

**BİR GAZ TÜRBİNLİ MOTOR FAN DİSKİNDE
YORULMA KAYNAKLI ÇATLAK İLERLEMESİNİN
İNCELENMESİ**

Ercan ARICAN
Yüksek Lisans Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Eylül 2006

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ercan ARICAN'ın “Bir Gaz Türbinli Motor Fan Diskinde Yorulma Kaynaklı Çatlak İlerlemesinin İncelenmesi” başlıklı **Sivil Havacılık** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 07.09.2006 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. MUSTAFA CAVCAR
Üye	: Yard. Doç. Dr. DİLEK TURAN
Üye	: Yard. Doç. Dr. Ender GEREDE

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR GAZ TÜRBİNLİ MOTOR FAN DİSKİNDE YORULMA KAYNAKLI ÇATLAK İLERLEMESİNİN İNCELENMESİ

Ercan ARICAN

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa CAVCAR
2006, 98 sayfa

Bu tezde bir gaz türbinli motorun titanyum alaşımlı malzemeden imal edilmesi öngörülen fan diskinin bilgisayar ortamında modellenerek yapısında oluşması muhtemel yorulma kaynaklı kritik çatlakların ilerleme analizi yapılmıştır. Unigraphics çizim programı kullanılarak bilgisayar ortamında model oluşturulmuş, oluşturulan bu model önce ANSYS programına aktarılarak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal gerilme analizi yapılmıştır. Daha sonra FRANC3D programına aktarılan modelin yine yapısal analizi bu sefer sınır elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler doğrultusunda disk yapısına üç boyutlu çatlak yerleştirilmiştir. FRANC3D programında mevcut yük çevrimleri altında ilerletilerek çatlağın yapı ve malzeme durumuna etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda yapılan yapısal analizlerin sonuçları, yapı üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımları biçiminde gösterilmiştir. Çatlak ilerleme ve ömür hesapları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapısal Çatlaklar, Kırılma Mekaniği, Yapısal Analiz,
Yorulma, Gaz Türbinli Motor Fan Diski

ABSTRACT

Master of Science Thesis

FATIGUE CRACK GROWTH ANALYSIS OF A GAS TURBINE ENGINE FAN DISK

Ercan ARICAN

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Aviation Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Mustafa CAVCAR
2006, 98 pages**

In this thesis, the fatigue crack growth analysis of a gas turbine engine fan disk is performed using computer programs. Titanium alloy is considered to be used as the material of the disk. Model geometry is prepared in Unigraphics computer aided design (CAD) program. At first, the model is imported to ANSYS finite element analysis code and the linear structural stress analysis is performed. Afterwards, CAD model is imported to FRANC3D program and structural analysis of disk is repeated with boundary element solution. According to results of these analyses, in FRANC3D program a 3D crack is added to disk structure. By propagating this crack under current loading cycles and boundary conditions; the effects of crack in the structure and material is investigated. The results of structural and fractural analysis are presented by crack propagation graphics, stress and displacement distributions. Crack propagation and life estimation calculations are also presented in this thesis.

Keywords: Structural Crack Propagation, Fracture Mechanics, Structural Analysis, Fatigue, Gas Turbine Engine Fan Disk

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SEMBOLLER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KIRILMA MEKANIĞI	3
2.1. Kırılma Tanımı ve Kırılma Kontrolü	3
2.1.1. Kırılma tanımı	3
2.1.2. Kırılma kontrolü	3
2.1.3. Neden Kırılma Mekaniği Gereklidir?	5
2.2. Metallerde Çatlak İlerleme ve Kırılma Mekanizması	10
2.2.1. Çatlak İlerleme Mekanizması.....	10
2.2.2. Kırılma Şekilleri.....	12
2.2.2.1 Yarıлма kırılması	12
2.2.2.2 Sünek kopma	13
2.2.2.3 Taneler arası kırılma (İntergranüler kırılma)	15
2.3. Çatlak ve Çentik Etkisi	15
2.3.1. Malzeme içerisindeki yük akışı çizgileri ve gerilme yığılması.....	16
2.3.2. Gerilme yığılma faktörü.....	19
2.4. Yüklemeler ve Kırılma Modları	21
2.5. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği.....	23
2.5.1. Çatlak Ucu Gerilmesi.....	25
2.5.2. Gerilme Şiddeti Faktörünün Genel Hali	28
2.5.3. Kırılma Tokluğu	30
2.5.4. Çatlak Ucu Plastik Deformasyonu	31
2.6. Çatlak İlerlemesi	34
2.6.1. Çatlak ilerleme mekanizması temel denklemleri.....	34
2.6.2. Çatlak İlerleme Denklemleri İntegralleri	39

	<u>Sayfa</u>
2.6.3. Yük spektrumu.....	41
2.6.4. Çatlak İlerleme Hesabına Tünel Etkisi.....	42
2.6.5. Çatlak ilerleme Oranını Etkileyen Faktörler	42
2.6.5.1 Malzeme kalınlığı etkisi	43
2.6.5.2 Gerilme oranı etkisi	43
2.6.5.3 Sıcaklık.....	44
2.6.5.4 Çevre.....	45
2.6.5.5 Çatlak oryantasyonu.....	46
2.6.5.6 Periyodik yük frekansı	48
2.6.5.7 Farklı tedarikçiler	48
2.6.6. Çatlak açıklığı kapanması.....	49
2.6.7. Çatlak ilerleme gecikmesi.....	51
3. FRANC3D PROGRAMI	53
3.1. Topoloji.....	54
3.2. Topolojiden Ayrılmış Geometri.....	55
3.3. Radyal Kenar Topolojik Veri Yapısı	56
3.4. Model Özelliklerinin Topolojik Elemanlarla İlişkilendirilmesi.....	57
3.5. Topolojik Modellerin Hiyerarşisi	57
3.6. Çatlakların ve Çatlak İlerlemesinin Topolojik Temsili	59
3.7. Çatlak İlerlemesinin Topolojik Gösterimi	60
3.8. Genel Amaçlı Yırtılma Operatörleriyle Çatlak İlerlemesi	62
3.9. Üç Boyutlu Çatlak İlerleme Tekniği	62
4. ÇATLAK İLERLEME ÖRNEĞİ	65
4.1. Problemin Tanımı.....	65
4.2. Yöntem.....	67
4.3. Analiz Sonuçları	78
4.3.1. ANSYS analizi sonuçları.....	78
4.3.2. FRANC3D Analizi Sonuçları	82
5. YORUM.....	94
KAYNAKLAR.....	97
Ek-1 Birim Dönüşüm Tablosu	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
1.1. (a) Temel mukavemet yaklaşımı (b) Kırılma mekaniği üçgeni	2
2.1. Yapısal çatlak örneği	3
2.2. Problemin kırılma mekaniği formülleriyle çözülebilmesi için gerekli veriler	6
2.3. Çatlak boyunun mukavemete etkisi grafiği	8
2.4. Çatlak boyunun zamana göre değişimi grafiği	10
2.5. Çatlak ucu ilerleme mekanizması	11
2.6. Yorulma Çizgileri	12
2.7. Yarılma Mekanizması	13
2.8. Sünek Kopma: Alüminyum alaşımda yapı içerisindeki boşlukların çatlak ucunda birleşerek ilerlemesi	14
2.9. Paralel Çubuk Örneği	16
2.10. Boylu boyunca kaynaklı paralel çubuk örneği	17
2.11. Yük akış çizgileri	18
2.12. Yük akış çizgilerine çentik etkisi	19
2.13. Eliptik çentikte (a) Yüksek gerilme yığılması (b) Düşük gerilme yığılması (c) Gerilmesiz çatlak yüzeyleri.....	21
2.14. Kırılma modları	22
2.15. Kırılma Mekaniği Bölümleri	23
2.16. Kartezyen koordinat sisteminde çatlak ucu gerilmeleri.....	25
2.17. Belirsiz (a) ve belirli (b) genişlikli levhalarda çatlak	27
2.18. Belirli genişlikli levha içerisinde orta çatlak geometri faktörü	29
2.19. Belirli genişlikli levha içerisinde kenar çatlak geometri faktörü	30
2.20. Belirli genişlikli levha içerisinde çift kenar çatlak geometri faktörü.....	30
2.21. Çatlak ucu gerilme süperpozisyonu.....	32
2.22. Çatlak ucu gerilme dağılımı (a) Düzlem gerilme (b) Düzlem gerilme	33
2.23. Çatlak ilerlemesinin gerilme oranı (R) ile değişimi	36
2.24. Forman ve Düzeltilmiş Forman Denklemi için çatlak ilerleme grafiği.....	37
2.25. Tipik bir $da/dN - \Delta K$ eğrisi örneği	38
2.26. Sabit genlikli yük spektrumu	41
2.27. Tünel etkisinin çatlak ucu ilerleme dağılımına etkisi.....	42

Sayfa

2.28. Çatlak ilerlemesine kalınlık etkisi	43
2.29. Gerilme oranı artışına göre çatlak boyu-çevrim sayısı grafiği	43
2.30. Gerilme oranı değişimine göre logaritmik ilerleme hızı	44
2.31. Çatlak ilerlemesine sıcaklık etkisi	44
2.32. Nemli havanın çatlak ilerleme oranına etkisi	45
2.33. Farklı çevre şartlarının çatlak ilerlemesine etkisi	45
2.34. Korozyonun çatlak ilerleme oranına etkisi	46
2.35. Sac malzemede çatlak oryantasyonları	46
2.36. Çatlak oryantasyonunun çatlak ilerlemesine etkisi (Sac Malzeme Şekil 2.35'teki yönler için)	47
2.37. Frekansın çatlak ilerleme hızına etkisi (Kuru Argon ve Su)	48
2.38. Farklı malzeme imalatçıların aynı malzeme için çatlak ilerlemesine etkileri	48
2.39. Çatlak açıklığı kapanma şekilleri	49
2.40. Yükleme çevrimi ve Efektif gerilme şiddeti aralığı	50
2.41. Aşırı yük öncesi ve sonrasında çatlak ucu kalıntı gerilme dağılımları (a) Aşırı yük öncesi normal yükleme durumu (b) Aşırı yükleme durumu (c) Aşırı yük sonrası durum	52
3.1. FRANC 3D çatlak ilerleme süreçleri	54
3.2. Manifold dışı koşulda radyal kenar yapısı	56
3.3. Sınırlandırılmış model hiyerarşisi a) geometri b) hacim ayrılma c) yüzey ayrılma d) kenar bölünme e) ayrıklaştırmayla ağ yapı oluşturma	58
3.4. Bir iç çatlak ilerledikçe yüzey çatlak ve son olarak süreksizlik haline gelmesi.....	59
3.5. Kapalı bir çevrim oluşturan yüzey çatlakını gösteren çevresel olarak çatlamış bir silindir.....	60
3.6. Manifold yırtılma operatörü kullanarak parça boyunca yüzey çatlak oluşturmak için süregelen manifold işlemleri.....	61
3.7. Çatlak önünden belirli uzaklıktaki çatlak yer değiştirmeleri (Çatlak önü gerilme şiddeti faktörleriyle direk olarak ilişkilidir.).....	63
3.8. Çatlak önündeki noktalar kullanılarak üç boyutlu bir çatlak, çatlak önünün normaline doğrultusundaki düzlemde iki boyutlu yaklaşımla ilerletilmesi [6]	64

Sayfa

4.1. Gaz türbinli bir motor çeşidi olan turbofan motorun genel şekli	66
4.2. Kırılma kuyruğu şeklindeki pala yuvası ve montajı	66
4.3. Fan diski üç boyutlu modeli (Unigraphics Programında)	67
4.4. Fan diski modelinin 48 eş parçasından bir tanesi (Unigraphics programında 7.5 derece ile silindirik koordinatlarda kesilmiştir)	68
4.5. ANSYS programına aktarılmış yalın model	68
4.6. Yalın model kullanılarak oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli	69
4.7. Sınır şartları ve yükler uygulanmış modelin çizgilerle gösterimi	70
4.8. Fan diski yuvasına uygulanan pala merkezci kuvveti	72
4.9. Sınır şartları ve yükler uygulanmış sonlu elemanlar modeli	73
4.10. Radyal kenar veri tabanı	74
4.11. Sınır elemanlardan oluşan ağ modeli	74
4.12. Simetri yüzeylerine sınır şartı uygulama menüsü	75
4.13. Pala temas yüzeylerine yayılı yük uygulama menüsü	75
4.14. Modele açısal hız uygulama menüsü	76
4.15. Analiz için hazır model	76
4.16. Yapısına çatlak yerleştirilmiş model	77
4.17. Çatlak ve civarında oluşturulan sık ağ yapısı	77
4.18. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı	79
4.19. Von Misses Gerilme Dağılımı (Deformasyon öncesi kenarları ile)	79
4.20. Radyal yönde yer değiştirme dağılımı	80
4.21. Teğetsel yer değiştirme dağılımı	80
4.22. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı (pala yuvası yakın görüntüsü)	81
4.23. 1nci asal gerime (σ_1) dağılımı (tüm disk görüntüsü)	81
4.24. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı	82
4.25. Von Misses Gerilme Dağılımı	83
4.26. y-ekseni doğrultusundaki (yaklaşık radyal) yer değiştirme dağılımı	83
4.27. x-ekseni (yaklaşık eksi teğetsel) doğrultusundaki yer değiştirme dağılımı	84
4.28. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı (pala yuvası yakın görüntüsü)	84
4.29. Çatlak yerleştirilmesine karar verilen düğüm noktasının koordinatları ve asal çekme gerilmesi doğrultusu	85
4.30. Normalize edilmiş çatlak önü mesafesi	86

Sayfa

4.31. Farklı kırılma modları için gerilme şiddeti faktörlerinin çatlak önü boyunca düzeltilmiş uzaklıkla değişim grafiği	86
4.32. 5inci adım sonundaki görüntü (Çatlak boyu $a=0.206238$ inç).....	87
4.33. 10uncu adım sonundaki çatlak görüntüsü (Çatlak boyu $a=0.501507$ inç)87	
4.34. 15inci adım sonundaki çatlak görüntüsü (Çatlak boyu $a=0.762367$ inç)..	88
4.35. 14üncü adım sonunda çatlak bölgesindeki gerilme dağılımı (σ_1).....	88
4.36. Gerilme şiddeti faktörünün çatlak boyuna göre değişimi	89
4.37. FRANC3D programı yorulma hesabı verileri giriş menüsü	91
4.38. FRANC3D programındaki seçilen titanyum alaşımının malzeme bilgi menüsü	92
4.39. Çatlak ilerleme grafiği.....	93
5.1. Benzer fan diskinde muhtemel çatlak oluşma bölgeleri.....	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Malzemelere göre kırılma davranış tipleri	24
--	----

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

- σ_Y : Akma gerilmesi
 σ_x : x eksenini doğrultusundaki gerilme
 σ_y : y eksenini doğrultusundaki gerilme
 σ_z : z eksenini doğrultusundaki gerilme
 σ_1 : Asal gerilmelerden birincisi
 σ_{vm} : Von Misses Gerilmesi
K : Gerilme Şiddeti Faktörü
 K_t : Gerilme Yığılma Faktörü
 K_c : Kırılma Tokluğu
P : Yük, Kuvvet
LEFM : Lineer Elastik Kırılma Mekaniği
k : Emniyet Katsayısı
a : Yüzey çatlak boyunun yarısı, köşe çatlak tek boyutu
c : Köşe çatlak diğer boyutu
 β : Çatlak geometrisi faktörü
W : Çatlak ilerlediği cismin genişliği
L : Çatlak ilerlediği cismin boyu
 F_{ty} : Akma Mukavemeti
N : Yük çevrim sayısı
R : Gerilme Oranı
 ρ : Eliptik çatlaktaki çatlak yarıçapı

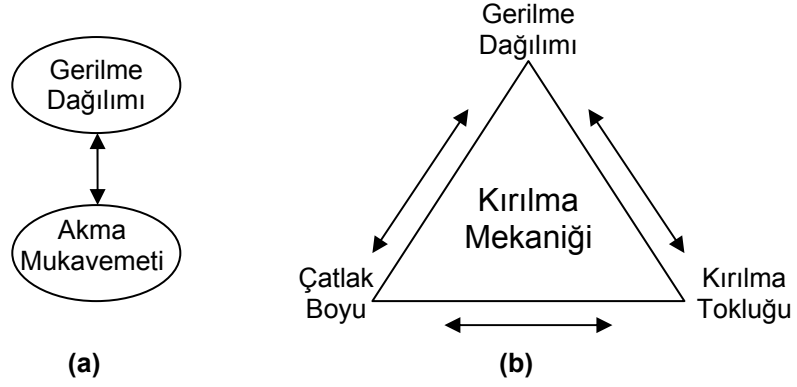
1. GİRİŞ

Üretim süreçlerinden kaynaklanan nedenlerden dolayı yapısal parçalarda hasar ve çatlaklar kaçınılmazdır. Bu gibi çatlak ve hasarlar daha yük uygulanmadan önce yapıda bulunurlar. Bu durumda çatlak ilerlemesi yükün uygulanmasıyla birlikte hemen başlayabilir, dolayısıyla bu gibi parçaların toplam yorulma ömrü Kırılma Mekanîği yaklaşımlarıyla hesaplanabilir.

Kırılma mekanîği, malzeme bünyesindeki çatlak ve çatlak benzeri hataları inceleyerek, çatlakların büyüme eğilim ve davranışlarını belirlemek ya da tahmin etmek için kullanılır. Bu büyüme kararlı (yavaş ve güvenli) ya da kararsız (ani ve hasar veren) bir davranış gösterebilir. Sünek malzemeler kararlı davranırken, kırılma malzemeler kararsız davranırlar.

Yorulma, malzemelerde hasarla sonuçlanan bir çatlak ilerleme mekanizmasıdır. Yorulma kaynaklı hasar tahmini yapılırken S-N (Mukavemet-Çevrim Sayısı) grafikleri kullanılır. Bu hasarı daha güvenli bir şekilde tahmin etmek için, çatlak ilerleme mekanizmasını, bu mekanizmayı etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin birbiriyle olan etkileşimlerini anlamak ve matematiksel olarak formüle etmek gerekir.

Temel mukavemet yaklaşımında, yapıya uygulanan yükler sonucu oluşan gerilme dağılımıyla malzemenin akma mukavemeti karşılaştırılır. Kırılma göz önüne alınarak yapılan yapısal tasarımlarda ise, üç temel kritik değişken incelenmelidir. Bu önemli değişkenler, gerilme, çatlak boyu ve kırılma tokluğudur. Kırılma mekanîği bu değişkenler arasında sayısal bir ilişki kurar. Çoğu zaman bu değişkenlerden birisini hesaplamak için diğer iki değişkenin değerine ihtiyaç vardır. Bu değişkenlerin oluşturduğu üçgene "Kırılma Mekanîği Üçgeni" denir (Şekil 1.1) [2].



Şekil 1.1. (a) Temel mukavemet yaklaşımı (b) Kırılma mekaniği üçgeni [2]

Çatlak ilerlemesinin bilgisayar ortamında simülasyonu farklı yazılımlarla yapılabilmektedir. Böylece çatlakın oluşabileceği muhtemel bölgeler belirlenebilir ve buradaki çatlakların ilerlemesi incelenebilir. Çatlak ilerlemesi simülasyonu için ikinci kademe bir fan diski üzerindeki gerilme ve çatlak analizi yapılmıştır. Öncelikle diskin bilgisayar ortamındaki üç boyutlu modeli, Unigraphics (UG) paket programı kullanılarak çizilmiş, model mümkün olan birim parçaya bölünüp, sadeleştirilerek yalın model elde edilmiştir. Birim model kullanılarak önce ANSYS paket programında yapısal analiz yapılmış, daha sonra aynı analiz FRANC 3D programında da yapılmıştır. Bu iki program sonuçları karşılaştırıldıktan sonra, FRANC 3D programında elde edilen analiz sonuçları kullanılarak yine aynı programda çatlak ilerleme analizi yapılmıştır.

2. KIRILMA MEKANIĞI

2.1. Kırılma Tanımı ve Kırılma Kontrolü

2.1.1. Kırılma tanımı

Malzemelerin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması olayına “kırılma” denir. Kırılmanın karakteri malzemedan malzemeye değişir ve uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma Mekanizması genel olarak üç aşamadan oluşur. Birinci aşama çatlak oluşması, ikinci aşama ise oluşan çatlağın ilerlemesi ve üçüncüsü ise parçanın kırılmasıdır.

Kırılma, genellikle yapısında Şekil 2.1’deki gibi bir çatlak ya da çentik bulunduran parçaya, sürekli ve tekrar eden yüklemeler sonucunda oluşur. Kırılma ayrıca çok nadir de olsa hasarsız malzeme üzerinde öngörölmeyen aşırı yük durumlarında da oluşabilmektedir.



Şekil 2.1. Yapısal çatlak örneği

2.1.2. Kırılma kontrolü

Malzemeler genellikle servis ömürleri boyunca sürekli ve tekrar eden yüklere maruz kalırlar. Bununla birlikte yapılarında imalat ve proseslerden

kaynaklı mikro çatlak ve çentikler barındırırlar. Bu nedenle aşırı yük sayılmayan normal servis yüklerinde dahi malzemeler, çentik ve çatlak nedeniyle oluşan gerilme yığılması (Stress Concentration) sonucunda çatlağın ilerlemesi ve büyümesi sonucu hasara uğrayabilmektedir [1].

Malzemelerin kırılmasının kontrol altına alınması gereksinimi, elim sonuçlar doğuran kırılma hataları oluşturmadan mekanizmaların güvenli çalışmasının sağlanması amacıyla doğmuştur. Bu konudaki araştırmalar tasarım, metalürji, imalat ve bakım mühendislerinin ortak gereksinimleri ve gayretleriyle geliştirilmektedir. Kırılmanın kontrol altına alınması ancak malzemenin servis ömrü boyunca planlı bir kırılmanın sağlanmasıyla sağlanabilir.

Malzemedeki çatlak ya da kusurlar yapının mukavemetinin azalmasına neden olur. Çatlak ilerlemesi sırasında yapının mukavemeti servis yüklerini taşıyamayınca kadar azalır ve sonunda kırılma meydana gelir. Kırılmanın önlenmesi ancak yapının mukavemetinin güvenli değerlerin üzerinde tutulması sağlanabilir. Yapı üzerindeki çatlaklar yapının mukavemetini kabul edilebilir sınırların altına düşürecek boyuta gelmeden kontrol altına alınmalıdır. Bu kritik çatlak boyunun bilinmesi için, malzemelerin yapısal mukavemetiyle çatlak boyutu arasında bir bağıntı hesaplanması gerekir. Ayrıca malzeme ömürlerinin belirlenmesi için de çatlak ilerleme hızının hesaplanması ve çatlağın kritik boya ulaşma zamanının belirlenmesi gerekir [1].

Bütün bu hesapların yapılması için çatlakların oluşması muhtemel bölgelerin yapı üzerinde belirlenmesi gerekir. Daha sonra çatlak ilerleme zamanı ve çatlak boyuna bağlı yapı mukavemetiyle ilgili analiz yapılır. Bu analize "Hasar Tolerans Analizi" denir [1].

Hasar toleransını üç ana safha olarak değerlendirebiliriz:

- Data toplama,
- Hasar tolerans analizi
- Kontrol gereklilikleri.

Hasar toleransı yapıların çatlak ve çentiklerle de güvenli olarak gerekli operasyonları sürdürmesi amaçlanmıştır. Çatlak ve çentiklerin yapı içerisinde temizlenmesi tamir ya da çatlak parçanın değiştirilmesi şeklinde olmaktadır.

Tasarım aşamasında çatlak direnci daha yüksek malzeme kullanarak ya da yapısal tasarımı değiştirerek, servis ömrü boyunca olası kritik çatlakların önüne geçmek mümkündür. Ayrıca kritik bölgelere periyodik kontroller

yapılarak, tespit edilen çatlaklar tamir edilebilir ya da üzerinde çatlak tespit edilen parçalar değiştirilebilir.

Hasar Tolerans analizi kullanarak çatlak ilerleme zamanı ve buna bağlı kontrol (test) periyotları oluşturulabilir. Bu kontroller birçok tahribatsız test teknikleri kullanarak yapılır. Kısacası, Hasar Tolerans Tasarımında bir denetim programıyla kontrol altında tutulabildiği takdirde, hasara izin verilir.

Kırılma kontrolü hasar tolerans analizi, malzeme seçimi, tasarım geliştirme ve sonrasında kontrol, bakım ve revizyon zamanlamasını kapsar. Bu kapsam yapının kritikliğine göre daraltılıp, genişletilebilir. Örneğin uçağın kırılma dayanımı söz konusu olduğunda bütün bu safhalara ihtiyaç olacaktır.

Hasar tolerans analizi ve sonuçları kırılma kontrol planlarının temelini oluşturur. Hasar tolerans analizinde kullanılan matematiksel araca “Kırılma Mekaniği” denir. Kırılma mekaniği çatlak oluşumu, ilerlemesi ve malzeme mukavemetine etkileriyle ilgili konu ve eşitlikleri inceler [1].

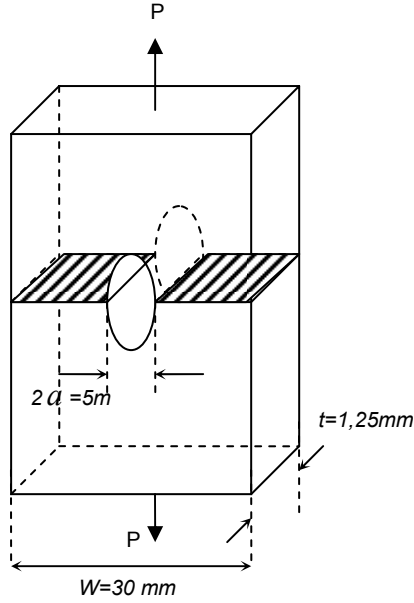
2.1.3. Neden Kırılma Mekaniği Gereklidir?

Bilinen yöntemlerle yapılan bazı yapısal analiz sonuçları ile yapılan testlerden elde edilen sonuçlar birbiriyle çelişmektedir. Bunun nedeni malzemelerin yapılarında bulunan mikro çatlakların yapı mukavemetine etkisinden kaynaklanmaktadır.

Bu etkiye örnek olarak; 7075-T6 Alüminyum alaşımı malzemedan imal edilmiş Şekil 2.2 deki gibi bir levha düşünülebilir. Eksenel olarak çekme yüküne maruz kalan bu levhanın taşıyabileceği maksimum yükü, bilinen (2.1) basit mukavemet formülüyle ve (2.2), (2.3) kırılma mekaniği formülleriyle ayrı ayrı hesaplanıp ve sonuçları karşılaştırabilir.

Kırılma mekaniğini hesaba katmadan, eksenel olarak çekme yüküne maruz kalan bu levhanın taşıyabileceği maksimum yük; (2.1) deki basit mukavemet formülüyle hesaplanır.

Yapıdaki maksimum gerilme akma gerilmesi değerine ulaştığında, plastik şekil değiştirme başlayacaktır. Bu değere göre maksimum taşınan yük bulunur.



Şekil 2.2. Eksenel çekme kuvvetine maruz bırakılan ve merkezinde delik içeren levha

$$\sigma_y = 517 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

$$517 \times 10^6 = \frac{P}{(30 - 5) \times 10^{-3} \times 1.25 \times 10^{-3}}$$

$$\blacktriangleright P_{\max} = 16.16 \text{ kN}$$

Kırılma mekaniğini göz önüne alındığında, aynı levha üzerinde 5 mm uzunluğunda bir çatlak olduğu düşünülerek hesap yapılır. β çatlak geometri katsayısı, ΔK_c eşik (kritik) gerilme şiddeti faktörü, σ_c kritik gerilme değeri olmak üzere levhanın taşıyabileceği maksimum yük (2.2) ve (2.3) ile bulunur.

$$\Delta K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

$$\beta = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \quad (2.3)$$

$$\rightarrow \beta \approx 1.017$$

$$\Delta K_c = 29.66 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \quad \rightarrow \quad \sigma_c = 329 \text{ MPa} \quad \sigma = \frac{P}{A}$$

$$329 \times 10^6 = \frac{P}{30 \times 10^{-3} \times 1.25 \times 10^{-3}}$$

$$\blacktriangleright P_{\max} = 12.3 \text{ kN}$$

Eksenel yükleme altında bilinen formülle gerilme hesabı yaptığımızda elde ettiğimiz maksimum kabul edilebilir yük 16.16 kN hesaplanırken, bu değer Kırılma Mekaniği hesaplamalarıyla 12.3 kN bulunmaktadır. Kırılma mekaniği hesaplamalarıyla elde edilen değerlerin testlerle elde edilen değerlere daha yakın çıktığının bilindiğine göre, bilinen yöntemlerle hesap yapmanın çok farklı ve yanlış sonuçlar ortaya çıkaracağı aşikârdır.

Kırılma mekaniği daha önce cevaplanamamış birçok soruya mantıklı cevaplar bulabilmiştir. Tabii ki mükemmel değildir. Fakat yaklaşık, mantıklı cevaplar hiç yoktan iyidir. Bu nedenle bu bilim dalı son yıllarda pratik bir mühendislik aracı olarak gelişmiştir. Tam olarak yeterli olduğu söylenemese de kullanılan diğer mühendislik hesapları gibi yaklaşık çözümler verebilmektedir. Bu nedenle hasar tolerans analizi de diğer mühendislik yaklaşımları gibi dikkatli ve emniyetli kullanılmalıdır. Bu analizin doğruluğu daha çok malzeme bilgisinin ve tahmini yük / gerilmelerin doğruluğuna bağlıdır.

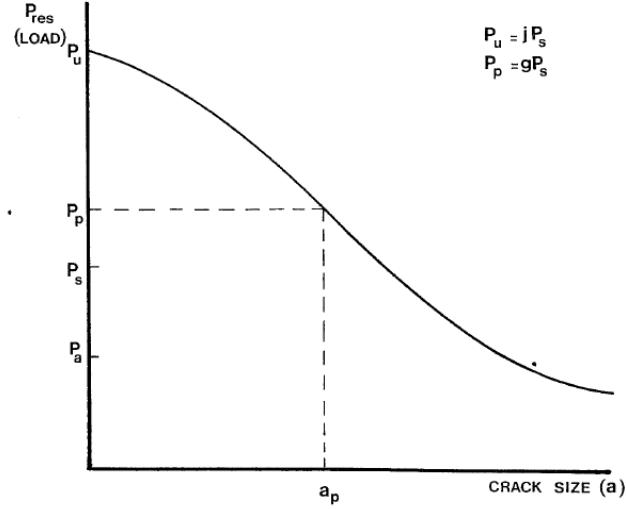
Kırılma kontrol planlarının hazırlanmasında çatlak yapısı mukavemetine etkilerinin ve çatlak kritik boya ulaşıncaya kadar geçen sürenin elde edilmesi gerekmektedir. Yani Hasar Tolerans Analizi'nin iki amacı vardır:

- Çatlakların mukavemete etkisi
- Çatlak büyümesinin/ilerlemesinin zamana bağlı fonksiyonu.

Şekil 2.3'deki grafikte çatlak boyunun mukavemete etkisi gösterilmiştir. Kırılma mekaniğinde çatlak boyu genellikle "a" ile gösterilir. Yukarıdaki grafikte malzemenin kırılmadan önce taşıyabileceği yük (P-Kırılma Yüğü), mukavemet terimini ifade etmektedir. Kullanılmamış bir parçada belirgin çatlakların olmadığı bir an, farz edelim. Çatlak boyunun sıfır kabul edildiği bu anda yapının mukavemeti, en yüksek tasarım yüğü (mukavemeti) ile ifade edilir ki, grafikte P_u ile gösterilmektedir [1].

Malzeme, öngörülen kritik yüklerde kopacak şekilde tasarlanır, eğer malzeme bu yüklerde kopmazsa yapı gereksiz mukavim tasarlanmış (over-design) olur. Bununla birlikte her tasarımda bir emniyet faktörü (safety factor) kullanılır. Bu emniyet katsayısı farklı şekillerde tasarıma uygulanabilir bu sonucu değiştirmez. Teknolojinin bazı alanlarında emniyet katsayısı yüklerle uygulanır.

$$P_u = k.P_s \quad (2.4)$$



Şekil 2.3. Çatlak boyunun mukavemete etkisi grafiği [1]

Örneğin yapıya servis süresince etkiyecek azami yük P_s olsun. Yapı P_u yüküne göre tasarlanır. Burada k emniyet katsayısıdır. Yapı P_u yükü uygulandığında meydana gelecek gerilmenin, malzeme mukavemetine (ultimate tensile strength) eşit ya da büyük olması esasına göre şekillendirilir. Ayrıca gerilme (allowable stress) değerlerine de emniyet katsayısı uygulanabilir. Gerilme ile yük orantılı olduğundan aynı katsayı kullanılabilir. Plastisite düşünüldüğünde bu orantı bozulacaktır. Fakat plastisite gelelikle çentikler ve gerilme yığılması olan küçük alanlarla sınırlı olduğundan, buraların haricinde yaklaşık olarak doğrudur. Bu emniyet katsayısı uçaklar için genellikle 1,5 olarak kullanılır [1].

Değişen yüklere maruz kalan yapılarda yük genellikle maksimum servis yükünden çok daha küçüktür. Sadece ekstrem durumlarda yapı maksimum servis yüküne maruz kalır. Bazı yapılarda ise, (örneğin döner parçalar, basınçlı kaplar) yapı genelde maksimum yüke yakın yüklere maruz kalırlar.

Ham bir malzemenin mukavemeti P_u ve emniyet faktörü k olsun. Malzemenin mukavemeti belirli bir sayı olacağından yük bu değere ulaştığında yapı hasara uğrayacaktır. Yani malzemenin ham haldeyken bile kırılma ihtimali vardır. Fakat tecrübî olarak bu ihtimalin düşük olduğu bilinir. Yapı içerisinde çatlakların varlığı bilindiğine göre malzeme mukavemeti P_u 'den küçük olacaktır ki bu kalan mukavemete "Kalıntı Mukavemeti" (P_{res} –Residual Strength) denir.

Burada oluşan $j = P_{res} / P_s$ emniyet katsayısı k 'den küçüktür. Bu iki çatlak ihtimaliyle birlikte kırılma hatasının oluşma ihtimali artacaktır [1].

Kırılma yapının iki ya da daha çok parçalara ayrılmasıyla sonuçlanan elim bir olaydır. $P = P_{res}$ servis yükü söz konusu olduğunda kırılma meydana gelecektir. Bu durumda kırılma süreci başlangıçta yavaş ve kararlı olabilir. Bu süreçte çatlak ilerler fakat yapı bütünlüğünü korur. İlerledikçe çatlak kararsız hale gelir ve yapı iki ya da fazla parçaya ayrılır. Tüm bu süreçler bir saniyeden kısa bir zamanda gerçekleşebilir. Fakat servis yükleri P_{res} den küçükse, çatlak, çatlak mekanizmasıyla yorulma, sürünme gibi yavaş ilerleyecektir [1].

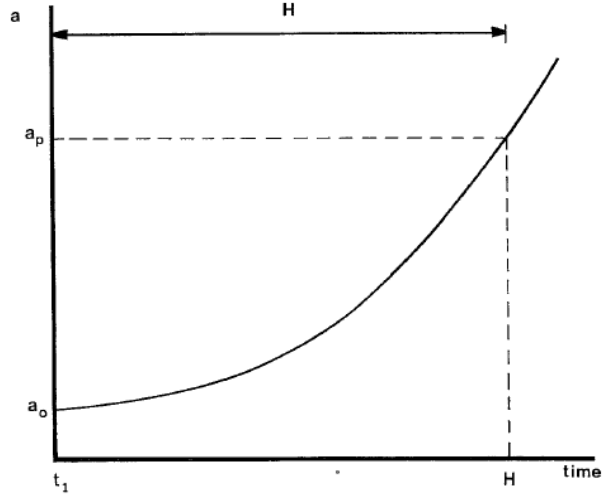
Çatlak ilerlemesiyle malzemenin kırılma ihtimali yükselecektir. Eğer bakım ve kontrolde yapıya müdahale edilmezse kalıntı mukavemet servis yüklerine eşit hale gelecek (yani emniyet katsayısı 1 olacak) ve yapı normal servis yükünde kırılacaktır. İşte bu nedenle malzeme içerisindeki çatlaklar kritik hale gelmeden yapıya müdahale edilmeli ya da parçalar değiştirilmelidir.

Tasarım aşamasında belirlenen emniyet faktörleri mühendislik şirketleri (ASME) ya da otoriteler tarafından tanımlanan kurallar ve yönetmeliklerle belirlenmiştir [1].

Hasar tolerans analizinde kabul edilebilir en büyük çatlak boyunu hesaplamak için önce kalıntı mukavemet diyagramlarının hazırlanması gerekir. Normal servis yükü şartlarında çatlak ilerlemesi yorulma, gerilme korozyonu ya da sürünme sonucunda meydana gelir.

Çatlak, a_0 boyundan başlayarak zamanla ilerler. Şekil 2.3'deki kabul edilebilir çatlak boyu (a_p) Şekil 2.4'teki eğride de çizebilir. Bu değere karşı gelen H zamanı bulunabilir ki; bu zaman emniyetli yükleme zamanıdır. Bu zaman dolmadan önce parçanın değiştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden kontroller çatlağın kritik boya geldiği H zamanından daha kısa süre içerisinde tekrar edilmelidir. Genellikle yarısı olarak alınır. (H/2) [1].

Kalıntı mukavemeti (yükler) ve çatlak ilerlemesi grafikleri aslında sadece şekil olarak değil anlam olarak da farklıdır. Kırılma en son ve aniden gerçekleşen bir olayken, çatlak ilerlemesi zamanla oluşur. Tabidir ki ikisinin mekanizmaları da farklıdır.



Şekil 2.4. Çatlak boyunun zamana göre değişimi grafiği [1]

Çatlak ilerleme mekanizmalarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Tekrarlı yüklerden kaynaklı yorulma
- Sürekli yüklemekten kaynaklı gerilme korozyonu
- Sürünme
- Hidrojen kaynaklı çatlak
- Sıvı metal kaynaklı çatlak

Kırılma ise metallerde, yarılmaya, sünek kopma ve taneler arası kırılma şeklinde meydana gelir.

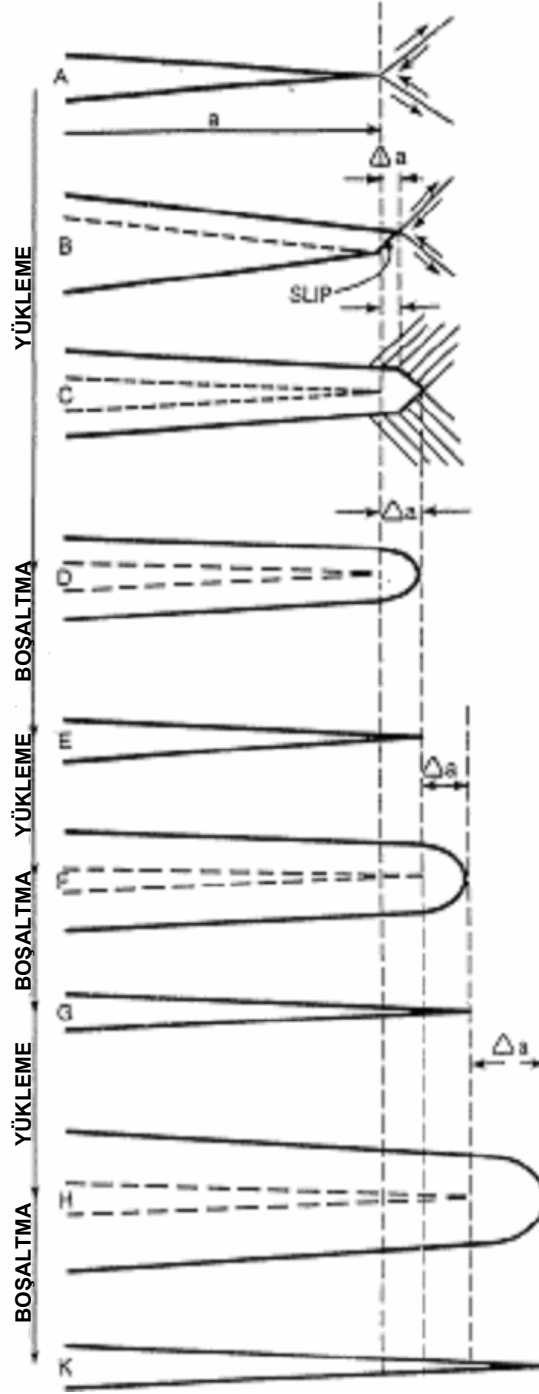
2.2. Metallerde Çatlak İlerleme ve Kırılma Mekanizması

2.2.1. Çatlak İlerleme Mekanizması

Düşük servis yüklerinde dahi çatlak ucu civarında malzemede gerilme yığılmasından kaynaklı plastik deformasyon olacaktır. Plastik deformasyon çatlak ucunda oluşan kayma gerilmeleri sonucunda oluşur. Devam eden kayma gerilmeleri sonucunda küt bir çatlak ucu meydana gelir. Yüklemenin kaldırılması sırasında bu uç tekrar keskin bir hal alır [2].

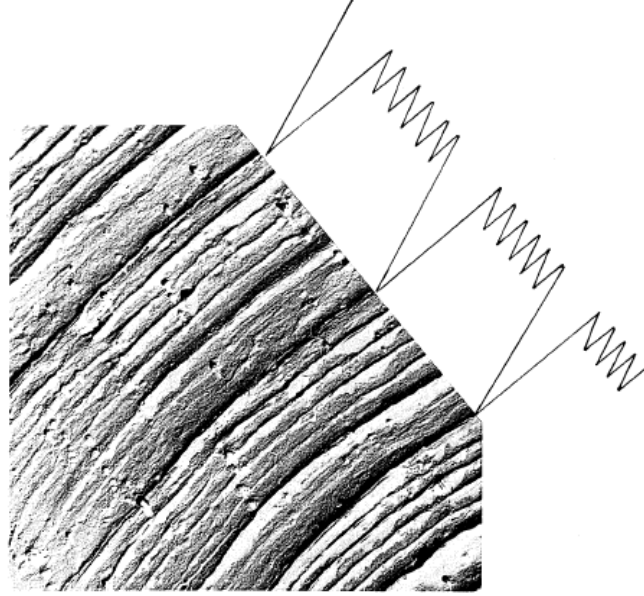
Normal mekanizma ilerlemesinde aslında yükün kaldırılması ilerleyen Δa çatlak boyunun geri kapanmasına neden olacaktır. Fakat kayan düzlemler sonucu açılan malzeme yüzeyi oksitlenme sonucu geri kapanmamakta ve çatlak ilerlemektedir [3].

Diğer yükleme çevrimlerinde bu süreç tekrar etmekte ve çatlak ilerlemektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Çatlak ucu ilerleme mekanizması [1]

Çatlak ucunun tekrar eden kütleşip keskinleşme süreci sonucu oluşan izler çatlakın büyütme oranı yüksek bir elektron mikroskopunda gözlenmesine olanak tanır. Bu izlere yorulma çizgileri (fatigue striations) denir (Şekil 2.6) [1].



Şekil 2.6. Yorulma Çizgileri [1]

Gerilme korozyonu sonucu çatlak ilerlemesi de yavaş ilerleyen bir süreçtir. Çatlak uç bölgesinde korozif etki sonucu genellikle tane sınırları boyunca ilerler. Bu etki yüksek gerilme ve devam eden atomik düzensizlikler sonucu oluşur.

Sürünme çatlaklarının genel mekanizması ise, atomik boşlukların difüzyonu ve kümeleşen bu boşlukların malzeme içerisinde bir delik haline gelerek çatlak ucuyla birleşmesi şeklinde olur.

2.2.2. Kırılma Şekilleri

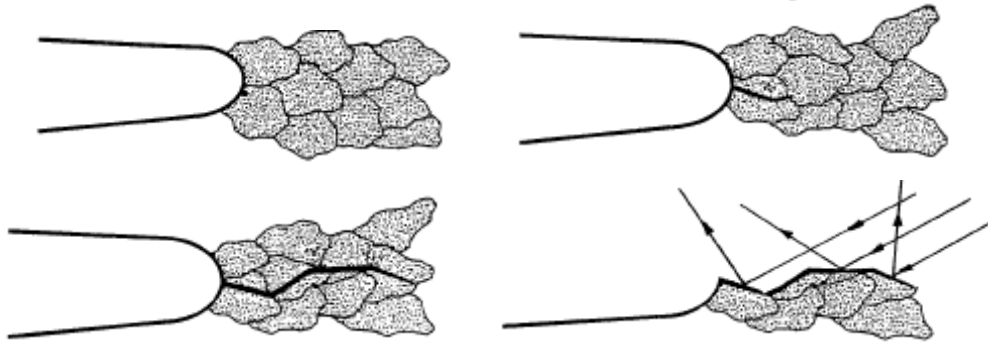
Mikroskopik açıdan incelendiğinde; malzemeyi meydana getiren bir tanenin kırılması, kristalografik düzlemler üzerinde veya kristalografik düzlemleri kesen atomlar arası bağın kopması yani atomlar arası kohezyon kuvvetinin sıfıra inmesi sonunda olur.

2.2.2.1 Yarılma kırılması

Kırılma, yarılma düzlemleri diye bilinen belirli kristalografik düzlemler boyunca meydana gelirse, buna yarılma kırılması denir. Yarılma ile oluşan

kırılma mekanizması farklı atomik düzlemlerin birbirinden ayrılması şeklinde meydana gelir. Yarıma düzlemleri en düşük yüzey enerjisine sahip düzlemlerdir. Bu tip kırılma, yarıma düzlemine dik normal gerilmelerin kritik bir değeri aşması ile yarıma düzlemine dik atom bağlarının koparılması sonucunda olur. Tek eksenli gerilme halinde çatlak çekme yönüne dik olarak ilerleme eğilimi gösterir, bu sebeple de yarıma kırılmaları düz bir görünüm gösterirler. Çok taneli malzemelerde, yarıma düzlemlerinin oryantasyonu her tanede farklı olup, bir taneden diğer taneye geçildikçe çekme doğrultusuna dik olmayacaktır. Dolayısıyla bir tane boyutundan daha büyük mesafelerde yarıma kırılması düz görünüm göstermeyecektir, tane değıştikçe yön değıştirecektir (Şekil 2.7) [2].

Malzemelerin gevrek kırılması, genellikle yarıma kırılması şeklinde olur. Yarıma kırılması granüler veya kristalimsi bir görünüşe sahiptir, çünkü bu tip kırılma her bir tane içerisindeki bir düzlemden meydana gelir. Ayrılma düzlemi tanecikler arasında farklılık göstereceğinden bu yüzeyler düşen ışıklar için iyi yansıtıcıdır. Bu da çatlakın yeni oluştuğunda parlak olmasını sağlar. Fakat sonra oksitlenme nedeniyle bu parlaklık gidecektir [1].



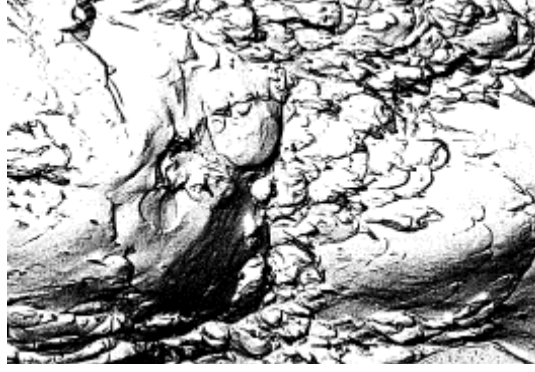
Şekil 2.7. Yarıma Mekanizması [1]

2.2.2.2 Sünek kopma

Diğer bir kırılma mekanizması da sünek kopmadır. Tüm yapısal malzemeler yapılarında kalıntılar ve parçacıklar barındırırlar. Bu parçacıklar genellikle alaşım elementlerin bileşikleridir. Bazı alaşım elementleri döküm ve işleme işlemleri için bazıları ise, özellikle malzemenin mukavemetini arttırmak

için kullanılırlar. Öncelikle malzemedeki nispeten büyük parçacıklar kırılarak çatlak ucunda boşluklar oluştururlar. Sayısız küçük parçacığın oluşturduğu boşlukların birleşmesiyle süreç kırılmayla sonuçlanır. Kırılma yüzeyi süreksizlikler nedeniyle ışığı absorbe eder ve mat gri olarak görünür (Şekil 2.8) [1].

Büyük parçacıkların yapı içerisinde oluşturdukları boşluklar ve küçüklerin birleşerek oluşturdukları elektron mikroskopuyla görülebilir. Bu büyük parçacıkların yapı içerisinden ayıklanması (örneğin ısıtma işlemi) alaşımın kırılma direncini arttıracaktır. Bununla birlikte alaşım oluşturma yapının mukavemetini güçlendirecektir, yani bütün parçacıklardan kurtulmak mümkün olmayacaktır.



Şekil 2.8. Sünek Kopma: Alüminyum alaşımında yapı içerisindeki boşlukların çatlak ucunda birleşerek ilerlemesi [1]

Kayma kırılması, kayma gerilmesinin kritik bir değeri aşması ile atom düzlemlerinin kayması sırasında atom bağlarının kopması suretiyle meydana gelir. Atom bağlarının kayma ile kopması sonucunda meydana gelen bu kırılma, bölgesel homojen olmayan plastik deformasyon işleminden ibarettir. Metalik malzemelerde plastik deformasyon, kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Bu düzlemlere kayma düzlemleri adı verilir. Metalik malzemelerde kayma çatlakları maksimum kayma gerilmesinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir. Çatlağın takip ettiği yol yükleme şekline, iç gerilmeler meydana getiren faktörlere ve matris yapısına bağlıdır. Bu tip kopma, çatlak ilerleyişi makroskobik olarak çekme yönüne dik olduğundan normal kopma veya kırık yüzeyi görünüşü lifli olduğundan lifli kırılma adını alır.

Mikroskopik olarak, çatlak çekme eksenini ile 45°'lik açı yapan düzlemlerde ilerleyerek kayma kırılmasını meydana getirmiştir.

2.2.2.3 Taneler arası kırılma (İntergranüler kırılma)

Çok taneli malzemelerde tane sınırlarındaki kohezyonun çeşitli sebeplerle az olması halinde, malzemenin kırılması tane sınırları yüzeyleri boyunca tanelerin birbirinden ayrılması şeklinde meydana gelir. Bu tip kırılmaya taneler arası kırılma veya intergranüler kırılma adı verilir. Ama genelde metaller tane sınırları boyunca kırılmazlar, sadece özel durumlarda çatlak oluşur ve tane sınırı boyunca ilerler [2].

İntergranüler kırılma için sadece tek bir mekanizma yoktur. Aşağıdaki durumlarda intergranüler kırılma gözlenir [2]:

- Gevrek fazın tane sınırında çökmesi
- Hidrojen gevrekleşmesi ve sıvı metal gevrekleşmesi
- Çevresel etkiyle çatlama
- İntergranüler korozyon
- Yüksek sıcaklıkta çatlama

2.3. Çatlak ve Çentik Etkisi

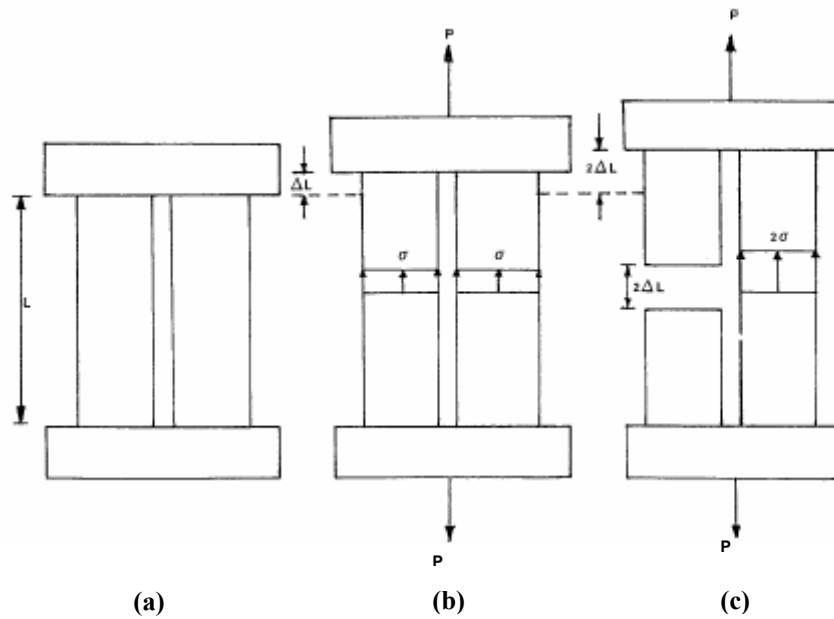
Hem Lineer Elastik hem de Elastoplastik Kırılma Mekaniğinde kırılma analizi çatlak ucu gerilme bölgesini temsil eden bir parametre kullanılarak yapılır. Elastik plastik kırılma mekaniğinde kullanılan değer gerilme enerjisi açığa çıkma oranını verir. Her iki kırılma mekaniğinde de plastik deformasyon tam anlamıyla değerlendirilemez. Kırılma mekaniği analizi plastik deformasyona sebep olacak gerilmeden daha büyük kırılma gerilmeleri (kalıntı gerilmeler) oluşturmaktadır. Maksimum yük taşıma kapasitesine kopma/çökme esnasında ulaşıldığında bu kırılma gerilme değerleri gerçeğinden çok yüksek olarak hesaplanacaktır. Benzer bir durumda hesaplanan kritik çatlak boyu da çok büyük olacaktır. Çökmeye bağlı kırılmanın olduğu bir testte ölçülen kırılma parametreleri çok küçük olacaktır.

Çökme durumu da değerlendirilmeden kırılma analizi tamamlanamaz. Çökme ve kırılma durumları rekabet etkisi gösterirler ve önce açığa çıkan durum diğerinin yerine geçer.

2.3.1. Malzeme içerisindeki yük akışı çizgileri ve gerilme yığılması

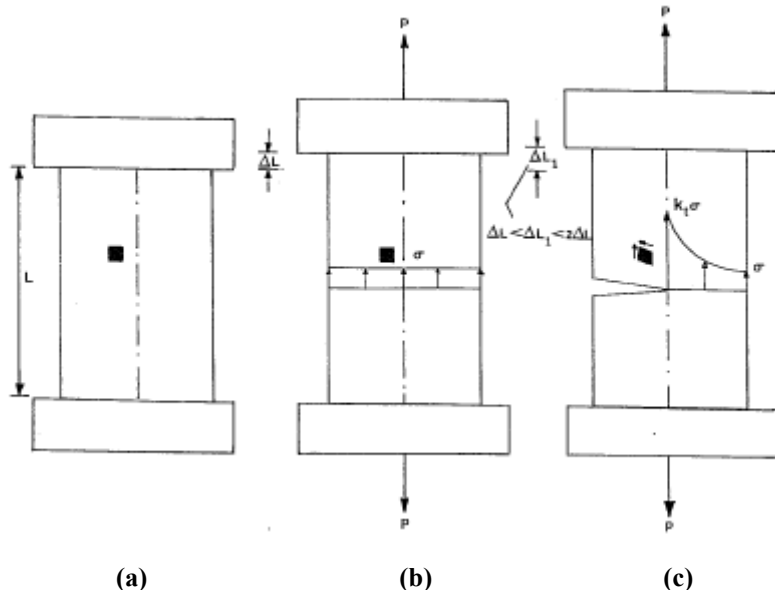
Süreksizlikler, keskin köşeler, çentikler ve çatlaklar gerilme yığılmasının oluşmasına neden olurlar. Gerilme yığılması (Stress Concentration) malzemenin küçük bir bölgesinde gerilme değerlerinin ortalama gerilme değerlerinden daha yüksek olması anlamına gelir ve tüm yapısal çatlak problemlerinde önemli bir yere sahiptir.

Aynı boyutlarda ve aynı malzemeden yapılmış Şekil 2.9'deki gibi iki paralel çubuk rijit plakalara bağlı olsun. Bu çubuklardan her biri toplam yükün yarısını taşır, çubuklardaki gerilme eşittir ve ΔL kadar bir uzamaya neden olurlar(Şekil 2.9b). Sol taraftaki çubuğu iki parçaya bölelim, sağ taraftaki çubuk tüm yükü taşıyacaktır ve bu çubuktaki gerilme, gerilme ve uzama değerleri de iki katına çıkacaktır. Sonuç olarak sol çubuktaki bölünen parçaların arasındaki aralık $2\Delta L$ olacaktır ve bu çubuk hiç gerilme taşımayacaktır (Şekil 2.9c) [1].



Şekil 2.9. Paralel Çubuklar Örneği [1]

Diğer bir durum olarak sağ ve sol çubukların boylarınca örneğin kaynakla birleştirilmiş olsun (Şekil 2.10). Bu işlem sırasında malzemelerin bozulmadığını farz edersek, bu durum bir öncekiyle özdeş olacaktır. Ancak sol çubuk ikiye bölündüğünde farklı bir durum oluşur. Bu durumda, sol çubuğun üst kısmında oluşacak gerinme, sağ çubuğun üst kısmındaki gerinmeyle yaklaşık olarak aynı olacaktır. Bu iki çubuğun elastisite modüllerinin de aynı olması dolayısıyla üst kısımlarda oluşacak gerilmelerin de aynı olduğunu söyleyebiliriz ($\sigma = \varepsilon E$). Sol çubuğun bölündüğü hizada sağ çubuk toplam yükü taşıyacaktır. Bu hizanın altında çubuklar birleşik olduğundan tekrar eşit gerinme değerleri oluşacaktır. Sonuçta alt kısımlar yine eşit yüklenecektir. Yani iki çubuk arası uygulanan birleştirme işlemi gerilme ve gerinme değerlerinin iki çubukta da hemen hemen eşit olmasını sağlamaktadır. Sol çubuğun bölünmesiyle oluşan yarığın yakınlarında çok kısa bir mesafe boyunca, sol çubuğun yükü sağ çubuğa aktarılmaktadır ve sonrasında tekrar yük paylaşılmaktadır. Sağ çubukta yarık kesitinde nominal gerilme P/A . Ancak kısa mesafe boyunca soldan aktarılan ve geri alınan bu ek yük, sağ çubukta kesit boyunca düzgün olarak dağılımaz. Yarık kesiti boyunca sağ çubukta sağ tarafta az ek yük taşınırken, yarığa yakın tarafta daha yüksek bir yük dağılımı gözlenir. Dolayısıyla yarık yakınında yüksek gerilme değerleri gözlenir, yani yarık ucunda bir gerilme yığılması oluşur [1].



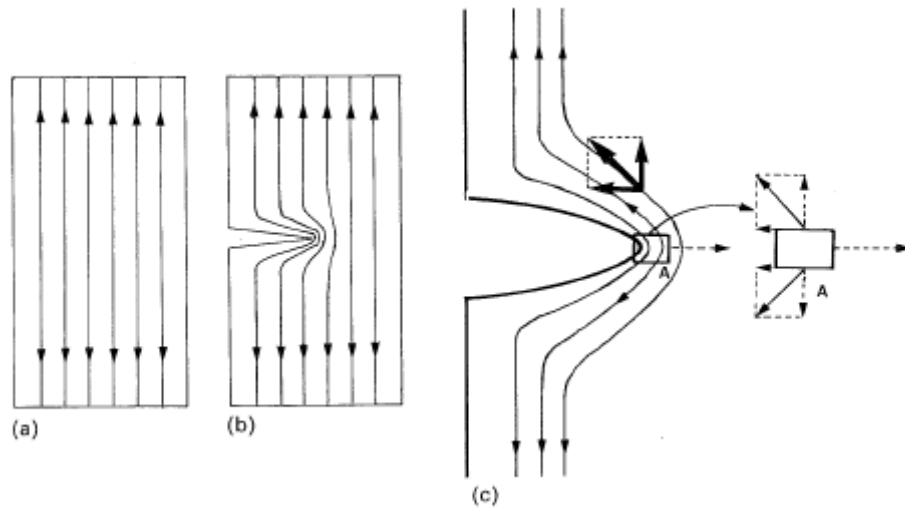
Şekil 2.10. Boylu boyunca kaynakla birleştirilmiş paralel çubuklar örneği [1]

Örnekteki iki çubuğun birbirine kaynakla birleştirilmesi ve bir çubuğun kesilmesiyle, ikisinin yekpare olması ve yarıya kadar kesilmesi arasında bir fark olmayacaktır. Yarı kesitin yükünün sağ kesite aktarılması kayma/kesme (shear) şeklinde meydana gelir. Yarık yakınında ele alacağımız birim alanın deformasyonunu düşünersek, bu bölgede kesme yüklemesinden kaynaklı gerilmelerin kayma gerilmeleri şeklinde olacağını görürüz [1].

Yekpare çubuk üzerinde yarık oluşturulmadan önce, gerilme düzgün olarak dağılır ve toplam uzaması ΔL dır. Yarık oluştuğunda ise, yarık kesiti dışında yine aynı değerler oluşacaktır. Sadece yarık kesitinde gerilme ve gerilme değerleri daha fazla olacaktır. Yani yekpare çubuk üzerinde yarık oluşturulduğunda toplam uzama ΔL den büyük, $2\Delta L$ den küçük olacaktır [1].

Yarık sonucunda oluşan yük ve gerilme dağılımını daha iyi anlamak için çubuk boyunca yük akışını düz çizgilerle temsil edelim. Düzgün yük dağılımında çizgiler eşit aralıklı ve düz olarak dağılırlar. Bu aynı zamanda düzgün bir gerilme dağılımını da gösterir. Bu düzgün yük dağılımı yarık tarafından bölünürse, yük akışı çizgileri yarık ucundan dolaşarak devam ederler.

Yarık ucunda akış çizgileri yakın aralıklı olarak dağılır. Bu da aynı yük akışının küçük alandan geçmesi yani yüksek gerilme anlamına gelir. Yük akış çizgileri, gerilmenin yönünün kabaca belirlenmesinde de kullanılabilir. Yarığın çevresinden dolaşan çizgiler eğilirler ve buralarda yönlerini değiştirirler. Yük akış çizgilerinin yönü yerel çekme gerilmelerini yönünü de belirler (Şekil 2.11) [1].



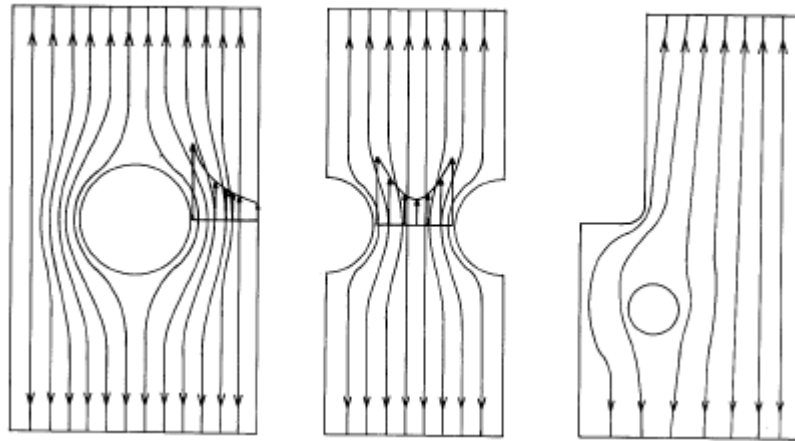
Şekil 2.11. Yük akış çizgileri [1]

Buradan da görebileceğimiz gibi çentik etrafında yük yönü ile düzgün yük dağılımının yönü farklıdır. Yerel gerilmelere baktığımızda da çentik etkisi altındaki bölgede gerilmenin yatay bileşeninin de olduğunu görürüz. Yani yükleme tek eksenle olduğu halde çentik etrafında gerilme çift eksenlidir (σ_x ve σ_y). Çentik sadece gerilme yığılmasına değil, enine gerilme dağılımına da neden olur.

2.3.2. Gerilme yığılma faktörü

Keskin uçlu bir yarık yerine çentik düşündüğümüzde de durum aslında çok farklı değildir. Her süreksizlik yapı içerisindeki yük akışını etkileyecek, bu etkiyle sapan yük akış çizgilerinin sıklaşmasıyla da gerilme yığılması oluşur.

Eğer çentik etkisi küt bir geometriden kaynaklanıyorsa, yük akışı çizgilerini daha uzak bölgeleri de etkiler (Şekil 2.12). Akış çizgilerinin etkilendiği bölge daha büyük olacaktır. Gerilme yığılmasının olduğu alan keskin yarığa göre daha geniş olduğundan gerilme yığılması daha düşük olacaktır. Yani bu bölgedeki en yüksek gerilme değeri daha düşük olacaktır [1].



Şekil 2.12. Yük akış çizgilerine çentik etkisi [1]

Bunu genel bir kural olarak belirtecek olursak; küt çentikler düşük bölgesel gerilmelere, keskin çentikler yüksek bölgesel gerilmelere neden olurlar. Bu gölgelerdeki en yüksek gerilme değerleri (σ_t) yapının nominal gerilme değerlerinden (σ_{nom}) kat kat fazladır. Bu bölgesel gerilme değerinin nominal

gerilme değerine oranına teorik gerilme yığılma faktörü denir ve k_t ile gösterilir. Bölgesel gerilme değeri (2.5) formülü ile bulunur [1].

$$\sigma_l = k_t \sigma_{nom} \quad (2.5)$$

Burada nominal gerilme her zaman aynı şekilde tanımlanmaz. Bazen düzgün dağılımlı gerilme, çentik etkisinden uzakta tüm kesit boyunca kullanılırken, bazen ortalama gerilme kullanılır. Fakat bölgesel gerilmeler her iki durum için de aynıdır. Yani farklı nominal gerilme değerlerinin kullanılması, gerilme konsantrasyon faktörlerinin değişmesine neden olur. Doğru eşleştirmeler kullanıldığı sürece sonucu değiştirmeyeceğinden bu bölgesel gerilmelerin hesabında bir problem teşkil etmez.

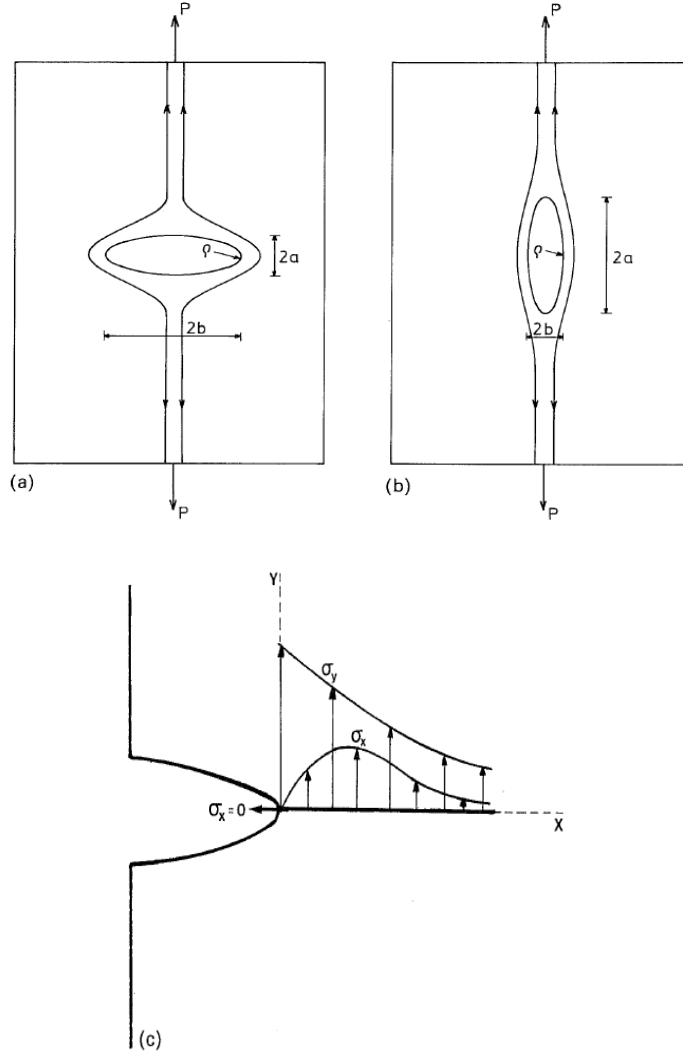
Eliptik geometrili çentik söz konusu olduğunda (Şekil 2.13), gerilme yığılma faktörü (2.6) denkleminde bulunabilir [1].

$$k_t = 1 + 2 \frac{b}{a} \quad (2.6)$$

Eliptik çatlakta çatlak yarıçapı aşağıdaki denklemlerle bulunur.

$$\rho = \frac{a^2}{b} \quad (2.7)$$

Bu denklemlerde kullanılan a ve b çatlak boyutlarını göstermekle beraber Şekil 2.13a ve b de belirtilmiştir. Eliptik geometrili çentikte çentik boyutlarına bağlı olarak gerilme yığılması değişmektedir. Ayrıca gerilmenin sıfır olduğu çatlak yüzeyi de Şekil 2.13c'de gösterilmiştir. Farklı çentik şekilleri için ise, gerilme yığılma faktörü kitaplardan bulunabilir.



Şekil 2.13. Eliptik çentikte (a) Yüksek gerilme yığılması (b) Düşük gerilme yığılması (c) Gerilmesiz çatlak yüzeyleri [1]

2.4. Yüklemeler ve Kırılma Modları

Yükleme yapılarında tekil ve çoğul olarak uygulanabilir. Tekil yüklemelerde yükü tek bir parça taşır. Bu parça ömür boyu sağlam olacak şekilde tasarlanmalıdır. Tasarımda bu yüklemeye biçiminin seçilmesi pek tavsiye edilmez fakat kullanılması gerektiği durumlarda, yüksek emniyet katsayıları kullanılarak tasarlanabilir.

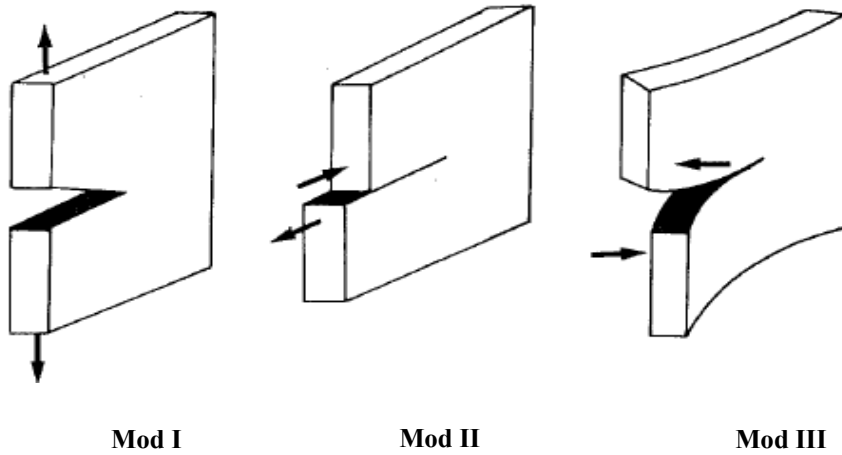
Bu tip yük durumuna örnek olarak uçakların iniş takımlarını gösterebiliriz. Burada yükü taşıyacak ikincil bir parça yoktur. Yani yük herhangi bir parça hasarı yaşanırsa taşınmaz. Bu nedenle iniş takımlarının ömür boyu sağlamlık göz önüne tutularak tasarlanması gerekir.

Çoğul yüklemelerde ise, yük ikincil bir parça tarafından da taşınabilir. Bu yüklemelerde yapılması gereken kontrol (test) periyodunu çatlak boyu kritik değere ulaşmayacak şekilde düzenlemektir. Bilinen test yöntemleri kullanılarak, tespit edilebilen çatlak boyu çatlağın yerine ve kullanılan test yöntemine göre değişir. Örneğin Eddy Current yöntemiyle yapılan tahribatsız kontrol yönteminde delik civarlarında 0.2 mm diğer yerlerde ise; 0.1 mm çatlak başlangıcı olarak alınıyor.

Yükler altındaki yapıda kırılmanın gerçekleşebileceği kritik bölgeleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Yüksek yük transferi olan bağlantılar
- Gerilme yoğunluğu yüksek olan yerler
- Yük taşıyan temel parça hasara uğradıktan sonra yük taşıyacak ikincil parçaların analizi
- Yüksek yük spektrum şiddeti (esnek parçalarda mesela)
- Düşük statik sınır
- Kaza halinde hasar görmeye eğilimli bölgeler
- Birebir ölçülerde yapılan yorulma testleri

Ayrıca yüklemenin doğrultusuna göre malzeme farklı şekillerde yırtılır. Farklı yükleme durumlarına göre 3 çeşit kırılma modu vardır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Kırılma modları

Mod I: Ayrılma Modu (En yaygın olanı)

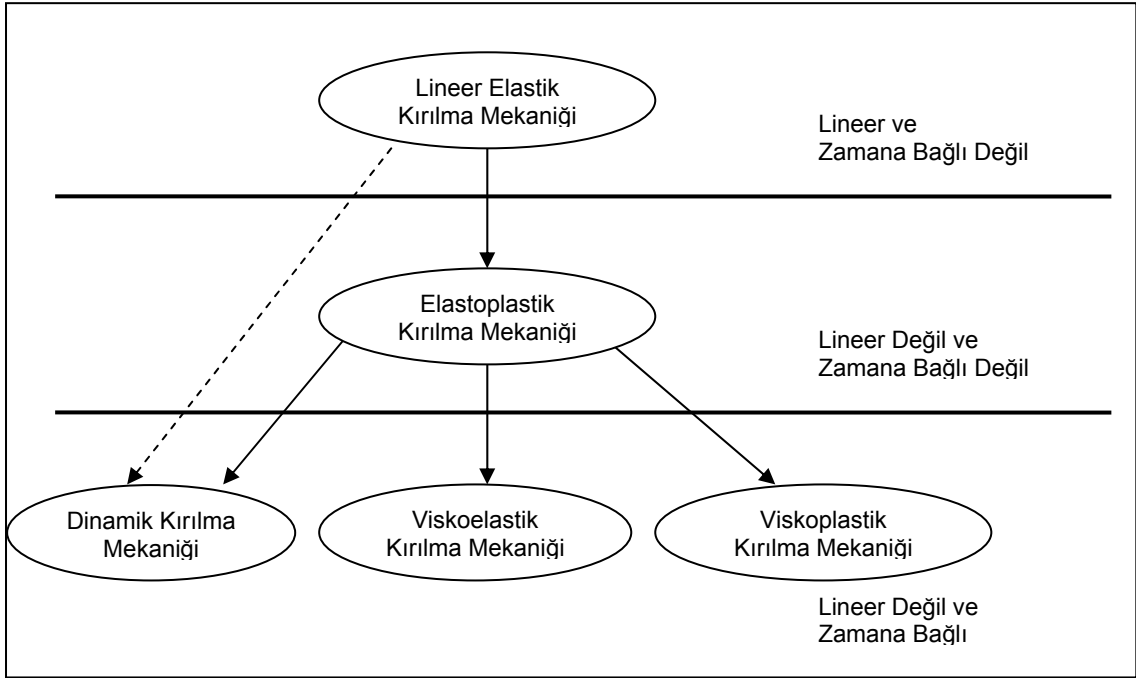
Mod II: Kayma Modu

Mod III: Yırtılma Modu

2.5. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniği çalışma alanı için küçük bir aile ağacı yapılırsa, bu ağaç Lineer Elastik Kırılma Mekaniği, Elastoplastik Kırılma Mekaniği, Dinamik, Viskoelastik, Viskoplastik Kırılma Mekaniği bölümlerinden oluşur. İlk çalışmalar kuasistatik statik gerilme şartları altında sadece lineer elastik malzeme uygulanabilmiştir. Daha sonra da diğer bölümlerde de çalışmalar olmuştur [2].

Elastoplastik kırılma mekaniği kuasistatik şartlar altında plastik deformasyonları inceler. Dinamik, viskoelastik, viskoplastik kırılma mekaniği ise, zamanı da bir değişken olarak alır. Şekil 2.15'teki kesik çizgili okun nedeni eski araştırmaların bazılarının dinamik lineer elastik karakteri içeriyor olmasıdır.



Şekil 2.15. Kırılma Mekaniği Bölümleri [2]

Elastoplastik, dinamik, viskoelastik ve viskoplastik kırılma mekanizmaları genel bir başlık olarak “Lineer Olmayan Kırılma Mekanizmaları” şeklinde de adlandırılır. Kırılma davranışını kullanılan malzemenin davranışı belirler (Çizelge 6.1).

Nispeten düşük kırılma dayanımına sahip malzemeler, esas hasara uğraması gereken mukavemet değerlerinden daha küçük değerlerde hasara

uğrarlar. Bu tip malzemeler elastik bölge içerisinde Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (Linear Elastic Fracture Mechanics-LEFM) kullanılarak analiz edilebilirler. Bu gibi malzemeler yüksek dayanımlı malzemeler olup, hava-uzay sanayinde yaygın olarak kullanılırlar. Bunlara örnek olarak yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler, soğuk işlenmiş paslanmaz çelikler gösterilebilir.

Çizelge 2.1. Malzemelere göre Kırılma Davranış Tipleri [2]

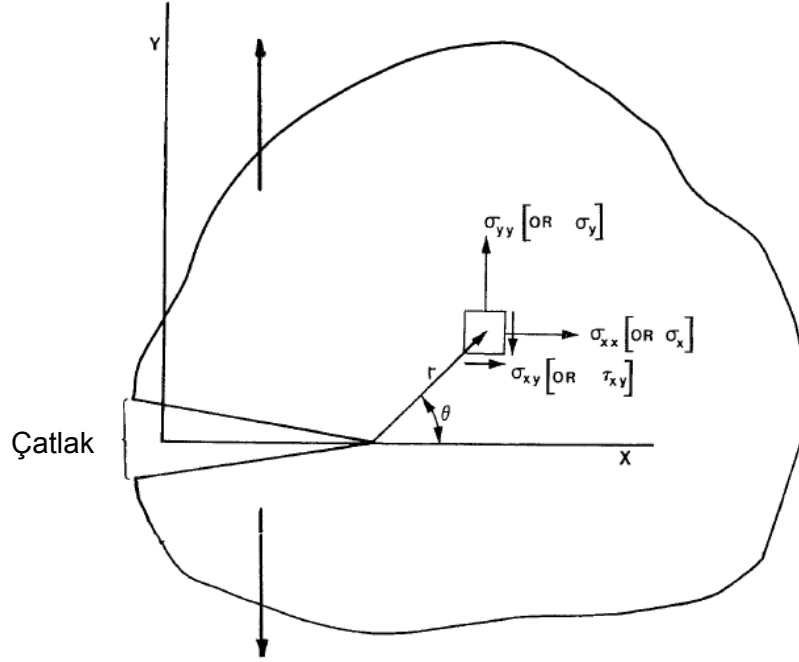
Malzeme	Kırılma Davranışı Tipi
Yüksek dayanımlı çelikler	Lineer Elastik
Düşük ve orta dayanımlı çelikler	Elastoplastik/Plastik
Ostenitli paslanmaz çelikler	Plastik
Çökeltme sertleşmeli alüminyum	Lineer Elastik
Yüksek sıcaklıkta metaller	Viskoplastik
Yüksek gerinmeli metaller	Dinamik-viskoplastik
Polimerler	Lineer Elastik/Viskoplastik
Monolitik Seramikler	Lineer Elastik
Seramik Kompozitler	Lineer Elastik
Yüksek sıcaklıkta seramikler	Viskoplastik

Çatlak ucunda gerilme, gerinme ve yer değiştirme dağılımının sabit olduğu bölgeye “tekil-baskın bölge” denir. Yapısında çatlak benzeri bir hata barındıran malzeme, çatlak ucu yakınlarında (kırılma gerçekleşme bölgesi) gerilme dağılımı kritik değerlere ulaştığında gevrek kırılma şeklinde hasara uğrar. Bu kritik değer, tekil-baskın bölgenin kırılma gerçekleşme bölgesini tamamen kapsamaması durumundaki değerdir. Ancak bu yaklaşımla lineer elastik kırılma mekaniği şartları uygulanabilir [2].

Lineer elastik kırılma mekaniği, geçmişte daha eskilere dayandığı için kırılma mekaniğinin daha ileri seviyede uygulamalarını inceleyebilmektedir. Lineer elastik kırılma mekaniği, enerji ve gerilme şiddeti yaklaşımlarıyla inceleyebilir. Fakat bu dokümanda sadece gerilme şiddeti yaklaşımıyla incelenecektir.

2.5.1. Çatlak Ucu Gerilmesi

Çekme, eğilme ya da her ikisine maruz kalan ve yapısında çatlak barındıran bir yapı düşünelim. Malzemenin elastik olduğunu düşünelim. Bu malzemenin gerilme dağılımını hesaplamak için elastisite teorisi kullanılabilir.



Şekil 2.16. Kartezyen koordinat sisteminde çatlak ucu gerilmeleri [1]

Daha önceki bölümde de belirtildiği gibi çatlak ucunda gerilme dağılımı (Yük akışı çizgileri dağılımı olarak gösterilmişti.) çift eksenlidir hatta kalınlık yönünde etkileşim olduğunda üç eksenli olabilir. Yani σ_x ve σ_y olmak üzere en az iki yönde gerilme bileşeni vardır (Şekil 2.16). Birinci mod kırılma şekli oluşturacak yükleme hali durumunda gerilme bileşenleri aşağıdaki gibidir [1]:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.8)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (2.10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.11)$$

Çatlak kesiti doğrultusundaki düzlemde (Bu düzlem $\theta = 0$ durumudur.) kayma gerilmeleri τ_{xy} (düzlem simetrik olmasından da çıkarabileceğimiz gibi) sıfırdır. ($x=r, \theta=0$) [1]

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi x}} \quad \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.12)$$

$$(2.13)$$

Bu düzlem boyunca enine σ_x ve boyuna σ_y gerilme değerleri birbirine eşittir. x söz konusu noktanın çatlak ucuna uzaklığı olarak belirlenir ki, uzak noktadaki gerilme değeri daha küçük olacaktır. Gerilmeler aynı zaman da K parametresine de bağlıdır [1].

Gerilmelerin hesaplandığı bu denklemler çok basit gözükabilir. Çatlak ve yüklemenin rasgele olması olmasına rağmen gerilme alanı çözümünün kullanılabilmesi de ilginçtir. Bu rasgele seçimlerle sonuca ulaşırken denklemlerde K gibi bir sabitin olması normaldir. Tüm çatlak problemlerinde kullanılan bu sabite Gerilme Şiddeti Faktörü (Stress Intensity Factor) denir. Bu kavram gerilme yığılma faktörüyle karıştırılmamalıdır [1].

Gerilme şiddeti faktörü (K) çatlak ucu hassasiyetinin büyüklüğünü gösterir. Yani çatlak ucu civarındaki gerilmelerin artışı K ile orantılıdır.

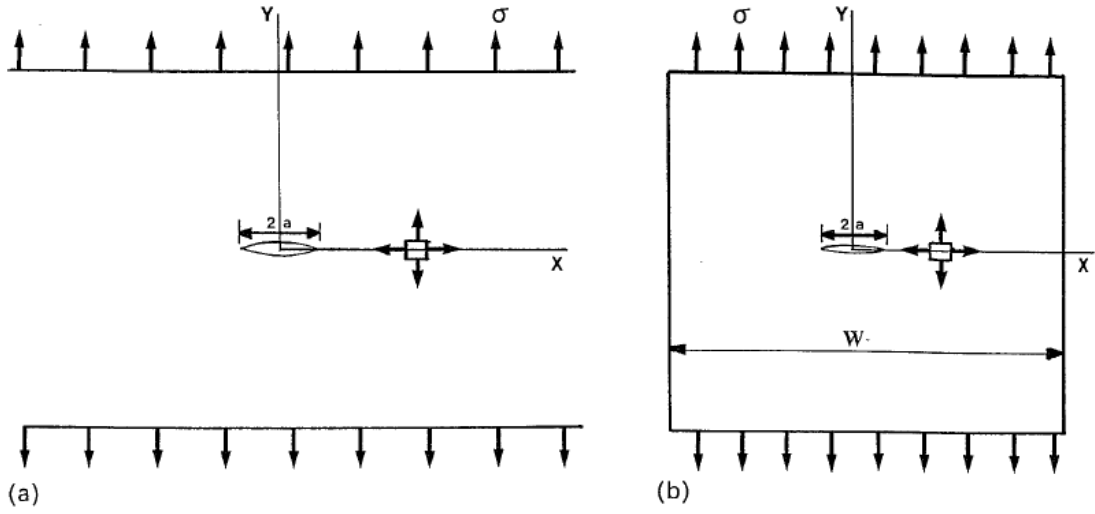
Diğer kırılma modlarında da benzer çözümler elde edilecektir. Her çözüm için bir Gerilme Şiddeti Faktörü olacaktır, fakat farklı modlar için farklı K değerleri tanımlanır. Gerilme şiddeti faktörleri yükleme şekillerine, diğer bir deyişle kırılma modlarına göre K_I , K_{II} ve K_{III} olarak adlandırılırlar.

Çatlak ucu gerilme denklemleri için düzgün aksenal yüklenmiş çok büyük (sonsuz uzunlukta) bir levha kabul edilebilir (Şekil 2.17a). Bu levha ortasında $2a$ boyunda bir çatlak olsun ve levhada nominal gerilme σ olsun. Literatürde, 2 uçlu çatlaklarda çatlak boyu " $2a$ ", tek uçlu çatlaklarda ise; " a " olarak kabul edilir.

Bir elastik yapı içerisinde her yerde gerilme uygulanan yüklerle doğru orantılıdır. Bunun çatlak ucu için de geçerli olduğunu düşünürsek, çatlak ucundaki gerilme uygulanan gerilmeyle doğru orantılıdır [1].

$$\sigma_y \propto \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi x}}$$

Buradan çatlak ucundaki gerilme dağılımının çatlak boyuna bağlı olduğu sonucunu çıkarırız. Çatlak boyu arttığında gerilmeler de daha yüksek olacaktır.



Şekil 2.17. Belirsiz (a) ve belirli (b) genişlikli levhalarda çatlak [1]

Eşitliğin iki tarafının da gerilmeyi ifade etmesi gerekir. Karekök içerisinde a çatlak boyunu denklemin sağına çarpan olarak eklersek denklem birimsel olarak eşitlenir [1].

$$\sigma_y \propto \frac{\sigma \sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}}$$

Bu denklem halen bir eşitlik ifade etmemekte orantı belirtmektedir. Birimsiz bir C katsayısının eklenmesiyle denklem aşağıdaki hali alır.

$$\sigma_y = \frac{C\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.14)$$

Bu C katsayısını, Şekil 2.17a'daki durum için inceleyecek olursak, $C = \sqrt{\pi}$ olarak bulunur. Eşitlik aşağıdaki şekli alır:

$$\sigma_y = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.15)$$

Denklem (2.13) ile (2.15) karşılaştırıldığında Gerilme Şiddeti Faktörü (K) Şekil 2.17a'daki durum için aşağıdaki gibi bulunur [1].

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.16)$$

Genelde K çözümlerinde, basit şekilli çatlakların sonsuz genişlikli levhalarda ilerlediği kabul edilir. Ya da çatlak boyutlarının levha boyutuna göre küçük olduğu ve böylece çatlak ucu şartlarının harici sınır şartlarından

etkilenmediği kabul edilir. Çatlak boyu, levha boyutu oranı arttıkça harici şartlar çatlak ucu bölgesini etkileyecektir. Bu durumda K çözümleri genellikle kullanılamaz [1].

Çatlak ucuna harici şartların etkisini simule etmek için, genişliği belirli olan bir levha üzerindeki çatlağı, sonsuz genişlikli bir levha üzerinde sıralı periyodik çatlaklar olarak kabul edilebilir. Bu yaklaşımla Mod I gerilme şiddeti faktörü aşağıdaki gibidir [1]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{2W}{\pi a} \tan \left(\frac{\pi a}{2W} \right) \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

2.5.2. Gerilme Şiddeti Faktörünün Genel Hali

Yukarıda bulduğumuz gerilme şiddeti faktörü sadece belirtilen durum için geçerli olup, farklı hallerde farklı eşitliklerle bulunacaktır. Bu farklı durumlar için de yine (2.14) numaralı denklemden yola çıkılabilir [1].

$$\sigma_y = \frac{C \sigma \sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.14)$$

Farklı bir durum olarak levhanın genişliği çatlak ucu gerilmelerini etkileyecektir (Şekil 2.17b). Bildiğimiz gibi levha genişliği kısaltıldığında gerilmeler artacaktır. Bu durumda C katsayısı genişliğin (W) bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar [1].

$$C = \sqrt{\pi \sec \frac{\pi a}{W}} \quad (2.18)$$

Buradaki C katsayısı (2.14) gerilme denkleminde yerine konulursa;

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{\pi \sec \frac{\pi a}{W}} \sigma \sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.19)$$

elde edilir. Burada gerilme şiddeti faktörü olan K ;

$$K = \sqrt{\pi \sec \frac{\pi a}{W}} \sigma \sqrt{a} \quad (2.20)$$

olarak belirlenir. Çatlağın olduğu parçayı daha iyi tariflemek için boyunu (L) da (2.14) numaralı denkleme eklersek,

$$\sigma_y = \frac{C\left(\frac{a}{L}\right)\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.21)$$

Burada gerilme şiddeti faktörü ise $K = C\left(\frac{a}{L}\right)\sigma\sqrt{a}$ olarak belirlenir.

Bu (2.21) numaralı genel denklemde geometrik etkenlerin temsil edildiği katsayıları tek bir geometri faktörüyle (β) tanımlarsak;

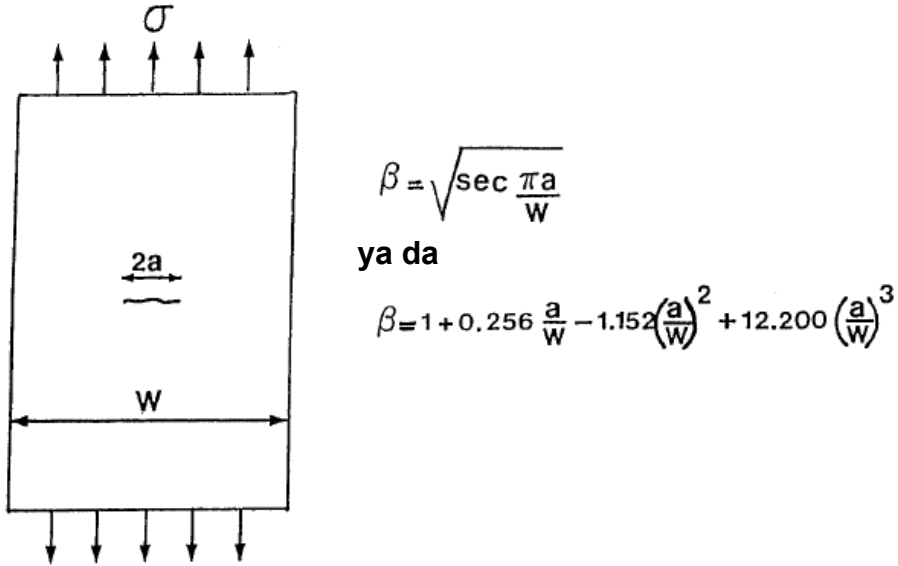
$$\sigma_y = \frac{\beta\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.22)$$

ve gerilme şiddeti faktörü (2.2) denklemiyle belirlenir [1].

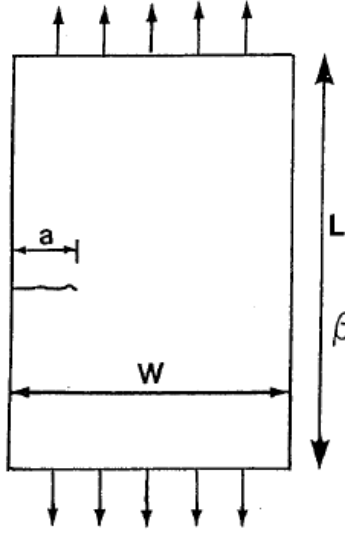
$$K = \beta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

Bu denklemler tüm çatlak problemlerinde çatlak ucu gerilmelerinin ve gerilme yoğunlaşmasının hesaplanmasında kullanılabilir. Sadece β değeri yada β fonksiyonu bulunması gerekiyor. Birçok farklı durum için β değerleri hesaplanmış olup, bu değerler kitaplardan da bulunabilir.

Aşağıda bazı β değerlerinin hesaplanması örneklenmiştir (Şekil 2.18-20):



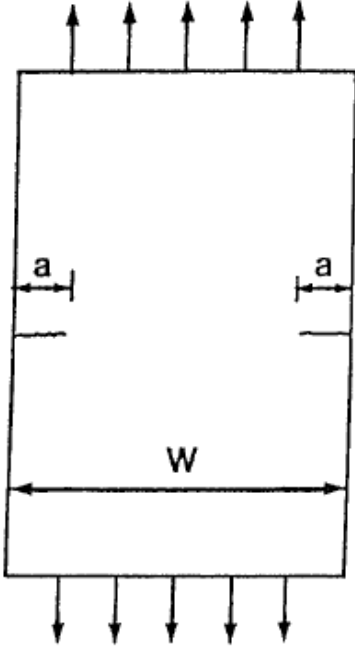
Şekil 2.18. Belirli genişlikli levha içerisinde orta çatlak geometri faktörü [1]



$$\frac{L}{W} = 2 \text{ ise;}$$

$$\beta = 1.12 - 0.23 \frac{a}{W} + 10.56 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21.74 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30.42 \left(\frac{a}{W}\right)^4$$

Şekil 2.19. Belirli genişlikli levha içerisinde kenar çatlak geometri faktörü [1]



$$\beta = 1.12 + 0.43 \frac{a}{W} - 4.79 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 15.46 \left(\frac{a}{W}\right)^3$$

Şekil 2.20. Belirli genişlikli levha içerisinde çift kenar çatlak geometri faktörü [1]

2.5.3. Kırılma Tokluğu

Çatlak ucundaki gerilmeler, malzemenin taşıyabileceğinden çok daha yüksek olduğunda kırılma meydana gelir. Gerilme şiddeti faktörü çatlak ucundaki tüm gerilme dağılımını temsil ettiğine göre, bir önceki ifade

değiştirilerek, “ K , malzeme için çok büyük olduğunda kırılma meydana gelir” de denilebilir.

Yapısında çatlak oluşmuş malzemenin taşıyabileceği en büyük çatlak ucu gerilme değerlerine karşılık gelen gerilme şiddeti faktörüne (K_C) “Kırılma Tokluğu” denir [1].

Malzemelerin Kırılma tokluğu özelliklerini bulmak etmek için çeşitli deneyler geliştirilmiştir. Bu deneylerde, deney yapılacak malzemenin şekli ve miktarına göre farklı şekillerde test kuponları hazırlanır. Herhangi bir parçanın kırılma analizi yapılacaksa, o parçanın kendisinden numune almak daha doğru sonuç verecektir. Aynı zamanda parçanın yüklenme durumu da göz önüne alınarak test kuponları hazırlanmalı ve aynı yönde yüklenerek deney yapılmalıdır. Yükleme sonucu çatlak ucunda oluşan gerilme dağılımı belirlenerek gerilme şiddeti faktörü bulunur: Test kuponu çatlak ucundaki gerilme dağılımı nedeniyle kalıcı hasara uğradığında, aynı gerilme dağılımlı çatlağa sahip asıl yapı da kalıcı hasara uğrayacaktır. Bu gerilme dağılımına karşılık gelen K değeri ise kırılma tokluğu olarak belirlenecektir. Kırılma analizi yapılan malzemede, malzemenin kırıldığı bölgenin dikkatle incelenmesi gerekir, çünkü kırılma tokluğu malzemenin her bölgesinde aynı olmayabilir. Kırılmaya sebep olan faktörler malzemenin her bölgesinde farklı olacağından, kırılma olan bölgenin kırılma tokluğunun ölçülmesi gerekir [1].

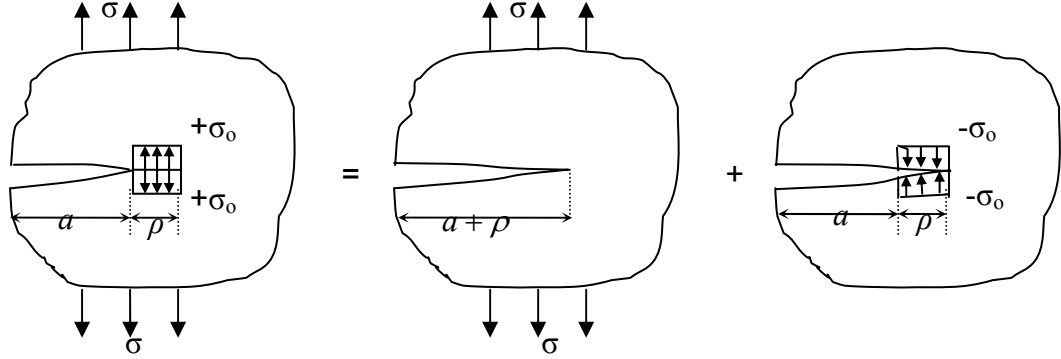
2.5.4. Çatlak Ucu Plastik Deformasyonu

Çatlak ucu plastik bölge yaklaşımı, sadece plastik bölge uzunluğu çatlak boyundan küçükse ve sınırların etkisi ihmal edilebildiğinde yapılabilir. Eğer bu şartlar sağlanmıyorsa; toplam gerilme dağılımı civar-bölge denklemleriyle (çatlak ucu gerilme denklemleri) öngörülenden daha karmaşık olacaktır ve eşitliği formüle etmek zorlaşacaktır [2].

Bununla birlikte sınırlandırılmış bir plastik bölge durumunda gerilme dağılımının daha kapsamlı tanımlanması için elastoplastik çözümleri içeren bir yaklaşım vardır.

Eğer tüm plastik deformasyon etkilerini çatlak ucunda dar bir banda yığarsak, plastik bölgeyi σ_0 büyüklüklü gerilme dağılımına sahip bir elastik bölge

olarak düşünebiliriz. Bu bölgedeki dağılım, süperpozisyonla Şekil 2.21'deki iki dağılımın toplamı olarak incelenebilir.



Şekil 2.21. Çatlak ucu gerilme süperpozisyonu

Çatlak yorulması meydana gelirken malzemede çatlak civarında iki farklı tip çatlak ucu plastik bölgesi oluşur. İleri plastik bölgesi malzemenin maksimum yük altında çatlak ucu civarında plastik deformasyona uğrayan bölgesidir. İkinci tip bölge ters plastik bölgedir. Bu bölge ise, malzemenin minimum basma yükleri altında çatlak ucu etrafında akmaya uğrayan bölgesidir [3].

Çatlak ucundaki plastik deformasyonun doğası iki boyutlu ideal kabulden çok etkilenmiştir. Yani birçok klasik kırılma mekaniği çözümleri problemi iki boyuta indirger. Asal gerilme ve gerilmelerden en az biri sıfır kabul edilir ki, bu da düzlem gerilme ve düzlem gerilme yaklaşımıdır. Genellikle, çatlak ucunda ne düzlem gerilme ne düzlem gerilme davranışı vardır. Malzeme davranışı üç boyutludur [3].

Eğer yapıda bir çatlak yoksa levhada düzlem gerilme durumu geçerlidir. Yani çatlak ucundan yeteri kadar uzak bölgelerde yine düzlem gerilme hali geçerlidir. Çatlak ucundaki malzeme diğer bölgelere nazaran daha yüksek gerilmelerle yüklenir. Çatlak düzlemine normal doğrultudaki yüksek gerilmeler nedeniyle çatlak ucundaki malzeme x ve z yönlerinde büzümeye çalışır. İnce levhalarda, kalınlık doğrultusundaki büzülme çatlak ucunda serbest bir biçimde silindirik olarak oluşur. Bu da düzlem gerilme halini oluşturur. Buna karşın kalın levhalarda çevredeki malzemeler tarafından bu büzülme engellenir ve çatlak ucunda üç eksenli gerilme durumu oluşur. Çatlak boyunun malzeme kalınlığından çok küçük olduğu durumda ise levha içerisinde düzlem gerilme

şartları ortaya çıkar. Bununla birlikte levha yüzeyinde ise, yüzeye normal doğrultuda gerilme olmamasından dolayı malzemede düzlem gerilme şartları oluşur. Kısacası çatlak ve çentikteki gerilme bölgesi ve gerilme şartları levha kalınlığına bağlıdır [1].

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} = 0 \quad (2.23)$$

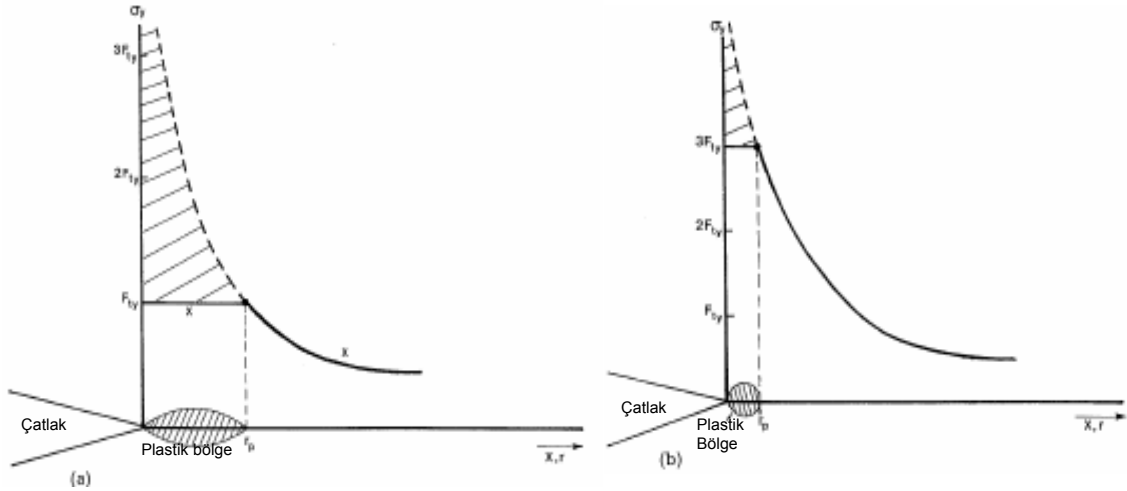
Düzlem gerilme durumu için geçerli (2.23) denklemi $\nu \approx 0.33$ için aşağıdaki hali alır.

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \approx 0.66\sigma_y$$

Tresca akma kriterine göre; maksimum ve minimum asal gerilmeler arasındaki fark, akma mukavemetine (F_{ty}) eşit olduğunda akma başlar. Bu düzlem gerilme halinde plastik deformasyon için aşağıdaki durumu getirir.

$$\sigma_y - 0.66\sigma_y = F_{ty} \text{ yada } \sigma_y = 3F_{ty}$$

Bundan dolayı, plastik deformasyon oluşması için, σ_y gerilmesinin akma mukavemetinin üç katına çıkması gerekir. Diğer taraftan, düzlem gerilmede akma, $\sigma_y = F_{ty}$ olduğunda gerçekleşir. Akmadan sonra gerilmelerin fazla artmadığını kabul ederken, gerilme dağılımı Şekil 2.22'deki gibi olacaktır [1].



Şekil 2.22. Çatlak ucu gerilme dağılımı (a) Düzlem gerilme (b) Düzlem gerilme [1]

Başka bir açıdan açıklanırsa, plastik deformasyon sırasında çatlağa normal doğrultuda oluşan kalıcı malzeme uzamaları, çatlayan yapının

sıkıştırılamazlığı göz önüne alındığında, yapı içerisinde malzemenin başka yerlere transferini gerektirir. Düzlem gerilme durumunda bu malzeme transferinin mekanizması açıktır. Düzlem dışı deformasyonlar sınırlanmadığı sürece, malzeme kalınlık doğrultusundan, aksenal doğrultuya doğru transfer olur. Düzlem gerilme için geçerli olan bu mekanizma düzlem gerilme için kabul edilemez. Tanım gereği, düzlem dışı büzülme olamaz ve bu yüzden çatlak ucu arkasında plastik ayrılma bölgesinde aksenal olarak net malzeme uzaması olmayacaktır. Fleck tarafından öne sürülen bu durum plastisite etkisiyle çatlak kapanmasının olmadığını öngörür. Plastisite etkisiyle çatlak kapanmasının olduğu düzlem gerilme durumu ayrı bir konu olarak incelenmelidir.

Birçok araştırmacı Sonlu Elemanlar Yöntemiyle plastisite etkisiyle yorulma çatlağı kapanması iki boyutlu düzlem gerilme veya düzlem gerilme şartlarında incelenmiştir. Nispeten daha az sayıda üç boyutlu problem çalışmaları da olmuştur [3].

Çatlak yorulmasının 3 Boyutlu tanımlanması çatlak ilerleme davranışını daha iyi simule etmek için geliştirilmiştir. Çatlak iki boyutlu olarak modellenbilmesine karşın gerçekte üç boyutlu bir problemdir. Hatta en basit geometri ve yük şartlarında (sabit büyüklüklü yük dağılımı) dahi tünel etkisinden dolayı çatlak üç boyutlu davranış sergiler. Yüzey çatlakları ve spektrum yükleme gibi daha karmaşık geometri ve yükleme koşullarında daha çarpıcı değişiklikler olacaktır. Bu gibi durumlarda iki boyutlu modellemeyle doğru çatlak ucu gerilme şiddeti faktörü ve gerilmelerine ulaşmak imkânsızdır.

2.6. Çatlak İlerlemesi

2.6.1. Çatlak ilerleme mekanizması temel denklemleri

Genel olarak çatlak ilerleme mekanizmasını tanımlayan temel denklemler aşağıdaki iki denklemdir [4]:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (2.24)$$

$$\Delta K = \Delta \sigma \beta \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

Algoritma: Denklem (2.24) deki ilerleme oranı, $\frac{da}{dN}$, farklar oranı olarak yazılabilir.

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = f(\Delta K) \quad (2.25)$$

Çatlak boyu uzamasını hesaplamak için (2.25) düzenlenir:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta a = a_{i+1} - a_i \\ \Delta N = N_{i+1} - N_i \end{array} \right\} a_{i+1} = a_i + \Delta N f(\Delta K) \quad (2.26)$$

Bu algoritmada a çatlak boyu, N parçanın çevrimsel ömrü olmak üzere $\frac{da}{dN}$ çatlak büyüme hızını temsil eder. Ayrıca ΔK gerilim şiddet faktörü aralıdır. Çatlak ilerleme mekanizması bu algoritma kullanılarak iki temel denkleme dayanır. Bu denklemler genel denklemde bulunan $f(\Delta K)$ fonksiyonun belirlenmesiyle elde edilir.

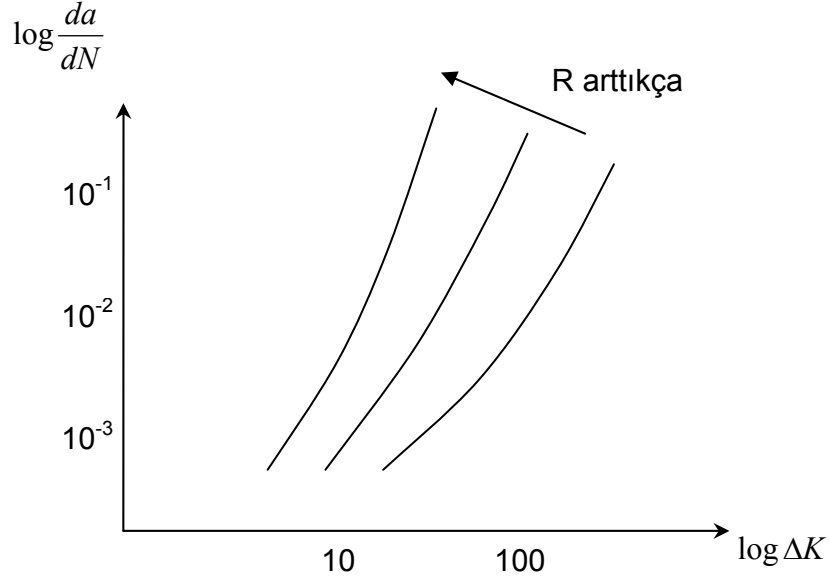
Basit çekme yüklemesi altında, çatlağın başlangıç boyundan kritik boya ulaşması için gerekli çevrim sayısı Paris-Erdoğan denklemi ile ifade edilebilir. $f(\Delta K) = C(\Delta K)^n$ olarak alırsak, Paris Erdoğan denklemiyle “Çatlak İlerleme Denklemi” elde etmiş oluruz [5]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (2.27)$$

Bu denklemde C ve n deneysel verilerden elde edilen parametrelerdir. Bu C ve n parametreleri

- Malzemeye
- Sıcaklığa
- Neme
- $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ gerilme oranına
- Kalınlığa bağlıdır.

Daha sonra Paris-Erdoğan denkleminin eksikliği görülmüş. Bu da denklemin $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ değerinden bağımsız olmasıdır. Testlerde görülmüştür ki çatlak ilerlemesi gerilme oranına bağlıdır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Çatlak ilerlemesinin gerilme oranı (R) ile değişimi [5]

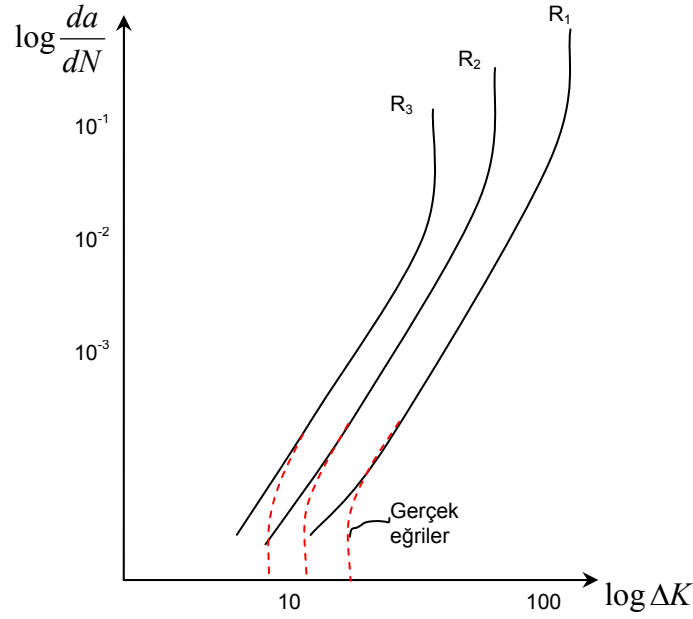
Paris-Erdoğan çatlak ilerleme denkleminin gerilme oranı da hesaba katılmış şekli olan “Walker Çatlak İlerleme Denklemi” aşağıdaki gibidir [5]:

$$\frac{da}{dN} = C' \left[\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-m}} \right]^{n'} \quad (2.28)$$

Denklem (2.28)'deki C' , n' ve m değerleri de yine deneysel sonuçlara dayanmaktadır.

Walker denkleminin de problemi; gerçek deneysel $\frac{da}{dN} - \Delta K$ eğrilerinin logaritmik skalada doğrusal olmamasıdır. Bunun çaresi olarak geliştirilmiş “Forman Denklemi” oluşturulmuştur. Bugün tasarımda kullanılan iki çatlak ilerleme denklemlerinden birisi “Forman Denklemi”dir [5].

$$\blacktriangleright \quad \frac{da}{dN} = C'' \frac{(\Delta K)^{n''}}{(1-R)K_C - \Delta K} \quad (2.29)$$



Şekil 2.24. Forman ve Düzeltilmiş Forman Denklemi için çatlak ilerleme grafiği

Bu denklemin sakıncası da düşük $\frac{da}{dN}$ değerlerinde hatalı değerlere götürebilmesidir (Şekil 2.24). Bunun için “Düzenlenmiş Forman Denklemi” geliştirilmiştir [5]:

$$\frac{da}{dN} = C^m \frac{\left[(1-R)^{1+m^m} \Delta K \right]^{n^m}}{\left[(1-R)^{m^m} K_c - (1-R)^{1+m^m} \Delta K \right]^L} \quad (2.30)$$

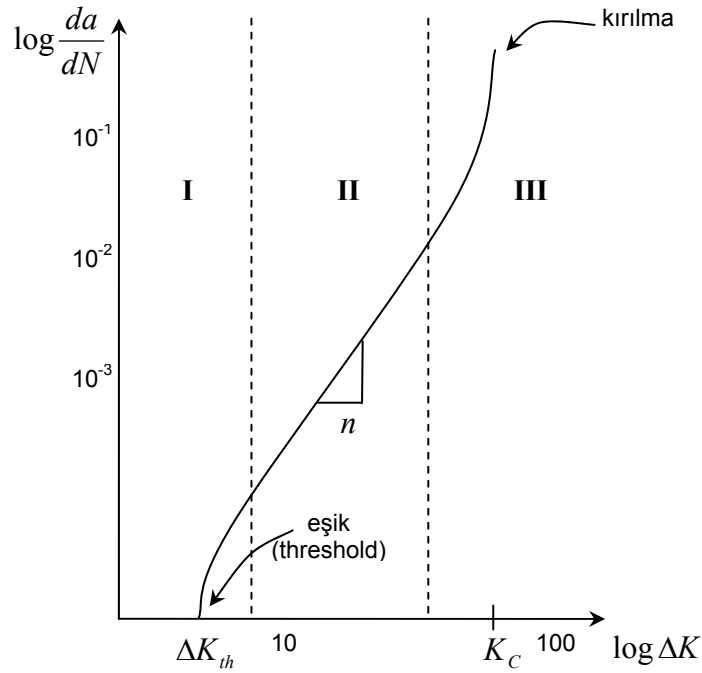
Deneysel eğrinin düşük ilerleme hızlarında ($\frac{da}{dN}$ ilerleme hızının $10^{-4}, 10^{-5}$ gibi küçük değerlerinde) kıvrımını daha iyi yakalamak için iki denklem daha önerilmiştir. Bu denklemlere burada değinilmeyecektir:

- Colligriest Çatlak İlerleme Denklemi
- Geliştirilmiş Colligriest Çatlak İlerleme Denklemi

Bugün kullanılan ikinci çatlak ilerleme denklemi ise NASA denklemdir:

$$\frac{da}{dN} = C \left[\frac{(1-f)}{(1-R)} \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (2.31)$$

Denklem (2.33)'deki C , n , p , ve q testler sonucu bulunan ampirik katsayılarıdır. Ayrıca denklemde çatlak açılma fonksiyonu, f , eşik gerilme şiddeti faktörü, K_{th} , kritik gerilme şiddeti faktörü, K_c olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Tipik bir $da/dN - \Delta K$ eğrisi örneği [3]

Tipik logaritmik bir grafik olan $da/dN - \Delta K$ Şekil 2.25'te gösterilmiştir. Sigmoidal şekle sahip eğri üç ana bölgeye ayrılabilir. I. Bölge, eşik değeri (ΔK_{th}) de içerisinde barındıran ve eşik değerinin etrafındaki bölgedir. Bu eşik değeri, altında çatlak ilerlemesinin olmadığı değerdir. Bu bölgedeki çatlak ilerlemesi, mikro yapı, ortalama gerilme, frekans ve çevre şartlarına bağlıdır [3].

II. Bölge, $\log da/dN$ ve $\log \Delta K$ arasındaki lineer bağıntının gösterildiği bölgedir. Bu bölgedeki lineer bağıntı aşağıdaki denklemle (Paris-Erdoğan) ifade edilir [3]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (2.32)$$

Bu nedenle bu bölgeye Paris Bölgesi de denir. Bu bölgedeki yorulma çatlak ilerlemesi, çevre etkisine bağlı olan kararlı makroskobik çatlak ilerlemesidir. II. Bölgede mikroyapının ve ortalama gerilmenin çatlağın ilerleme davranışına etkisi, I. Bölgedekinden daha azdır [3].

III. Bölgede ise, çatlak ilerleme oranı o kadar artar ki, kararsız hale gelir ve yorulmayla çatlak ilerleme ömrü kısalmır. Bu bölge, mikroyapı ve çevreye bağlı olan kırılma tokluğu (K_c) tarafından kontrol edilir [3].

Uçak şirketlerinin kullandığı diğer bir üçüncü metot ise, deneylerle oluşturulan $\frac{da}{dN} - \Delta K$ eğrilerine fonksiyon uydurarak elde edilen denklemlerdir. Ya da eğri uydurma yerine eğrilerin kendisi kullanılır. Tablolarda enterpolasyonla $\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R)$ değeri bulunur.

Eğer tüm bu yöntemlerden birisi kullanılarak hesaplanan gerilme şiddeti faktörü, eşik gerilme şiddeti faktöründen küçük ya da eşitse, söz konusu çatlak büyümmez, ilerlemez. Diğer bir deyişle, gerilme şiddeti faktörü eşik değerinden büyük olursa çatlak ilerler. Eşik değerinin altındayken çatlaklar pasif olarak adlandırılırlar.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta K_{th} : \text{Eşik Gerilme Şiddeti Faktörü} \\ \Delta K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \end{array} \right\} \Delta K \leq \Delta K_{th}$$

2.6.2. Çatlak İlerleme Denklemleri İntegralleri

Genel olarak çatlak ilerleme oranı aşağıdaki gibidir:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (2.33)$$

Bu genel denklemin özel hallerini daha önceki bölümde incelemiştik.

$$\text{Forman denklemi: } \frac{da}{dN} = C'' \frac{(\Delta K)^{n''}}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (2.29)$$

$$\text{NASA denklemi: } \frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (2.31)$$

Bu denklemlerde C , n , C , f , n , p ve q malzeme parametreleridir. Her iki denklemde de bu malzeme parametreleri $\frac{da}{dN}$ değerlerine eğri uydurularak bulunur.

Bazen bu çatlak ilerleme modelleri yerine gerçek $\frac{da}{dN} - \Delta K$ eğrisi enterpolasyon algoritması ile birlikte kullanılır.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \rightarrow \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, R)} = \int_0^N dN$$

$$N = \int_{a_{ilk}}^{a_{final}} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (2.34)$$

Genel çatlak ilerleme denklemi integre edilerek elde edilmiş olan bu denklem çatlak boyunun başlangıç boyu a_{ilk} 'den a_{final} 'e büyümesi için gerekli çevrim sayısını hesaplamak için kullanılır.

İntegral sonucu elde edilen bu denklemin özel hali olarak Forman Denklemi integrali aşağıdaki gibi elde edilir:

$$N = \int_{a_{ilk}}^{a_{final}} \frac{da}{\frac{C(\Delta K)^n}{[(1-R)K_c - \Delta K]}} \quad (2.35)$$

Burada gerilme şiddeti faktörü yerine bildiğimiz formülünü ($\Delta K = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$) yazarsak Forman Denklemi için çevrim sayısı denklemi elde edilir:

$$N = \int_{a_{ilk}}^{a_{final}} \frac{[(1-R)K_c - \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a}]}{C \beta^n \Delta \sigma^n (\pi a)^n} da \quad (2.36)$$

Eğer çatlak boyu (a) ilerlemesi hesaplanmak isteniyorsa;

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = f(\Delta K, R) \quad (2.33)$$

Yukarıdaki genel denklemde $\Delta a = a_{i+1} - a_i$ idi. Genel denklem için çatlak ilerlemesi $a_{i+1} = a_i + f(\Delta K, R) \Delta N$ olacaktır.

Özel bir hal olarak Forman Denklemi kullanarak, çatlak ilerleme denklemi aşağıdaki gibi bulunur:

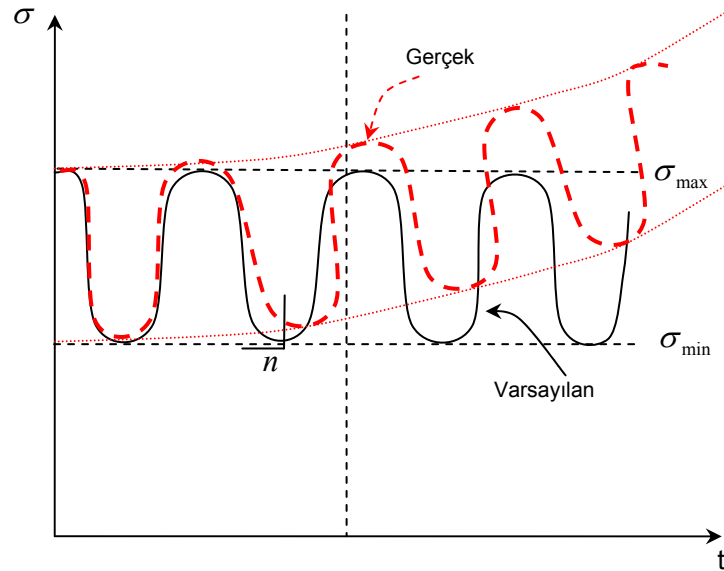
$$a_{i+1} = a_i + \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_c - \Delta K} \Delta N \quad (2.37)$$

$$\Delta K = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

$$a_{i+1} = a_i + \frac{C\beta^n(a)\Delta\sigma^n(\pi a)^{n/2}}{(1-R)K_c - \beta(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}} \Delta N \quad (2.38)$$

2.6.3. Yük spektrumu

Genellikle yük spektrumunun çatlak ilerlemesinden etkilenmediği kabul edilir. Yük spektrumu genelde minimum ve maksimum gerilme değerleri arasında salınım yapan bir dağılım gösterir (Şekil 2.26).

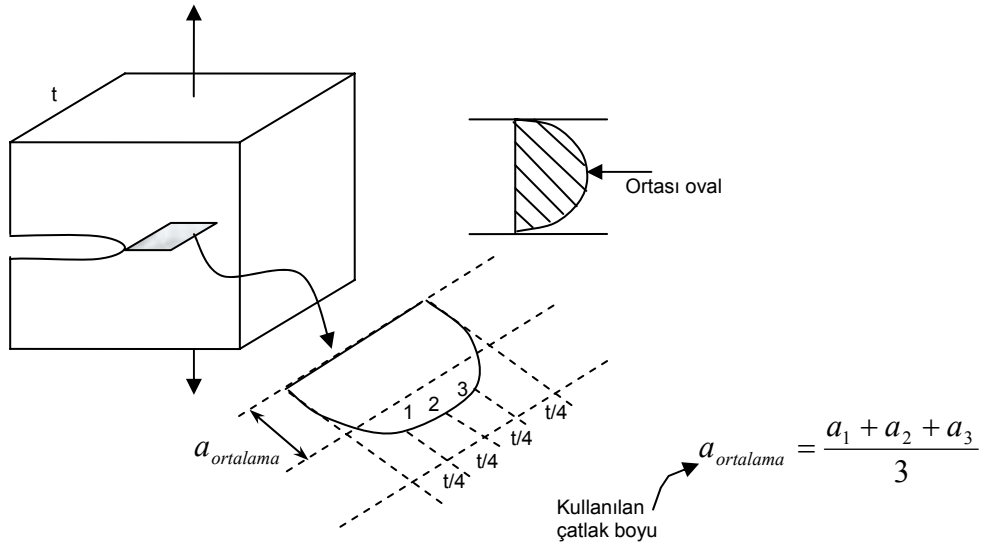


Şekil 2.26. Sabit genlikli yük spektrumu [4]

2.6.4. Çatlak İlerleme Hesabına Tünel Etkisi

Çatlak ucunda düzlemsel gerilme ve ilerleme dağılımı parabolik fonksiyon şeklindedir (Şekil 2.27) . Kenarlarda düzlem gerilme hali oluşuyor. Malzeme buralarda kırılğan davranıyor. Orta kısımda ise düzlem gerilme durum oluşuyor. Malzeme burada ise, sünek davranıyor.

Kalın parçalarda a küçük iken $\frac{da}{dN}$ hatası fazla olabilir. Çünkü “tünel etkisi” nedeniyle hatalı a kullanılabilir.



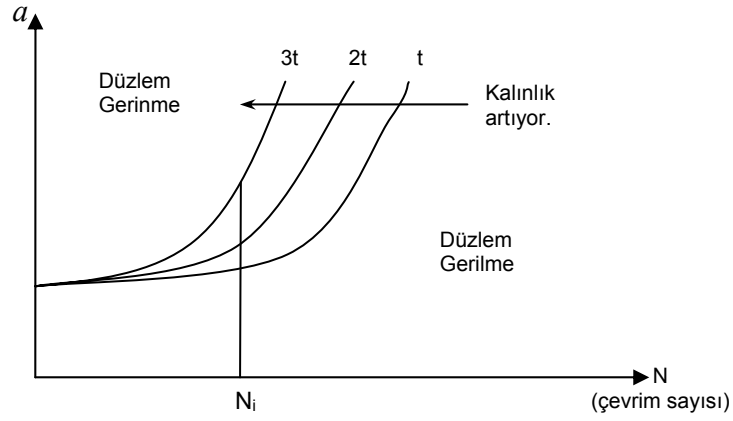
Şekil 2.27. Tünel etkisinin çatlak ucu ilerleme dağılımına etkisi

2.6.5. Çatlak İlerleme Oranını Etkileyen Faktörler

- Malzeme Kalınlığı
- Gerilme Oranı
- Sıcaklık
- Çevre (Nem, Vakum, Kimyasallar... vs.)
- Çatlak Oryantasyonu
- Periyodik Yük Frekansı
- Farklı imalatçılar

2.6.5.1 Malzeme kalınlığı etkisi

Kalınlık arttıkça çatlak ilerleme hızı artıyor. Sebebi ince parçada düzlem gerilme, kalın parçalarda düzlem gerilme oluşmasıdır (Şekil 2.28).

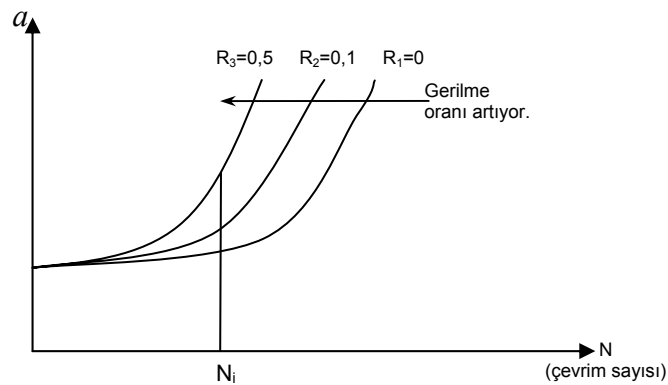


Şekil 2.28. Çatlak ilerlemesine kalınlık etkisi [5]

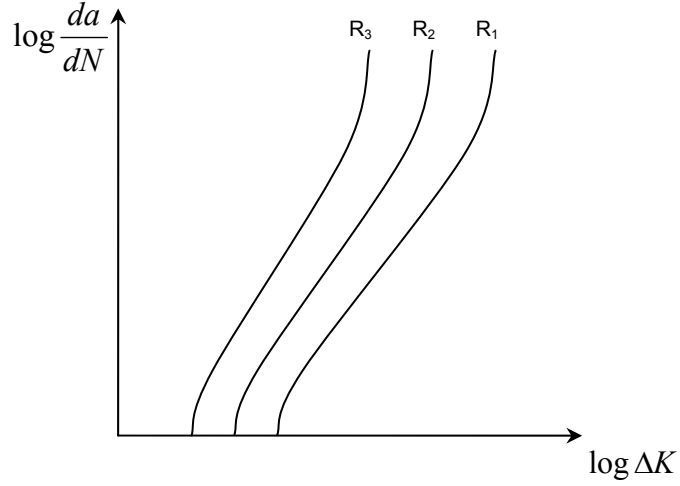
Daha doğru sonuçlara ulaşmak için, analizlerde kullanılan $\frac{da}{dN} - \Delta K$ eğrileri seçilirken, eğrinin oluşturulduğu test kuponlarının kalınlığı analiz yapılacak parça kalınlığıyla aynı olmalıdır.

2.6.5.2 Gerilme oranı etkisi

Gerilme oranı ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) arttıkça çatlak ilerleme hızı artıyor (Şekil 2.29 ve Şekil 2.30).



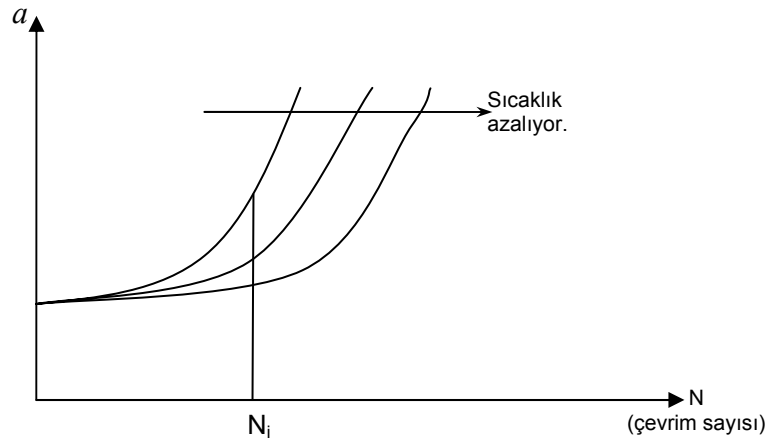
Şekil 2.29. Gerilme oranı artışına göre çatlak boyu-çevrim sayısı grafiği [5]



Şekil 2.30. Gerilme oranı değişimine göre logaritmik ilerleme hızı [5]

2.6.5.3 Sıcaklık

Sıcaklık azaldıkça çatlak ilerleme hızı azalır. Sıcaklıktan etkilenme oranı malzemeye göre değişir (Şekil 2.31).



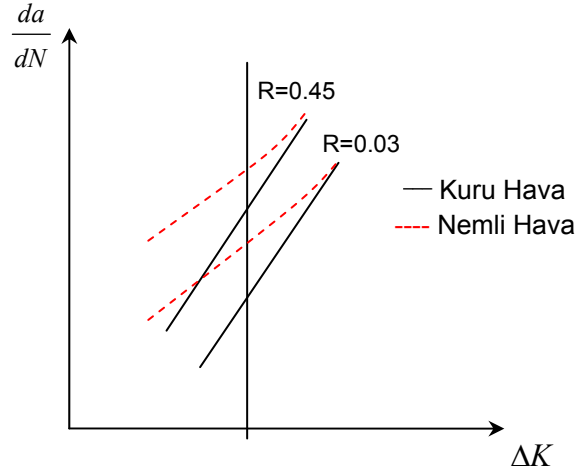
Şekil 2.31. Çatlak ilerlemesine sıcaklık etkisi [5]

Kırılma tokluğu (K_c) değeri de sıcaklıkla düşüyor. $K_c = \sigma\beta\sqrt{\pi a_{Kritik}}$ olduğu göz önünde bulundurduğumuzda, K_c değeri düştüğünde a_{Kritik} değeri de düşmektedir.

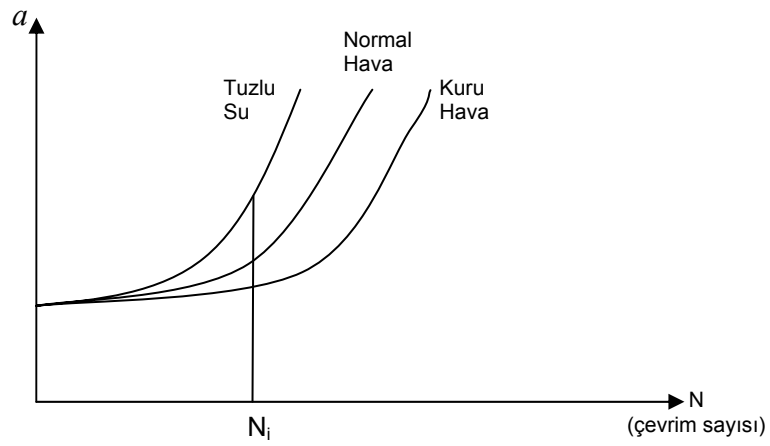
Sadece 2024 Alüminyum Alaşımı için, K_c değeri 20°C ve -65°F arası sıcaklık aralığında fazla değişmez. Bu yüzden dış kaplamalarda kullanılır.

2.6.5.4 Çevre

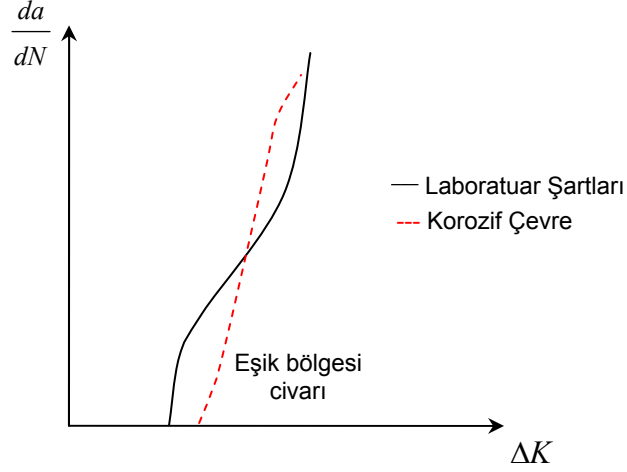
Genel olarak çatlak ilerleme hızı nem ve tuz ile artıyor (Şekil 2.32 ve 2.33). Ayrıca çatlak ucunda korozyon da çatlak ilerleme hızını artırır.



Şekil 2.32. Nemli havanın çatlak ilerleme oranına etkisi [5]



Şekil 2.33. Farklı çevre şartlarının çatlak ilerlemesine etkisi [5]

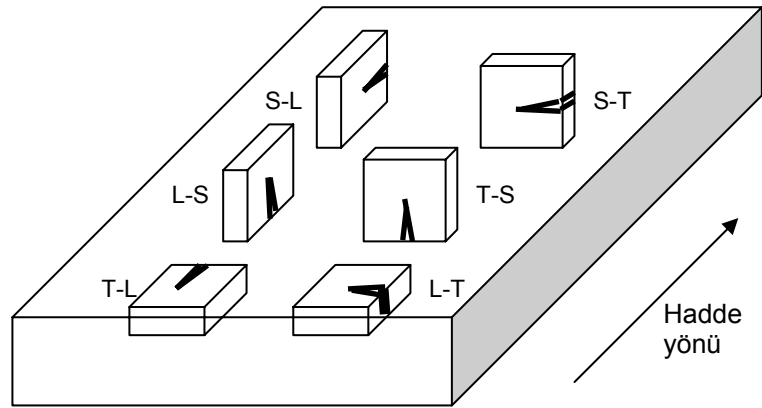


Şekil 2.34. Korozif çevrenin çatlak ilerleme oranına etkisi [5]

Korozif ortam şartlarında çatlak, eşik değeri civarında daha yavaş ilerler. Buna karşın daha sonra korozif etki çatlak ilerleme hızını artırır (Şekil 2.34). Ayrıca frekans etkisi korozyonlu ortamlarda daha belirgin oluşur. Frekans azaldıkça çatlak yüzeyinde korozyon etkisi artıyor.

2.6.5.5 Çatlak oryantasyonu

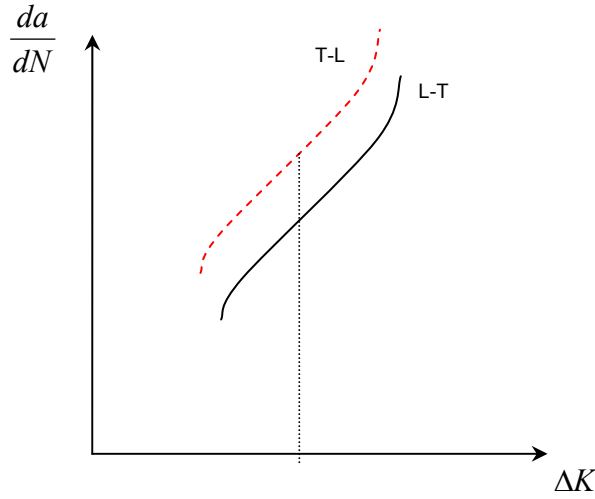
Sac, imalatı sırasında hadde yönü nedeniyle, hadde doğrultusunda sanki fiberler varmış gibi davranır (Şekil 2.35). Bu etki statik mukavemet değerlerinde (E , ν , σ_{akma} , σ_{nihai}) ihmal edilebilir. Gerçekte saclarda ortotropik davranış vardır ve dinamik mukavemet özelliklerini (yorulma/çatlak ilerleme) etkiler.



Şekil 2.35. Sac malzemede çatlak oryantasyonları [2]

Fiber yapılı kompozit malzemelere benzer şekilde, T-L doğrultusunda çatlak hızlı ilerler (Şekil 2.36). Çünkü çatlak fiberler arasında yırtılarak kolaylıkla büyür. Bunun yanında diğer doğrultuda yani L-T doğrultusunda çatlak bu fiberleri keserek ilerlemek zorunda kalacaktır ki, bu da bu doğrultuda çatlak ilerleme hızını düşürecektir. Tasarımda muhtemel çatlak başlangıcına sebep olacak yerleri belirleyip, çatlağın L-T doğrultusunda ilerlemesini sağlayacak şekilde tasarım yapmak gerekiyor.

Bu iki doğrultunun karşılaştırılmasından yola çıkarak diğer doğrultular için de genel bir kural belirleyebiliriz: S-T, S-L, T-L çatlak hızlı ilerlerken, T-S, L-S ve L-T doğrultularında yavaş ilerler.

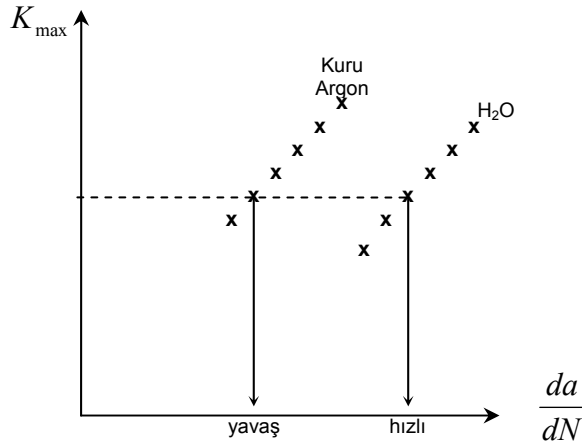


Şekil 2.36. Çatlak oryantasyonunun çatlak ilerlemesine etkisi (Sac Malzeme Şekil 2.35'teki yönler için)

Bunlara ek olarak döküm ve dövmede de imalat şekline göre fiber doğrultusu benzeri malzeme doğrultuları vardır. Örneğin; santrifüj dökme yönteminde radyal yönde malzeme doğrultusu oluşur. Bu yapı kompozit malzemelerdeki fiber yapıya benzerdir. Böylece santrifüj döküm radyal olarak yayılan çatlaklara karşı çok mukavemetlidir.

2.6.5.6 Periyodik yük frekansı

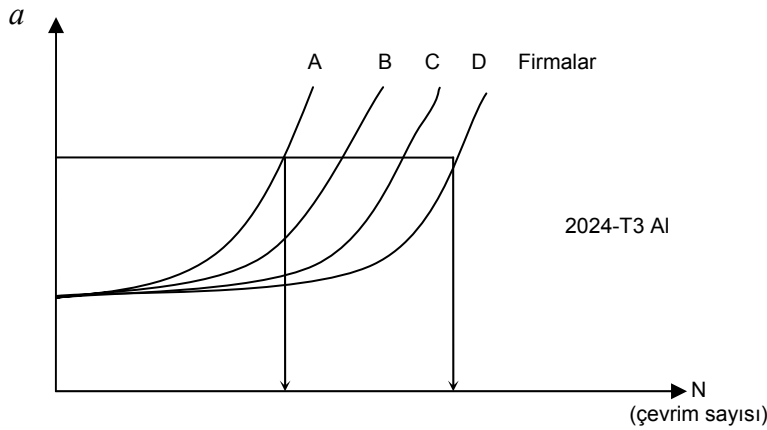
Genel olarak frekans azaldıkça korozyon etkisi artmaktadır; bu etki çatlak ilerleme hızını arttırmaktadır (Şekil 2.37). Dolayısıyla çatlak hızlı ilerliyor. Bunun nedeni frekans azaldıkça çatlak yüzeyleri daha uzun süre korozif maddeye maruz kalıyor olmasıdır.



Şekil 2.37. Frekansın çatlak ilerleme hızına etkisi (Kuru Argon ve Su) [5]

2.6.5.7 Farklı tedarikçiler

Farklı imalatçı firmalar, imalat şartları ve yöntemleri arasındaki farklılıklar nedeniyle farklı çatlak ilerleme hızlarına neden olabilirler. Şekil 2.38'de bir alüminyum alaşımının farklı imalatçı firmalar tarafından imal edilmesi sonucunda çatlak ilerleme hızının değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 2.38. Farklı malzeme imalatçılarının aynı malzeme için çatlak ilerlemesine etkileri [5]

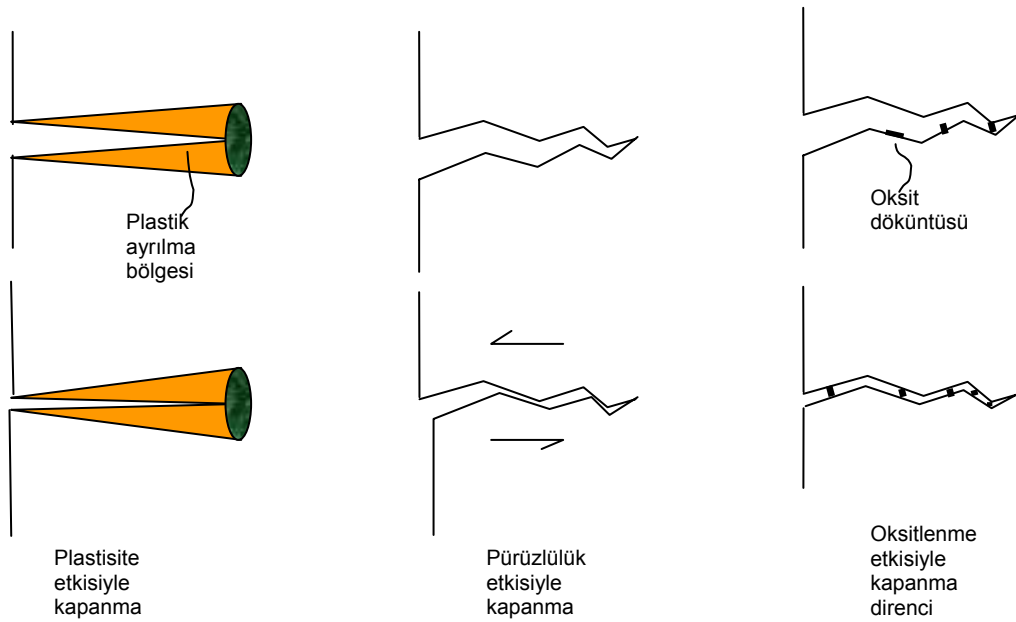
2.6.6. Çatlak açıklığı kapanması

Plastisite etkisiyle çatlak açıklığı kapanma olgusu, ilk olarak Elber tarafından araştırılmış ve çatlak ilerlemesinde yeni kavramlara yol açılmıştır. Daha sonra farklı kapanma mekanizmaları geliştirilmiştir; fakat birçok şartta yine geçerli ilk mekanizma plastisitedir. Yükleme sırasında çatlak ucunda yüksek çekme plastik gerinmeleri oluşur ki; bunlar yük boşalmasıyla yok olmazlar. Böylece çatlak büyür. Bu da ilerleyen çatlağa normal doğrultuda plastik deformasyonların oluşturduğu plastik ayrılmanın oluşmasını sağlar [3].

Eşik çatlak ilerleme bölgesi yakınlarında, pürüzlülük ve oksitlenme etkisiyle oluşan çatlak kapanması öne çıkar. Ayrılma bölgesinde çekme yükleri sırasında, bu iki kapanma mekanizması da plastisite etkisiyle benzer şekilde çatlak kapanmasına neden olur (Şekil 2.39) [3].

Çatlak ilerlemesi düzlemsel değilse ve çatlak ucu ayrılma bölgesinde malzeme uyumsuzluğuna neden olan karma-modlu yükleme söz konusuysa, yüzeyler arasında pürüz nedeniyle temas oluşur ve pürüzlülük etkisiyle çatlak kapanması oluşur [3].

Ayrılma bölgesi yüzeyinde oluşan oksit film tabakası çekme yükleri sırasında çatlak yüzeyleri arasında temas oluşturarak, Oksitlenme etkisiyle çatlak kapanmasına neden olur.



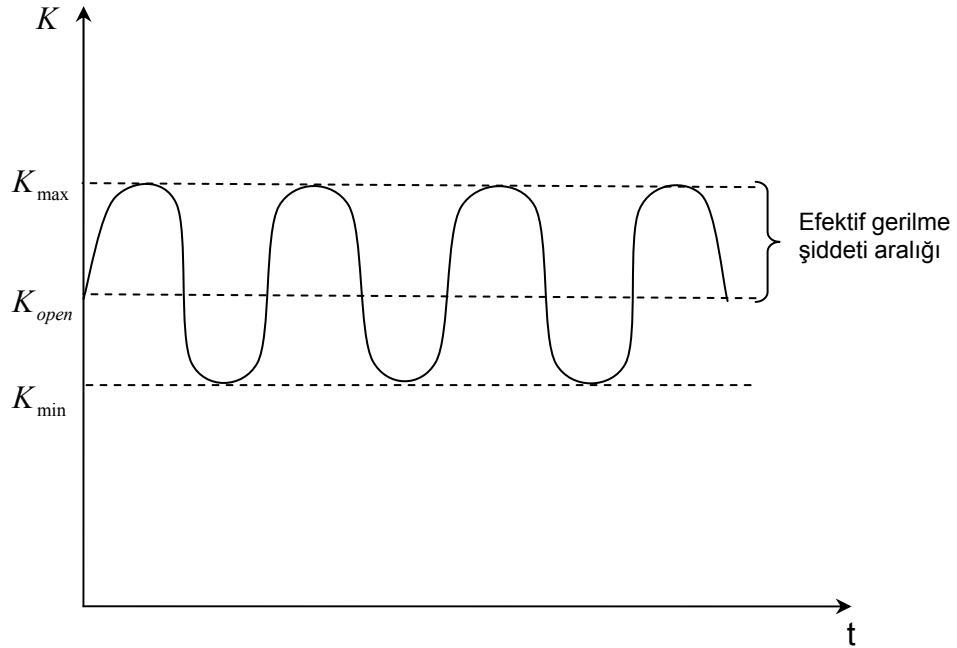
Şekil 2.39. Çatlak açıklığı kapanma şekilleri [3]

Elber, çatlak açıklığı kapanma kuvvetinin, efektif gerilme şiddeti aralığını daraltarak çatlak ilerleme oranının azalttığını öne sürmüştür. Bir test kuponunun K_{max} ve K_{min} arasında değişen periyodik yüklere maruz kaldığını düşünelim. Çatlağın tam olarak açıldığı gerilme şiddeti olan K_{open} değerinin altında çatlak içi yüzeyler temas halindedir. Elber, K_{open} değerinin altındaki çevrimin çatlak ilerlemesine katkısının olmadığını kabul etmiştir. Efektif gerilme şiddeti aralığı (2.39) gibi tanımlanmıştır [3]:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{open} \quad (2.39)$$

Elber, Paris-Erdoğan denklemini efektif gerilme şiddetine göre revize etmiştir.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^n \quad (2.40)$$



Şekil 2.40. Yükleme çevrimi ve Efektif gerilme şiddeti aralığı [3]

Şekil 2.40'deki yükleme çevriminin tek bir gerilme periyodu için plastisite etkisiyle kapanma incelenebilir. Yapı, K_{max} değerine yüklendiğinde çatlak ucunda bir plastik bölge oluşur. Yük boşalması sırasında çatlak ucunda ters plastisite oluşur. Bu ters plastisite çatlak ucunda basma yani kapanma yönünde bir plastik bölge oluşumuyla sonuçlanır. Bu çatlak ucundaki basma gerilme bölgesi sonraki deformasyonları ve çatlak ilerlemesini etkileyecektir. Bu etkiye

iyi bir örnek olarak aşırı yük durumunda çatlak ilerleme gecikmesi gösterilebilir [3].

Rice yaklaşımıyla, bu ters plastisite etkisini Dugdale-Barenblatt bant akma modeliyle inceleyebiliriz. Bu modelin avantajı yükleme ve boşaltma gerilme bölgeleri için süperpozisyon imkânına olanak vermesidir. Yapı, K_{\max} değerine yüklendiğinde oluşan plastik bölgenin boyu aşağıdaki denklemle bulunur (2.41).

$$\rho = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.41)$$

Yük boşalması durumunda basma yönlü gerilme şiddeti, $-\Delta K = K_{\min} - K_{\max}$ olacaktır. Malzeme, basma plastik bölgesinde $+\sigma_{YS}$ değerinden, $-\sigma_{YS}$ değerine yüklenir. Böylece basma akmasıyla efektif akma gerilmesi $-2\sigma_{YS}$ olur. Bu durumda oluşan basma yönlü plastik bölgenin boyu (2.42) ile hesaplanabilir [1].

$$\rho^* = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_{YS}} \right)^2 \quad (2.42)$$

Basma plastik bölgenin boyu, yükleme bölgesinin $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Ancak sonlu elemanlar analizi, daha küçük plastik bölgeyi öngörür.

Newman ve Raju tarafından, sabit genlikli yorulma yüklemesi durumunda, yarı eliptik yüzey çatlakları ve çeyrek-eliptik köşe çatlaklarında daha doğru çatlak ilerlemesi yaklaşımı yapmak için bir "çatlak kapanma faktörü" (β_R) geliştirilmiştir. Bu faktör gerilme şiddetinin (ΔK) bir çarpanı olarak, sadece çatlak açıklığı bir yüzeye açılıyorsa ve gerilme oranının bir fonksiyonuysa kullanılır. $R > 0$ için çatlak kapanma faktörü,

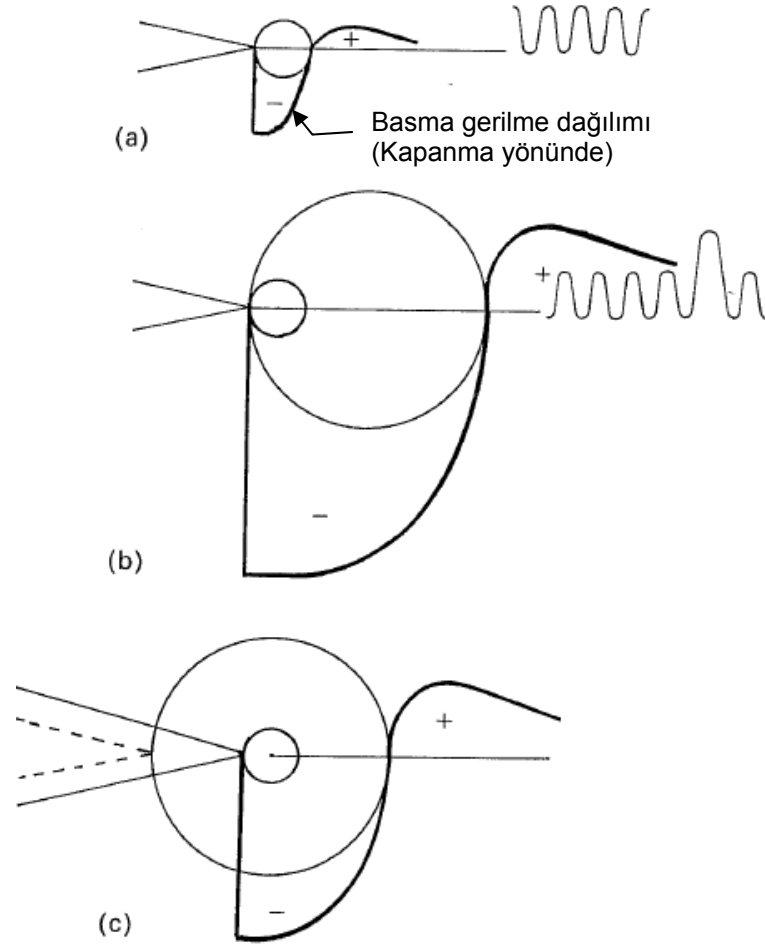
$$\beta_R = 0.9 + 0.2R^2 - 0.1R^4$$

formülünden hesaplanır. $R \leq 0$ için ise; bu faktör 0.9 olarak kabul edilir [1].

2.6.7. Çatlak ilerleme gecikmesi

Yorulma yüklemesinde çatlak ucunda oluşan plastik bölge çok küçüktür. Normal yüklemelerde çatlak ucu plastik bölgesinde oluşan basma gerilme değerleri normaldir ki; en az akma mukavemeti kadardır. Aşırı yükleme

durumunda ise, çok daha büyük bir plastik bölge oluşur (Şekil 2.41). Bununla birlikte daha geniş bir kalıntı gerilme dağılımı oluşur. Bu dağılım çatlak ucunu kapanması yönündedir. Dolayısıyla bir sonraki yüklemde yükün öncelikle bu gerilme dağılımını yenmesi gerekecektir. Bu ise çatlak ilerlemesinin yavaşlamasına neden olur. Aşırı yüklenme nedeniyle, çatlak ucu bölgesinde bu yavaşlatma etkisine “Geciktirme Etkisi” denir. Geciktirme etkisi aşırı yüklenme nedeniyle oluşan plastik bölge tamamen yırtılıncaya kadar devam edecektir.



Şekil 2.41. Aşırı yük öncesi ve sonrasında çatlak ucu kalıntı gerilme dağılımları (a) Aşırı yük öncesi normal yüklenme durumu (b) Aşırı yüklenme durumu (c) Aşırı yük sonrası durum [1]

Bütün bunlara rağmen örneğin uçak tasarımında bir uçağın ömründe birkaç defa maruz kalabileceği çok büyük aşırı yükler ihmal edilir. Böylece tasarımda emniyetli tarafta kalınmış olur.

3. FRANC3D PROGRAMI

FRANC 3D programı üç boyutlu problemler için yazılmış kırılma analizi kodlarından oluşmaktadır (FRacture ANalysis Codes-FRANC). Üç boyutlu gerçekçi bir yapısal simülasyonu yapmak oldukça güçtür. Basit bir analiz programından daha fazlasını gerektirir. Analiz bu simülasyonun sadece bir parçasıdır. Bu analizlerde yapılan mühendislik kabulleriyle gerçek sonuçlara daha kolay ulaşmaya çalışılır. Lineer malzeme ve geometrik kabullerin çok dikkatli yapılması gerekir ki; daha doğru sonuçlara ulaşılsın. Bu nedenle sınır eleman ve sonlu elemanlar yöntemlerinin her ikisinin de temel prosedürleri çok iyi geliştirilmiştir. Bunun sonucu olarak birçok kod oluşturulmuştur [6].

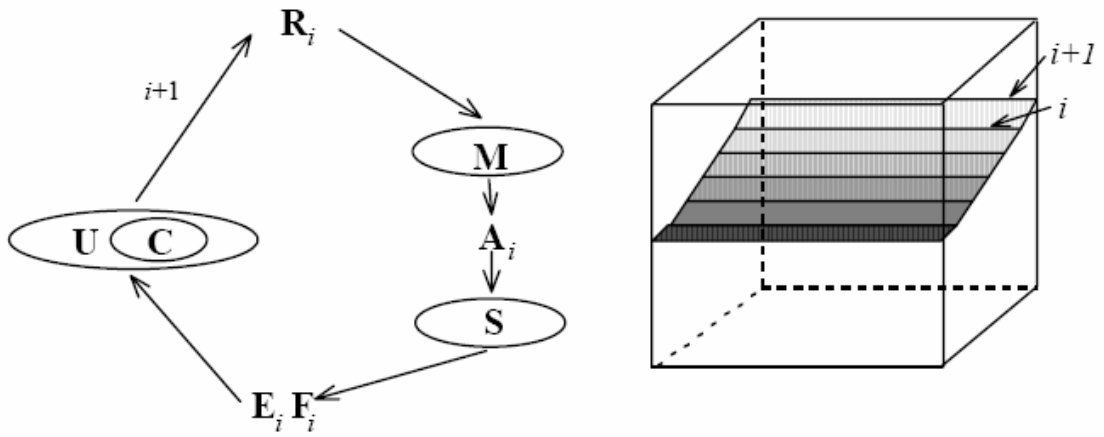
Çatlak ilerleme simülasyonu kademeli bir şekilde gelişen bir süreçtir. Bir çatlak modelinin büyümesi tekrarlayan adımlardan oluşur. Süreçteki her iterasyon bir önce hesaplanan değeri temel alır. Bu süreç her ilerleme adımı için 4 temel veritabanı oluşturma aşamasından oluşur. Birincisi R_i ile gösterilen, temsili veritabanıdır. Bu veritabanı çatlağa sahip bir yapıyı tam olarak tanımlayabilmek için gerekli bilgileri kapsar. Yani veritabanı katı model geometrisini, uygulanan yük ve sınır şartlarını ve malzeme bilgilerini içerir. Temsili veritabanı gerilme analizi için gerekli nümerik bilgileri içermez [6].

Temsili veritabanı ayrıklaştırma işlemiyle, A_i ile gösterilen gerilme analizi veritabanına dönüştürülür. Bütün yapıyı yaklaşık olarak tanımlayan bu veritabanı gerilme analizi programı için uygundur. Gerilme analizi veritabanı tipik olarak alan değişkenlerinin hesaplanabileceği düğüm noktaları kümesinden oluşur. Bir ağ sistemi bu düğüm noktalarını birbirine bağlar. Bu ağ kalıntı gerilme ve gerilme değerlerini hesaplamak için sınır eleman analizi için yüzey, sonlu eleman analizi için hacim şeklinde olacaktır [6].

Sonlu ya da sınır eleman çözüm teknikleri kullanılarak analiz veritabanı denge veritabanına dönüştürülür. Bu veri tabanı E_i ile gösterilir ve yükler, yer değiştirmeler, gerilmeler ve gerilmeleri gibi değişkenleri içerir. Denge veritabanı yapının her noktasındaki değişkenleri ve malzeme bilgilerini içermelidir. Çatlak ilerleme analizinde bu denge veritabanı ayrıca çatlak civarındaki tüm noktalarda gerilme şiddeti faktörü gibi kırılma parametrelerini barındırır [6].

Denge veritabanı temsili veritabanıyla (R_i) bir sonraki temsili veritabanı (R_{i+1}) arasında köprü görevini de görmektedir. Böylece çatlak adımları ilerleyişi durduran bir etkiyle karşılaşınca kadar simule edilmektedir [6].

Çatlak ilerleme simülasyonunda, ayrıklaştırma sonucu oluşturulan bir ağ fonksiyonu (M), temsili veritabanını (R_i) gerilme analizi için uygun bir modele dönüştürür. Gerilme analizi (S) ise bu modeli kullanarak, gerilme ve gerinme gibi değişkenleri (E_i) ve kırılma parametrelerini (F_i) hesaplar. Temsili veritabanını yenileyen U fonksiyonu da çatlak ilerleme şeklini ön görebilen özel bir C fonksiyonunu, değişkenleri ve modeli kullanarak yeni temsili veri tabanını (R_{i+1}) oluşturur [6].



Şekil 3.1. FRANC 3D çatlak ilerleme süreçleri [6]

Bu simülasyonun kullanılabilir bazı sonuçları, nihai çatlak geometrisi, yükleme ve çatlak boyu grafiği, çatlak açılığı profili ve çatlak önü kırılma parametreleri geçmiştir.

3.1. Topoloji

Topoloji geometrik bilgilerin soyutlaştırılarak sentezlenmiş halidir. Bir çok topoloji formu vardır fakat FRANC3D'de bitişik topoloji ele alınmıştır [6]. Bitişik topoloji köşe, kenar ve yüz gibi topolojik temel elemanların komşuluklarını inceler. Bir fiziksel nesne her noktası uzayda tanımlanmasıyla oluşturulan

geometrisi ile ifade edilebilir. Topoloji geometrik bilgilerin bir altkümesidir. Yani geometriden topoloji elde edilebilir fakat topolojiden geometri elde edilemez.

Çatlak ilerleme analizinde açık topolojik bilgiye sahip olmak çok da gerekli değildir. Buna karşın verimli bir topolojik temsil için gerekli olan bazı nedenler vardır.

Topolojik bilgi, yaklaşımda bulunmadan da tam olarak saklanabilir. Buna ek olarak, açık bir topolojik temsil söz konusuysa, geometrik sapmalar olsa dahi, cismin istenilen özelliği temsil edilebilir. Her topoloji sonsuz sayıda geometriyi temsil edebilir. Çatlak ilerleme simülasyonlarında cismin geometrisi her adımda değişir. Buna karşın cismin topolojisi çok az değişim gösterir. Genel yapı değiştirilmeden bölgesel değişiklikler yapılabilmektedir. Bu nedenle topolojik bilgiler geometrik bilgiye göre daha ideal bir temsil imkânı sağlamaktadır [6].

3.2. Topolojiden Ayrılmış Geometri

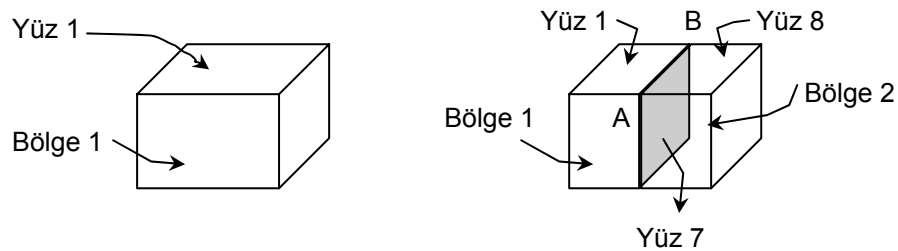
Üç boyutlu bir katıyı tanımlamak için yalnızca topoloji bilgisine sahip olmak yeterli değildir. Geometri hakkındaki bilgi her temel elemanla ilişkilendirilmelidir. Katı modelleme sistemlerinde bitişik topoloji gösterimleri kullanılarak topoloji bir çerçeve olarak ya da tüm geometrik bilgileri bir arada tutan bir yapıştırıcı olarak düşünülebilir. Sistemin veri yapısını düzenleyen bir şema olarak görev yapar. Böyle bir sistemde kartezyen koordinatlar noktalarla, 3 boyutlu eğri eşitlikleri kenarlarla ve 3 boyutlu yüzey eşitlikleri yüzlerle ilişkilendirilirler [6].

Burada kenarların ve yüzlerin düzlem olması gerekli olmadığını belirtilmesi gerekir. Herhangi bir geometrik temsil geometrinin kenarlarını ya da yüzlerini göstermek için kullanılabilir. Geometrinin kenarlarının ya da yüzlerini temel yapılarını göstermek için herhangi bir geometrik gösteri, örneğin eğriler kullanılabilir. Dolayısıyla sonsuz sayıda biçimi bozulmuş geometrik şekli aynı topolojik veriyle tanımlamak mümkündür. FRANC3D şu anki uygulamaları üç ayrı yüzey gösterimini desteklemektedir: Düzlemsel poligonlar, dört köşeli, bi-kübik ve oransız B-Eğrileri ve tri-kübik Bezier eğrileri. Desteklenen kenar temsilleri ise, düz kenarlar ve kübik B-Eğrileridir [6].

3.3. Radyal Kenar Topolojik Veri Yapısı

Temel topolojik elemanların birbiriyle bitişik olma ilişkilerini ifade etmek üzere kullanılacak pek çok veri yapısı mevcuttur. Bu yapılardan en yaygın kullanılanları iki-manifold yüzeyleri üç boyutta modelleyebilmektedir. (Matematikte manifold, birbirine dönüştürülebilir yerel koordinat sistemleri ailesiyle donatılmış topolojik boşluktur.) İki-manifold yüzeyler, bir çokyüzlünün dış yüzeyleri olarak da düşünülebilir. Ancak burada sözü geçen sistem karmaşık üç boyutlu nesnelere içyapılarıyla modellemeyi amaçladığından (çok malzeme çeşidine ve ağ yapısının iç yüzeyleri gibi iç yüzeylere imkân sağlamak için) bu manifold dışı durumları da barındıracak daha gelişmiş bir veri yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Radyal kenar topolojik veri yapısı (Weiler,1986) bu gereksinimleri karşılamaktadır [6].

Şekil 3.2 radyal kenar yapısının bu manifold dışı koşulları ifade mekanizmasını göstermektedir. İki ayrı malzemedan oluşan bir katı 6 yüzlü yapının ifade edilmek istenirse tek bir katıyla modellenemez. Tek bir katı oluşturulmuşsa da topolojik olarak bir yüze eşit bir ara yüz eklenerek, bu kutu iki ayrı bölgeye ayrılabilir. Daha sonra her bölgeye uygun malzeme özellikleri atanır. Eklenen kenarların her birinde manifold dışı bir durum söz konusudur (Örneğin, Şekil 3.2deki AB kenarı). Bu kenar çevresinde radyal kenar yapısı yüzlerin birbiriyle bitişik olup olmama bilgisini kaydeder. AB kenarı boyunca bir çevrim yapılarak bitişik yüzeylerin bir listesi çıkartılabilir.



Şekil 3.2. Manifold dışı koşulda radyal kenar yapısı [6]

Etkileşimli modelleme esnasında böyle karmaşık bir veri yapısının tutarlılığını sağlamak oldukça zor bir iştir. Model oluşturmanın tüm adımları sırasında modelin topolojik uygunluğunu garanti eden operatörler aracılığı ile bu

kontrol sağlanır. Bu operatörler temiz ve tutarlı bir ara yüz yapısını da sağlarlar. Bunun sonucu olarak verimli ve modüler bir sistem meydana gelir. Aynı zamanda topolojik elemanlar arası bitişiklik ilişkisi açık bir şekilde olduğu sürece veri tabanındaki şüpheler her zaman bölgesel oluşacaktır. Bu topolojik eleman sayısı ile doğru orantılıdır. Yani sistem büyük modeller söz konusu olduğunda hızlı tepkiler oluşturur [6].

3.4. Model Özelliklerinin Topolojik Elemanlarla İlişkilendirilmesi

Nümerik modellerle ilişkilen birçok özellik vardır. Bu özellikler, sınır şartlarını, malzeme özelliklerini ve ara modelleme verileri gibi özellikleri içerir. Bilinen sonlu ve sınır eleman programlarında, özellikler ayırıklaştırma sonucu oluşan ağ yapıyla ilişkilendirilir. FRANC3D programında ise; bu özellikler topolojik elemanlarla ilişkilendirilir. Yüzey çekme kuvvetleri yüzlere, malzeme özellikleri bölgelere ve yer değiştirmeler ise köşelere yada kenarlara uygulanırlar [6].

3.5. Topolojik Modellerin Hiyerarşisi

FRANC3D simülasyon sırasında her biri yapının birer radyal kenar topolojik temsili olan hiyerarşik modeller oluşturulur. Orijinal yapıdan özelliklerinde bağlandığı ağ yapıya geçişin basamakları hiyerarşiyi oluşturur.

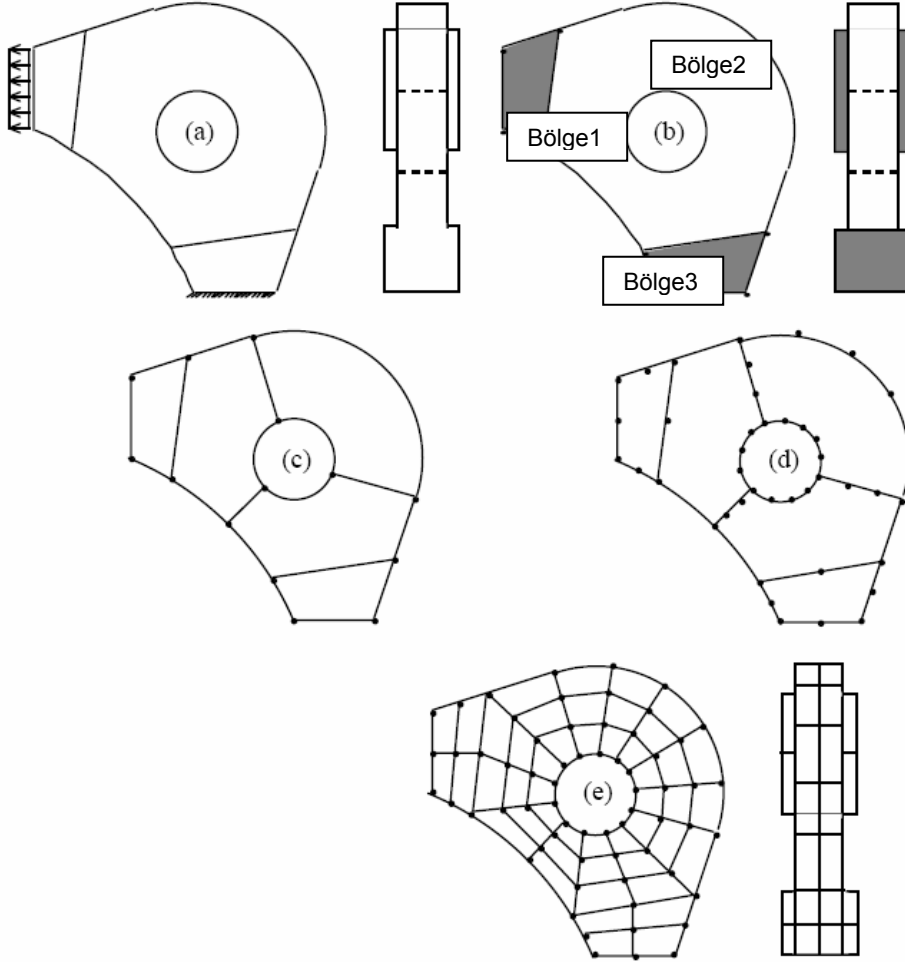
Hiyerarşi aşağıdaki beş modeli içerir (Şekil 3.3) [6]:

- Geometri Modeli (GEO)
- Hacim Ayrılma Modeli (SDM)
- Yüz Ayrılma Modeli (SRG)
- Kenar Ayrılma Modeli (SDV)
- Ağ Ayırıklaştırma Modeli (MSH)

Bu hiyerarşinin iki temel amacı vardır. Bunlardan birisi, sınırlamaları ve model etkileşimlerini sağlamak, diğeri ise ilerleyen analiz sırasında hasarın bölgeselleştirilmesine yardımcı olmaktır.

Ağ modeli yapının geometrisini sağlayacak şekilde sınırlandırılmalıdır. Hiyerarşi sadece geometrinin değil özelliklerin de sağlanmasını sağlar. Gerilme

analizinde tüm bu özelliklere (sınır şartları, geometri ve malzeme özellikleri gibi) ihtiyaç vardır [6].



Şekil 3.3. Sınırlandırılmış model hiyerarşisi a) geometri b) hacim ayrılma c) yüzey ayrılma d) kenar bölünme e) ayrıklaştırmayla ağ yapısı oluşturma [6]

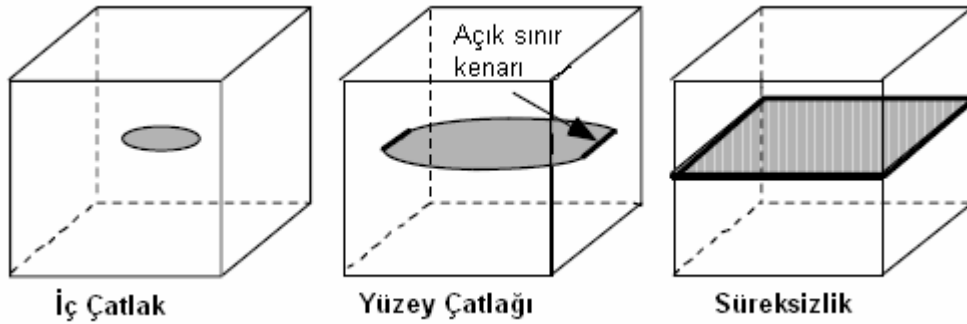
Hasarın bölgeselleştirilmesi ise, artan adımlardan oluşan bir analiz için gereklidir. Adımlarda model yenilendikçe eldeki veriler geçerliliklerini yitirirler. Hasarın bölgeselleştirilmesi ise, bu veri kaybını azaltacaktır. Mesela, çatlak ilerleme analizinde sadece çatlak civarında model yenilemesi yapılır. Yani çatlak etkisinden uzak yerlerde her adımda ağ yapısını bozup, tekrar ağ yapısını oluşturmaya gerek yoktur [6].

3.6. Çatlakların ve Çatlak İlerlemesinin Topolojik Temsili

Çatlaklar geometrik seviyede oluşurlar, fakat her geometrik şeklin alt seviyelerde bir karşılığı vardır (ayrıklaştırılmış katı elemanların, bir hacme karşılık gelmesi gibi). Çatlak ilerlemesi orijinal model geometrisini değiştirmesi nedeniyle tüm hiyerarşik seviyeleri etkiler. Buna karşın sadece çatlak civarındaki elemanlar direk olarak etkilenecektir [6].

Çatlaklar yüzler, köşeler ve kenarlardan oluşmaktadır. Bir çatlak genellikle bir temel bir de eş yüzeyden oluşur. Bu çatlak içi yüzeydeki her yüzün, kenarın, köşenin bir eşi vardır. Sadece çatlak ucundaki kenar ve köşeler tektir. Bu elemanların konumları çatlak kodlarını oluşturur. Temel ya da eş yüzler çatlak kodlarının yarısını oluşturur. Diğer yarısı ise, çatlak yüzeyi, kenarı ve çatlak ucu tanımlarıyla belirtilir [6].

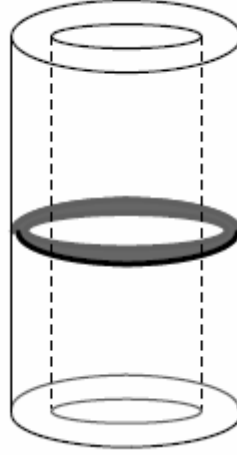
Çatlak iç ya da yüzey çatlağı olabilir. İç çatlaklar yapının yüzeyiyle kesişmezken, normal olarak yüzey çatlakları en az bir sınır yüzeyle kesişmelidir. Bir iç çatlak ilerleyerek yüzeye ulaştığında yüzey çatlağı olarak değerlendirilir. Sonuç olarak tüm çatlak ön kenarları sınırlayıcı yüzeylere ulaştığında tam bir süreksizlik oluşturabilir (Şekil 3.4). Dolayısıyla üç boyutlu bir çatlak ya da süreksizlik sıfır, bir ya da bir kaç çatlak ucuna sahip olabilir [6].



Şekil 3.4. Bir iç çatlağı ilerledikçe yüzey çatlağı ve son olarak süreksizlik haline gelmesi

Bir iç çatlak kenarları tamamen yüzey içerisinde kalan kapalı bir çevrim oluştururken bir yüzey çatlağı yüzey üzerinde birkaç açık sınıra ve yapı içerisinde çatlak ön kenarlarına sahiptir. Çevresel olarak çatlamış bir çubuk ya da silindirde olduğu gibi bir yüzey çatlağı da kapalı bir çevrim oluşturabilir. Çatlak çeşitlerinde bir ayırım yapılması gereklidir. Çünkü çatlak ilerlemesine

yönelik topolojik işlemler farklıdır. Kapalı bir çevrim oluşturan yüzey çatlaklarının ilerlemesi iç çatlak ilerlemesiyle benzerlik gösterir ve aralarındaki tek fark bu çatlakların yapıyı sınırlayan yüzeylere doğru değil de yapı içine doğru ilerlemesidir (Şekil 3.5). Topolojik işlemler benzerdir, çünkü kapalı bir çevrim olduğundan dolayı açıkça tanımlanmış bir çatlak ucu yoktur [8].



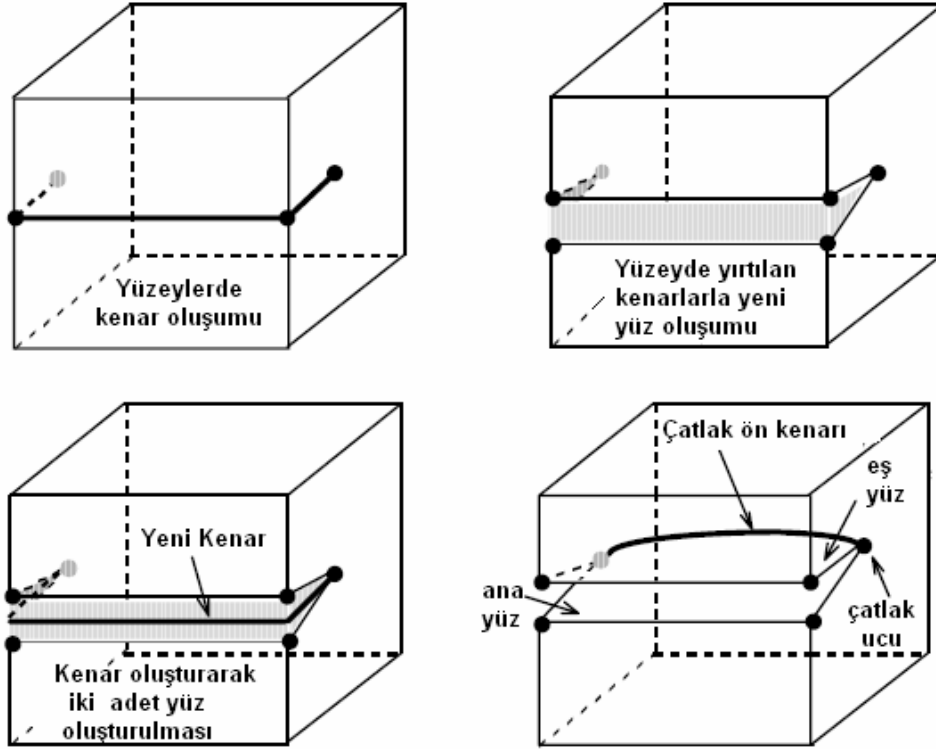
Şekil 3.5. Kapalı bir çevrim oluşturan yüzey çatlaklarını gösteren çevresel olarak çatlamış bir silindir

3.7. Çatlak İlerlemesinin Topolojik Gösterimi

Eğer çatlak ilerleyecekse en az bir çatlak önü hareket etmelidir. Eğer tek bir çatlakta birden fazla çatlak önü varsa, her biri ayrı ayrı denenmelidir. Çatlak önü hareket ettikçe şekil boyut ve oryantasyonu değişebilir. Tek bir çatlak önü model yüzeyiyle kesişebilir ve açık sınır kenarları tarafından bölünmüş birkaç küçük çatlak önü bölgesi oluşturabilir. Bitişik çatlaklardaki çatlak önleri tek bir çatlak oluşturacak şekilde birleşebilir. Sonuç olarak çatlak tam bir süreksizlik halini aldığı anda tüm çatlak önleri yok olabilir. Dolayısıyla çatlak ilerlemesini simule edecek çalışma yöntemi burada değinilen tüm konuları kontrol altında tutabilmelidir [6].

Çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi iki şekilde yapılır. Bunlardan birisi, Martha (1993) tarafından açıklanan manifold yırtılma operatörü (kenar yırtıp, yüz ve çerçeve oluşturmak) diğeri ise; Carter (1994) tarafından anlatılan genel amaçlı yırtılma operatörü kullanılarak yapılır. İlk metod, manifold yüzeyleri üzerindeki manifold grubu kenarlardan oluşturulabilen çatlak topolojileri ile

sınırlandırılmıştır. Bir manifold kenarı sadece iki yüzün kenara doğru çerçeve yaptığı anlamına gelir. Bir yüzey üzerinde bulunan kenarın diğer yönlerden onu çerçeveleyen yüzü yoksa bu da bir manifold oluşturur.



Şekil 3.6 Manifold yırtılma operatörü kullanarak parça boyunca yüzey çatlakları oluşturmak için süregelen manifold işlemleri

Parça boyunca ve büyük yüzey çatlaklarının oluşumu manifold yırtılma operatörünü kullanır. Parça boyunca bir çatlak için yüzey üzerinde kenarlar, yeni bir yüz ve iki grup kenar arasında bir çevrim oluşturacak şekilde yırtılır (Şekil3.6). Bu yüzeye bir grup kenar ucundan diğer uca kadar uzayan yeni bir kenar eklenerek çatlak ön kenarı yaratılır. Bu kenarın eklenmesi orjinal yüzü iki ayrı yüze böler. Bu iki yüz ana ve eş olmak üzere iki çatlak yüzeyini ifade eder. Çatlak geometrisi, çatlak yüzeylerini de tanımlayan çatlak ön kenarı geometrisinin belirlenmesiyle tamamlanır. Büyük çatlaklar benzer şekilde meydana getirilir. Ancak kenar ve yüz sayısı fazladır.

3.8. Genel Amaçlı Yırtılma Operatörleriyle Çatlak İlerlemesi

Bir iç çatlak manifold olmayan bir yapı meydana getirir. Manifold yırtılma operatörü çatlakların etkileşimli bir şekilde ilavesinde kullanılamaz. Ancak çatlak geometrisi dış bir metotla oluşturup ilk model geometrisiyle veri tabanına okutulabilir. Bir iç çatlak, geometri oluşturulduktan sonra topolojik yüzlerin geometrik tanımları uzatılarak ya da değiştirilerek ilerletilebilir.

Manifold yırtılma operatörü aynı zamanda karmaşık, düzlemsel olmayan çatlakların oluşturulmasında ve ilerlemesinde sınırlayıcıdır. Bir iç çatlağın model yüzeyine ilerletilmesi dolayısıyla birkaç çatlak önüne sahip bir çatlak oluşturulması mümkün değildir. Sonuç olarak manifold yırtılma operatörü kullanılarak bir süreksizlik oluşturulamaz. Malzeme ara yüzü boyunca da bir çatlak oluşturulamaz. Manifold yırtılma operatörü ile bölünen ve kesişen çatlaklar yaratılamaz, çünkü ya sonuçta oluşan çatlak manifold olmayacak yada ara adımlarda manifold olmayan bir topoloji oluşturulacaktır. Bu tip çatlaklar manifold olmayan bir operatör gerektirir.

Manifold yırtılma operatörünün bütün bu kısıtlarına karşın, FRANC3D'de geliştirilmiş olan radyal kenar veri yapısı karmaşık çatlak yapılarınının topolojilerini de temsil edebilmektedir.

3.9. Üç Boyutlu Çatlak İlerleme Tekniği

Üç boyutlu çatlak ilerleme simülasyonu, birden fazla çatlak olması, düzlemsellik, topoloji ve geometri etkilerini içeren fizik ve matematik işlemlerinin bir bütünüdür.

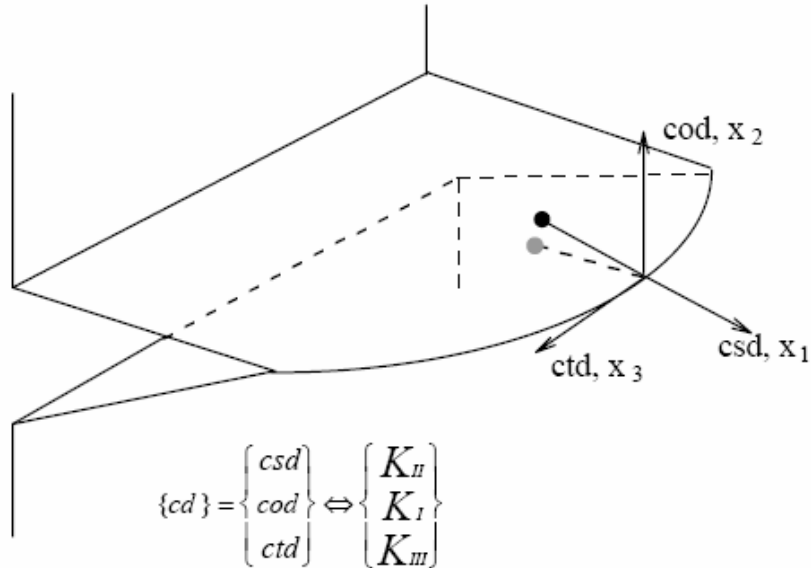
FRANC3D programı bir çeşit üç boyutlu çatlak ilerleme tekniğini kullanır. Bu teknikte gerilme şiddeti faktörleri, bir yer değiştirme korelasyon tekniği kullanılarak hesaplanır. Çatlak önündeki ayrık noktalarda iki boyutlu düzlem gerilme denklemlerini kullanarak çatlak ilerleme yönü elde edilir. Çatlak ilerlemesi ise, klasik Paris-Erdoğan denklemi ve ya bu denklemin geliştirilmiş versiyonları kullanılarak hesaplanır. Serbest yüzeyler, malzeme ara yüzleri ve diğer çatlakların etkisi göreceli uzaklıklarına göre hesaba katılır [6].

Gerilme şiddeti faktörünün sayısal çatlak ilerleme simülasyonundan çıkartılması için birçok yöntem vardır. FRANC3D programının yer değiştirme korelasyonunu kullanmasının nedenleri; düzlemsel olmayan çatlak geometrilerinin de kolayca temsil edilebilmesi ve basit bir yöntem olmasıdır [6].

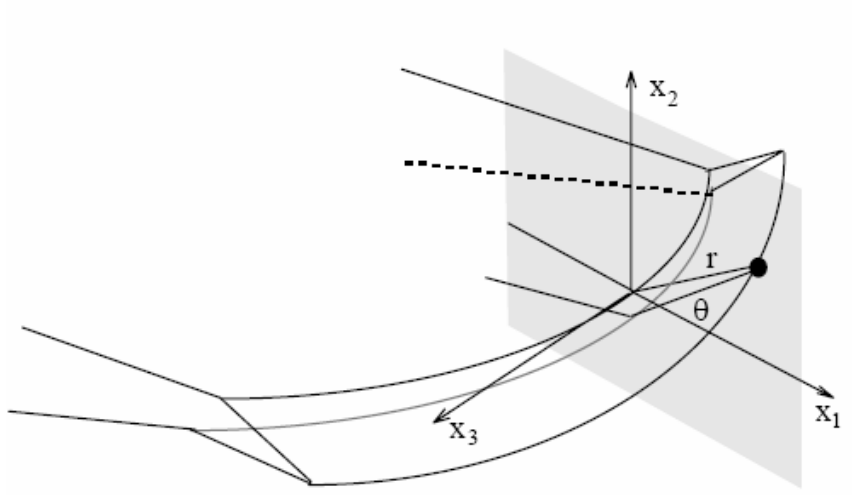
Sadece Mode I yükleme durumunda çatlak simetrik ve doğrusal bir düzlemde ilerleyecektir. Mode II yükleme durumu ise; çatlak önünün eğilmesine neden olacaktır. Düzlem kayması yüklemesi olarak da bilinen bu durumda çatlak düzlem boyunca ilerleme doğrultusundan sapacaktır. Mode III yükleme durumunda ise; çatlak burularak ilerler. Bu üç mod için üç gerilme şiddeti faktörü vardır.

Çatlak yüzeyindeki yer değiştirmeler bu üç gerilme şiddeti faktörüyle direkt olarak ilişkilidir (Şekil 3.7). Çatlak önünden belirli uzaklıktaki noktalarda hesaplanan enterpolasyon değerleri bu yer değiştirmelerin temelini oluşturur [6].

İki boyutta düzlem gerilme denklemleri çatlak ilerlemesinin yönünü belirlemek için, çatlak önü teğetine normal yönündeki düzlemde uygulanır. Tüm çatlak önü uzaması, göreceli gerilme şiddeti faktörü ve analizcinin belirlediği maksimum uzama değeri temel alınarak hesaplanır. Yeni çatlak önü ise; hesaplanan yön ve uzama değerleriyle belirlenir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Çatlak önünden belirli uzaklıktaki çatlak yer değiştirmeleri (Çatlak önü gerilme şiddeti faktörleriyle direkt olarak ilişkilidir.)[6]



Şekil 3.8. Çatlak önündeki noktalar kullanılarak üç boyutlu bir çatlağın, çatlak önü normaline doğru düzlemde iki boyutlu yaklaşımla iletilmesi [6]

4. ÇATLAK İLERLEME ÖRNEĞİ

Çatlak başlangıç safhası için oluşturulan modellerin amacı verilen geometri ve malzeme bilgisine göre yük spektrumunu yorulma ömrüne dönüştürmektir. İlk olarak parçanın kritik bölgesi belirlenir, tabii ki gerilme yığılmasına bakılır. Bu aşamada gerilme ve gerinme değerleri bulunur.

İkinci aşamada önceden kritik bölgede belirlenen gerilme ve gerinme değerleri hasar hesaplarında kullanılır. Çatlağın meydana getirdiği bu hasar çatlak başlangıcı için kritik değerlere ulaşınca kadar büyür. Hertzberg ve Riberio gibi bazı araştırmacılar bu başlangıç safhasını çatlağın 0.25 mm boya kadar büyümesi olarak tanımlarlar [7].

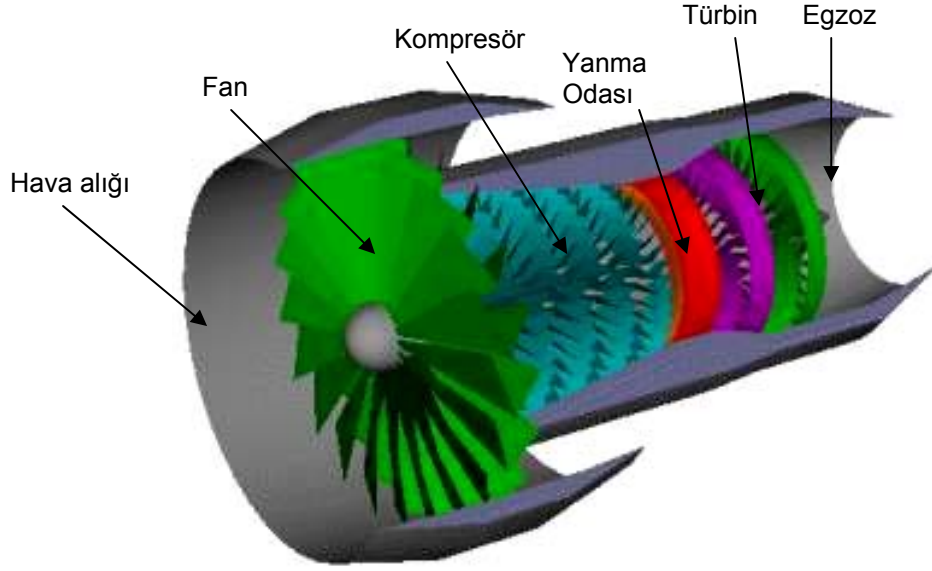
Bu anlatılan yöntem direk metottur. Hasar bölgesel gerilme ve gerinme değerleri kullanılarak doğrudan hesaplanır. Bu yüzden lokal metot olarak da bilinir [7].

Diğer taraftan karşıt olarak, endirekt metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlarda harici gerilme ve gerinme değerlerinden dolayı olarak hasar hesaplanır. Bu değerlerin hesaplanmasında çentik etkisinden kaynaklı gerilme yığılmaları göz önüne alınır [7].

4.1. Problemin Tanımı

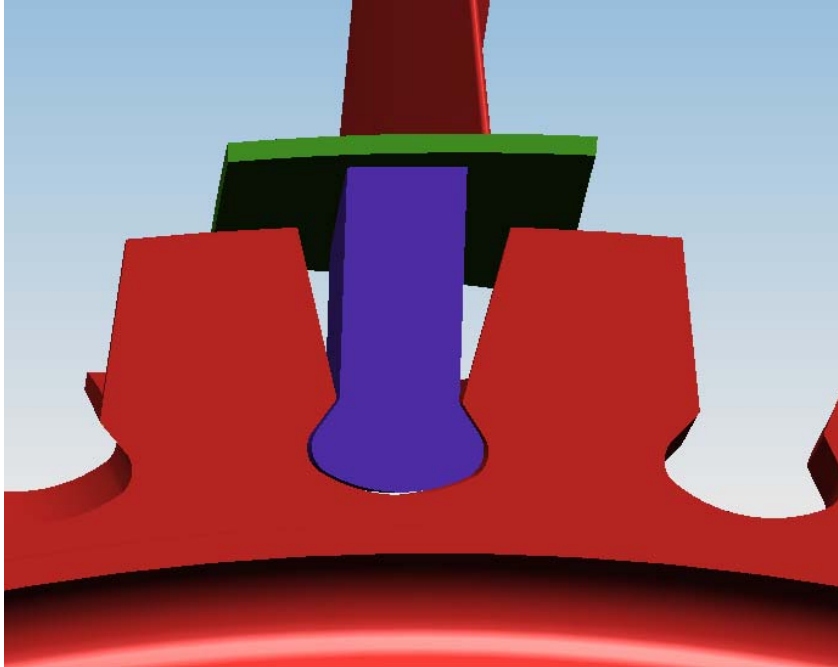
Gaz türbinli motor, çok yalın bir tabirle; yakıtı hava ile yakarak elde ettiği ısı enerjisini kinetik enerjiye dönüştüren bir makinedir. Bu motor genel olarak havanın içeri alındığı “Hava Alığı”, alınan havayı sıkıştırıp, basınçlandıran “Kompresör”, sıkıştırılan havayla yakıtın yandığı “Yanma Odası”, elde edilen enerjinin kinetik enerji olarak aktarıldığı “Türbin” ve gazın dışarı atıldığı “Egzoz” kısımlarından oluşur (Şekil 4.1).

Gaz türbinli motorların bir çeşidi olan turbofan motorlarda itkinin büyük bir bölümü düşük basınç türbininden tahrik alan, fan tarafından sağlanır. Fanın da ana yapısını, kompresör ve türbin gibi yüksek hızlarda dönen parçalar oluşturur. Bu parçalara “rotor” adı verilir. Fan rotoru basit olarak bir disk ve buna bağlı fan palalarından (fan kanatçıkları) oluşur.



Şekil 4.1. Gaz türbinli bir motor çeşidi olan turbofan motorun genel şekli

Bu örnekte yüksek açisal hızda dönen ikinci kademe bir fan diskinin yapısal analizi ve bu diskte oluşabilecek çatlakların ilerleme analizi yapılmıştır. Fan palaları pala köklerinden diske, disk üzerinde açılmış kırlangıç kuyruğu (dovetail) şeklinde yuvalar vasıtasıyla monte edilir. Bir fan diskin kesiti Şekil 4.2'deki gibidir.



Şekil 4.2. Kırılğıç kuyruğu şeklindeki pala yuvası ve montajı

4.2. Yöntem

İkinci kademe bir fan diskinin bilgisayar ortamındaki üç boyutlu modeli, Unigraphics (UG) paket programı kullanılarak çizilmiştir (Şekil 4.3).

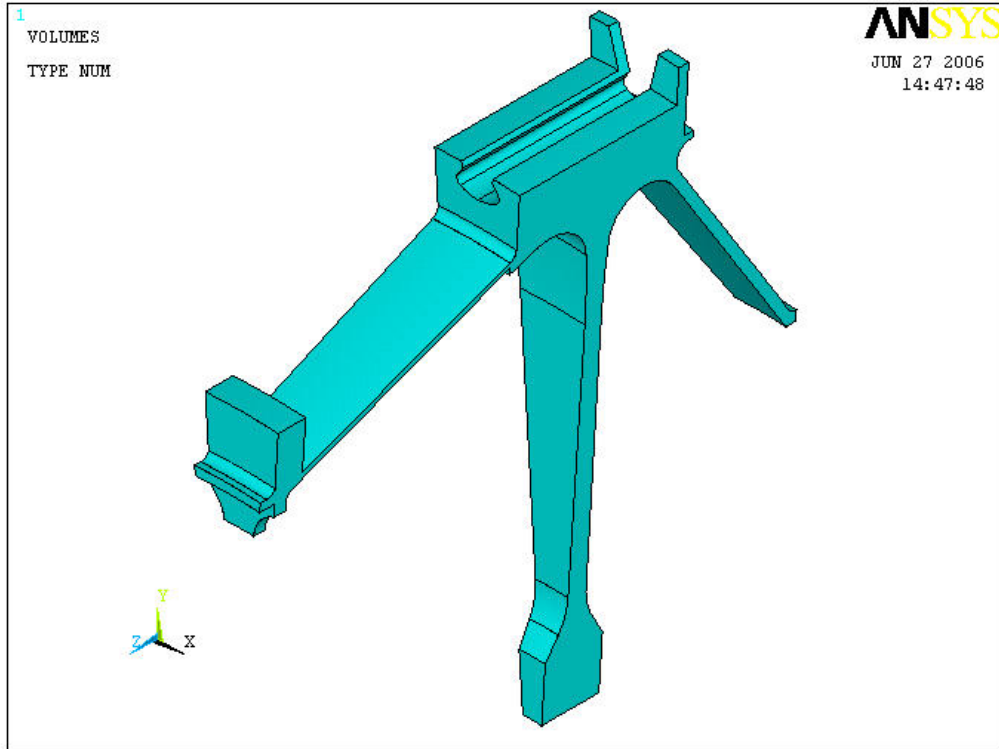


Şekil 4.3. Fan diski üç boyutlu modeli (Unigraphics Programında)

Oluşturulan üç boyutlu model (Şekil 4.3), daha kolay sonuca ulaşmak için Unigraphics programında birbirinin aynısı olan 48 parçaya bölünmüştür (Şekil 4.4). Bölünme işlemi silindirik koordinatlarda radyal olarak yapılmıştır. Model bölündükten sonra elde edilen model, parçasının simetrik olarak tüm modeli simule edebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca analizde kullanılmayacağı için deliklerde kaldırılarak model sadeleştirilmiştir. Modeli sadeleştirerek bir birim model elde etmek zaman kazancı ve işlem imkânı olarak fayda sağlayacaktır.



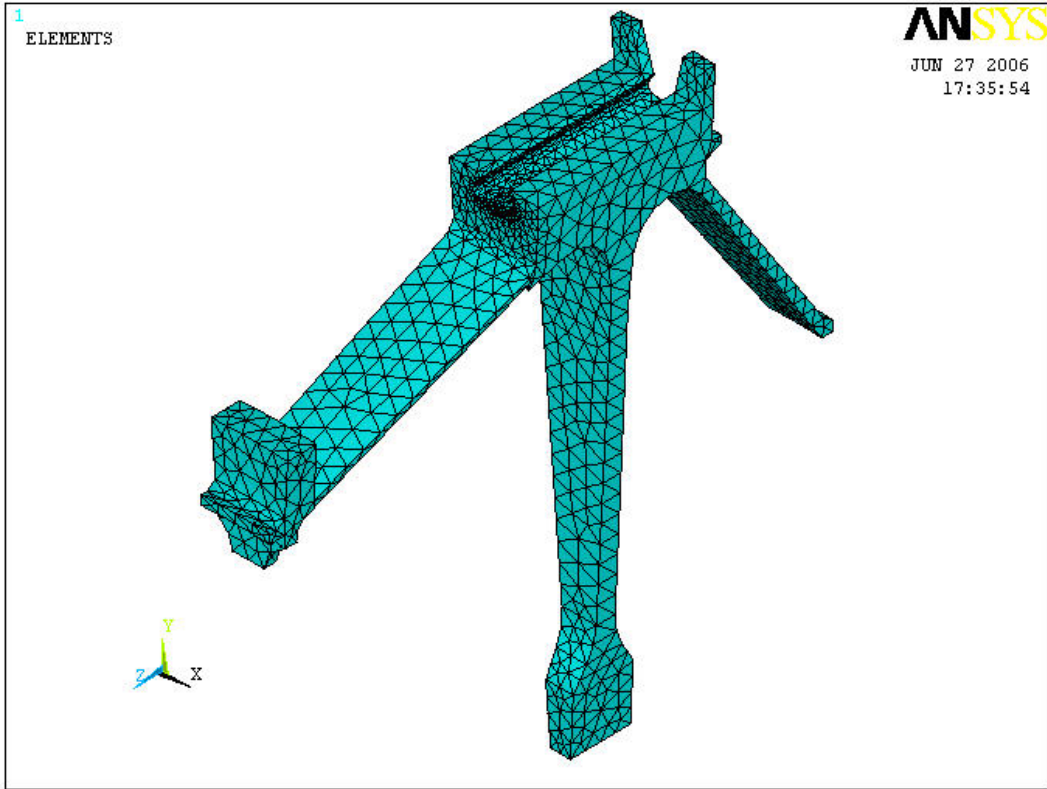
Şekil 4.4. Fan diski modelinin 48 eş parçasından bir tanesi (Unigraphics programında 7.5 derece ile silindirik koordinatlarda kesilmiştir)



Şekil 4.5 ANSYS programına aktarılmış yalın model

Elde edilen bu yalın model ANSYS programına aktarılmıştır (Şekil 4.5). Burada disk global kartezyen koordinatlara göre z-ekseni motor eksenine olacak şekilde konumlanmıştır.

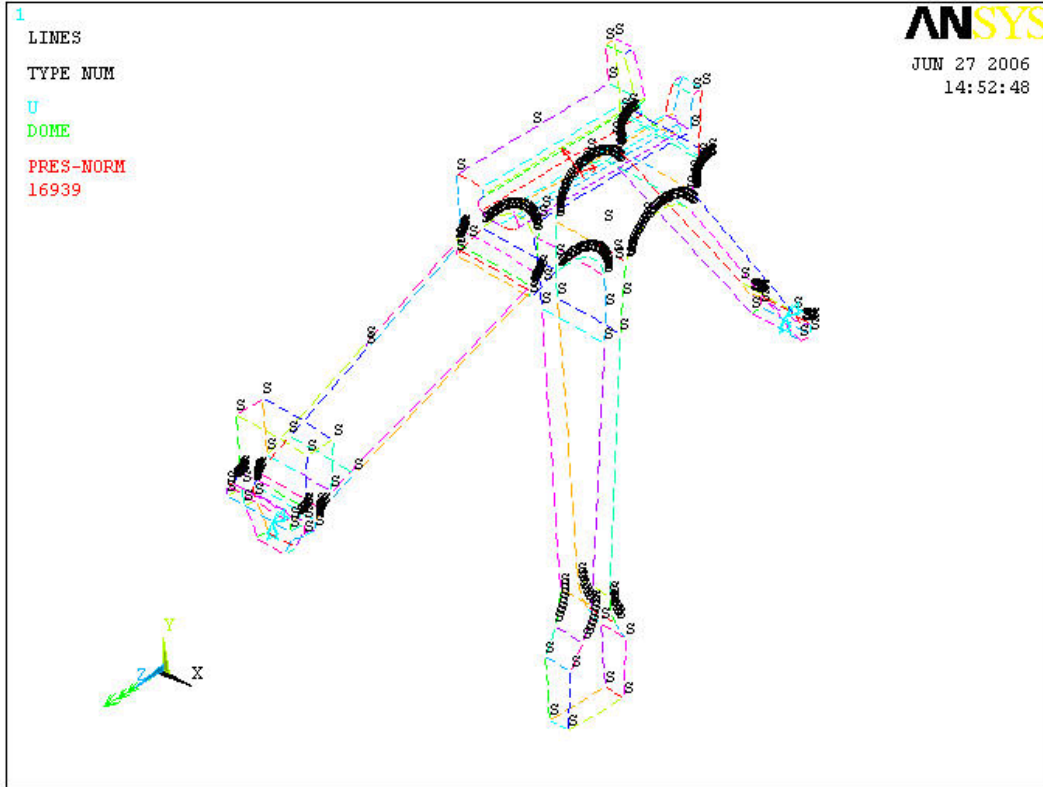
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çalışan ANSYS programının analiz yapması için sonlu elemanlardan oluşan bir modele ihtiyaç vardır. Bu ağ model ANSYS programı içerisinde oluşturulur (Meshleme işlemi). Bu modele yapının “Sonlu Elemanlar Modeli” denir (Şekil 4.6). Burada sonlu eleman olarak SOLID92 kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Yalın model kullanılarak oluşturulmuş sonlu elemanlar modeli

Bütün bunlarla birlikte, bölünen model parçasının tüm modeli temsil etmesi için gerekli sınır şartları verilmelidir ki; birim model tüm modeli temsil edebilsin. Bu nedenle modelde bölünen simetri alanlarına “Simetri Sınır Şartı” uygulanmıştır (Şekil 4.7). Simetri sınır şartı gerçek modelde yüzeyin karşısında düzleme göre simetrik elemanların bulunduğu bilinen yerlere uygulanır. Simetri sınır şartı, düzleme normal doğrultuda yer değiştirmeleri sınırlarken, elemanlarda rotasyon serbestlik dereceleri varsa; düzlem dışı rotasyonları da sınırlar.

Ayrıca flanşlar da diğer kademelere bağlantı yerleri olduğu için bağlantı alanlarına da sınır şartı tanımlamak gerekir. Bu nedenle flanş bağlantı yüzeylerine aksenal (z-ekseni yönünde) yer değiştirme kısıtı verilmiştir (Şekil 4.7) . Buradaki analizden farklı olarak flanş civarında daha doğru bir yaklaşım için diğer kademeleri, bağlantı elemanlarını ve kontak yüzeyleri de modellenebilir.



Şekil 4.7. Sınır şartları ve yükler uygulanmış modelin çizgilerle gösterimi

Diskin çalışma şartlarını temsil etmek için söz konusu modele, global koordinatlarda z eksenini etrafında diskin açısal dönme hızı olan 8300 RPM yani 869 rad/s açısal hız verilmiştir. Buna ek olarak diske monte edilen fan palalarının pala yuvasına uyguladığı yayılı yük temas yüzeylerine basınç olarak uygulanmıştır. Bu basınç kuvvetini hesaplamak için pala geometrisi ve malzeme bilgisinden faydalanılmıştır.

Palalar ve disk aynı malzemedен modellenmiş olup, ikisi de Titanyum alaşımıdır (Ti-6Al-4V:MA(1350°F/2h)). Malzeme özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Yoğunluk: $d = 0.0004425861 \text{ lb.s}^2/\text{inç}^4$
- Maksimum çekme mukavemeti (akma sınırı): $\sigma_y = 145 \text{ ksi}$
- Poisson oranı: $\nu = 0.33$
- Young Modülü: $E = 1.65e+07 \text{ ksi}$

UG programında çizilen palanın hacmi ($V=1.981 \text{ inç}^3$) bulunduktan sonra yoğunluğu kullanarak, (4.1) ile kütlesi hesaplanır:

$$m = d.V \quad (4.1)$$

$$m_p = 0.0004425861 \times 1.98$$

$$\blacktriangleright m_p = 0.000877 \text{ lb.s}^2/\text{inç}$$

Fanın dönme hareketi nedeniyle palanın oluşturduğu merkezci ivme açısal hız (ω), pala kütlesi (m_p) ve açısal hareket yarıçapıyla (r) orantılıdır. Açısal hareket yarıçapı, palanın ağırlık merkezinin motor eksenine (z-ekseni) olan uzaklığıdır ve $r = 12.9 \text{ inç}$ olarak bulunmuştur. Bu veriler doğrultusunda merkezci ivme (4.2) denklemleriyle hesaplanır (Şekil 4.8).

$$a_m = \omega^2 r \quad (4.2)$$

$$\blacktriangleright a_m = 9741576.9 \text{ inç}(\text{rad/s})^2$$

Hesaplanan merkezci ivme kullanılarak, palanın diske uyguladığı kuvvet bulunur.

$$F_m = m_p \times a_m \quad (4.3)$$

$$\blacktriangleright F_m = 8548.9 \text{ lb}$$

Bu kuvvet diskteki her fan yuvasındaki iki adet A alanına etkir. Etkiyen kuvvetin alanlara dik bileşeni Şekil 4.8'deki vektörlerle hesaplanır.

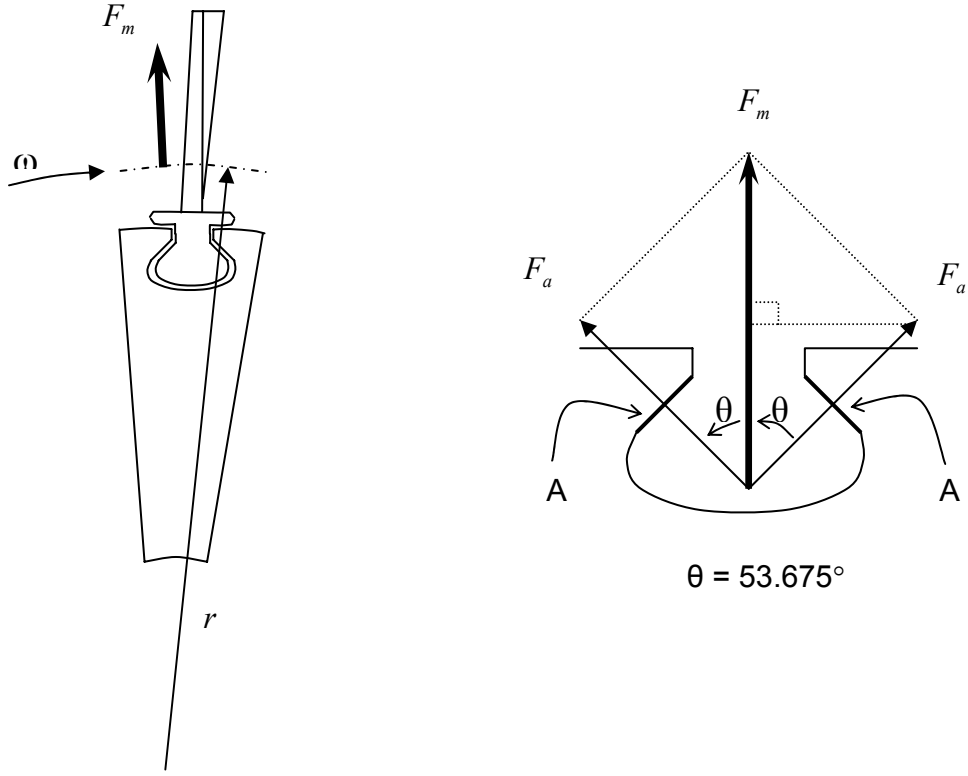
$$F_a = F_m / (2 \cos \theta) \quad (4.4)$$

$$\blacktriangleright F_a = 7216 \text{ lb}$$

Bu kuvvet $A = 0.426 \text{ inç}^2$ alanına etkir. Bu alan üzerindeki yayılı yük (4.5) ile hesaplanabilir.

$$P = \frac{F_a}{A} \quad (4.5)$$

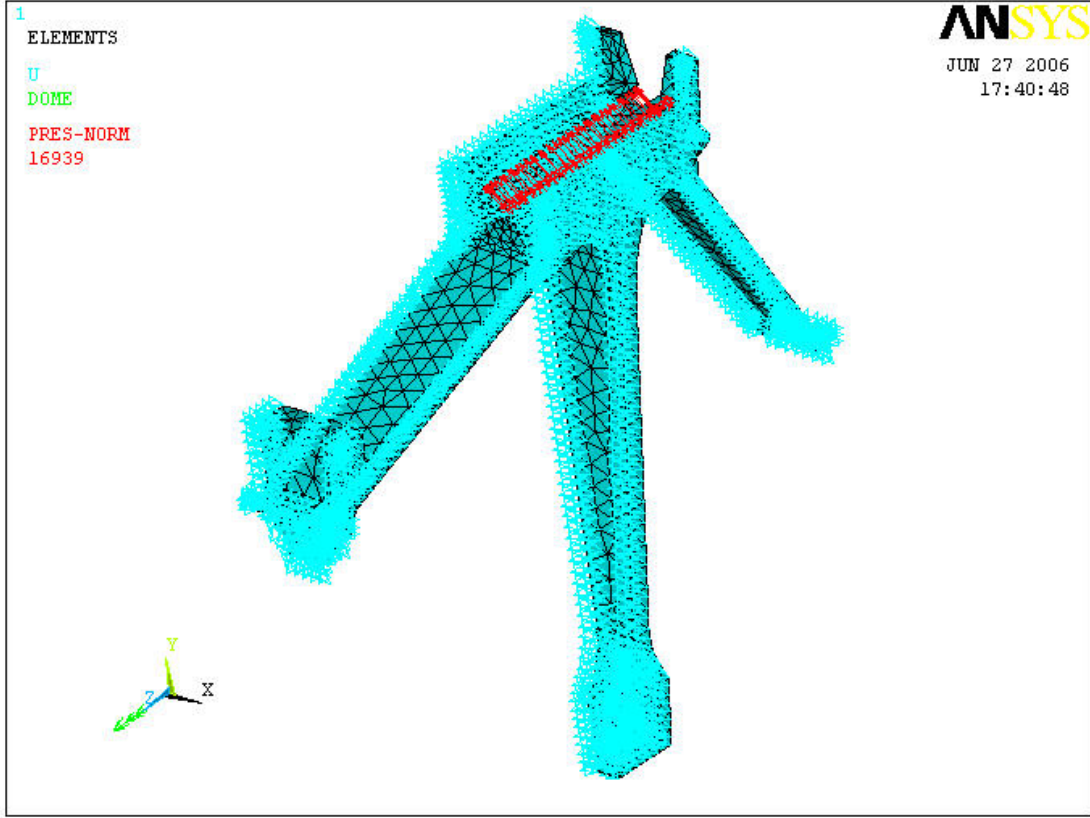
$$\blacktriangleright P = 16939 \text{ psi}$$



Şekil 4.8 Fan diski yuvasına uygulanan pala merkezci kuvveti

Uygulanan sınır şartları ve yükler, sonlu elemanlar modelinde program tarafından alanlardan elemanlara aktarılır (Şekil 4.9). Modelleme işleminde malzeme bilgileri de eklendikten sonra ANSYS programı kullanılarak problem çözülebilir.

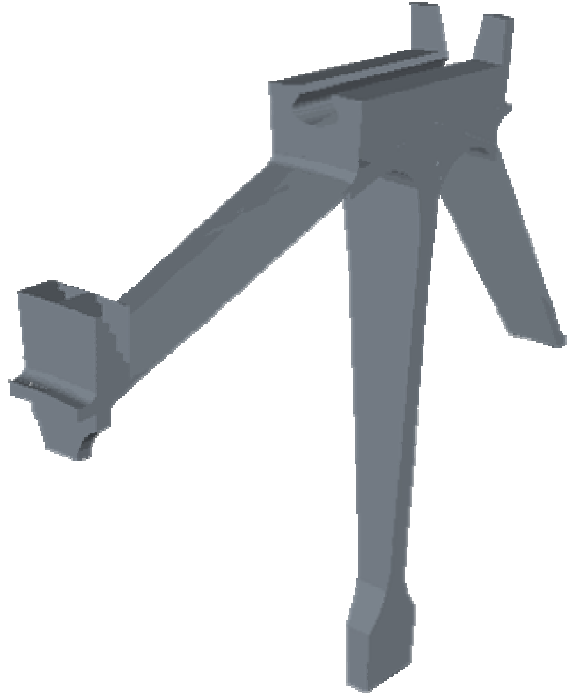
Birim model kullanılarak ANSYS paket programında yapılan yapısal analiz, FRANC 3D programında da yapılmıştır.



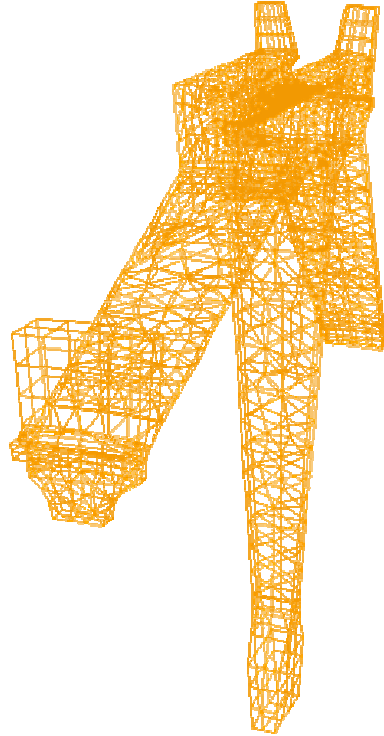
Şekil 4.9. Sınır şartları ve yükler uygulanmış sonlu elemanlar modeli

Sınır eleman çözümlerini kullanan FRANC3D programına model ANSYS programından aktarılmıştır. Aktarılan bu modelin ağ modelini oluşturmak için hacmin üç ya da dörtkenarlı alanlardan oluşması gerekmektedir. Bu nedenle ANSYS 'den aktarmadan ve aktardıktan sonra alanlar düzenlenmiştir. Düzenlenen alanlarla “radyal kenar veritabanı” oluşturulduğunda katı model hazırlanmış olur (Şekil 4.10).

Hazırlanan bu model ağ modele dönüştürülmüştür (Mesh işlemi). Ağ model sınır elemanlarından oluşur (Şekil 4.11).



Şekil 4.10. Radyal kenar veri tabanı



Şekil 4.11. Sınır elemanlardan oluşan ağ modeli

Çalışma şartlarını temsil etmesi için hazırlanan modele sınır şartları ve yükler eklenmelidir. Simetri yüzlerine, simetri sınır şartı Şekil 4.12'deki menüden, yüzeyin normali doğrultusundaki deformasyonlar engellenerek uygulanır. Buna benzer şekilde flanş temas yüzlerine z-ekseninde yer değiştirme kısıtı verilmiştir.

BOUNDARY CONDITIONS FOR A FACE

BC Name: sym bc Layer: 1

Coord Sys: default local sys global Cartesian surface local user defined

BC Set: default BC set MRP BC: no MRP

x (global or user Cartesian [green]) or n (surface local [red])

displacement traction 0 rotation moment 0

y (global or user Cartesian [blue]) or u (surface local [green])

displacement traction 0 rotation moment 0

z (global or user Cartesian [red]) or v (surface local [blue])

displacement traction 0 rotation moment 0

Dismiss Prev Layer Next Layer

Şekil 4.12. Simetri yüzeylerine sınır şartı uygulama menüsü

BOUNDARY CONDITIONS FOR A FACE

BC Name: pressure Layer: 1

Coord Sys: default local sys global Cartesian surface local user defined

BC Set: default BC set MRP BC: no MRP

x (global or user Cartesian [green]) or n (surface local [red])

displacement traction -16939.5 rotation moment 0

y (global or user Cartesian [blue]) or u (surface local [green])

displacement traction 0 rotation moment 0

z (global or user Cartesian [red]) or v (surface local [blue])

displacement traction 0 rotation moment 0

Dismiss Prev Layer Next Layer

Şekil 4.13. Pala temas yüzeylerine yayılı yük uygulama menüsü

Palanın merkezciil kuvveti nedeniyle oluşan ve yukarıda hesaplanan yayılı yük Şekil 4.13'deki gibi temas yüzeylerine uygulanmıştır.

Diskin dönme hareketini ve bu nedenle oluşacak kuvveti de hesaba katmak için modele z-ekseninde açısal hız verilmiştir (Şekil 4.14).

MODEL BOUNDARY CONDITIONS

boundary condition name: rotation

BC Set: default BC set

none rotation linear acceleration

Magnitude of Rotation Vector (Omega)

x = 0 y = 0 z = 869

Magnitude of Linear Acceleration Vector (Gravity)

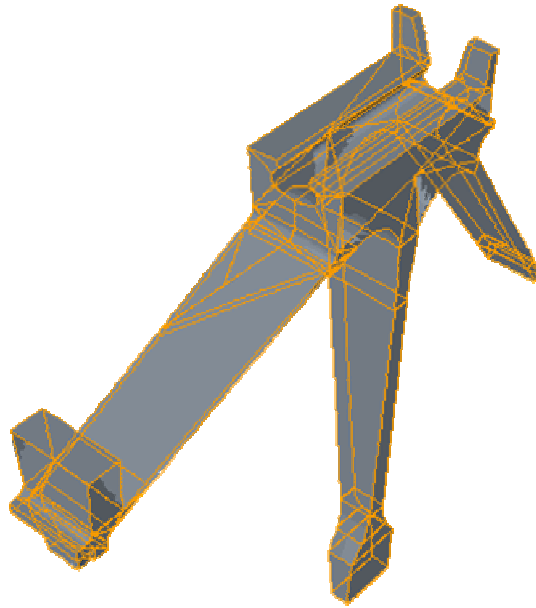
x = 0 y = 0 z = 0

MRP BC: no MRP

Dismiss

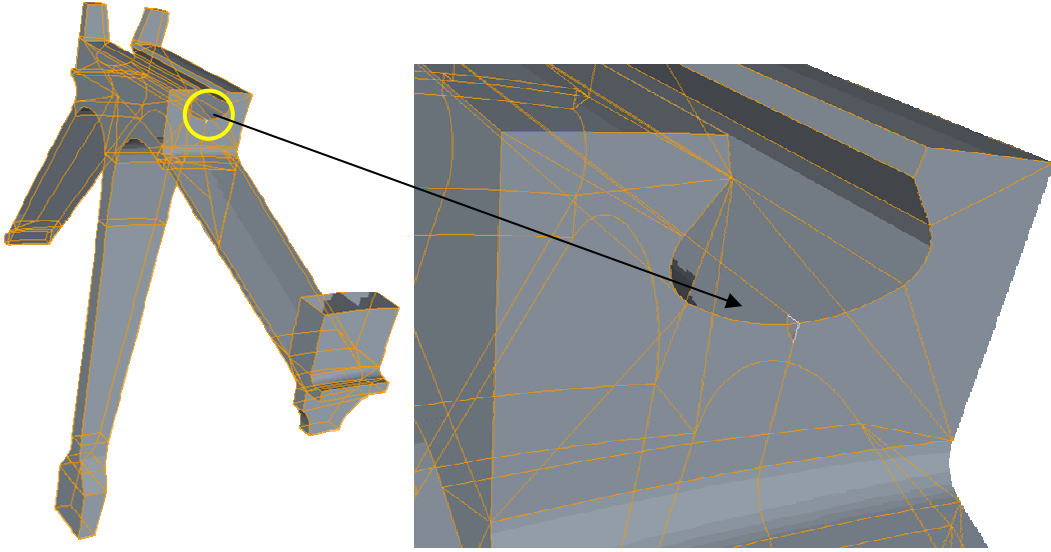
Şekil 4.14. Modele açısal hız uygulama menüsü

Sınır şartları ve yükler ilgili alanlarla ilişkilendirilmiştir. Analize hazır bu model (Şekil 4.15) Sınır Eleman Çözümü (BES) modülü kullanılarak çözülmüştür. Yapılan analiz sonuçları, sonlu eleman analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



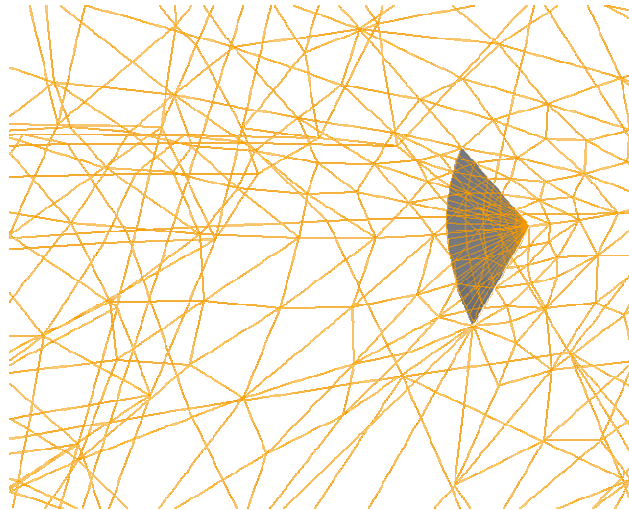
Şekil 4.15. Analiz için hazır model

Gerilme analizi sonuçlarına göre karar verilen düğüm noktasına, belirlenen doğrultuda 0.03 inç boyunda bir çatlak yerleştirilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Yapısına çatlak yerleştirilmiş model

Yerleştirilen çatlak civarında ve ilerlemesi muhtemel bölgede daha doğru sonuçlara ulaşmak için, daha sık bir ağ tabakası oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan çatlak yapısı da çok sık bir ağ yapısı oluşturacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Çatlak ve civarında oluşturulan sık ağ yapısı

Yerleştirilen bu çatlak ilerletilmiş ve sonuçları incelenmiştir.

4.3. Analiz Sonuçları

Analizlerde diske etki eden merkezci kuvvetle, yine palaların merkezci ivme sonucu disk temas yüzeyine uyguladıkları radyal yükler dikkate alınmıştır. ANSYS programında yerçekimi ivmesi kullanılarak yapılan analiz sonuçları önceki sonuçlarla hemen hemen aynı olduğundan yerçekimi etkisi ihmal edilebilmiştir.

Çatlak ilerlemesinde, çatlak düzlemine dik çekme gerilmeleri etkilidir. Bu nedenle çatlak ilerlemesinde önemli olan asal gerilme, çekme asal gerilmesi olarak da bilinen 1inci asal gerilmelerdir. ANSYS programı kullanılarak yapılan analizlerde de öncelikli olarak 1nci asal gerilmeler incelenmiştir.

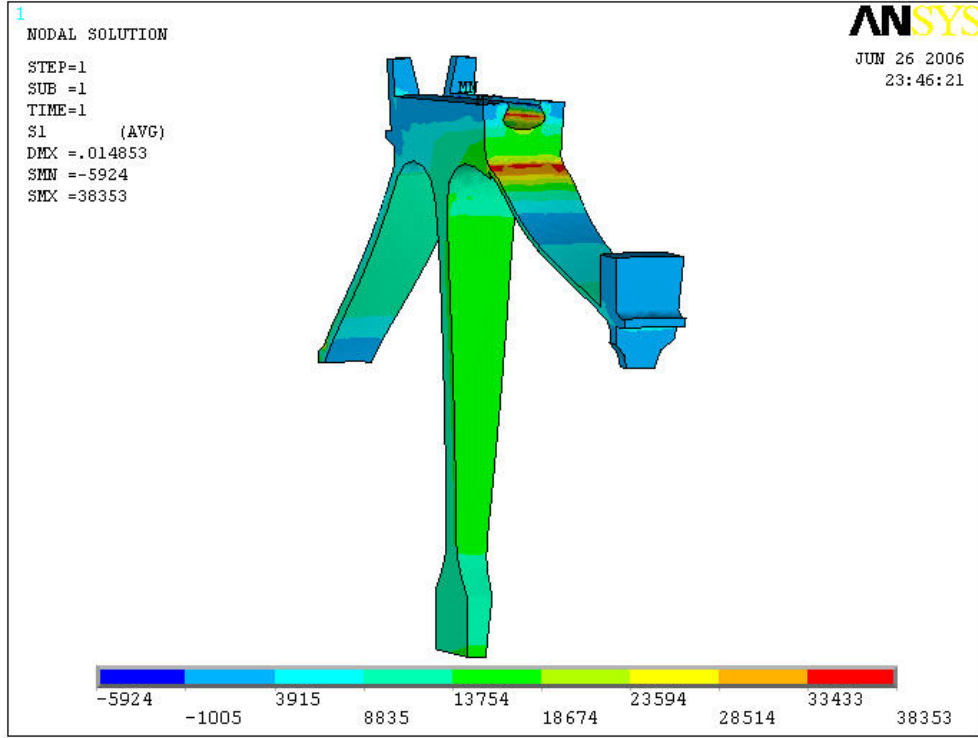
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.6)$$

Bunun yanında asal gerilmelerin karelerinin karekökleriyle orantılı olan Von Misses gerilmeleri (4.6) [8] ile silindirik koordinatlarda radyal ve teğetsel yer değiştirmeler ve gerilmeler incelenmiştir.

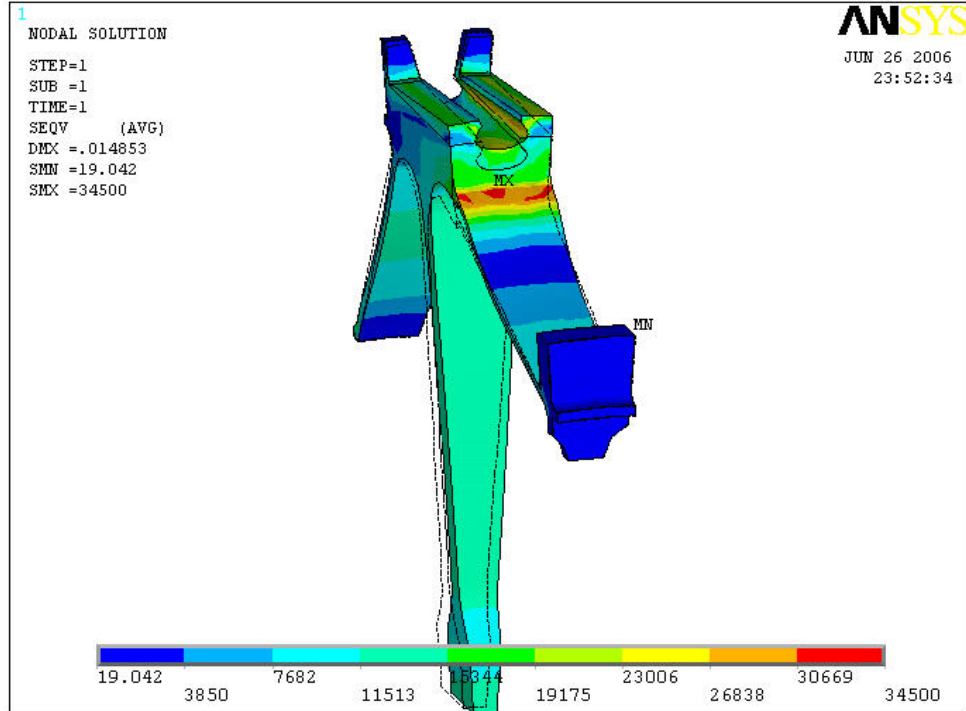
4.3.1. ANSYS analizi sonuçları

Programın gösterimleri gereği olarak şekillerde radyal yön "x", teğetsel yön "y" olarak gösterilmektedir. Bilindiği gibi silindirik koordinatlar radyal yön "r", teğetsel yön "θ", ve aksenal yön "z" ile gösterilir. Ayrıca gerilmelerde "σ" yerine "S", yer değiştirmelerinde ise "U" gösterimi kullanılmıştır. Sonuç çerçevesinin sol üst köşesindeki açıklamalardaki "RSYS 0", sonuçların global kartezyen koordinat sisteminde gösterildiğini, "RSYS 1" ise, sonuçların silindirik koordinat sisteminde gösterildiğini belirtmek için kullanılmıştır. Koordinat sisteminden bağımsız olan asal gerilme gibi değerlerde ise koordinat sistemi belirtilmemiştir. Von Misses gerilmeleri için "SEQV" ifadesi kullanılmıştır. Sonuç dağılımları deforme olmuş hacim üzerinde gösterilmiştir. Deformasyon görselliği sağlamak adına 10 kat büyültülmüştür. Model ölçüleri inç birimine göre çizildiğinden yükler ve parametreler de bu birim sisteminden verilmiş olup, sonuçlarda da gerilme birimleri "psi" cinsinden, yer değiştirmeler ise; "inç" cinsindedir.

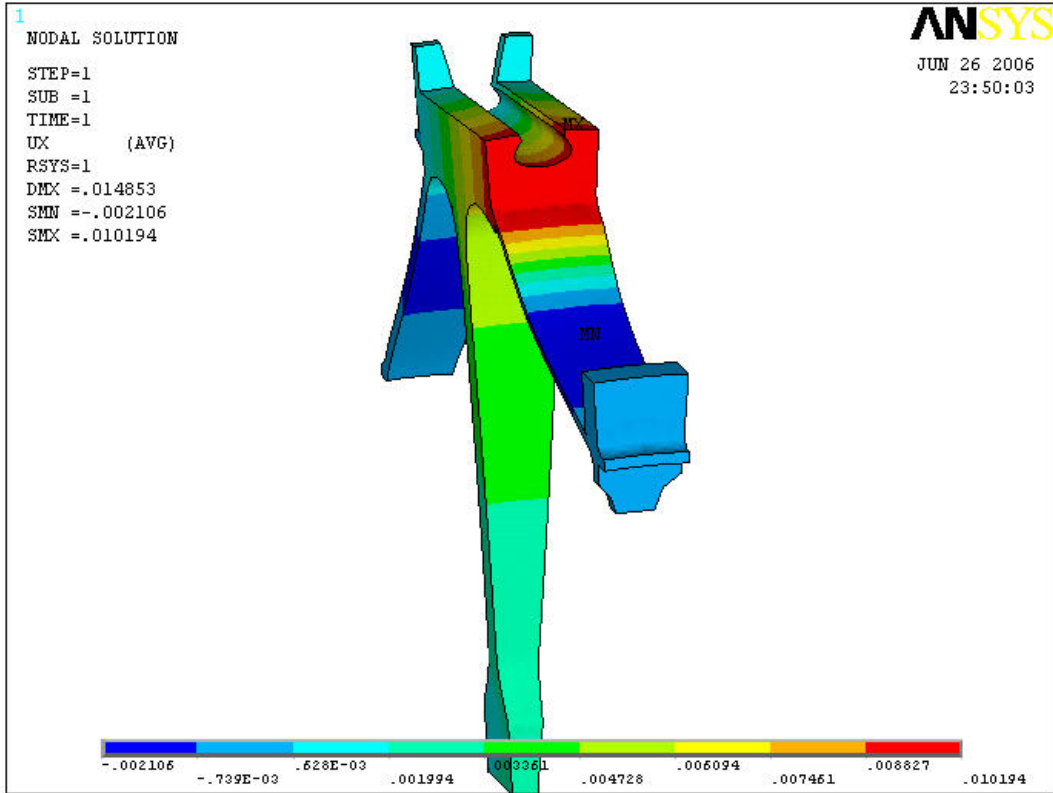
ANSYS programı kullanılarak yapılan analizin sonucunda ortaya çıkan gerilme ve yer değiştirme dağılımları şekillerde gsterilmiştir. (şekil 4.18-23)



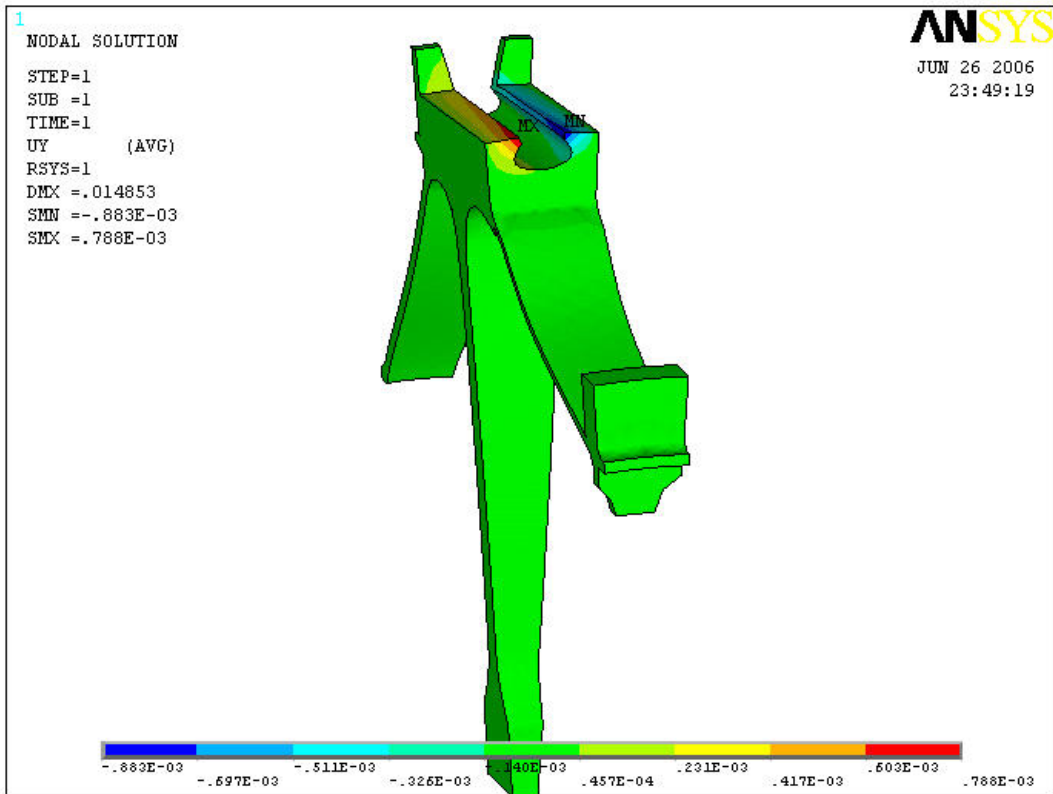
şekil 4.18. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımları



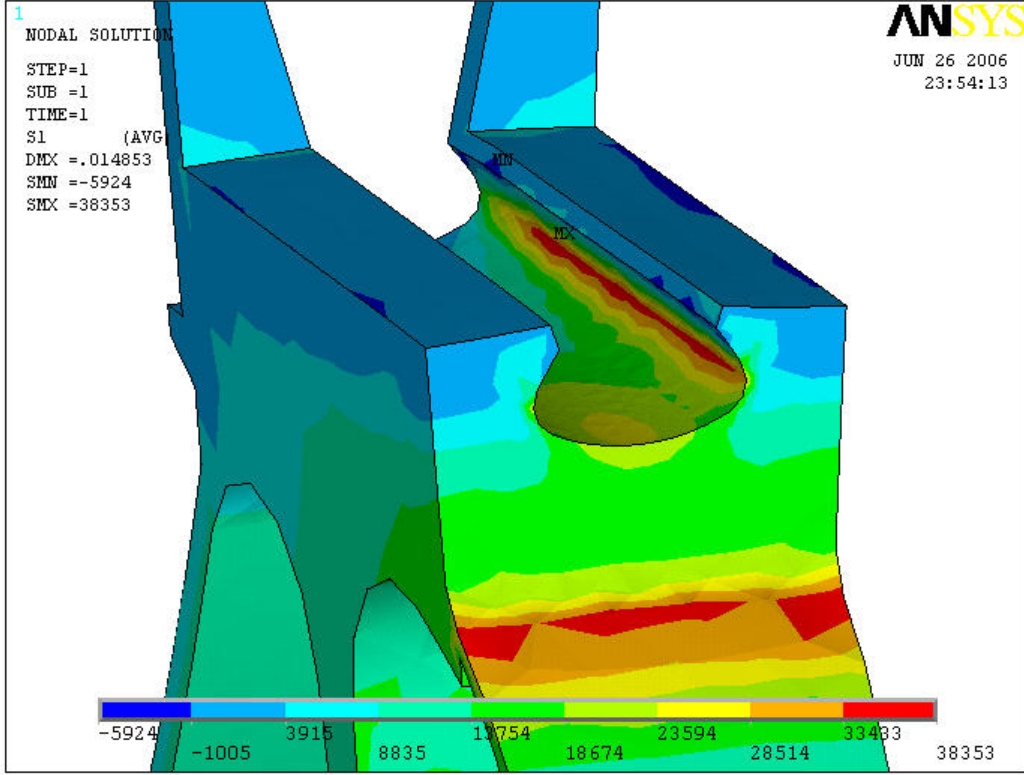
şekil 4.19. Von Misses Gerilme Dağılımları (Deformasyon öncesi kenarları ile)



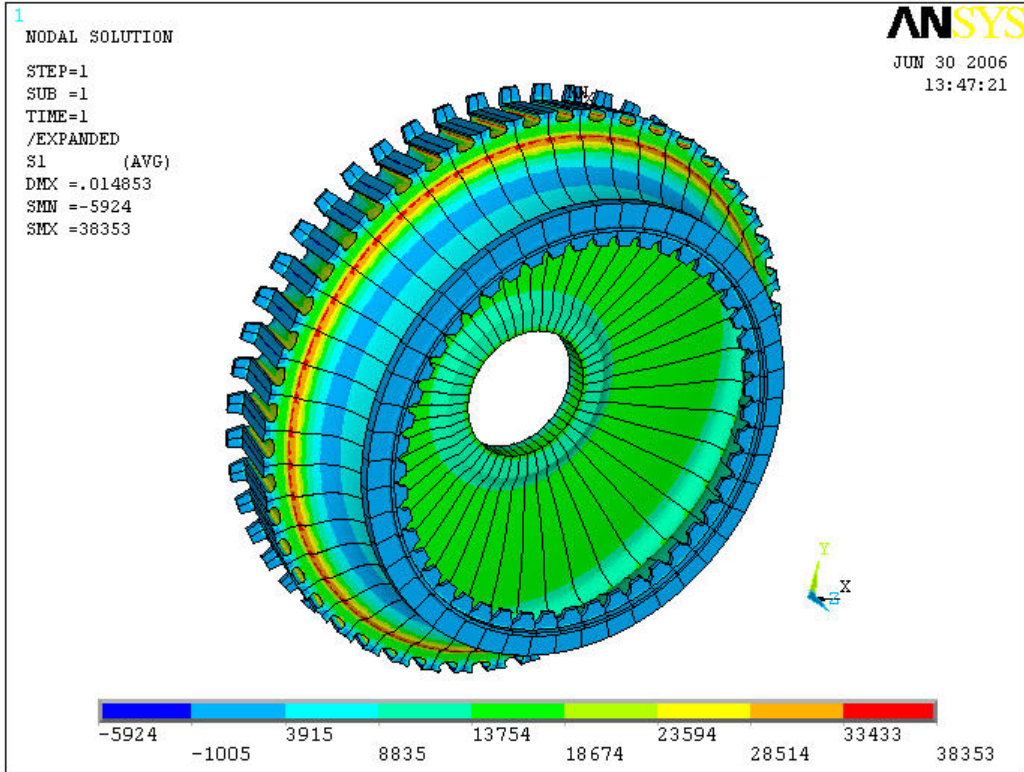
Şekil 4.20. Radyal yönde yer değiştirme dağılımı



Şekil 4.21. Teğetsel yer değiştirme dağılımı



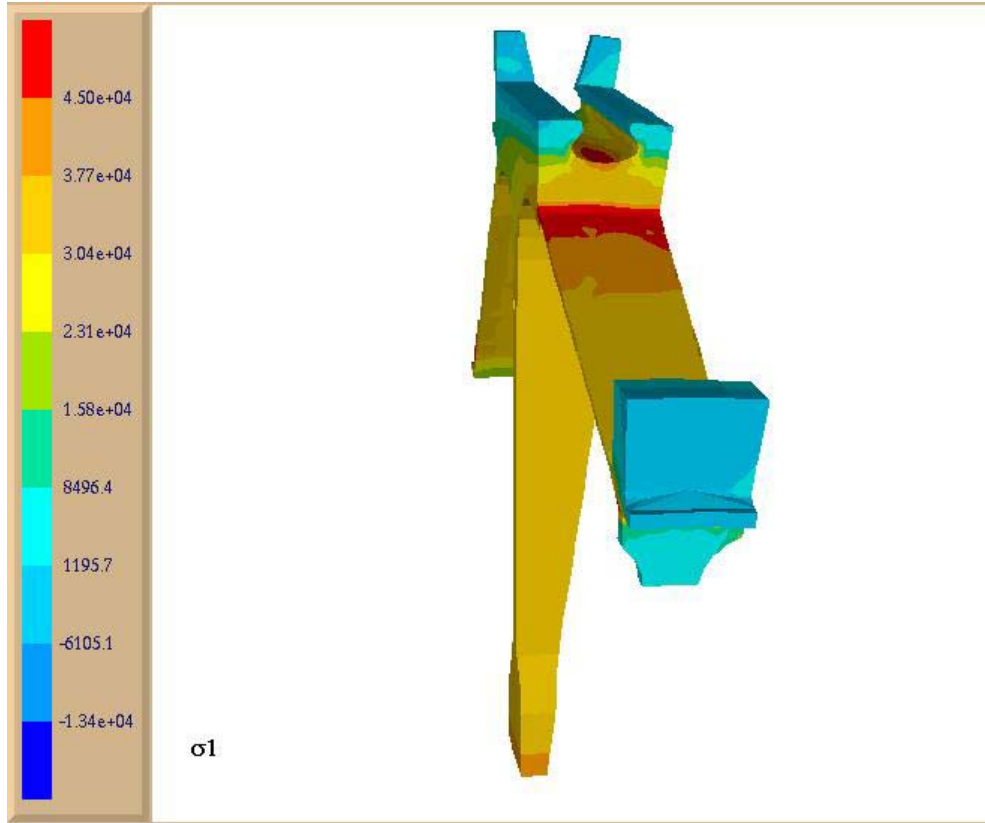
Şekil 4.22. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı (pala yuvası yakın görüntüsü)



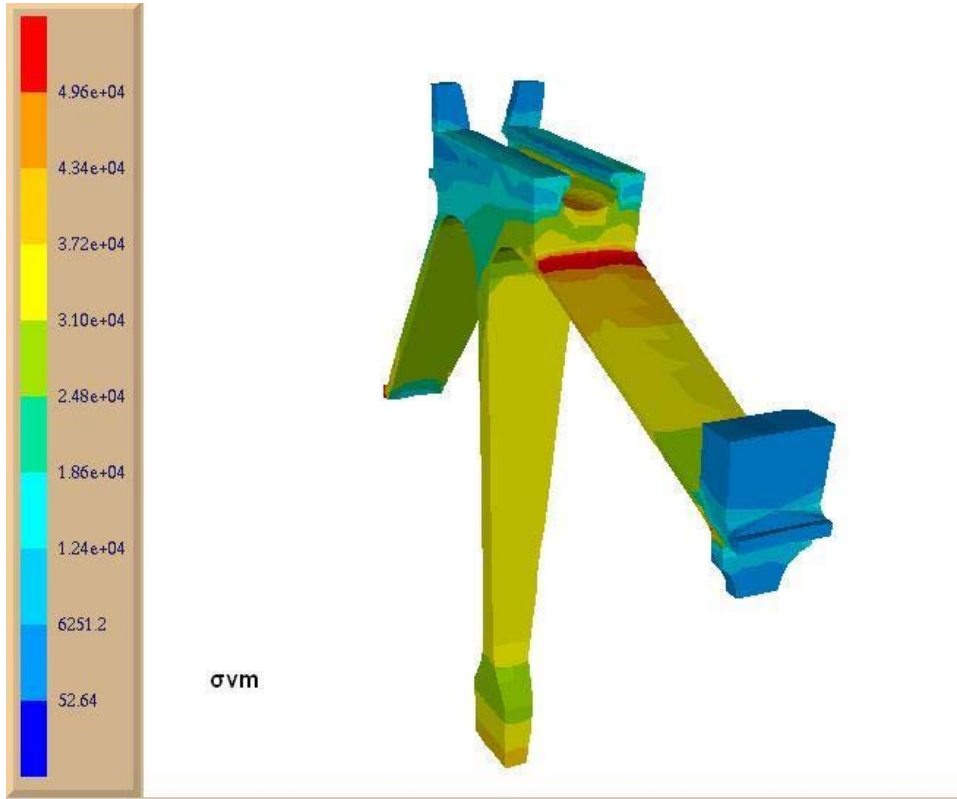
Şekil 4.23. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı (tüm disk görüntüsü)

4.3.2. FRANC3D Analizi Sonuçları

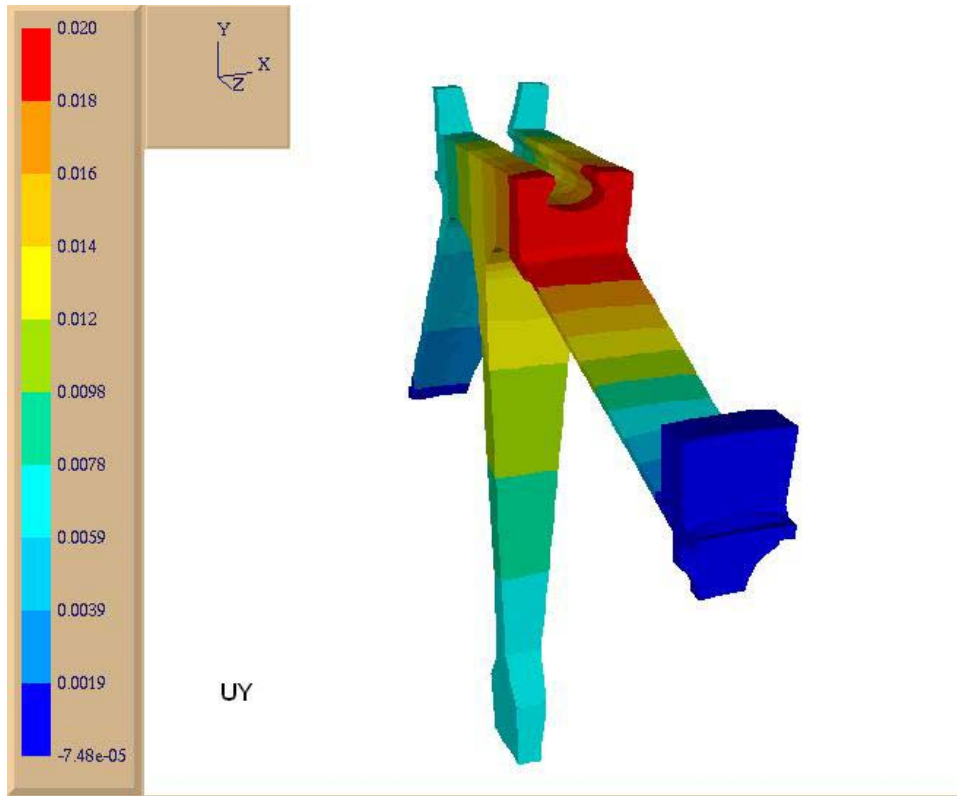
FRANC3D programında analiz sonuçları sadece kartezyen koordinat sisteminde gösterilebilmektedir. Bu nedenle modelin kartezyen koordinatlara göre konumundan dolayı, y-ekseni yönündeki yer değiştirmeler yaklaşık olarak radyal yer değiştirmelere, eksi x-ekseni yönündeki yer değiştirmeler ise yine yaklaşık olarak teğetsel yer değiştirmelere karşılık gelmektedir. FRANC3D programı kullanılarak elde edilen yapısal mukavemet analizi sonuçları Şekil 4.24'ten Şekil 4.28' ye kadar olan şekillerde gösterilmiştir.



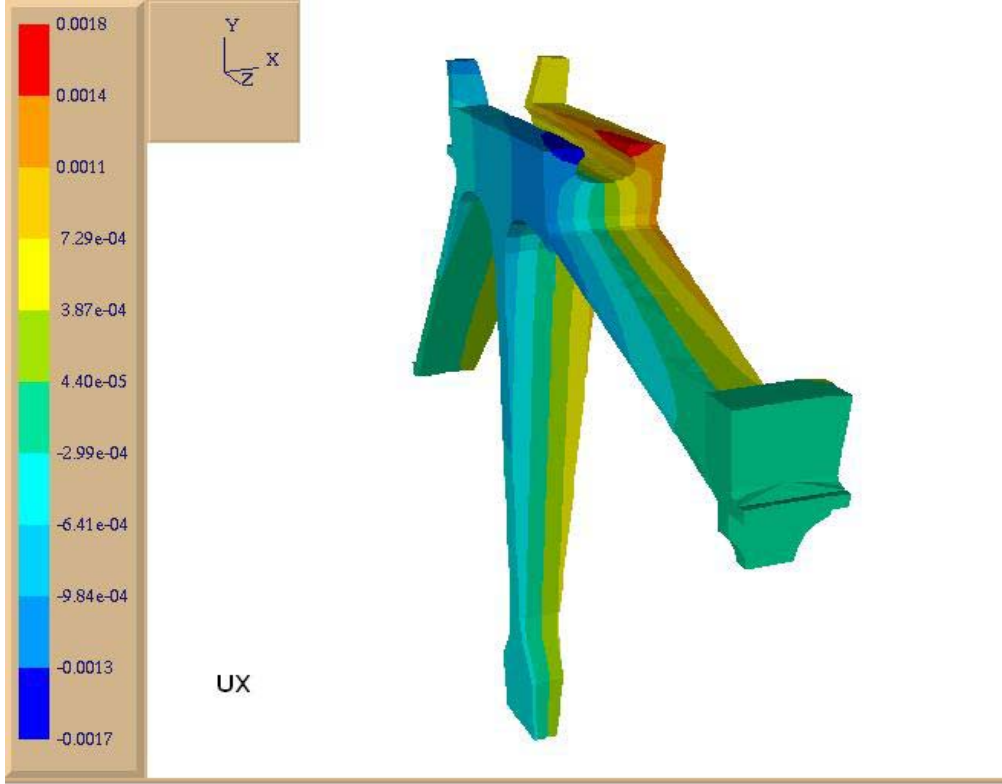
Şekil 4.24. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı



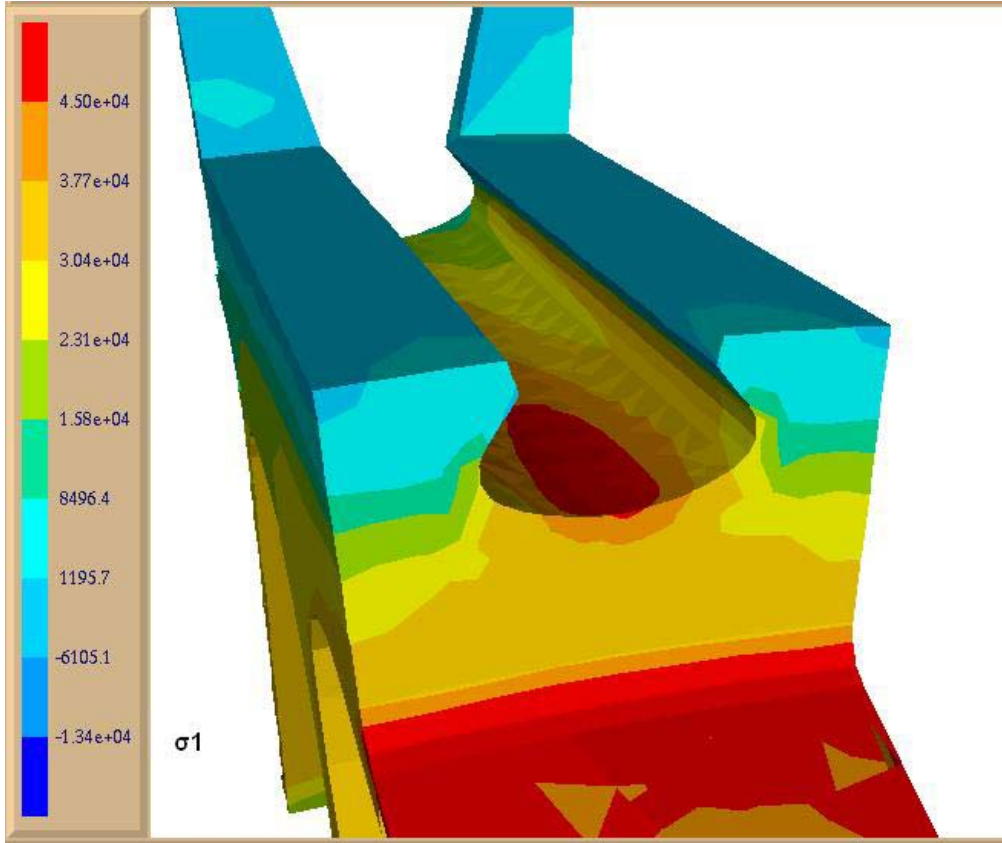
Şekil 4.25. Von Misses Gerilme Dağılımı



Şekil 4.26. y-ekseni doğrultusundaki (yaklaşık radyal) yer değiştirme dağılımı

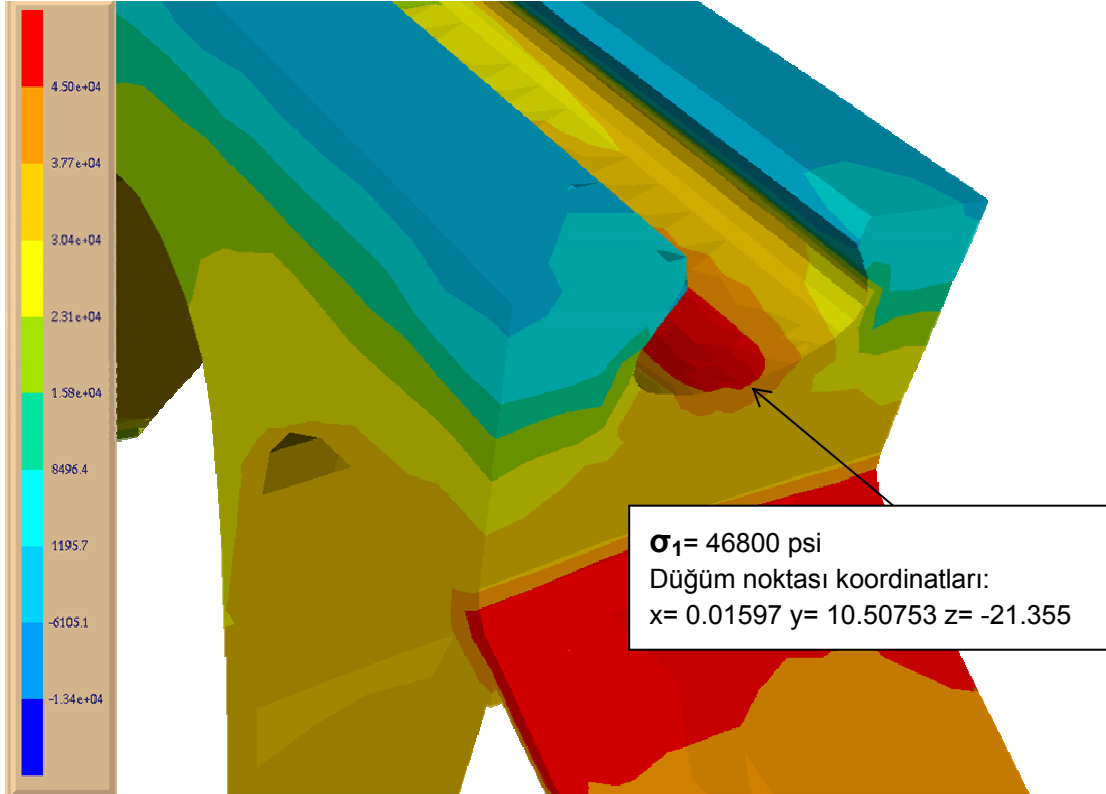


Şekil 4.27. x-ekseni (yaklaşık eksi teğetsel) doğrultusundaki yer değiştirme dağılımı



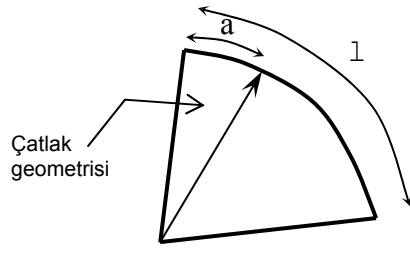
Şekil 4.28. 1nci asal gerilme (σ_1) dağılımı (pala yuvası yakın görüntüsü)

Yapılan analiz sonuçlarına göre şekilde görülen noktada çatlak ilerlemesi hesabı yapılmasına karar verilmiştir. Buradaki en kötü şartı temsil etmek için birinci asal gerilme vektörünün düzlemin normali olduğu düzlemde çatlak yerleştirilmelidir (Şekil 4.29). Çünkü bu doğrultuda yerleştirilen çatlağın ilerleme ihtimali düzlemine dik olan çekme asal gerilmesi nedeniyle daha yüksek olacaktır.



Şekil 4.29. Çatlak yerleştirilmesine karar verilen düğüm noktasının koordinatları ve asal çekme gerilmesi doğrultusu

Yapının belirlenen yerine yerleştirilen çatlak 17 adım ilerletilmiştir ve bu her ilerleme adımında 0.05 inç'lik bir çatlak ilerlemesinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. İkinci adımda çatlak ilerleme yönünde bir sapma görüldü. Bunun nedeni Mod II (Kayma) Gerilme şiddeti Faktörü'nün (K_{II}) artmasıdır. Daha sonraki adımlarda bu sapma düzelmiştir. Farklı yükleme modlarındaki gerilme şiddeti faktörlerinin çatlak önü boyunca düzeltilmiş (normalize edilmiş) uzaklıkla olan değişimini gösteren grafik Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



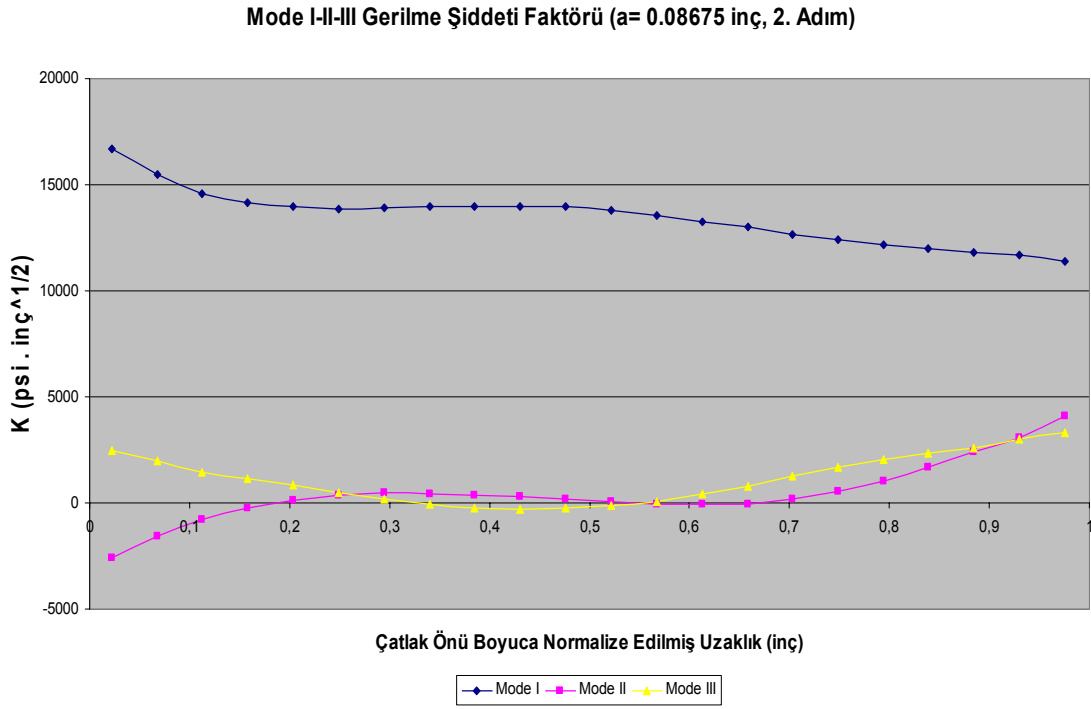
1 : Çatlak toplam önü boyu

a: Rasgele seçilen bir nokta için yay boyu

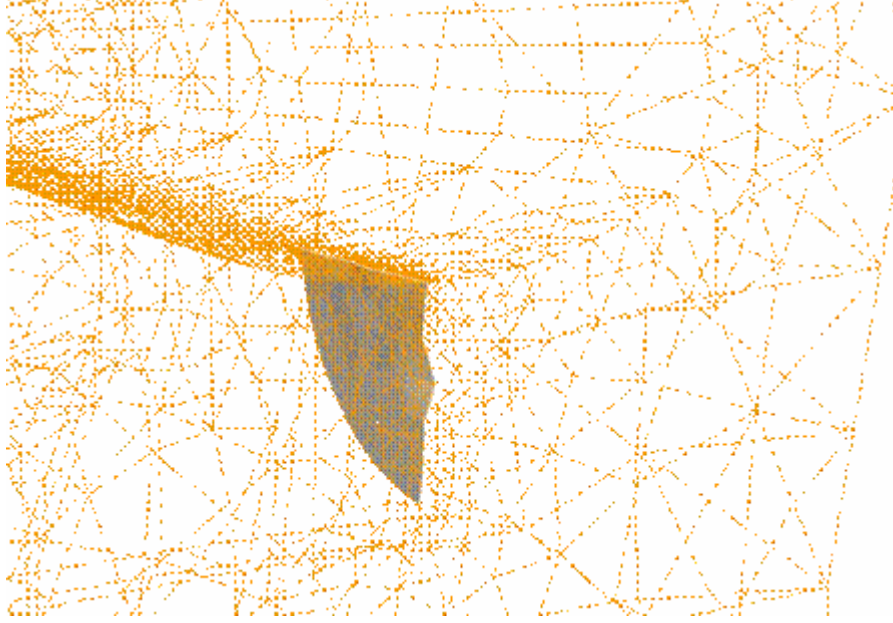
Normalize edilmiş çatlak önü mesafesi = $a / 1$

Şekil 4.30. Normalize edilmiş çatlak önü mesafesi

En yaygın görülen kırılma modu olan ayrılma modu (Mod I), Şekil 4.31'deki grafikten de görülebileceği gibi bu örnekte de en etkili moddur.

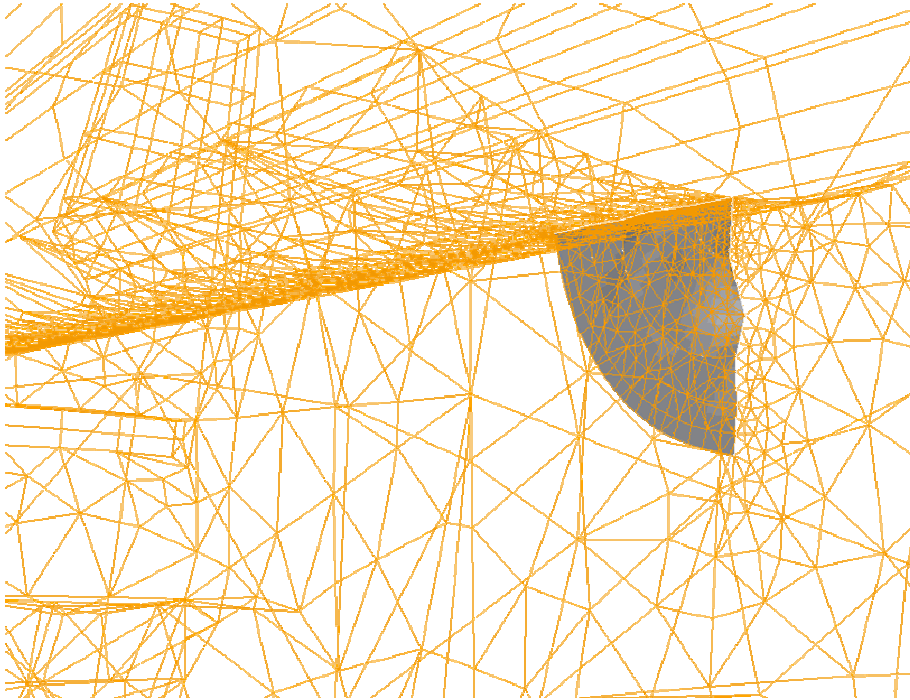


Şekil 4.31. Farklı kırılma modları için gerilme şiddeti faktörlerinin çatlak önü boyunca düzeltilmiş uzaklıkla değişim grafiği

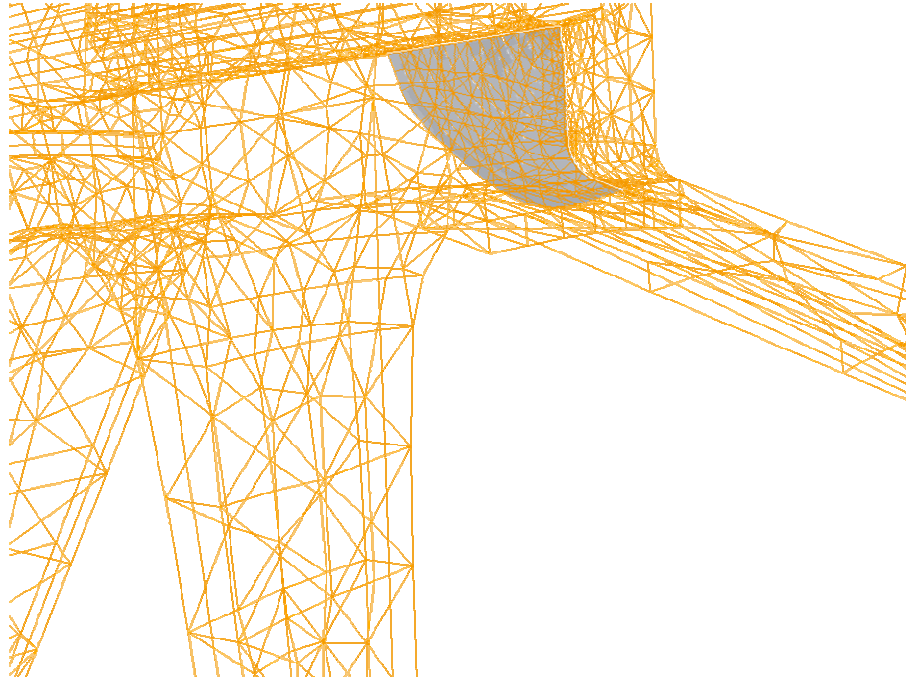


Şekil 4.32. 5inci adım sonundaki görüntü (Çatlak boyu $a=0.206238$ inç)

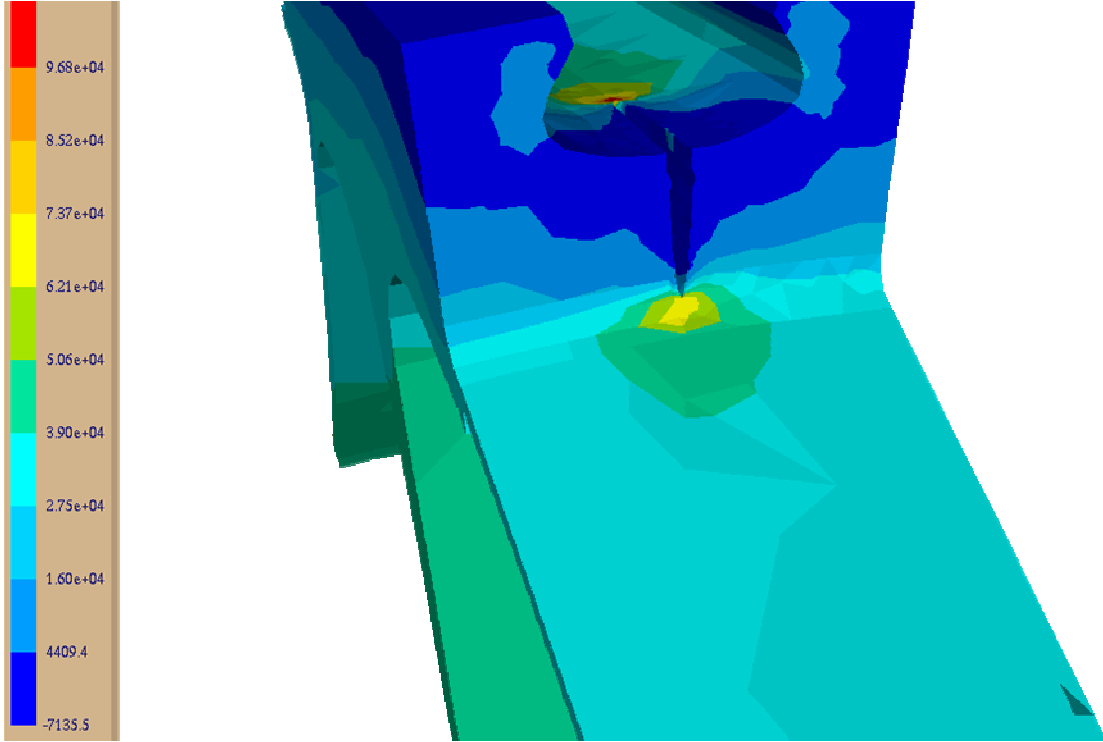
Söz konusu çatlağın sınır eleman ağ modeli içerisinde ilerlemesinin 5, 10 ve 15nci adımlarındaki görüntüleri Şekil 4.32, 4.33 ve 4.34 de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. 10uncu adım sonundaki çatlak görüntüsü (Çatlak boyu $a=0.501507$ inç)



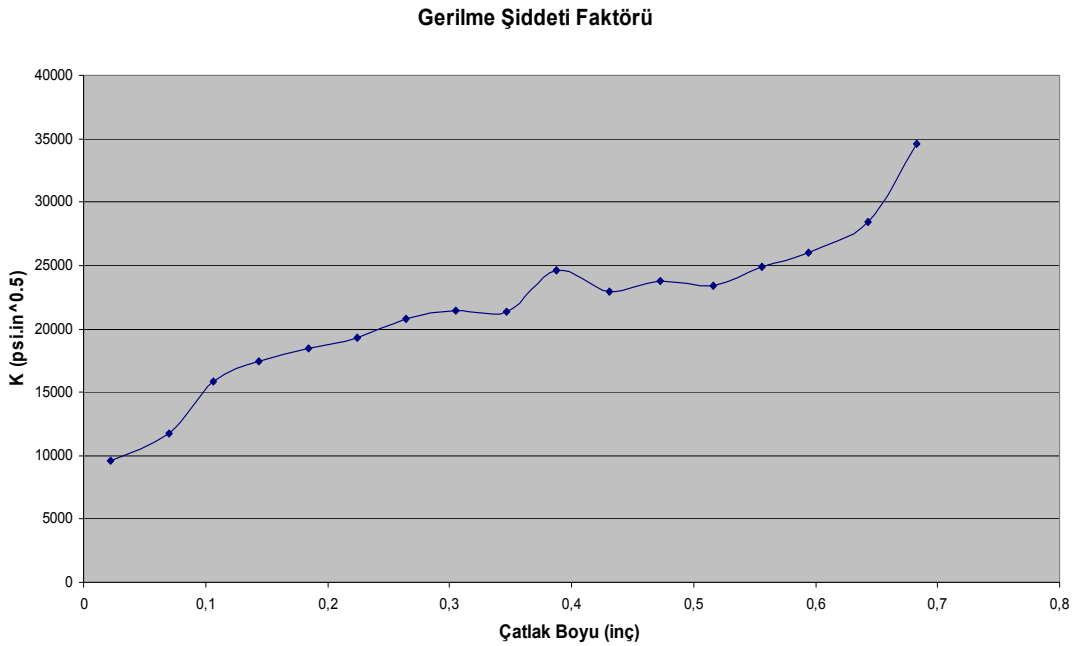
Şekil 4.34. 15inci adım sonundaki çatlak görüntüsü (Çatlak boyu $a=0.762367$ inç)



Şekil 4.35. 14üncü adım sonunda çatlak bölgesindeki gerilme dağılımı (σ_1)

Şekil 4.35'te çatlak ucu gerilme yığılması gözlenebilmektedir. Çatlak önü bölgesinde çatlak ilerlemeden önce yaklaşık 35 ksi (35000 psi) civarında olan gerilme değerleri, ilerleyen çatlakla birlikte çatlak ucu etkisinden kaynaklanan gerilme yığılması nedeniyle 90 ksi seviyelerine yükselmiştir. Bu aşamada çatlağın köşe çatlağından boydan boya çatlağına dönüşmesi söz konusu olacaktır.

Yapılan bu 3 boyutlu analiz sonucunda ortalama olarak elde edilen gerilme şiddeti faktörünün çatlak boyuna göre değişimi Şekil 4.35'te verilmiştir. Buna göre çatlağın köşe çatlağı olarak devam eden ilerlemesi boyunca gerilme şiddeti faktörünün $36500 \text{ psi}\sqrt{\text{inç}}$ değerine ulaşabildiği grafikten de gözlenebilmektedir. Bu değer malzeme için verilen $65000 \text{ psi}\sqrt{\text{inç}}$ değerinden oldukça küçüktür.



Şekil 4.36. Gerilme şiddeti faktörünün çatlak boyuna göre değişimi

Bu aşamada ömür tahmini yapılmasına karar verilmiştir. Buradaki amaç, halen küçük miktarlarda olan gerilme şiddeti faktörünün hedeflenen ömür kriterini sağlayıp sağlamadığını görmek ve buna göre de analizin devam ettirilip ettirilmemesine karar vermektir. Ömür tahmini, FRANC3D programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için girilmesi gereken 5 önemli parametre mevcuttur.

Bu parametrelerden ilki “Gerilme Şiddeti Faktörü” bilgisidir. Bunun için model verilerinin kullanılması öngörülmüş ve yukarıdaki Şekil 4.36’te gösterilen ortalama Gerilme şiddeti Faktörleri kullanılmıştır.

Çatlak ilerleme modeli olarak ise Forman-Newman-de Koning modeli (NASA denklemi) (2.31) tercih edilmiştir. NASA için geliştirilen ve $da/dN-\Delta K$ verilerini en iyi temsil eden model olduğu bilinen bu modeli kullanmanın bir diğer avantajı ise modele uygun malzeme veritabanının FRANC3D içinde yer almasıdır. Bu kapsamda, malzeme olarak Ti-6Al-4V:MA(1350 F/2h) seçilmiştir (Şekil 4.38).

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (2.31)$$

Denklem (2.31)’deki K_{max} değeri (4.7), f fonksiyonu ise (4.8) numaralı denklemle bulunur. Bu fonksiyon R katsayısını kullanarak, sabit büyüklükte yükleme durumunda plastisite etkisiyle çatlak kapanmasının etkisini kapsayan bir fonksiyondur.

$$K_{max} = \frac{\Delta K}{1-R} \quad (4.7)$$

$$f = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R < 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Denklem (4.8)’teki sabitler (4.9)’da verilmiştir.

$$A_0 = \left(0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2 \right) \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{S_{max}}{\sigma_0} \right) \right]^{1/\alpha}$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) \frac{S_{max}}{\sigma_0} \quad (4.9)$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

Bu denklemdeki düzlem gerilme/gerinme sınırlama faktörü (α) ve uygulanan maksimum gerilmenin malzeme akış gerilmesine oranı (S_{max}/σ_0) ve R değeri Şekil 4.38’teki malzeme bilgisinden alınmıştır.

Units:	Configure
ksi - in	
SIF History:	Configure
none specified	
SIF Transfer Function:	Configure
effective $K = 1 * K + 0$	
Fatigue Growth Model:	Configure
FNK: Ti-6Al-4V; MA(1350F/2h)	
Retardation Model:	Configure
no retardation	
Loads Model:	Configure
Constant Amplitude: R=0	
Loads Transfer Function:	Configure
effective $S = 1 * S + 0$	
Initial Flaw Size:	Configure
Initial Flaw Size: 0.03	
Thickness:	Configure
thickness: 1	
Fatigue Life Reports Cancel	

Şekil 4.37. FRANC3D Programı Yorulma Hesabı Verileri Giriş Menüsü

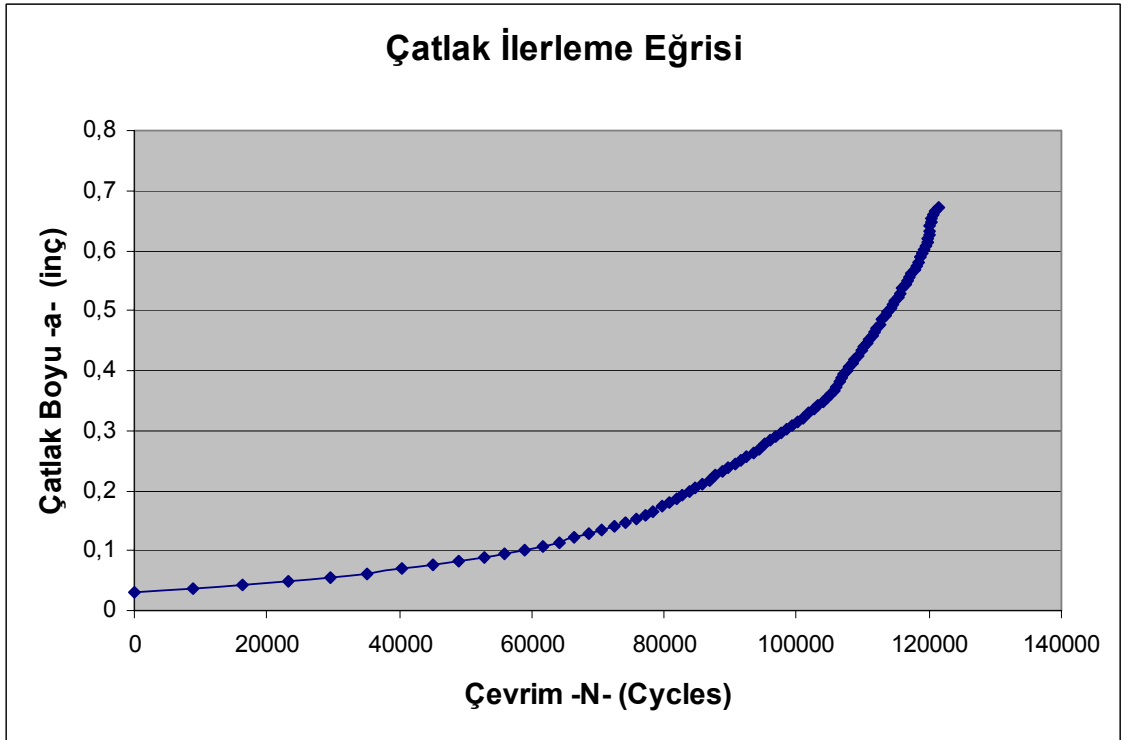


Şekil 4.38. FRANC3D programındaki seçilen titanyum alaşımının malzeme bilgi menüsü

Bu çözüm kapsamında geciktirme (retardation) etkisi göz önüne alınmamıştır (Şekil 4.37).

Bu tip analizlerdeki en önemli verilerden birisi de yük spektrumudur. Gaz türbinli motorlarda yük spektrumu oldukça kapsamlı ısı-yapısal analizler sonucunda elde edilmektedir. Bunu gerçekleştirirken de, uçağın manevra zarfı, gerçekleştirdiği görevler göz önüne alınmaktadır. Bu analiz için elimizde buna yönelik bir bilgi mevcut olmadığı için sabit genlikli bir spektrum uygulanmıştır. Bu aynı zamanda, geciktirme etkilerinin neden göz önüne alınmadığının da gerekçesidir. Gerilme oranı ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) sıfır seçilerek sabit genlikli bir yük uygulanmıştır.

Başlangıç çatlak boyu olarak ise bu tip geometriler için belirlenmiş olan 0.03 inç değeri alınmıştır. Bu durumda yapılan analiz sonucu ortaya çıkan çatlak ilerleme grafiği Şekil 4.39' da gösterilmiştir. Bu grafikte çatlak boyunun uygulanan yük çevrimi sayısı ile değişimi gösterilmiştir. Çatlak çevrim sayısı arttıkça artan bir eğimle parabolik olarak büyümektedir.

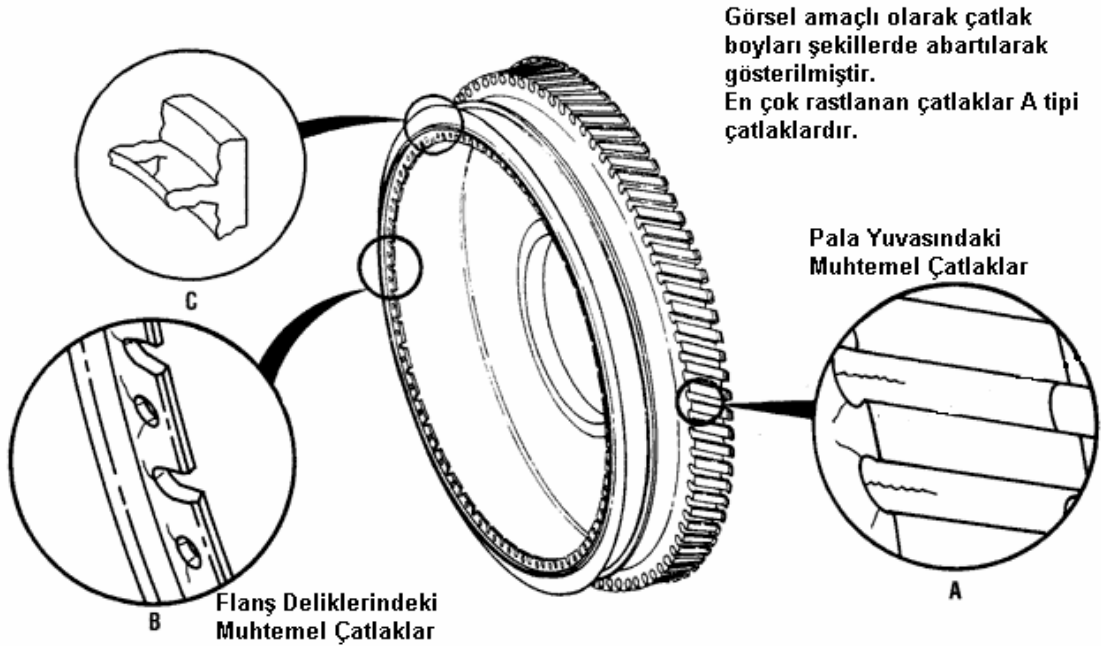


Şekil 4.39. Çatlak ilerleme grafiği

5. YORUM

Yapılan gerilme analizleri sonucunda oluşan çekme gerilmesi dağılımlarında en yüksek gerilme değerinin malzemenin (titanyum alaşım) akma mukavemetinden küçük olduğu; dolayısıyla söz konusu yükleme ve sınır şartları durumunda yapısında çatlak bulunmayan malzemenin akmaya uğramayacağı anlaşılmıştır.

Sonlu ve sınır eleman analizlerinde elde edilen gerilme dağılımları malzemede bulunan muhtemel mikro-çatlakların nerelerde ilerleme ihtimali olduğu hakkında bize bilgi vermektedir. Bu doğrultuda söz konusu fan diskinde çatlakların oluşma ihtimali en yüksek bölge pala yuvası olarak belirlenmiştir. Yapılan araştırma sonucunda benzer fan disklerinde en çok rastlanan çatlakların yine pala yuvası (dovetail) iç yüzeyinde oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Benzer fan diskinde muhtemel çatlak oluşma bölgeleri

Çatlak oluşması muhtemel diğer bölgeler ise flanş çevresi bölgeleridir. Gerçekte flanşlar diğer kademelere bağlantı yerleridir ve civata-somun bağlantısıyla birbirlerine bağlanırlar. Fakat modellemede bu bölgelere serbestlik

derecesi kısıtı verilerek simule edilmiştir. Bu da bu bölgelerde doğal olarak farklı gerilme dağılımları oluşturabilmektedir. Bu yüzden flanşlardaki muhtemel çatlaklar incelenmemiştir. İlgilenilen pala yuvaları ise flanş bölgesinden uzakta olduğundan gerilme dağılımları daha doğru sonuçlar vermektedir. Modelde civata-somun bağlantısı ve kontak yüzeyleri tam olarak simule edilirse flanşlardaki çatlaklar ve gerilme dağılımları da incelenebilir.

Yapılan çatlak analizi sonucunda ise, 0.03 inç boyundaki çatlağın mevcut şartlar altında 121566 çevrim sonunda 0.672346 inç boyuna ulaşacağı belirlenmiştir.

Bu durumda, çatlağın bundan sonraki aşamada boydan boya çatlağı olarak ilerleyeceğini tahmin etmek güç değildir. Öte yandan da çatlağın kritik gerilme şiddeti faktörünün yarısı bir değere ulaşması için yaklaşık 120000 çevrim yapılması gerekliliği de ortadadır. Eğer söz konusu motorun 1 uçuşluk sürede (ortalama sorti süresinin 1 saat olduğu varsayımıyla) 7 çevrim harcadığı düşünülürse – ki bu savaş uçakları için bir sortide azami yükün uygulanma sayısı için genel eğilimdir- ve uçağın garanti edilen servis ömrü 8000 U/S ise bu durumda çatlağın yukarıda hesaplanan çatlak boyuna ulaşması için $120000/7=17142$ U/S'lik uçuş gerçekleştirilmesi gerekecektir. Çatlağın hangi boyda kritik olacağı ise aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\Delta K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

Malzemenin kalıcı hasara uğrama şartı $\Delta K = K_c$ (hesaplanan gerilme şiddeti faktörünün kırılma tokluğuna eşit olması durumu) olduğu bilindiğine göre $65000 = 0.75 \times 46800 \times \sqrt{\pi a}$ ve $a=1.1912$ inç olarak bulunur. Buradaki kritik çatlak boyu yapının boydan boya kırılacağı çatlak boyudur. Çatlağın, ilerlemenin son dönemlerinde daha hızlı ilerlediği göz önünde bulundurulsa bile zaten 17142 uçuş saati olarak hesaplanan ömür yeterli olduğundan boydan boya çatlağının ilerlemesinin hesaplanmasına gerek duyulmamıştır.

Bu çalışmanın amacı olan “yorulma kaynaklı çatlakların ilerlemesine esas olan parametrelerin analiz yöntemiyle elde edilmesi” göz önüne alındığında ise, FRANC3D ve benzeri programların çatlak ilerlemesinin fiziğini ve ömür hesaplamalarında kullanılacak parametreleri elde edebilmek için iyi bir araç olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak, programın kullanıcı dostu olmaması, bazı fiziksel özellikleri tanımlamada yetersiz kalması ve lineer

olmayan çözümleri desteklememesi en önemli handikapları olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmaya ek olarak; daha sonraki çalışmalarda fan pala yuvasında, yapılan analizler ve araştırmalar sonucunda belirlenen çatlak oluşması muhtemel diğer bir bölge olan yuva yan duvarında da benzer bir çatlak oluşturularak analiz yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Broek, D., *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Hollanda, 1989
- [2] Anderson, T.L., *Fracture Mechanics Fundamental and Applications*, CRC Press LLC, Florida, A.B.D., 1995
- [3] Solanki, K.N., *Two and Three Dimensional Finite element Analysis of Plasticity Induced Fatigue Crack Closure*, Yüksek Lisans Tezi, Mississippi State University, Makine Mühendisliği Departmanı, Mississippi, A.B.D., 2002
- [4] Sanford, R.J., *Principles of Fracture Mechanics*, Pearson Education Inc., New Jersey, A.B.D., 2003
- [5] Liu, A.F., *Structural Life Assessment Methods*, ASM International, California, A.B.D., 1998
- [6] *FRANC 3D Concepts and Users Guide*, Cornell Fracture Group, A.B.D., 2003
- [7] Ribeiro, A.S., Jesus, A.M.P., Portela, A., Castro, P.M.T., Fernandes, A.A., *Software Development For The Fatigue Life Prediction of Structural Components*, Makale, Lizbon, Portekiz, 1999
- [8] Budynas, R.G., *Advanced Strength and Applied Stress Analysis*, WCB McGraw-Hill, A.B.D., 1999

Ek-1 Birim Dönüşüm Tablosu

	SI	BIN (Kullanılan birim sistemi karşılığı)
<i>Kütle</i>	1 kg	$5.71 \cdot 10^{-3}$ lb.s ² /inç
<i>Uzunluk, Yer değiştirme</i>	1 m	39.37 inç
<i>Zaman</i>	1 s	1s
<i>Yoğunluk</i>	1 kg/m ³	$9.357 \cdot 10^{-8}$ lb.s ² /inç ⁴
<i>Çizgisel Hız</i>	1 m/s	39.37 inç/s
<i>İvme</i>	1 m/s ²	39.37 inç/s ²
<i>Basınç, Gerilme</i>	1 N/m ² (yada Pa)	$1.45 \cdot 10^{-4}$ psi (yada lb/inç ²)
<i>Kuvvet</i>	1 N	0.2248 lb
<i>Moment</i>	1 N.m	8.85 lb.inç
<i>Sıcaklık</i>	1 °K	1.8 °R
<i>Gerilme Şiddeti Faktörü</i>	1 MPa \sqrt{m}	$5.7 \cdot 10^3$ psi $\sqrt{inç}$

Not: $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$
 $1 \text{ ksi} = 10^3 \text{ psi}$
 $1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N}$