

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

**OYUK KOROZYONUNDA ÇATLAK OLUŞUMU VE  
İLERLEMESİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Faruk YAREN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muhammet CERİT**

**Temmuz 2014**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OYUK KOROZYONUNDA ÇATLAK OLUŞUMU VE  
İLERLEMESİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Faruk YAREN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 18 / 07 /2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr. Muhammet CERİT  
Jüri Başkanı

  
Prof. Dr. Kenan GENEL  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr. Ergün NART  
Üye

## ÖNSÖZ

Yapıda meydana gelen korozyondan kaynaklı oyuğun yapının gerilme dayanımını düşürdüğü bilinmektedir. Literatürdeki pek çok kaynakta korozyon oyuğunun çatlak başlangıcı için uygun bölge olduğu ve bu noktalarda genellikle çatlak başlangıcına rastlandığına dair bilgi bulunmaktadır. Ayrıca yüzeydeki sürekliliği bozması ve gerilme artışına neden olması dolayısı ile korozyon oyuğu, yapının ömrünü de etkilemektedir.

Bu çalışmada korozyon oyuğunun yorulma ömrüne etkisini deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Dalma erozyon tezgahında oyuk oluşturulan numunelerle deneyler gerçekleştirilmiş ardından sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Analiz ve deneylerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Gerilme analizlerinin ardından korozyon oyuğunda çatlak başlangıcı için uygun bir noktada çatlak modellenmiş ve kırılma mekaniği için özelleşmiş program yardımı ile çatlak ilerlemesi incelenmiştir.

Çalışmamda her türlü yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sn. Doç.Dr. Muhammet CERİT hocama, Prof.Dr. Ali Osman AYHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	ix
SUMMARY .....	x

## BÖLÜM 1.

### GİRİŞ

1.1. Giriş .....	1
1.2. Literatür Taraması .....	2

## BÖLÜM 2.

KOROZYON .....	7
2.1. Korozyon Çeşitleri .....	8
2.1.1. Uniform korozyon .....	8
2.1.2. Oyuk (pitting) korozyonu .....	8
2.1.3. Galvanik korozyon .....	9
2.1.4. Aralık korozyonu .....	11
2.1.5. Kabuk altı korozyonu .....	11
2.1.6. Seçimli korozyon .....	11
2.1.7. Taneler arası korozyon .....	12
2.1.8. Erozyonlu korozyon .....	12
2.1.9. Aşınmalı korozyon .....	13
2.1.10. Gerilme korozyonu .....	14
2.1.11. Yorulmalı korozyon .....	14

2.1.12. Hidrojen kırılganlığı .....	14
2.1.13. Kaçak Akım korozyonu.....	15
2.1.14.Mikrobiyolojik korozyon .....	15
2.2. Korozyondan Korunma yöntemleri.....	16
BÖLÜM 3.	
YORULMA.....	17
3.1. Yorulma testleri .....	17
3.2. Dönel Eğilme testi.....	18
3.3. S-N diyagramı .....	18
3.4. Değişken gerilmenin karakterizasyonu .....	19
3.5. Yorulma hasar teorileri .....	20
3.6. Yorulma gerilme yığılma faktörü .....	22
BÖLÜM 4.	
KIRILMA MEKANİĞİ.....	23
4.1. Enerji kriteri yaklaşımı.....	23
4.2. Çatlak deformasyon modları .....	24
4.3. Gerilme şiddeti yaklaşımı.....	25
4.4. Çatlak ucu plastik bölge .....	26
4.5. Yorulma sonucu çatlak oluşumu .....	27
4.6. Kırılma mekaniği yaklaşımı ile yorulma.....	27
BÖLÜM 5.	
KOROZYON OYUĞUNUN YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ.....	30
5.1. Malzeme özellikleri.....	30
5.2. Çekme deneyi .....	30
5.3. Talaşlı imalat ve oyuk oluşturulması.....	30
5.4. Taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemeleri.....	32
5.5. Yorulma deneyleri .....	33

## BÖLÜM 6.

### KOROZYON OYUĞUNUN YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN NÜMERİK

İNCELENMESİ.....	35
6.1. Problemin tanımlanması.....	35
6.2. Modelin doğruluğunun incelenmesi.....	36
6.2.1. Problemin temel mukavemet yaklaşımı İle çözümü .....	36
6.3. Modelin Oluşturulması.....	37
6.4. Analizde Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	38
6.5. Analizde Uygulanan Sınır Şartlar .....	39
6.6. Analizin Çözdürülmesi.....	40

## BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	41
7.1. Yorulma Deneyi Sonuçları .....	41
7.2. Taramalı Elektron Mikroskopu Görüntüleri.....	42
7.3. Oyuk Derinliğinin Gerilme Üzerine Etkisi .....	43
7.4. Oyuk Derinliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi .....	45
7.5. Oyuk Derinliğinin Gerilme Şiddet Faktörüne Etkisi.....	47
7.6. Korozyon Oyuğunda Çatlak İlerlemesi .....	49
7.7. Sonuçların Tartışılması.....	52

KAYNAKLAR.....	54
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ .....	56
----------------	----

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$K_f$	: Yorulma çentik faktörü
$K_t$	: Gerilme yığılma faktörü
$K$	: Gerilme şiddet faktörü
$K_1$	: 1. Modda gerilme şiddet faktörü
$K_{lc}$	: Kırılma tokluğu
$N$	: Çevrim sayısı
$M$	: Moment
$I$	: Atalet momenti
$y$	: Tarafsız eksen den olan uzaklık
$\sigma_{min}$	: En düşük gerilme değeri
$\sigma_{max}$	: En yüksek gerilme değeri
$\sigma_m$	: Ortalama gerilme
$\sigma_a$	: Gerilme genliği
$S_{yt}$	: Akma dayanımı
$S_{ut}$	: Maksimum çekme dayanımı
$S_e$	: Dayanıklılık sınırı
$U_0$	: Birim hacimde depolanan enerji
$U_e$	: Dış enerji
$U_s$	: Şekil değiştirme enerjisi
$U_k$	: Kinetik enerji
$U_d$	: Kaybolan enerji
$a$	: Korozyon oyuk derinliği
$c$	: Korozyon oyuk çapı
$a_c, b$	: Çatlak uzunluğu
$\theta$	: Çatlak üzerindeki bir noktanın açısı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Oyuk oluşma faktörü.....	9
Şekil 2.2. Galvanik korozyon.....	10
Şekil 2.3. Aşınmalı korozyon.....	13
Şekil 3.1. Yorulma teorileri.....	20
Şekil 4.1. Çatlak deformasyon modleri.....	24
Şekil 4.2. Çatlak ucu gerilme gösterimi .....	25
Şekil 4.3. Yorulma çizgileri ve çatlak yüzeyi .....	27
Şekil 4.4. Korozyon oyuğundan kaynaklı çatlak başlangıcı ve ilerlemesi.....	29
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan numunenin boyutları.....	31
Şekil 5.2. Talaşlı imlat sonrası numuneye ait görüntü .....	31
Şekil 5.3. Numune üzerine açılan oyuğun detay resmi .....	32
Şekil 5.4. Yorulma deney cihazına ait görüntü .....	33
Şekil 6.1. Modelin üç boyutlu gösterimi .....	37
Şekil 6.2. Eleman sayısının sonuçlar üzerine etkisi .....	38
Şekil 6.3. Zamana bağlı değişken yükün değişimi.....	39
Şekil 7.1. Oyuksuz numunelerle elde edilen WÖHLER eğrisi.....	41
Şekil 7.2. Oyuk en-boy oranının yorulma ömrüne etkisinin deneysel incelenmesi	42
Şekil 7.3. Kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri .....	43
Şekil 7.4. Derinlik değişimi ile gerilme yığılma faktörünün değişimi.....	44
Şekil 7.5. Derinlik değişimi ile gerilme yığılma faktörü $K_t$ nin değişimi.....	45
Şekil 7.6. Oyuk derinliğinin yorulma ömrüne etkisi.....	46
Şekil 7.7. Çatlak önü gerilme şiddet değerine oyuk derinliğinin etkisi .....	48
Şekil 7.8. Oyuk derinliği ile çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü değerlerinin değişimi .....	49
Şekil 7.9. Yarım oyuk ağzında çatlak ilerleme çizgileri .....	50
Şekil 7.10. En boy oranı 1 olan oyuk ağzındaki çatlak ilerleme çizgileri.....	51
Şekil 7.11. En boy oranı 2 olan oyuk ağzındaki çatlak ilerleme çizgileri.....	52



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Deney numunesine ait kimyasal bileşimi .....	30
Tablo 5.2. Oyuk en boy oranları .....	32
Tablo 6.1. Malzeme Özellikleri .....	39
Tablo 7.1. Yorulma analizlerinde kullanılan değerler.....	46
Tablo 7.2. Gerilme şiddet faktörüne oyuk derinliğinin etkisi .....	47
Tablo 7.3. Farklı derinliklerdeki oyuk ağızlarında çatlak ilerlemesi .....	50

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Korozyon Oyuğu, Yorulma, Çatlak Başlangıcı, Çatlak İlerlemesi, Gerilme Şiddet Faktörü, Kırılma Analizi, Ansys

Birçok mühendislik uygulamasında oyuk korozyonuna sıklıkla rastlanmaktadır. Bu korozyon türü yapıda noktasal olarak meydana gelmektedir. Tüm yüzeyde olmadığından dolayı tespiti zordur ve farkedilmemesi durumunda oyuk zamanla büyüyerek ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Oyuk korozyonu yüzeyde noktasal olarak başlar ve büyüyerek yapının derinlerine doğru ilerler. Korozyonun oluşturduğu oyuk, yapı üzerinde süreksizliğe neden olduğundan dolayı oyuğun bulunduğu noktalarda gerilme yığılmaları meydana gelir. Gerilme yığılmasının artması, tekrarlı yük altındaki yapının yorulma ömrünü düşürmekte ve aynı zamanda bu bölgeler muhtemel çatlaklar için başlangıç noktası olmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle, korozyon oyuğundaki derinlik değişiminin gerilme yığılma faktörüne ve yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar birlikte kullanılmıştır. Deney malzemesi olarak 6082 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen WÖHLER eğrisi analizlerde çözüm için kullanılmıştır. İkinci adımda ise analizlere göre en yüksek gerilmenin olduğu noktadan çatlak başlatılmış ve çatlak ilerlemesi incelenmiştir. Gerilme yığılma faktörünün belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve ANSYS 15.0 programından yararlanılmıştır. Çatlak ilerleme davranışını incelemek için ANSYS 15.0 ile oluşturulan model, FCPAS (Fracture Crack Propagation Analsys System) paket programı yardımı ile çözülmüştür.

Çatlağın ilerleme davranışında önemli bir parametre olan gerilme şiddet faktörünün hesaplanmasının ardından bir sonraki çatlak adımı tahmin edilmiş ve analizler malzemenin kırılma tokluğuna erişene kadar devam ettirilmiştir.

# NUMERICAL INVESTIGATION ON CRACK INITIATION AND PROPAGATION FROM PIT

## SUMMARY

Key Words: Pitting Corrosion, Crack Initiation, Crack Propagation, Stress Intensity Factor, Fracture Mechanics, Ansys

Corrosion pits have been encountered in many engineering applications. This type of corrosion occurs just localised on surface. Determination of pitting corrosion is difficult because of the lack of sign on all surface. If the growth in pit is not realized, it can cause damage. Pitting corrosion initiates on surface and goes deep into the material. Corrosion pit causes discontinuity, leading to stress concentration. Fatigue life decreases because of increasing stress intensity factor. Crack initiates around corrosion pits.

In this study; the effects of the change in pit depth on stress concentration factor and fatigue life are investigated. Results of experimental and finite element analysis are evaluated together. Aluminium 6082 alloy has been used in experimental study. S-N curve is derived from tests on sample and defined as material properties on software. Subsequently, crack initiate on corrosion pit wall and crack propagation are analyzed. In the determination of stress concentration factor, finite element analysis has been used by ANSYS 15.0 software. To investigate crack propagation; model generated by ANSYS 15.0 is solved by FCPAS (Fracture Crack Propagation Analysis System).

After calculation of stress intensity factor which is an important parameter on crack propagation, next step of crack has been estimated. Crack propagation process is repeated until stress intensity factor reaches fracture toughness of material.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Oyuk korozyonu sık karşılaşılan korozyon türlerindedir. Bu tür korozyon, metal yüzeyin bazı noktalarında oyuk şeklinde oluşan korozyondur. Sadece belli bölgelerde noktasal olarak gerçekleştiğinden dolayı tespit edilmesi de oldukça zordur. Bu tür korozyonun oluşumunda metalin etkileşimde bulunduğu ortamdaki iyonlar rol alır. Oyuk içerisinde anodik reaksiyonlar gerçekleşir. Oyuk içi anot gibi davranırken oyuğun giriş kısmı katot olarak görev yapar. Oyuk içindeki reaksiyonlara paralel olarak çevre yüzeylerde de oksijen indirgenmesi olur. Ortamdaki klor iyonları gibi aktif iyonlar demir iyonları ile bileşik oluşturur. Ardından oluşan bileşik, metalden ayrılarak yüzeyde oyuk oluşturur. Reaksiyonlar sonucu oyuk derinleşir. Oyuğun belli bir derinliğe ulaşmasının ardından reaksiyon ürünü olan hidroksiller oyuğun ağız bölgesini kapatmaya başlar. Oyuğun ağız kısmının daralması ile reaksiyonlar yavaşlar. Bu tür korozyonda anot ve katot bölgeleri birbirinden net bir şekilde ayrılır.

Korozyon oyuğu sebebiyle yapıda süreksizlik meydana gelir. Yapıdaki süreksizlik de yapının gerilme dayanımının azalmasına yol açar. Korozyon oyuğu gerilme yığılmasına sebep olur. Oyuğunun gözlemlendiği bölgelerde maksimum gerilme değeri nominal gerilmeye göre birkaç kat daha büyük olabilir. Bu büyüklüğün belirlenmesinde elementer yaklaşımlar yeterli olmadığından deneysel veya numerik çözümlere ihtiyaç duyulur. Deneysel çalışmalarda, bu kritik noktalara zorlanma rozetleri (strain gage) yapıştırılarak zorlanma değeri ölçülebilir. Zorlanma değerlerinden de Hook kanunu yardımıyla gerilme değerleri hesaplanabilir. Bütün bunlar kesit düzensizliğinin olduğu bölgelerde gerilmelerin belirlenmesinin zorluğunu göstermesi açısından önemlidir. Yüzey kusurlarının yaklaşık geometrilerinin belirlenebilmesi halinde, korozyona maruz kalmış yapının gerilme durumu bilgisayar destekli yapısal analizlerle yeterli doğrulukta hesaplanabilir.

Karmaşık yapılarda elementer mukavemet yardımı ile sonuca ulaşmak oldukça zordur. Sonlu elemanlar yönteminin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği bilindiğine göre, karmaşık geometriye sahip çalışmalarda kullanılması uygundur. Lokal düzensizliklerin olduğu bölgelerde gerilme yığılma faktörleri belirlenebilir. Belirlenen bu katsayılar bir yönüyle yapının yük taşıma kapasitesindeki azalmayı gösterir.

Oyuk korozyonun olduğu bölgede gerilme en yüksek değeri alır. Periyodik yükleme halinde yapının yorulur ve gerilmenin en yüksek olduğu bölgede çatlak başlar. Yüklemenin devam etmesi durumunda çatlak ilerlerler ve malzemenin kırılma tokluğuna erişilmesi ile yapıda hasar meydana gelir.

Kırılma mekaniği; çatlak başlangıcı ve ilerlemesi sonucu oluşan hasarla ilgili konuları inceleyen mühendislik alanıdır. Kırılma problemlerinde çatlak ucu tekillik meydana getirdiği için elementer mukavemet yaklaşımı kullanılamaz. Ayrıca yine tekillik sebebiyle sonlu elemanlar yöntemi ile gerilmelerin hesaplanması mümkün değildir. Kırılma mekaniği çatlak ucunda tekil gerilme durumunu kabul etmekle birlikte çatlak ucu gerilme değerinin akma gerilmesi veya atomlar arası bağ tarafından sınırlanmasını göz önünde bulundurarak hasar analizi için gerilme değerini doğrudan kullanmaz.

Kırılma mekaniği yaklaşımları yardımıyla çatlak bulduran yapıların gerilme dayanımı belirlenebilir. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi belirlenerek kırılma için önlemler alınabilir, kırılmanın zararları azaltılabilir.

## **1.2. Literatür Taraması**

Bu bölümde oyuk korozyonun gerilme üzerine etkisini ele alan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca literatürdeki pek çok kaynakta oyuk korozyonunun yorulma ve çatlak başlangıcına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen bilgiler bu bölümde sunulacaktır

Rokhlin ve arkadaşları 1999 yılında yayınladıkları çalışmada; korozyon oyuğunun yorulma çatlak başlangıcına ve yorulma ömrüne etkisini araştırmışlardır. Oyuk derinliğinin belirlenmesi için mikrorayografik metodun kullanıldığı bu çalışmada yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesini araştırmak için farklı derinliklerde yapay oyuklar oluşturmuş ve numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel sonuçları analiz etmek için üç boyutlu kırılma modeli de geliştirilmiştir. Deney sonuçlarına dayanılarak korozyon oyuğunun derinliği ve yorulma ömrü arasında empirik bir ilişki de kurulmuştur [1].

Cerit M. ve arkadaşları tarafından 2009 yılında korozyon oyuğunun gerilme yığılmasına etkisini nümerik olarak incelenmiştir. Oyuğun en-boy oranının gerilme yığılma faktörünü etkileyen temel faktör olduğu ifade edilmiştir. Oyuğun en-boy oranı ile gerilme yığılma faktörü arasındaki ilişki 3 boyutlu sonlu eleman analizleri sonucunda sunulmuştur. SEM görüntüsüne dayanılarak oyuk dibinde ikincil bir oyuğun olması durumu da ele alınmıştır. Yapılan analizler dipteki ikincil oyuğun varlığının gerilme yığılma faktörünü artırdığını göstermiştir. Ayrıca başlangıç aşamasındaki ikincil oyuğun çatlak oluşumu için yüksek potansiyel oluşturduğu belirtilmiştir [2].

Chen G.S. ve arkadaşları 1996 yılında korozyon oyuğunun çatlak başlangıcına etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. 2024-T3 alüminyum malzeme kullanarak oda sıcaklığında farklı yükleme frekansları altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda kırılmaya ilişkin yapılan gözlemlerde korozyon oyuğunun çatlak oluşumunda etkili olduğu ortaya konulmuştur. Bu gözlem, deney sonuçlarına ait SEM görüntüleriyle de desteklenmiştir. Ayrıca 5 Hertz'den yüksek frekanslarda, çatlak başlangıç aşamasında oyuk boyutlarının ve gerilme şiddet faktörünün frekanstan bağımsız olduğunu da ortaya konulmuştur. Korozyon oyuğundan yorulma çatlakına geçişte iki kriter öne sürülmüştür. Bunlardan birincisi; korozyon oyuğundaki gerilme şiddet faktörünün çatlak ilerlemesi için eşik değeri aşması gerekliliğidir. İkincisi ise; aynı süre içerisinde çatlak ilerleme hızı, korozyon oyuğunun büyüme hızını aşması gerektiğidir [3].

Ebara R. 2006 yılında yayınladığı makalesinde yorulma çatlak başlangıç aşamasında korozyon oyuğunun ve çatlak ilerlemesinde tanelerarası korozyonun önemini vurgulamıştır. Ayrıca çatlak ilerlemesinde hidrojen etkisi de yakıt tankerleri özelinde incelenmiştir. Çalışmada buhar türbin kanatları üzerindeki çatlaklar başlıca ele alınan konudur. Rezonansa maruz kaldığından dolayı hareketli kanatçıklarda oluşan yorulma hasarı gözle muayenede kolaylıkla kırılma yüzeyi olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada buhar türbinlerindeki korozyona dayalı yorulma hasarı üç şekilde karakterize edilmiştir. Bunlardan birincisi çatlak başlangıç noktasında korozyon oyuğu gözlenmiştir. İkinci olarak Çatlak başlangıç alanında korozyon oyuğu ile ilişkili mikro çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Son olarak da tanelerarası kırılma yüzeyleri çatlak ilerleme alanında görülmüştür. Sayılan bu üç aşama çalışma içerisinde görsel olarak da sunulmuş ve açıklanmıştır [4].

2012 yılında Gonzalo M. ve arkadaşları tarafından 6063-T5 alüminyum malzemesi kontrollü korozyona maruz bırakılmıştır. Malzemedeki korozyonun yorulma ömrüne ve çatlak ilerlemesine etkisi yorulma testleri gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Çalışmada farklı sürelerde korozyona maruz bırakılmış numuneler üzerindeki korozyon oyuklarının görüntüleri alınmış ve boyutları tayin edilmeye çalışılmıştır. Bu numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler sonucunda korozyonun alüminyum malzemelerde yorulma ömrünü önemli miktarda düşürdüğü ortaya konulmuştur. Gonzalo M. ve arkadaşları makalenin simülasyon kısmında; korozyon oyuğunun dibinde bir çatlak olduğu kabulüyle iki boyutlu kırılma model oluşturmuşlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü hesaplamaya çalışmışlardır. Sonuç olarak korozyon oyuğunun çatlak başlangıç ve ilerleme noktaları olduğunu tespit etmişlerdir. Çatlağın yüzeydeki korozyon oyuklarına yakın noktaları takip ederek ilerlediğini gözlemlemişlerdir [5].

Horner D. A. ve arkadaşları 2011 yılında yayınladıkları makalede farklı olarak üç boyutlu X-ray görüntülerinden yararlanmışlardır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile elde ettikleri sonuçlarla da görüntüleri desteklemiş ve yorumlamışlardır. Görüntüler yardımıyla; oyuk geometrisine bağlı olarak çatlak başlama noktasını istatistikî olarak ortaya koymuşlardır. Gerçekleştirdikleri çok sayıda deneye dayanarak çatlağın %90

oranında korozyon oyuğunun ağız kısmına yakın bölgelerde olduğunu göstermişlerdir [6].

Mahir UZUN, “Yorulma Çatlak İlerlemesi ve Çatlak Davranışının Nümerik Analizi” isimli tezinde çatlak ucunda meydana gelen gerilmeleri ve yer değiştirmeleri incelemiştir. Merkez çatlaklı numuneler üzerinde çalışmış ve gerilmenin çevrim sayısı ile artışını grafik olarak sunmuştur. Sonuç olarak malzemede çatlak ilerledikçe belli bir süre sonra artan gerilme oranının sabit hale geldiğini tespit etmiş ve bunu da malzemede gerilmenin maksimum olduğu yerde pekleşmenin meydana gelmesine bağlamıştır. Ayrıca değişik çatlak boyları için değişik yüklemelerde çevrimler uygulanmış ve çatlak ucundaki gerilmenin çatlak boyuyla ilişkili şekilde arttığını gözlemlemiştir [7].

Galip KEÇECİOĞLU, tezinde perçinli bağlantılarda gerilme ve kırılma analizini incelemiştir. Üç boyutlu çatlaklı ve çatlaksız modeller oluşturarak çekme gerilmesi altında kırılma analizi gerçekleştirmiştir. Perçinli bağlantılarda sıkça görülen köşe çatlağı ve yarı eliptik yüzey çatlağı için plaka üzerinde yükleme yönüne dik olacak şekilde çatlak yerleştirilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Çatlak şekil ve boyutlarının gerilme şiddet faktörüne etkileri incelenmiştir [8].

Ercan ARICAN, tezinde yorulmadan kaynaklanan çatlak ilerlemesini nümerik olarak incelemiştir. ANSYS sonlu eleman paketinde gerilme hesaplarının yapılmasının ardından FRANC3D programında çatlak analizi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede çevrimler altında çatlağın yapı ve malzeme durumuna etkisi incelenmiş, çatlak ilerleme ve ömür hesapları yapılmıştır. Çatlak boyu ve yorulma ömür grafikleri verilmiştir. Hazırlanan modelde kırılma için en tehlikeli durumun mod-I olduğu ifade edilmiştir. Çatlak boyunun artmasıyla orantılı olarak gerilme şiddet faktörünün de hızla arttığı grafiksel olarak gösterilmiştir [9].

Ahmet SOYYİĞİT, farklı derinliklerde yapay oyuk oluşturduğu numunelerin dönel eğme zorlanması altındaki yorulma davranışını incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda 7075-T6 alüminyum malzemesi üzerindeki yapay oyukların yorulma ömrü üzerinde önemli etkisi olduğu gösterilmiştir. Kırık yüzeyinden alınan



görüntülere dayanarak, tez çalışmasında tüm çatlakların yapay oyuklardan başladığı ifade edilmiştir [10].

Literatürde korozyon oyuğunun yorulma ömrü ve çatlak başlangıcı ile ilişkisini konu edinen birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak yapılan literatur tarama çalışmasında, üç boyutlu model üzerinde sonlu elemanlar yaklaşımını kullanan, hem sonlu eleman hem de deneysel verileri içeren çalışma sayısı oldukça azdır. Ayrıca korozyon oyuğunun çatlak başlangıcı için tetikleyici olduğunu ifade eden çalışmaların çatlak ilerlemesi ile ilgili sonuçları net bir şekilde ortaya koymadığı görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı “Oyuk Korozyonunda Çatlak Oluşumu ve İlerlemesinin Nümerik İncelenmesi” başlıklı çalışma gerçekleştirilmiştir.

## **BÖLÜM 2. KOROZYON**

En düşük enerji seviyesine ulaşmak için doğası gereği demir ve çelik diğer kimyasallarla bileşik oluşturma eğilimindedir. Demir ve çelik en düşük enerji seviyesine ulaşmak için doğada bol miktarda bulunan oksijen ve su ile bileşik yaparak demir cevherine çok benzer kimyasal yapıya sahip pas'a dönüşür.

Metalin çevre ile reaksiyona girmesi sonucu bozunmasına korozyon denir. Korozyon konusu tartışılırken olayın; bir malzeme ve bir ortamın kombinasyonu olduğunun düşünülmesi önemlidir. Malzemenin içinde bulunduğu ortam şartlarını belirlemeden malzemenin korozyon davranışını tanımlamak mümkün değildir. Malzemenin korozyon davranışı, içinde bulunduğu ortama; ortamın korozyon etkisi de, yapısını bozmaya çalıştığı malzemeye bağlıdır.

Korozyon için yapılan sınıflandırmalar genellikle aşağıdaki üç faktörden birine dayanır.

Korozyon maddenin yapısına göre sınıflandırma: Korozyon kuru veya ıslak olarak sınıflandırılabilir. Sıvı veya nem biçim değişimi için gereklidir. Kuru korozyon genellikle yüksek sıcaklıktaki gazların reaksiyonlarını içerir.

Korozyon şekline (görünüşüne) göre sınıflandırma: Korozyonun tüm yüzeyde oluşması veya sadece bir bölgede korozyonun oluşmasına göre sınıflandırma yapılması durumudur.

Korozyon şekline (görüntüsüne) göre sınıflandırma çıplak gözle veya büyüteç yardımıyla korozyon şeklinin tanımlanmasına dayanır. Bu yöntem hasar analizinde oldukça sık kullanılmaktadır.

Islak korozyonun şekline (görüntüsüne) göre sınıflandırılmasında sekiz kategori vardır. Teoride bu sekiz kategori birbirinden ayrılmaktaysa da pratikte birden çok kategoriye dahil edilebilecek korozyon şekilleri ile karşılaşılabilir. Yine de bu kategorilendirme korozyon problemlerinin çözülmesi için oldukça yardımcı olmaktadır [11].

## **2.1. Korozyon Çeşitleri**

Korozyondan korunma yöntemlerinin etkin kullanımı için korozyon çeşidinin doğru tespiti önemlidir. Pratikte birbirinden farklı özelliklere sahip on dört korozyon çeşidi vardır. Korozyona karşı alınacak önlemler de korozyon çeşidine göre farklılık göstermektedir.

### **2.1.1. Uniform korozyon**

İsminden de anlaşılacağı üzere tüm metal yüzeyine etki eden korozyon türüdür. Anot ve katotun sürekli yer değiştirmesi sonucu homojen incelmeye sebep olur. Metal yüzeyinde her noktada eşit hızda korozyon gerçekleşir. Her noktada korozyon hızı eşit olduğundan malzemenin incelmesi de her noktada eşit olacaktır.

Metallerin tahribatında uniform korozyon tonaj bazında en büyük paya sahiptir. Ancak nispeten basit daldırma testleri ile doğru ömür tahmini yapılabilmesinden dolayı teknik açıdan bu korozyon türü çok büyük tehlike oluşturmamaktadır [11].

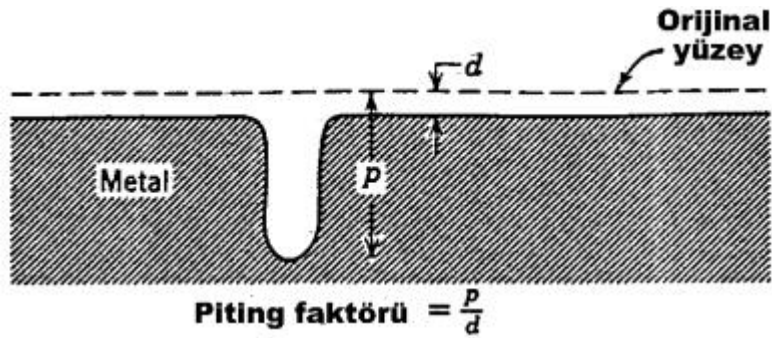
### **2.1.2. Oyuk (pitting) korozyonu**

Malzeme yüzeyinde oyuk oluşturan ve sadece bölgesel olarak görülen korozyon türüdür. Tespiti ve bu korozyona karşı dayanıklı tasarım yapmanın zorluğundan dolayı oyuk korozyonu uniform korozyondan daha tehlikeli olarak kabul edilmektedir. Korozyon ürünleri genellikle korozyon oyuğunu kapatır. Küçük, sığ bir oyuk çok az bir malzeme kaybıyla bütün sistemin hasara uğramasına sebep olabilir.[12] Bu tür korozyonda oyuğun içi anot görevi görürken oyuğun ağız kısmı katot gibi davranır. Dolayısı ile anot ve katot kısımları birbirinden net bir şekilde

ayrılmıştır. Uniform korozyondaki gibi kutupların yer değiştirmesi söz konusu değildir.

Oyuk içerisinde anodik reaksiyonlara paralel olarak çevre yüzeylerde de oksijen indirgenmesi olur. Çevre yüzeylerdeki bu katodik reaksiyonlar oyukun belli bir derinliğe ulaşması ve oluşan metal hidroksillerinin oyukun ağzını kapatması ile yavaşlar [13].

Oyuk korozyonunun değerlendirilmesi için oyuk oluşturma faktörü “pitting faktörü” ifadesi kullanılır. Bu ifade maksimum oyuk derinliğinin ortalama kalınlık azalmasına oranı olarak tanımlanır. Bu bağıntı ortalama penetrasyon hızının hesaplanması için kullanılır. Buradan da anlaşılacağı gibi maksimum oyuk derinliğinin belirlenmesi korozyon zararının belirlenmesi için önemlidir [13].



Şekil 2.1. Oyuk oluşturma faktörü.

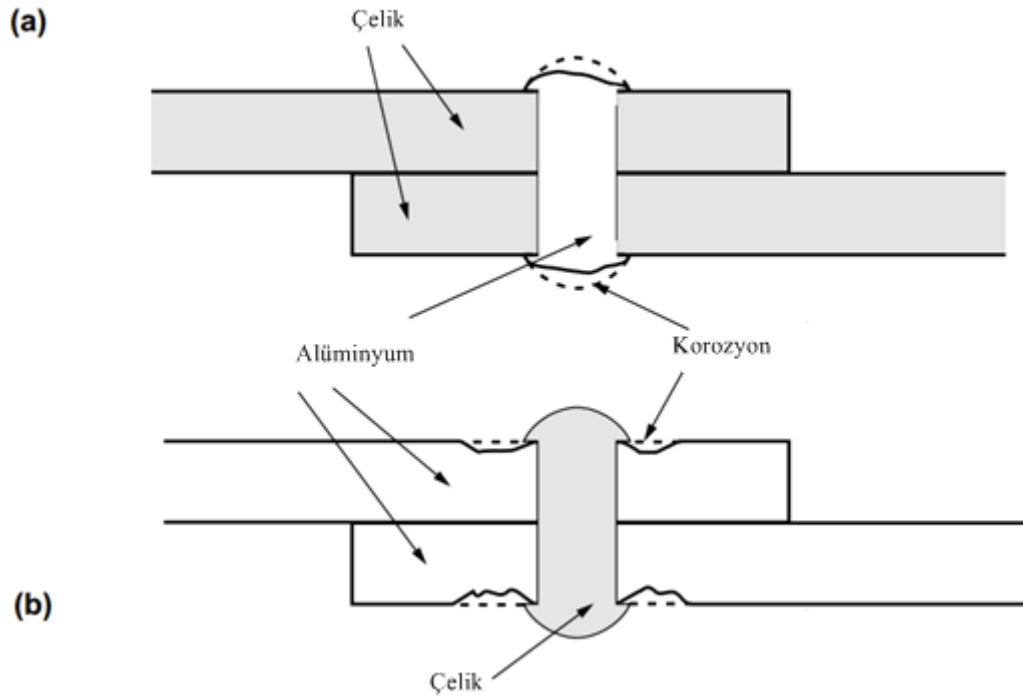
Pasifleşme özelliği olan ve korozyon ürünleri suda az çözünen metaller oyuk korozyonuna duyarlıdır. Katodik koruma ile oyuk korozyonu tam olarak önlenemez [13].

### 2.1.3. Galvanik korozyon

Galvanik korozyon farklı metalik malzemelerin birbirine temas etmesi ve ortamda bir elektrolitin varlığı durumunda oluşur. Ayrıca benzer hasar, metal ve alaşımları veya karbon, grafit gibi diğer iletken malzemeler arasında da oluşabilir. Elektrokimyasal bir korozyon hücresi; benzer olmayan malzemelerin korozyon

potansiyellerindeki farktan dolayı oluşur. Metallerin daha soy olanı katot, daha aktif olanının ise anot görevi üstlenmesiyle korozyon hücresi oluşur [12].

Bu tür korozyonda sadece anot olan metal kısım korozyona uğrar. Galvanik korozyondan korunmak için galvanik seride birbirinden uzak olan metallerin temasından kaçınılmalıdır. Galvanik seri, gerçek ortamlarda metallerin potansiyellerinin ölçülüp sıralanması ile elde edilen termodinamik bir seridir. Temas ve malzeme seçimi konusunda serbestlik yoksa mümkün olduğunca anot/katot yüzey oranının küçük tutulması da koruma için alınabilecek bir önlemdir [13].



Şekil 2.2. Galvanik korozyon

Anot/katot yüzey alanı oranı korozyon şiddeti üzerinde önemli bir rol oynar. Büyük katot yüzeyine karşılık anot yüzeyinin küçük olması akım yoğunluğunun artmasına ve dar bir bölgede şiddetli bir korozyon görülmesine sebep olur. Tam tersi durumda ise akım yoğunluğu düşer ve korozyon geniş bir alana yayılarak etkisiz kalır [13].

#### **2.1.4. Aralık korozyonu**

Aralık korozyonu metal-metal veya metal-metal dışı bileşenlerin arasındaki açıklıkta meydana gelen bölgesel bozunma olarak tanımlanır. Bu tür korozyon; aralık içindeki oksijen bakımından fakir çözelti ile aralık dışındaki oksijen bakımından zengin çözelti arasındaki potansiyel fark sebebiyle oluşur. Aralık içindeki çözelti anot görevi görürken dışarıda kalan çözelti katottur [12].

#### **2.1.5. Kabuk altı korozyonu**

Kabuk altı korozyonu doğal koşullarda oluşan kalıntılar ile malzeme arasındaki aralık korozyonu olarak tanımlanabilir. Su tesisatındaki kireç gibi su kaynaklı çökeltiler, korozyon ürünleri, biyolojik ve daha birçok kalıntının oluşturacağı kabuk bu korozyonun tetikleyici faktörüdür. Kabuk altında kalan kısım oksijenle daha az temas edecek ve kabuk çevresi ile arasında bir potansiyel farkı meydana gelecektir. Böylelikle kabuğun altı anot, çevresi ise katot olarak korozyon hücrelerini meydana getirecektir.

Kalıntıların belli periyotlarla temizlenmesi, birikinti oluşumuna izin vermeyecek tasarım, koruyucu kaplama, katodik koruma gibi yöntemlerle bu tür korozyon önlenir.

Kabuk altı korozyonunun tipik bir örneği de “filiform korozyonu” olarak bilinir. Filiform korozyonu metal üzerindeki boya veya kaplama altında oluşan kıvrılarak ilerleyen bir korozyon şeklidir. Ancak bu korozyonun mekanizması kabuk altı korozyon ile birebir aynı değildir [13].

#### **2.1.6. Seçimli korozyon**

Bir alaşım içerisindeki elementlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşması sonucu oluşan korozyondur.

Seçimli korozyon mekanizması şu şekilde açıklanmaktadır. Alaşım yüzeyinde her iki element de korozyona uğrar ancak elementlerden biri çözültide kalırken diğeri katodik reaksiyon ile yeniden metal haline döner. Bu, poroz bir yapı oluşturacak şekilde derinlere doğru ilerler [13].

### **2.1.7. Taneler arası korozyon**

Eritilmiş bir metalin katılaşması veya katı haldeki bir metalin ısıtılma tabii tutulması sırasında metal atomu kristallerinin sınır bölgelerinde korozyon açısından bazı zorluklar oluşabilir. Metal korozif bir ortam içine girdiğinde bu bölgelerde taneler arası korozyon olur. Taneler arası safsızlık durumunda seçimli korozyona benzer bir korozyon gerçekleşir [13].

Alaşımın taneler arası korozyona duyarlılığı genellikle ısıtılma iyileştirmeleriyle azaltılabilmektedir. Genelde; alaşımlar taneler arası korozyona duyarlılığı düşük olmasından dolayı ısıtılma uygulanmış koşullarda kullanılır. Malzemenin bileşimi de oldukça önemli bir faktördür. Karbon ve nitrojen gibi oldukça düşük dokular arası element seviyesine sahip paslanmaz çelikler bu korozyon türü için duyarsızdır. Titanyum veya niyobyum katkısıyla ısıtılma edilmiş çelik alaşımları bu korozyon türünden nadiren etkilenir [12].

Taneler arası korozyonda çok küçük kütle kaybına karşın tane sınırlarında korozyon hızı çok yüksek değerlere ulaşabilir. Taneler bütünlük ve şekillerini korur ancak taneler arası bağ bozulmaya başlar ve metallere özgü bazı özelliklerde değişiklikler olabilir.

### **2.1.8. Erozyonlu korozyon**

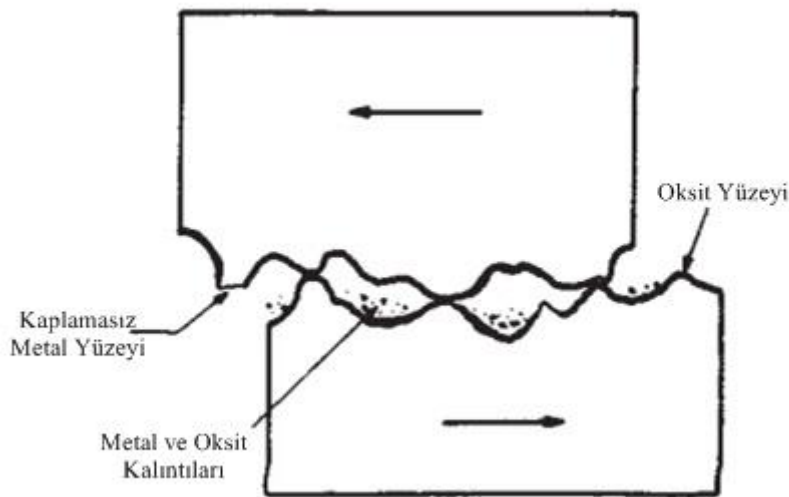
Erozyonlu korozyon mekanik aşınma veya aşındırıcı etkinin korozyonla birlikte uygulanması sebebiyle metal yüzeyindeki bozunmanın hızlandığı korozyon türüdür. Aşındırıcı etki ile korozyonun bileşiminin sonuçları kimyasal veya mekanik korozyonun tek başına olan etkisinden daha ciddi olacaktır [11].

Korozif çözeltilinin metal yüzeyinden hızla akması durumunda korozyon olayının yanında erozyon da gerçekleşir. Bu da korozyon hızını artırır. Akış hızı arttıkça erozyon etkisi de artar. Korozyon sonucu oluşan küçük bir oyuk türbülans etkisiyle erozyonlu korozyon olayını başlatıcı etken olur. Kavitasyon erozyonlu korozyon olayının özel bir şeklidir.

### 2.1.9. Aşınmalı korozyon

Aşınmalı korozyon; aşınma ve korozyon işlemlerinin birlikte gerçekleştiği korozyon türüdür. Birbiriyle temas halindeki malzemelerin hareket etmesi ile yüzeydeki çıkıntılar kopar. Malzemelerin hareketi sonucunda metal partiküllerinin kopmasıyla çıkıntıların etrafındaki oksijen sürtünme yüzeyleri arasında sıkışarak korozyona neden olur. Oksitler aşındırıcı ve malzeme kaybını artıran bir role sahiptir. Aşınmalı korozyon kazınan parçaların oksitlenmesi ile tekrarlanarak sürer. Demir alaşımlarında temas yüzeyleri arasındaki kırmızı sızıntı ile bu tür aşınma kolaylıkla anlaşılabilir [11].

Yağlama, hareketi kısıtlama, birbiriyle temas halinde çalışacak malzemelerin seçimi gibi iyileştirmelerle bu tür korozyondan kaçınılmaya çalışılır.



Şekil 2.3. Aşınmalı korozyon



### **2.1.10. Gerilme korozyonu**

Korozif ve mekanik etmenlerin birlikte yol açtığı mekanik zorlanmalı korozyon türüdür. Kimyasal ve mekanik etkilerin birbirini destekler nitelikte ilerlemesi bu tür korozyonun en önemli özelliğidir.

Bu korozyonun oluşması için çekme gerilmesinin malzeme üzerine etkimesi gereklidir. Çekme gerilmesinden dolayı korozyon ürünleri metal yüzeyinde kabuk oluşturamaz. Pasifleşme gerçekleşmediği için korozyon hızlı bir şekilde ilerler ve çatlak başlar.

Stres korozyonundan kaçınmak için malzeme üzerindeki çekme gerilmesi ve korozif ortam etkisi azaltılmalıdır.

### **2.1.11. Yorulmalı korozyon**

Periyodik yükler altında çalışan malzemeler yorulmaya maruz kalırlar. Malzemeler yorulma etkisiyle akma dayanımından daha düşük değerlerde hasara uğrarlar. Korozyon olayının yorulma etkisi ile aynı anda gerçekleşmesi sonucu hasar oluşması için gerekli olan süre; malzemenin sadece korozyon veya sadece yorulma etkisi ile hasara uğraması için gerekli olan süreden daha kısadır.

Yorulmalı korozyondan korunmak için katodik koruma yöntemi kullanılabilir, ortamın korozif etkisi veya malzemenin korozyon dayanımı artırılabilir.

### **2.1.12. Hidrojen kırılabilirliği**

Bir reaksiyon sonucu ortaya çıkan hidrojen atomu metal yüzeyi tarafından adsorbe edilir ve yapının içine hapsolünür. Yapı içerisindeki hidrojen atomu, molekül oluştururken basınca sebep olarak iç gerilmelere sebep olur.

Hidrojen gevrekliği elektrolit, gerilme ve çatlak gibi üç ana elemanın varlığına rağmen, hasar mekanizması temelde farklı olduğu için gerilme korozyonu olarak nitelenmemelidir. Gerilme korozyonunda çatlak başladıktan sonra karşılıklı etkileşimle olay giderek hızlanır [14].

Yapının içerisine hapsolmuş hidrojen, yapının kısa süreli olarak yüksek sıcaklığa çıkarılmasıyla giderilebilir. Çelik içerisine katılan nikel veya molibden malzemenin hidrojen kırılğanlığına karşı dayanımını artırır [13].

### **2.1.13. Kaçak akım korozyonu**

Birbiriyle temas halindeki malzemelerin üzerlerinde farklı elektrik potansiyeli bulundurması durumunda korozyon anot ve katottan oluşan korozyon hücresi meydana gelir. Doğru akımla çalışan makinaların yakınlarındaki metal yapılar; doğru akım kaçağı olması durumunda aradaki potansiyel farktan dolayı korozyona uğrar.

Kaçak akım korozyonuna önlem olarak potansiyeli korunmak istenen yapı dışında başka bir elemana aktarmak veya yapının elektrik direncini artırmak gibi yöntemler kullanılabilir.

### **2.1.14. Mikrobiyolojik korozyon**

Mikroorganizmalar, canlılıklarını devam ettirmek için asit ve sülfür gibi bileşenler açığa çıkarırlar. Açığa çıkan bu bileşenler metal üzerindeki korozyon hızını artırır. Dolayısı ile mikrobiyolojik korozyon (MIC); mikro yapıdaki canlıların sebep olduğu korozyon olarak adlandırılabilir. Mikrobiyolojik korozyon bölgesel olduğundan dolayı korozyon sonrası yapının görüntüsü oyuk korozyonu sonucunda oluşan geometriye benzerdir.

## 2.2. Korozyondan Korunma Yöntemleri

Korozyonu kontrol etmek için beş temel yöntem vardır. Çoğu korozyon tipine uygun olan yöntemler genellikle korozyon kontrolü için en önemli aşama olan tasarım aşamalarında daha çok kabul görmektedir.

Korozyon kontrolü için sistem tasarımı ilk ve en önemli aşamadır. Oluşabilecek korozyon problemlerini öngörerek ve üretim öncesinde buna uygun tasarım yaparak işletme sırasında oluşabilecek büyük maliyetli zararlar önlenir. Tasarım yapılırken elemanın fonksiyonu, çalışma ortamı, malzeme seçimi ve üretimi göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak iyi bir tasarım her zaman korozyondan korunmak için yeterli değildir.

Uygun malzeme seçilmemesi durumunda tahmin edilen süreden daha erken hasarlarla karşılaşmak olasıdır. Malzeme seçim aşaması genellikle üretim, birlikte çalışacak diğer yapılar, ortam şartları, maliyet ve erişilebilirlik gibi birçok şart göz önünde bulundurularak yapılır. Örneğin yapının galvanik korozyona uğramaması için temas halinde bulunduğu diğer malzemeler ve bunların galvanik serideki yeri bilinmeli ve mümkün olduğunca galvanik serideki yakın malzemeler seçilmelidir.

Koruyucu kaplama uygulamaları korozyonla mücadelede yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Korozyonla mücadelede kaplamalar; çevre veya temas yüzeyleriyle arada engel, kimyasal reaksiyonları yavaşlatıcı veya korozyonun malzeme yerine kendi üzerinde gerçekleşmesini sağlayıcı rolleri üstlenir.

Katodik veya anodik koruma yöntemleri metallerin sahip olduğu potansiyeli değiştirme uygulamalarıdır. Bu yöntemde korunması istenen metal üzerindeki potansiyel doğrudan güç kaynağı ile akım uygulanmasıyla veya farklı metallerin bağlantısı sebebiyle oluşacak galvanik korozyon yardımıyla aktarılır.

Ortam şartlarının PH derecesi, ortamda bulunan iyonlar, mikroorganik canlılar, nem veya yüksek sıcaklık da korozyonu etkiler. İmkanlar dahilinde bu şartların optimum düzeyde tutulması da korozyona karşı alınacak tedbirler arasında önemli bir yer tutar.

## **BÖLÜM 3. YORULMA**

Yapının zamana bağılı olarak değişen yükler altında çalışması durumunda yapı akma gerilmesinin altında bir gerilme değerinde hasara uğrayabilir. Tekrarlı yükler sebebiyle çatlağın ilerlemesine yorulma adı verilir [15].

### **3.1. Yorulma Testleri**

Tasarım ve analizde üç önemli yorulma ömür metodu vardır. Bunlar gerilme-ömür metodu, zorlanma-ömür metodu ve lineer-elastik kırılma mekaniği metodudur. Bu metotlar belli bir yükleme seviyesinde kırılmanın gerçekleşeceği çevrim sayısını tahmin etmek için kullanılırlar.  $1 \leq N \leq 10^3$  aralığındaki çevrim sayısı genellikle düşük çevrimli yorulma,  $10^3$  den daha yüksek değerler ise yüksek çevrimli yorulma olarak kabul edilir. Gerilme-Ömür metodu gerilme seviyesini temel alır ve özellikle düşük çevrimli uygulamalarda doğruluk miktarı düşüktür. Buna rağmen uygulama kolaylığı, yeterli destekleyici veri ve yüksek çevrimli uygulamalar için yeterli doğrulukta sonuç vermesinden dolayı gerilme-ömür metodu en çok kullanılan metottur [16].

Zorlanma-ömür metodunda ömür tahmini yapılmak istenen bölgenin detaylı plastik deformasyon analizi gereklidir. Bu metot özellikle düşük çevrim sayılı yorulma uygulamalarında iyi sonuçlar vermektedir. Bu metodun uygulanmasında çok sayıda idealizasyon yapılması gerektiğinden sonuçlarda kesin olmayan bilgiler olacaktır [16].

Periyodik yükler altındaki malzemelerin mukavemetini belirlemek için çekme, burma, eğme veya bunların kombinasyonundan oluşan dört tip test bulunmaktadır. Her bir testte kopma gerçekleşene kadar çevrim sayısı veya gerilme sayılırken numuneler belli şiddetteki tekrarlı kuvvete tabi tutulur. R.R. Moore yüksek hızlı

dönel eğme yorulma cihazı çoğunlukla kullanılan cihazdır. Test gerçekleştirilirken numune belirli bir  $W$  ağırlığı ile yüklenir. Deney düzeneğindeki motorun numuneyi döndürdüğü ancak ağırlık olmadığını belirtmek gereklidir. Tipik bir dönel eğme yorulma cihazı 500-10.000 rpm aralığında çalışabilir ve numune üzerinde 200 lb.in değerine kadar moment oluşturabilir [15].

### 3.2. Dönel Eğilme Testi

Dönel eğme yorulma testinde, dairesel kesitli ve yüzeyi zımparalanmış numune üzerine eğme momenti uygulanır. Dönme hareketi ile numune üzerindeki bir noktadaki eğme gerilmesi de sürekli olarak maksimum çekme gerilmesi ile maksimum basma gerilmesi arasında değişir. Numunenin ortası daha küçük çapa sahip olduğundan en yüksek gerilme değeri de orta noktadadır [15].

### 3.3. S-N Diyagramı

En sık kullanılan S-N diyagramı konsepti; numune üzerine uygulanan sabit genlikteki gerilme karşısında numunenin kırılmasına kadarki çevrim sayısının bulunduğu diyagramdır. Düşük yükleme seviyelerinde hasarın oluşması için milyon mertebelerinde çevrim gerekebilir bu nedenle apsis genellikle logaritmik olarak ifade edilir [17].

Bazı malzemelerin (özellikle demir alaşımlarının) S-N eğrileri neticede düzleşir [17].

Dayanıklılık sınırı ve yorulma dayanımı, malzemelerin periyodik yükleme durumu için iki önemli özelliktir. Yorulma dayanımı ( $S'_n$ ), malzemenin belirli bir yorulma ömrüne karşılık gelen gerilme değeridir. O halde, bir malzemenin yorulma dayanımının değeri çevrim sayısı ile birlikte tanımlanmalıdır [15].

Dayanıklılık sınırı ( $S'_e$ ) veya yorulma sınırı; malzemenin sonsuz süre ile kırılmadan maksimum değişken yorulma dayanımı değeridir. Dolayısı ile dayanıklılık sınırı hasar için gerekli olan çevrim sayısı ile ilişkili değildir [15].

Malzeme, üretim yöntemi, çevresel etkenler ve tasarım şartları yorulma davranışı üzerinde etkilidir. Boyut, geometri, malzeme bileşenleri, ısıl işlem, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, gerilme yığılması, artık gerilmeler, korozyon, sıcaklık, hız yorulma ömrünü azaltıcı tipik etkenlerdir.

### 3.4. Değişken Gerilmenin Karakterizasyonu

Farklı dalgalı gerilme modelleri olmasına karşın dönme hareketi yapan birçok makinenin üzerindeki dalgalı gerilme genellikle sinüzoidal olarak modellenir. Dalgalı gerilmede önemli olan dalga şekli değil, maksimum ve minimum gerilme değerleridir. Dolayısı ile en yüksek ve en düşük kuvvet değerleri kuvvetin modellenmesi için kullanılır.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (3.2)$$

$\sigma_{min}$  = minimum gerilme

$\sigma_m$  = ortalama gerilme

$\sigma_{max}$  = maksimum gerilme

$\sigma_a$  = gerilme genliği

Zamana bağlı olarak değişen her yük yorulma hasarlanmasına sebep olabilir. Hasara sebep olan bu yükler uygulamaya göre çok fazla çeşitlilik gösterebilir. Bu nedenle, parçaların gerilme şartlarına göre yorulmaya karşı direnci belirlenmelidir [15].

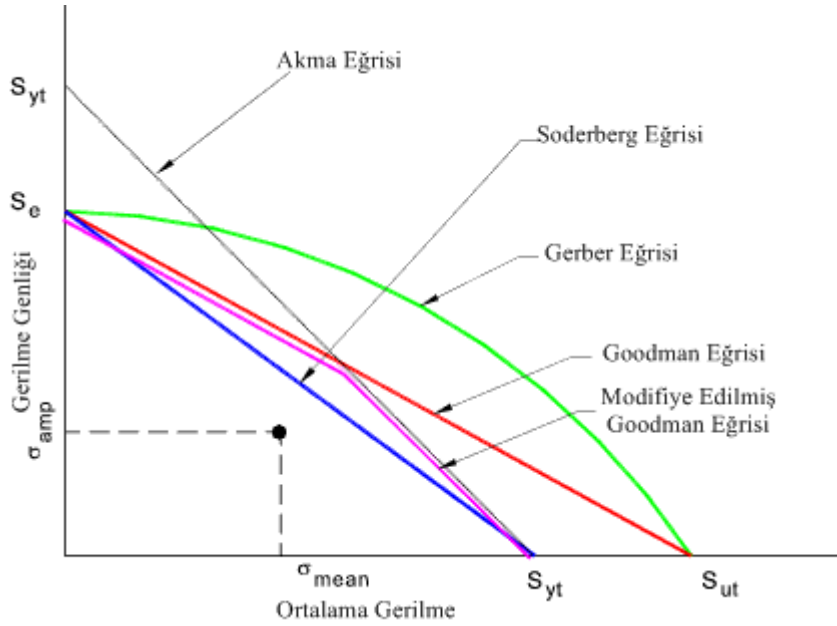
Eşitlik 3.1 ve 3.2 de verilen  $\sigma_a$  ve  $\sigma_m$  değerleri herhangi bir yüzeysel kusur olmaması durumu için verilmiş nominal değerlerdir. Yüzeyde çentik vb. kusurlar varsa bu eşitlikler yorulma çentik faktörü  $K_f$  ile çarpılarak kullanılmalıdır.

Gerilme oranı R minimum gerilme değerinin maksimum gerilme değerine bölünmesi ile elde edilir. Ortalama gerilmenin sıfıra eşit olması durumu için maksimum ve minimum gerilme değerleri birbirine eşit olduğundan  $R=1$ ,  $A=\infty$  dir.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3.3)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (3.4)$$

### 3.5. Yorulma Hasar Teorileri



Şekil 3.1. Yorulma teorileri

Şekil 3.1 de genel durum için yorulma diyagramı verilmiştir. Bu diyagramın apsis'inde ortalama gerilme, ordinatında da gerilme genliği yer almaktadır. Diyagramdaki gerilme ve genlik değerleri parça üzerine etkileyen maksimum ve minimum kuvvete bağlıdır. Gerilme genliği sıfıra eşit olması yüklemenin statik olduğu anlamına gelir ve bu durumda hasar kriterisi S<sub>yt</sub> ve S<sub>ut</sub> olarak diyagramda gösterilmiştir. Ortalama gerilme değeri sıfır olduğunda dayanıklılık limiti S<sub>e</sub> olarak ordinat üzerinde çizilmiştir. Ortalama gerilme ve gerilme genliğinin ikisinin birden parça üzerine etkimesi durumunda hasar grafikte gösterilen farklı noktalarda oluşabilir [18].

Ortalama gerilme ve gerilme genliğinin farklı durumları için emniyetli ve riskli bölgeyi ayıran bir sınır vardır. Bu sınırın belirlenmesi için farklı kriterler ortaya

konulmuştur [18]. Bu kriterler yardımıyla malzemeye herhangi bir ortalama gerilme uygulandığında ne kadar gerilme genliği uygulanabileceği hesaplanır.

Gerber eğrisi, hasar noktalarını mümkün olan en iyi şekilde test datalarına uydurur. Goodman çizgisi ise deney datalarının altında kalan bir çizgi şeklindedir. Goodman çizgisi ve Gerber eğrisi grafiğin apsis ve ordinatında aynı noktalarda kesişirler. Buna rağmen Goodman çizgisi Gerber eğrisini ve hasar noktalarını tamamıyla kapsadığından tasarım için daha güvenlidir [18].

Soderberg çizgisi diğer iki grafiğe göre daha tedbirlidir ve akma durumunda bile herhangi bir kabul yapılmasını gerektirmez. Grafiğin her iki ekseninde de akma çizgisi ile bağlantılı durumdadır. Bu nedenle malzeme akmaya başladığında yorulma açısından emniyet sınırı içinde olmasına bakılmaksızın hasar oluştu kabul edilir. Bu kriter daha çok sünek malzemelerin sonsuz dayanım hesaplarında kullanılır.

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1 \quad (3.5)$$

$a$  ve  $b$  doğrunun sırasıyla  $x$  ve  $y$  eksenlerini kestiği noktalar olarak alınır ve doğrunun denklemi uygulanarak Soderberg ve Goodman çizgileri için eşitlikler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\sigma_m}{S_{yt}} + \frac{\sigma_a}{S_e} = 1 \quad (\text{Soderberg}) \quad (3.6)$$

$$\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_e} = 1 \quad (\text{Goodman}) \quad (3.7)$$

Parçanın gerilme genliğinin yanında ortalama gerilmeye de tabi olduğu durumlarda Goodman kriteri yorulma için yaygın kullanıma sahiptir.



### 3.6. Yorulma Gerilme Yığılma Faktörü

Gerileme yığılması yorulmaya bağılı hasarlanmada çok önemli bir faktördür. Dinamik yükleme koşulları için, teorik gerilme yığılma faktörünün ( $K_t$ ) malzemenin çentik hassasiyetine bağılı olarak modifiye edilmesi gereklidir.

$$K_f = \frac{\text{çentik bulundurmıyan numunenin dayanım limiti}}{\text{çentikli numunenin dayanım limiti}}$$

Deneysel sonuçlar göstermiştir ki;  $K_f$  genellikle malzeme yapısındaki iç düzensizlikler nedeniyle  $K_t$  değerine eşit veya daha küçüktür. Çentiksiz numuneler de bile içyapıdaki düzensizlikler oldukça etkilidir. Bu problem çentik faktörü kullanılarak elimine edilmeye çalışılır [15].

## **BÖLÜM 4. KIRILMA MEKANİĞİ**

Kırılma mekaniği; çatlak başlangıcı ve ilerlemesi sonucu oluşan hasarla ilgili konuları inceleyen mühendislik alanıdır. Bu alana temel oluşturan gelişmeler başlıca; 1920 yılında Griffith tarafından gerçekleştirilen öncü çalışmalar ve 1950 yılında Irvin tarafından ortaya konulan gerilme şiddet faktörü kavramıdır. Elastik-Plastik kırılma mekaniğine ait çalışmalar ise 1960 ila 1970 yılları arasında gerçekleştirilmiştir [19].

Kırılma mekaniğinde kırılma ile ilgili parametre kırılma tokluğu veya gerilme şiddet faktörü (K) dır. Gerilme şiddet faktörü (K), çatlak ucu civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve yönünün uyumuna bağlıdır [7]. Çatlak ucu gerilme alanı ve enerji yaklaşımı kırılma analizi için kullanılan temel iki yaklaşımdır.

Çatlakla ilgili lineer elastik analiz sonuçları, çatlak ucu civarındaki gerilme değerinin çatlak ucu uzaklığının karekökü ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki çatlak ucunda gerilme değeri sonsuz olmaktadır. Böyle bir tekil gerilme durumu, hasar analizinde klasik mukavemet kriterlerini uygulanamaz kılmaktadır. Kırılma mekaniği, çatlak ucunda tekil gerilme durumunu kabul etmekle birlikte çatlak ucu gerilme değerinin akma gerilmesi veya atomlar arası bağ tarafından sınırlanmasını göz önünde bulundurarak hasar analizi için gerilme değerini doğrudan kullanmaz [19].

### **4.1. Enerji Kriteri Yaklaşımı**

Griffith'in ortaya koyduğu bu teoriye göre; serbest kalan elastik enerjinin yeni yüzey oluşturma enerjisine eşit veya daha fazla olması durumunda çatlak ilerlemesi gerçekleşir [20].

Bu kriter cam ve benzeri ideal gevrek cisme yakın malzemelerde gerçeğe yakın değerler vermektedir. Ancak metal malzemeler gibi mühendislik açısından çok önemli malzemelerde kırılma öncesi ve sırasında önemli ölçüde kalıcı şekil değişiminin olduğu görülmüştür. Dolayısıyla Griffith'in ortaya koyduğu kriterlerde serbest kalan enerji yüzey oluşumunda kullanıldığı gibi kalıcı şekil değişimi için de harcanacaktır. Kalıcı şekil değişiminin her malzemeye özgü sabit bir değer olarak bağıntılara girilmesi mümkün olmadığından Griffith'in enerji yaklaşımı metal malzemelere doğrudan uygulanamaz. Metal malzemeler için kırılma mekaniğinin esasları Griffith kriterlerinden yola çıkarak Irwin tarafından geliştirilmiştir [20].

Basit çekme durumunda birim hacimde depolanan elastik enerji

$$U_0 = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (4.1)$$

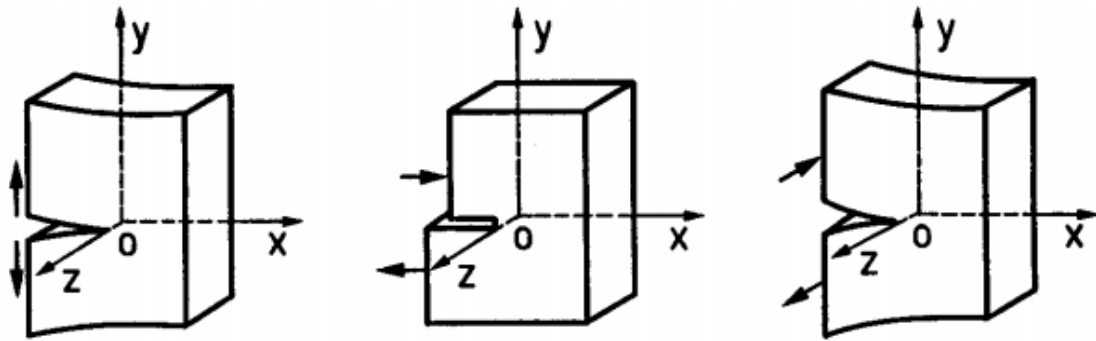
şeklinde hesaplanır

Dış enerji  $U_e$ , birim şekil değiştirme enerjisi  $U_s$ , kinetik enerji  $U_k$ , kaybolan enerji  $U_d$  olmak üzere sistemin enerji dengesi açısından en genel anlamda enerji türleri arasında;

$$U_e = U_s + U_k + U_d \quad (4.2)$$

bağıntısı vardır. Statik veya yarı statik durumda  $U_k = 0$  alınabilir [21].

#### 4.2. Çatlak Deformasyon Modları



Şekil 4.1. Çatlak deformasyon modları

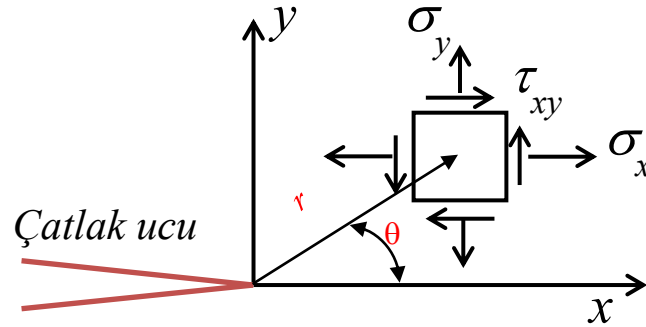
Alt ve üst çatlak yüzeyinin birbirlerine göre hareket edebileceği üç farklı yön vardır. Bu üç yön şekil 4.1 de gösterilmiştir. Bu üç temel modun birleştirilmesi yardımıyla çatlak yüzeyindeki deformasyon belirlenebilir. Bu üç mod aşağıda tanımlanmıştır.

Açılma Modu, I ; çatlak yüzeylerinin xz ve xy düzlemlerine göre simetrik olarak birbirinden ayrılması durumudur.

Kayma Modu, II ; çatlak yüzeylerinin birbirine göre kayma xy düzlemine simetrik olacak şekilde kayması durumudur.

Yırtılma Modu, III; çatlak yüzeylerinin birbirine göre xy ve xz düzleminde asimetrik olacak şekilde kayması durumudur [22].

#### 4.3. Gerilme Şiddeti Yaklaşımı



Şekil 4.2. Çatlak ucu gerilme gösterimi

Lineer elastik durumda çatlak ucundaki gerilme, geometri ve uygulanan yükten bağımsız olarak aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır.

$$\sigma_{xx} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta \left( 1 - \sin \frac{1}{2} \theta \sin \frac{3}{2} \theta \right) \quad (4.3)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta \left( 1 + \sin \frac{1}{2} \theta \sin \frac{3}{2} \theta \right) \quad (4.4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{1}{2} \theta \cos \frac{1}{2} \theta \cos \frac{3}{2} \theta \quad (4.5)$$

Denklemlerde  $K_1$ , gerilme şiddet faktörü olarak adlandırılır. Bu değer  $r$  ve  $\theta$  dan bağımsız olup yükleme ve çatlak geometrisine bağlıdır. Griffith yaptığı araştırmada çatlak ucundaki gerilmenin  $\sqrt{\pi a}$  ile orantılı bir şekilde değiştiğini ortaya koymuştur. Bu ifadede kullanılan  $a$  çatlağın yarı uzunluğudur. Böylece en genel hali ile;

$$K_1 = Y\sigma\sqrt{\pi} \quad (4.6)$$

Bağıntısı yazılabilir. Burada;

$Y$ : parçanın geometrisine bağlı sabit bir katsayı

$\sigma$ : parçaya uygulanan gerilme

$a$ : çatlak uzunluğu

$K$ : Gerilme şiddet faktörü

olarak verilir. Böylece  $K$  değeri, çatlak ucundaki gerilme şiddeti ile uygulanan gerilme ve elemanın geometrisi arasındaki bağıntıyı verir [21].

Çatlak ilerlemesi gerilme şiddet faktörünün kritik değere ulaşmasıyla meydana gelir.

$$K_1 = K_{Ic}$$

Burada  $K_{Ic}$  malzemenin deneysel olarak belirlenmiş kırılma tokluğu değeridir.

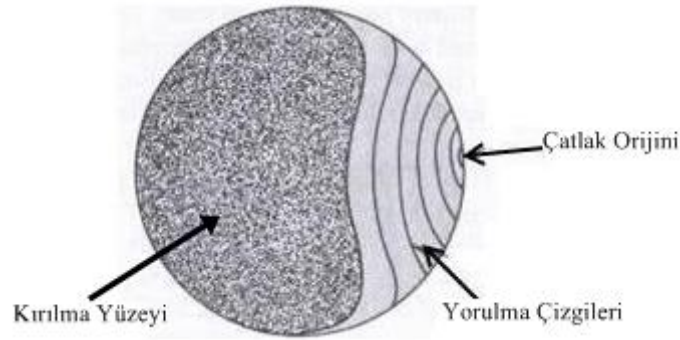
#### 4.4. Çatlak Ucu Plastik Bölge

Çatlak ucunda oluşan maksimum gerilme malzemenin akma mukavemetinin altında bir değerde ise çatlak doğrudan hasar oluşturmaz. Bu durumda sünek malzemelerde çatlak ucu etrafında plastik deformasyona maruz kalmış bölgeler oluşur. Bu bölgeye çatlak ucu plastik bölge adı verilir [21].

#### 4.5. Yorulma Sonucu Çatlak Oluşumu

Tekrarlı yüke maruz parçalar belli bir çevrim sonunda gerilme değerinin en yüksek olduğu noktadan çatlar. Oluşan bu çatlak, tekrarlı yük devam ettirildikçe uygulanan kuvvete dik doğrultuda ilerler. İlerleme sonucu çatlak belli bir uzunluğa ulaşır. Eğer çatlak ilerlemesi sonucu oluşan gerilme şiddet faktörü kritik değere ulaşırsa parça kırılır.

Yorulma kırılmasında kırılma yüzeyleri makroskopik olarak düz ve pürüzsüzdür. Ancak kırılma yüzeylerine mikroskop altında bakıldığında yorulma çizgileri görülebilmektedir. Bu tür çizgiler her bir çevriminde çatlak ilerlemesinin gerçekleştiğini gösterir [21].



Şekil 4.3. Yorulma çizgileri ve çatlak yüzeyi

Genelde yorulma kırılma yüzeylerinde orijinden başlayarak çatlak ilerleme yönünde gidildiğinde kırılma yüzey pürüzlülüğü ve çatlak hızı artar. Bu artış, bilhassa çatlak ilerledikçe gerilme şiddeti faktöründeki artışın daha belirgin olduğu yerlerde kendini gösterir.

#### 4.6. Kırılma Mekanîği Yaklaşımı İle Yorulma

Kırılma mekanîği yaklaşımı ile elde edilen yorulma dayanımı verilerinin geliştirilmesi için birçok deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan gerilmenin değişim gösterdiği aralık  $\Delta\sigma$  ile ifade edilecektir. Gerilme minimum ve maksimum aralıkta değişirken çatlak ilerleme oranı  $da/dN$  sürekli olarak ölçülmüş ve

yüklemenin gerçekleştiği her bir çevrimde gerilme şiddet faktörü değişimi  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  ifadesi ile belirlenmiştir. Burada ifade edilen K değeri çatlak etrafında oluşan gerilme şiddet faktörü ve maksimum-minimum değerinin bulunması için aşağıdaki formüller kullanılır [15].

$$K_{max} = \lambda \sqrt{\pi a} \sigma_{max} \quad (4.7)$$

$$K_{min} = \lambda \sqrt{\pi a} \sigma_{min} \quad (4.8)$$

Yukarıdaki formülde  $a$  başlangıçtaki çatlak boyu olarak alınır.

Bir çevrimde gerilme şiddet faktörü değişimi de

$$\Delta K = \lambda \sqrt{\pi a} (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (4.9)$$

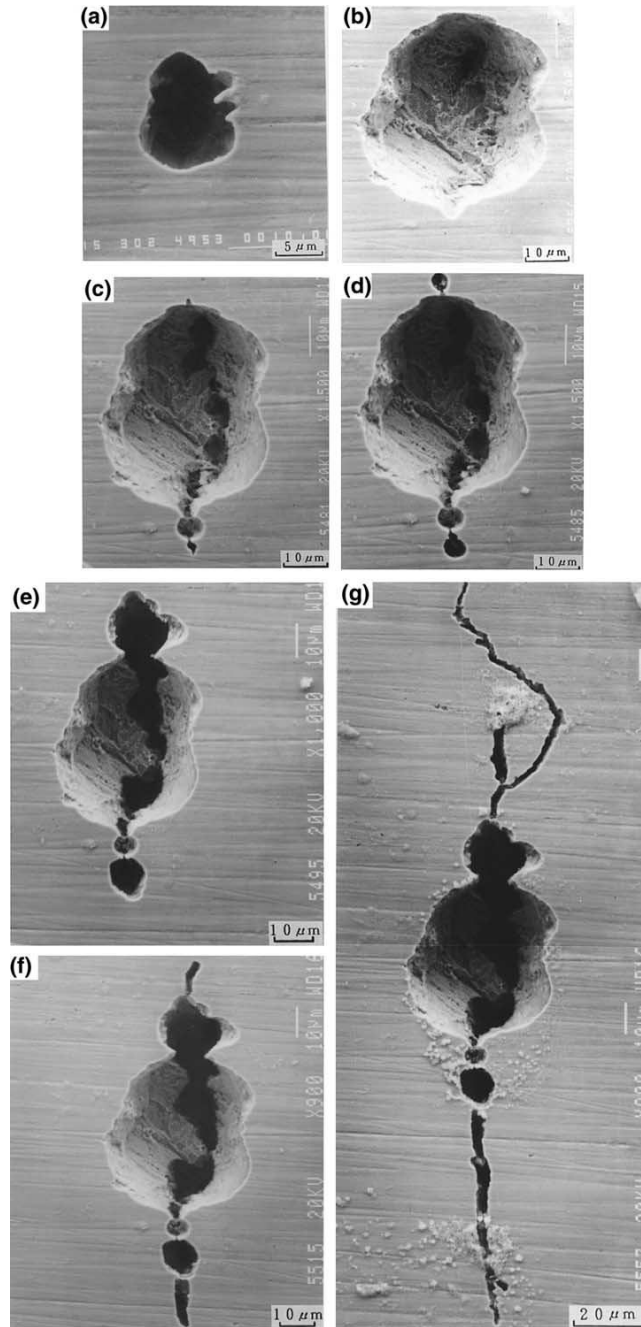
şeklinde ifade edilebilir.

Her iki eksenin de logaritmik olarak ifade edildiği grafikte çatlak ilerleme oranı  $da/dN$  genellikle gerilme şiddet faktörü  $\Delta K$  ya karşı çizilir. Yorulma ömür tahmini ile ilgili olan bu eğrinin orta kısmı düz bir doğru olarak çizilir [15].

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad (4.10)$$

Paris eşitliği olarak bilinen yukarıdaki formülde A ve n ampirik değerler olup farklı malzemeler için tablolardan bulunabilir. Çatlak başlangıç boyu olan  $a$  değerinden kritik boy olan  $a_f$  e ulaşması için gerekli çevrim sayısını bulmak üzere Paris eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir [15].

$$N = \frac{a_f^{1-\frac{n}{2}} - a^{1-\frac{n}{2}}}{A \left(1-\frac{n}{2}\right) (1.77 \lambda \Delta \sigma)^n} \quad (4.11)$$



Şekil 4.4. Korozyon oyuğundan kaynaklı çatlak başlangıcı ve ilerlemesi [4].  
 Çevrim sayısı x 10<sup>6</sup>: (a) 4.95, (b) 5.45 , (c) 5.48, (d) 5.485, (e) 5.495, (f) 5.15, (g) 5.55



## BÖLÜM 5. KOROZYON OYUĞUNUN YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

### 5.1. Malzeme Özellikleri

Deneysel çalışmada 6082 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal içeriği tablo 5.1 de verilmiştir. Spektro analizi Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde SpektroMax cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1. Deney numunesine ait kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

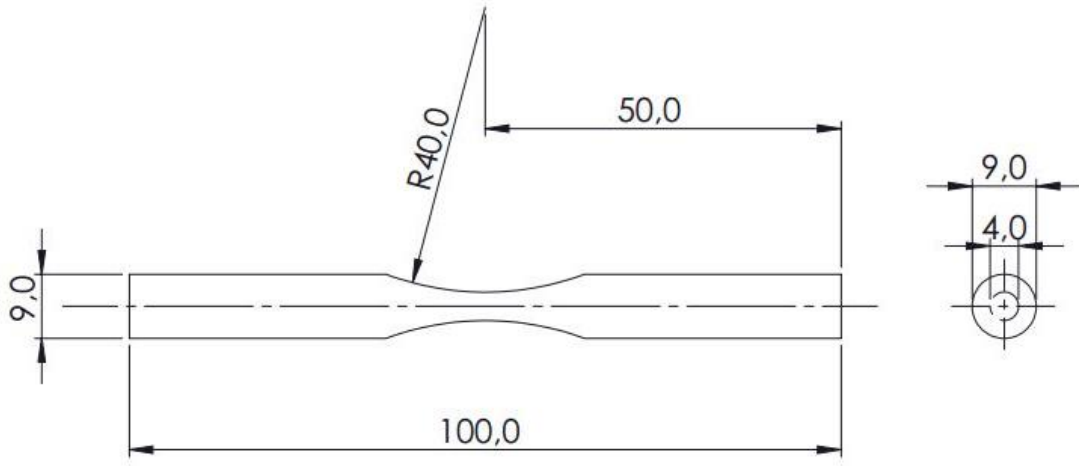
Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Ti	B	Al
1,13	0,1	0,65	0,67	0,0041	0,0033	0,002	97,4

### 5.2. Çekme Deneyi

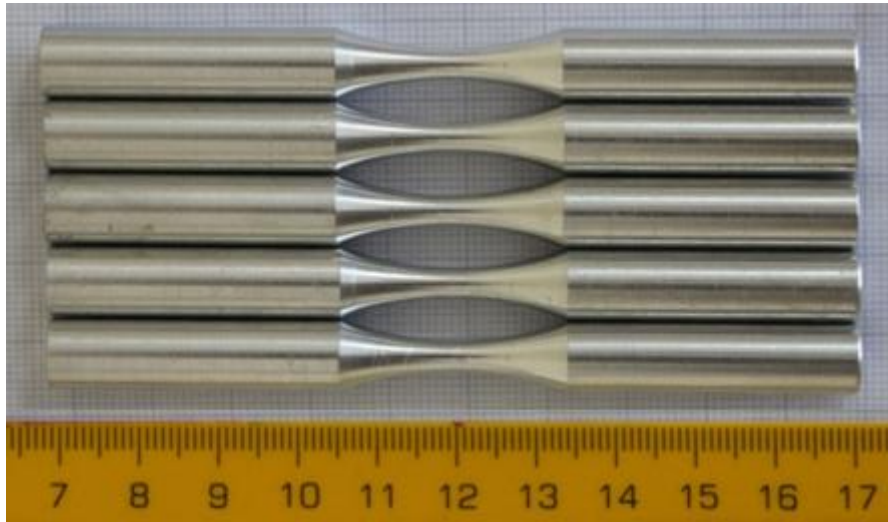
Standartlara uygun olarak hazırlanan çekme deney numunesi Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan Zwick/Roell marka çekme cihazı ile ISO 6892 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

### 5.3. Talaşlı İmalat ve Oyuk Oluşturulması

6082 alüminyum alaşımı 12 mm çubuk profil olarak temin edilmiştir. Daha sonra bilgisayar kontrollü tezgahta talaşlı imalat yöntemi ile işlenmiştir. Numuneye ait teknik resim şekil 5.1 de görülmektedir.

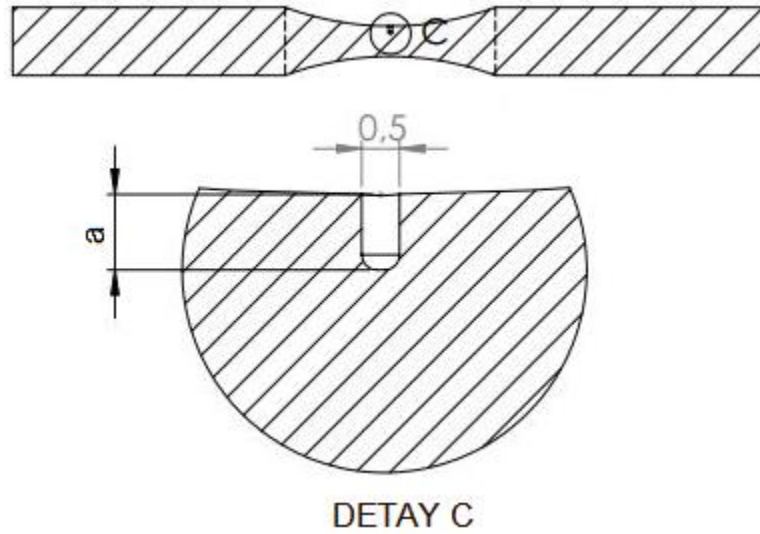


Şekil 5.1. Deneyleerde kullanılan numunenin boyutları



Şekil 5.2. Talaşlı imlat sonrası numuneye ait görüntü

Talaşlı imalat aşamasından sonra numunenin orta kısmına dalma erozyon yöntemi ile oyuk açılmıştır. Dalma erozyon yönteminin tercih edilme sebebi, bu yöntemin talaşlı imalatın aksine yüzeyde artık gerilme bırakmamasıdır. Detaylı resim şekil 5.3 de verilmiştir



Şekil 5.3. Numune üzerine açılan oyukun detay resmi

Numune üzerinde oluşturulan tüm oyukların çapı 0,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Şekil 5.3 de a ile gösterilen oyuk derinliği değişken olarak belirlenmiştir. a değerinin değiştirilmesi ile farklı en-boy oranları elde edilmiştir. Değiştirilen a değerleri tablo 5.2 de verilmiştir. Bilgisayar kontrollü tezgah yardımı ile ölçülerde yüksek hassasiyet elde edilmiştir.

Tablo 5.2. Oyuk en boy oranları

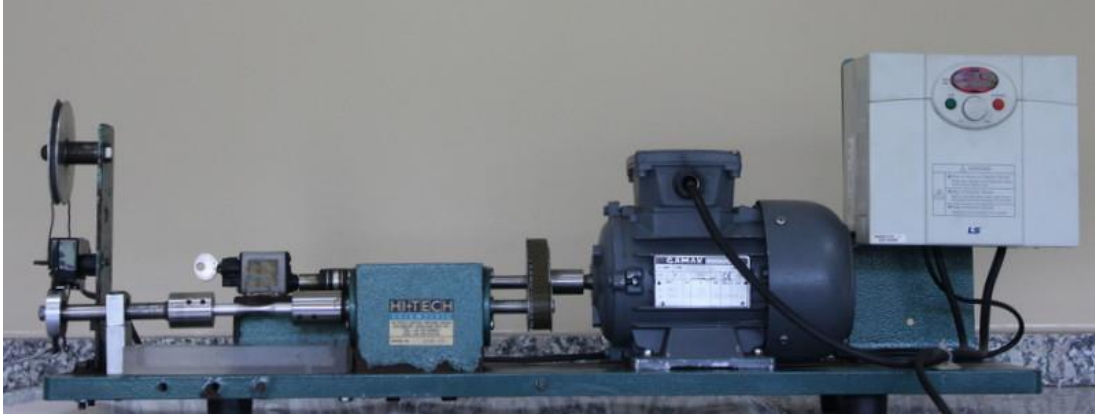
En-boy oranı, $a/2c$	Çap [mm]	Derinlik, a [mm]
0,3	0,5	0,15
0,5	0,5	0,25
0,75	0,5	0,375
1	0,5	0,5
2	0,5	1

#### 5.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) İncelemeleri

Çatlak ilerleme ve kırılma yüzeylerini incelemek amacıyla Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu ile görüntü alınmıştır.

### 5.5. Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda Hi-Tech marka deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Tüm yorulma deneylerinde frekans 60 Hz (3600 dev/dk) değerinde sabit tutulmuştur. Numunenin yorulma cihazına bağlanması sırasında komparatör yardımı ile eksenden kaçıklıklar ölçülmüştür. Eksen kaçıklığı en fazla 0.01 mm olacak şekilde ayarlanmış ve hassas bir şekilde bağlanmıştır. Böylece merkezkaç kuvvetinin gerilme üzerine etkisi ihmal edilecek mertebeye indirilmiştir.



Şekil 5.4. Yorulma deney cihazına ait görüntü

Uygulanan kuvvetin numunenin kritik kesitinde oluşturduğu gerilmeyi belirlemek için deneylere başlamadan önce gerilme hesabı yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunenin kritik çapı 4 mm dir. Kuvvetin uygulandığı noktanın kritik çapa olan uzaklığı kumpas yardımı ile 125,7 mm olarak ölçülmüştür. Bu durumda kritik kesitte meydana gelen gerilme denklem 5.1 yardımı ile hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{32 F L}{\pi d^3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5.1)$$

$\sigma$  = Maksimum gerilme [N/mm<sup>2</sup>]

F = Uygulanan kuvvet [N]

L = Moment kolu [mm]

d = Kritik kesitteki yarıçap değeri [mm]

6082 alüminyum malzemedan talaşlı imalat yöntemi ile işlenmiş oyuksuz numuneler kullanılarak WÖHLER eğrisi elde edilmiştir. Eğrinin elde edilmesinde dokuz farklı gerilme değerinde yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Dalma erozyon yöntemi kullanılarak üzerinde oyuk açılmış olan numunelerle üç farklı gerilme değeri için yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her deney tablo 5.2 de verilen farklı oyuk derinliğindeki numuneler için üç kez tekrarlanmıştır.

## **BÖLÜM 6. KOROZYON OYUĞUNUN YORULMA ÖMRÜNE ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ**

Bu kısımda model üzerinde oluşturulan korozyon oyuğunun en-boy oranında değişiklikler yapılarak farklı şartlar için analizler incelenmiş ve gerilme şiddet faktörleri karşılaştırılmıştır. Gerilme şiddet faktörlerinin bulunmasının ardından oyuk derinliğinin yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Daha sonra analiz sonuçlarına göre korozyon oyuğunda çatlak oluşması muhtemel noktalarda çatlak başlatılmış ve korozyon oyuğundan kaynaklı çatlak ilerlemesi incelenmiştir.

### **6.1. Problemin Tanımlanması**

Dönel eğme yüküne maruz bir yorulma numunesinin gerilme ve deformasyon durumu analiz edilmiştir. Model üzerinde korozyon oyuğu oluşturulmuş daha sonra da korozyon oyuğunun geometrisi değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır. Tekrarlı analizler sonucunda korozyon oyuğunun varlığının ve büyüklüğünün gerilme durumuna etkisi belirlenmiştir. Ayrıca gerilme durumundaki değişikle beraber korozyon oyuğunun yorulma ömrüne etkisi de analizler sonucunda hesaplanmıştır.

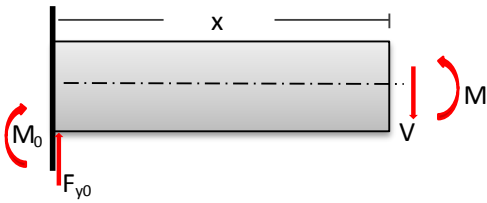
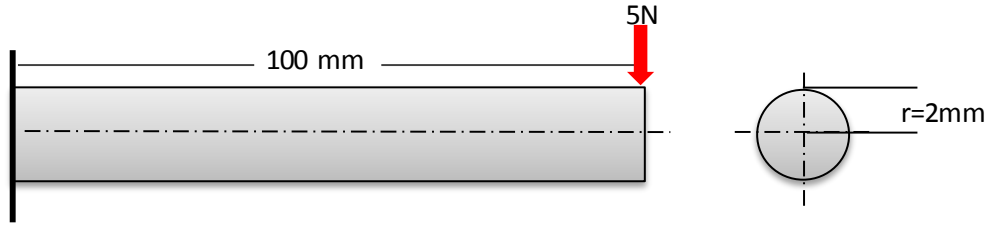
Üzerinde korozyon oyuğu bulunmadığı durumda model, iki boyuta indirgenerek eksenel simetri durumundan faydalanabilir. Ancak model üzerinde korozyon oyuğunun varlığı eksenel simetri durumunu ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle bilgisayar hafızasının daha verimli kullanılmasını sağlamak ve analiz süresini kısaltmak için analizler sırasında üç boyutlu yarı simetrik model kullanılmıştır.

Literatürde çok sayıda çalışmada korozyon oyuğunun çatlak başlangıç noktası olduğu belirtilmiştir. Bu kısımda sonlu elemanlar yöntemi ile korozyon oyuğundaki gerilme durumunun belirlenmesinin ardından çatlak ilerleme analizleri yapılmıştır. Korozyon oyuğunun en-boy oranının kırılmaya olan etkisi belirlenmiştir. Bu kısımda yapılan tüm çalışmalarda kalıntı gerilmeler göz önünde bulundurulmamıştır.

## 6.2. Modelin Doğruluğunun İncelenmesi

Çalışmamızda dönel eğme yorulma yüküne maruz bir numune modellenmiştir. Modelimizin bir ucuna ankastre bağlantı sınır şartları uygulanmıştır. Serbest uca ise zamana bağlı değişen yük uygulanmıştır. Çalışmamız için gerekli analizlere başlamadan önce modelimizin doğruluğundan emin olmak için problem temel mukavemet yaklaşımı ile çözülmüştür. Ardından sınır şartlar uygulanarak aynı problem sonlu elemanlar yaklaşımı ile çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### 6.2.1. Problemin temel mukavemet yaklaşımı ile çözümü



$$F_{y0} = 5 \text{ N}$$

$$M_0 = 5 \cdot 100 = 500 \text{ Nmm}$$

$$V = F_{y0} = 5 \text{ N}$$

$$\sum M = 0 ;$$

$$-M_0 + M - V \cdot x = 0$$

$$M = -500 \text{ Nmm} + 5x$$

$$x = 0 ; \quad M = -500 \text{ Nmm}$$

$$x = 50 \text{ mm}; \quad M = -250 \text{ Nmm}$$

$$x = 100 \text{ mm}; \quad M = 0$$

$$\sigma_{max} = \frac{M y}{I}$$

$$I = \frac{\pi r^4}{4}$$

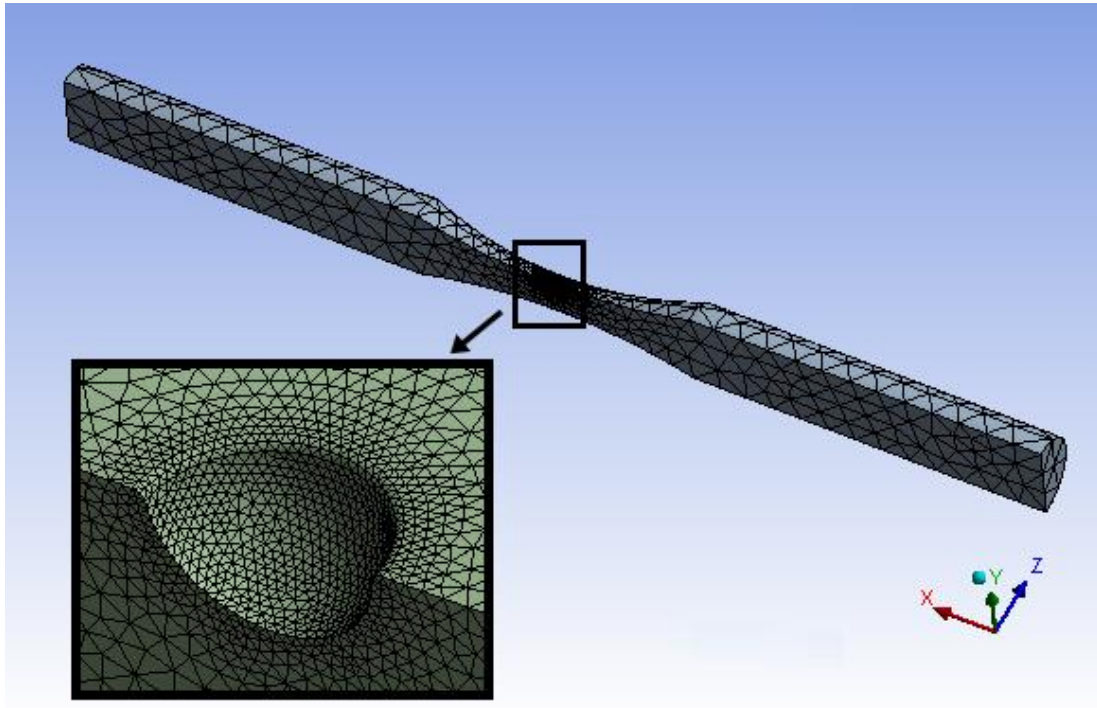
$$I = \frac{\pi 2^4}{4} = 12,566 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{max} = \frac{-250 \text{ Nmm} \cdot 2 \text{ mm}}{12,566 \text{ mm}^4} = 39,78 \text{ N/mm}^2 ; \quad x = 50 \text{ mm}$$

$$\sigma_{max, (ANSYS)} = 40,06 \text{ N/mm}^2$$

### 6.3. Modelin Oluşturulması

Analizlerde kullanılacak olan modelin boyut ölçüleri milimetre olarak şekil 5.1 de verilmiştir.

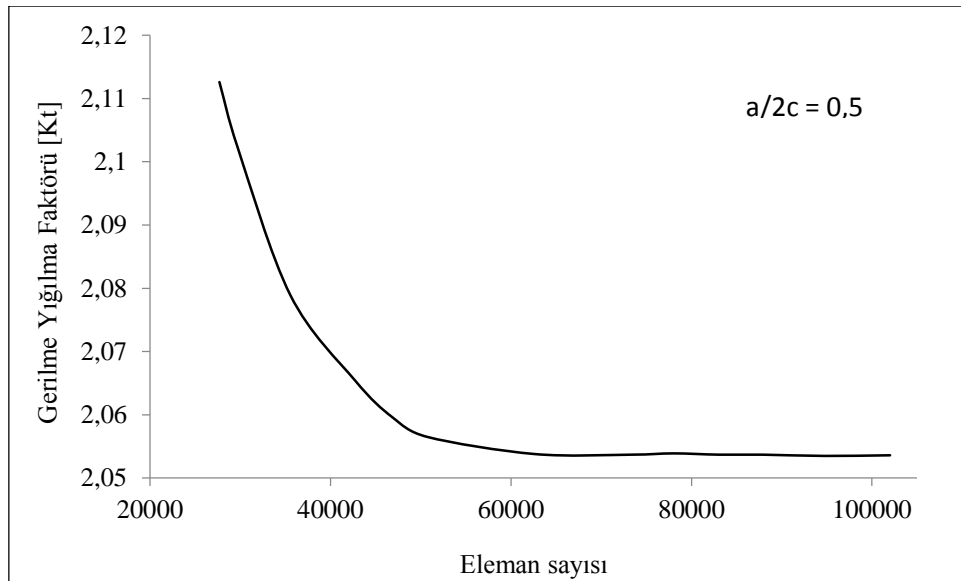


Şekil 6.1. Modelin üç boyutlu gösterimi



Geometrinin elemanlara bölünmüş durumdaki görüntüsü şekil 6.1 de verilmiştir. Eleman sayısı artırılarak aynı analiz tekrarlanmış ve sonuçlardaki değişimin ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Yapı elemanlara bölünürken oyuk etrafındaki elemanlar oldukça sıklaştırılmıştır.

Her bir düğümü için üç serbestlik derecesi bulduran, on düğümlü ve dört yüzeyle üç boyutlu tetrahedral eleman tipi kullanılmıştır. Böylece geometrik düzensizlik bulunan bölgeler için yüksek doğrulukta elemanlara bölme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yarı simetri özelliğinden yararlanılarak model oluşturulmuştur. Simetri yüzeyindeki tüm düğümlerin sadece şekil 6.1 de görülen xy düzleminde hareketine izin verilmiştir. Diğer bir ifade ile simetri yüzeyinde kayar mesnet sınır şartı tanımlanmıştır. Modelin bir ucunun hareketi ise tüm yönlerde sınırlanmış, ankastre bağlantı sınır şartı uygulanmıştır.



Şekil 6.2. Eleman sayısının sonuçlar üzerine etkisi

#### 6.4. Analizde Kullanılan Malzeme Özellikleri

Bölüm 5 de belirtilmiş olan deney şartları analizlere uygulanmıştır. Deneyde kullanılan 6082 alüminyum alaşımına ait bazı özellikler deneyler sırasında belirlenmiştir. Çekme deneyi yapı ve yorulma-ömür deneyleri sonucunda elde edilen bilgiler analiz programına malzeme özelliği olarak tanımlanmıştır.

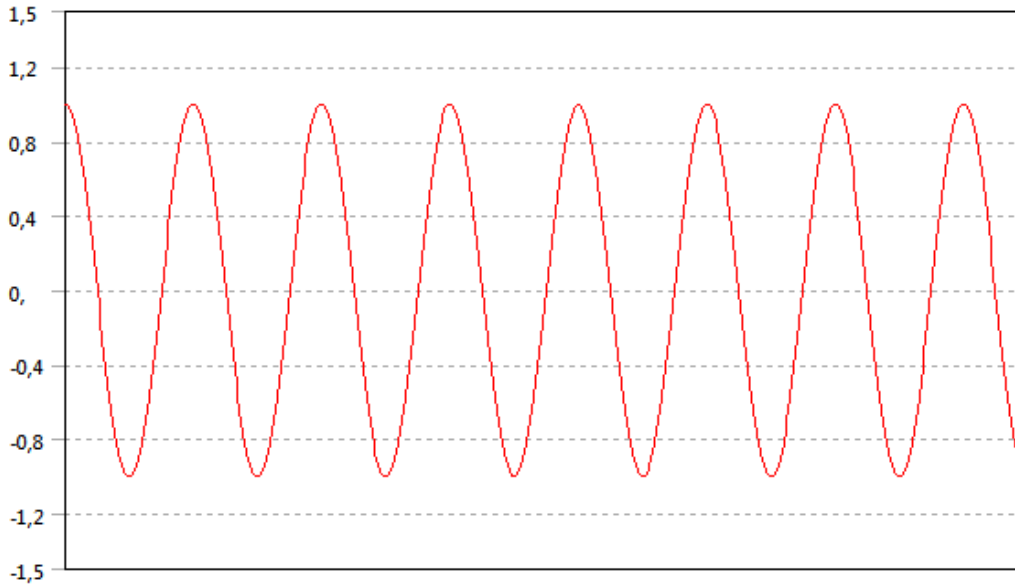
Malzemeye ait gerilme-ömür diyagramı şekil 7.1 de görülmektedir. Çekme deneyinden elde edilen sonuçlara tablo 6.1 de verilmiştir.

Tablo 6.1.Malzeme Özellikleri

<b>Alüminyum Alaşımı</b>	
Çekmedeki akma dayanımı	390 Mpa
Çekme dayanımı	420 Mpa
Poisson Oranı	0.33
Elastiklik Modülü	71000 MPa

### 6.5. Analizde Uygulanan Sınır Şartlar

Analizlerde zamana bağlı olarak değişen periyodik yük kullanılmıştır. Şekil 6.3 de bir çevrim için yük grafiği verilmiştir. Bu yükleme şartları altında yorulma numunesinin üst yüzeyi birinci saniyede maksimum basma, üçüncü saniye sonunda ise maksimum çekme yüküne maruzdur ve böylelikle numune tekrarlı yük altında yorulmaktadır.



Şekil 6.3. Sabit genlikli yükleme

Üç boyutlu yarı model oluşturulduğundan dolayı modelin kesit yüzeyinde simetri şartı vardır. Modelin kuvvet uygulanmayan sabit ucu ise ankastre bağlantı olarak tanımlanmış ve tüm yöndeki serbestlikler sınırlandırılmıştır.

## 6.6. Analizin Çözdürülmesi

Sınır şartlarının uygulanmasının ardından sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek gerilme değerleri elde edilmiştir. Deneylerde elde edilen ve ANSYS Workbench'e tanımlanan S-N tablosu yardımıyla ömür tahmini gerçekleştirilmiştir.

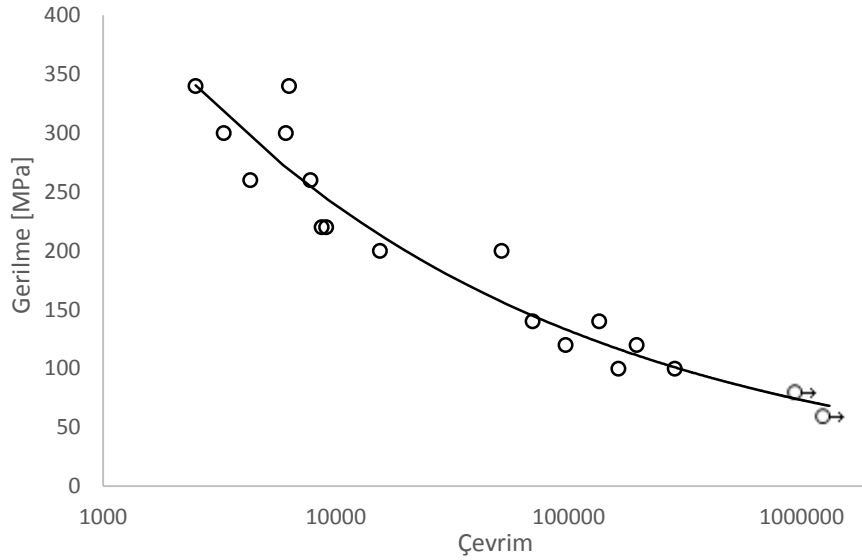
Kırılma mekaniği bilgilerine dayanarak, gerilmenin en yüksek olduğu bölgede, gerilmeye dik olacak şekilde çatlak başlayabileceği öngörülmüştür. Gerilme analizleri sonucunda, en yüksek gerilmenin olduğu bölge belirlendikten sonra bu bölgede oyuk çapının 1/10 uzunluğa sahip yüzey çatlağı oluşturulmuştur.

ANSYS Mechanical APDL ortamında, çatlak, korozyon oyğunun ağız kısmına gerilmeye dik yönde köşe çatlağı olarak modellenmiştir. Modellemenin ardından ANSYS üzerinden alınan listeler, üç boyutlu kırılma analizi ve çatlak ilerlemesi tahmini gerçekleştirmek üzere FCPAS yazılımına aktarılmıştır. FCPAS ortamında, modellenen çatlağın bir sonraki adım geometrisi tahmin edilmiştir. Ardından tahmin edilen geometri ANSYS ortamında modellenmiş ve yine FCPAS yardımı ile bir sonraki adımın tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen çatlağın modellenip yeni tahminlerin alınması işlemi malzemenin kırılma tokluğuna ulaşmasıyla sonlandırılmıştır [23].

## BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1. Yorulma Deneyi Sonuçları

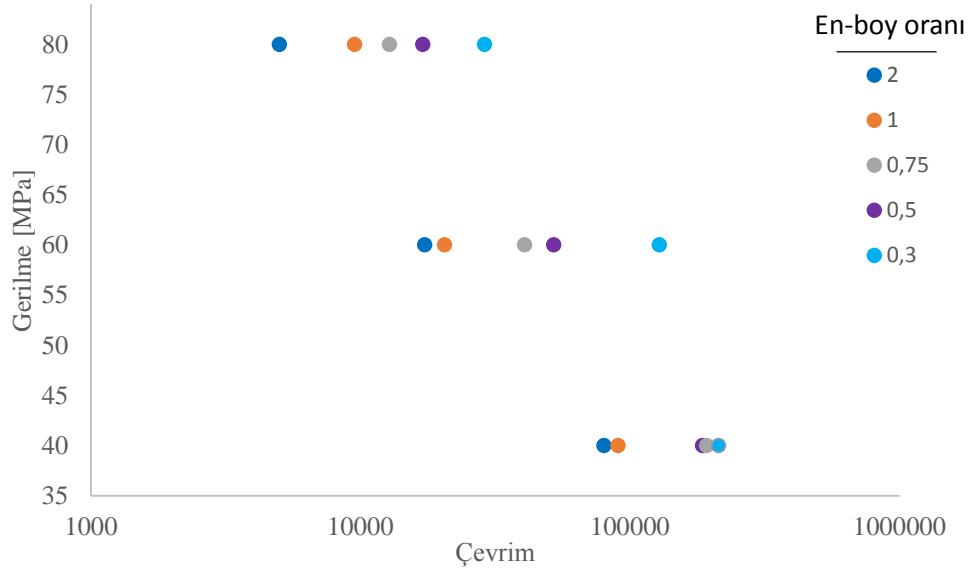
Oyuksuz numunelerle dokuz farklı gerilme değerinde yapılan yorulma deneyleri ile çıkarılan WÖHLER eğrisi şekil 7.1 de verilmiştir. 80 MPa gerilme altında yapılan deneylerde  $10^6$  çevrim sayısına ulaşılmıştır. 350 Mpa gerilme değerine karşılık ise ömür 2500 çevrim olarak bulunmuştur.



Şekil 7.1. Oyuksuz numunelerle elde edilen WÖHLER eğrisi

Dalma erozyon tezgahında oyuk açılmış numunelerle yorulma deneyleri üç farklı gerilme değeri için yapılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar grafiksel olarak şekil 7.2 de verilmiştir. Deneylerde oyuk derinliğinin artmasıyla yorulma ömründe önemli oranda azalma gözlenmiştir. 80 MPa gerilme altında yapılan deneylerde en-boy oranı 2 olan oyuklu numunenin ömrü 5000 çevrim olarak bulunmuştur. En-boy oranı 0,3 olan sığ oyukta ise bu ömür değeri 28800 çevrimdir. Farklı gerilme durumlarında da oyuk derinliğinin ömre etkisi grafikte görüldüğü üzere benzer durumdadır.

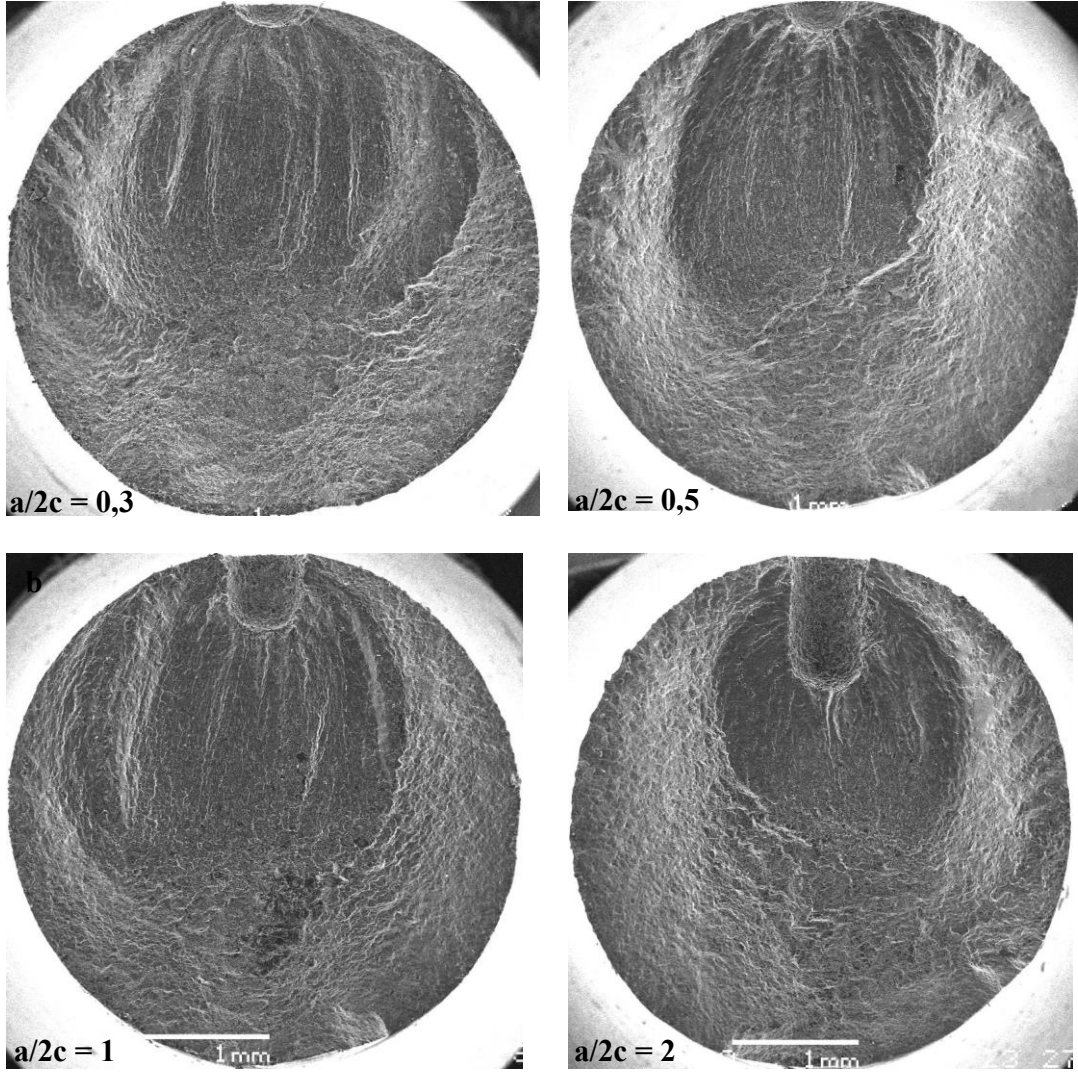
80 Mpa gerilme altında oyuksuz numunenin sonsuz ömre sahip olduğu şekil 7.1 de görülmektedir. Ancak oyuklu numune için aynı gerilme durumunda oyuk derinliğine göre 5000 ila 28800 çevrim aralığında değişmektedir.



Şekil 7.2. Oyuk en-boy oranının yorulma ömrüne etkisinin deneysel incelenmesi

## 7.2. Taramalı Elektron Mikroskopu Görüntüleri

Yorulma deneyleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerinin taramalı 420re420ron mikroskopu görüntüleri alınmıştır. Şekil 7.3 de sabit 80 MPa yük altında yapılan deneylere ait 75 kat büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.3. Kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri

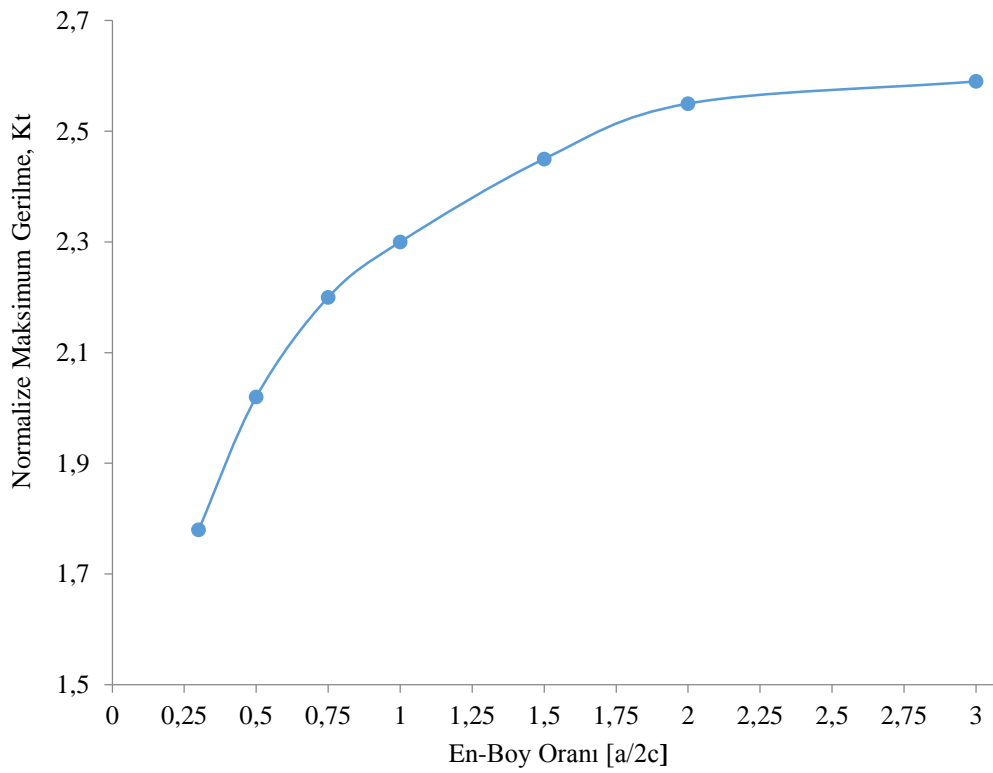
Kırılma yüzeyleri incelendiğinde oyuk civarında çatlak başlangıcı olduğu ve yorulma sonucu çatlağın ilerlediği ve yorulma sonucunda kırılmanın gerçekleştiği görülmektedir.

### 7.3. Oyuk Derinliğinin Gerilme Üzerine Etkisi

Yapılan analizlerde oyuk çapı 0.2 mm olarak sabit tutulmuş derinlik değiştirilerek oyuğun farklı en-boy oranlarındaki gerilme şiddet faktörleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde parçanın bir ucundan uygulanan yükün değeri modelin kritik

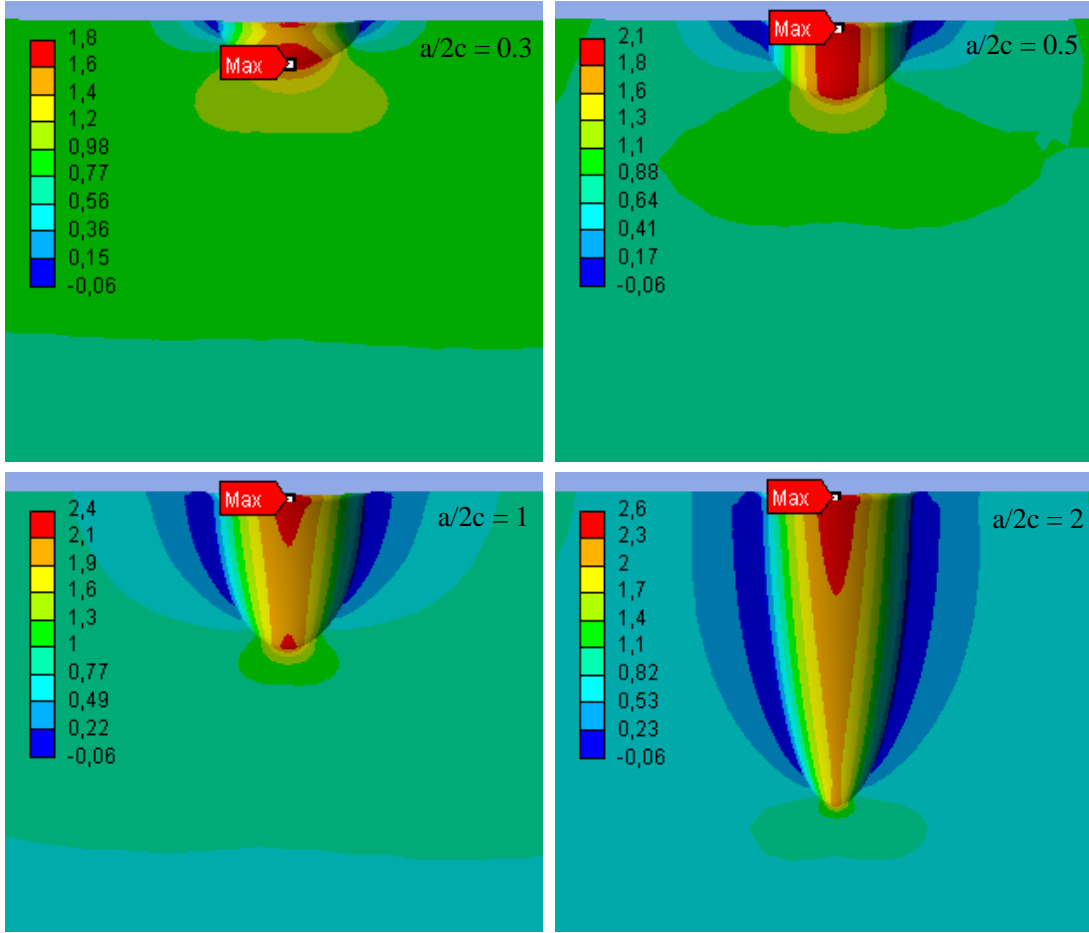
kesitinde 1 Mpa gerilme oluşturacak şekilde belirlenmiştir. Böylece oyukta oluşan maksimum gerilme değeri doğrudan doğruya gerilme yığılma faktörünü vermektedir.

Sonuçlar grafik şekil 7.4 de olarak verilmiştir. Derinlik değişimi ile sığ, yarım ve derin oyuk durumlarını içeren altı farklı en boy-oranı elde edilmiştir. Yapılan analizlerde en-boy oranının artması ile gerilme şiddet faktörünün arttığı gözlemlenmiştir. En-boy oranı 2 olduğu durumda gerilme yığılma faktörü  $K_t$ , 2.6 değerine ulaşmıştır.



Şekil 7.4. Derinlik değişimi ile gerilme yığılma faktörünün değişimi

Şekil 7.5 de farklı derinliklerdeki oyuklara ait gerilme durumu gösterilmiştir. Yarım ve derin oyuklarda en yüksek gerilme korozyon oyuğunun ağzına yakın gölgede meydana gelmiştir. Bu sonuç, literatürde daha önce yapılan çalışmalarla örtüşmektedir.



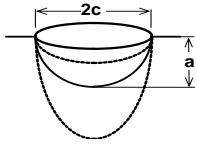
Şekil 7.5. Derinlik değişimi ile gerilme yığılma faktörü  $K_t$  nin değişimi

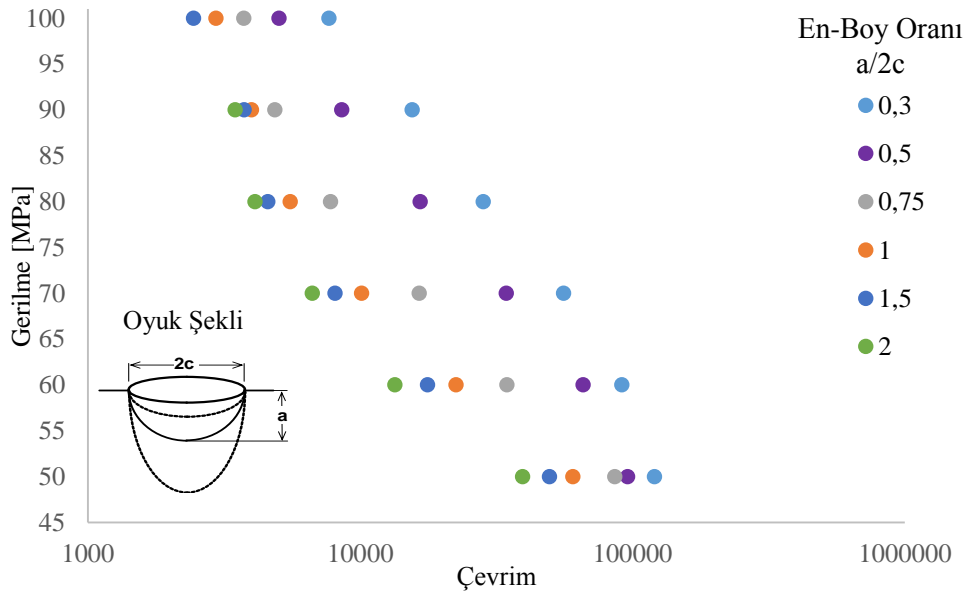
#### 7.4. Oyuğun Derinliğinin Yorulma Ömrüne Etkisi

Farklı oyuk derinlikleri için farklı kuvvetler altında yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar Şekil 7.6 de verilmiştir. Üzerinde oyuk bulundurmayan model için yapılan analizlerde uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu gerilme altında yapının sonsuz ömürde olduğu belirlenmiştir. Ancak model üzerindeki oyuğun varlığı yorulma ömrüne etki etmektedir. Bu etki, oyuğun en-boy oranına göre değişmektedir. Analiz sonuçlarına dayanarak; aynı kuvvet değeri için oyuk derinliğinin artması ile yorulma ömrü düşmektedir. Bu sonuç gerilme şiddet faktörü ile ilişkilidir ve Şekil 7.3 de verilen grafik tarafından da doğrulanmaktadır.



Tablo 7.1. Yorulma analizlerinde kullanılan değerler

							
a/2c	oyuksuz	0.3	0.5	0.75	1	1.5	2
a [mm]	-	0.06	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4
2c [mm]	0.2						
Gerilme [Mpa]	50 – 60 – 70 – 80 – 90 – 100						



Şekil 7.6. Oyuk derinliğinin yorulma ömrüne etkisi

Yorulma dayanımında çentiğin etkisini hesaplamak için malzeme ve geometriye bağlı bir katsayı olan yorulma çentik faktörü kullanılır. Yapılan analizler sonucu elde edilen gerilme yığılma faktörü  $K_t$  değerleri kullanılarak yorulma çentik faktörü  $K_f$  hesaplanmıştır. Hesaplanan değer ANSYS workbench yorulma ömür tahmininde programa 46ore olarak girilmiştir.

$K_t$  değeri kullanılarak, parçanın  $K_f$  değeri eşitlik 7.1 yardımı ile hesaplanabilir. Eşitlikteki “q” malzemenin çentik hassasiyeti olup malzemeye ve geometriye bağlı bir büyüklüktür. Literatürde tablolar halinde bulunmaktadır.

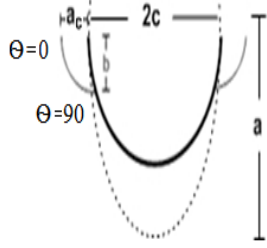
$$K_f = q(k_t - 1) + 1 \quad (7.1)$$

Analiz tipi olarak gerilme-ömür seçilmiş ve verilen malzeme için ANSYS workbench'e tanımlanmış olan gerilme-ömür çevrim tablosu kullanılmıştır. Yorulma ömür teorisi olarak da Goodman yaklaşımı seçilmiştir. Şekil 6.2 de verilen zamana bağlı değişken yük durumu bir çevrim olarak tanımlanmıştır.

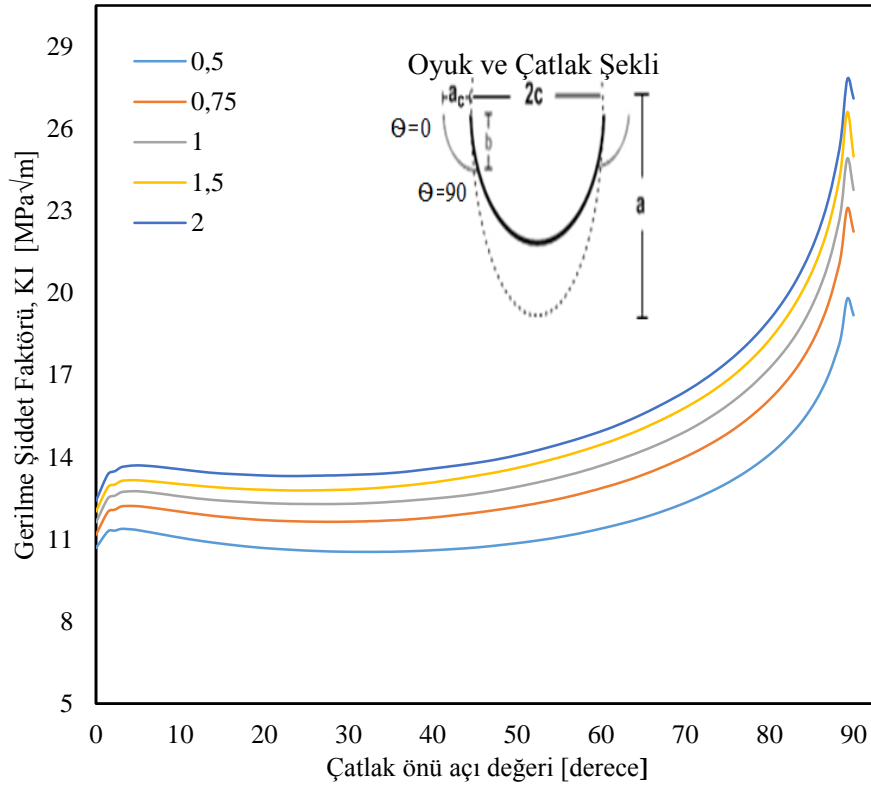
### 7.5. Oyuk Derinliğinin Gerilme Şiddet Faktörüne Etkisi

Korozyon oyuğu bulandıran modellerde yapılan analiz sonuçlarına göre en yüksek gerilme, korozyon oyuğunun ağız kısmına yakın bölgelerde ortaya çıkmaktadır. Çatlak başlangıcının, en yüksek gerilmenin olduğu noktada gerilmeye dik yönde oluşacağı literatürde yer almaktadır. Çalışmamızın bu aşamasında korozyon oyuğu kaynaklı bir çatlak oluşturulmuş ve çatlakın ilerlemesi incelenmiştir.

Tablo 7.2. Gerilme şiddet faktörüne oyuk derinliğinin etkisi

							
a/2c	0.3	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2
a [mm]	0.06	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.4
2c [mm]	0.2						
Gerilme [MPa]	50						
a <sub>c</sub> , b [mm]	0.02						

Kırılma analizleriyle, korozyon oyuğunun derinliğinin çatlak ilerlemesine etkisini incelemek amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı derinliklerdeki oyukların içine aynı boyutlarda çatlak yerleştirilmiş ve K1 gerilme şiddet faktörleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar şekil 7.7. de grafik olarak sunulmuştur.



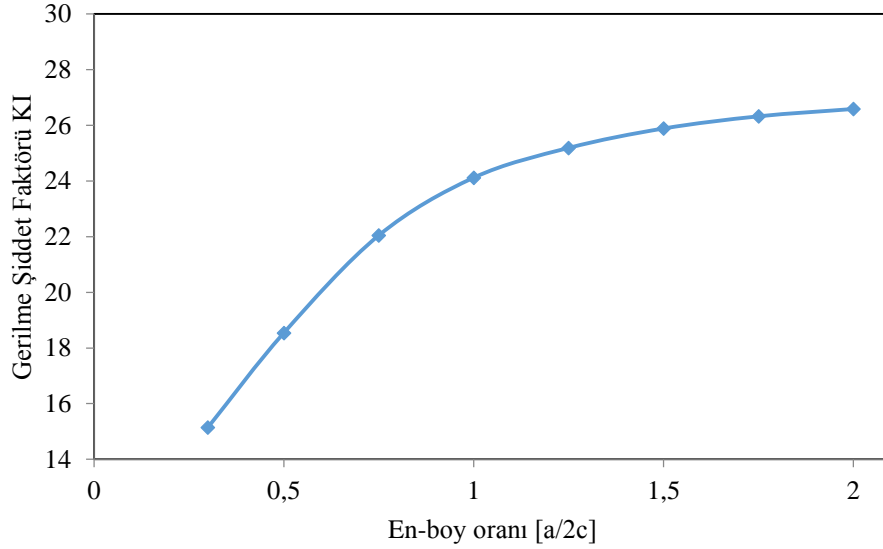
Şekil 7.7. Çatlak önü gerilme şiddet değerine oyuk derinliğinin etkisi

K1 gerilme şiddet faktörü ile derinlik artışı arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla oyuk derinliği eşit aralıklarla artırılmıştır. Sekiz farklı derinlik için 0.02 mm boyunda yüzey çatlakları oluşturulmuş ve kırılma analizi yapılmıştır. Başlangıçta seçilen çatlak boyu, oyuk derinliğinin 1/10 u kadardır. Analiz sonuçlarına göre korozyon oyuğunun derinleşmesi ile aynı boyuttaki çatlak daha yüksek gerilme şiddet faktörüne sebep olmaktadır.

Çatlak önü boyunca tüm noktalardaki K1 gerilme şiddet faktörü değeri FCPAS programı yardımı ile bulunmuştur. Çatlak üzerindeki 0 dereceye karşılık gelen nokta korozyon oyuğunun dış kısmı olarak ayarlanmıştır. 90 derece ise korozyon oyuğunun içinde kalan çatlak ucu olarak ayarlanmıştır.

Grafikten de görüldüğü üzere; yüzeydeki çatlak ucu ile oyuğun iç kısmında kalan çatlak ucunun K<sub>1</sub> gerilme şiddet faktörü değeri farklıdır. Korozyon oyuğunun içindeki çatlak ucu daha yüksek gerilme şiddet faktörü değerine sahiptir. Çatlak ilerlemesi ise gerilme şiddet faktörü değeri ile ilişkili olarak gerçekleşmektedir. Bu

verilere dayanarak korozyon oyuğunun içindeki çatlak ucunun daha hızlı ilerleyeceği sonucu çıkarılabilir.



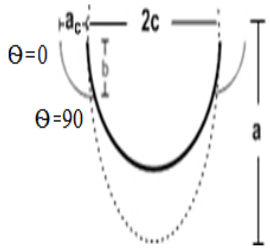
Şekil 7.8. Oyuğun derinliği ile çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörü değerlerinin değişimi

Aynı çatlakla sahip farklı derinliklerdeki oyuklarda oluşan gerilme şiddet faktörü değerlerinden yararlanılarak şekil 7.7 elde edilmiştir. Oyuğun derinleşmesinin etkisi ile gerilme şiddet faktörü değerinin artması şekil 7.8 de farklı bir grafikte de ifade edilmiştir. Grafikten görülmektedir ki oyuğun en-boy oranının yaklaşık 1 değerini bulmasının ardından derinlikle gerilme şiddet faktörü artışıdaki değişim miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca çatlak boyutları aynı kalmak şartı ile; sığ oyuğa kıyasla derin oyuk içerisindeki çatlakın daha tehlikeli olduğu görülmüştür.

## 7.6. Korozyon Oyuğunda Çatlak İlerlemesi

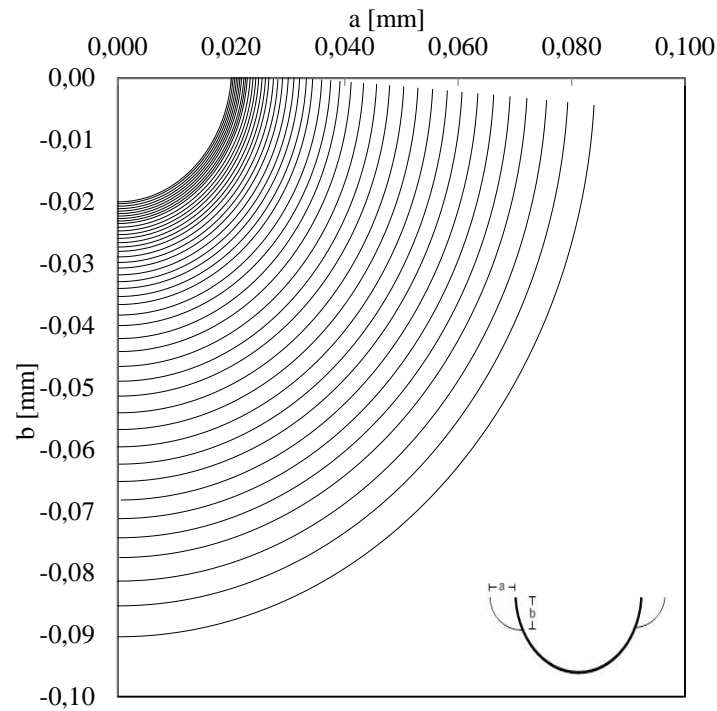
Yarım oyuk ( $a/2c = 0.5$ ) için en yüksek gerilme değeri oyuğun ağzına yakın bir noktada görülmüştür. Gerilme değerine dik olarak oyuk çapının 1/10 u kadar (0.02 mm) yüzey çatlakları oluşturulmuştur. Başlangıç çatlakları için gerilme şiddet faktörü çatlak boyunca FCPAS yardımı ile hesaplanmıştır. Gerilme şiddet faktörüne paralel olarak yine aynı yazılımla bir sonraki çatlak adımı tahmin edilmiştir. Tahmine göre yeni model oluşturulup çözümlenmiştir. Kırılma tokluğu değerine ulaşılan kadar işlemler tekrarlanmıştır.

Tablo 7.3. Farklı derinliklerdeki oyuk ağızlarında çatlak ilerlemesi



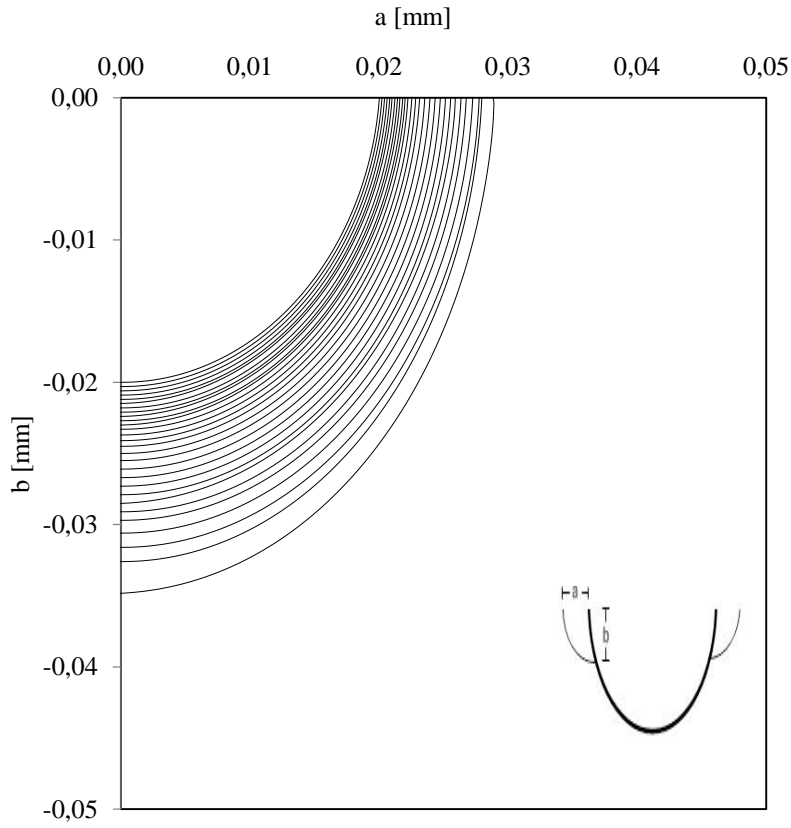
$a/2c$	0.5	1	2
$a$ [mm]	0.1	0.2	0.4
$2c$ [mm]	0,2		
Gerilme [MPa]	50		
$a_c$ [mm]	0.02 – 0.09	0.02 – 0.030	0.02 – 0.026
$b$ [mm]	0.02 - 0.91	0.02 – 0.035	0.02 – 0.0303

Yarım oyukta çatlak ilerleme adımları şekil 7.9 de görülmektedir. Görüldüğü üzere oyuk içerisindeki çatlak ucunun son adımdaki uzunluğu 0.1 olarak bulunmuştur. Oyuk kenarındaki çatlak boyunun son uzunluğu ise bu değerden daha düşüktür. Bu sonuçlara dayanarak oyuk içerisindeki çatlak ucunun daha hızlı ilerlediği ifade edilebilir.

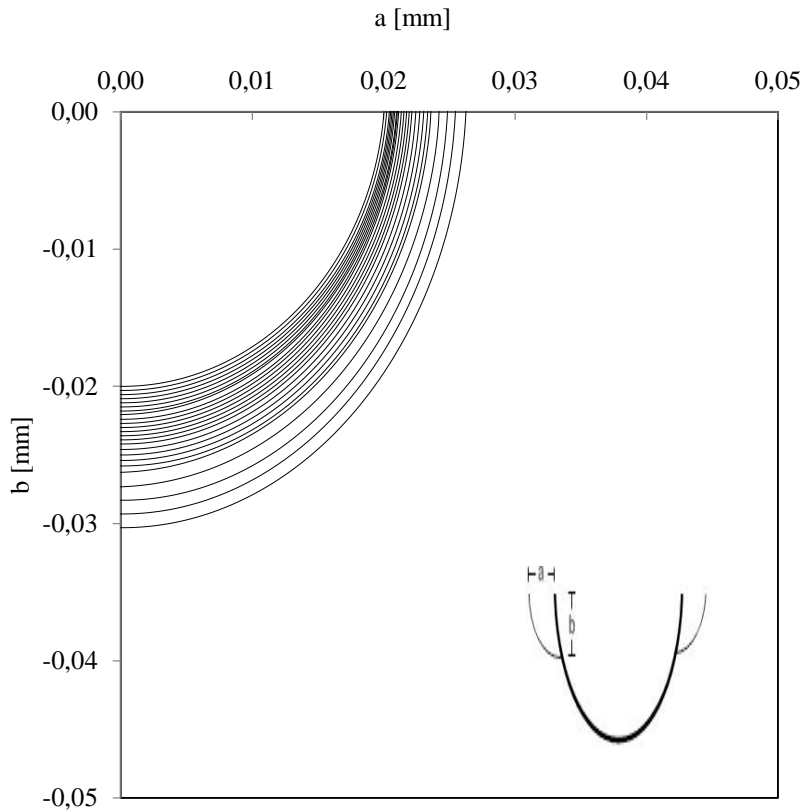


Şekil 7.9. Yarım oyuk ağızında çatlak ilerleme çizgileri

Yarım oyuk için gerçekleştirilen işlemlerin aynısı derin ( $a/2c = 1$  ve  $a/2c=2$ ) oyuklarına da uygulanmıştır.  $a/2c = 1$  olan oyukta tahmin edilen son adım oyuk içindeki çatlak ucunda 0,035 mm dir.  $a/2c = 2$  olan derin oyukta ise bu değer 0,0303 mm olarak bulunmuştur. Oyuk derinliğinin artması ile gerilme şiddet faktörünün kırılma tokluğuna ulaşması için gerekli çatlak uzunluğu değerinin düştüğü sonucunda varılmıştır. Diğer bir ifade ile oyuk derinleştikçe daha az çatlak ilerleme adımı sonucunda yapı kırılmaktadır.



Şekil 7.10. En boy oranı 1 olan oyuk ağzındaki çatlak ilerleme çizgileri



Şekil 7.11. En boy oranı 2 olan oyuk ağzındaki çatlak ilerleme çizgileri

### 7.7. Sonuçların Tartışılması

Bu çalışmada oyuk korozyonun gerilme yığılma faktörüne ve yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda oyuğun en-boy oranının artmasıyla gerilme yığılma faktörünün arttığı görülmüştür.

Yorulma ömrü, gerilme yığılma faktörüyle ilişkili olan yorulma çentik faktörüne bağlıdır. Çalışmamızda bu ilişki hem deneysel hem de sonlu eleman analizi ile incelenmiştir. Analiz ve deney sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Hem deney hem de analizler yardımıyla korozyon oyuk derinliğinin artışı ile yapının yorulma ömrünün önemli miktarda azaldığı sonucu elde edilmiştir.

Üzerinde oyuk korozyonu bulduran bir yapıda tekrarlı yükler altında çatlak başlangıcı meydana geleceği literatürdeki birçok çalışmada yer almaktadır. Oyuk korozyonunun gerilme yığılma faktörüne ve yorulma ömrüne etkisinin

incelenmesinin ardından, yapıdaki en yüksek gerilmenin olduğu noktada çatlak başlatılmıştır. Farklı derinliklerdeki oyuklarda açılan eşit uzunluktaki çatlağın gerilme şiddet faktörü hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları karşılaştırıldığında; aynı şartlardaki çatlağın derin oyuk içerisinde daha yüksek gerilme şiddet faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Diğer bir ifade ile oyuk derinleştikçe çatlak daha tehlikeli olmaktadır.

Daha sonra en-boy oranı ( $a/2c = 0.5$ , 1 ve 2) oyuklar için çatlak ilerleme analizleri yapılmıştır. Farklı derinliklerdeki oyuklar içerisinde yapılan çatlak ilerlemede oyukun içinde kalan çatlak ucunun daha yüksek gerilme şiddet faktörüne sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuca dayanarak oyuk içerisindeki çatlak ucunun, oyuk dışındaki çatlak ucuna göre daha hızlı ilerleyeceği tahmin edilmektedir. Elde edilen çatlak ilerleme çizgileri de bu bilgiyi doğrulamaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] ROKHLIN S. I. , KIM J.Y., NAGY H., ZOOFAN B.,Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life, Engineering Fracture Mechanics, p425-444, 1999.
- [2] CERİT M., GENEL K., EKŞİ S., Numerical Investigation on Stress Concentration of Corrosion Pit, Engineering Failure Analysis, p2467-2472.
- [3] CHEN, G.S., WAN K.C, GAO M., WEI R.P., FLOURNOY T.H, Transition from pitting to fatigue crack growth-modeling of corrosion fatigue crack nucleation in a 2024-T3 aluminum alloy., p126-132, 1996.
- [4] EBARA R., Corrosion fatigue phenomena learned from failure analysis, Engineering Failure Analysis, p516-525, 2006.
- [5] ALMARAZ D.M.G, AMBRIZ L.J., CALDERON E.C., Fatigue endurance and crack propagation under rotating bending fatigue tests on aluminum alloy AISI 6063-T5 with controlled corrosion attack, Engineering Fracture Mechanics, p119-131, 2012.
- [6] HORNER D.A., CONNOLLY B.J., ZHOU S., CROCKER L., TURNBULL A., Novel images of the evolution of stress corrosion cracks from corrosion pits, Corrosion Science, p3466-3485, 2011.
- [7] UZUN M., Yorulma Çatlak İlerlemesi ve Çatlak Davranışının Nümerik Analizi, Fırat Üniversitesi FBE, 2002.
- [8] KEÇELİOĞLU G., Stress and fracture analysis of riveted joints, ODTU FBE, 2008.
- [9] ARICAN E., Bir Gaz Türbinli Motor Fan Diskinde Yorulma Kaynaklı Çatlak İlerlemesinin İncelenmesi, Anadolu Üniversitesi FBE, 2006.
- [10] SOYYİĞİT A., 7075-T6 Alüminyum Alaşımında Yapay Olarak Oluşturulan Oyukların Yorulma Dayanımına Etkisi, Sakarya Üniversitesi, 2009.
- [11] DAVIS, R.J., Corrosion: Understanding the Basics, ASM International, 2000.

- [12] ROBERGE P., Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill Professional, 2012.
- [13] YALÇIN H., KOÇ T., Mühendisler İçin Korozyon, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 1998.
- [14] BARGEL H.J., SCHULZE G., Malzeme Bilgisi (çev: ARAN A., GULEÇ Ş.), İTÜ Makine Fakültesi, 1993.
- [15] UGURAL C.A., Mechanics of Materials, Wiley, 2007.
- [16] Mischke, C., Shigley J., Mechanical Engineering Design., McGraw-Hill, 2003.
- [17] ROYLANCE D., Fatigue, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [18] BHANDARI V.B., Design of Machine Elements, McGraw-Hill, 2010.
- [19] SUN C.T., JIN Z., Fracture Mechanics Academic Press, 2012.
- [20] ARAN A., Kırılma Mekaniğine Giriş, 1981.
- [21] YAYLA P., Kırılma Mekaniği, Çağlayan Kitabevi, 2007.
- [22] GDOUTOS E.E, Fracture Mechanics am Introduction, Springer, 2005.
- [23] FCPAS, Version 1.0, TURKEY, 2011.

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Faruk YAREN, 29.11.1988 de Ankara' da doğdu. 2011 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.