

2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ  
SİMÜLE EDİLMİŞ UÇUŞ YÜKLERİ  
ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI

DİLEK TETİK  
Doktora Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı  
OCAK -1999

ESKİŞEHİR

T.C.  
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SİMÜLE EDİLMİŞ  
UÇUŞ YÜKLERİ ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI

DOKTORA TEZİ  
DİLEK TETİK

DANIŞMAN  
Doç. Dr. NURAN AY

ESKİŞEHİR-1999

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Dilek Tetik'in 2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SİMÜLE EDİLMİŞ UÇUŞ YÜKLERİ ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI başlıklı Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki, Doktora tezi ~~18.03.1999~~..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Doç. Dr. Numan Ay	.....
Üye :	Prof. Dr. Macit Yaman	.....
Üye :	Y. Doç. Dr. Nedret Aydın	.....

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ~~24.03.1999~~..... tarih ve ~~9/2~~..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

## ÖZET

### Doktora Tezi

## 2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SİMÜLE EDİLMİŞ UÇUŞ YÜKLERİ ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI

### DİLEK TETİK

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nuran AY  
1999, 123 Sayfa

Bu çalışmada, 2024-T3 alüminyum alaşımının gerçek uçuş şartlarına yakın koşullarda yorulma davranışının belirlenmesi amacıyla sabit ve simüle edilmiş değişken genlikli yükler altında yorulma deneyleri yapılmıştır. Simüle edilmiş değişken genlikli deneylerde  $R=0,1$  oranında, her 5000, 2500, 1200 çevrimde 100 çevrim blok aşırı yük uygulanmıştır.  $R=0,5$  oranında ise her 500, 250 çevrimde 50 çevrim blok aşırı yük uygulanmıştır. Karşılaştırmak amacıyla aynı alüminyum alaşımının yorulma davranışı iki değişik yük oranında ( $R=0,1$  ve  $R=0,5$ ) sabit genlikli yük altında incelenmiştir.

Değişik periyotlarda uygulanan aşırı yük ile çatlak ilerleme hızının değişimi incelenmiştir. Deneyler numuneler kırılıncaya kadar devam ettirilmiş ve kırık yüzeylerde oluşan ve taramalı elektron mikroskobu ile belirlenen yorulma çizgileri yardımıyla mikro boyutta bölgesel olarak çatlak ilerleme hızı hesaplanmış ve çatlak ilerleme hızını bölgesel olarak etkileyen yapısal hatalar üzerinde incelemeler yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Alüminyum, çatlak ilerlemesi, yorulma, mikroyapı, sabit genlikli yükleme, simüle edilmiş uçuş yükleri

**ABSTRACT****PhD Thesis****FATIGUE BEHAVIOUR OF 2024-T3 ALUMINIUM ALLOY UNDER  
SIMPLIFIED FLIGHT SIMULATION LOADING****DİLEK TETİK****Anadolu University****Graduate School of Natural and Applied Sciences****Civil Aviation Programme****Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nuran AY****1999, 123 Pages**

Fatigue behaviour of 2024-T3 aluminium alloy under constant amplitude and simplified flight loading has been undertaken in this study. The aim of the research was to obtain an understanding of how the alloy behaves under almost real flying conditions. During simplified flight loading experiments when  $R=0,1$ , for every 5000, 2500 and 1200 cycles a block of 100 cycle overload was applied. Whereas when  $R=0,5$  was used, for every 500 and 250 cycles a block of 50 cycle overload was applied. For the comparison, experiments at two different R ratio ( $R=0,1$  and  $R=0.5$ ) were also carried out to determine the fatigue behaviour of the same alloy under constant amplitude loading.

Variation of the crack propagation rate with applied overloads during different periods were also investigated. Fatigue experiments have been continued until the specimens got broken. Fatigue striations formed on fractured surfaces have been observed by using a scanning electron microscope and as a result, local crack propagation rate at micro level has been calculated. In addition, the effect of local structural imperfections on the crack propagation rate was also investigated.

**Key words:** Aluminium, crack propagation, fatigue, microstructure, constant amplitude loading, simplified flight simulation loading

## TEŐEKKÖR

Bu alıőmanın gerekleőtirilmesinde uyarıcı ve yönlendirici desteklerini gördüğüm sayın hocam Do. Dr. Nuran AY'a teşekkür ederim.

Ayrıca, alıőmanın her aőamasında yardımlarını ve desteğini esirgemeyen (özellikle kırık yüzeyleerin taramalı elektron mikroskobu ile incelenmesinde) sayın Yrd. Do. Dr. Servet TURAN'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. UÇAKLARDA YORULMA.....</b>	<b>2</b>
2.1. Tasarım Yaklaşımları .....	3
2.1.1. Emniyetli -Ömür Tasarımı .....	3
2.1.2. Emniyetli-Hasar Tasarımı .....	4
2.1.3. Hasar Toleransı Tasarımı .....	5
2.2. Uçakta Yük Dağılımı.....	7
2.3. Standartlaştırılmış Yük Dağılımı.....	9
<b>3. LİNEER ELASTİK KIRILMA MEKANİĞİ.....</b>	<b>10</b>
3.1. Çatlak Ucuna Etkiyen Gerilmeler .....	10
3.2. Gerilme Şiddet Faktörü .....	12
3.3. Çatlak Ucu Plastisitesi .....	15
3.3.1. Plastik Bölgenin Şekli.....	17
3.3.2. Malzeme Boyutlarının Etkisi.....	19

<b>4. YORULMA KIRILMALARI</b> .....	21
4.1. Yorulma Çatlak Başlangıcı ve İlerlemesi .....	21
4.2. Sabit Genlikli Yorulma.....	24
4.2.1. Gerilme Oranı ve Çatlak Ucu Plastisitesinin Etkisi, Çatlak Kapanması.....	29
4.3. Değişken Genlikli Yorulma .....	32
4.3.1. Aşırı Yük Etkisi .....	32
4.3.1.1. Tek Aşırı Yük Etkisi .....	33
4.3.1.2. Periyodik Olarak Uygulanan Aşırı Yükler.....	35
4.3.2. Değişken Genlikli Yük Bloklarının Etkisi .....	36
4.3.3. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler.....	37
4.3.3.1. Metalurjik Faktörlerin Etkisi .....	37
4.3.3.2. Yüzeyin Etkisi .....	38
4.3.3.3. Geometrik Faktör: Çentik Etkisi.....	39
 <b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	 42
5.1. Kullanılan Malzeme .....	42
5.2. Deney Numuneleri.....	42
5.3. Kullanılan Cihazlar.....	44
5.4. Yapılan Deneyler.....	46
5.4.1. Çekme Deneyleri .....	46
5.4.2. Yorulma Deneyleri .....	46
5.4.3. Sabit Genlikli Yorulma Deneyleri .....	46
5.4.4. Değişken Genlikli Yorulma Deneyleri .....	46
5.4.5. Mikroyapı İncelemeleri.....	47



<b>6.</b>	<b>DENEY SONUÇLARI</b> .....	53
6.1.	Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları.....	53
6.2.	Çekme Deneyi Sonuçları .....	53
6.3.	Sabit Genlikli Yorulma Deneyi Sonuçları .....	53
6.4.	Değişken Genlikli Yorulma Deneyi Sonuçları .....	60
6.5.	Kırılmış Yüzeylerin Mikroyapı İnceleme Sonuçları .....	74
<b>7.</b>	<b>DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ</b> .....	95
7.1.	Çatlak İlerlemesinin İncelenmesi .....	95
7.1.1.	Sabit Genlikli Yükleme.....	95
7.1.2.	Değişken Genlikli Yükleme .....	96
7.1.2.1.	Periyodik olarak Uygulanan Basma Yüklerinin Etkisi .....	96
7.1.2.2.	R=0,1 Oranında Periyodik Olarak Uygulanan Aşırı Blok Çekme Yüklerinin Etkisi.....	99
7.1.2.3.	R=0,5 Oranında Periyodik Olarak Uygulanan Aşırı Blok Çekme Yüklerinin Etkisi.....	108
7.2.	Mikroyapı Analizleri .....	114
7.2.1.	Sabit Genlikli Yükleme .....	114
7.2.2.	Değişken Genlikli Yükleme .....	115
<b>8.</b>	<b>GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	116
8.1.	Genel Sonuçlar .....	116
8.2.	Öneriler .....	117
<b>9.</b>	<b>KAYNAKLAR</b> .....	118

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Çatlak ucu koordinat eksen	10
Şekil 3.2.	Çatlak ucundaki $\sigma_y$ elastik gerilmesi	12
Şekil 3.3.	Kırılma şekilleri	13
Şekil 3.4.	Çatlak ucundaki plastik bölgenin ilk yaklaşıma göre gösterimi	15
Şekil 3.5.	Irwin plastik bölge düzeltmesi	17
Şekil 3.6.	Von Mises akma kriterine göre boyutsuz plastik bölge şekilleri	19
Şekil 3.7.	Orta kalınlıkta bir plakada kesit boyunca plastik bölge değişimi	20
Şekil 4.1.	Çatlak ilerleme aşamaları	23
Şekil 4.2.	Sabit genlikli yorulmanın şematik gösterimi	25
Şekil 4.3.	Metal malzemelerde görülen tipik çatlak ilerlemesi	26
Şekil 4.4.	İlerleyen çatlak etrafında meydana gelen plastik bölgenin şematik gösterimi	30
Şekil 4.5.	Uygulanan gerilme ile gerilme şiddet faktörünün değişimi	30
Şekil 4.6.	Gerilme şiddet faktör değerlerinin çatlak kapanmasına etkisi	31
Şekil 4.7.	Sabit genlikli yükleme sırasında uygulanan tek aşırı yük	33
Şekil 4.8.	Sabit genlikli yükleme sırasında uygulanan aşırı yükün çatlak ilerlemesini geciktirici etkisi	34
Şekil 4.9.	Sabit ve değişken genlikli yüklerin çatlak ilerleme hızına Etkisi	35
Şekil 4.10	Mikroboşlukların birleşmesi ile çatlak ilerlemesinin şematik gösterimi	38
Şekil 4.11.	Çatlak boyunca yük çizgileri ve gerilme konsantrasyonunun değişimi	39
Şekil 4.12.	Elips şeklinde çentikler: yüksek ve düşük gerilme şiddet faktörü	40
Şekil 4.13.	Çentikten $\delta$ sonlu mesafesi dışında ortalama gerilme	41
Şekil 5.1.	Çekme deney numunesinin şematik gösterimi	43
Şekil 5.2.	Delikli ve delik kenarında çentikli yorulma numunelerinin şematik gösterimi	43
Şekil 5.3.	Çekme ve yorulma deneylerinin yapıldığı INSTRON cihazı	45
Şekil 5.4.	Kimyasal analiz cihazı ile donatılmış taramalı elektron mikroskobu	45
Şekil 5.5.	R=0,1 oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	49
Şekil 5.6.	R=0,5 oranında, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	49
Şekil 5.7.	10 çevrim, yük genliği=2 kN, ortalama yük değeri=-3 kN ve 100 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük	

	değeri=16,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	50
Şekil 5.8.	R=0,1 oranında, 5000 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	50
Şekil 5.9.	R=0,1 oranında, 2500 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	51
Şekil 5.10.	R=0,1 oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	51
Şekil 5.11.	R=0,5 oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN yük değerleriyle yapılan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	52
Şekil 5.12.	R=0,5 oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN yük değerleriyle yapılan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi	52
Şekil 6.1.	Numunenin yöne bağlı üç boyutlu mikroyapısı	54
Şekil 6.2.	Numunenin xy düzlemindeki mikroyapısı	54
Şekil 6.3.	Numunenin yz düzlemindeki mikroyapısı	55
Şekil 6.4.	Numunenin xz düzlemindeki mikroyapısı	55
Şekil 6.5.	2024 alüminyum alaşımına ait yük-uzama ve mühendislik gerilme-% uzama eğrisi	56
Şekil 6.6.	R=0,1 oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi	57
Şekil 6.7.	R=0,1 oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi	58
Şekil 6.8.	R=0,1 oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi	58
Şekil 6.9.	R=0,5 oranında, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinden	

	elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi	59
Şekil 6.10.	$R=0,5$ oranında, yük genliği= $7,5$ kN, ortalama yük değeri= $22,5$ kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi	60
Şekil 6.11.	$R=0,5$ oranında, yük genliği= $7,5$ kN, ortalama yük değeri= $22,5$ kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi	60
Şekil 6.12.	10 çevrim, yük genliği= $2$ kN, ortalama yük değeri= $-3$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN olarak uygulanan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi	62
Şekil 6.13.	10 çevrim, yük genliği= $2$ kN, ortalama yük değeri= $-3$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN olarak uygulanan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi	63
Şekil 6.14.	10 çevrim, yük genliği= $2$ kN, ortalama yük değeri= $-3$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN olarak uygulanan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi	63
Şekil 6.15.	$R=0,1$ oranında, 5000 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $14,8$ kN, ortalama yük değeri= $18,2$ olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi	64
Şekil 6.16.	$R=0,1$ oranında, 5000 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $14,8$ kN, ortalama yük değeri= $18,2$ olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi	65
Şekil 6.17.	$R=0,1$ oranında, 5000 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $14,8$ kN, ortalama yük değeri= $18,2$ olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi	65
Şekil 6.18.	$R=0,1$ oranında, 2500 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $14,8$ kN, ortalama yük değeri= $18,2$ olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi	66
Şekil 6.19.	$R=0,1$ oranında, 2500 çevrim, yük genliği= $13,5$ kN, ortalama yük değeri= $16,5$ kN ve 100 çevrim, yük genliği= $14,8$ kN, ortalama yük değeri= $18,2$ olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-	

- çevrim sayısı eğrisi 67
- Şekil 6.20.  $R=0,1$  oranında, 2500 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi 67
- Şekil 6.21.  $R=0,1$  oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi 68
- Şekil 6.22.  $R=0,1$  oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi 69
- Şekil 6.23.  $R=0,1$  oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi 69
- Şekil 6.24.  $R=0,5$  oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi 70
- Şekil 6.25.  $R=0,5$  oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi 71
- Şekil 6.26.  $R=0,5$  oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi 71
- Şekil 6.27.  $R=0,5$  oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi 72
- Şekil 6.28.  $R=0,5$  oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi 73

- Şekil 6.29.  $R=0,5$  oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi 73
- Şekil 6.30. Kırılmış yüzeylerin mikroyapı incelemeleri sonucunda genelde gözlenen çatlak başlangıçları. (a) Tek bir noktadan ve (b) iki ayrı noktadan başlamış yorulma çatlakları 75
- Şekil 6.31.  $R=0,1$  oranındaki  $F_{max}=30$  kN ve  $F_{min}=3$  kN değerleri alınarak yapılan sabit genlikli yükleme sonucu oluşmuş yorulma çizgileri 76
- Şekil 6.32.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.12’de değerleri verilen yükleme ile oluşmuş yorulma çizgileri ve kırılma yüzeyinde matristen ayrılmış inklüzyonlar 77
- Şekil 6.33.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.15’de değerleri verilen yüklemeye göre son kırılma ve başlangıç bölgesine yakın yorulma çizgileri arasındaki mesafenin değişimi 78
- Şekil 6.34.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18’de değerleri verilen yükleme ile kenardan yaklaşık 500  $\mu\text{m}$  mesafede oluşan kırılma yüzeyinin genel ve detaylı görünüşü 79
- Şekil 6.35.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18’de değerleri verilen yükleme ile kenardan yaklaşık 500  $\mu\text{m}$  mesafede oluşmuş kayma çizgileri 80
- Şekil 6.36.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.21’de değerleri verilen yükleme ile kenardan yaklaşık 6 mm mesafede oluşan kırılma yüzeyinin genel ve detaylı görünüşü 81
- Şekil 6.37.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18’de değerleri verilen yükleme ile kırılma yüzeyinde oluşmuş düzenli ve düzensiz yorulma çizgileri 82
- Şekil 6.38.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.15’de değerleri verilen yükleme altında oluşmuş mikroboşluklar 83
- Şekil 6.39.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18’de değerleri verilen yükleme altında oluşmuş ikincil çatlaklar 83
- Şekil 6.40.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.21’de değerleri verilen yükleme altında oluşmuş çatlaklar ve mikroboşluklar 84
- Şekil 6.41.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.15’de verilen yük değerleri ile elde edilen kırılma yüzeyinde, orijinal yapıdan neredeyse tamamen ayrılmış demir ve oksijen içeren inklüzyon ve bu inklüzyondan elde edilen EDX spektrumu 85
- Şekil 6.42.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18’de verilen yük değerleri ile elde edilen kırılma yüzeyinde, orijinal yapıdan neredeyse tamamen ayrılmış demir ve oksijen içeren inklüzyon ve bu inklüzyondan elde edilen EDX spektrumu 86
- Şekil 6.43.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18’de verilen yük değerleri ile elde edilen kırılma yüzeyinde, bakır içeren inklüzyonlar ve bu inklüzyonlardan ve matris fazından elde edilen tipik EDX spektrumu 87

Şekil 6.44. R=0,1 oranında, Şekil 6.15’de ve Şekil 6.21’de verilen yük değerleri ile elde edilen tanelerarası kırılmayı içeren son kırılma bölgesi	89
Şekil 6.45. R=0,5 oranında, Şekil 6.24’de değerleri verilen yükleme ile oluşmuş ve yük değişimi gözle de görülebilen bölgenin farklı büyütmelelerdeki görünüşü	90
Şekil 6.46. R=0,5 oranında, Şekil 6.27’de değerleri verilen yükleme ile kırılma yüzeyinde oluşmuş düzenli ve düzensiz yorulma çizgileri	91
Şekil 6.47. R=0,5 oranında, Şekil 6.24’de değerleri verilen yükleme ile oluşmuş kırılma yüzeyinin iki farklı görünüşü	92
Şekil 6.48. R=0,5 oranında, değişken genlikli yükleme altında oluşmuş ikincil çatlaklar ve inklüzyonlar civarında oluşmuş mikroçatlaklar	93
Şekil 6.49. R=0,5 oranında, değişken genlikli yükleme sonucu oluşmuş yorulma çizgileri	94
Şekil 7.1. 2024-T3 alüminyum alaşımında R oranının çatlak ilerleme hızına etkisi	95
Şekil 7.2. R=0,1 oranında, sabit genlikli yükleme ve Şekil 6.12’de değerleri verilen değişken genlikli yükleme etkisiyle çatlak boyu-çevrim sayısı değişimi	99
Şekil 7.3. R=0,1 oranında, sabit genlikli ve R=0,1 oranında değişken genlikli yükleme etkisiyle çatlak boyu-çevrim sayısı değişimi	105
Şekil 7.4. Uygulanan aşırı yük ile çatlak ilerlemesi arasındaki ilişki	106
Şekil 7.5. Periyodik olarak aşırı yük uygulanmasına bağlı olarak çatlak ilerleme hızının değişimi	107
Şekil 7.6. R=0,5 oranında sabit genlikli ve R=0,5 oranında değişken genlikli yükleme etkisiyle çatlak boyu-çevrim sayısı değişimi	113

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Emniyetli-Hasar ve Emniyetli-ömür tasarımı uçak yapı elemanları için yorulma emniyet faktörleri	6
Çizelge 2.2. Ticari uçakların kanat yapısında yorulma çatlak oluşum Yüzdesi	7
Çizelge 5.1. 2024 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi	42
Çizelge 5.2. Sabit ve değişken genlikli deneylerde uygulanan yük değerleri ve çevrim sayıları	48
Çizelge 7.1. $R=0,1$ oranında, basma yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yükleme ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi	97
Çizelge 7.2. $R=0,1$ oranında, basma yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yükleme ile $da$ , $dN$ , $da/dN$ ve $\Delta K$ değerlerinin değişimi	97
Çizelge 7.3. $R=0,1$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (5000+100 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi	100
Çizelge 7.4. $R=0,1$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (5000+100 çevrim) ile $da$ , $dN$ , $da/dN$ ve $\Delta K$ değerlerinin değişimi	100
Çizelge 7.5. $R=0,1$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (2500+100 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi	101
Çizelge 7.6. $R=0,1$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (2500+100 çevrim) ile $da$ , $dN$ , $da/dN$ ve $\Delta K$ değerlerinin değişimi	102
Çizelge 7.7. $R=0,1$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (1200+100 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi	103
Çizelge 7.8. $R=0,1$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (1200+100 çevrim) ile $da$ , $dN$ , $da/dN$ ve $\Delta K$ değerlerinin değişimi	104
Çizelge 7.9. $R=0,5$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (500+50 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi	109
Çizelge 7.10. $R=0,5$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (500+50 çevrim) ile $da$ , $dN$ , $da/dN$ ve $\Delta K$ değerlerinin değişimi	110
Çizelge 7.11. $R=0,5$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (250+50 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi	111
Çizelge 7.12. $R=0,5$ oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (250+50 çevrim) ile $da$ , $dN$ , $da/dN$ ve $\Delta K$ değerlerinin değişimi	112



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\sigma_x, \sigma_y$	: Normal gerilmeler (MPa)
$\sigma_{ys}$	: Akma gerilmesi (MPa)
$\sigma_m$	: Ortalama gerilme (MPa)
$\Delta\sigma$	: Gerilme aralığı (MPa)
$\tau_{xy}, \tau_{yx}$	: Kayma gerilmeleri (MPa)
$\sigma_{op}$	: Çatlağın açıldığı gerilme (MPa)
$K_{I, II, III}$	: Gerilme şiddet faktörü (MPa m <sup>1/2</sup> )
$K_c$	: Kritik gerilme şiddet faktörü (MPa m <sup>1/2</sup> )
$a$	: Çatlak boyu (mm)
$N$	: Çevrim sayısı
$r_y$	: Çatlak ucundaki plastik bölgenin boyutu
$R$	: Gerilme oranı
$\gamma$	: Hızlanma faktörü
$k_t$	: Elastik gerilme konsantrasyon faktörü
$k_f$	: Yorulma çentik faktörü
$q$	: Çentik hassasiyeti
ASIP	: Uçak yapısal bütünlük programı (Aircraft Structural Integrity Program)
Y.E.F	: Yorulma Emniyet Faktörü
TWIST	: Ticari uçakların kanatları için standart program (Transport Wing Standart)
FALSTAFF	: Savaş uçakları için standart program Fighter Aircraft Loading Standart For Fatigue
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
EDX	: Enerji Saçılımlı X-ışınları Spektrometresi (Energy Dispersive x-ray Spectrometer)

## 1. GİRİŞ

Uçuş sırasında bir uçağa aşırı yüklerin gelmesine sebep olan olaylardan biri de, düşey doğrultuda esen rüzgarlardır. Bu rüzgarlar uçağa aşırı yükler gelmesine neden olurlar. Havacılıkta, hasar toleransı tasarımı kavramının kullanımı, incelenen parça veya parçalardaki yorulma çatlak ilerleme hızının bilinmesine bağlıdır. Çatlak ilerleme hızı tam ölçekli testlerle ya da laboratuvar şartlarında deneysel olarak belirlenir. Bu şekilde belirlenen çatlak ilerleme oranının bilinmesiyle, parçalarda var olan ya da olması mümkün çatlaklar için uygun kontrol aralıkları belirlenir.

Modern uçak yapıları, çoğu yüksek yüklere maruz yapısal elemanlardan oluşur. Uçağın tam ölçekli yorulma deneyleri sırasında, kanat ya da gövde gibi yapısal elemanların içindeki bazı parçalarda, çatlak başlangıcı ve ilerlemesini ölçmek konumları nedeniyle mümkün değildir. Bu tür parçaların deneyleri parça kırılıncaya kadar devam eder ve deney sonuçlarının yorumu, uygulanan yorulma yükleri ile kırılma yüzeyinin ilişkilendirilmesiyle mümkündür. Kırılma yüzeyinin incelenmesinde, taramalı veya geçirimli elektron mikroskobu kullanılır. Yüzeyin incelenme yönteminin öneminin yanı sıra incelenen malzemenin yorulma özelliklerini yansıtması da önemlidir.

Modern uçaklar, değişik metal alaşımlarından imal edilmektedir. Ticari uçaklar için, bu alaşımlardan en yaygın alüminyum alaşımlarıdır. Bunlardan en çok kullanılanları 2xxx (2024) ve 7xxx serisi alüminyum alaşımlarıdır.

Bu çalışmada uçuş sırasında etkiyen düşey rüzgarların (aşırı yükler) çatlak ilerleme davranışını nasıl etkilediği incelenmiştir. 2024-T3 alüminyum alaşımı ile öncelikle sabit genlikli deneyler yapılmıştır. Sabit genlikli deneyler,  $R=0,1$  ve  $R=0,5$  olmak üzere iki değişik yük oranında yapılmıştır. Değişken genlikli deneylerde ise  $R=0,1$  oranında, her 5000, 2500, 1200 çevrimde 100 çevrim aşırı blok yük uygulanmıştır.  $R=0,5$  oranında ise her 500, 250 çevrimde 50 çevrim aşırı blok yük uygulanmıştır. Bu değişik farklı çevrim sayılarında uygulanan aşırı yükler sonucu çatlak ilerleme hızının değişimi incelenmiştir. Deneyler numuneler kırılıncaya kadar devam ettirilmiş ve kırık yüzeylerde oluşan yorulma çizgileri yardımıyla mikro boyutta bölgesel olarak çatlak ilerleme hızı hesaplanmış ve çatlak ilerleme hızını bölgesel olarak etkileyen yapısal hatalar üzerinde incelemeler yapılmıştır.

## 2. UÇAKLARDA YORULMA

1950'lerden itibaren hava taşıtlarının daha hızlı olması ve uçaklarda taşınan paralı ağırlığın yapısal ağırlığa göre artmaya başlaması ile birlikte yapısal bazı problemler ortaya çıkmıştır. Bu problemlerin içerisinde en önemlisi olan yorulma, çok sayıda hasara yol açmıştır [1].

1957 yılında B-47'lerde yorulma probleminden dolayı kazaların olması nedeniyle, Amerikan Hava Kuvvetleri hava taşıtlarındaki yorulma problemini araştırmak üzere bir program geliştirmiştir [2]. Uçak yapısal bütünlük programı (Aircraft Structural Integrity Program, ASIP) adı verilen programın üç amacı vardır:

- 1- Mevcut filolarda hava taşıtlarının yapısal yorulmasını kontrol etmek,
- 2- Hava taşıtlarının servis ömürlerini kontrol etmek,
- 3- Gelecekte yorulma problemi yaratmayacak tasarım yöntemleri geliştirmektir.

Bu program, yeni kontrol ve analiz yöntemleri ile geliştirilmeye çalışılmış ve özellikle bu dönemde F-111 ve F-5 uçaklarında meydana gelen hasarların önüne geçilmeye çalışılmıştır.

Genel olarak yapılar, değişik yorulma problemleri göstermeleri bakımından ikiye ayrılırlar. Monoblok adı verilen ilk grubu blok malzemedен işlenerek veya küçük parçacıkların kaynaklanması ile elde edilen yapılar oluşturur. İkinci grubu ise, kafes levha olarak adlandırılan perçin ve/veya civatalarla birleştirilmiş yapılar oluşturur. İlk gruptaki yapılarda yorulma çatlağı göreceli olarak daha hızlı ilerlerken, ikinci grup yapılarda daha yavaş olur [3]. Bu farklı tipteki yapıların tasarımında iki farklı yaklaşım mevcuttur. Birinci yaklaşımda, tasarımı yapılan parça için bir ömür tayin edilir ve tayin edilen bu ömrün sonunda parçada herhangi bir çatlak olmasa dahi sözkonusu parça değiştirilir. İkincisinde ise, parçada çatlak

bulunsa bile parça serviste kalır ve parça, çatlak tehlikeli bir boyuta gelmeden tamir edilir. Birinci yaklaşıma emniyetli-ömür tasarımı, ikincisine ise emniyetli-hasar tasarımı adı verilir. Daha sonra, bu iki tasarımın prensipleri geliştirilerek bugün kullanılan hasar toleransı tasarımı şekline dönüştürülmüştür [4].

## 2.1. Tasarım Yaklaşımları

### 2.1.1. Emniyetli-Ömür Tasarımı

Emniyetli-ömür tasarımı, önceden bilinen veya tahmin edilen çatlak başlangıç yorulma ömrü üzerine dayandırılmıştır. Bu yaklaşımda tasarlanan parça için bir ömür belirlenir ve belirlenen bu ömrün sonunda parçada herhangi bir çatlak olmasa bile parça değiştirilir. Bu yaklaşıma göre, parçalar servise sokulurken çatlak ve benzeri hatalar içermeyecek ve çalışma ömürleri boyunca bu tür hatalar oluşmayacaktır.

Bu tasarım yaklaşımın bir sonucu olarak da parçaların servis içinde denetlenmeleri gerekmeyecektir. Belirlenen emniyetli-ömrün sonunda hava taşıtında kullanılan parçalar değiştirilmektedir. Belirli bir iniş sayısına göre tasarlanan iniş takımları, belirli bir uçuş saatine göre tasarlanan helikopter rotoru belirlenen emniyetli ömrün sonunda mutlaka değiştirilir.

Hava taşıtlarında meydana gelen yorulma problemini araştırmak üzere geliştirilen ASIP, ilk oluşturulduğunda servis ömrü belirleme amacıyla kullanılmıştır. Bu emniyetli-ömür yaklaşımına göre oluşturulmuştur. Uçağın işletim ortamı laboratuvar şartlarında oluşturularak ve hesaplanan ömür yorulma emniyet katsayısına bölünerek uçağın emniyetli-ömrü bulunmuştur. Yorulma emniyet katsayısı, imalat kalitesi ve kullanılan malzemenin parçadan parçaya değişmesi nedeniyle yüksek tutulmuştur [5].

Emniyetli-ömür yaklaşımı, 1960'lı yıllarda tüm yeni tasarımlarda temel kabul edilmiş ve C-141'lerde başarılı görülmüştür. 1969'da F-111'in düşmesiyle, emniyetli-ömür yaklaşımının aksaklıkları incelenmeye başlanmıştır [1]. Herhangi bir

hasar almadan çalışma ömrünü dolduracakları varsayılan bazı parçaların tam aksine çatlaklar içerdikleri ve bu çatlakların, çalışma yükleri altında ve çoğu kez ortamın korozif etkisi ile hızla büyüdüğü görülmüştür. Çatlakların kararsız kırılmanın başladığı kritik büyüklüğe ulaşmaları için gereken zamanın öngörülen çalışma ömründen çok daha kısa olabileceği bulunmuştur.

Bu tasarımda, parçaların çatlak ve benzeri hatalardan tamamen soyutlanmış olarak servise sokuldukları kabul edilmiştir fakat bu genelde geçersizdir. Bu yaklaşımın bir dezavantajı da parçaların gerçek ömründen yararlanmaya imkan vermemesidir [1].

### 2.1.2. Emniyetli-Hasar Tasarımı

Emniyetli-hasar tasarımında ise parçadaki çatlak tahribatsız kontrol yöntemleriyle tesbit edilse dahi parça serviste kalır ve çatlak tehlikeli bir konuma gelmeden parça tamir edilir. Bu tasarımda çatlak içeren parçaya, uçuşta riskin olmaması ve çatlak ilerlemesinin yavaş olması şartıyla izin verilebilir. Çatlağın yavaş büyüdüğü parçaların tasarımı ve denetlenmesinde temel koşul, belirli bir sınır değere ulaşıncaya kadar, çatlak büyümesinin tam bir kontrol altında olması ve izlenebilmesidir.

Emniyetli-hasar yapıları (gövde, kanat gibi) birden fazla yük yollarına sahiptir. Eğer, herhangi bir parça üzerine düşen görevi yapamaz ya da yükü karşılayamaz duruma gelirse, geri kalanlar çalışma yükünü taşımaya devam edeceklerdir. İzin verilen çatlakların kontrol ile bulunabilmesi amacıyla, kontrol edilebilir çatlak başlangıç değeri için gerekli ömür belirlenir ve ilk kontrol zamanının belirlenmesi için bulunan ömür bir güvenlik katsayısına bölünür. Eğer çatlak bulunursa, hasarlanmış parça hemen tamir edilmelidir. Eğer çatlak yoksa, parça bir sonraki bakıma kadar servise devam eder. Sonraki kontroller için, çatlak ilerleme hızına bağlı olarak gerekli zaman belirlenir. Kontrol aralıkları hesaplama ve/veya deneysel olarak elde edilen çatlak ilerleme eğrisinden belirlenir [6,7].

### 2.1.3. Hasar Toleransı Tasarımı

Emniyetli-ömür ve emniyetli-hasar tasarım prensipleri geliştirilerek bugün kullanılan hasar toleransı tasarımı şekline dönüştürülmüştür. Hasar toleransı tasarımı malzemede olması mümkün bazı hatalara rağmen yapısal bütünlüğün sağlanmasının mümkün olduğunun bilinmesi ile geliştirilmiştir.

Hasar toleransı tasarımının kabulleri şunlardır;

- 1- Bütün önlemlerin alınmış olmasına rağmen bir veya daha fazla sebepten dolayı hasar meydana gelir,
- 2- Hasar (çatlak) uygun bir kontrol yöntemiyle tesbit edilir ve tamiri planlanır,
- 3- Tamir edilene kadar, hasara rağmen yapı yük taşımaya devam eder.

Gözönüne alınması gereken ana değişkenler; çatlak kontrol edilebilirliği, çatlak ilerleme aralığı ve kritik çatlak uzunluğudur. Bu değişkenlerden herhangi birindeki artış, çatlak veya parça üzerine gelen yükteki azalış kontrol aralığını artırır. Servis ömrü sırasında meydana gelmesi mümkün tüm hasarlar için uygun kontrol yöntemleri hasar toleransı yaklaşımı için şarttır.

Uçak yapısal güvenilirliğini etkileyen çok sayıda faktör vardır. Fakat, her faktör için koruyucu kriterler yerleştirilirse belirgin ağırlık problemleri ortaya çıkar. Buna karşılık, eğer çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için belirgin faktörler göz ardı edilirse parçanın tamamen değiştirilmesi gerekebilir veya aşırı bakım masrafları ortaya çıkar. Dolayısıyla, yapısal güvenilirlik, yapısal yeterlilik ve bakım masrafları arasındaki denge sağlanmalıdır [8]. Bütün bu etkenler gözönüne alınarak, çatlak başlangıç ve ilerleme riskini hesaba katarak belirlenen yorulma emniyet katsayı (Y.E.K.) değerleri Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Emniyetli-Hasar ve Emniyetli-Ömür tasarımı uçak yapı elemanları için yorulma emniyet katsayıları [5]

Tasarım Anlayışı	Yapı Tipi	Y.E.K.
Emniyetli-hasar	kolay ulaşılabilir ve tamiri kolay	1,0
	kolay ulaşılamayan veya tamiri kolay olmayan	1,5
	erken yorulma çatlaklarının beklenmediği onarım için uçağın yerde önemli zaman kaybına neden olan bölgeler	2,0
Emniyetli-ömür	yer yüküne maruz kalan alüminyum yapılar	2,6
	yer yüküne maruz kalan çelik ve titanyum yapılar	3,7
	uçuş yüküne maruz kalan alüminyum ve titanyum yapılar	4,0

Çizelge 2.1'deki değerlerden görüleceği üzere, emniyetli-hasar tasarımı yapıların yorulma emniyet katsayısı, emniyetli-ömür tasarımı yapıların yorulma emniyet katsayısından daha küçüktür. Bu fark, çatlak görülmesinin emniyetli-ömür tasarımında çok daha tehlikeli olmasından kaynaklanmaktadır.

En yüksek yorulma emniyet katsayısı uçuş yüküne maruz alüminyum ve titanyum yapılardadır. Yerdeki yükler için, alüminyumun düşük elastisite modülüne sahip olması, çelik ve titanyum yapılarla karşılaştırıldığında rijitliğinin düşük olması nedeniyle, alüminyum yapıların yorulma emniyet katsayısı, çelik ve titanyum yapılarınkinden daha düşüktür.

## 2.2. Uçakta Yük Dağılımı

Uçaklar, yerde, kalkışta, tırmanışta ve uçuş sırasında çeşitli manevralar ve düşey rüzgar yüklerine maruz kalır. Ticari uçaklar uzun uçuş süreleri için tasarlanırlar ve savaş uçaklarının karşılaştığı kadar manevra yüklerine maruz kalmazlar [9].

Uçak kanatlarına gelen yükler, uçuş sırasında kanadı yukarı doğru eğmeye çalışırlar, bu yükler, kanadın alt yüzeyinde çekme, üst yüzeyinde basma yükleri şeklinde olup, kanadı çevrimsel olarak etkiler. Çekme yüklerinin etkidiği bölgelerde çatlak oluşumun daha fazla olduğu gözlenmektedir [10].

Çizelge 2.2’de ticari uçaklarda kanat yapısında çatlak oluşum yüzdeleri verilmiştir. Bu değerlerden çekme yüklerinin çatlak oluşumuna etkisi görülmektedir.

Çizelge 2.2. Ticari uçakların kanat yapısında yorulma çatlak oluşum yüzdesi [11]

Hasar bölgesi	Olay Sayısı	Çatlak Oluşumu (%)
Alt yüzey	106	53
Üst yüzey	58	29
Spar ağırları, flaplar...	36	18
Toplam	200	100

Ticari uçakların yük dağılımında, en fazla yükü, yer-hava-yer çevrimi ile birlikte etkileyen şiddetli düşey rüzgarlar oluşturur. Yerdeki denge durumunda, kanat aşağı doğru eğilir ve ortalama gerilme negatiftir. Uçuştaki denge durumunda, kanat yukarı doğru eğilir ve ortalama gerilme pozitiftir.



Değişik tipteki her uçuş için yük çevrim sayısı ve genliği tayin edilmelidir. Bir biri ardınca etkiyen yüklerin aşırı iyimser yorulma ömür tahminine yol açmasından sakınılmalıdır. Bir test programı çalıştırıldığında, en büyük pozitif düşey rüzgar veya manevra yükü çok erken uygulanmamalıdır. Yüksek çekme yükünün uygulanması sonucu çatlak içeren yapıda kalıntı basma gerilmelerinden dolayı fazla yorulma ömrü tahmini yapılabilir. Pozitif ve negatif yönde yük değişimlerinin sırası yorulma ömür değerlendirmesinde rol oynar. Yorulma hasar hesaplamalarında, en büyük pozitif yük değişimi en büyük negatif yük değişimi ile birleştirilir ve bu en küçüğe doğru devam eder. Uçuş simülasyon testlerinde, en büyük yük ve en küçük yük ayrılmıştır, uçuş sırasında olduğu gibi etkileşimleri rastgeledir.

Yeni uçak modellerinde, yorulma açısından kritik parçalarda çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin belirlenmesi için, uçak üzerine gelen yükler, uçak yerdeyken uygulanır ve ölçümler yapılır. Bu testler, tam ölçekli yorulma testleri olarak adlandırılır [12].

Tam ölçekli yorulma testlerinde en önemli noktalar şunlardır:

- 1 -Yorulma kritik elemanlarının ve tasarım kusurlarının saptanması,
- 2 -Görülebilir çatlağın meydana geldiği yorulma ömrünün tanımlanması,
- 3 -Çatlak ilerlemesi, kontrol ve tamir metodlarının incelenmesi,
- 4 -Çatlak içeren yapının mukavemetinin hesaplanması [13].

Uçuş saati veya uçuş sayısı olarak ölçülen servis ömrü, genelde yorulma testleriyle bulunan ömürden daha kısadır.

Servis ömrü boyunca etkiyen korozyon, servis ömrünün daha kısa olmasına neden olur. Aynı model uçakların karşılaştıkları değişik hava koşulları ve manevralar nedeniyle de servis ömürleri farklıdır [14].

### 2.3. Standartlaştırılmış Yük Dağılımı

Tam ölçekli yorulma testi, ilk prototipin hazır olduğu ve ilk uçuş ölçümlerinin yapıldığı üretim safhasının başında yapılır. Her havacılık şirketi kendi yük spektrumunu ve test yöntemi uyguladığından, sonuçların karşılaştırılması zordur. Bunun üzerine bazı Avrupa kuruluşları standartlaştırılmış yükleme programları geliştirmişlerdir. Ticari uçaklar için geliştirilen program TWIST (Transport Wing STandard), kanat yüzeyine gelen çekme yüklerini ve FALSTAFF (Fighter Aircraft Loading STandard For Fatigue) ise savaş uçakları için geliştirilen program olup, kanat köküne gelen yükleri temsil eder [15,16].

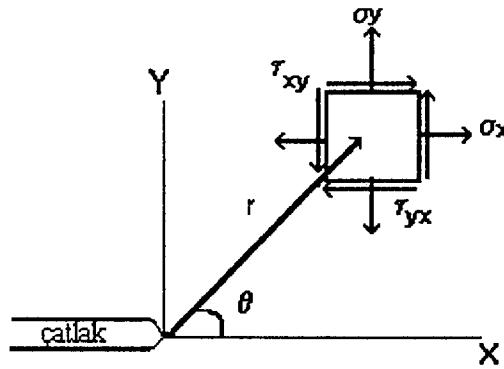
Ticari uçaklar için yük dağılımı oluşturulurken, uçuş başına değişik çevrim sayısı ile, on değişik uçuş tipi seçilmiştir. Uçuş başına çevrim sayısı 25 (durgun hava için) ile 1500 (fırtınalı hava için) arasında değişmektedir. TWIST standart yük testinin uzun sürmesinden dolayı, küçük yüklerin ihmal edildiği Mini-TWIST geliştirilmiştir [17].

### 3. LİNEER ELASTİK KIRILMA MEKANİĞİ

Havacılıkta malzeme seçiminde ana kriter, genelde, en yüksek özgül mukavemet (akma mukavemeti/özgül ağırlık) olarak tanımlanabilir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları başta olmak üzere, titanyum alaşımları ve yüksek mukavemetli çelikler uçak, helikopter ve uzay araçlarının yapımında öncelikle kullanım bulmaktadır. Lineer elastik kırılma mekaniği bu malzeme grupları için yeterli bir yaklaşımdır [18]. Bu bölümde lineer elastik kırılma mekaniği parametreleri açıklanmıştır.

#### 3.1. Çatlak Ucuna Etkiyen Gerilmeler

$2a$  uzunluğunda çatlak içeren sonsuz büyüklükte bir plakanın,  $dx$   $dy$  elemanı için, çatlak ucu orijin olmak üzere, çatlak ucundan  $r$  mesafede ve çatlak düzlemine göre  $\theta$  açısında, normal gerilmeler ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) ve kayma gerilmeleri ( $\tau_{xy}, \tau_{yx}$ ) Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Çatlak ucu koordinat eksenleri [19]

Aynı plakayı,  $\sigma$  çekme gerilmesinin etkilediği göz önüne alınırsa, çatlak ucundan  $r$  mesafede,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  ve  $\tau_{xy}$  değerleri, Eşitlik 3.1, 3.2 ve 3.3 ile hesaplanabilir [20].

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.2)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.3)$$

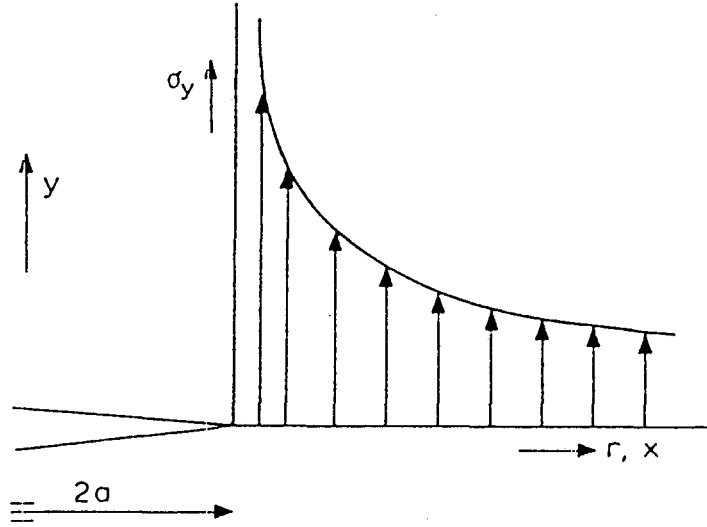
$$\sigma_z = 0 \quad (\text{düzlemsel gerilme}) \quad (3.4)$$

$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{düzlem deformasyon}) \quad (3.5)$$

burada,  $\nu$ =Poisson oranıdır.

Elastik durumda, çatlak ucundaki gerilmeler, dışarıdan uygulanan  $\sigma$  gerilmesiyle orantılıdır, çatlak boyunun karekökü ile değişir ve  $r$ 'nin çok küçük olduğu yerde, yani çatlak ucunda sonsuza,  $r$ 'nin büyük değerleri için ise  $\sigma_y$  sifira yaklaşma eğilimindedir. Eşitlik 3.1, 3.2 ve 3.3 sadece çatlak ucu civarında geçerlidir. Eşitliklerin her biri bir serinin ilk terimlerini temsil eder, diğer terimler ilk terimlerle kıyaslandığında küçük olduğundan ihmal edilebilir ve ilk terimler çatlak ucundaki gerilme alanının tanımında kullanılır [21].

Şekil 3.2'de çatlak ucundaki  $\sigma_y$  elastik gerilmesinin  $r$  mesafesi ile değişimi görülmektedir [22]. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, çatlak ucunda  $\sigma_y$  gerilmesi sonsuza gitme eğilimindedir, çatlak ucundan uzaklaştıkça  $\sigma_y$  gerilmesi düşer ve sifira yaklaşma eğilimindedir.



Şekil 3.2 Çatlak ucundaki  $\sigma_y$  elastik gerilmesi [23]

### 3.2. Gerilme Şiddet Faktörü

Irwin [24] tarafından, çatlak ucu orijin olmak üzere, kutupsal ekseninde, çatlak ucundaki gerilme, Eşitlik 3.6 ile gösterilmiştir.

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (3.6)$$

Burada K, elastik gerilme alanının büyüklüğünü veren bir sabittir ve gerilme şiddet faktörü olarak adlandırılır. Gerilme şiddeti faktörü, Eşitlik 3.7'de görüldüğü gibi, uygulanan gerilmenin ve çatlağın boyunun fonksiyonudur.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.7)$$

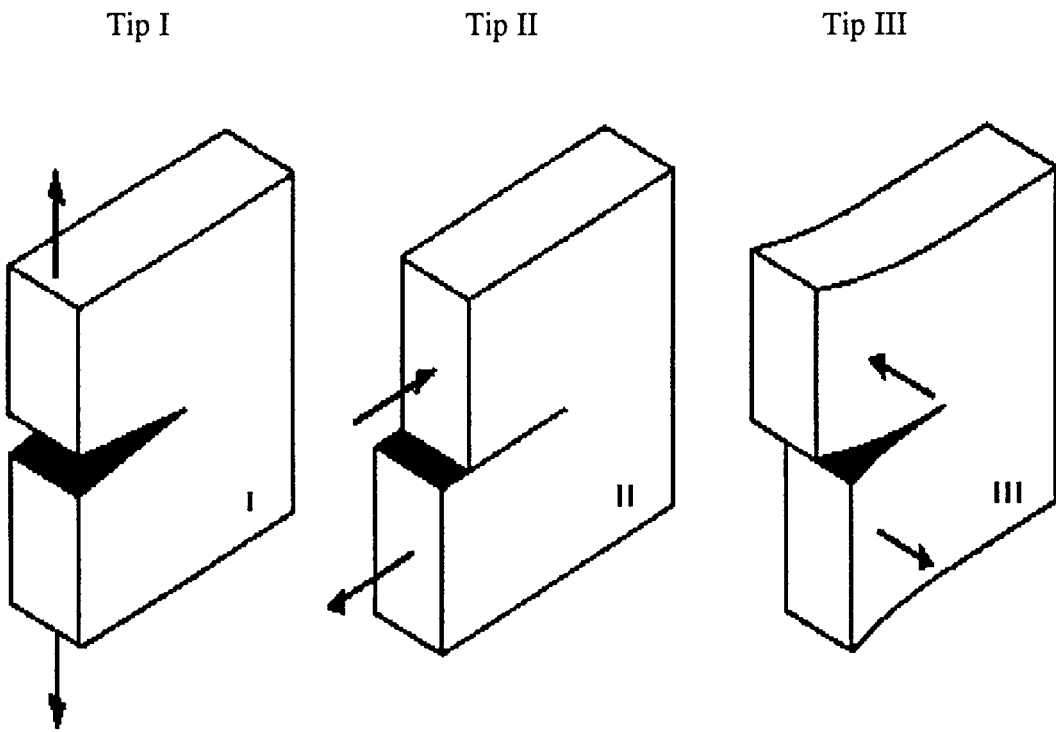
Gerilme şiddet faktörü, tüm gerilme ve deformasyonlar için bir ölçüdür. Çatlak ilerlemesi, çatlak ucundaki gerilme ve deformasyonlar kritik bir değere ulaştığında, yani K değeri, kritik değer ( $K_c$ )'ye ulaştığında kırılma meydana

gelecektir. Kırılma yükünden kırılma gerilmesi ( $\sigma_c$ ) hesaplanabilir ve gerilme şiddet faktörünün kritik değeri,

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (3.8)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Buradan hesaplanan  $K_c$  değerleri ile, aynı malzemedeki herhangi boyuttaki çatlakın kırılma mukavemeti hesaplanabilir ya da verilen bir gerilme değeri için kabul edilebilecek çatlak boyutu hesaplanabilir. Bu kritik  $K_c$  değeri, kırılma tokluğunun bir göstergesi olup, malzemenin özelliklerine bağlıdır.

Kırılma tokluğu ölçülürken, üç model kullanılmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Kırılma şekilleri [25]

- I. Tip kırılma şeklinde normal bileşen çatlak yüzüne dik olarak Y eksenine doğrultusunda,

- II. Tip kırılma şeklinde gerilme kayma bileşeni çatlğa X eksenine doğrultusunda,
- III. Tip kırılma şeklinde ise, gerilmenin kayma bileşeni çatlğa Z eksenine doğrultusunda, çatlğın dip kenarına paralel olacak şekilde etkimektedir.

Kritik gerilme şiddet faktörü, malzeme sabiti olmasına rağmen yüklemeye tipine göre değişiklik gösterir ve gerilme şiddet faktöründe yüklemeye şekli indis olarak yazılır.

Gerilme şiddet faktörünün hesaplanması için verilen Eşitlik 3.7 ve 3.8 sonsuz boyuttaki levhalar içindir. Sonsuz genişlikli levhalarda, çatlğın boyu levhanın veya plakanın boyu ile karşılaştırıldığında, çatlğın boyu çok küçüktür ve bu yüzden çatlak ucu sınırları dış sınırlardan etkilenmez.

Çatlak boyunun artmasıyla veya levha boyutlarının azalmasıyla dış sınır şartları çatlak ucuna etki eder [26]. Çatlak boyunun, plaka genişliğine oranı,  $(a/w)$ , gerilme yığılmasını doğrudan etkileyen bir faktördür ve hesaplamalarda gözönüne alınmaktadır (Eşitlik 3.9).

$$K_{I, II, III} = C \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'da, C geometriye ve yüklemeye şekline bağlı bir sabittir. Her iki yönden çatlak başlamış, R yarıçaplı delik içeren W genişliğinde,  $\frac{a}{R+a} > 0.3$ , uzun çatlak içeren bir parça için,  $K_I$ 'nin çözümü, Eşitlik 3.10'da verilmiştir [25].

$$K_I = C \sigma \sqrt{\pi(R+a)} \quad (3.10)$$

Burada;

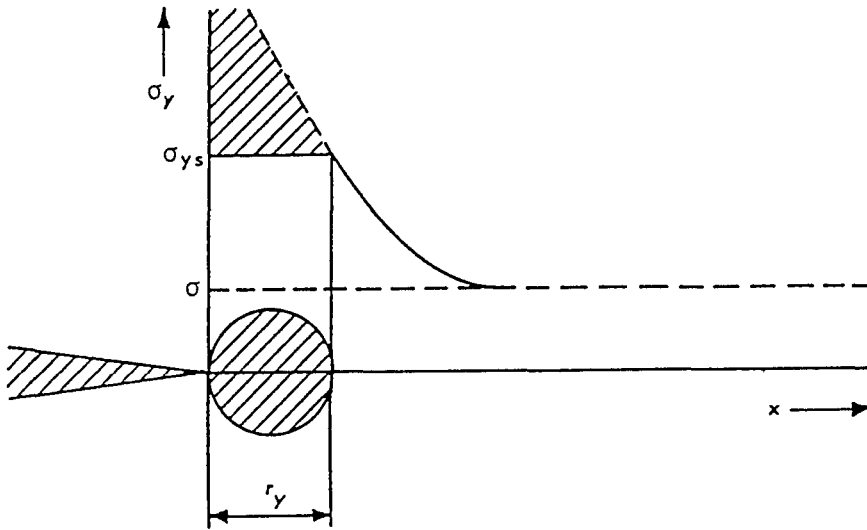
$$C = 1 + 0.256 \left(\frac{a}{W}\right) - 1.152 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 12.200 \left(\frac{a}{W}\right)^3$$

ile bulunulabileceği belirtilmiştir.

### 3.3. Çatlak Ucu Plastisitesi

Malzemeler, özellikle metaller, akma gerilmesinin üzerinde plastik şekil değiştirirler. Eşitlik 3.6'da verilen elastik çözüme göre, çatlak ucunda gerilmeler sonsuzdur. Gerçekte ise böyle değildir, çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyon gerilmeyi sınırlı tutar. Çatlak ucunda plastik deformasyon meydana geldiğinde lineer elastik kırılma mekaniğinde bazı düzeltmeler söz konusudur.

Çatlak ucu plastik deformasyon bölgesinin tayini için mevcut yöntemlerden birisi Irwin yaklaşımı olup, bu yaklaşımda plastik bölge için bazı düzeltmeler söz konusudur. Şekil 3.4'de,  $\theta=0$  düzleminde, ilk yaklaşıma göre plastik bölgenin gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4. Çatlak ucundaki plastik bölgenin ilk yaklaşıma göre gösterimi [27]

Bu konuda yapılan ilk çalışmalara göre, plastik bölgenin boyutu  $r_y$ 'dir. Normal gerilme ( $\sigma_y$ ) yerine akma gerilmesi ( $\sigma_{ys}$ ) yazılarak,  $r_y$  belirlenebilir.

$$\sigma_y = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.11)$$



$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.11 ve 3.12 sadece elastik çözüm içindir. Oysa akma söz konusu olduğunda gerilmelerin dağılımının tekrar gözden geçirilmesi gerekir. Şekil 3.4'deki taralı bölge elastik bir malzemedeki kuvvetleri göstermektedir. Gerilme akma gerilmesini aşamayacağından, bu bölge elastik-plastik malzemeye taşınmaz. Kuvvetleri dengeli hale getirmek için plastik bölgenin boyutunu büyütme gerekmektedir. Akma gerilmesi üzerindeki taralı alan kadar bir bölgenin, çatlak ucunda, akma gerilmesinin altındaki bir alanla temsil edilmesinden yola çıkılarak yapılan hesaplama ile bulunan plastik bölge boyutunun iki kat daha büyük olduğu görülür.

$$r_y = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.13)$$

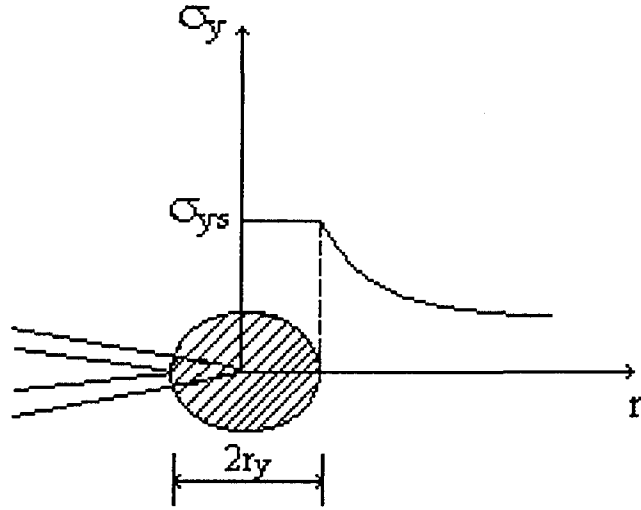
Irwin'e [28] göre, çatlak ucundaki plastik bölge, çatlağı fiziksel boyutundan daha büyükmüş gibi davranmasına neden olur. Diğer bir deyişle, plaka daha büyük boyutta çatlak içeriyormuş gibi davranmaktadır. Etkili çatlak boyu ( $a_{eff}$ ), çatlak boyu ile plastik bölge boyutunun toplamına eşittir.

$$a_{eff} = a + r_y \quad (3.14)$$

$r_y$ 'nin değeri, düzlem gerilme için Eşitlik 3.12 ifadesiyle verilmişti. Düzlem deformasyonda  $r_y$  değeri üçe bölünerek küçültülür.

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.15)$$

Plastik bölgenin dairesel bir şekilde olduğu kabul edilir ise, efektif çatlak boyunun plastik bölgenin merkezine kadar uzadığı Şekil 3.5'de görülmektedir.



Şekil 3.5. Irwin plastik bölge düzeltmesi [27]

Eğer plastik bölge için düzeltme yapılırsa, K içinde bir düzeltme gerekli olur. Efektif gerilme şiddeti faktörünün ( $K_{eff}$ ) elde edilişi mevcut K formülündeki a'ların yerine  $a_{eff}$  konularak bulunur.

$$K_{eff} = C (a_{eff}) \sigma \sqrt{\pi a_{eff}} \quad (3.16)$$

### 3.3.1. Plastik Bölgenin Şekli

Çatlak ucundaki plastik bölgenin şekli akma kriteri kullanılarak hesaplanabilir. Akma gerilmesi, Von Mises [25] ifadesine göre,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_{ys}^2 \quad (3.17)$$

eşitliği ile yazılır. Burada,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  normal gerilmelerdir. Eşitlik 3.1, 3.2, 3.4 ve 3.5'den

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2}\right) \quad (3.18)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2}\right) \quad (3.19)$$

$$\sigma_3 = 0 \text{ (düzlemsel gerilme )} \quad (3.20)$$

$$\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \text{ (düzlemsel deformasyon)} \quad (3.21)$$

yazılabilir. Normal gerilme değerleri Eşitlik 3.17'de yerine yazılırsa,

$$\frac{K_I^2}{2\pi r} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta\right) = 2\sigma_{ys}^2 \quad (3.22)$$

veya,

$$r(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}}\right)^2 \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta\right) \quad (3.23)$$

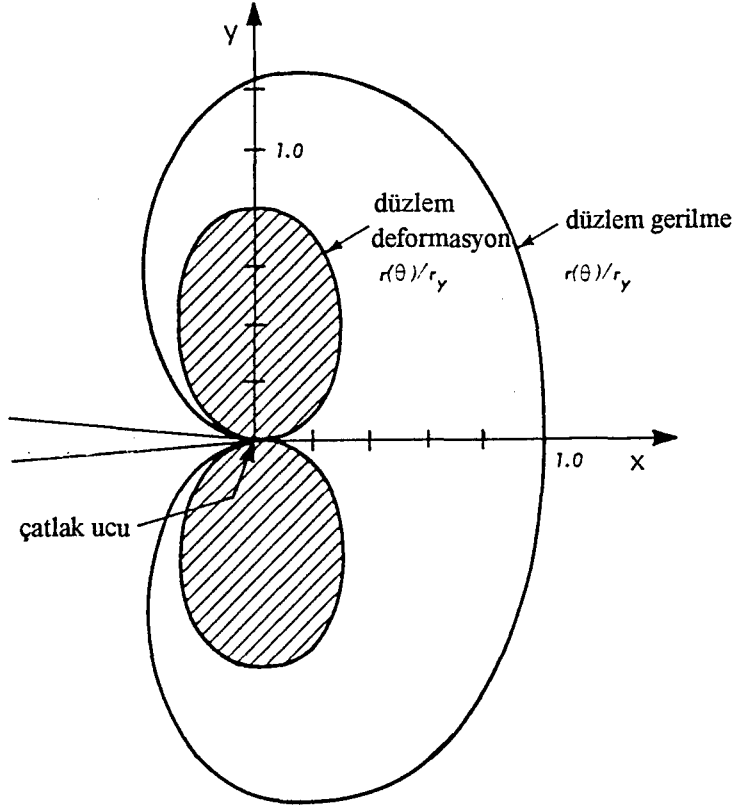
bulunur.

Eşitlik 3.23, eşitlik 3.12'de verilen  $r_y$  ile bölünerek boyutsuz hale getirilebilir.

$$\frac{r(\theta)}{r_y} \text{ düzlem gerilme} = \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \cos \theta \quad (3.24)$$

$$\frac{r(\theta)}{r_y} \text{ düzlem deformasyon} = \frac{3}{4} \sin^2 \theta + \frac{1}{2} (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta) \quad (3.25)$$

x eksenini boyunca ( $\theta = 0$ ),  $r(\theta)$ 'nin düzlem deformasyon değeri, düzlem gerilme değerinden daha küçüktür. Şekil 3.6'da boyutsuz formda düzlem gerilme ve düzlem deformasyon plastik bölgelerinin şekli görülmektedir.

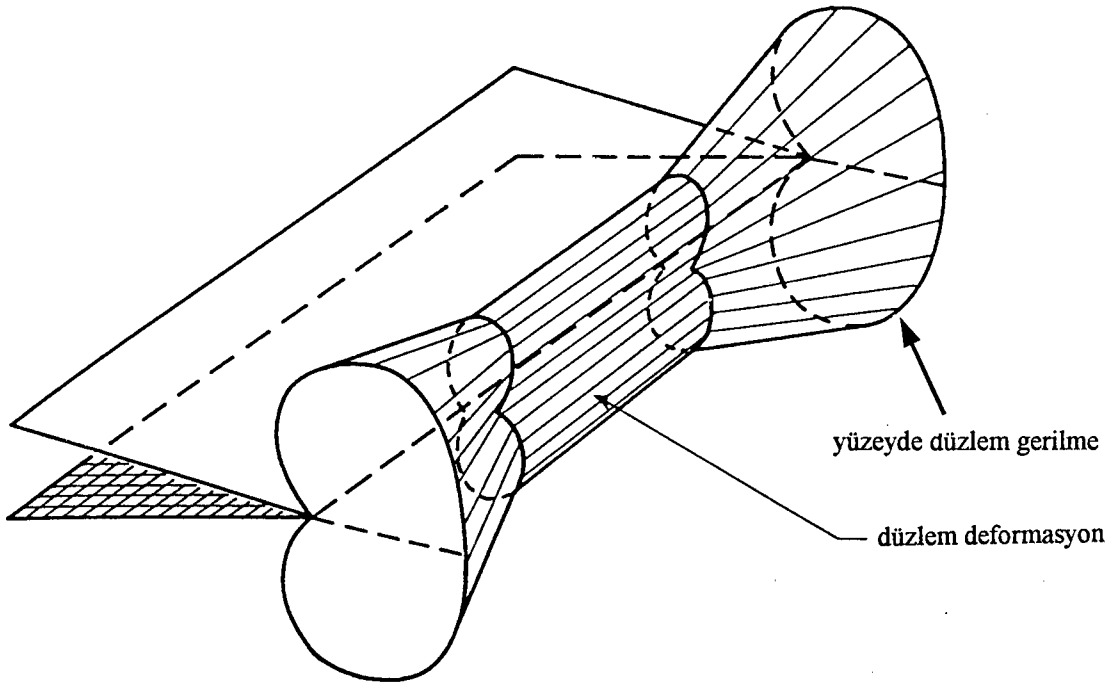


Şekil 3.6. Von Mises akma kriterine göre boyutsuz plastik bölge şekilleri [25]

### 3.3.2. Malzeme Boyutlarının Etkisi

Çatlak ucunda düzlemsel deformasyon şartlarına ulaşmak için plastik bölgenin malzeme kalınlığına göre daha küçük olması gerekmektedir. İnce malzemeler söz konusu olduğunda, plastik bölgenin, kalınlığa oranı bire yaklaştığında, düzlemsel gerilme oluşabilir. Kalınlık boyunca büyük bir kısımda

düzlem deformasyon şartlarının oluşması için, bu oranın belirgin olarak birden küçük olması gerekir. Plastik bölgenin boyutu,  $\frac{K_I^2}{\sigma_{ys}^2}$  ile orantılıdır. Yüksek gerilme şiddeti ve düşük akma gerilmesi sonucu büyük plastik bölge oluşur. Plastik bölge boyu, malzemenin kalınlığı boyunca değişir, malzemenin iç kısımlarına gidildikçe düzlemsel deformasyon oluşsa bile yüzeyinde düzlemsel gerilme görülebilir, bu değişim Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7.Orta kalınlıkta bir plakada kesit boyunca plastik bölge değişimi [29]

#### 4. YORULMA KIRILMALARI

Yorulma olayında çatlaklar genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak, çevrimsel gerilme, çekme gerilmesi ve plastik deformasyonun eş zamanlı etkisiyle oluşur [30]. Eğer bunlardan herhangi biri olmazsa yorulma çatlağı başlamayacak ve ilerlemeyecektir. Çevrimsel gerilme ve deformasyon çatlağı başlatır, çekme gerilmesi çatlak ilerlemesi meydana getirir.

Kırılmanın safhaları ;

- Çatlağın başlaması,
- Çatlağın kritik uzunluğa kadar ilerlemesi ve
- Kırılma

şeklindedir.

##### 4.1. Yorulma Çatlak Başlangıcı ve İlerlemesi

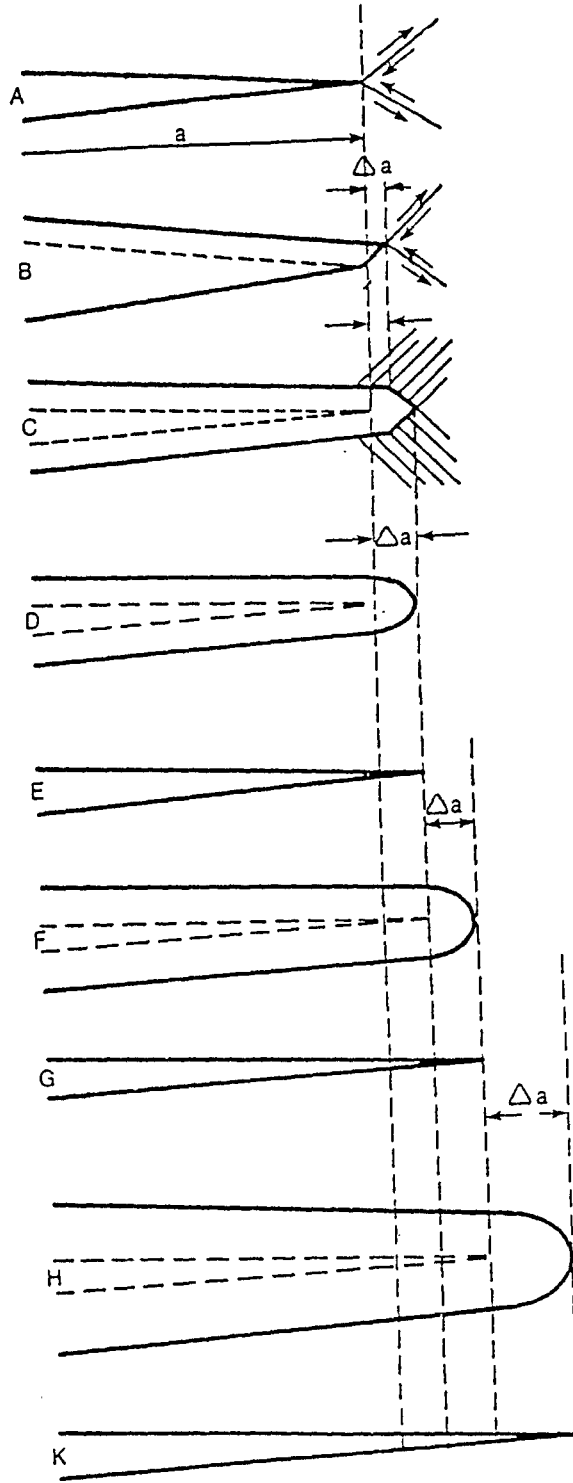
Parçaların kırılma yüzeyleri incelendiğinde çatlak başlangıç bölgesi I. bölge olarak adlandırılır. Bu bölge, çatlak başlangıcını ve çatlağın gerilme eksenine göre yaklaşık 45° eğimle ilerlemesini içerir. Bu bölgede çatlak ilerleme hızı çok düşüktür ve orjinden itibaren birkaç tane boyutunu geçmez, yorulma çizgileri yoktur ve karakteristik özellik olarak düz yüzey oluşur. Bazı durumlarda I. Bölge malzemeye, çevre ve gerilme seviyesine bağlı olarak farkedilmeyebilir [31].

Yorulma çatlakları genelde, malzemenin yapısal hataları veya kesit değişimi nedeniyle gerilme yığılmalarının en büyük olduğu yerde başlar ve ilerler. Kayma nedeniyle parçanın yüzeyinde oluşan girintiler, çıkıntılar dışında tane sınırları veya metalik olmayan kalıntılar gibi noktalardan da çatlak başlayabilir [32].

Parçaya uygulanan gerilmeler elastik sınırın altında olsa bile, bölgesel gerilmeler, gerilme yığılmalarına bağlı olarak akma gerilmesinin üzerindedir. Sonuç olarak plastik deformasyon mikro boyutta bölgesel olarak meydana gelir. Bölgesel plastik deformasyon nedeniyle, yorulma çatlak başlangıcı Wood [33] tarafından açıklanmıştır. Çevrimde kayma, yükün arttığı kısımda, yönlendirilmiş kayma düzleminde meydana gelir. Yükün azaldığı kısımda ise kayma, ilk düzlem üzerinde yeni yaratılmış yüzeyin oksitlenmesi ve deformasyon sertleşmesi nedeniyle engellendiğinden, ilk düzleme paralel kayma düzleminde ve ters yönde meydana gelir. İlk çevrimsel kayma, metal yüzeyinde girinti veya çıkıntılarının oluşmasına yol açabilir. Bir girintide, sonraki çevrim sırasında plastik akışın devam etmesiyle çatlak oluşabilir. Çatlak ucunda kayma, en büyük kayma gerilmesi yönündeki kayma düzleminde meydana gelir (Şekil 4.1.aşama A ve B). Kaymaya bağlı olarak çatlak açılırken çatlak boyu da artar. Bundan sonra kayma diğer düzlem üzerinde meydana gelir (Şekil 4.1.aşama C). Deformasyon sertleşmesi ve artan gerilme diğer kayma düzlemlerini aktif hale getirir ve bu da çatlak ucunun körelmesine yol açar (Şekil 4.1.aşama D). Çevrimin yükün arttığı kısmında çatlak  $\Delta a$  kadar ilerler.

Plastik deformasyon, elastik bölge tarafından çevrelenmiş, küçük bir bölgede meydana gelir. Elastik bölgede, deformasyonun ortadan kalkması, çevrimin yükün azaldığı kısmında, plastik bölge üzerine basma gerilmesi uygulanarak sağlanabilir. Bu uygulanan basma gerilmesi, çatlak ucunda akma gerilmesinin üzerinde olacaktır, bu nedenle çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyon, çatlak ucunun kapanmasına neden olur. Uygulanan yükün boşalmasına bağlı olarak çatlak tekrar keskinleşir (Şekil 4.1.aşama E). Diğer aşamalarda uygulanan yüke bağlı olarak çatlak benzer şekilde körelir veya keskinleşir (Şekil 4.1. aşama F, G, H, K).

Çatlağın çevrimsel olarak açılma ve kapanması (Şekil 4.1.aşama A-E ), parçanın kırılma yüzeyinde elektron mikroskobu ile görülebilen ve yorulma çizgileri diye adlandırılan karakteristik çizgilerin oluşmasına neden olur. Yorulma çizgileri II. bölgedeki çatlak ilerlemesini karakterize eden yorulma yüzey özellikleridir [34,35].



Şekil 4.1. Çatlak ilerleme aşamaları [22]



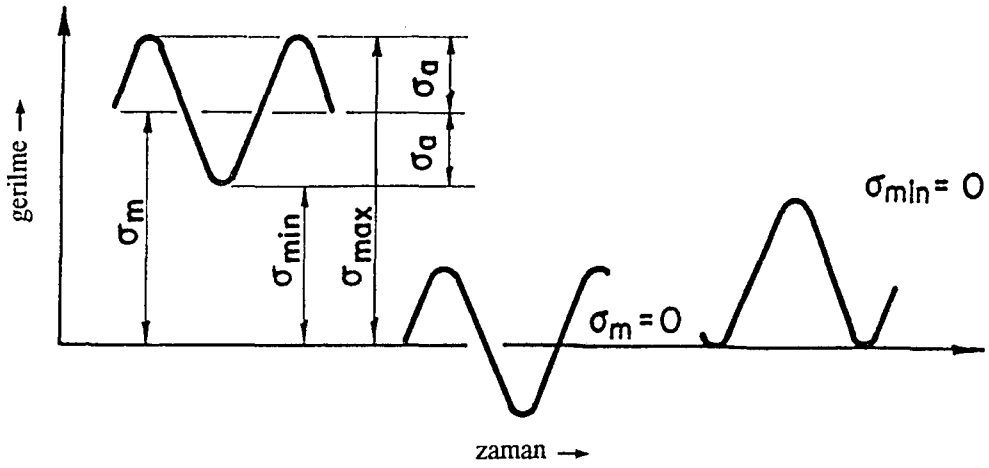
Yorulma çizgileri ortam, yükleme şekline bağlı olarak yorulma çatlağının ilerlemesini karakterize ederler. Bu bölgedeki çatlak ilerlemesinde çatlak yayılması her çevrim için mikrometre mertebesine ulaşır [32].

Yorulma çizgileri, çatlak ilerleme yönüne diktir ve birbirlerine paraleldirler. Genelde, uniform yükleme ile, yorulma başlangıç noktasından uzaklaştıkça, yorulma çizgileri arasındaki mesafe artar [36]. Her yorulma çizgisi, tek bir gerilme çevriminin sonucudur, fakat her gerilme çevrimi yorulma çizgisi oluşturmayabilir. Yorulma çizgileri arasındaki mesafe, çatlak ilerleme hızına dolayısıyla da uygulanan yükün büyüklüğüne bağlıdır [37]. Yorulma çizgilerinin görünürlüğü ise, malzemenin sünekliğine bağlıdır. Yorulma çizgileri, yorulma limitinden daha büyük gerilme seviyesinde ve sünek malzemelerde daha görünürdür. Alüminyum alaşımlarında diğer malzemelere göre daha belirgin yorulma çizgileri görülür [38]. Yüksek çatlak ilerleme hızında (çevrim başına 0,0025mm çatlak büyümesi) yorulma çizgileri dalgalı hale gelir ve pürüzlü yüzey oluşur. Çatlak ucundaki geniş plastik bölge ve mikroyapısal özellikler ikincil çatlakların uzamasına neden olabilir, her ikincil çatlak, yorulma çatlağı gibi ilerler ve ikincil yorulma çizgiler ağı oluşturur. Bölgesel olarak, ikincil çatlak ilerleme yönü belirgin olarak farklı olabilir [30].

III. bölge olarak adlandırılan son bölge, kalan kesit uygulanan yükü taşıyamadığında meydana gelir [32].

#### **4.2. Sabit Genlikli Yorulma**

Laboratuvarında yapılan çoğu yorulma testinde gerilmeler, çekme-çekme, çekme-basma veya basma-basma şeklinde uygulanabilir. Şekil 4.2'de sabit genlikli yorulma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Sabit genlikli yorulmanın şematik gösterimi [5]

Uygulanan gerilmelerde üç parametre tanımlanmıştır [39]:

*Ortalama gerilme* ( $\sigma_m$ ), bir çevrimdeki en büyük ve en küçük gerilmenin aritmetik ortalamasıdır.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4.1)$$

$\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$  olduğunda, ortalama gerilme sıfırdır.

*Gerilme aralığı* ( $\Delta\sigma$ ), bir çevrimdeki en büyük ve en küçük gerilme arasındaki farktır.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4.2)$$

*Gerilme genliği* ( $\sigma_a$ ), gerilme aralığının yarısıdır.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (4.3)$$

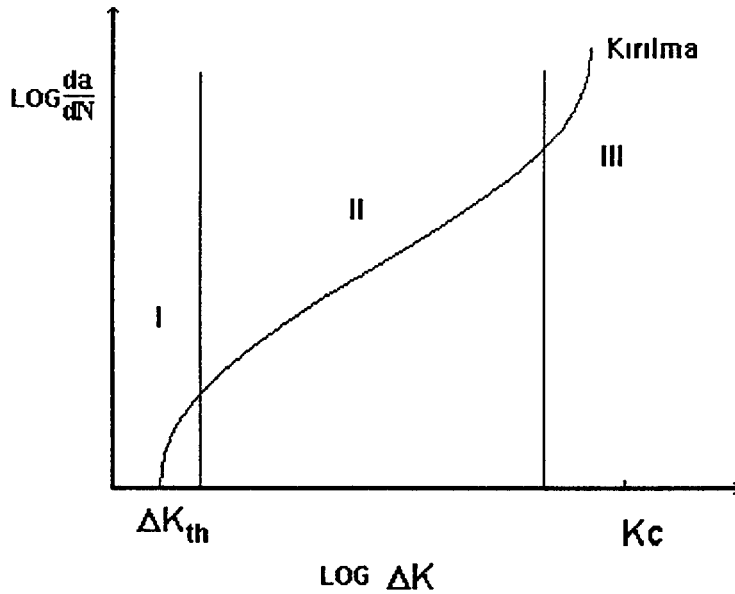
*Gerilme oranı (R)*, Bir çevrimde en küçük gerilmenin en büyük gerilmeye oranıdır.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4.4)$$

Eğer, gerilmeler birbirine eşit ve ters işaretli ise,  $R=-1$ , gerilmeler birbirinden farklı büyüklükte ve ters işaretli ise,  $R$  birden küçük ve negatif hale gelir. Eğer gerilme, en büyük yük ve sıfır yük arasında çevrim yaparsa  $R$  oranı sıfır olur. Çevrim iki çekme gerilmesi arasında ise  $R$  oranı pozitif ve 1'den küçüktür.

Çevrimsel yükleme altında, yorulma çatlak ilerlemesi en büyük yük ve gerilme oranı tarafından kontrol edilir. Buna rağmen, çatlak başlangıcında olduğu gibi çok sayıda ilave faktör (çevre, frekans, sıcaklık ve mikroyapısal faktörler) çatlak ilerlemesinde etkilidir.

Şekil 4.3'de, sabit genlikli çevrim altında, çentikli bir numunenin  $da/dN$  ile  $\Delta K$  değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Metal malzemelerde görülen tipik çatlak ilerleme hızı [40]

Bu grafik üç ayrı bölümden oluşmaktadır:

I. bölgede gerilme şiddet faktörünün bir alt sınırı vardır ( $\Delta K_{th}$ ). Bu sınır değer, gerilme şiddet aralığının yavaş çatlak büyümesine neden olan en küçük

düzeyi olarak yorumlanır. Gerilme şiddet aralığının bu sınır değeri aşmadığı durumlarda çatlaklar büyümeyecek veya büyüme hızları ihmal edilebilir düzeyde kalacaktır.

II. bölgede,  $da/dN$  ile  $\Delta K$ 'nın değişimi doğrusaldır.

III. bölgede grafik, büyük  $\Delta K$  değerlerindeki doğrusal olmayan özellik gösterir.  $K_{max}$ ,  $K_{crit}$  değerine yaklaştığında çatlak ilerleme hızı artar.

Çevrim başına çatlak ilerleme oranının gerilme şiddet faktörü ile gösterimi ilk olarak Paris, Gomez ve Anderson [41], tarafından gerçekleştirilmiş ve çatlak ilerleme hızı Eşitlik 4.5'de gösterilmiştir.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (4.5)$$

burada;

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

C ve m malzeme sabitleri olup deneysel olarak tayin edilmektedirler. Paris kanunu adı verilen ve II. bölgede geçerli olan Eşitlik 4.5'e göre, çatlak ilerleme hızı sadece  $\Delta K$ 'ya bağlıdır. Denklemden verilen m değeri malzeme çeşidine göre 2-7 arasında bir değer alır. Eğer  $K_{max}$  veya  $K_{min}$  tekrarlı yüklemeye sırasında değişkenlik gösteriyorsa her tekrarda  $K_{max}$  ve  $K_{min}$  değerlerinin çatlak boyuna etkisi gözönüne alınır. Forman [42] Şekil 4.2'de verilen eğrinin II. ve III. bölgeleri için;

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K^m}{(1-R) K_{crit} - \Delta K} \quad (4.6)$$

bağıntı geliştirmiştir. Aynı denklem,

$$\frac{da}{dN} = \frac{C\Delta K^{m-1}}{\frac{K_{crit}}{K_{max}} - 1} \quad (4.7)$$

şeklinde de yazılabilir.

Eşitlik 4.7'den anlaşılacağı üzere  $K_{max}$  değerine yaklaştıkça çatlak ilerleme hızı sonsuza gider. Forman [42] denklemlerindeki  $C$  ve  $m$  katsayıları Paris kanunundaki değerlerden farklıdır. Paris kanunu olarak bilinen eşitlik yorulma çatlak ilerlemesi tayininde Şekil 4.3'deki eğrinin sadece II. bölgesinde doğru sonuçlar vermektedir. Ancak sözkonusu eğrinin her iki ucundaki bölgede eğri  $R$  oranına bağlılık göstermektedir.

Klesnil ve Lucas [43], Paris kanununu,

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (4.8)$$

eşitliğine dönüştürmüşlerdir. Bu ifadede ise  $\Delta K_{th}$  genelde  $R$  oranına bağlı olmaktadır.

$da/dN$  oranı üzerine  $R$ 'nin etkisini incelemek üzere birçok deneysel eşitlik kullanılmıştır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanlardan bir tanesi de aşağıda verilen Walker eşitliğidir [44].

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1}{(1-R)^{m_1(1-\gamma)}} (\Delta K)^{m_1} \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.5'deki  $C$  ve  $m$  sabitleri,

$$C = \frac{C_1}{(1-R)^{m_1(1-\gamma)}}, \quad m=m_1 \text{ olmaktadır.}$$

2024-T3 alüminyum alaşımı için Walker eşitliğindeki  $C_1$ ,  $m_1$  ve  $\gamma$  değerleri:

$$C_1 = 1.42 \times 10^{-8} \quad m_1 = 3.59 \quad \gamma = 0.68 \text{ (} R \geq 0 \text{ için)'} \text{ dir [44].}$$

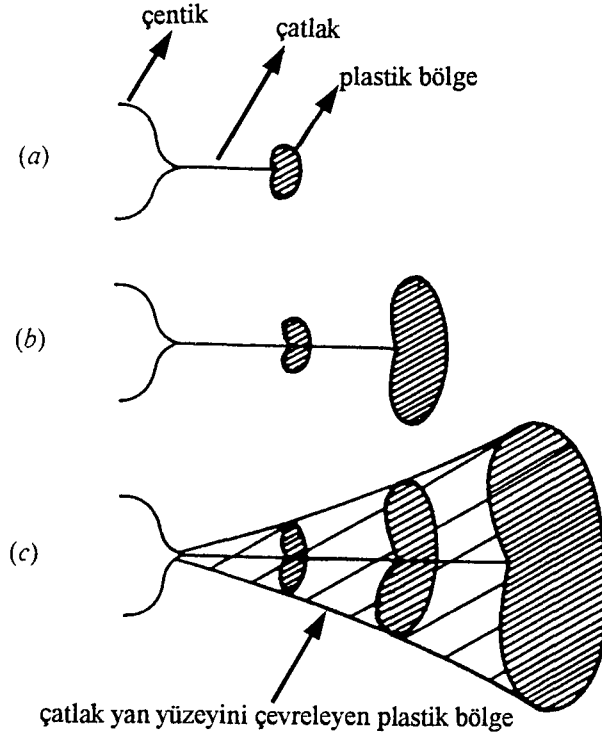
#### 4.2.1. Gerilme Oranı ve Çatlak Ucu Plastisitesinin Etkisi, Çatlak Kapanması

Paris Kanunu olarak bilinen, Eşitlik 4.5, yorulma çatlak ilerlemesinde kabul görmesine rağmen bu ifade her zaman uygulanabilir değildir. Şekil 4.3'de gösterilen  $da/dN-\Delta K$  logaritmik gösteriminin doğrusal olan kısmında bu ifadeye göre doğru sonuçlar elde edilmektedir. Ancak söz konusu eğrinin her iki ucundaki bölgede eğri R oranına bağlı olarak değişmektedir. Bir yorulma çevriminde R'nin çatlak ilerleme davranışı üzerine belirgin etkisi vardır.

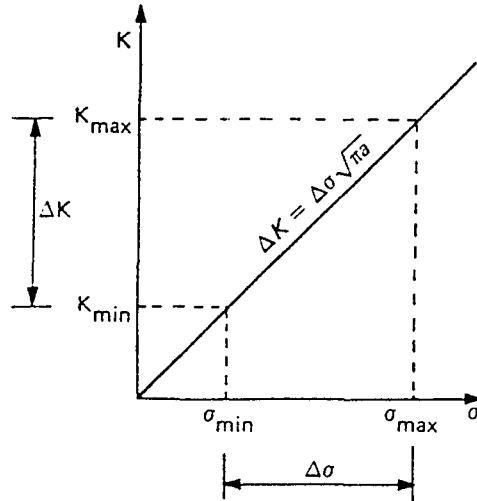
$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (4.10)$$

1970 yılında Elber [45], çatlak ilerleme oranı üzerine R'nin etkisini açıklamaya yardımcı olan çatlak kapanması olayını bulmuştur. Çatlak kapanması, çatlak ucu plastisitesinin bir sonucudur. Her yük çevriminde ve/veya yük arttığında, çatlak ucunda plastik bölge meydana gelir. Yükleme kalktığında ise, çatlak ucu civarındaki malzeme ters plastisite özelliği gösterir ve oluşan bu basma gerilmeleri plastik bölgeye sebep olur. Bu oluşan plastik bölge, çekme yükleri sırasında oluşan plastik bölgenin dörtte biri kadardır. Çatlak ilerlerken, kalıntı plastik deformasyon, çatlak yan yüzeyi boyunca oluşur [46]. Şekil 4.4'de bir çentik kenarında oluşmuş çatlağın ilerlemesiyle çatlak yan yüzeyi boyunca oluşan plastik bölge görülmektedir. Çatlak açıkken bu kalıntı deformasyon bölgesinin önemi yoktur fakat, yorulma yükü azaldığında çatlak kapanma eğilimi gösterecektir ve kalıntı deformasyon bölgesi önemli hale gelecektir. Şekil 4.5'de uygulanan gerilme, ile gerilme şiddet faktörünün değişimi görülmektedir.

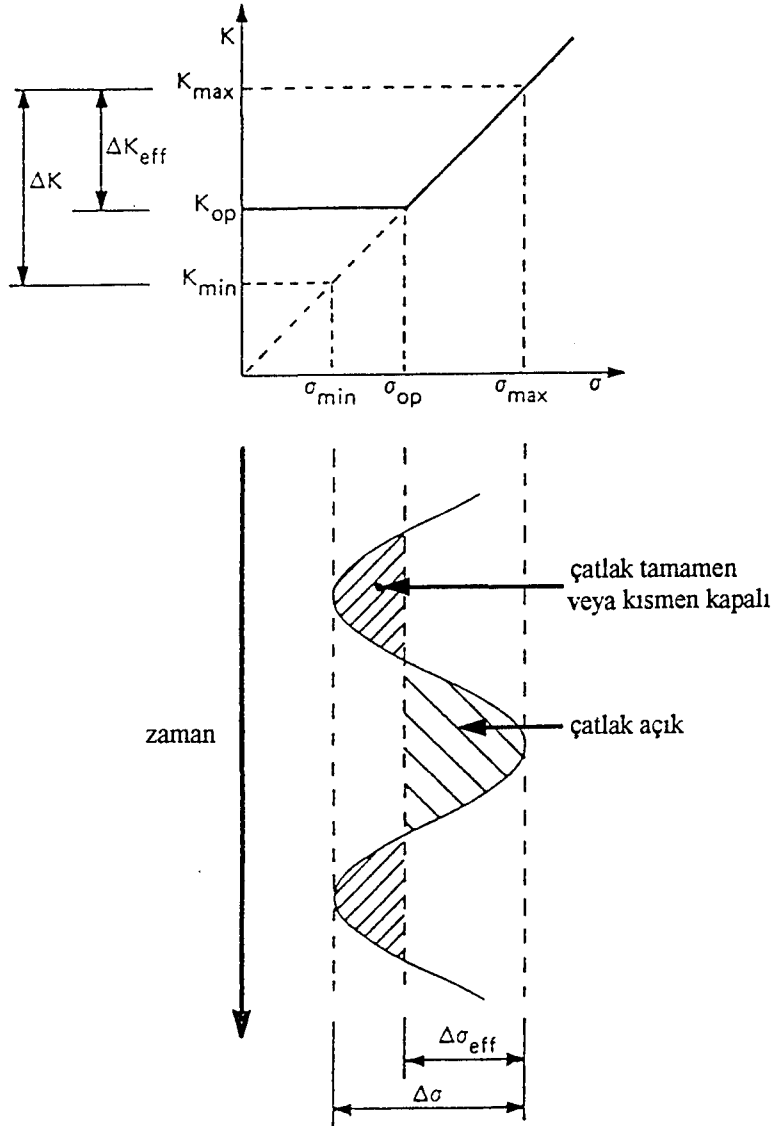
Yorulma çatlak ilerlemesinin meydana gelmesi için çatlağın tamamen açık olması gerekmektedir. Bu nedenle çatlağın tamamen açıldığı gerilme değeri,  $\sigma_{op}$  önemli bir kavramdır.  $\sigma_{max}-\sigma_{op}$  gerilme aralığından, efektif gerilme şiddet faktör aralığı,  $\Delta K_{eff}$  tanımlanabilir (Şekil 4.6).



Şekil 4.4 İlerleyen çatlak etrafında meydana gelen plastik bölgenin şematik gösterimi [29]



Şekil 4.5. Uygulanan gerilme ile gerilme şiddet faktörünün değişimi [25]



Şekil 4.5. Gerilme şiddet faktör değerlerinin çatlak kapanmasına etkisi [25]

Büyük R değerlerinde daha az çatlak kapanması meydana gelir.  $\Delta K_{eff}$  yaklaşık olarak  $\Delta K$ 'ya eşit hale gelir. Elber [45], çatlak ilerleme oranı üzerine R'nin etkisi için  $\Delta K_{eff}$  değerini içeren,

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{eff}) \quad (4.11)$$



eşitliğini yazmıştır.

Ayrıca efektif gerilme şiddet oranını,

$$\frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = U = 0.5 + 0.4R \quad (4.12)$$

olarak göstermiştir. Son olarak da, Paris ifadesini,

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{eff}^m \quad (4.13)$$

şeklinde geliştirmiştir. Bu ifade, değişik R oranlarında başarılı sonuçlar vermektedir.

### 4.3. Değişken Genlikli Yorulma

Yorulma yüklemesine maruz bir parçanın tasarımındaki en önemli adım, parçanın servis boyunca maruz kalacağı yüklemeyi belirlemektir. Her servis yüklemesi tipik işletim şartları altında oluşturulur (örneğin, bir parçanın kritik kısımlarına monte edilmiş gerilme-ölçerlerin çıktılarının incelenmesiyle). Parçanın maruz kaldığı servis yüklemesi ömür tahmini için uygulanabilir hale getirilir [11]. Değişken genlikli yüklemeye maruz yapılar için çok çeşitli örnekler vardır (söz gelimi, gaz türbinli motorlardaki kanatcıklar, düşük genlikte, yüksek frekansta titreşime ve motorun açılıp kapatılmasına bağlı olarak değişik çevrim sayısında yorulma yüklemelerine maruzdurlar). Bir yolcu uçağının kanat alt yüzeyi, yerde basma yüklerinin etkisindedir. Uçuş sırasında ise hava şartlarına bağlı olarak değişik büyüklükte çekme kuvvetleri altındadır [11].

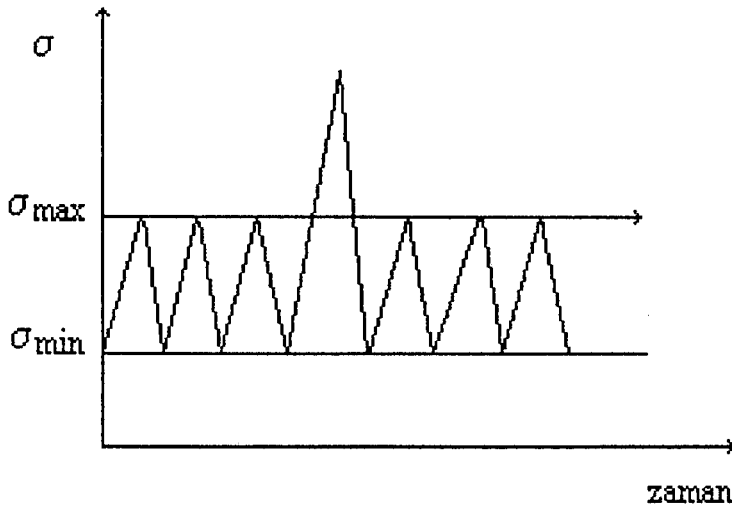
#### 4.3.1. Aşırı Yük Etkisi

Yapılar ömürleri boyunca çok çeşitli gerilmelere maruz kalırlar. Değişken genlikli yükleme altında yorulma çatlak ilerlemesi yüklerin birbirine etkimesi

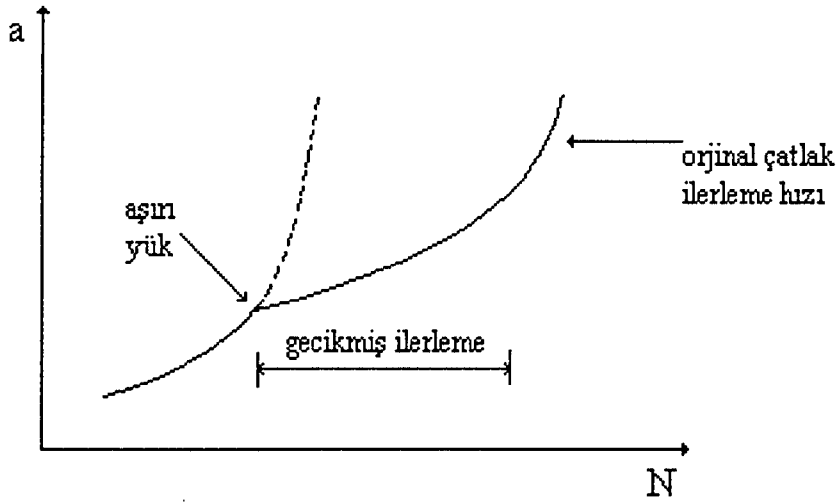
sonucu karmaşıktır. Örneğin, yükleme sırasında aşırı bir yük uygulanması çatlak ilerlemesinin gecikmesine yol açar. Genelde bu gecikme geçicidir ve aşırı yükün etkisinin azalması ile sabit genlikli yüklemedeki çatlak ilerleme oranına döner [47]. Gecikme etkisi değişken genlikli yüklerin uygulanma sırasına göre değişiklik gösterir. Yüksek genlikli yükten sonra düşük genlikli yükün uygulanması durumunda, çatlak ilerlemesi daha yavaş [48], düşük genlikli yükten sonra yüksek genlikli yükün uygulanması durumunda ise, çatlak ilerlemesi nispeten daha hızlı olacaktır [49].

#### 4.3.1.1. Tek Aşırı Yük Etkisi

Tek aşırı yük değişken genlikli yüklemenin en temel ve en basit gecikme durumunu temsil eder. Bir tek aşırı yük uygulanarak yapılan deneylerden değişik sonuçlar bulunmuştur, bazı deneylerde, uygulanan aşırı yükten sonra çatlak ilerleme hızının arttığı gözlenmiştir [50]. Genelde bulunan sonuç ise, sabit genlikli yükleme sırasında uygulanan bir aşırı yükün çatlak ilerleme hızını geciktirdiğidir. Bu geciktirme etkisi uygulanan yükün şiddetine bağlı olarak değişir. Aşırı yükün uygulanması ve aşırı yükün geciktirme etkisi sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Sabit genlikli yüklemeye uygulanan tek aşırı yük [51]



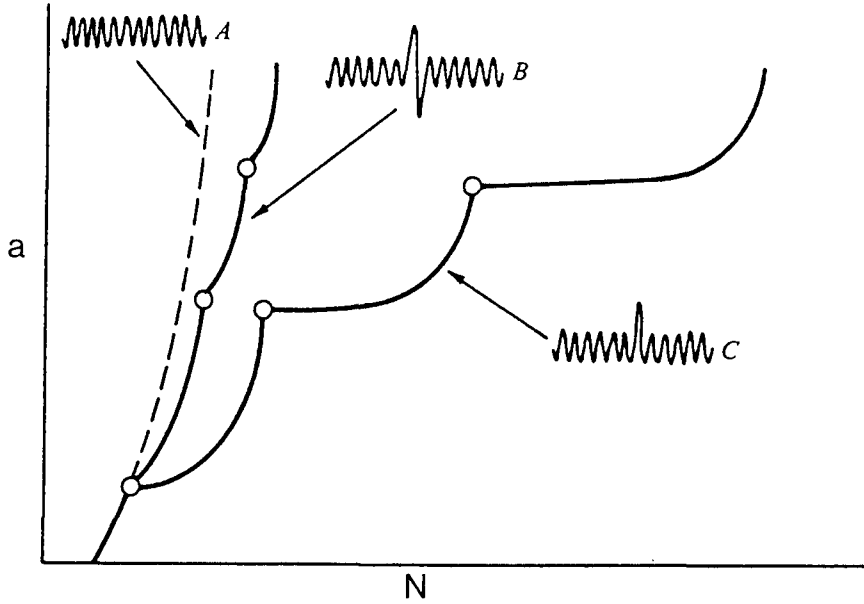
Şekil 4.8. Sabit genlikli yüklemeye sırasında uygulanan aşırı yükün çatlak ilerlemesini geciktirici etkisi [51]

Aşırı yüklemeye öncesi plastik bölgenin boyu olağan boyuna ulaşmıştır. Ancak, bu boy aşırı yüklemeye sonunda farkedilir bir büyüklüğe ulaşır. Çatlak ilerlemesindeki gecikme aşırı yükün büyüklüğüne bağlıdır. Yüksek genlikteki bir aşırı yük, çatlak ilerlemesini tamamen durdurabilir. Çatlakın durması malzemeye ve gerilme oranı  $R$ 'ye bağlıdır.

Tek bir aşırı yük uygulanarak yapılan deneyler sonunda, için aşağıdaki özellikler gözlenmiştir.

- 1- Aşırı yükün büyüklüğü gecikmeyi kontrol eden en etkili faktördür [52].
- 2- Daha düşük akma mukavemetine sahip malzemelerde aynı yük seviyesinde daha fazla gecikme ortaya çıkar [51].
- 3- Gecikme, kesit kalınlığı düşüldükçe artar [53].

Şekil 4.9'da sabit genlikli yükleme (A), tek çekme aşırı yükünün etkidiği değişken genlikli yükleme (C) ve çekme-basma aşırı yükünün etkidiği değişken genlikli yüklemelerde (B) çatlak ilerlemesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Sabit ve değişken genlikli yüklerin çatlak ilerleme hızına etkisi [29]

Eğer, çekme aşırı yükünü takiben basma aşırı yükü uygulanırsa, çekme aşırı yükü sonucu beklenen gecikmenin etkisi kısmen yok olur. Negatif yükler, pozitif aşırı yük tarafından geliştirilen kalıntı gerilmeyi yok edebilir, böylece pozitif aşırı yükün faydalı etkisi azalabilir. Çatlak ilerleme hızı, sabit genlikli yükleme durumundaki hıza yakındır. Basma aşırı yükü, çekme aşırı yükünden önce uygulanırsa basma yüklemesiyle çatlak ucunda farklılık oluşmaz ve çekme aşırı yükü tek başına etkir ve ilerlemeyi geciktirir [54].

#### 4.3.1.2. Periyodik Olarak Uygulanan Aşırı Yükler

Eğer tek bir aşırı yük periyodik olarak uygulandığında gecikme, aşırı yükler arasındaki etkileşmeye bağlıdır. Eğer bu aşırı yükler birbirinden oldukça uzakta uygulanırsa, her biri farklı olaylar gibi etkirler. Yükler arasındaki mesafeler uygun

alındığında, periyodik olarak uygulanan aşırı yükler, tek aşırı yükten daha fazla geciktirme meydana getirirler. Vardar ve Tür [55], 2024-T3 alaşımı ile yaptıkları deneylerde,  $\Delta K = 13MPa\sqrt{m}$  değerinde sabit genlikli yüklemelerde çatlak ilerleme oranını çevrim başına 0,245  $\mu m$  bulmuşlardır. Periyodik aşırı yük uyguladıklarında, çatlak ilerleme oranı çevrim başına 0,100  $\mu m$ 'ye düşer ve bu oranın kademeli olarak çevrim başına 0,080-0,050  $\mu m$ 'ye düştüğünü görmüşlerdir. Periyodik aşırı yüke zıt yönde uygulanan aşırı yük, basma yükü olmasa bile, çatlak ilerlemesinin hızlanmasına yol açar. Daha sık aralıklarla uygulanan zıt yönlü aşırı yükler çatlak ilerlemesinin daha çok hızlanmasına yol açarlar. Bunun sonucunda, uçakların da yer-hava-yer çevrimi fazla olduğunda, yorulma ömrü daha kısa olacaktır.

#### 4.3.2. Değişken Genlikli Yük Bloklarının Etkisi

Değişken genlikli yorulma çalışmalarında en önemli yükleme şekli değişik yük bloklarını içermektedir. Çatlak ilerlemesindeki geçici bir artış, düşük genlikli yükleme bloğunu takiben yüksek genlikli yüklemenin başlangıç safhası olabilir. Yüksek-düşük genlikli yükleme ile R oranı veya  $\Delta K$ 'daki azalışa bağlı olarak  $K_{max}$ 'daki ani düşüş çatlak ilerlemesinin gecikmesine veya tamamen durmasına neden olur.

Blok yükleme ile yükleme etkileri hızlanma faktörü  $\gamma$  ile gösterilir [29].

$$\gamma = \frac{(da/dn)_{s,exp}}{(da/dn)_{s,p}} \quad (4.14)$$

$(da/dn)_{s,exp}$  blok yükleme başına deneysel olarak ölçülen çatlak ilerleme oranı ve  $(da/dn)_{s,p}$  sabit genlikte çatlak ilerlemelerinin toplamıdır.

Eğer,  $\gamma = 1$  ise etkileşim yoktur,  
 $\gamma > 1$  ise yüklemeye bağlı çatlak ilerlemesi hızlanmıştır,  
 $\gamma < 1$  ise gecikme vardır.

### 4.3.3. Yorulma Ömrüne Etki Eden Faktörler

#### 4.3.3.1. Metalurjik Faktörlerin Etkisi

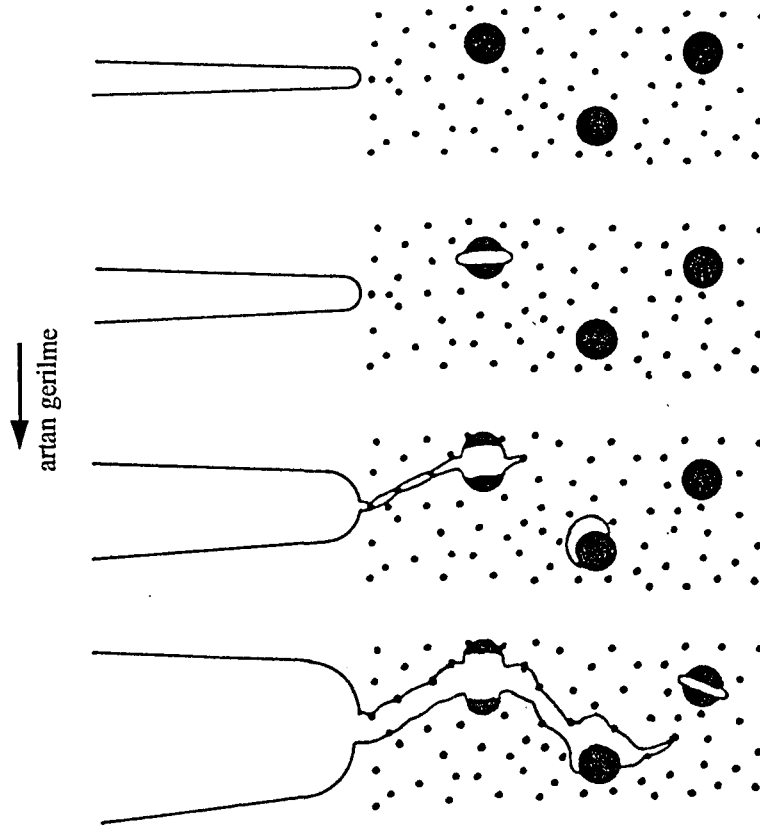
Metalurjik faktörler; döküm şekli, sıcak ve soğuk şekil verme, fazların dağılımı, gibi faktörlerdir. Gerek ısı ve gerekse mekanik işlemler, metal ve alaşımların iç gerilmelerinin dağılımı, kristal yapısı, dislokasyonların hareketi, vb üzerine etki ederek mekanik özelliklerde değişmelere sebep olmaktadır. Isıl işlemler, haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri sonucunda metallerin tane boyut ve şekli değişmektedir. Tane boyutunun küçülmesi, yorulma mukavemetini artırmaktadır.

Mühendislik malzemelerinin bir çoğu kalıntı içerirler. Bu kalıntılar da malzemenin yorulma dayanımını etkilerler [56]. Ayrıca, bu kalıntılar genelde kırılmalıdır ve etrafını çevreleyen matris gibi kolay şekil değiştiremediklerinden dolayı etraflarında plastik akış meydana geldiğinde matrisle bağlarını kaybederler [57]. Sonuçta küçük boşluklar oluşur, bu boşluklar düzensiz şekle sahiptir Bu boşlukların şekilleri uygulanan gerilmeye ve mikroskopta bakış açısına bağlı olarak değişir [36].

Mikro boşlukların başlama, ilerleme ve birleşme mekanizması karakteristik kırılma özelliğini ortaya çıkarır (Şekil 4.9). Bu kalıntılar, malzemenin sünekliğini düşürür ve gerilme yığılmasına neden olurlar [58,59,60].

Kalıntıların boyutu ve aralarındaki mesafe kırılma tokluğunu büyük ölçüde etkiler [61]. Büyük kalıntılar büyük boşlukların oluşmasına neden olur, bu yüzden kalıntıların büyük ve aralarındaki mesafenin az olması oldukça zararlıdır [62].

Uygulanan yüksek gerilme nedeniyle, çatlak ucundaki büyük kalıntılarda mikro boşluk oluşur ve kalıntılar arasında çatlak ilerleme hızı artar [63,64].



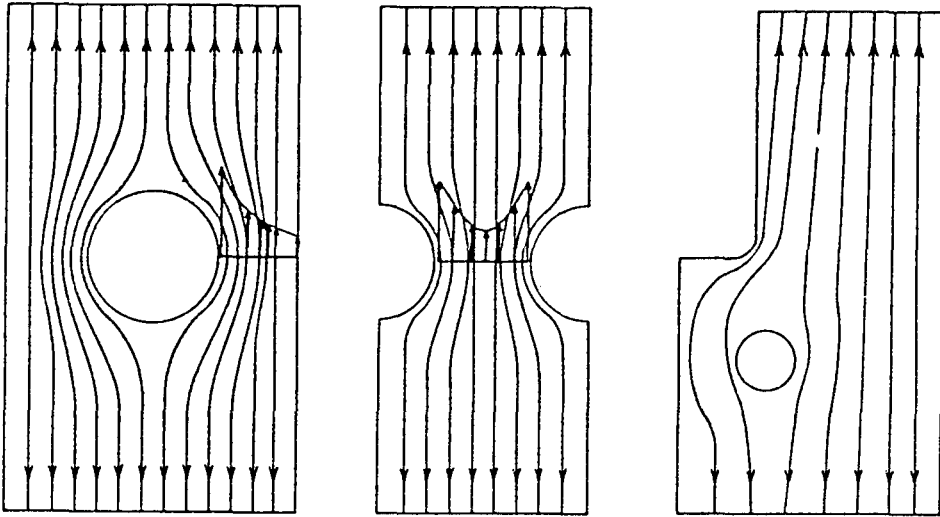
Şekil 4.10 Mikroboşlukların birleşmesi ile çatlak ilerlemesinin şematik gösterimi [27]

#### 4.3.3.2. Yüzeyin Etkisi

Bir çok mühendislik parçasının yorulma mukavemeti yüzey durumu ve yüzey işlemleri tarafından etkilenir. Yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ile yorulma ömrünün artışı arasında doğru orantılı bir bağıntı vardır. Gerilmenin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde en büyük olması, yüzeyin plastik şekil değiştirmeye karşı direncinin iç kısımdan daha düşük olması, yorulmanın yüzeyden başlamasının nedenidir [65].

#### 4.3.3.3. Geometrik Faktör: Çentik Etkisi

Parça tasarımında, geometrik süreksizlikler kaçınılmazdır ve bölgesel olarak gerilmelerin artmasına neden olurlar. Geometrik süreksizlikler, genel olarak çentik diye adlandırılır ve yük akış çizgilerini sapmasına neden olurlar (Şekil 4.11). Yapı içerisinde yük akışının kesilmesine neden olan her süreksizlik gerilme yığılmasına neden olur. Bu bölgesel olarak artan gerilmeler, ortalama gerilmeden daha büyüktür.



Şekil 4.11. Çatlak boyunca yük çizgileri ve gerilme konsantrasyonunun değişimi [22]

Yuvarlak bir çentiğin keskin bir çentiğe göre gerilme yığılması daha fazla alana yayılmıştır ve şiddeti daha düşüktür. Çentikleri karakterize etmede elastik gerilme konsantrasyon faktörü  $k_t$  kullanılır. Bu değer en büyük bölgesel gerilmenin, nominal (ortalama) gerilmeye oranıdır.

$$k_t = \frac{\sigma_l}{\sigma_{ort}} \quad (4.15)$$



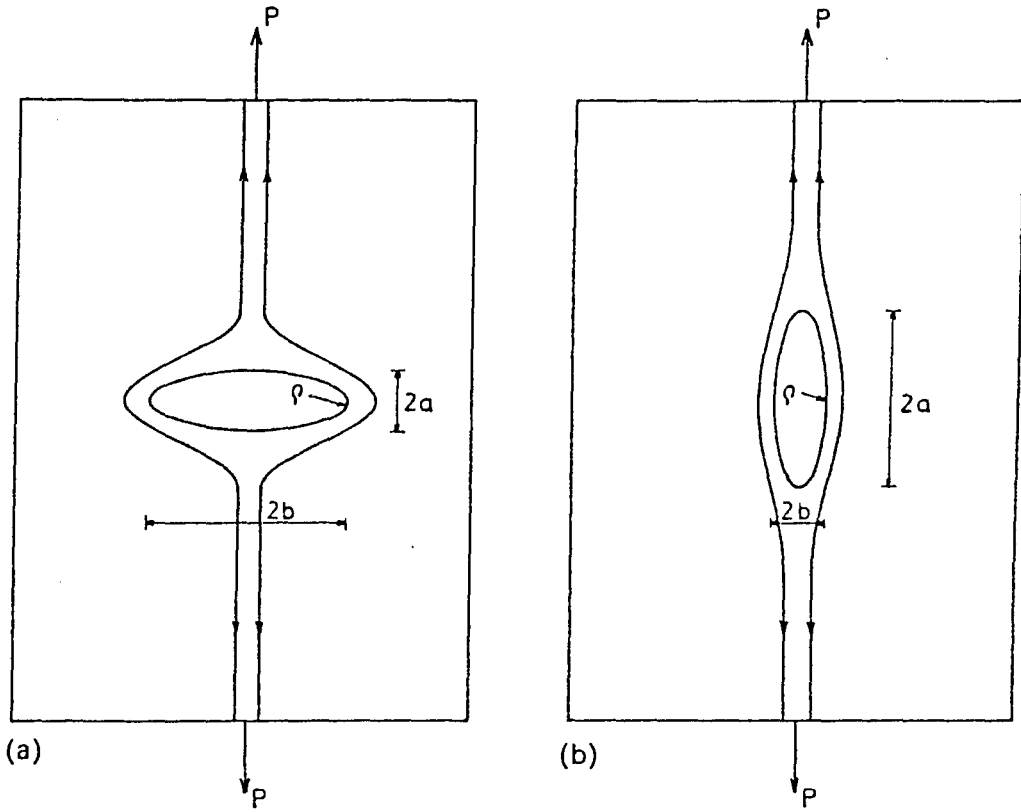
Sonsuz genişlikteki bir plakadaki elips ve daire için (Şekil 4.12) elastik gerilme şiddet faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [22].

$$k_t = 1 + 2\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.16)$$

a=deliğin genişliği

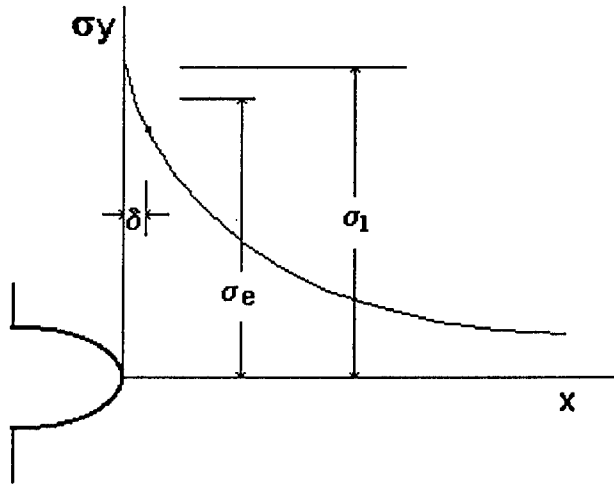
b=deliğin yüksekliği

Eşitlik 4.16'ya göre dairesel delik için a=b olduğundan,  $k_t = 3$ 'dür.



Şekil 4.12. Elips şeklinde çentikler: (a) yüksek ve (b) düşük gerilme şiddet faktörü [22]

Uzun yorulma ömürlerinde, yorulma çentik faktörü tanımlanır ve  $k_f$  ile gösterilir,  $k_f$  düz numunenin mukavemetinin, çentikli numunenin mukavemetine oranıdır. Eğer çentik yarıçapı ( $\rho$ ) büyükse,  $k_f = k_t$  olabilir. Bununla beraber, küçük  $\rho$  değerleri için  $k_f$  belirgin olarak  $k_t$ 'den küçüktür. Çentikli numunedeki gerilme, çentikten uzaklaştıkça, mesafe artışı ile hızla düşer. Gerilme dağılımının  $d\sigma/dx$  eğimi, gerilmenin  $x$ 'e bağlı olarak düşmesini gösterir.  $k_f < k_t$  etkisi gerilmenin çentikten itibaren düşmesi ile ilgilidir. Gerilmenin hızla düşmesine bağlı olarak tanımlanan bölgenin boyutu  $\delta$  ile gösterilebilir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Çentikten  $\delta$  sonlu mesafesi dışında ortalama gerilme [44]

Yorulma hasarının kontrolleri, en büyük gerilme değerinde,  $x=0$ 'da değil,  $x= \delta$  mesafesinin dışında, ortalama bir mesafede yapılır ve ortalama gerilme ( $\sigma_e$ ) değeri alınır.

Eşitlik 4.17'de çentik etkisi ile ilgili diğer bir kavram,  $q$  çentik hassasiyeti verilmiştir.

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad (4.17)$$

Çentik en büyük hassasiyete sahipse,  $k_f = k_t$ 'dir ve  $q = 1$ 'dir.  $k_f < k_t$  ise  $q$ 'nun değeri düşer.  $k_f = 1$  değerinde ise, çentik etkisi sıfırdır ( $q = 0$ ).

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalarda, çatlak ilerleme hızının farklı çevrim sayılarında uygulanan aşırı yükler altında gösterdiği değişim incelenmiştir. Öncelikle malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre sabit ve değişken genlikli deneyler yapılmıştır. Sabit genlikli deneylerde alınan değerler elastik bölgede olacak şekilde ve değişken genlikli deneylerde alınan değerler plastik bölgede olacak şekilde seçilmiştir. Numunelerin kırılmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda incelenmiş ve analizler yapılmıştır.

### 5.1. Kullanılan Malzeme

Deneylerde kullanılan 2024 alüminyum alaşımı, piyasadan T3 ısıl işlemi görmüş olarak plaka halinde temin edilmiştir. Çizelge 5.1'de 2024 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi verilmiştir. Bu alaşımın bileşiminde alüminyumun yanı sıra ana element olarak bakır ve manganez bulunmaktadır.

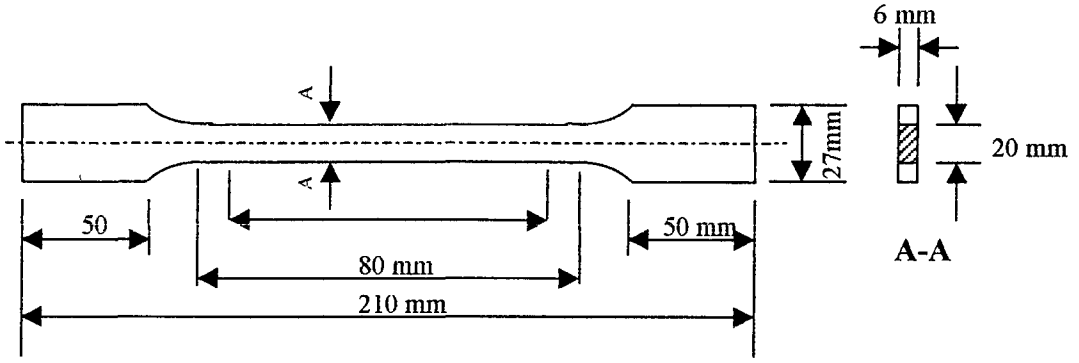
Çizelge 5.1. 2024 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% Ağırlık)

Cu	Mn	Mg	Fe	Si	Zn	Ti	Cr
3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,5	0,25	0,15	0,1

### 5.2. Deney Numuneleri

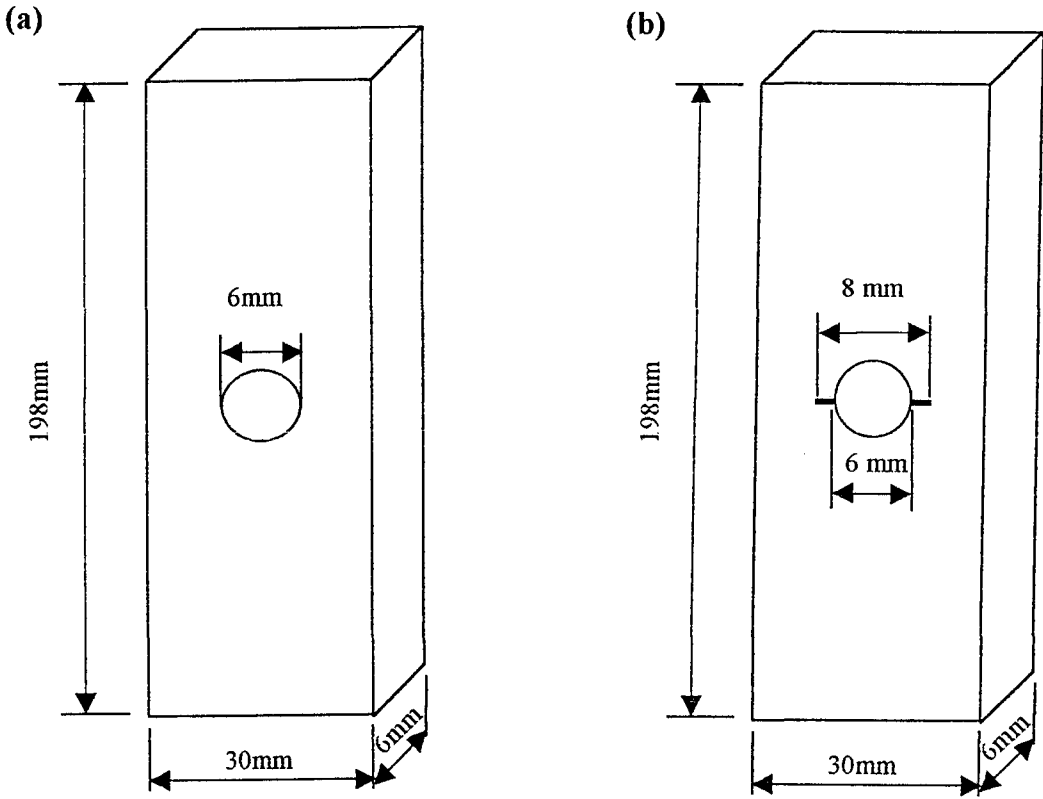
Plaka halindeki alüminyum alaşımı, eksantrik makasla kesildikten sonra, istenilen numune ölçüleri için freze tezgahında işlenmiştir.

Çekme numunelerinin ölçüleri, TSE 138'e göre hazırlanmıştır ve deney numunelerinin şematik gösterimi Şekil 5.1'dedir.



Şekil 5.1. Çekme deney numunesinin şematik gösterimi

$R=0,1$  ve  $R=0,5$  oranlarında yapılan yorulma deneylerinde kullanılan numuneler, 198 mm uzunluğunda, 30 mm genişliğinde, 6 mm kalınlığındadır ve merkezde 6 mm çapında bir delik içermektedir (Şekil 5.2),  $R=0,5$  oranında yapılan yorulma deneylerinde kullanılan numunelerde ise merkezdeki delik kenarlarında ayrıca 1 mm uzunluğunda çatlak oluşturulmuştur.



Şekil 5.2. (a) Delikli ve (b) delik kenarında çentikli yorulma numunelerinin şematik gösterimi

### 5.3. Kullanılan Cihazlar

Malzemenin, soğuk işlem yönünün belirlenmesi amacıyla değişik yönlerde kesilip soğuk kalıba alınan numuneler zımparalanıp, parlatılmış ve Keller dağlayıcısı ile dağlanmıştır. Keller dağlayıcısı; 2 ml HNO<sub>3</sub>, 1,5 ml HCl, 1 ml HF, 95 ml saf su içermektedir.

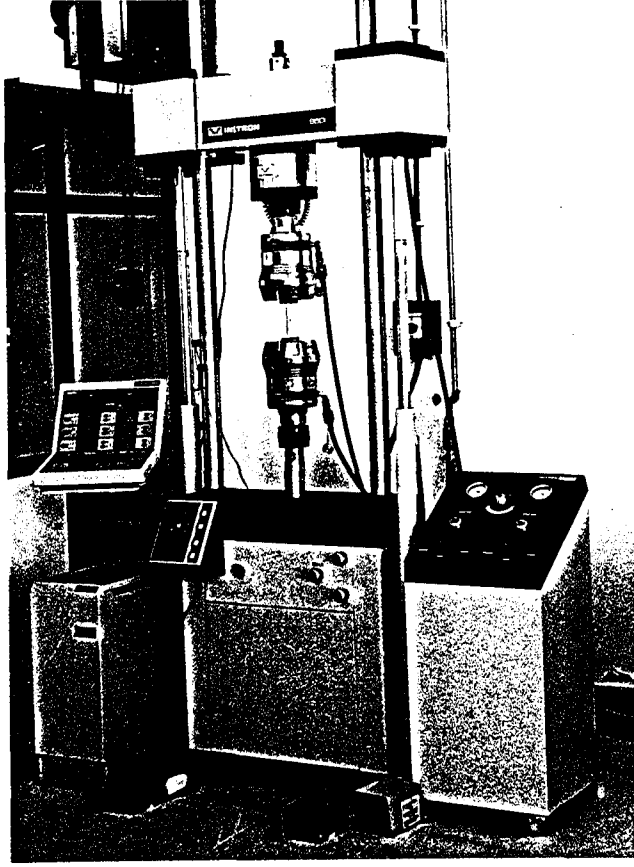
Dağlanan numuneler optik mikroskopta (Olympus BHM 60M) incelenerek fotoğrafları çekilmiştir.

Çekme deneyleri, 200 kN statik, 100 kN dinamik yük kapasiteli, bilgisayar kumandalı, Instron (8500 model) test cihazında (Şekil 5.3) yapılmıştır. Deneylerin yapımında Series IX paket programı kullanılmıştır. Bu programa, çekme hızı, numune boyutları, çekme çeneleri arasındaki mesafe, ortam sıcaklığı, nem oranı verileri girilerek, deney sonunda akma dayanımı, çekme dayanımı gibi istenilen mekanik özellikler program tarafından hesaplanmaktadır.

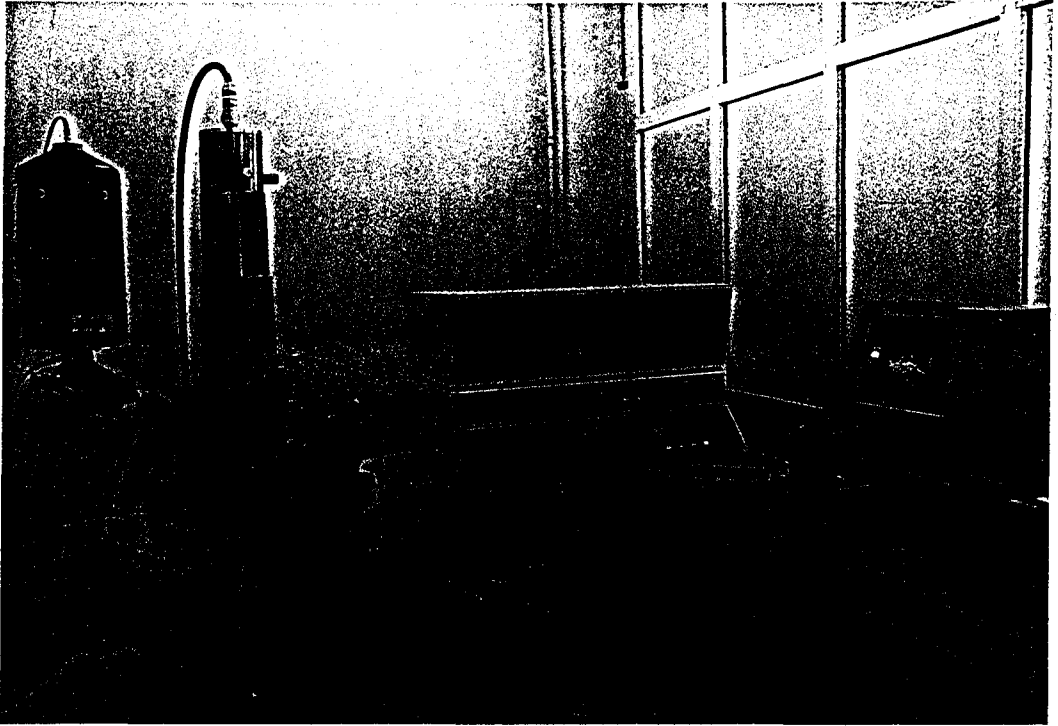
Yorulma deneyleri, Instron test cihazında, MAX paket programı kullanılarak yapılmıştır. Bu programla deneyler, ortalama yük değeri, genlik, frekans ve çevrim sayısı verileri girilerek yapılmaktadır. Sabit genlikli yorulma deneylerinin yanı sıra değişken genlikli deneylerde yapılabilmektedir.

Yorulma deney numunelerinde, delik kenarlarında çatlak oluşturulmasında Electro-Discharge Machining (EDM) kullanılmıştır. Deney sırasındaki çatlak ilerlemesi optik mikroskopla ölçülmüştür.

Yorulma deneyleri sonucunda kopan parçaların kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda (SEM-CamScan 4) incelenmiştir (Şekil 5.4). Kimyasal analizler aynı mikroskopta, enerji saçılımlı X-ışınları spektrometresi (EDX-Link ISIS 300) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3. Çekme ve yorulma deneylerinin yapıldığı INSTRON cihazı



Şekil 5.4. Kimyasal analiz cihazı ile donatılmış taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX)

## 5.4. Yapılan Deneyler

### 5.4.1. Çekme Deneyleri

Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme deneyleri 1mm/dk çekme hızında yapılmıştır ve deneylerde altı tane numune kullanılmıştır.

### 5.4.2. Yorulma Deneyleri

#### 5.4.3. Sabit Genlikli Yorulma Deneyleri

Sabit genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük sinüs eğrisi şeklindedir ve deneyler numuneler kopuncaya kadar devam ettirilmiştir.  $R=0,1$  oranında, 10 Hz frekans değerinde yapılan sabit genlikli yorulma deneylerinde Şekil 5.5’de gösterildiği gibi maksimum yük 30 kN, yük genliği 13,5 kN, alınmıştır.  $R=0,5$  oranında, 10 Hz frekans değerinde yapılan sabit genlikli yorulma deneylerinde Şekil 5.6’da gösterildiği gibi maksimum yük 30 kN, yük genliği 7,5 kN, alınmıştır. Sabit genlikli deneylerde, her değişik yük oranı için altı tane numune kullanılmıştır. Deneylerde uygulanan yük değerleri ve çevrim sayıları Çizelge 5.1’de görülmektedir.

#### 5.4.4. Değişken Genlikli Yorulma Deneyleri

Değişken genlikli yorulma deneylerinde  $R=0,1$  oranında, 10 Hz frekans değerinde, Şekil 5.7’de gösterildiği gibi, ilk 10 çevrimde maksimum yük  $-1$  kN yük genliği 2 kN, sonraki 100 çevrimde ise maksimum yük 30 kN, yük genliği 13,5 kN alınmış ve yükleme alternatif olarak numuneler kopuncaya kadar devam etmiştir.

$R=0,1$  oranında periyodik olarak aşırı yük uygulanarak yapılan yorulma deneylerinde, Şekil 5.8’de görüldüğü gibi ilk 5000 çevrimde sabit genlikli yorulma değerleri alınmıştır, sonraki 100 çevrimde ise, maksimum yük 33 kN,

yük genliği 14,8 kN, alınmıştır.  $R=0,1$  oranında yapılan diğer deneylerde ise 5000 çevrim yerine 2500 ve 1200 çevrim değerleri uygulanmış yük değerleri değiştirilmemiştir. (Şekil 5.9 ve 10).

$R=0,5$  oranında yapılan diğer değişken genlikli yorulma deneyinde ise ilk 500 çevrimde, maksimum yük 30 kN, yük genliği 7,5 kN, alınmıştır, sonraki 50 çevrimde ise, maksimum yük 34 kN, yük genliği 8,5 kN, alınmıştır. Yükleme alternatif olarak deney numuneleri kopuncaya kadar devam ettirilmiştir. Deneyler sırasında uygulanan yükler Şekil 5.11'de görülmektedir.  $R=0,5$  oranında yapılan diğer deneylerde ise, 500 çevrim yerine 250 çevrim değeri uygulanmış, yük değerleri değiştirilmemiştir. Yükleme alternatif olarak deney numuneleri kopuncaya kadar devam ettirilmiştir. Deneyler sırasında uygulanan yükler Şekil 5.12'de görülmektedir. Değişken genlikli yorulma deneylerinde her değişik deney türü için altı tane numune kullanılmıştır. Deneylerde uygulanan yük değerleri ve çevrim sayıları Çizelge 5.2'de görülmektedir.

#### 5.4.5 Mikroyapı İncelemeleri

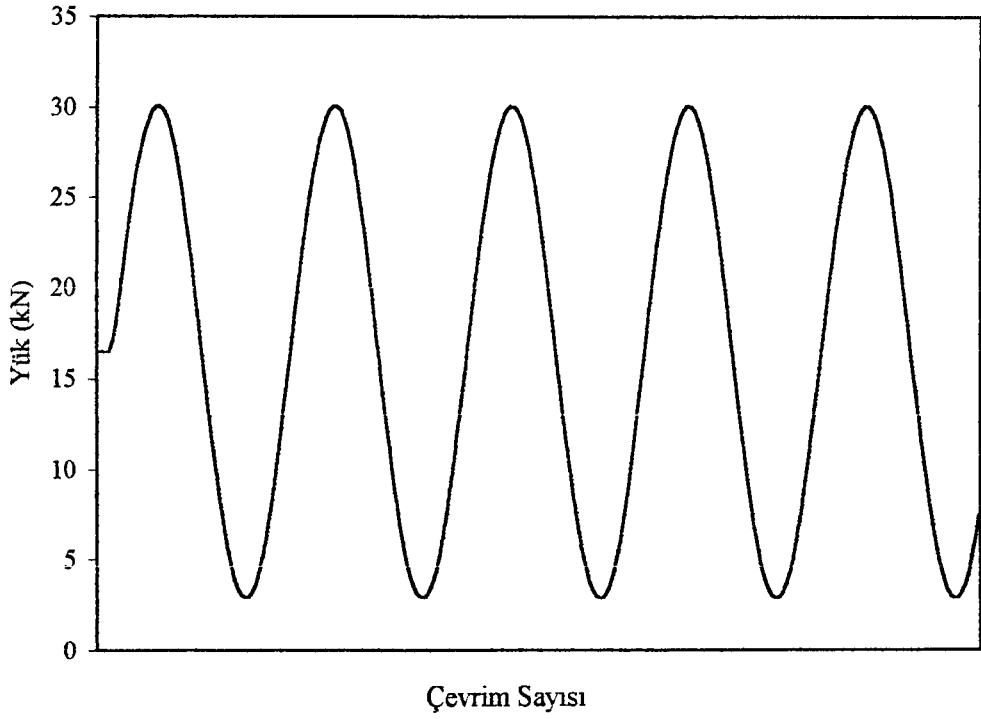
Alüminyum plakaların soğuk işlem yönü optik mikroskopta aydınlık alan tekniği ile üç farklı yönde incelenip değişik büyütme fotoğrafları çekilerek belirlendi.

Yorulma deneyleri sonucu kırılan numunelerin yüzeylerinin düz olmaması nedeniyle mikroyapı incelemeleri optik mikroskop yerine derinliğine görme yeteneği çok daha iyi olan taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Numuneler hiçbir yüzey işlemine tabi tutulmamış ve alüminyum iletken olduğu için yüzeyleri kaplanmamıştır. 20 kV hızlandırma voltajında ikincil elektron görüntü tekniği kullanılarak kırılmış yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir. Numunelerin farklı bölgelerinin kompozisyonunu belirlemek için kimyasal analizler SEM'e bağlı olan ve numune yüzeyine  $45^\circ$  eğim ile yerleştirilen enerji saçılımlı x-ışınları dedektörü ile elde edilmiştir. Bu tür dedektörler bileşimde mevcut olan bütün elementleri aynı anda saptayabilirler ve kimyasal bileşimler yaklaşık olarak belirlenebilir.

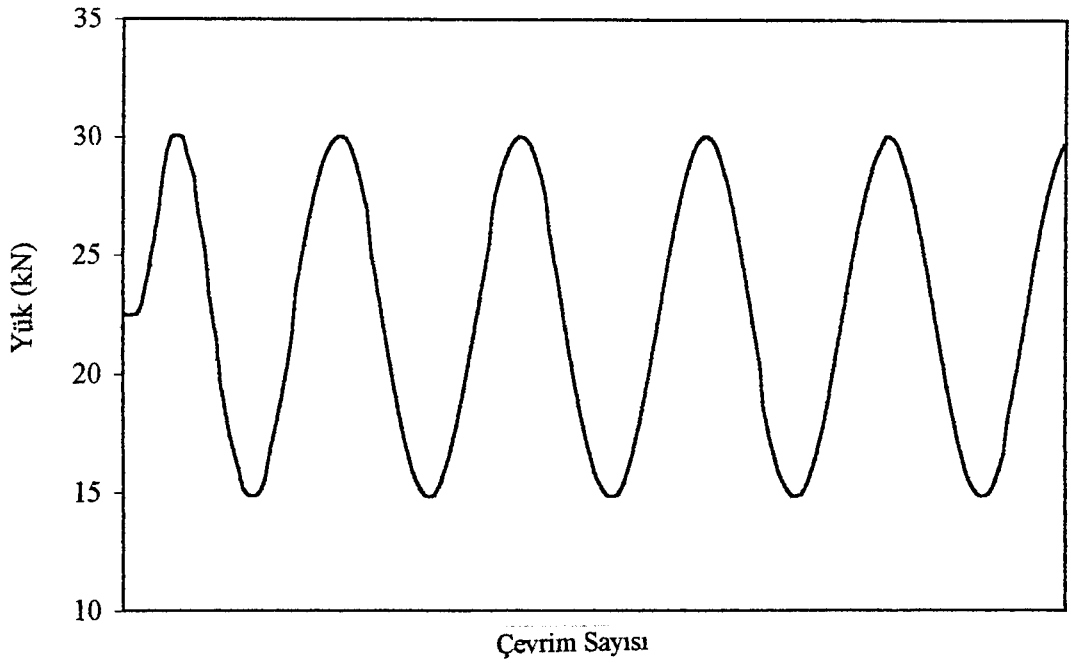


Çizelge 5.2. Sabit ve değişken genlikli deneylerde uygulanan yük değerleri ve çevrim sayıları

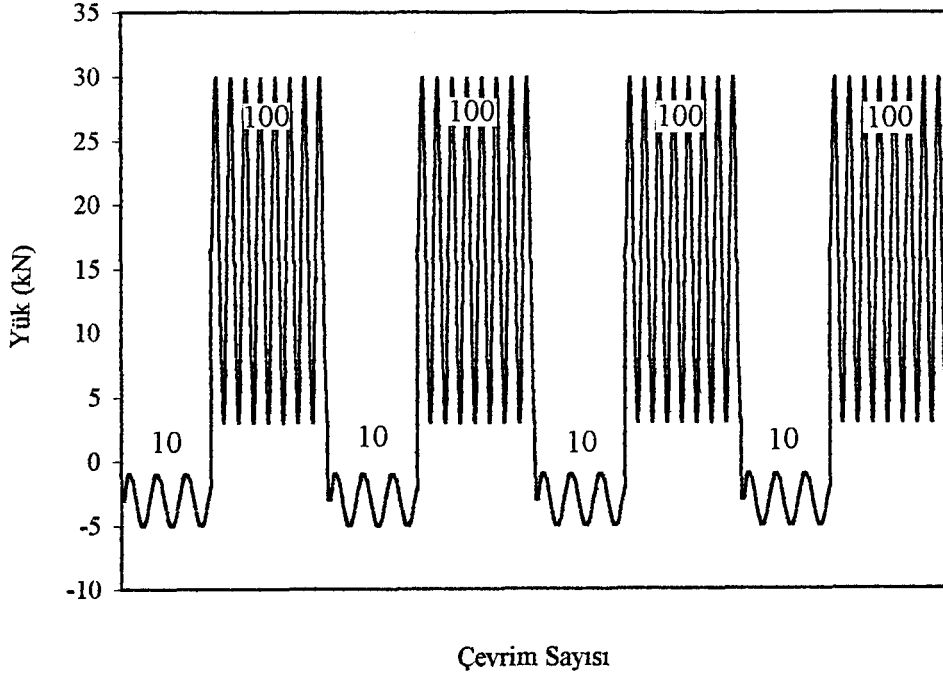
Yükleme Şekli	Yük Oranı (R)	Yük Genliği (kN)	Ortalama Yük Değeri (kN)	Çevrim Sayısı (N)	Yük Genliği (kN)	Ortalama Yük Değeri (kN)	Çevrim Sayısı (N)
Sabit Genlikli (Çekme-Çekme)	0,1	13,5	16,5				
Sabit Genlikli (Çekme-Çekme)	0,5	7,5	22,5				
Değişken Genlikli (Çekme-Basma)	0,1	13,5	16,5	100	2	-3	10
Değişken Genlikli (Çekme-Çekme)	0,1	13,5	16,5	5000	14,8	18,2	100
Değişken Genlikli (Çekme-Çekme)	0,1	13,5	16,5	2500	14,8	18,2	100
Değişken Genlikli (Çekme-Çekme)	0,1	13,5	16,5	1200	14,8	18,2	100
Değişken Genlikli (Çekme-Çekme)	0,5	7,5	22,5	500	8,5	25,5	50
Değişken Genlikli (Çekme-Çekme)	0,5	7,5	22,5	250	8,5	25,5	50



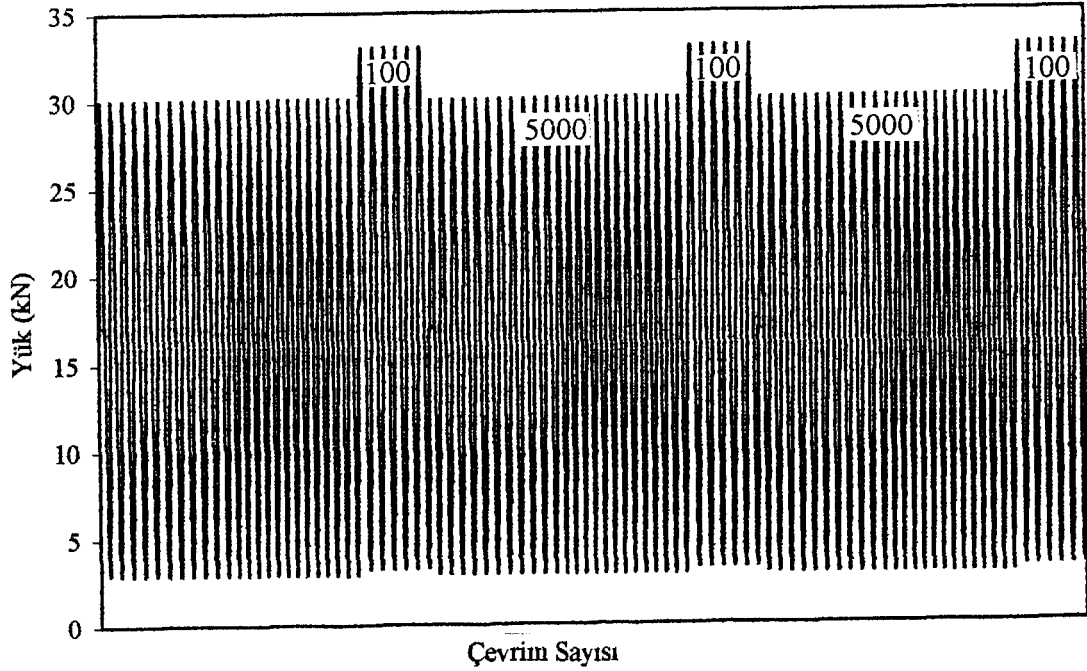
Şekil 5.5.  $R=0,1$  oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi



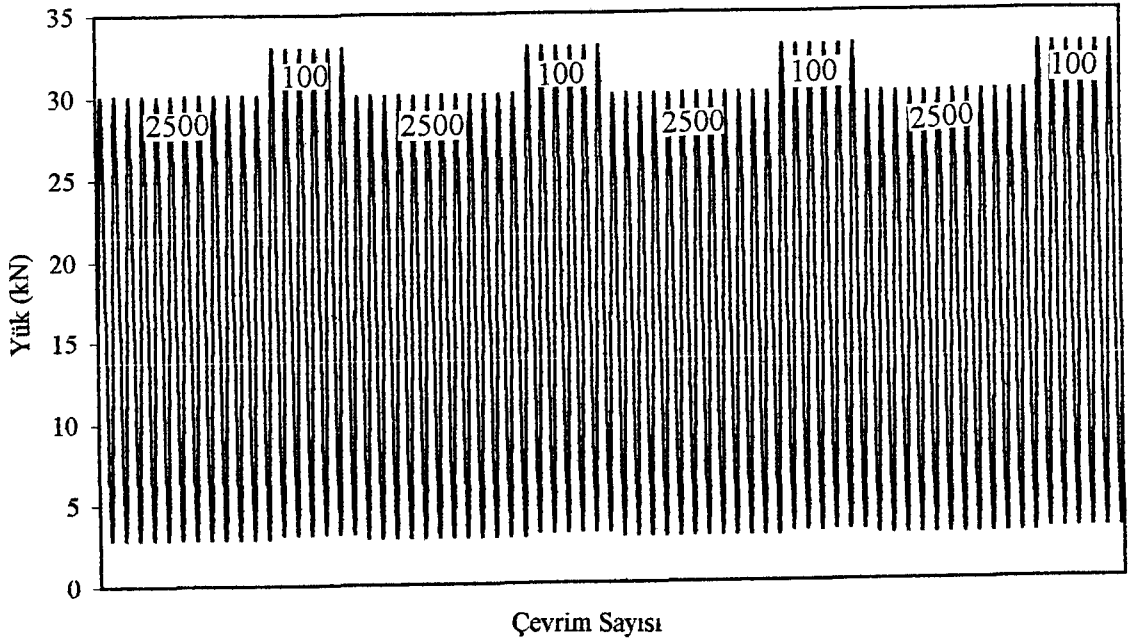
Şekil 5.6.  $R=0,5$  oranında, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi



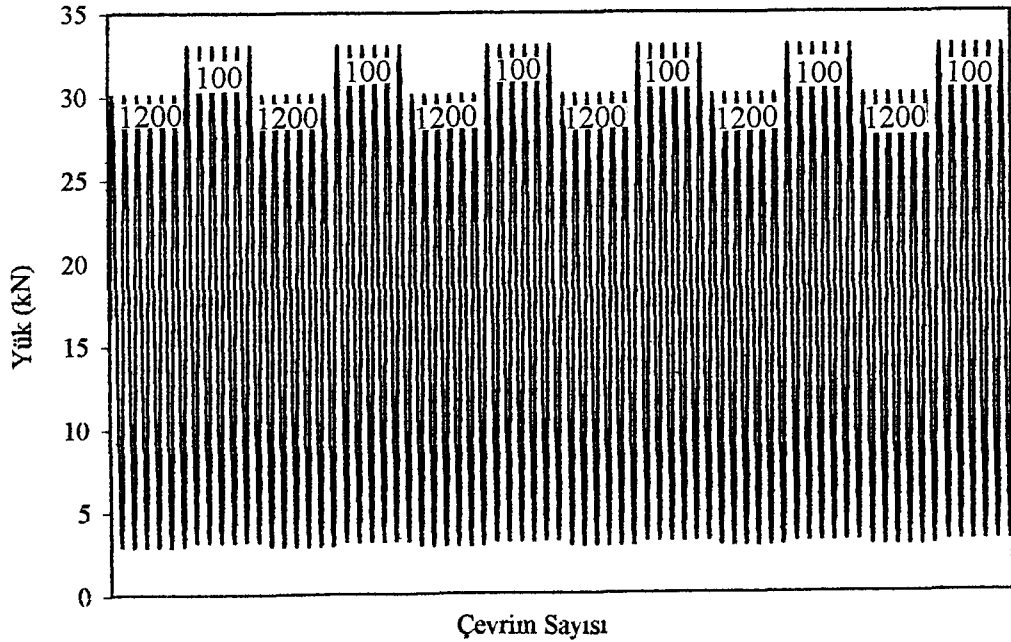
Şekil 5.7. 10 çevrim, yük genliği=2 kN, ortalama yük değeri=-3 kN ve 100 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi



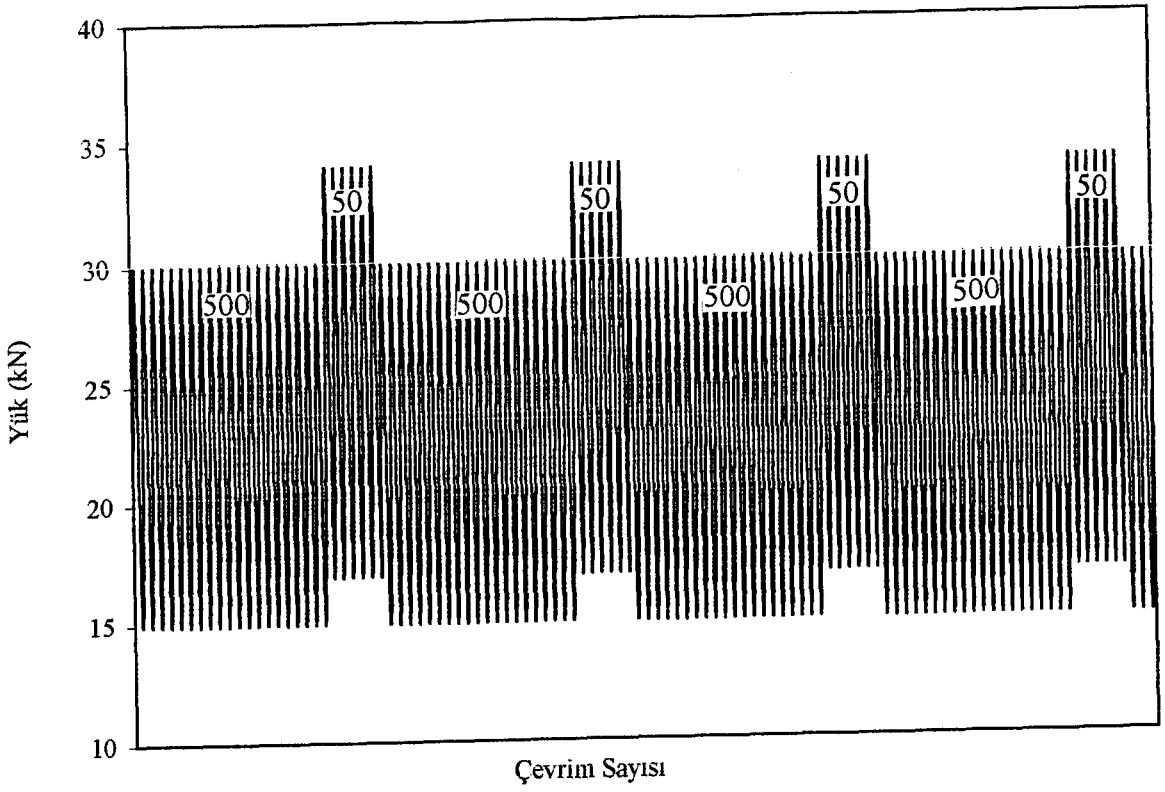
Şekil 5.8.  $R=0,1$  oranında. 5000 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi



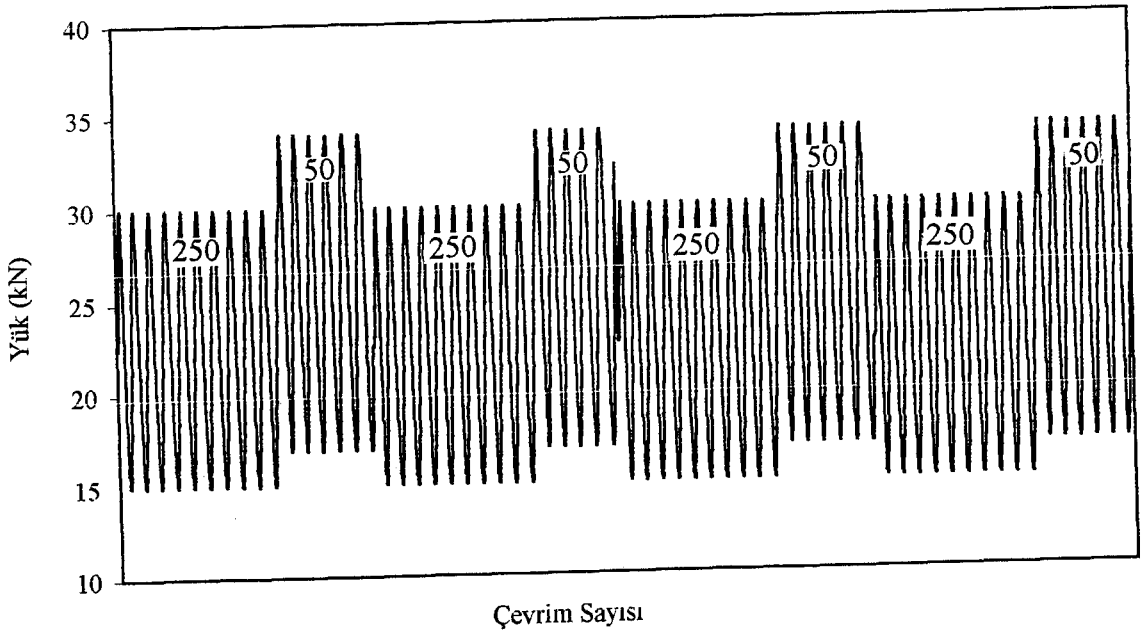
Şekil 5.9.  $R=0,1$  oranında, 2500 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi



Şekil 5.10.  $R=0,1$  oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi



Şekil 5.11.  $R=0,5$  oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi



Şekil 5.12.  $R=0,5$  oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük-çevrim sayısı eğrisi

## 6. DENEY SONUÇLAR

### 6.1. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları

Optik mikroskopta yapılan incelemeler sonucunda elde edilen ve yöne bağlı olarak değişen mikroyapılar Şekil 6.1, 6.2, 6.3 ve 6.4'de görülmektedir.

### 6.2. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre;

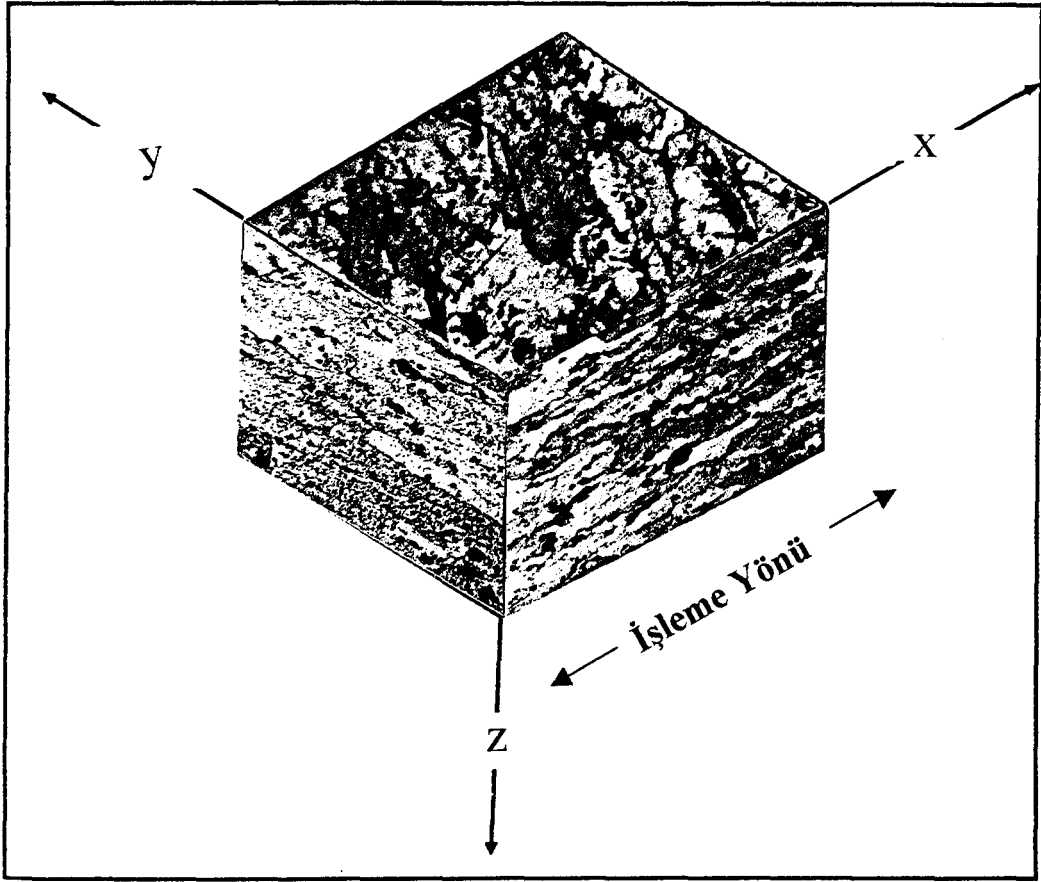
%0,2'deki Akma Yüğü	$31 \pm 1$ kN
%0,2'deki Akma Gerilmesi	$285 \pm 20$ MPa
Çekme Gerilmesi	$454 \pm 20$ MPa

bulunmuştur. Literatürde [66], akma gerilmesi 310 MPa, çekme gerilmesi 450 MPa olarak verilmiştir. Bu değerler çekme deneyleri sonucunda bulunan değerlere yakındır. Deney sonucunda elde edilen yük-uzama eğrisi ve hesaplamalar yapılarak [67] çizilen mühendislik gerilme-% uzama eğrisi Şekil 6.5 (a) ve (b)'de görülmektedir.

### 6.3. Sabit Genlikli Yorulma Deneyi Sonuçları

R=0,1 oranında, Şekil 5.5'de verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda, kırılmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 41000 bulunmuştur. Yük-çevrim sayısı, çatlak boyu-çevrim sayısı ve çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrileri sırasıyla Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de verilmiştir.

R=0,5 oranında, Şekil 5.6'da verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda kırılmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 12609 bulunmuştur. Şekil 6.9'da yük-çevrim sayısı, Şekil 6.10'da çatlak boyu-çevrim sayısı, Şekil 6.11'de ise çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrileri verilmiştir. Her iki yük oranındaki gerilme şiddet faktörü değerleri Eşitlik 4.9'a göre hesaplanmıştır.



Şekil 6.1. Numunenin yöne bağlı üç boyutlu mikroyapısı



Şekil 6.2. Numunenin xy düzlemindeki mikroyapısı (Büyütme: 130x)

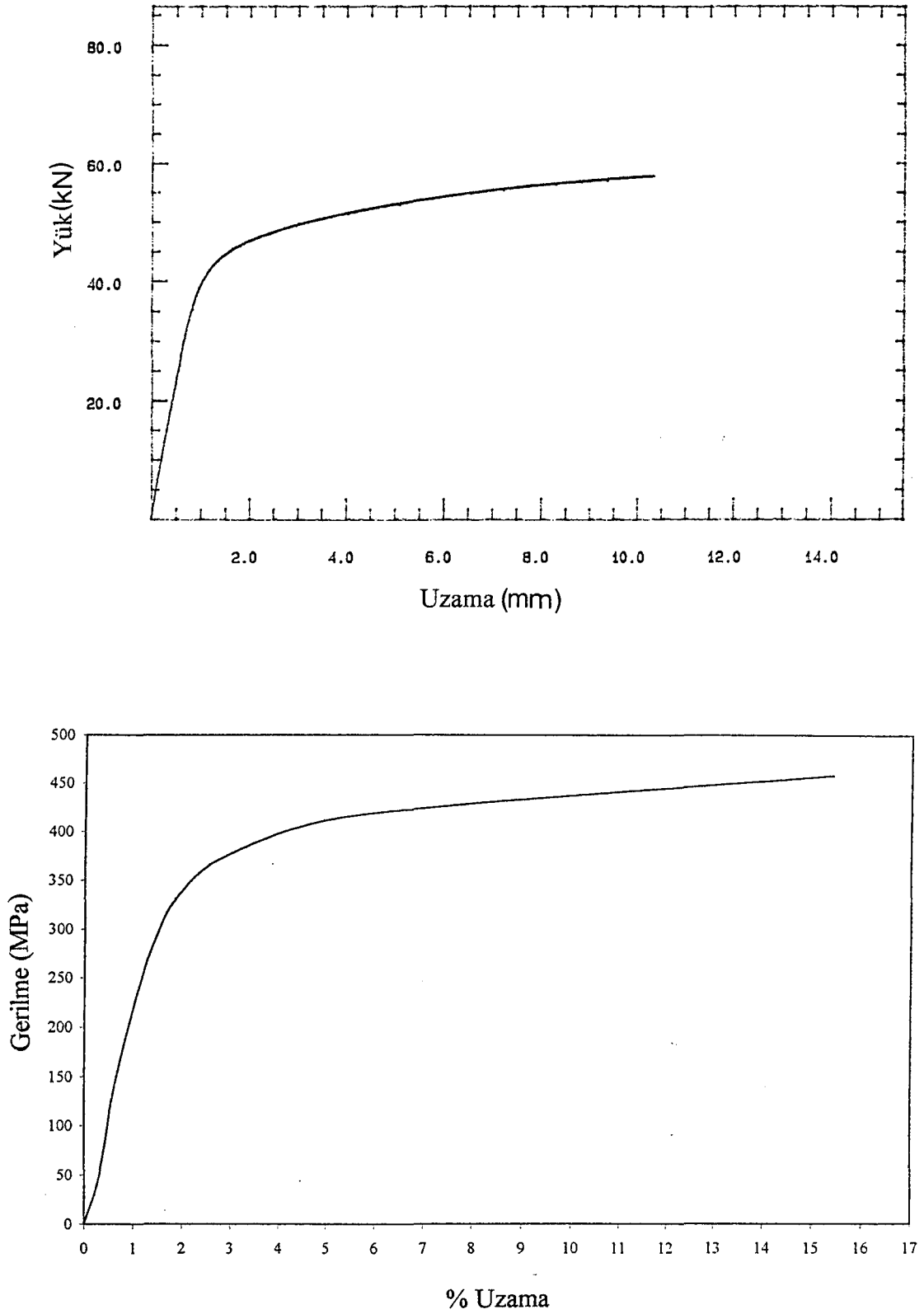


Şekil 6.3. Numunenin yz düzlemindeki mikroyapısı (Büyütme:130x)

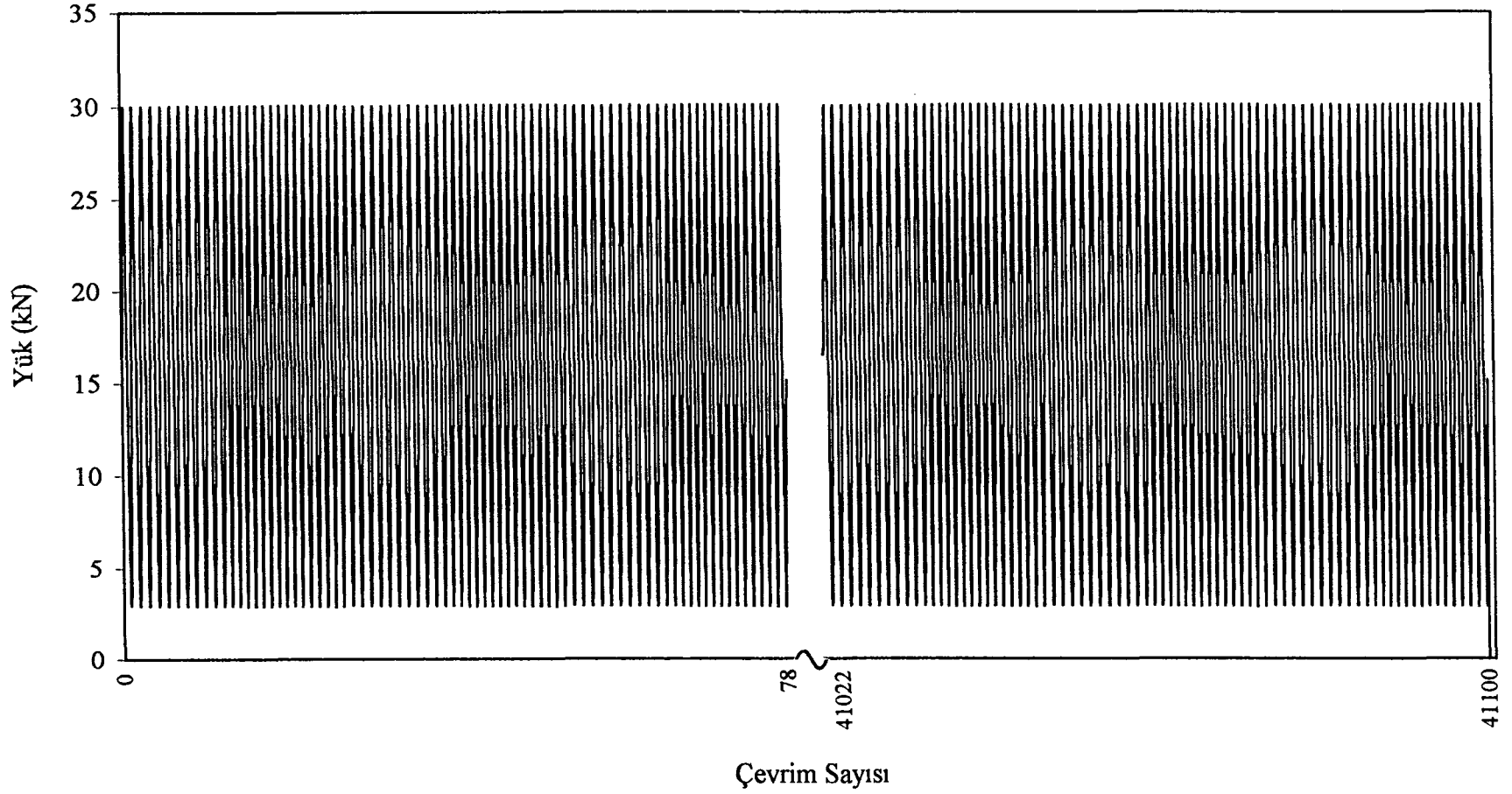


Şekil 6.4. Numunenin xz düzlemindeki mikroyapısı (Büyütme:130x)

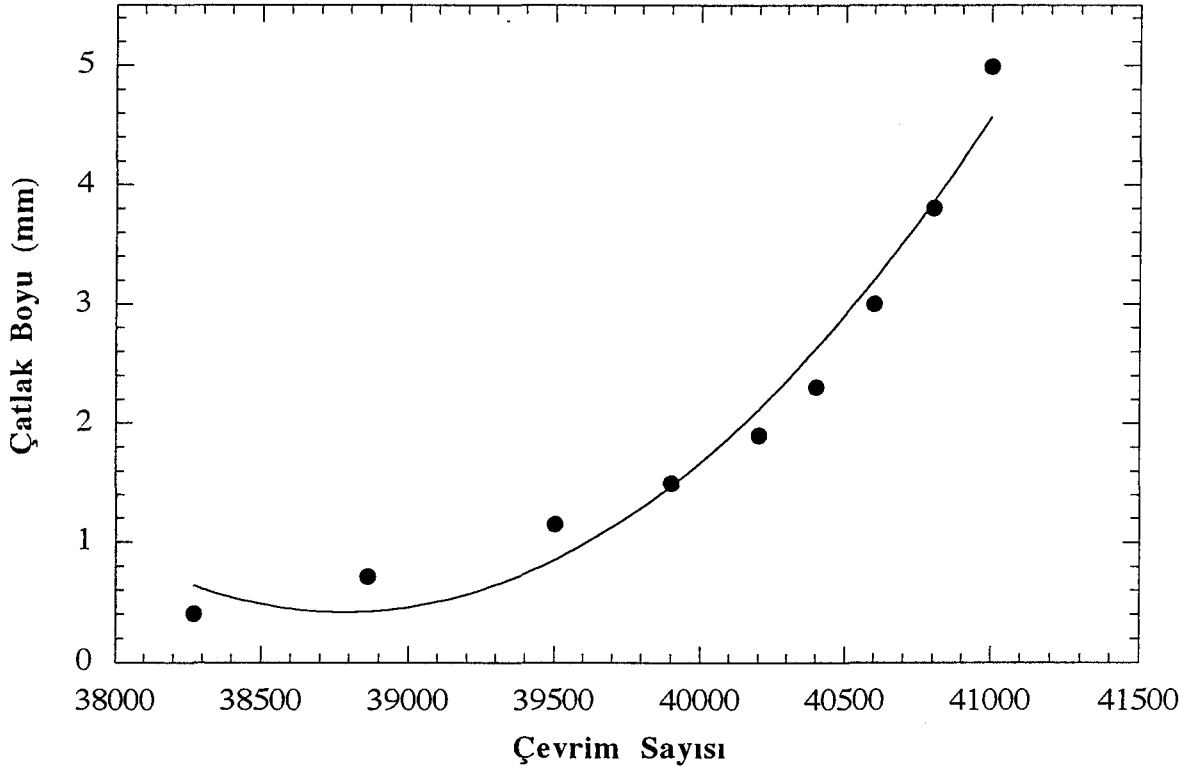




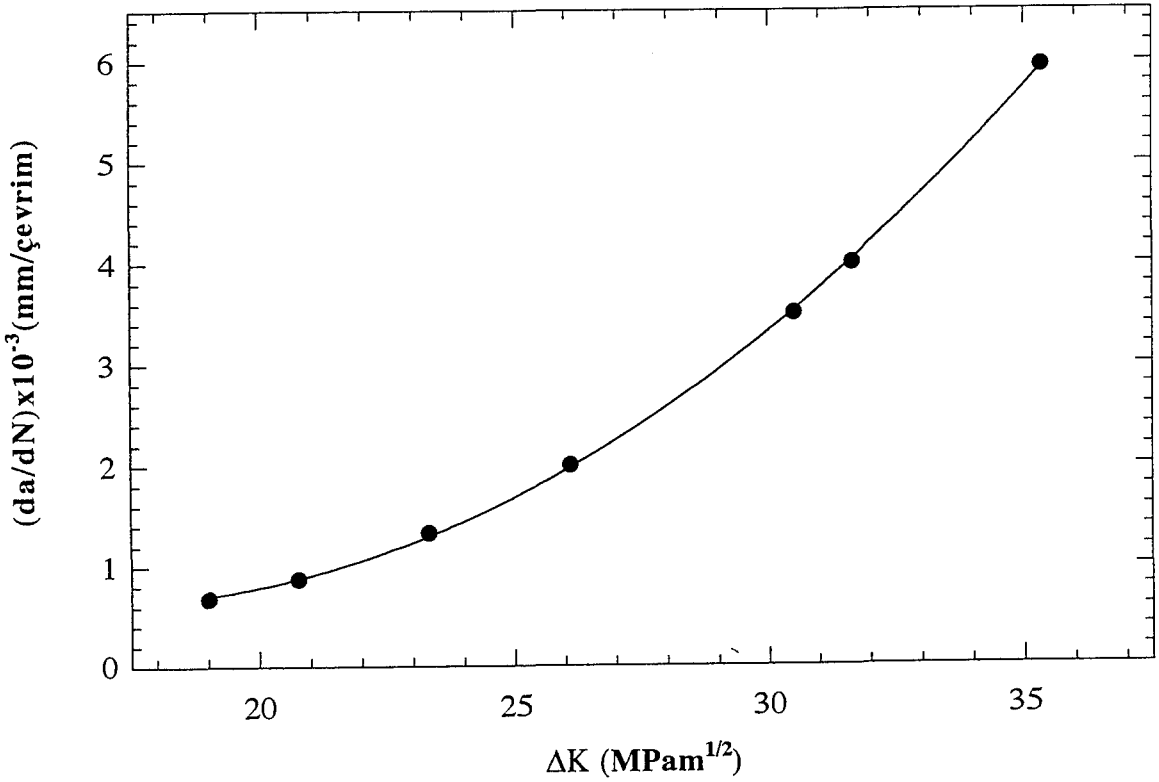
Şekil 6.5. (a) 2024 alüminyum alaşımına ait yük-uzama ve (b) mühendislik gerilme-%uzama eğrisi



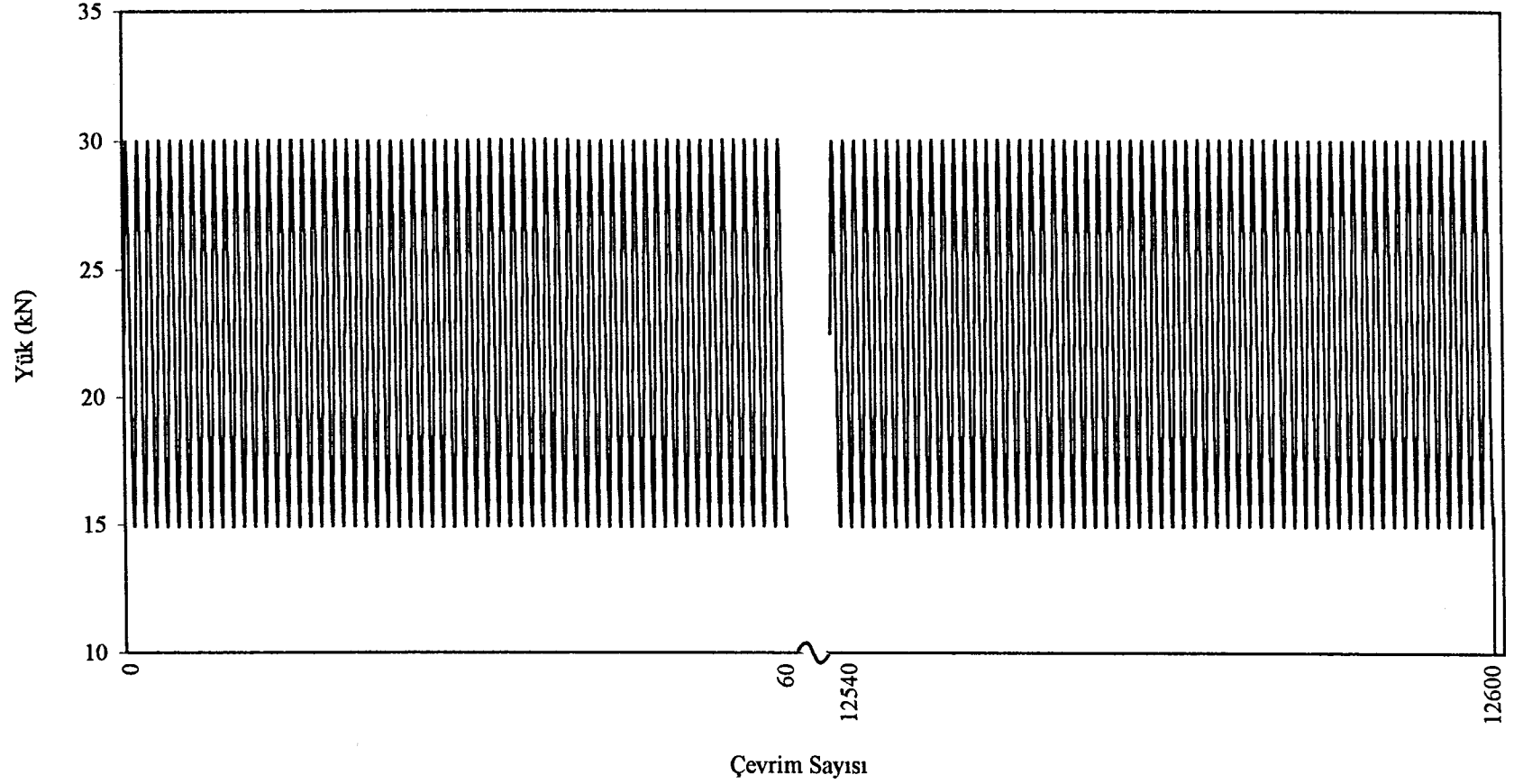
Şekil 6.6.  $R=0,1$  oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi



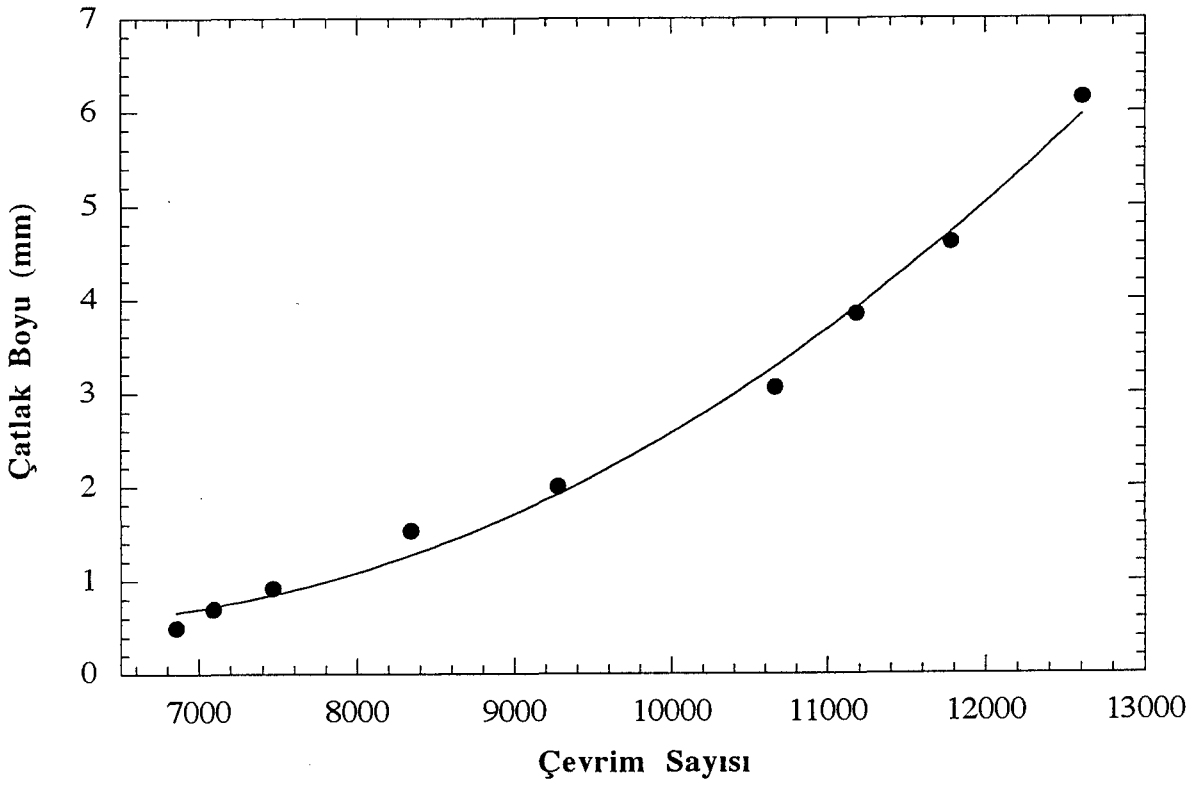
Şekil 6.7 R=0,1 oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi



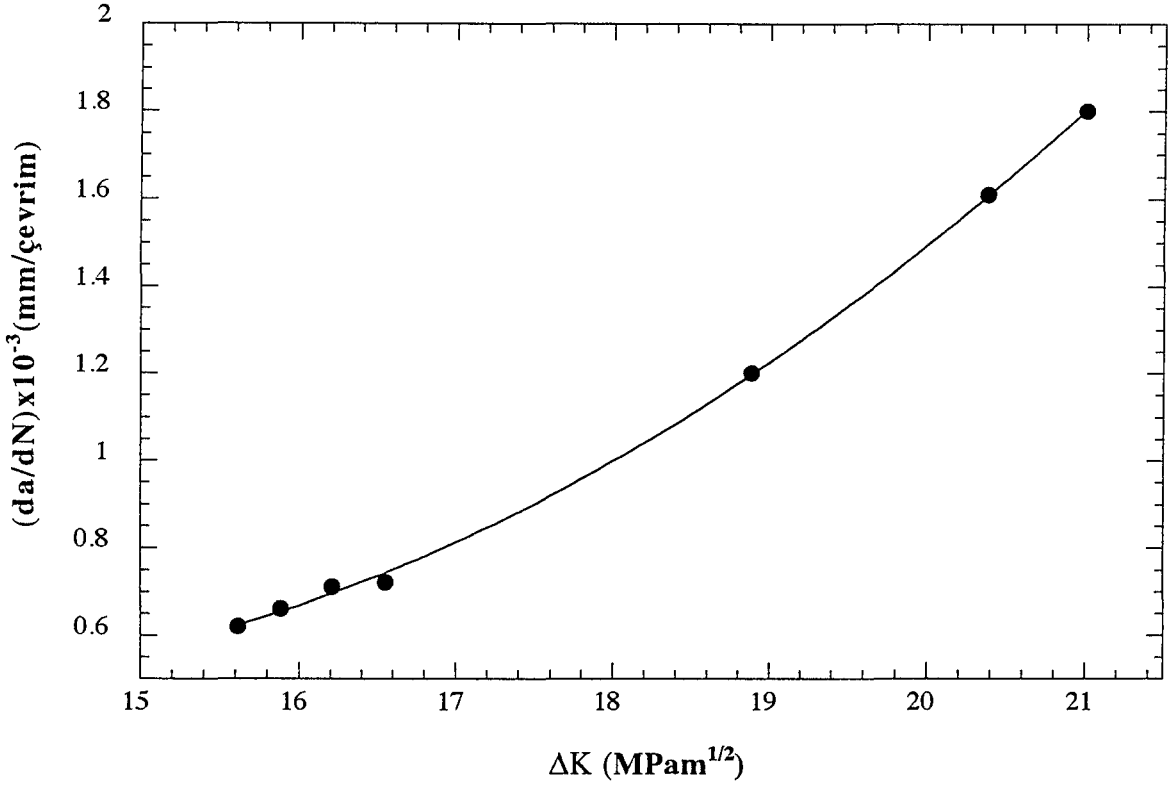
Şekil 6.8. R=0,1 oranında, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi



Şekil 6.9.  $R=0,5$  oranında, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan sabit genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi



Şekil 6.10. R=0.5 oranında, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi



Şekil 6.11. R=0.5 oranında, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan sabit genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi

#### 6.4. Değişken Genlikli Yorulma Deneyi

$R=0,1$  oranında, Şekil 5.7'de verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda yorulmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 45000 bulunmuştur. Yük-çevrim sayısı eğrisi Şekil 6.12'de, çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi Şekil 6.13'de ve çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi Şekil 6.14'de verilmiştir.

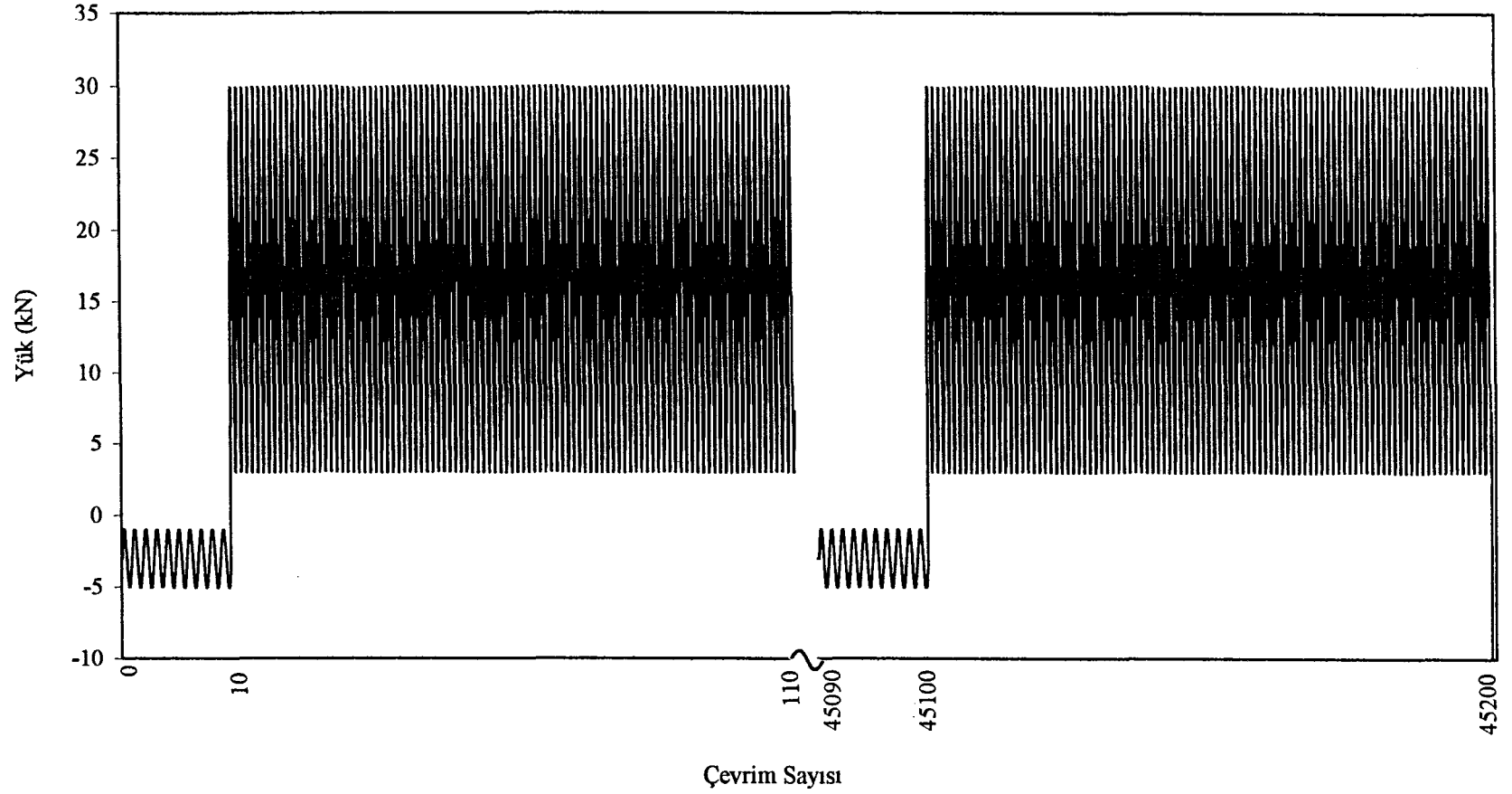
$R=0,1$  oranında, Şekil 5.8'de verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda yorulmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 59300 bulunmuştur. Şekil 6.15'de yük-çevrim sayısı, Şekil 6.16'da çatlak boyu-çevrim sayısı, Şekil 6.17'de ise çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrileri verilmiştir.

$R=0,1$  oranında, Şekil 5.9'da verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda yorulmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 66714 bulunmuştur. Yük-çevrim sayısı, çatlak boyu-çevrim sayısı ve çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrileri sırasıyla Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de verilmiştir.

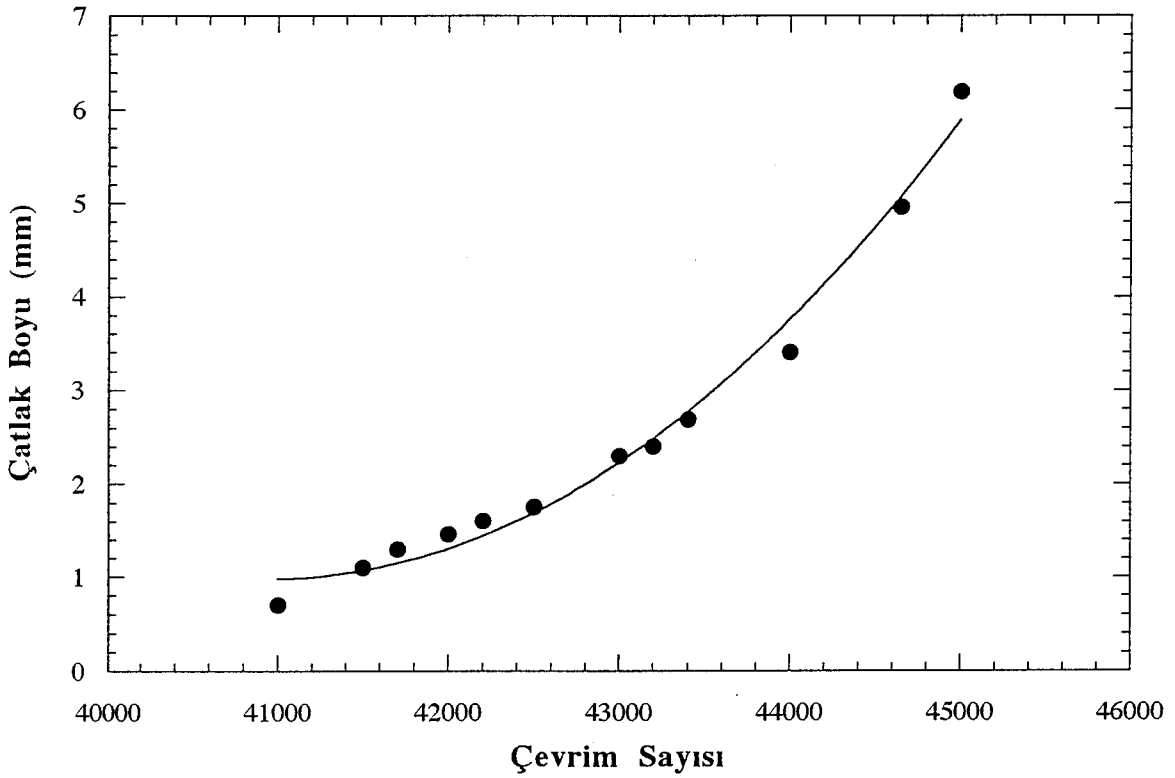
$R=0,1$  oranında, Şekil 5.10'da verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda yorulmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 54070 bulunmuştur. Şekil 6.21'de yük-çevrim sayısı, Şekil 6.22'de çatlak boyu-çevrim sayısı ve Şekil 6.23'de ise çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrileri verilmiştir.

$R=0,5$  oranında, Şekil 5.11'de verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda yorulmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 19260 bulunmuştur. Yük-çevrim sayısı eğrisi Şekil 6.24'de, çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi Şekil 6.25'de ve çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi Şekil 6.26'da verilmiştir.

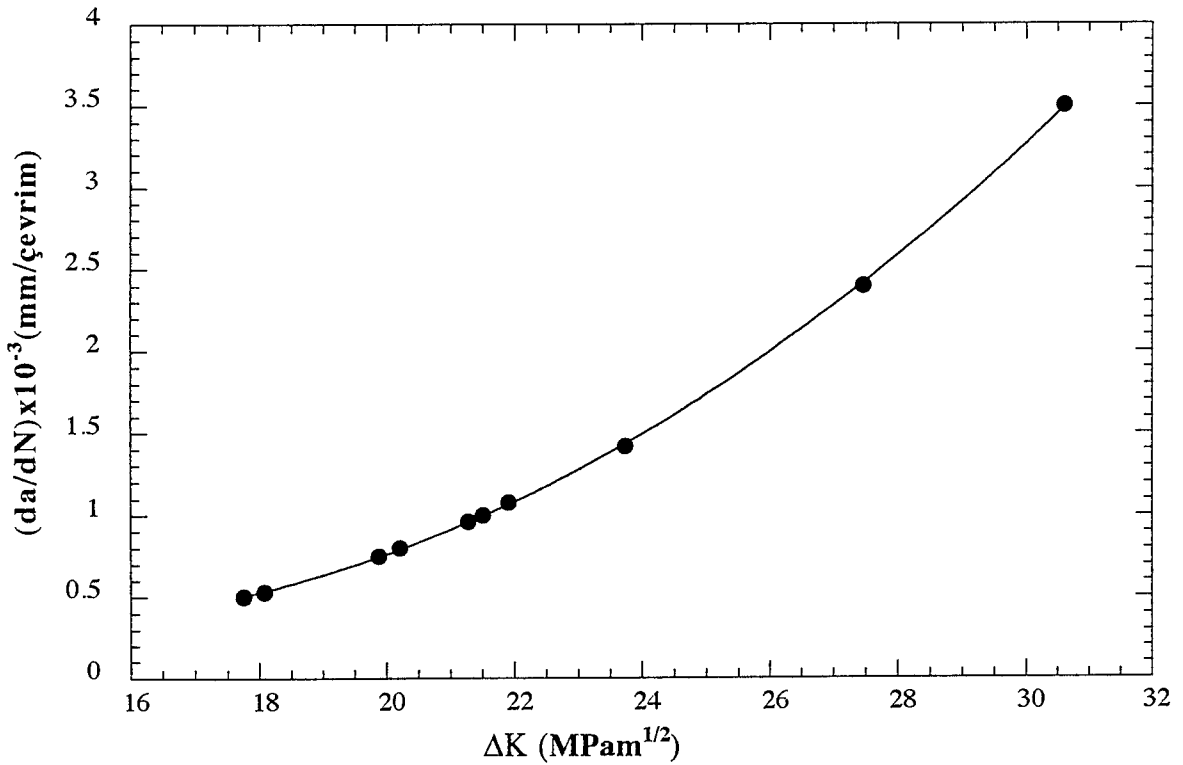
$R=0,5$  oranında, Şekil 5.12'de verilen yük değerleriyle yapılan deneyler sonucunda yorulmaya kadar çevrim sayıları ortalaması 17300 bulunmuştur. Yük-çevrim sayısı, çatlak boyu-çevrim sayısı ve çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrileri sırasıyla Şekil 6.27, Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da verilmiştir. Her iki yük oranındaki gerilme şiddet faktörü değerleri Eşitlik 4.9'a göre hesaplanmıştır.



Şekil 6.12. 10 çevrim, yük genliği=2 kN, ortalama yük değeri=-3 kN ve 100 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olarak uygulanan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi

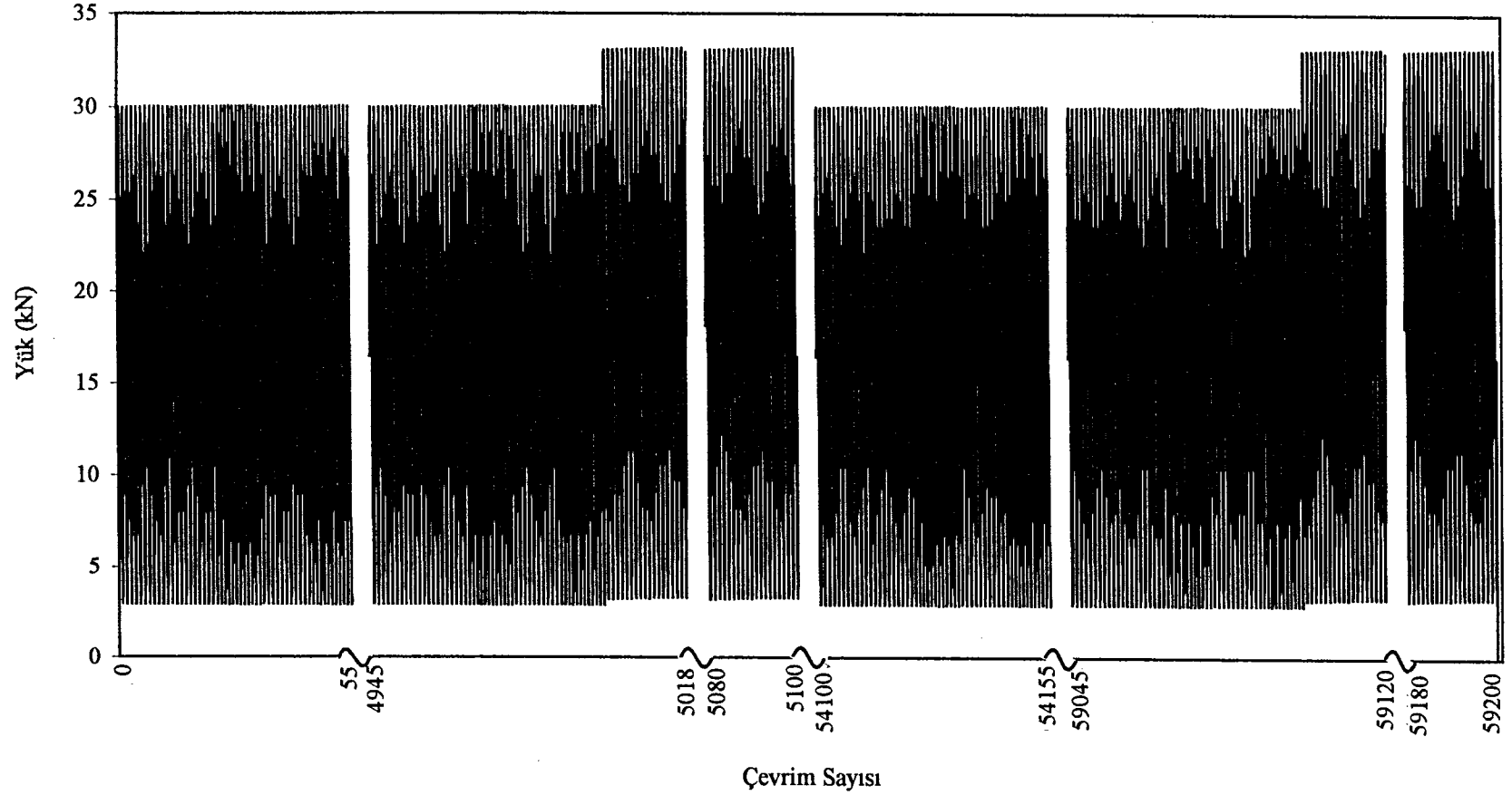


Şekil 6.13. 10 çevrim, yük genliği=2 kN, ortalama yük değeri=-3 kN ve 100 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olarak uygulanan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi

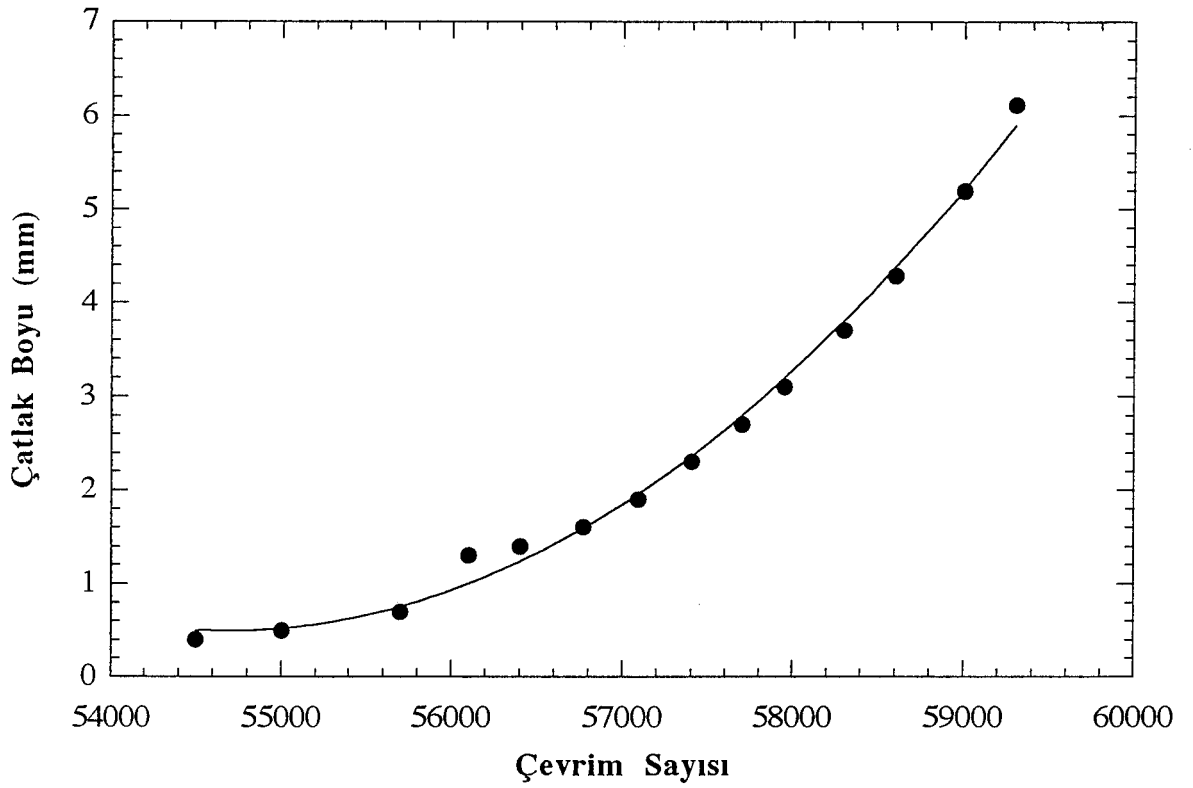


Şekil 6.14. 10 çevrim, yük genliği=2 kN, ortalama yük değeri=-3 kN ve 100 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN olarak uygulanan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi

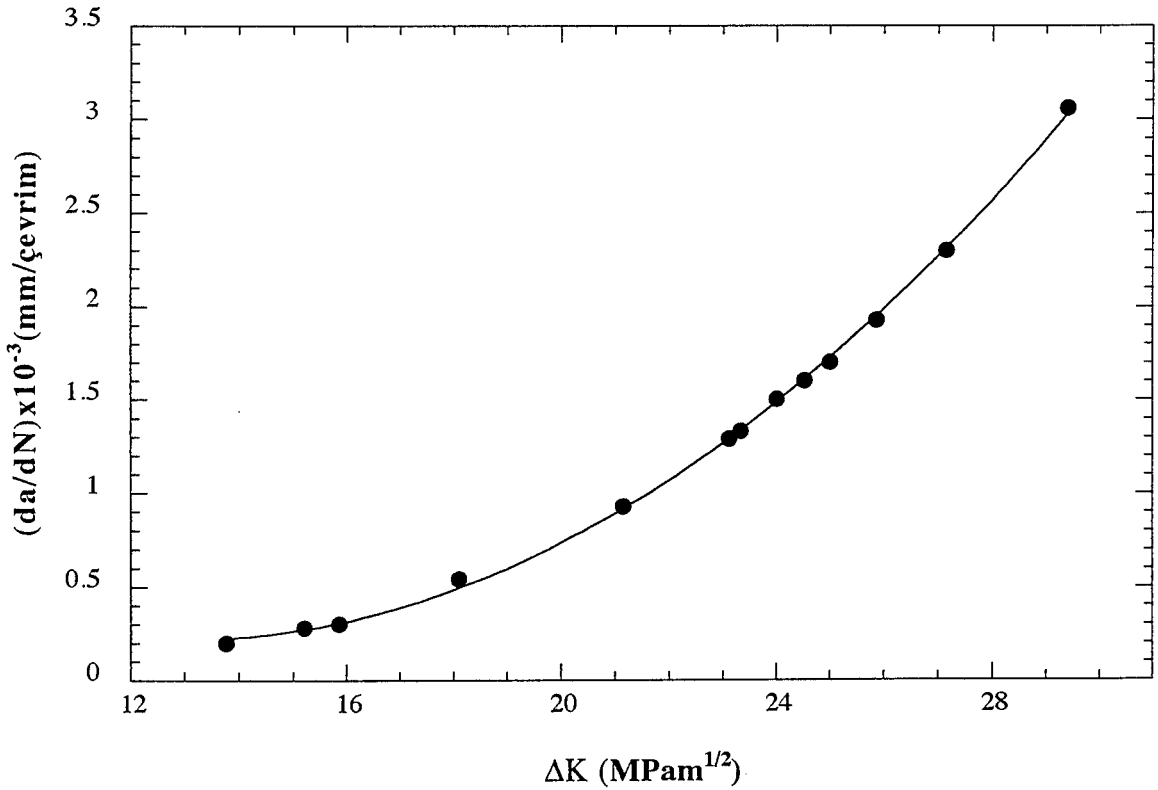




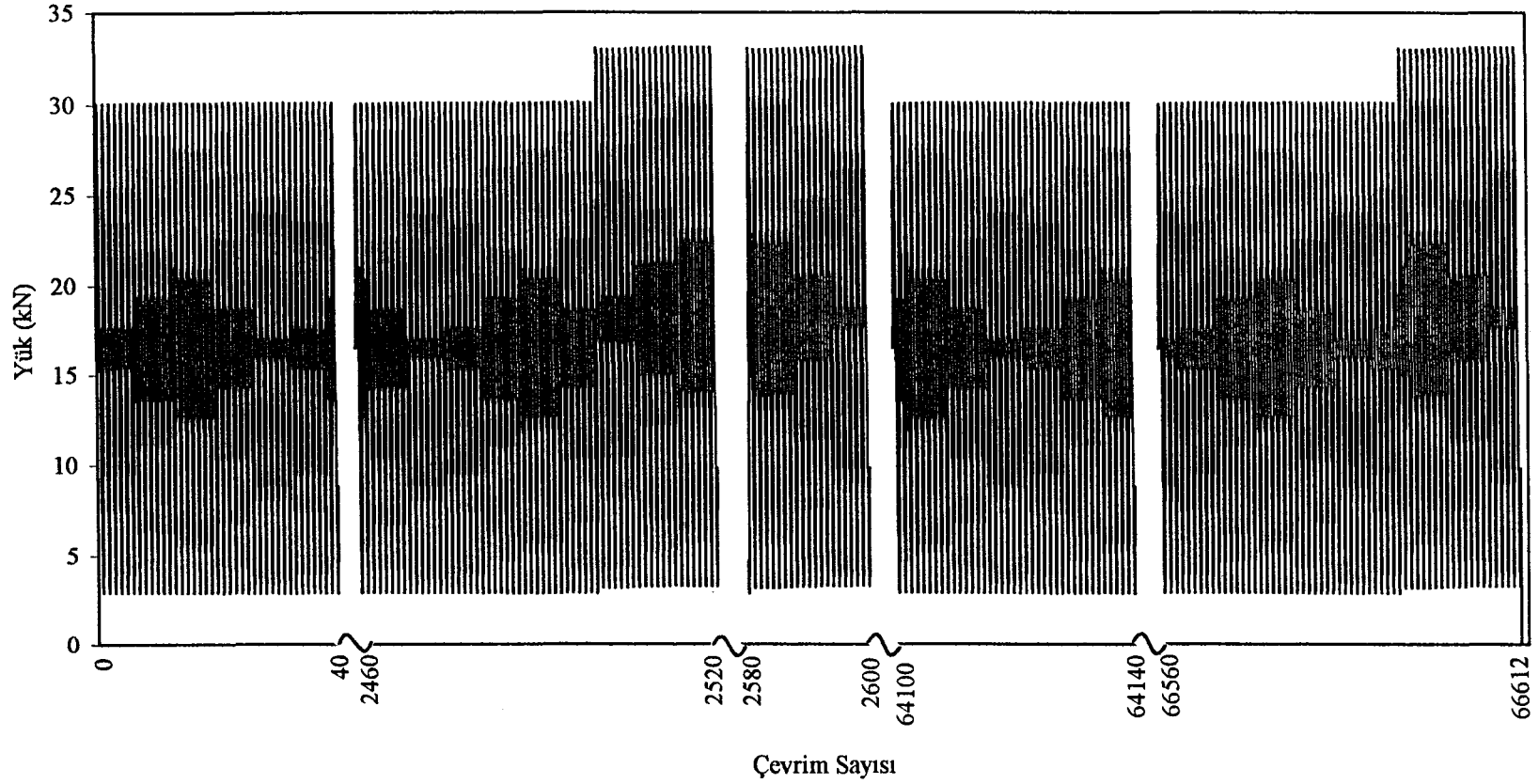
Şekil 6.15.  $R=0,1$  oranında, 5000 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi



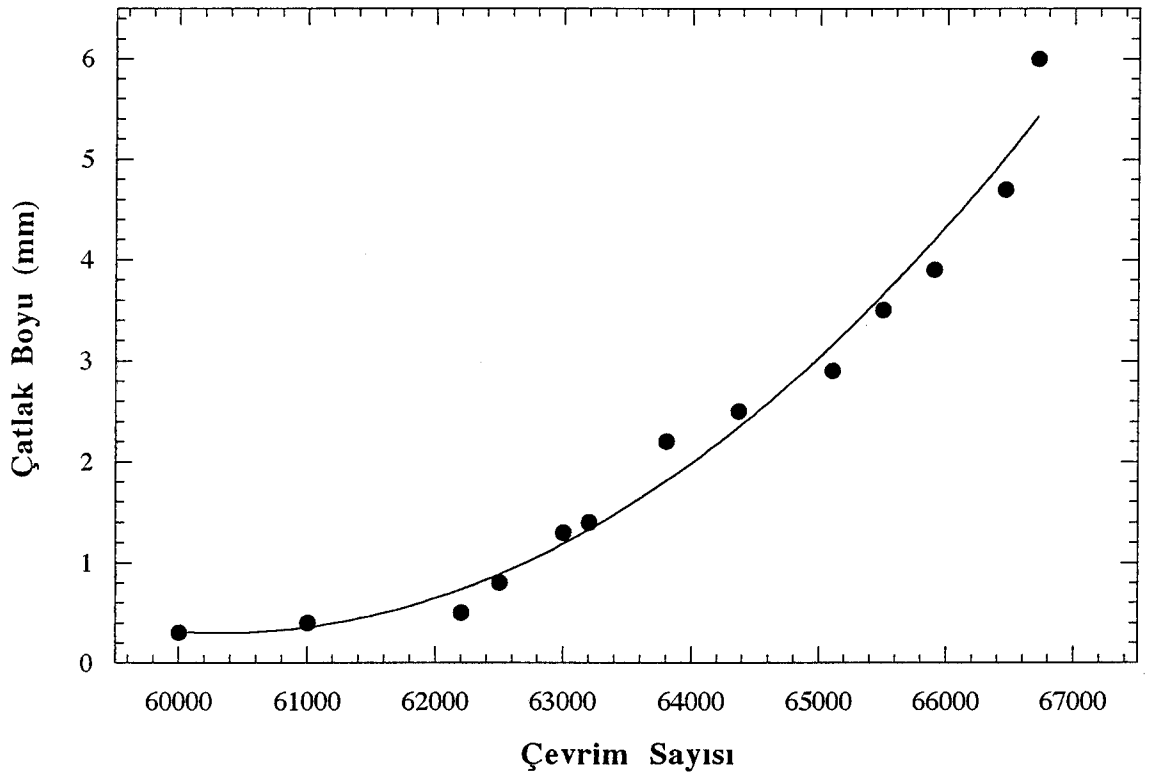
Şekil 6.16. R=0,1 oranında, 5000 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi



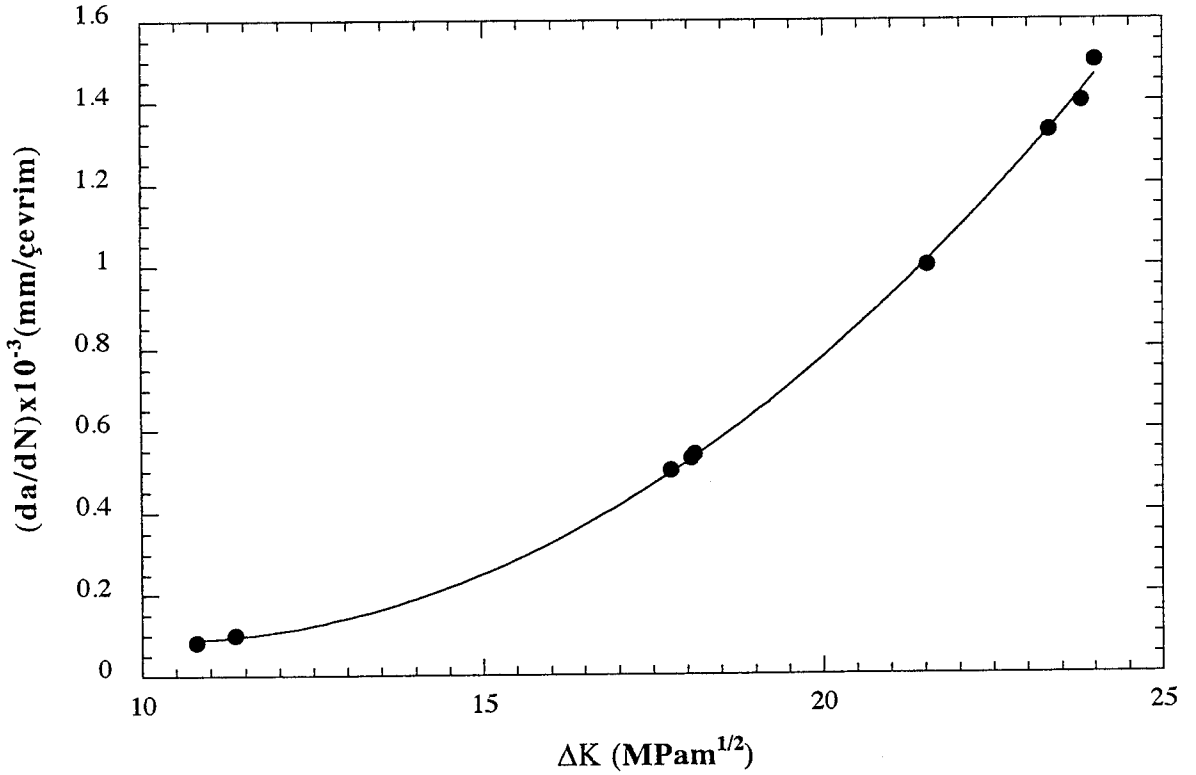
Şekil 6.17. R=0,1 oranında, 5000 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi



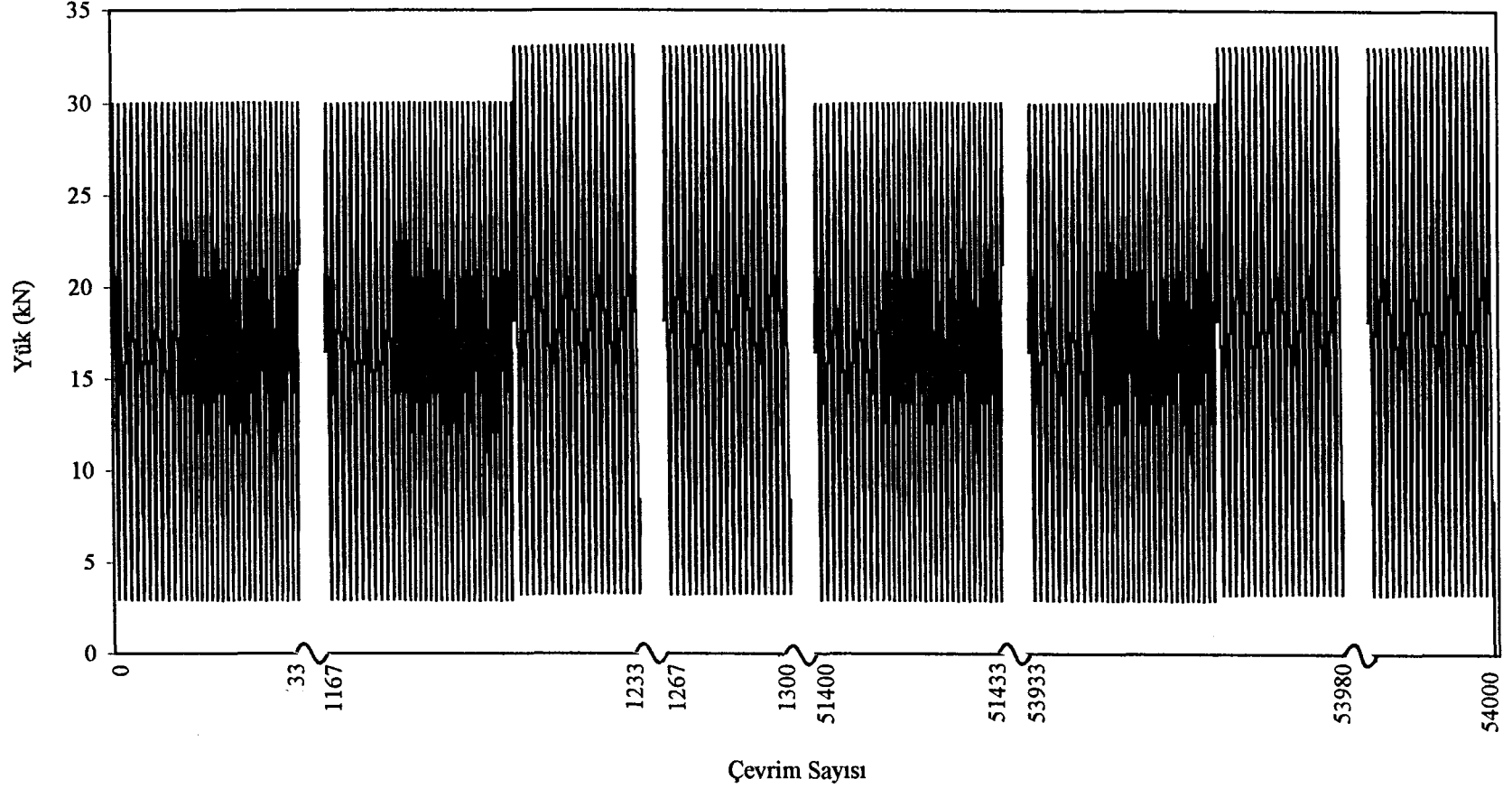
Şekil 6.18.  $R=0,1$  oranında, 2500 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi



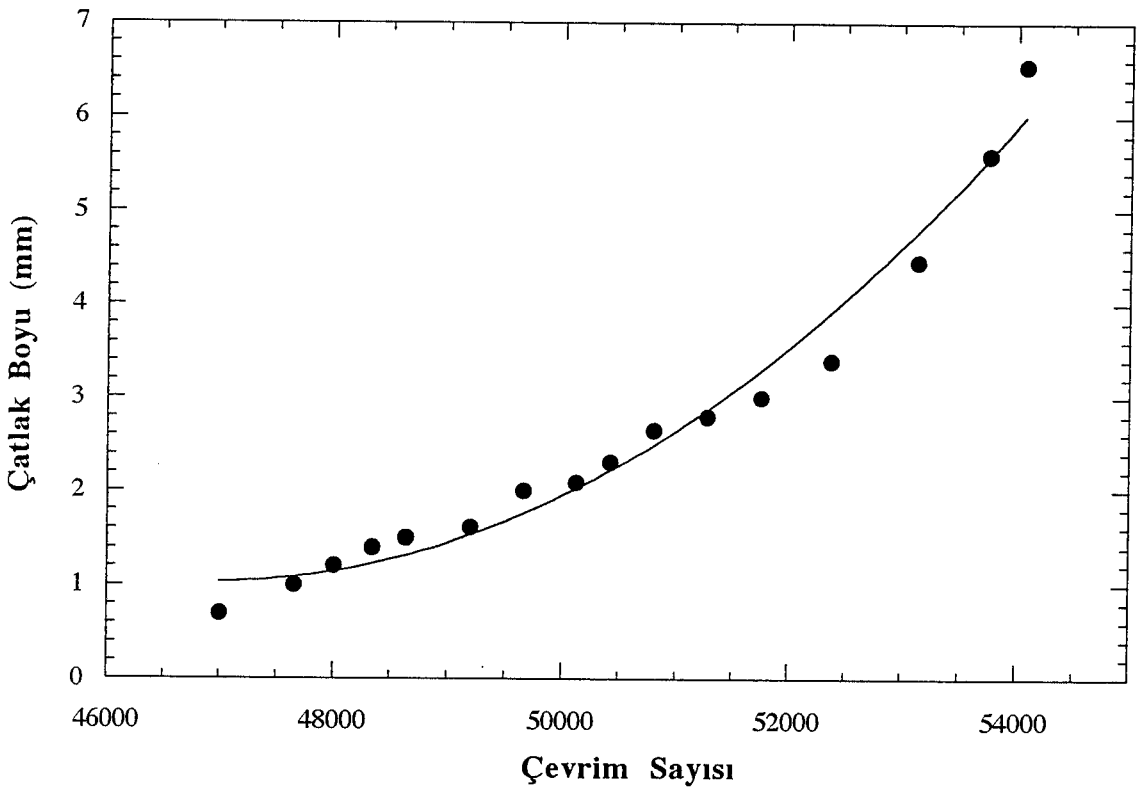
Şekil 6.19. R=0,1 oranında, 2500 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi



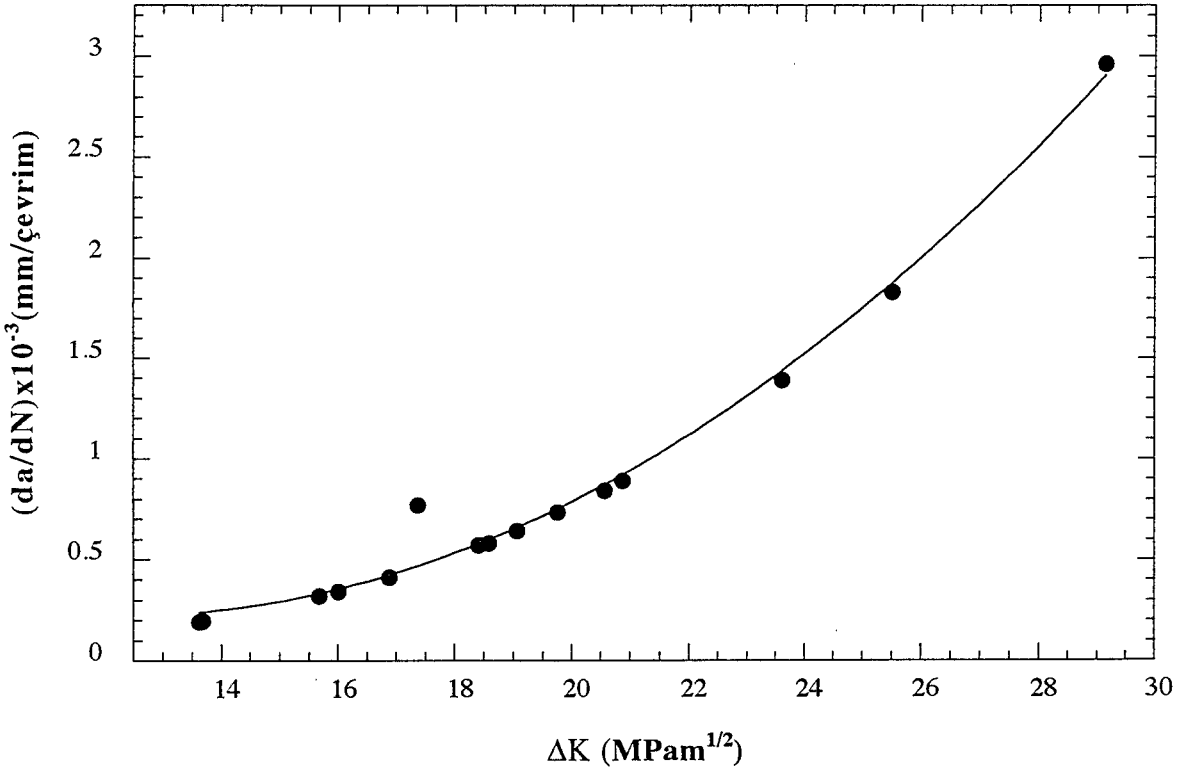
Şekil 6.20. R=0,1 oranında, 2500 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi



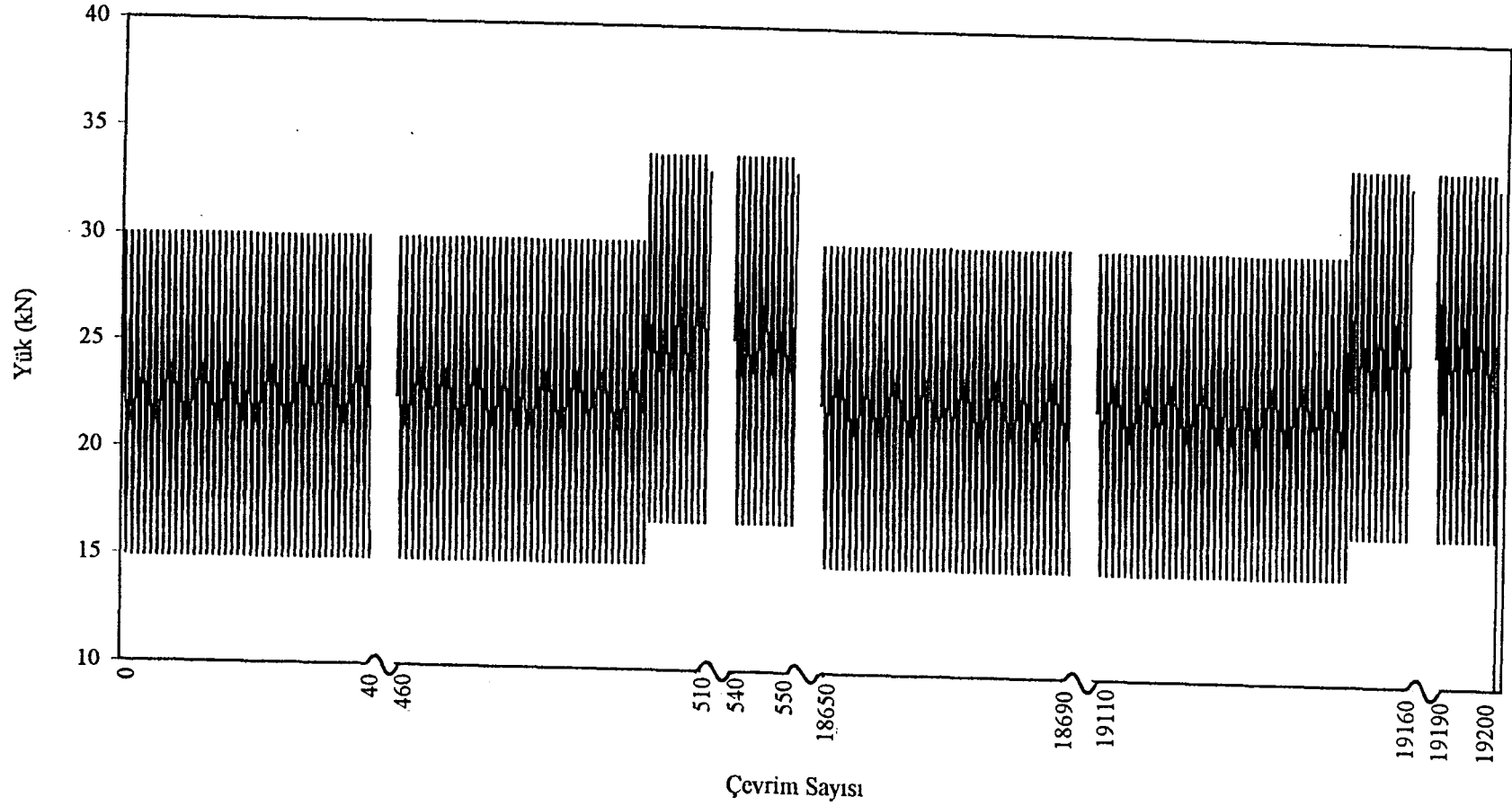
Şekil 6.21.  $R=0,1$  oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi



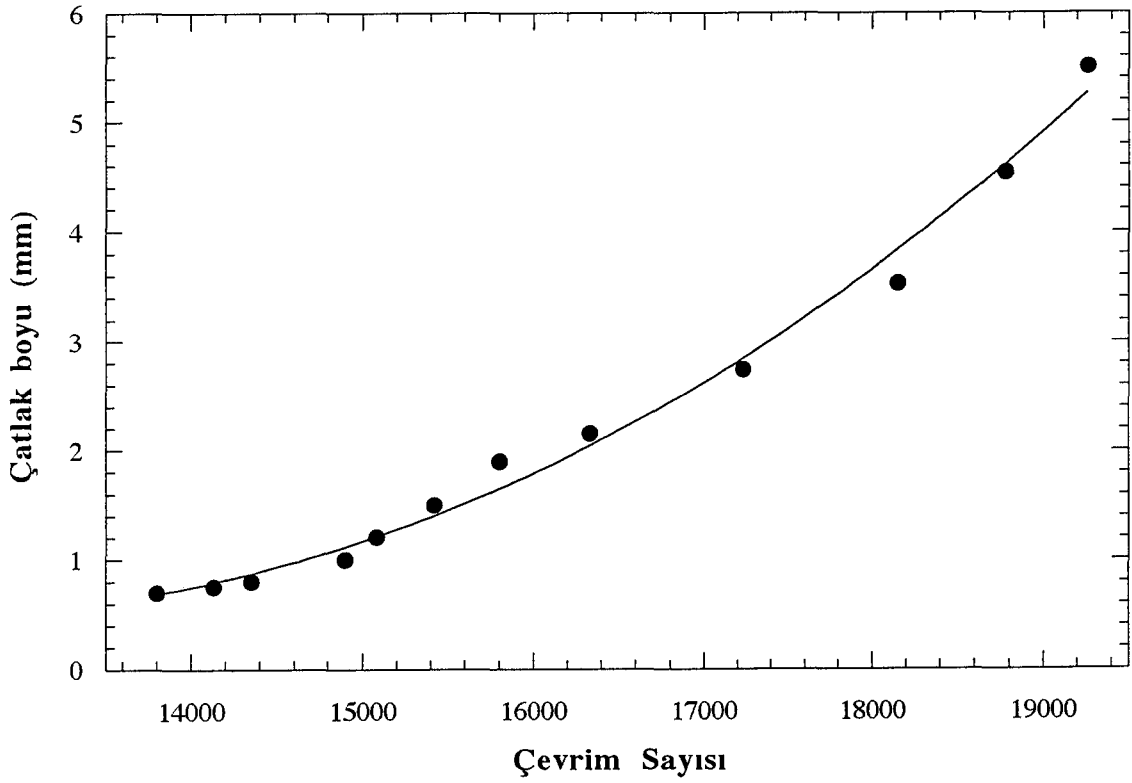
Şekil 6.22.  $R=0,1$  oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi



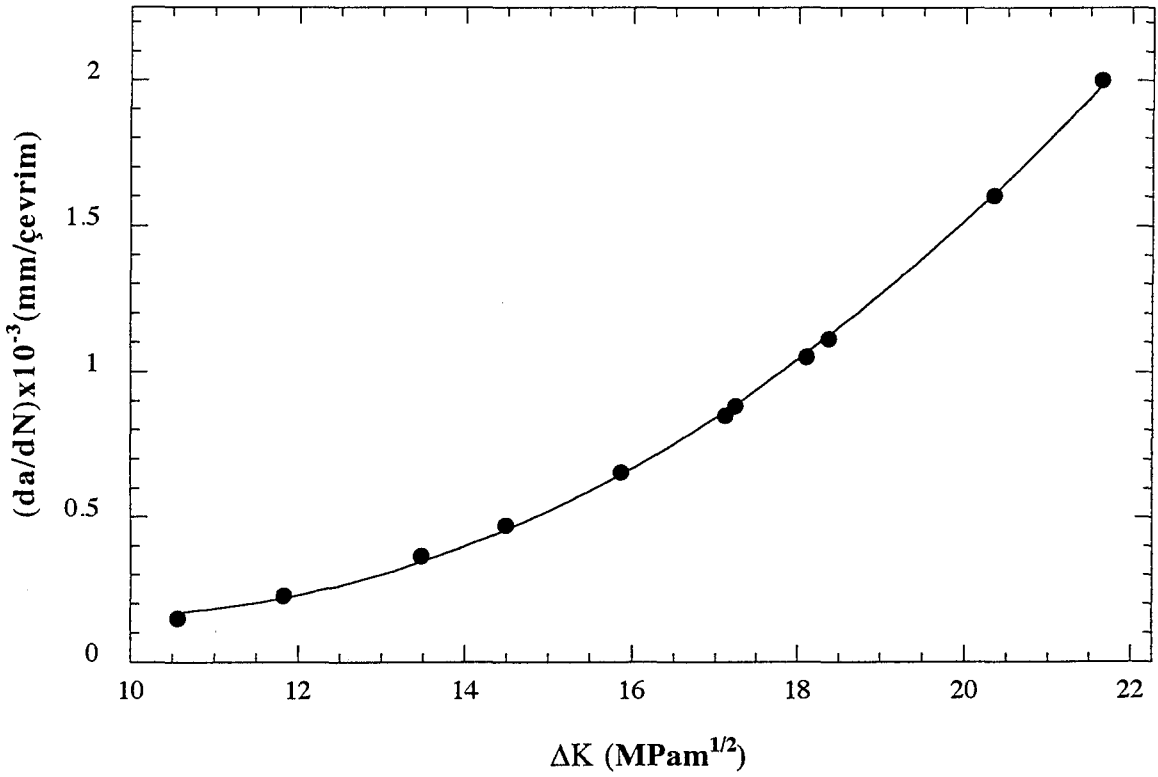
Şekil 6.23.  $R=0,1$  oranında, 1200 çevrim, yük genliği=13,5 kN, ortalama yük değeri=16,5 kN ve 100 çevrim, yük genliği=14,8 kN, ortalama yük değeri=18,2 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi



Şekil 6.24.  $R=0,5$  oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi

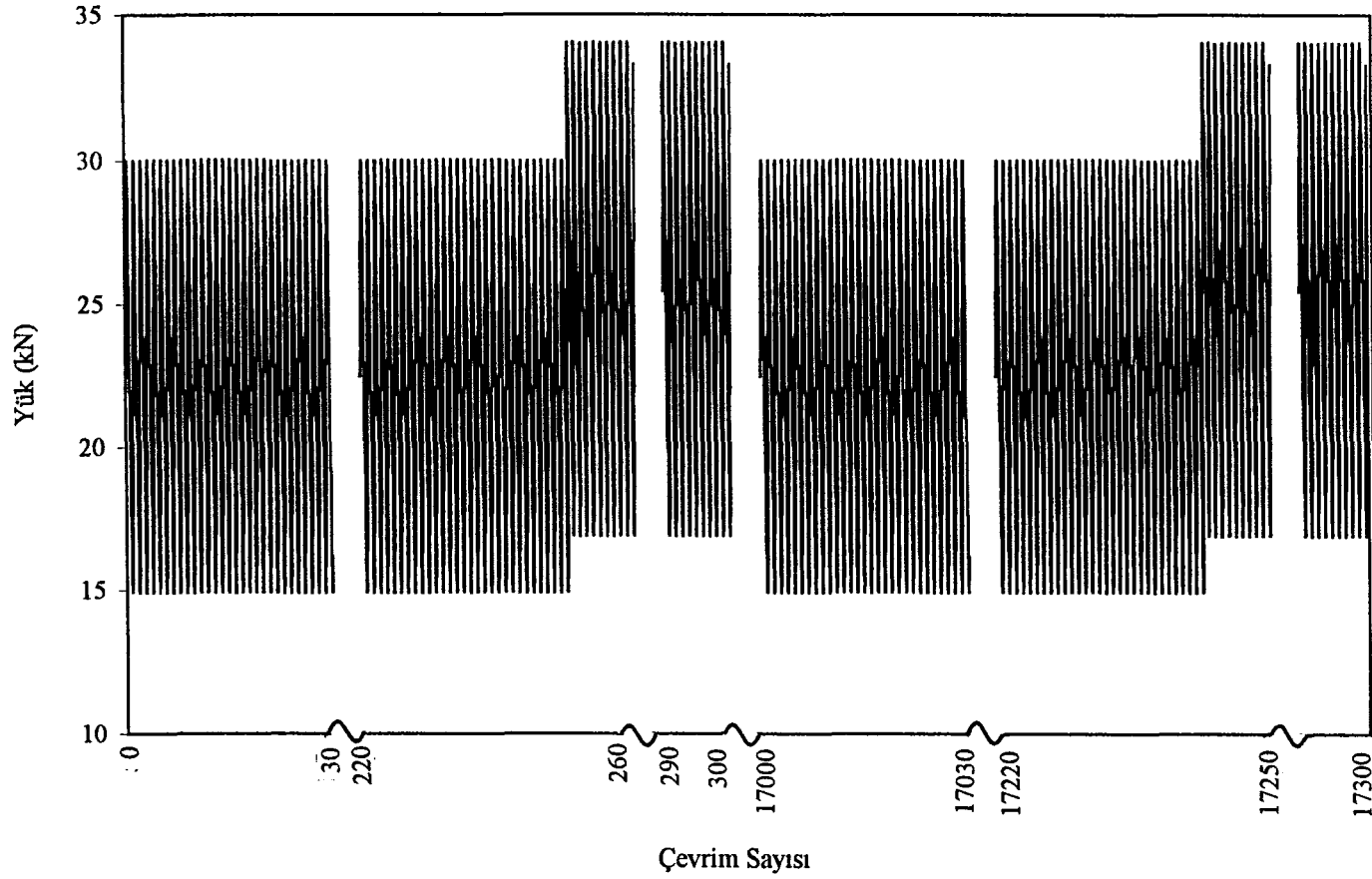


Şekil 6.25. R=0,5 oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi

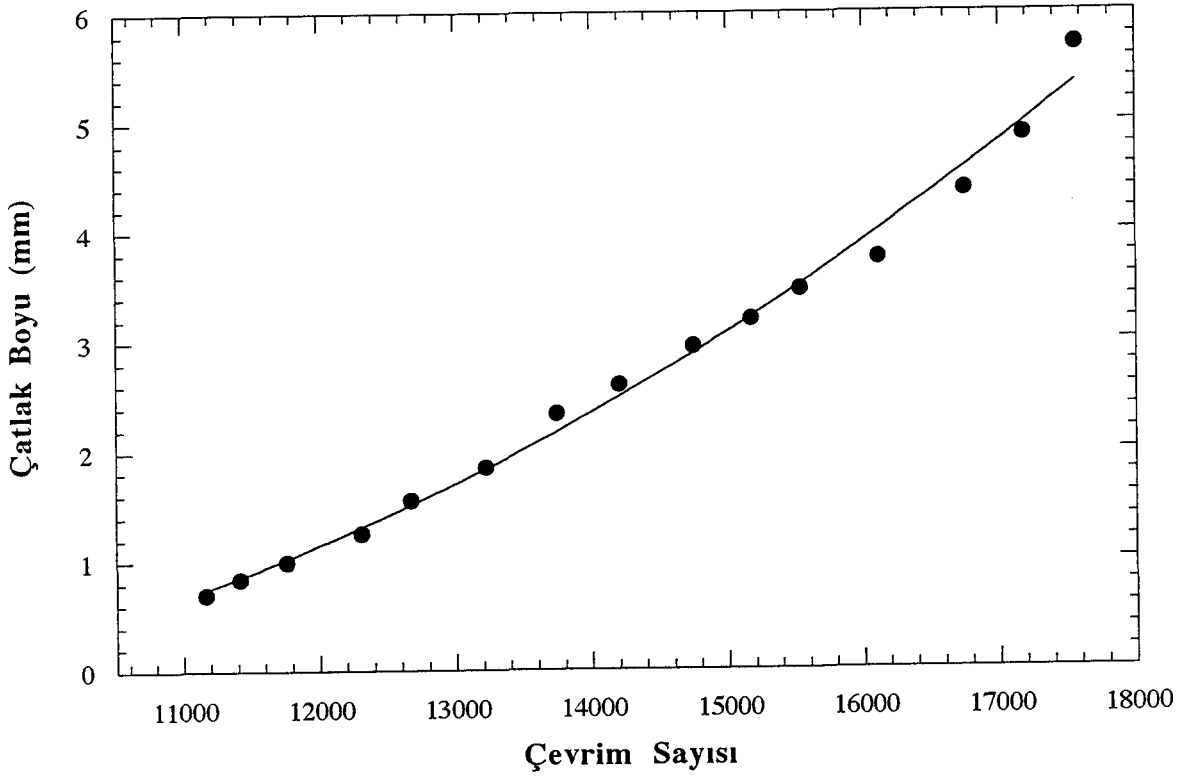


Şekil 6.26. R=0,5 oranında, 500 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi

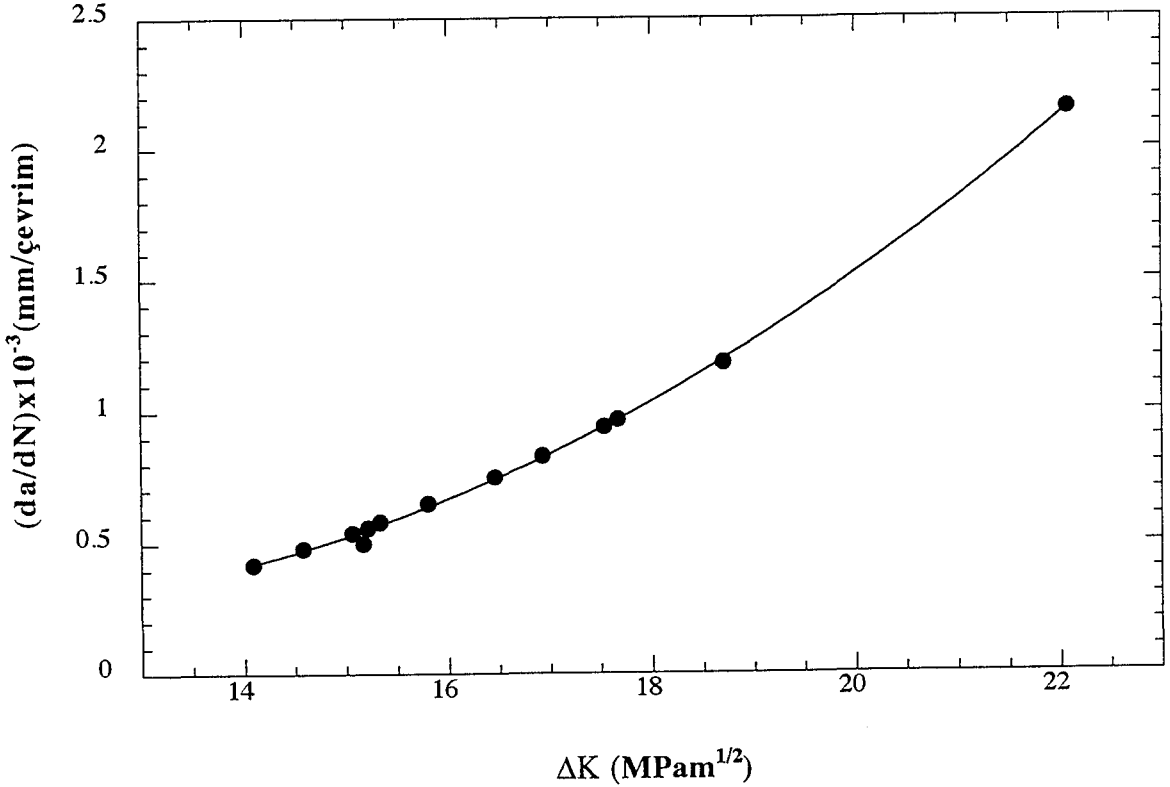




Şekil 6.27.  $R=0,5$  oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deneylerinden elde edilen yük-çevrim sayısı eğrisi



Şekil 6.28. R=0,5 oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi



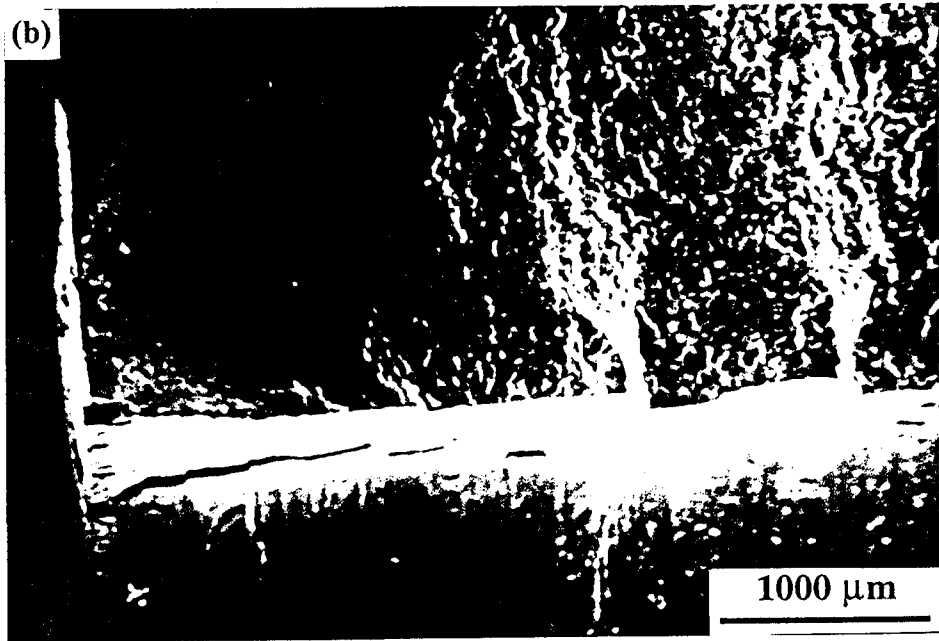
Şekil 6.29. R=0,5 oranında, 250 çevrim, yük genliği=7,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN ve 50 çevrim, yük genliği=8,5 kN, ortalama yük değeri=22,5 kN olan değişken genlikli yorulma deney sonuçlarına göre çizilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü eğrisi

## 6.5. Kırılmış Yüzeylerin Mikroyapı İncelemeleri

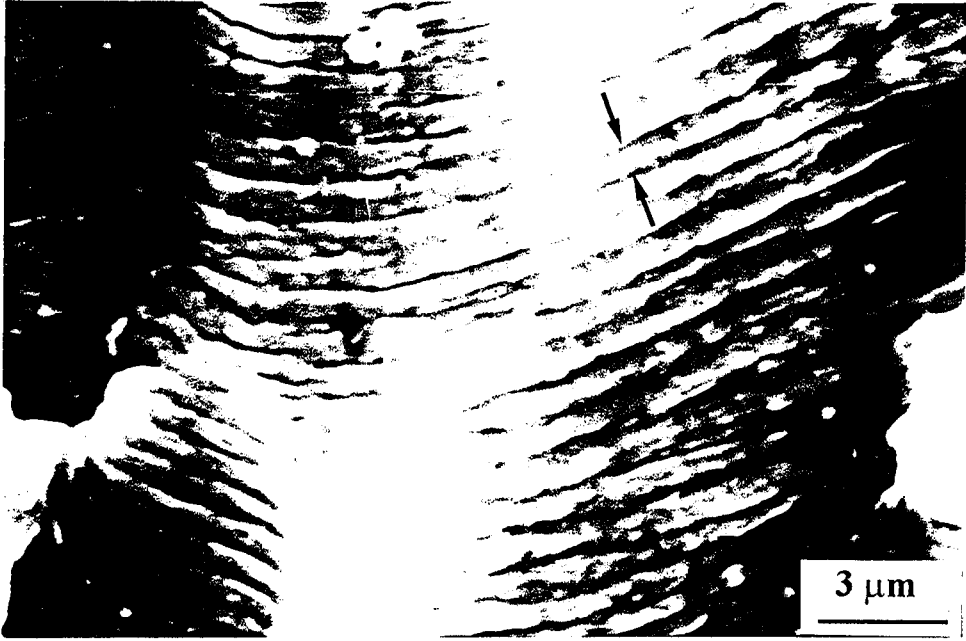
Yorulma çatlakları, uygulanan yüke ve yüzey özelliklerine bağlı olarak birden fazla noktadan başlayabilir. Şekil 6.30'da tek bir noktadan ve iki ayrı noktadan başlamış yorulma çatlakları, Şekil 6.31'de ise  $R=0,1$  oranında, sabit genlikli yüklemeye sonucu oluşmuş yorulma çizgileri görülmektedir.

Aşağıdaki mikrograflar  $R=0,1$  oranında değişken genlikli yükler altında yapılan yorulma deneyleri sonucunda oluşan kırılmış yüzeylerden elde edilmiştir. Şekil 6.32'de Şekil 6.12'de değerleri verilen yüklemeye ile oluşmuş yorulma çizgileri ve kırılma yüzeyinde matristen ayrılmış inklüzyonlar görülmektedir. Şekil 6.33'de, Şekil 6.15'de değerleri verilen yüklemeye göre son kırılma ve başlangıç bölgesine yakın yorulma çizgileri arasındaki mesafenin değişimi görülmektedir. Şekil 6.34.'de, Şekil 6.18'de değerleri verilen yüklemeye ile kenardan 500  $\mu\text{m}$  mesafede oluşan kırılma yüzeyinin genel ve detaylı görünüşü, Şekil 6.35'de ise aynı mesafede oluşmuş kayma çizgileri görülmektedir. Şekil 6.36.'da, Şekil 6.21.'de değerleri verilen yüklemeye ile kenardan 6 mm mesafede oluşmuş kırılma yüzeyinin görünüşü verilmiştir. Şekil 6.37'de, Şekil 6.18'de değerleri verilen yüklemeye altında oluşmuş düzenli ve düzensiz yorulma çizgileri görülmektedir. Şekil 6.38.'de, Şekil 6.15'de değerleri verilen yüklemeye altında oluşmuş mikro boşluklar görülmektedir. Şekil 6.39'da ise, Şekil 6.18'de değerleri verilen yüklemeye altında oluşmuş ikincil çatlaklar görülmektedir. Şekil 6.40'da Şekil 6.21'de değerleri verilen yüklemeye altında oluşmuş çatlaklar ve mikro boşluklar görülmektedir. Şekil 6.41. ve 6.42'de, Şekil 6.15. ve 6.18'de değerleri verilen yüklemeye altında oluşmuş kırık yüzeyde demir ve oksijen içeren inklüzyonlar ve bunlara ait EDX spektrumları görülmektedir. Şekil 6.43'de ise, Şekil 6.18'de değerleri verilen yüklemeye altında oluşmuş kırık yüzeydeki bakır içeren inklüzyon ve EDX spektrumu görülmektedir. Şekil 6.44'de, Şekil 6.15 ve 6.21'de değerleri verilen yüklemeye altında oluşmuş son kırılma bölgesi görülmektedir.

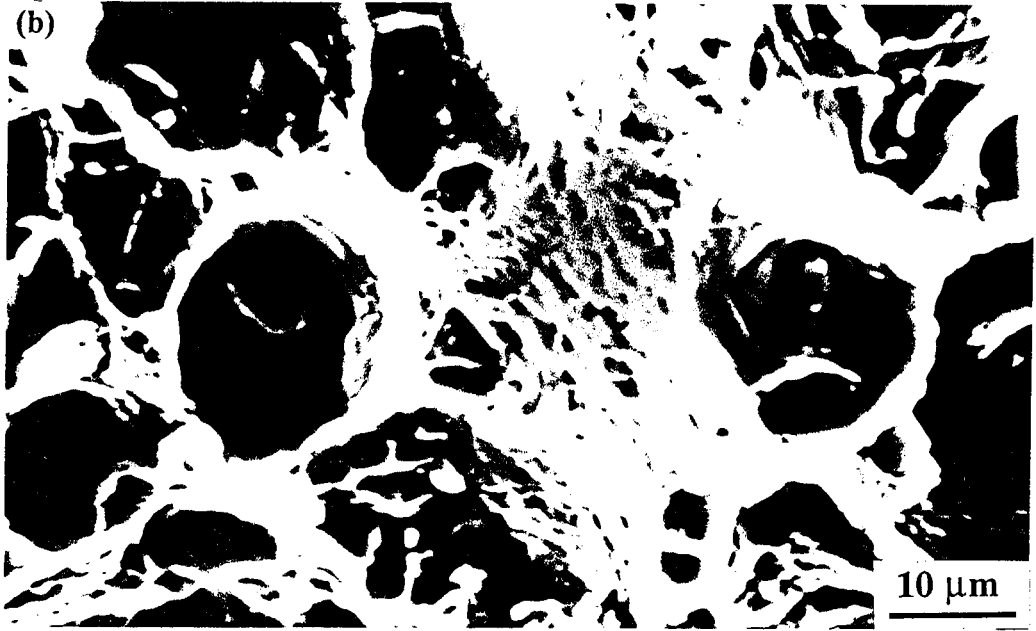
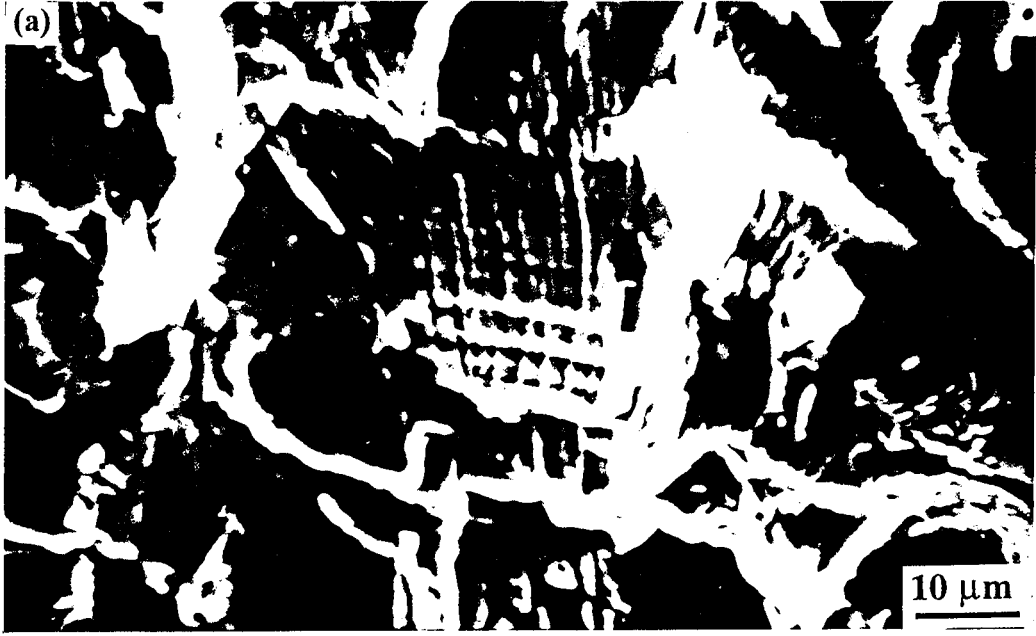
$R=0,5$  oranında, Şekil 6.45 ve 6.46 , Şekil 6.24 ve 27'de değerleri verilen yüklemeye sonucunda oluşmuş yorulma çizgileri görülmektedir. Şekil 6.47'de, Şekil 6.24'de değerleri verilen yüklemeye ile oluşmuş kırılma yüzeyi, Şekil 6.48'de ise kırılma yüzeyindeki ikincil çatlaklar ve inklüzyonlar civarında oluşmuş mikro çatlaklar, Şekil 6.49'da ise düzenli oluşmuş yorulma çizgileri görülmektedir.



Şekil 6.30. Kırılmış yüzeylerin mikroyapı incelemeleri sonucunda genelde gözlenen çatlak başlangıçları. (a) Tek bir noktadan ve (b) iki ayrı noktadan başlamış yorulma çatlakları



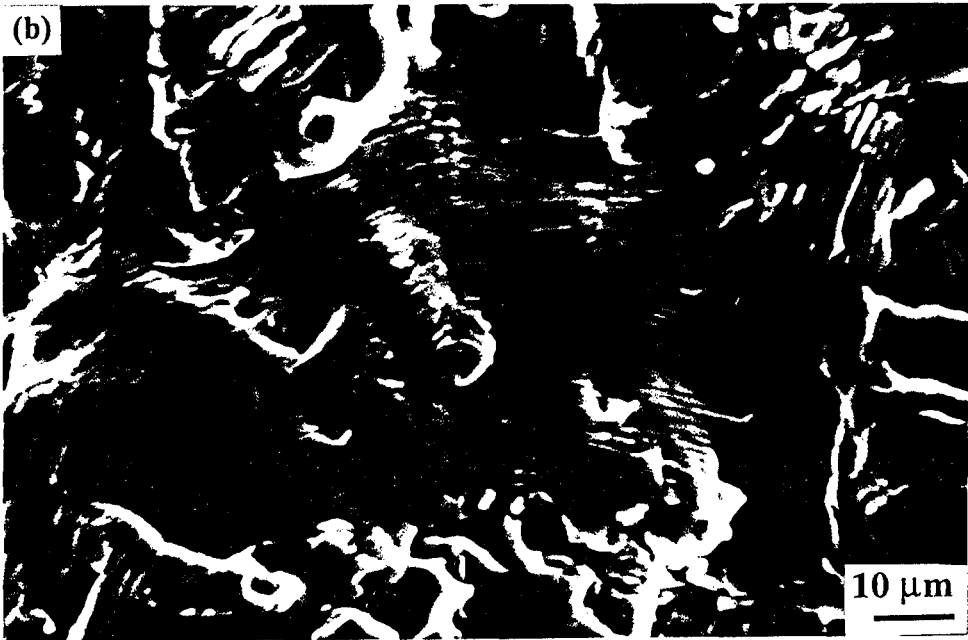
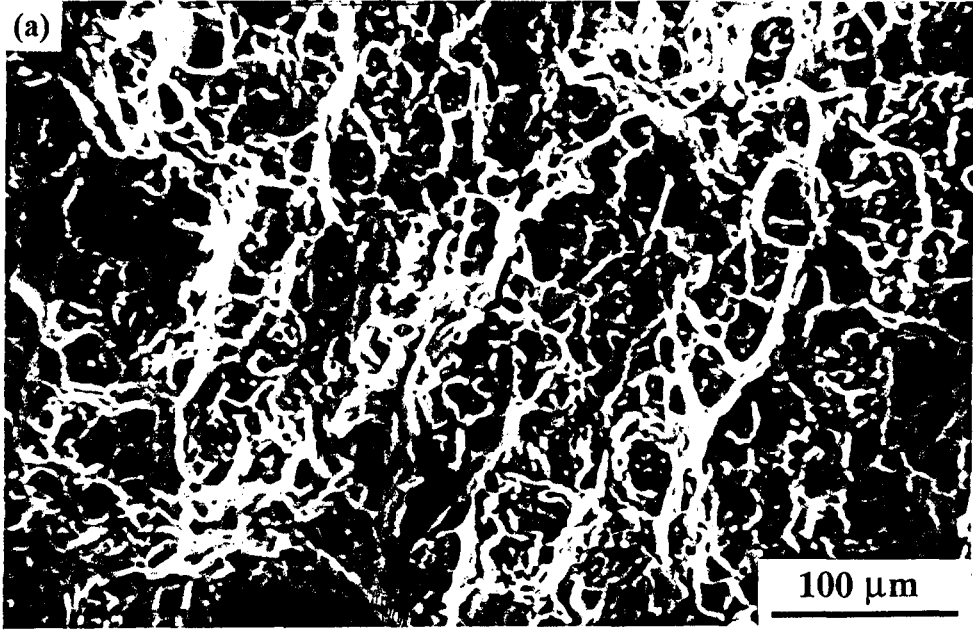
Şekil 6.31.  $R=0,1$  oranındaki  $F_{\max}=30$  kN ve  $F_{\min}=3$  kN değerleri alınarak yapılan sabit genlikli yükleme sonucu oluşmuş yorulma çizgileri



Şekil 6.32. (a)  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.12’de değerleri verilen yükleme ile oluşmuş yorulma çizgileri. (b) kırılma yüzeyinde matristen ayrılmış inklüzyonlar



Şekil 6.33.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.15'de değerleri verilen yüklemeye göre (a) son kırılma ve (b) başlangıç bölgesine yakın yorulma çizgileri arasındaki mesafenin değişimi

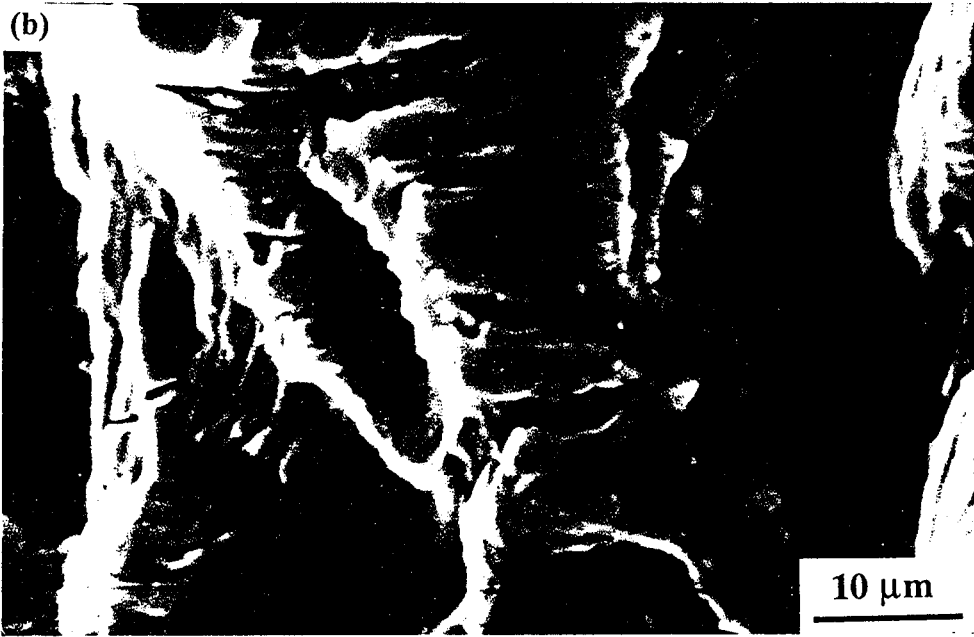
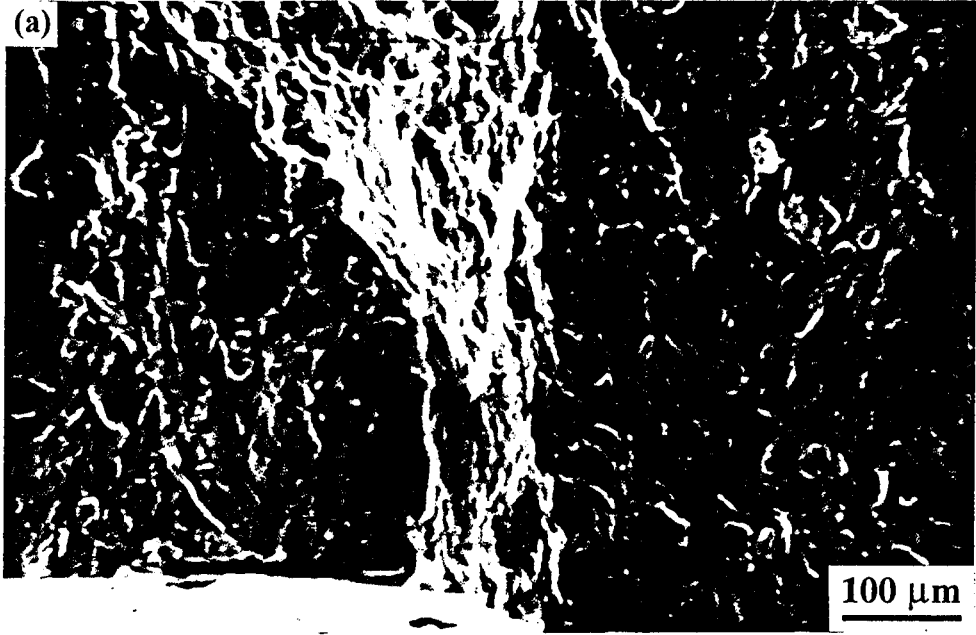


Şekil 6.34.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18'de değerleri verilen yükleme ile kenardan  $\approx 500\mu\text{m}$  mesafede oluşan kırılma yüzeyinin (a) genel (b) detaylı görünüşü

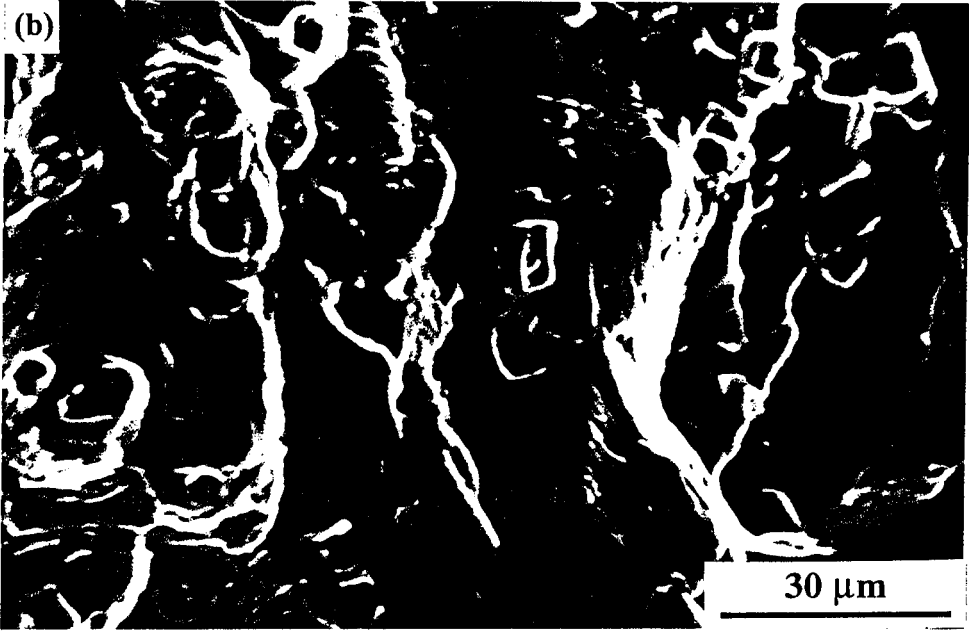




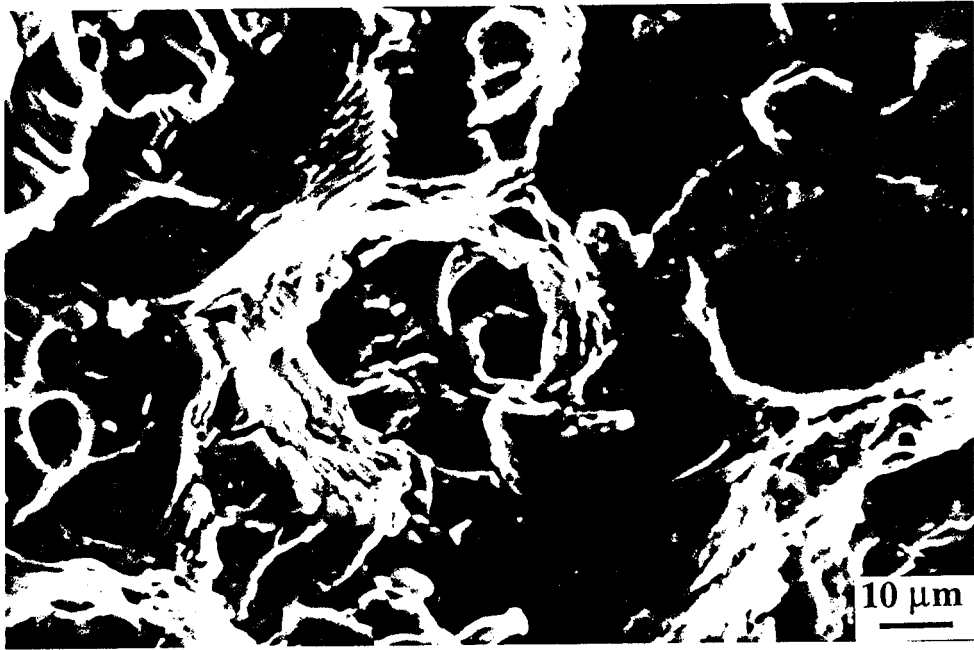
Şekil 6.35.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18'de değerleri verilen yükleme ile kenardan  $\approx 500\mu\text{m}$  mesafede oluşmuş kayma çizgileri



Şekil 6.36.  $R=0.1$  oranında, Şekil 6.21’de değeri verilen yükleme ile kenardan  $\approx 6$  mm mesafede oluşmuş kırılma yüzeyinin (a) genel ve (b) detaylı görünüşü



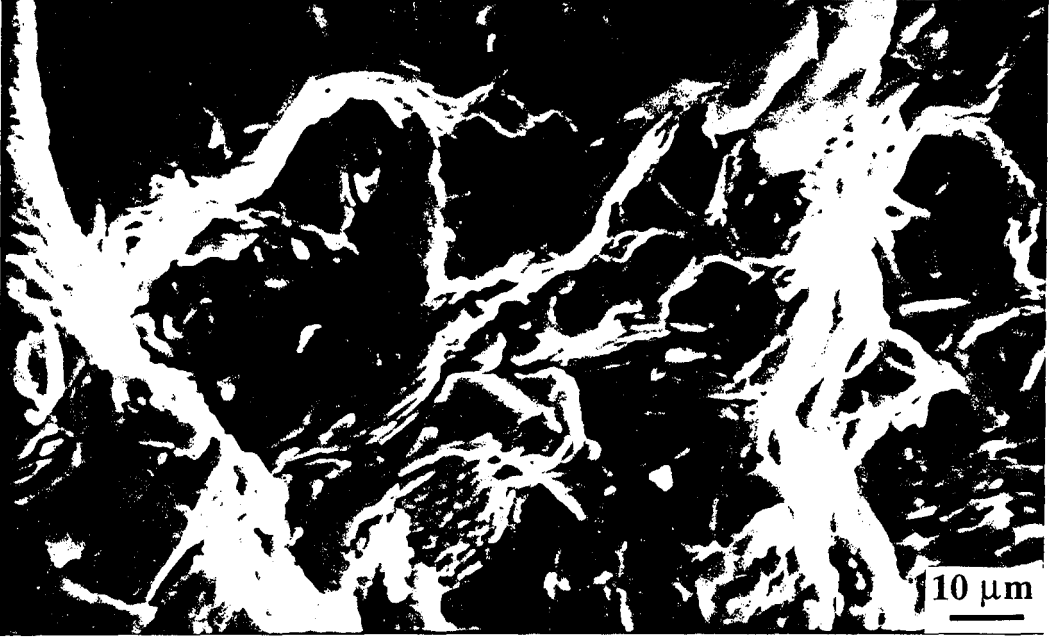
Şekil 6.37.  $R=0,1$  oranındaki Şekil 6.18'de değerleri verilen yüklemeye ile kırılma yüzeyinde oluşmuş (a) düzenli ve (b) düzensiz yorulma çizgileri



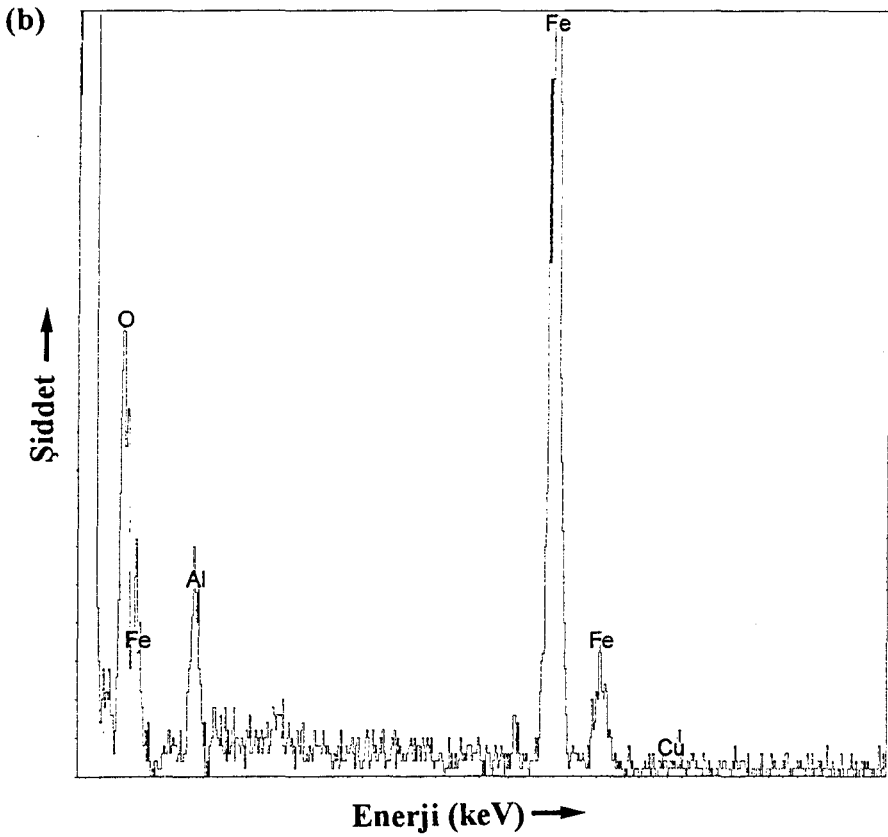
Şekil 6.38.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.15'de değerleri verilen yükleme altında oluşmuş mikro boşluklar



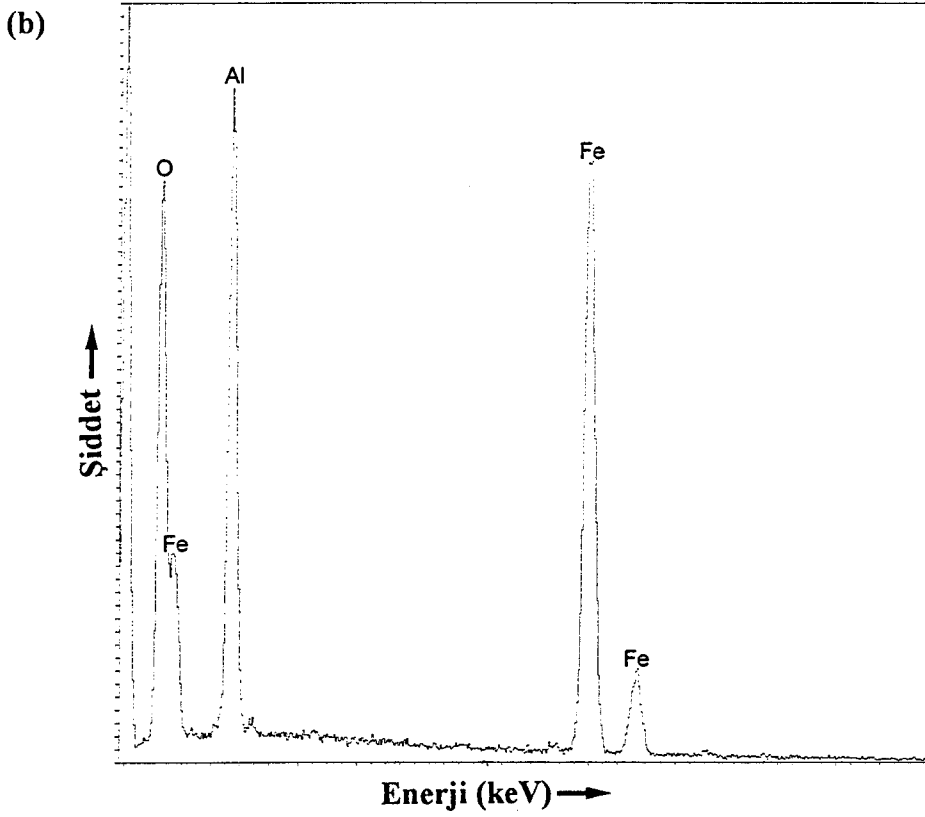
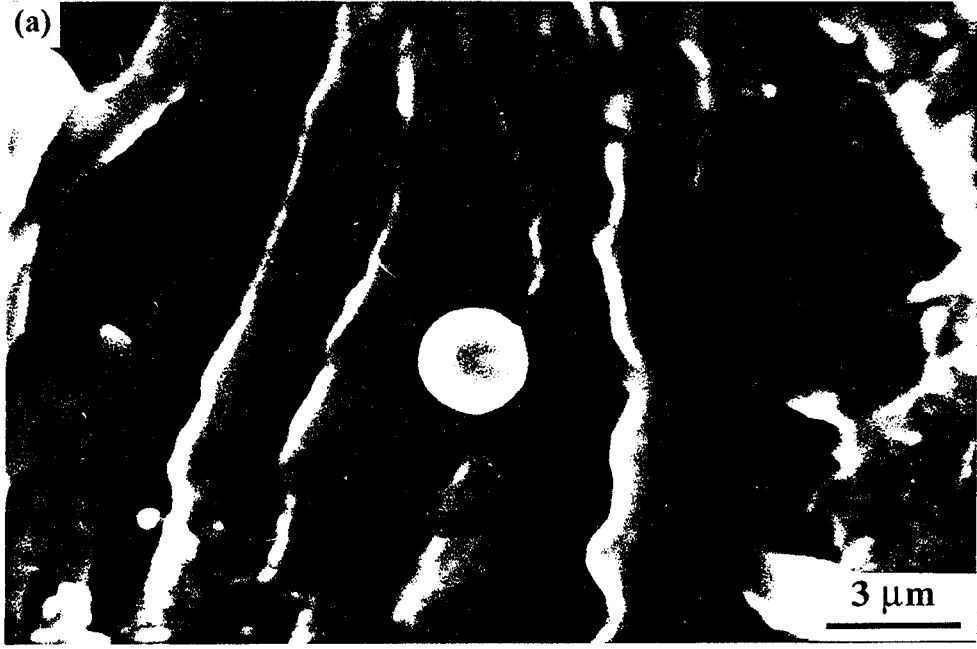
Şekil 6.39.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18'de değerleri verilen yükleme altında oluşmuş ikincil çatlaklar



Şekil 6.40.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.21'de değerleri verilen yükleme altında oluşmuş çatlaklar ve mikro boşluklar



Şekil 6.41.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.15’de verilen yük değerleri ile elde edilen kırılma yüzeyinde (a) orijinal yapıdan neredeyse tamamen ayrılmış demir ve oksijen içeren inklüzyon ve (b) bu inklüzyondan elde edilen EDX spektrumu

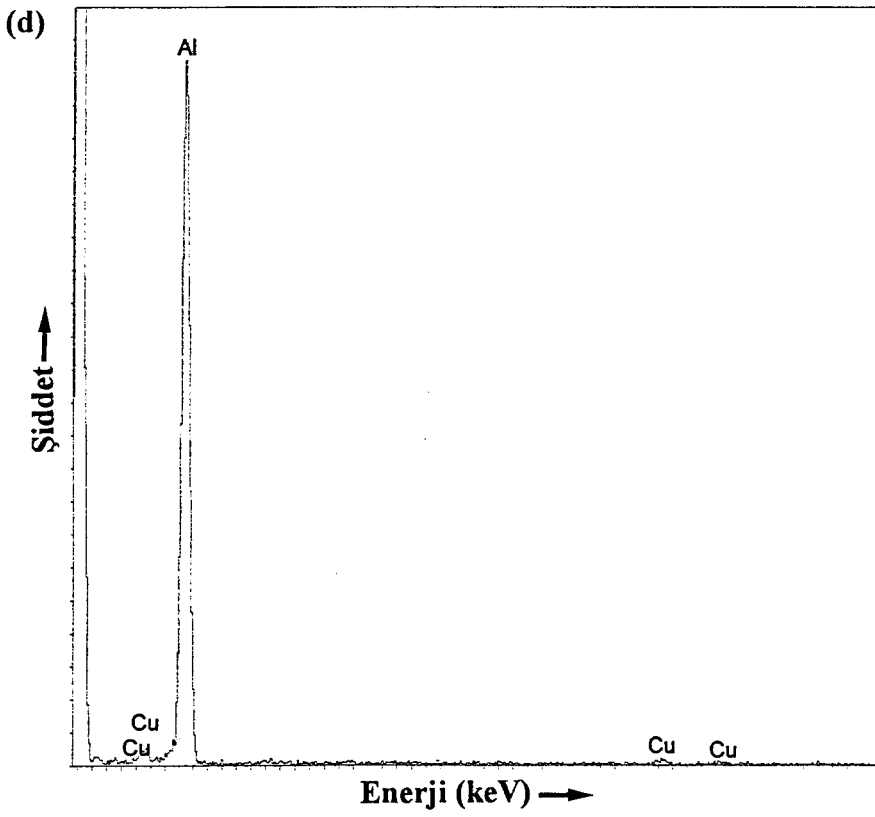
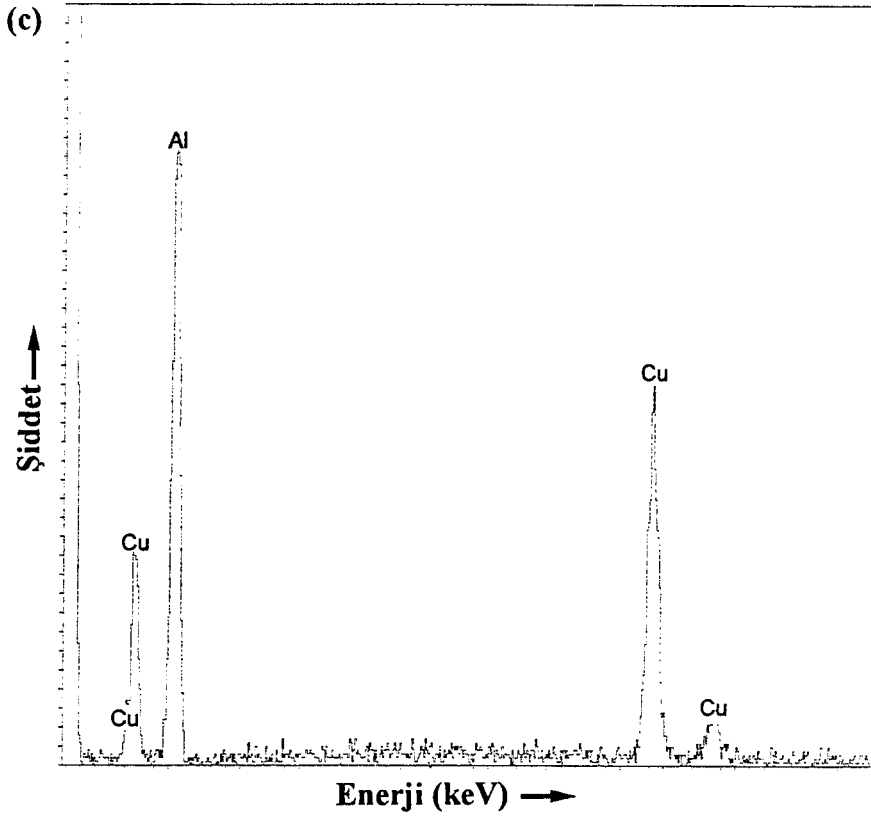


Şekil 6.42.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18'de verilen yük değerleri ile elde edilen kırılma yüzeyinde (a) orijinal yapıdan neredeyse tamamen ayrılmış demir ve oksijen içeren inklüzyon ve (b) bu inklüzyondan elde edilen EDX spektrumu

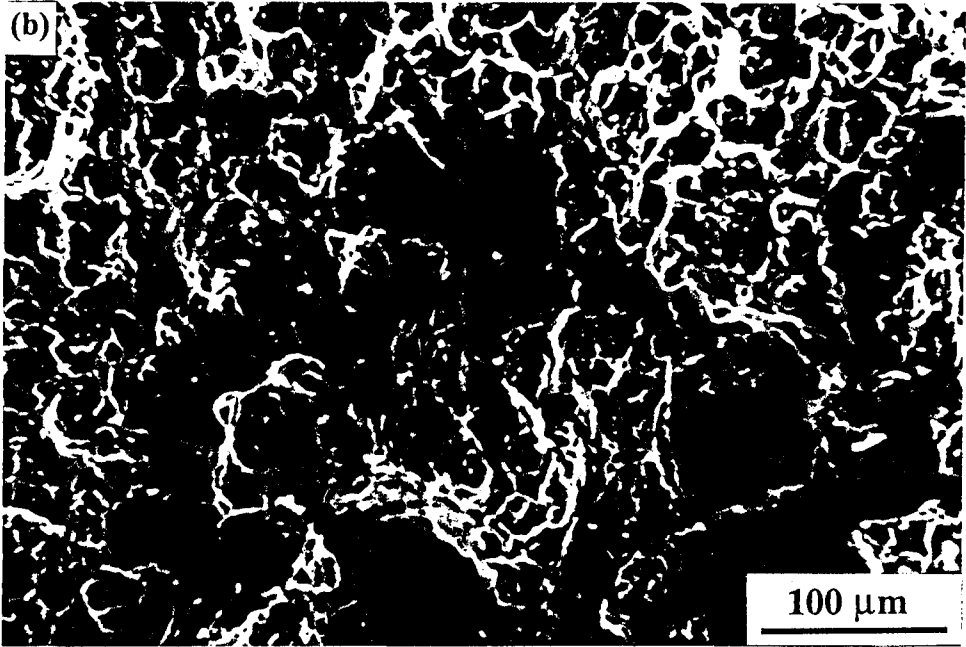
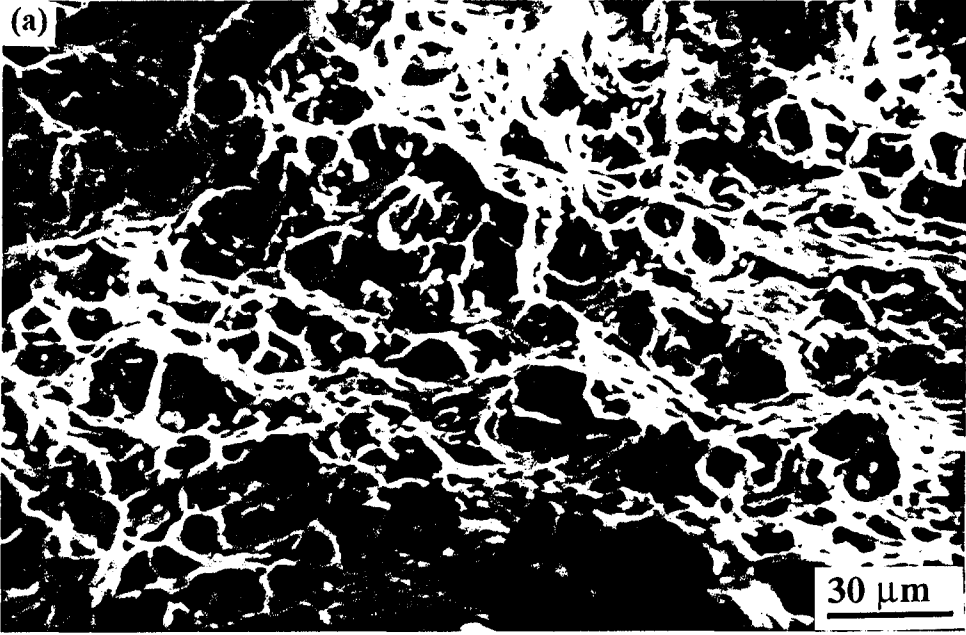


Şekil 6.43.  $R=0,1$  oranında, Şekil 6.18’de verilen yük değerleri ile elde edilen kırılma yüzeyinde bakır içeren inklüzyonlar (a ve b), bu inklüzyonlardan (c) ve matris fazından (d) elde edilen tipik EDX spektrumları (devamı arka sayfada)

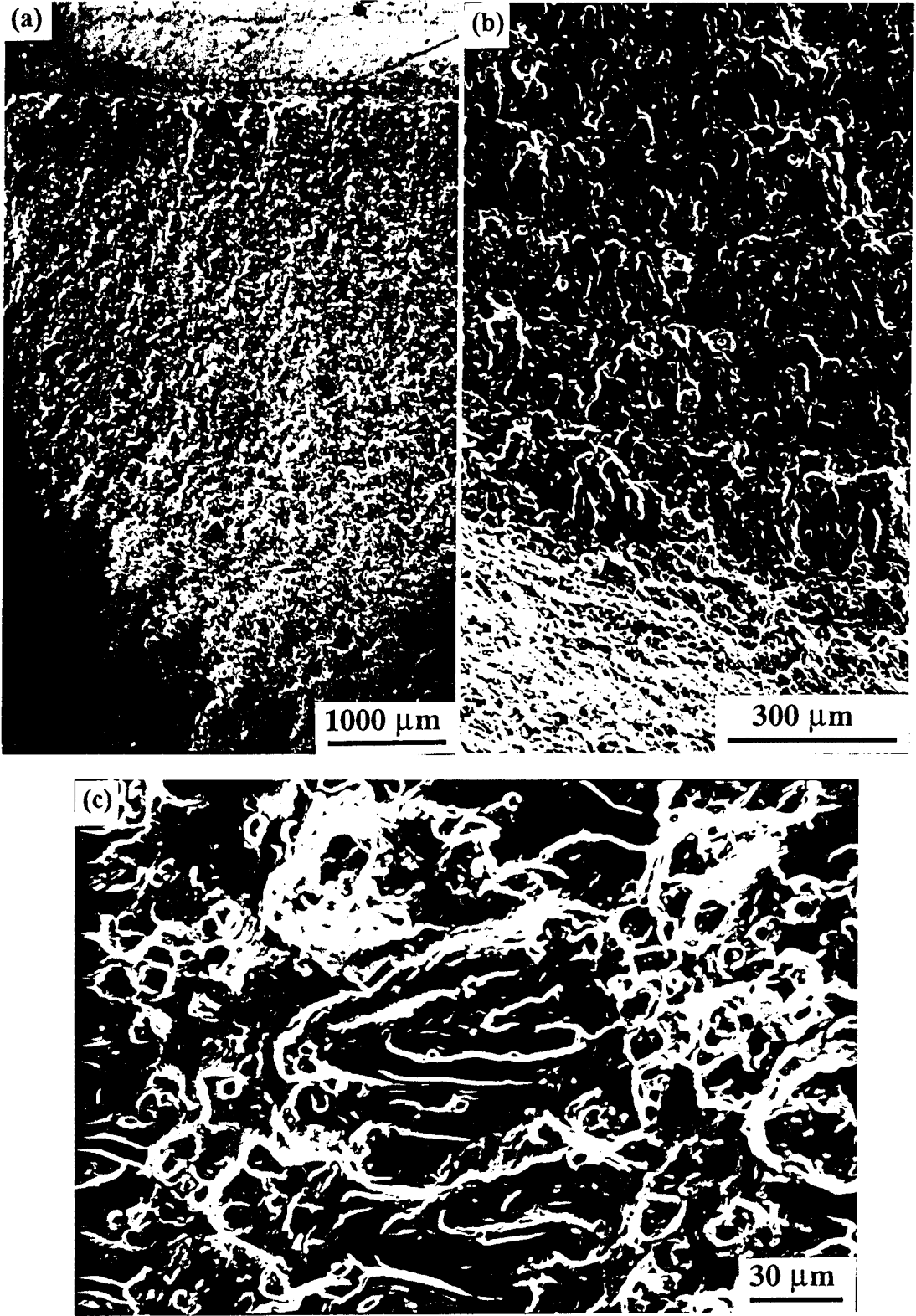




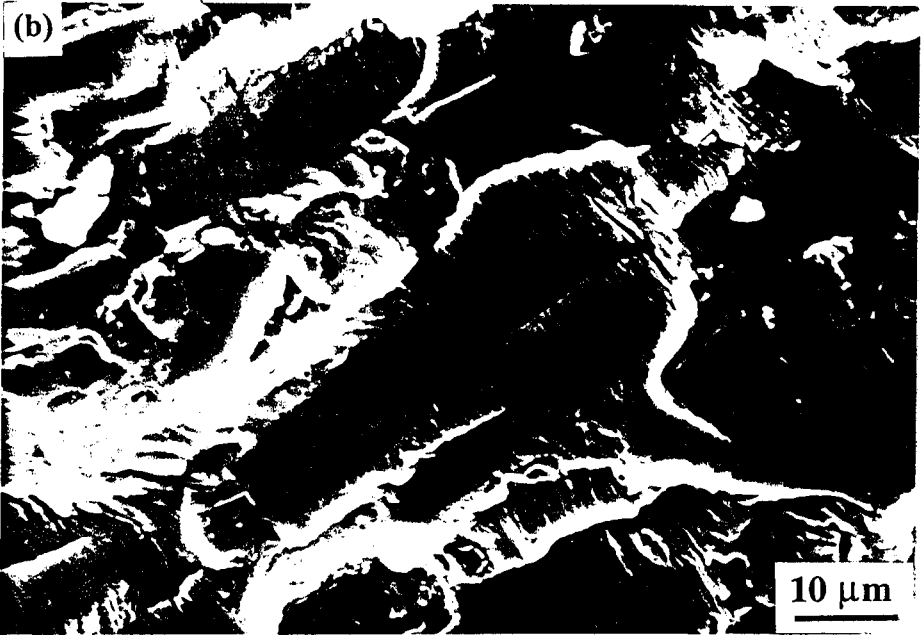
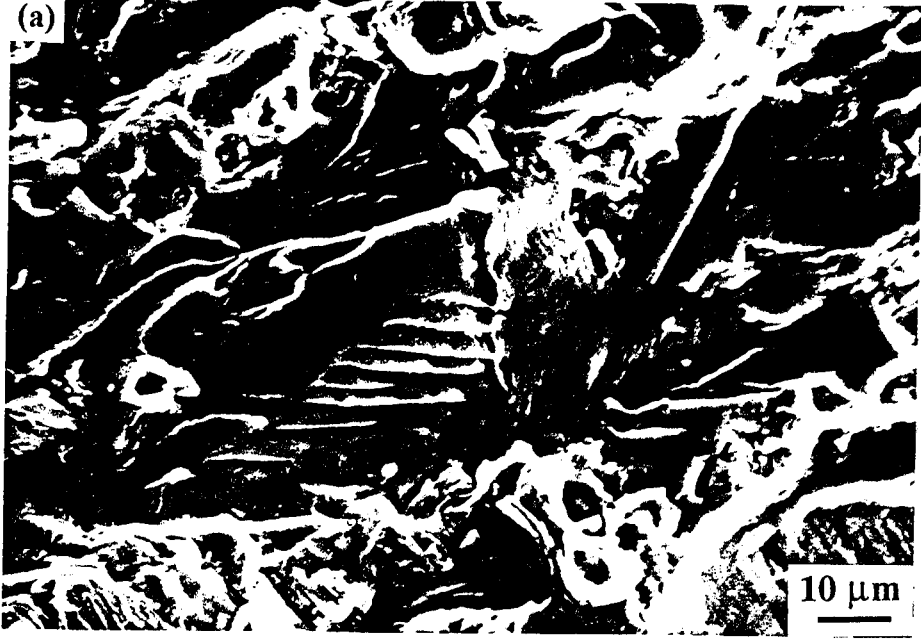
Şekil 6.43. Önceki sayfanın devamı



Şekil 6.44. (a) ve (b)  $R=0,1$  oranında, sırasıyla Şekil 6.15. ve Şekil 6.21.'de verilen yük değerleri ile elde edilen tanelerarası kırılmayı içeren son kırılma bölgeleri



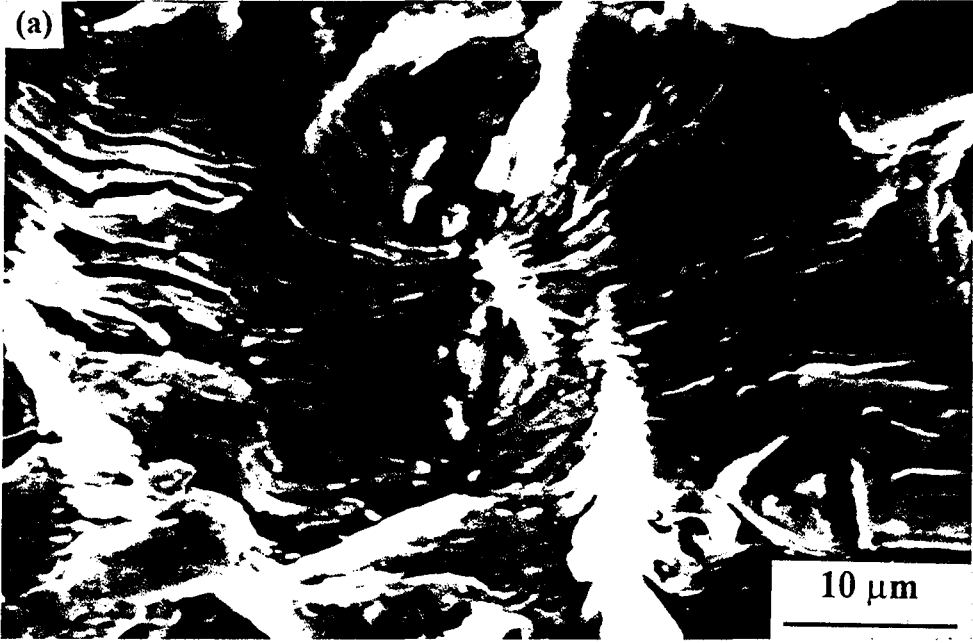
Şekil 6.45.  $R=0,5$  oranında, Şekil 6.24'de değerleri verilen yükleme ile oluşmuş ve yük değişimi gözle de görülebilen bölgenin farklı büyütmelerdeki görünüşü



Şekil 6.46.  $R=0,5$  oranında, Şekil 6.27.'de değerleri verilen yükleme ile kırılma yüzeyinde oluşmuş (a) düzenli ve (b) düzensiz yorulma çizgileri



Şekil 6.47.  $R=0,5$  oranında, Şekil 6.24'de değerleri verilen yükleme ile oluşmuş kırılma yüzeyinin iki farklı görünüşü



Şekil 6.48.  $R=0,5$  oranında, değişken genlikli yükleme altında oluşmuş (a) ikincil çatlaklar ve (b) inklüzyonlar civarında oluşmuş mikro çatlaklar



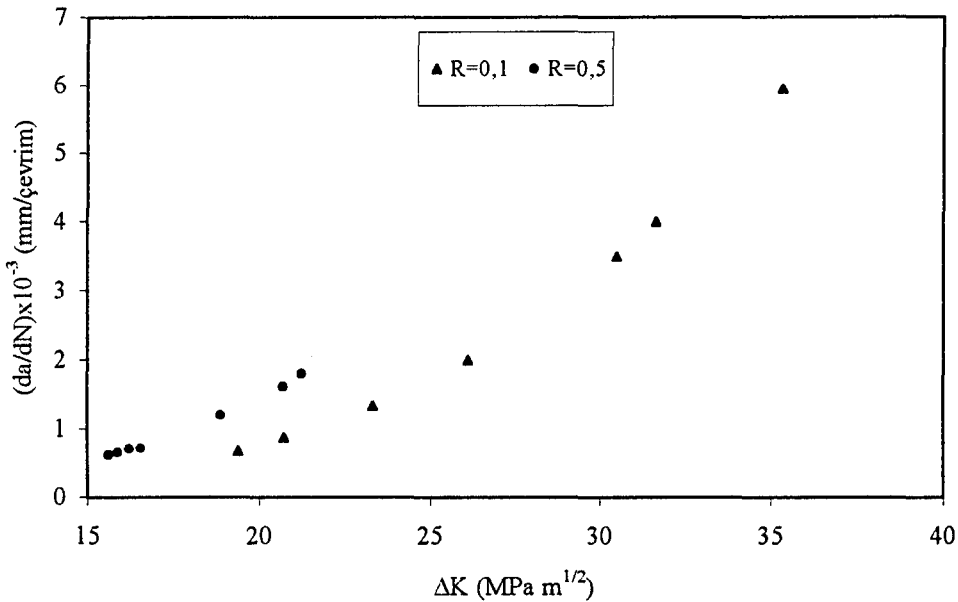
Şekil 6.49.  $R=0,5$  oranında, değişken genlikli yüklemeye sonucu oluşmuş yorulma çizgileri

## 7. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

### 7.1. Çatlak İlerlemesinin İncelenmesi

#### 7.1.1. Sabit Genlikli Yükleme

$F_{max}=30$  kN, 10 Hz frekans değerinde,  $R=0,1$  ve  $R=0,5$  oranlarında yapılan sabit genlikli yorulma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre çatlak ilerleme hızı çevrim sayısı arttıkça artmaktadır. 2024-T3 alaşımında, R oranının çatlak ilerleme hızına etkisi Şekil 7.1'de görülmektedir.



Şekil 7.1. 2024-T3 alüminyum alaşımında R oranının çatlak ilerleme hızına etkisi

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi, sabit genlikli yüklemde,  $R=0,1$  oranında yapılan deneyler sonucunda yapılan hesaplamalara göre çatlak ilerleme hızı  $0,65 \times 10^{-3}$  mm/çevrim değerinden başlayıp  $5,95 \times 10^{-3}$  mm/çevrim değerine kadar çıkmaktadır. Gerilme şiddet faktörü ise  $19,40$  MPa m<sup>1/2</sup> değerinden başlayıp  $35,35$  MPa m<sup>1/2</sup> değerine kadar çıkmaktadır.



$R=0,5$  oranında ise çatlak ilerleme hızı  $0,60 \times 10^{-3}$  mm/çevrim değerinden başlayıp  $1,60 \times 10^{-3}$  mm/çevrim değerine kadar çıkmaktadır. Gerilme şiddet faktörü ise  $15,60 \text{ MPa m}^{1/2}$  değerinden başlayıp  $20,40 \text{ MPa m}^{1/2}$  değerine kadar çıkmaktadır.

Şekil 7.1'den de görüleceği gibi, yaklaşık olarak aynı  $\Delta K$  ( $\Delta K=20,7 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) değerinde çatlak ilerleme hızı  $R=0,1$  oranında  $0,875 \times 10^{-3}$  mm/çevrim iken  $R=0,5$  oranında  $1,60 \times 10^{-3}$  mm/çevrim'dir. Aynı  $\Delta K$  değerinde,  $R=0,5$  oranında çatlak ilerleme hızı  $R=0,1$  oranındaki çatlak ilerleme hızından daha büyüktür.

$R=0,1$  oranında minimum gerilme değeri  $R=0,5$  oranına göre daha küçük olduğundan, bu değerde çatlak yüzeyler birbirine temas eder ve çatlak kapanması meydana gelir, fakat çatlak boyu büyüdükçe çatlak ilerleme hızı da artar.

$R=0,5$  oranında minimum gerilme değeri maksimum gerilmeye daha yakındır, çatlak yüzeyler birbirine temas etmez ve çatlak kapanması daha azdır. Ortalama gerilmenin büyük olmasının etkisiyle çatlak daha çabuk ilerler.

Misava ve Schijve'nin [7] 2024 alüminyum alaşımıyla  $R=-0,33$ ,  $R=0$  ve  $R=0,33$  oranlarında yaptıkları deneylerin sonuçlarına göre de  $R$  oranı arttıkça çatlak ilerleme hızı artmaktadır.

## 7.1.2. Değişken Genlikli Yükleme

### 7.1.2.1. Periyodik olarak Uygulanan Blok Basma Yüklerinin Etkisi

$R=0,1$  oranında,  $F_{\max}=30 \text{ kN}$  olmak üzere 100 çevrim çekme yükü ve  $F_{\min}=-1 \text{ kN}$  olmak üzere 10 çevrim basma yükü uygulanması sonucunda, aynı orandaki sabit genlikli yüklemeye göre çatlak ilerleme hızı değişmektedir. Çizelge 7.1'de basma yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yükleme sırasında ölçülen çatlak boyu ve çevrim sayısı değerleri, Çizelge 7.2'de ise çatlak boyu aralığı (da), çevrim sayısı aralığı (dN) ve bu değerlere göre hesaplanan çatlak ilerleme hızı (da/dN), gerilme şiddet faktör aralığı ( $\Delta K$ ) değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.1. R=0,1 oranında, basma yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yükleme ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi

Çatlak Boyu (mm)	Çevrim Sayısı
0,70	41000
1,10	41500
1,30	41700
1,46	42000
1,61	42200
1,76	42500
2,30	43000
2,40	43200
2,69	43400
3,40	44000
4,96	44650
6,20	45000

Çizelge 7.2. R=0,1 oranında, basma yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yükleme ile da, dN, da/dN ve  $\Delta K$  değerlerinin değişimi

da (mm)	dN (çevrim sayısı)	(da/dN)x10 <sup>-3</sup> (mm/çevrim)	$\Delta K$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
0,40	500	0,80	20,20
0,20	200	1,00	21,50
0,16	300	0,53	18,07
0,15	200	0,75	19,87
0,15	300	0,50	17,75
0,54	500	1,08	21,90
0,10	200	0,50	17,75
0,29	300	0,96	21,28
0,71	500	1,42	23,73
1,56	650	2,40	27,46
1,24	350	3,50	30,60

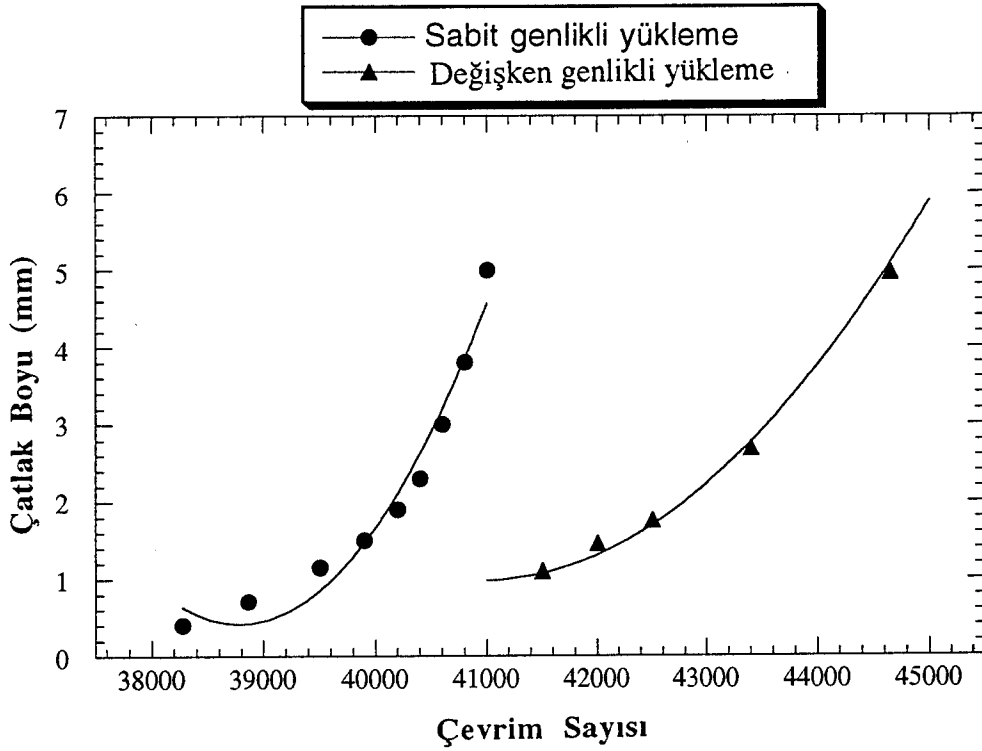
Çizelge 7.1 ve 7.2'deki değerlerden görüldüğü gibi, çatlak ilerleme hızı uygulanan yüke bağlı olarak artmaktadır. Bu artış, son 1800 çevrimde daha fazladır ve bu çevrimlerde çatlak ilerleme hızı sabit genlikli yüklemeye benzerlik göstermektedir.

Sabit genlikli yüklemeye ve periyodik olarak basma yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yüklemeye ile elde edilen çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi Şekil 7.2'de görülmektedir. Şekil 7.2'den görüleceği gibi basma yüklerinin etkisiyle parçanın yorulma ömrü sabit genlikli yüklemeye nazaran %9,75 artmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre de basma yüklerinin geciktirme etkisi 0,5 mm'den küçük çatlak boylarında daha etkilidir. Çatlak ilerlemesindeki gecikmenin nedeni basma yükleri sırasında yüzeyin geçici olarak kapanmasıyla açıklanabilir.

Uçağa yerde ve uçuş sırasında etkiyen basma yükleri az sayıda etkidiğinde, yorulma ömrü üzerinde olumsuz etkiye sahip değildir. Fakat bu etki, uygulanan basma yükünün büyüklüğüne göre değişir, eğer basma yükünün şiddeti büyükse çatlak ilerleme hızı artar [51].

Yu ve Ritchi [68] periyodik olarak basma yükünün uygulanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmanın sonucuna göre, belirli bir  $\Delta K_{th}$  değerinde durmuş olan çatlak ilerlemesi, basma yüklerinin etkisiyle yeniden başlar ve çatlak ilerleme hızı uygulanan yüke bağlıdır.

Zaiken ve Ling'in [56] yaptığı çalışmaların sonuçlarına göre; basma yükleri sonucunda çatlak ilerleme hızındaki artış oldukça küçüktür, basma yükleri çatlak ilerleme hızını artırmak yerine az miktarda da olsa geciktirebilir.



Şekil 7.2.  $R=0,1$  oranında, sabit genlikli yükleme ve Şekil 6.12'de değerleri verilen değişken genlikli yükleme etkisiyle çatlak boyu-çevrim sayısı değişimi

#### 7.1.2.2. $R=0,1$ Oranında Periyodik Olarak Uygulanan Aşırı Blok Çekme Yüklerinin Etkisi

Çizelge 7.3'de,  $R=0,1$  oranında, her 5000 çevrimden sonra 100 çevrim aşırı blok çekme yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yükleme sırasında ölçülen çatlak boyu ve çevrim sayısı değerleri, Çizelge 7.4'de ise, çatlak boyu aralığı (da), çevrim sayısı aralığı (dN) ve bu değerlere göre hesaplanan çatlak ilerleme hızı (da/dN) ve gerilme şiddet faktör aralığı ( $\Delta K$ ) değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.3. R=0,1 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (5000+100 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi

Çatlak Boyu (mm)	Çevrim Sayısı
0,50	55000
0,70	55700
1,30	56100
1,40	56400
1,60	56770
1,90	57090
2,30	57400
2,70	57700
3,10	57950
3,70	58300
4,28	58600
5,20	59000
6,12	59300

Çizelge 7.4. R=0,1 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (5000+100 çevrim) ile da, dN, da/dN ve  $\Delta K$  değerlerinin değişimi

da (mm)	dN (çevrim sayısı)	(da/dN)x10 <sup>-3</sup> (mm/çevrim)	$\Delta K$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
0,20	700	0,28	15,20
0,60	400	1,50	24,00
0,10	300	0,30	15,86
0,20	370	0,54	18,10
0,30	320	0,93	21,14
0,40	310	1,29	23,11
0,40	300	1,33	23,32
0,40	250	1,60	24,53
0,60	350	1,70	25,00
0,58	300	1,93	25,86
0,92	400	2,30	27,14
0,92	300	3,06	29,39

Çizelge 7.3 ve 7.4'deki değerlerden görüldüğü gibi aşırı blok çekme yükünün uygulanması çatlak ilerleme hızını etkilemektedir. Aşırı blok çekme yükü uygulandığında çatlak ilerleme hızı 0,0015 mm/çevrim'e çıkmaktadır, fakat aşırı yüklemeyi takiben kademeli olarak 0,0003 mm/çevrim'e kadar düşmekte sonraki çevrimlerde çatlak ilerleme hızı kademeli olarak artarak 0,00054 mm/çevrim ve daha sonra da 0,00093 mm/çevrim hızına çıkmaktadır. Aşırı yük uygulanmasıyla parçanın yorulma ömrü sabit genlikli yüklemeye göre %39,35 artmıştır.

Çizelge 7.5'de,  $R=0,1$  oranında, her 2500 çevrimden sonra aşırı blok çekme yükü uygulanarak yapılan deneylerde ölçülen çatlak boyu ve çevrim sayısı değerleri, Çizelge 7.6'de ise, çatlak boyu aralığı (da), çevrim sayısı aralığı (dN) ve bu değerlere göre hesaplanan çatlak ilerleme hızı (da/dN), gerilme şiddet faktör aralığı ( $\Delta K$ ) değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.5.  $R=0,1$  oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (2500+100 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi

Çatlak Boyu (mm)	Çevrim Sayısı
0,30	60000
0,40	61000
0,50	62200
0,80	62500
1,30	63000
1,40	63200
2,20	63800
2,50	64365
2,90	65100
3,50	65500
3,90	65900
4,70	66456
6,00	66714

Çizelge 7.6. R=0,1 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (2500+100 çevrim) ile da, dN, da/dN ve  $\Delta K$  değerlerinin değişimi

da (mm)	dN (çevrim sayısı)	(da/dN) $\times 10^{-3}$ (mm/çevrim)	$\Delta K$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
0,10	1000	0,10	11,35
0,10	1200	0,083	10,79
0,30	300	1,00	21,53
0,10	200	0,50	17,75
0,80	600	1,33	23,32
0,30	565	0,53	18,05
0,40	735	0,54	18,10
0,60	400	1,50	24,09
0,40	400	1,60	21,53
0,80	556	1,40	23,80

Çizelge 7.5 ve 7.6'da görüldüğü gibi, aşırı blok yük uygulandığında çatlak ilerleme hızı 0,0013 mm/çevrim'e çıkmaktadır, fakat aşırı yüklemeyi takiben 0,00053 mm/çevrim'e düşmekte sonraki çevrimlerde tekrar artmaktadır. Parçanın yorulma ömrü ise sabit genlikli yüklemeye göre % 61 artmıştır

Çizelge 7.7'de, R=0,1 oranında, her 1200 çevrimden sonra aşırı blok çekme yükünün uygulandığı değişken genlikli yükleme sırasında ölçülen çatlak boyu ve çevrim sayısı değerleri, Çizelge 7.8'da ise, çatlak boyu aralığı (da), çevrim sayısı aralığı (dN) ve bu değerlere göre hesaplanan çatlak ilerleme hızı (da/dN), gerilme şiddet faktör aralığı ( $\Delta K$ ) değerleri görülmektedir.

Çizelge 7.7. R=0,1 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (1200+100 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi

Çatlak Boyu, a, (mm)	Çevrim Sayısı (N)
0,70	47000
1,00	47650
1,20	48000
1,40	48340
1,50	48630
1,60	49200
2,00	49660
2,09	50120
2,31	50420
2,65	50800
2,80	51270
3,00	51750
3,40	52370
4,46	53130
5,60	53750
6,55	54070

Çizelge 7.7'deki değerlere göre çatlak boyu çevrim sayısı arttıkça artmaktadır. Çatlak boyu arttıkça çatlak ilerleme hızı da artmaktadır. Bu artış son 1730 çevrimde oldukça fazladır.

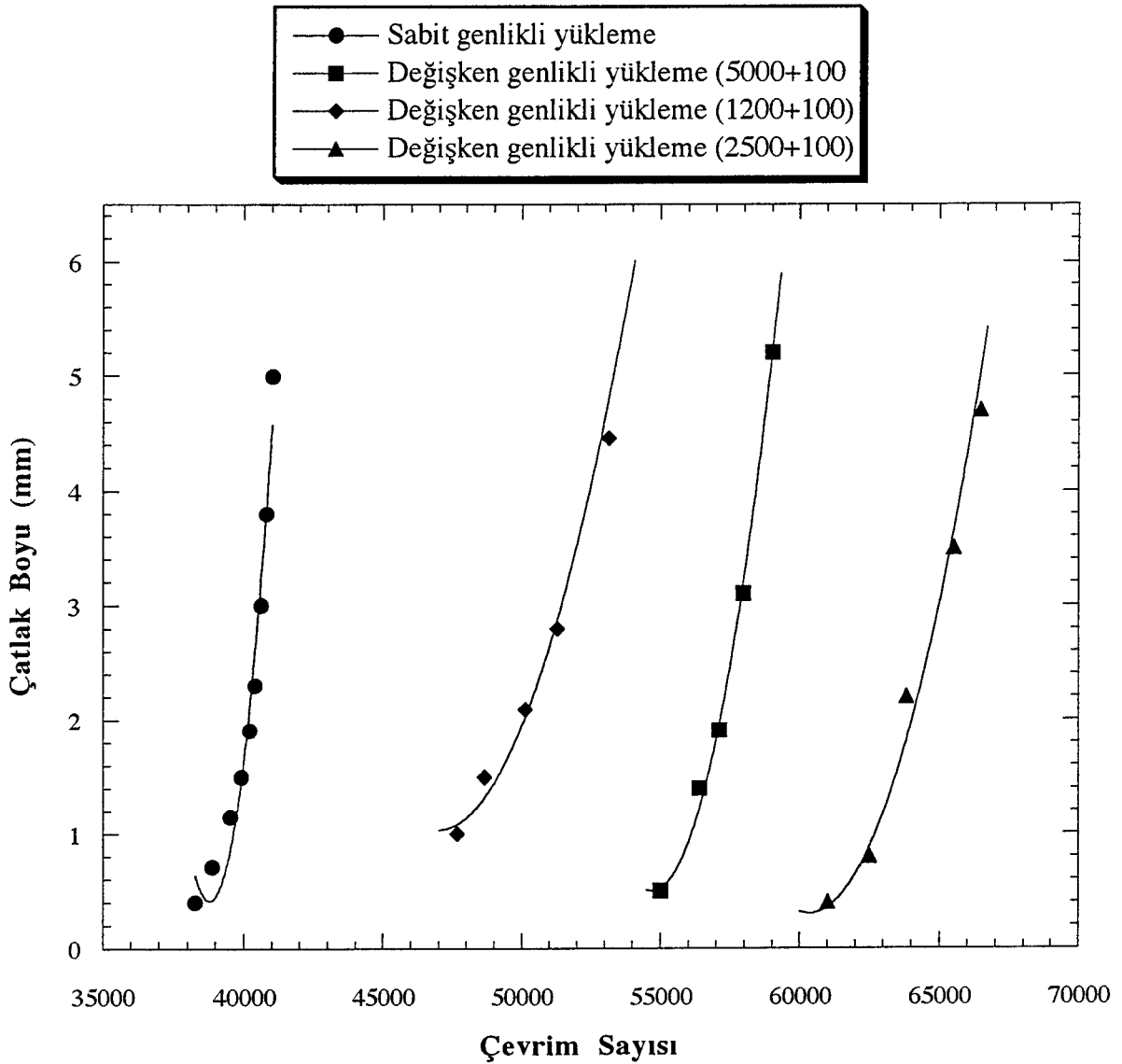


Çizelge 7.8. R=0,1 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (1200+100 çevrim) ile da, dN, da/dN ve  $\Delta K$  değerlerinin değişimi

da (mm)	dN (çevrim sayısı)	(da/dN)x10 <sup>-3</sup> (mm/çevrim)	$\Delta K$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
0,30	650	0,46	17,36
0,20	350	0,57	18,40
0,20	340	0,58	18,57
0,10	290	0,34	16
0,11	570	0,19	13,62
0,39	460	0,84	20,56
0,09	460	0,19	13,67
0,22	300	0,73	19,75
0,34	380	0,89	20,87
0,15	470	0,32	15,67
0,20	480	0,41	16,87
0,40	620	0,64	19,06
1,06	760	1,39	23,61
1,14	620	1,83	25,50
0,95	320	2,96	29,13

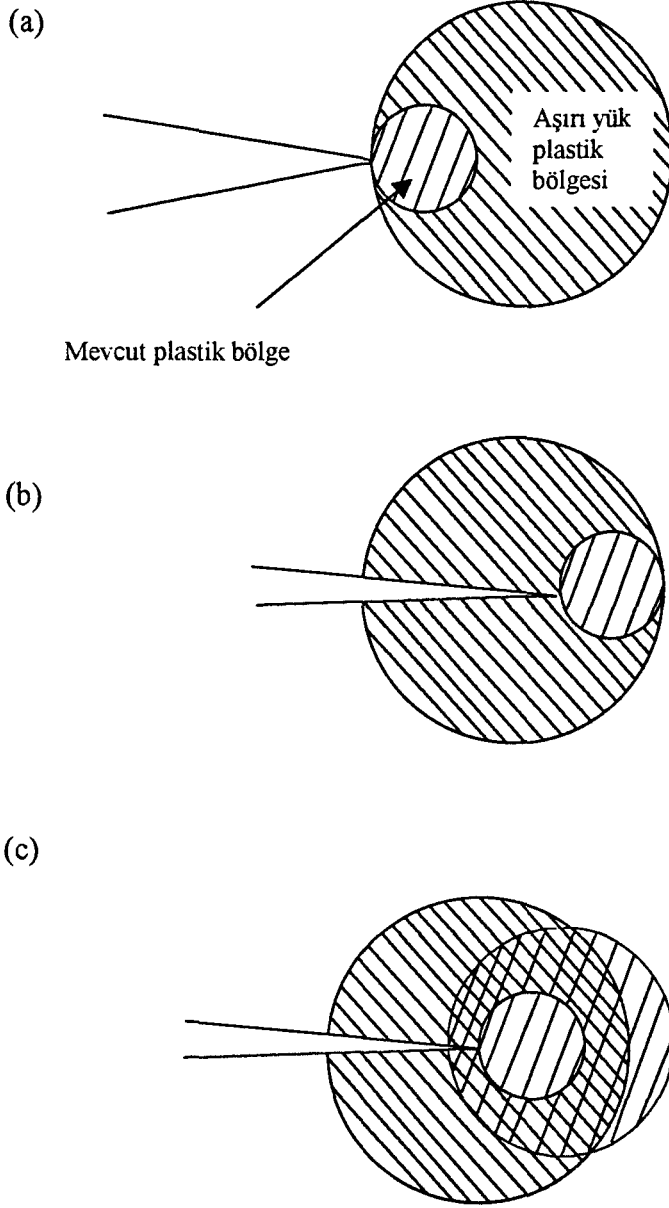
Çizelge 7.8'deki değerlere göre, aşırı blok yük uygulandığında çatlak ilerleme hızı 0,00089 mm/çevrim'e çıkmaktadır, fakat aşırı yüklemeyi takiben 0,00019 mm/çevrim'e düşmekte sonraki çevrimlerde tekrar artmaktadır. Parçanın yorulma ömrü ise sabit genlikli yüklemeye göre % 32 artmıştır

Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Şekil 7.3.'de sabit ve değişken genlikli yüklemelere göre çatlak boyu-çevrim sayısı eğrisi verilmiştir.



Şekil 7.3. R=0,1 oranında sabit genlikli ve R=0,1 oranında değişken genlikli yüklemeye etkisiyle çevrim sayısı-çatlak boyu değişimi

Şekil 7.3'deki eğrilere göre sabit genlikli yüklemeye kıyasla değişken genlikli yüklemeler sonucu çatlak ilerlemesi gecikmiştir. Değişken genlikli yüklemelerde çatlak ilerlemesindeki gecikmenin nedeni, çatlak ucunda var olan plastik bölgenin üzerine aşırı yüklemeye sonucu meydana gelen ikinci plastik bölgenin etkisidir (Şekil 7.4.(a), (b)). Çatlağın bu bölgede ilerleyebilmesi için daha yüksek gerilmeye veya daha fazla çevrim sayısına ihtiyaç vardır. Çatlak, birinci aşırı yük plastik bölgesinin etkisindeyken ikinci aşırı yük plastik bölgesinin oluşumu çatlak ilerlemesini daha da geciktirir (Şekil 7.4.(c)).

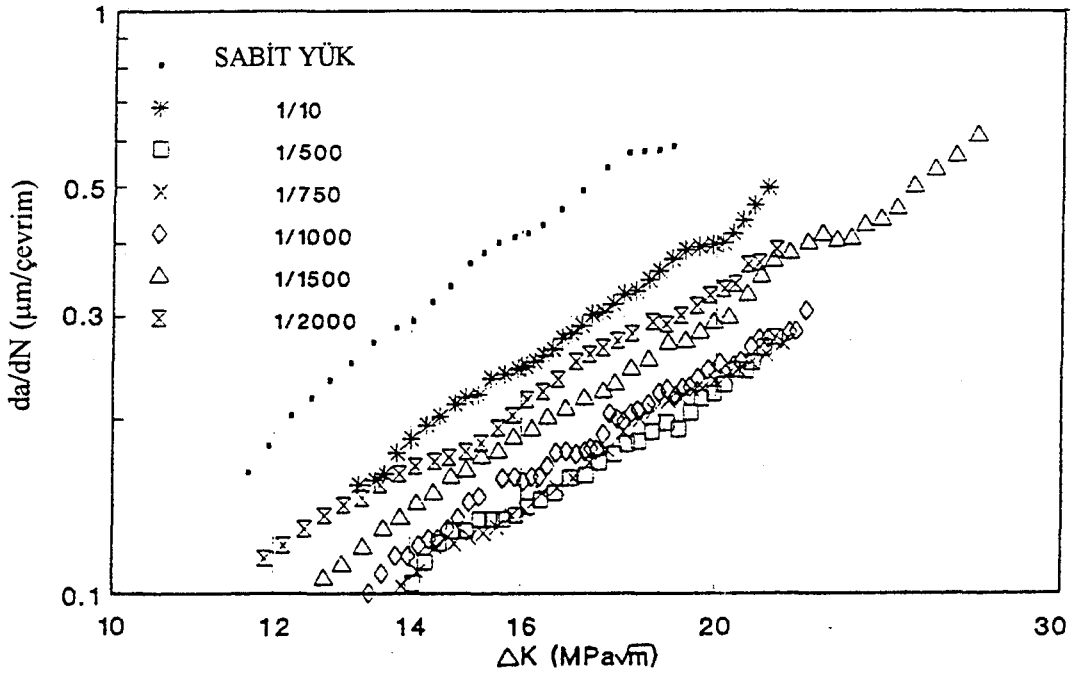


Şekil 7.4. Uygulanan aşırı yük ile çatlak ilerlemesi arasındaki ilişki [25]

- (a) Aşırı yük uygulandıktan hemen sonra oluşan aşırı yük plastik bölgesi
- (b) Çatlağın aşırı yük plastik bölgesi boyunca ilerlemesi
- (c) Çatlak, birinci aşırı yük plastik bölgesindeyken ikinci aşırı yük plastik bölgesinin oluşması

Yapılan değişken genlikli deneylerde, farklı aralıklarda uygulanan aşırı blok çekme yükleri uygulanmasıyla çatlak ilerlemede meydana gelen gecikmelerde farklılık göstermektedir. Çatlak ilerlemedeki gecikmedeki bu farklılık periyodik olarak uygulanan tek aşırı yük için şu şekilde açıklanmıştır.

Tür ve Vardar [55], 2024 T3 alaşımına periyodik olarak tek aşırı yük uygulayarak değişken genlikli yorulma deneyleri yapmışlardır.  $R=0,1$  oranında, her 2000, 1500, 1000, 750, 500 ve 10 çevrimde bir periyodik olarak tek aşırı yük (1/2000, 1/1500, 1/1000, 1/750, 1/500, 1/10) uygulamışlardır. Bu deneylerin sonucunda elde edilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü değişimi Şekil 7.5’de görülmektedir.



Şekil 7.5. Periyodik olarak aşırı yük uygulanmasına bağlı olarak çatlak ilerleme hızının değişimi

Şekil 7.5 incelendiğinde, sabit genlikli yüklemeye göre, periyodik olarak tek aşırı yük uygulanan değişken genlikli yüklemelerde çatlak ilerlemede

geciktığı görülmektedir. Çatlak ilerlemesinde en fazla gecikme 500 ve 750 çevrimde bir uygulanan aşırı yükleme sonucu görülmüştür. Yaptıkları çalışmaların sonuçlarına göre de çatlak ilerlemesinde ( $\Delta a$ ) en fazla gecikme, çatlak, aşırı yük nedeniyle oluşan plastik bölgenin % 20'si kadar uzadığında ikinci aşırı yükün uygulanmasıyla meydana gelmektedir ( $\Delta a = \%20 \times \text{plastik bölge boyutu}$ ). Mills ve Hertzberg [55], 2024-T3 alaşımı için, bu oranı %25 olarak bulmuşlardır.

Tek aşırı yük uygulandığında meydana gelen gecikme benzer olarak blok aşırı yük uygulandığında da meydana gelmektedir. Bizim deney şartlarımızda, deney sırasında çatlak ilerlemesini ölçmek mümkün olmadığından çatlağın plastik bölge içinde ne kadar ilerlediğini hesaplamak güçtür.

Uygulanan aşırı yükler sonucu çatlak ilerlemesindeki gecikme meydana gelmektedir. Çatlak ilerlemesindeki gecikme kısa çatlak boylarında daha fazla etkilidir. Çatlak belirli bir uzunluğa geldikten sonra sabit genlikli yüklemeyle benzerlik göstererek hızla ilerlemektedir. Şekil 7.3'de görüleceği gibi değişken genlikli yüklerde çatlak makro boyutta ilerlemeye daha geç çevrim sayılarında başlamıştır.

Özellikle çentikli parçalarda, periyodik aşırı yüklerin etkilerinin incelenmesi havacılıkta oldukça yaygındır. Bu çalışmalardan bir tanesi, aşırı yüklemeye sonra düşük genlikli yükleme yapılması ve daha yüksek genlikli yükleme yapılması durumunda çatlak ilerleme hızının değişimi incelenmesidir. [70].

### **7.1.2.3. R=0,5 Oranında Periyodik Olarak Uygulanan Aşırı Blok Çekme Yüklerinin Etkisi**

R=0,1 oranında uygulanan değişken genlikli yükler sonucunda çatlak ilerleme davranışının karşılaştırılabilmesi amacıyla R=0,5 oranındaki yükleme, R=0,1 oranındaki yüklemeyle benzer olarak yapılmıştır.

Her 500 ve 250 çevrimde bir 50 çevrim aşırı blok çekme yükü uygulanmıştır. Çizelge 7.9'da,  $R=0,5$  oranında, her 500 çevrimden sonra 50 çevrim aşırı blok çekme yükü uygulandığı değişken genlikli yükleme sırasında ölçülen çatlak boyu ve çevrim sayısı değerleri, Çizelge 7.10'da ise, çatlak boyu aralığı (da), çevrim sayısı aralığı (dN) ve bu değerlere göre hesaplanan çatlak ilerleme hızı (da/dN), gerilme şiddet faktör aralığı ( $\Delta K$ ) görülmektedir.

Çizelge 7.9.  $R=0,5$  oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (500+50 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi

Çatlak Boyu (mm)	Çevrim Sayısı
0,70	13800
0,75	14130
0,80	14350
1,00	14900
1,20	15080
1,50	15420
1,90	15800
2,15	16330
2,74	17230
3,53	18150
4,54	18780
5,50	19260

Çizelge 7.9'daki değerler incelendiğinde çatlak boyu, çevrim sayısı arttıkça artmaktadır. Bu artış kırılmaya yakın çok fazladır.

Çizelge 7.10. R=0,5 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (500+50 çevrim) ile da, dN, da/dN ve  $\Delta K$  değerlerinin değişimi

da (mm)	dN (çevrim sayısı)	(da/dN)x10 <sup>-3</sup> (mm/çevrim)	$\Delta K$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
0,05	330	0,15	10,56
0,05	220	0,22	11,82
0,20	550	0,36	13,47
0,20	180	1,11	18,37
0,30	340	0,88	17,23
0,40	380	1,05	18,10
0,25	530	0,47	14,48
0,59	900	0,65	15,86
0,79	920	0,85	17,10
1,01	630	1,60	20,34
0,96	480	2,00	21,63

Çizelge 7.10 incelendiğinde, aşırı blok yük uygulandığında çatlak ilerleme hızı 0,0011 mm/çevrim'e çıkmaktadır, fakat aşırı yüklemeyi takiben 0,00088 mm/çevrim'e düşmektedir. Sonraki çevrim sayılarında da aşırı yükleme nedeniyle çatlak ilerleme hızında artış ve azalışlar görülmektedir.

Parçanın yorulma ömrü de R=0,5 oranındaki sabit genlikli yüklemeye göre %52,8 artmıştır.

Çizelge 7.11'de, R=0,5 oranında her 250 çevrimden sonra 50 çevrim aşırı blok çekme yüklerinin uygulandığı değişken genlikli yükleme sırasında ölçülen çatlak boyu ve çevrim sayısı değerleri, Çizelge 7.12'de ise, çatlak boyu aralığı (da), çevrim sayısı aralığı (dN) ve bu değerlere göre hesaplanan çatlak ilerleme hızı (da/dN), gerilme şiddet faktör aralığı ( $\Delta K$ ) değerleri görülmektedir.

Çizelge 7.11. R=0,5 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (250+50 çevrim) ile çatlak boyu ve çevrim sayısı değerlerinin değişimi

Çatlak Boyu (mm)	Çevrim Sayısı
0,70	11159
0,84	11409
0,99	11759
1,25	12309
1,55	12670
1,85	13220
2,34	13740
2,60	14200
2,95	14740
3,20	15170
3,47	15530
3,75	16110
4,37	16750
4,88	17180
5,70	17560

Çizelge 7.11'deki değerler incelendiğinde çatlak boyu, çevrim sayısı arttıkça artmaktadır. Bu artış kırılmaya yakın çok fazladır.



Çizelge 7.12. R=0,5 oranında, aşırı blok çekme yükünün uygulanması (250+50 çevrim) ile da, dN, da/dN ve  $\Delta K$  değerlerinin değişimi

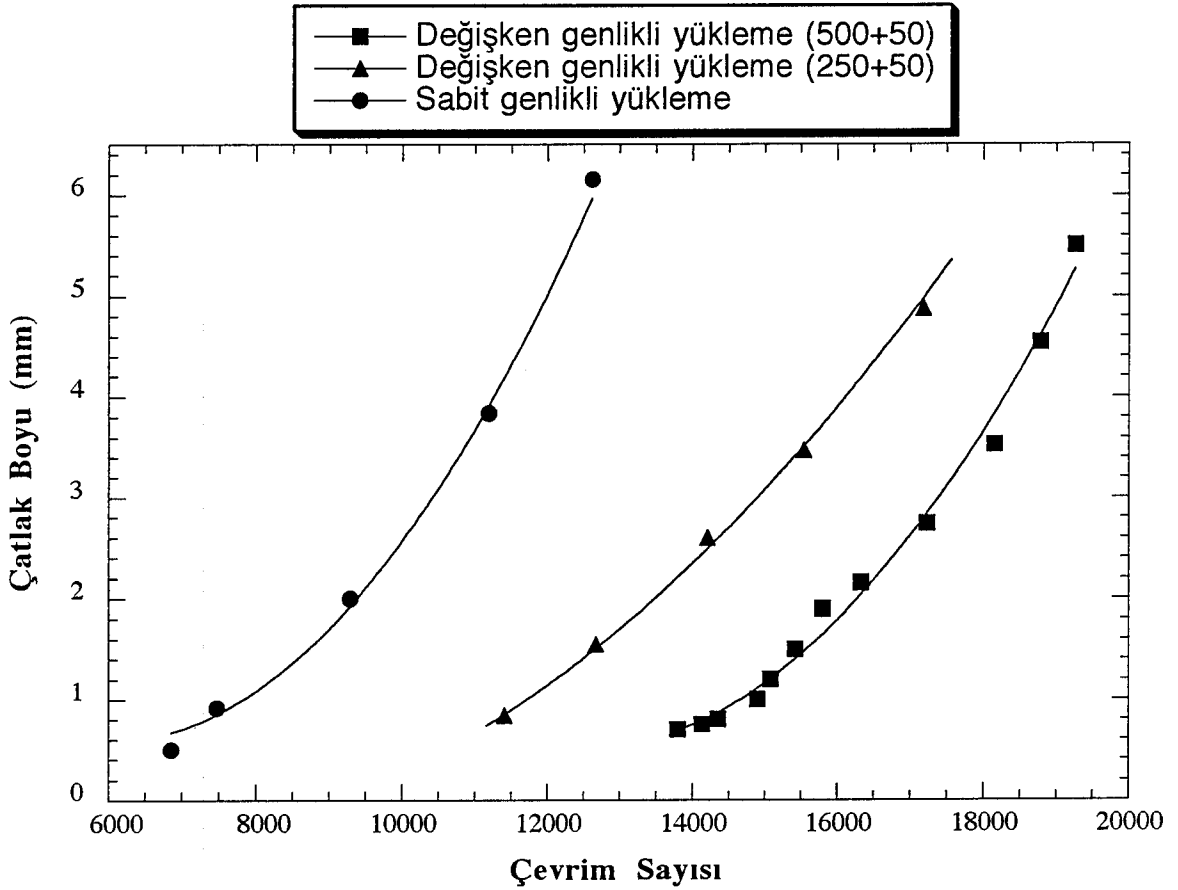
da (mm)	dN (çevrim sayısı)	(da/dN) $\times 10^{-3}$ (mm/çevrim)	$\Delta K$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
0,14	250	0,50	15,17
0,15	350	0,42	14,09
0,26	550	0,47	14,48
0,30	361	0,83	16,93
0,30	350	0,54	15,06
0,49	520	0,94	17,54
0,26	460	0,56	15,21
0,35	540	0,64	15,80
0,25	430	0,58	15,33
0,27	360	0,75	16,46
0,28	580	0,48	14,56
0,62	640	0,96	17,67
0,51	430	1,18	18,70
0,82	380	2,15	22,08

Aşırı blok yük her 250 çevrimde uygulandığında parçanın yorulma ömrü, sabit genlikli yüklemeye nazaran %39,3 artmıştır. Çizelge 7.12'deki değerler incelendiğinde, aşırı blok yük uygulandığında çatlak ilerleme hızı 0,00094 mm/çevrim'e çıkmış daha sonra ise 0,00056 mm/çevrim'e düşmüştür.

Aşırı blok yük uygulanmasının çatlak ilerleme hızını geciktirici etkisi kısa çatlak boylarında daha fazladır. Çatlak boyu arttıkça aşırı blok yüklemenin geciktirici etkisi azalmaktadır.

R=0,5 oranında, sabit ve değişken genlikli yüklemedeki deneylerin sonuçları incelendiğinde, değişken genlikli yüklemeye, sabit genlikli yüklemeye göre çatlak ilerleme hızı düşmüştür ve parçanın yorulma ömrü artmıştır.

Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Şekil 7.5'de  $R=0,5$  oranında sabit genlikli ve değişken genlikli yüklemelerdeki çatlak boyu-çevrim sayısı eğrileri birlikte verilmiştir.



Şekil 7.6.  $R=0,5$  oranında, sabit genlikli ve  $R=0,5$  oranında değişken genlikli yüklemeye etkisiyle çevrim sayısı-çatlak boyu değişimi

Her 250 çevrimde bir alternatif olarak aşırı blok çekme yükü uygulandığında yorulma ömrü, 500 çevrimde bir aşırı yük uygulandığındaki yorulma ömrüne göre azalmıştır. Azalışın nedeni şöyle açıklanabilir; aşırı yük nedeniyle oluşan plastik bölgenin etkisiyle çatlak ilerleme hızı düşer, çatlak bu oluşan plastik bölgenin henüz etkisindeyken sonraki aşırı yükün uygulanmasıyla çatlak ucu açılır ve çatlak ilerler.

## 7.2. Mikroyapı Analizleri

### 7.2.1. Sabit Genlikli Yükleme

Yorulma çatlakları, yüzeyin işleme kalitesine bağlı olarak bir veya birden fazla noktadan başlamaktadır (Şekil 6.30).

Sabit genlikli yükleme altında, kırılma yüzeyinde düzenli olarak yorulma çizgileri oluşur (Şekil 6.31) ve yorulma çizgileri arasındaki mesafe bir yük çevrimi sırasında oluşan yorulma çatlak ilerlemesi ile bağıntılıdır [36]. Yorulma çizgileri arasındaki mesafe (s) ölçülerek çatlak ilerleme hızı Eşitlik 7.1'e göre hesaplanabilir [36].

$$s=1,5 \times 10^{-2} \times (da/dN)^{0,47} \quad (7.1)$$

Şekil 6.31'deki yorulma çizgileri arasındaki mesafe ölçülerek Eşitlik 7.1'e göre yapılan hesaplamalar sonucu ortalama çatlak ilerleme hızı  $1,02 \times 10^{-3}$  mm/çevrim bulunmuştur. Bulunan bu değer çatlak boyu ölçülerek bulunan değerlere yakındır. Şekil 6.31'de görülen SEM mikroyapı fotoğrafında yorulma çizgileri arasındaki mesafeler farklılık göstermekte ve yaklaşık olarak  $5,9 \times 10^{-4}$  mm ile  $7,7 \times 10^{-4}$  mm arasında değişmektedir. Bu gözlenen farklılığın nedeni, çatlak ilerleme yönünden hafif sapmanın yorulma çizgileri arasındaki mesafenin farklı görünmesine neden olmasıdır.

Malzemede bulunan inklüzyonlar çatlak ilerleme hızını etkilerler. Kısa çatlak boylarında inklüzyonlar çatlak ilerleme yönünden sapmasına neden olurlar ve çatlak ilerleme hızı azalır (Şekil 6.34.(b)). Uzun çatlak boylarında ve yüksek gerilme değerlerinde malzeme yapısında bulunan inklüzyonlar matris gibi kolay şekil değiştiremediklerinden, etraflarında plastik akış meydana geldiğinde matrisle olan bağlarını kaybederler ve bu yolla mikro boşluklar oluşur (Şekil 6.32). Bu boşluklarla birleşen çatlaklar daha hızlı ilerler (Şekil 6.40).

## 7.2.2. Değişken Genlikli Yükleme

Değişken genlikli yükleme sırasında uygulanan aşırı yükleme sonucunda oluşan plastik deformasyon nedeniyle oluşan ikincil çatlaklar oluşur (Şekil 6.36, 6.39). Bu ikincil çatlaklar ayrı yorulma çizgileri ağı oluşturur, bu nedenle de çatlak ilerleme hızı azalır (Şekil 6.37.(a))

Değişken genlikli yükleme altında yorulma çizgileri arasındaki mesafe uygulanan yüklere bağlı olarak değişmektedir. Şekil 6.33'de görüldüğü gibi aşırı blok yük uygulandığında çatlak ilerleme hızı artmış sonraki çevrimlerde ise azalmıştır. Parça üzerine gelen değişken genlikteki yükler belirgin izler bırakmaktadır. Bu özellikten yararlanılarak belirli aralıklarda yüzeyde iz bırakacak yükler uygulanarak çatlak ilerleme hızını hesaplama çalışmaları yapılmıştır [37]. Şekil 6.49'da görüldüğü gibi, blok yük uygulandığında bu özellikten yararlanmak mümkündür fakat rastgele yükler uygulandığında SEM fotoğraflarından bu yükleri tanımak mümkün değildir. Şekil 6.37.(a) ve 6.43.(a)'da oluşan düzenli yorulma çizgileriyle bölgesel çatlak ilerleme hızı  $0,15 \times 10^{-3}$  ve  $0,17 \times 10^{-3}$  mm/çevrim bulunmuştur. Bulunan bu değerler Çizelge 7.3'deki değerlere yakındır. Parçada bulunan inklüzyonlar nedeniyle son kırılma bölgesine yakın bölgelerde, mikro boşluklar oluşur (Şekil 6.38). Parçada bulunan demir ve oksijen veya bakır içeren inklüzyonlar, son kırılma bölgesine yakın yerlerde düzenli yorulma çizgilerinin oluşumunu engellerler (Şekil 6.41, 42, 43.(a)) ve parçanın mukavemetini azaltırlar. Deney numuneleri, çatlak belirli bir uzunluğa geldikten sonra aniden kırılmıştır. Tüm yük oranlarında son kırılma bölgesinde tanelerarası kırılma gözlenmiştir (Şekil 6.44) Her iki orandaki yüklemelerde benzer kırılma yüzey özellikleri gözlenmiştir (Şekil 6.48). Fakat  $R=0,5$  yükleme oranında gerilme genliği düşük olduğundan kırılma yüzeyi daha düzgündür (Şekil 6.46, 47) ve yük değişimi gözle görülebilmektedir (Şekil 6.45).

## 8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 8.1. GENEL SONUÇLAR

2024-T3 alüminyum alaşımından optik mikroskop incelemeleri sonucunda belirlenen soğuk işlem yönüne paralel olarak hazırlanan numunelerle sabit ve simüle edilmiş değişken genlikli yükler altında INSTRON test cihazında çekme ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin ve deneyler sonucunda oluşan kırık yüzeylerin taramalı elektron mikroskopunda incelenmesi ile bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. İki ayrı R oranında yapılan sabit genlikli yorulma deneyleri sonucunda, aynı  $\Delta K$  değerinde, R=0,1 oranında çatlak ilerleme hızı R=0,5 oranına göre daha küçük olduğu bulunmuştur.
2. R=0,1 ve R=0,5 oranında yapılan değişken genlikli yüklemeye aşırı blok yük uygulanarak yapılan deneyler sonucunda aşırı yük uygulanmasının çatlak oluşumunu ve ilerlemesini geciktirdiği bulunmuştur. Gecikme kısa çatlak boylarında daha etkilidir. Bu aşırı yüklerin çatlak oluşumu ve ilerlemesini geciktirme etkisi özellikle uçak bakım programlarının yapılmasında önemlidir.
3. Sabit genlikli yüklemeye altında oluşan kırılmış yüzeylerin SEM incelemeleri yorulma çizgilerinin sınırlı bir bölgede düzenli olarak oluştuğunu göstermiştir. Kısa çatlak boylarında ve son kırılma bölgesinde ise yorulma çizgileri düzenli olarak oluşmamaktadır.
4. Yorulma çatlak ilerleme davranışı kırılma yüzeyi boyunca homojen değildir. Malzemenin yapısına ve yapıda bulunan inklüzyonların (SEM incelemeleri ile bu alaşımda 2-15  $\mu\text{m}$  boyutunda demir ve oksijen içeren veya sadece bakır içeren inklüzyonlar gözlenmiştir) konumuna bağlı olarak çatlak sapması

görülmektedir. Son kırılma bölgesine yakın yerlerdeki inklüzyonlar uygulanan yükün etkisi ile matristen tamamen ayrılarak malzemenin yorulma mukavemetini düşürmektedirler.

5. Aşırı plastik deformasyon sonucu oluşan ikincil çatlakların ana çatlak ilerleme yönünden sapmalara ve çatlağın dallanmasına neden olduğu görülmüştür. Böylece, dallanan çatlaklar, çatlak ilerleme hızını yavaşlatmaktadır.
6. Periyodik olarak uygulanan aşırı yükler kırılma yüzeyinde belirgin izler bırakmaktadır. Bu izler arasındaki mesafe mikroskopta ölçülerek, çatlak ilerleme hızı bulunabilir. Bu özellikle tam ölçekli uçak yorulma testleri sırasında hasarsız kontrol yöntemleriyle çatlak boyu ölçümünün yapılamadığı parçalarda yorulma davranışını belirleme açısından önemlidir.

## 8.2. ÖNERİLER

1. Bu çalışmanın devamı olarak uygulanan aşırı yükün şiddeti artırılarak çatlak ilerleme davranışının nasıl etkilendiği incelenebilir.
2. Uygulanan blok aşırı çekme yüklerinden sonra daha büyük yükler uygulanarak çatlak ilerleme hızının nasıl değiştiği incelenebilir.
3. Bu çalışma uçak kanadına gelen yükler gözönüne alınarak yapılmıştır. Benzer şekilde uçak gövdesi içinde basınç değişimi için çalışmalar yapılabilir.

## 9. KAYNAKLAR

1. LINCOLN, J.W., *Overview of the Structural Integrity Process*, AGARD 797, 1-11, 1993.
2. HANSEN, A.G., *Damage Tolerance Analysis and Structural Integrity in Air Force Aircraft*, Air Force Journal of Logistics (USAF), 4 –5, 1989.
3. PAYNE, A.O., *The Fatigue of Aircraft Structures*, Engineering Fracture Mechanics, 8, 256, 1976.
4. BROEK, D., *Damage Tolerance in Practice*, AGARD, Agard Lecture Series No. 97, Fracture Mechanics Design Methodology, 1-13, 1979.
5. BUCH, A., *Fatigue Strength Calculation, Materials Science Surveys*, Trans Tech SA, 287-318, 1988.
6. SHOWERS, D.R., *Applications of Damage Tolerance Analysis to In-Service Aircraft Structures*, Proceedings of the Failure Analysis Program, 159-166, Salt Lake City, 1985.
7. MISAVA, H. and SCHIJVE, J., *Fatigue Crack Growth in Al-Alloy Sheet Material Under Constant Amplitude and Simplified Flight-Simulation Loading*, Delft University of technology report LR-381, The Netherland 1983.
8. SMITH, H.W., *Spectrum Loading in Relation to Aircraft Design*, 8<sup>th</sup> ICAF Symposium, Lausanne, ASTM STP, 761, 1980.
9. FOTH, J., *Crack Propagation Under Constant and Variable Stress Amplitude*, AGARD 376, 17-1-17-9, 1984.
10. KLINGELE, H., *Essential Features in Fatigue Fractures and Remarkable Phenomena in Fatigue Crack Growth*, AGARD 376, 1-1-1-36, 1984.
11. SCHÜTZ, D. and LOWAK, H., *The Fatigue Strength of an Aircraft Wind Upper Surface*, 9<sup>th</sup> ICAF Symposium, Darmstadt, 1977.
12. SCHIJVE, J., *The Significance of Flight Simulation Tests*, Delft University of Technology Report LR-466, 1985.

13. CHERRY, M.C. and MALL, S., *Residual Strength of Unstiffened Aluminium Panels with Multiple Site Damage*, Engineering Fracture Mechanics Vol 56, No. 6, 701-713, 1997.
14. SCHIJVE, J., *The Accumulation of Fatigue Damage in Aircraft Materials and Structures*, AGARD-157, 1972.
15. LOWAK, H., SCHÜTZ, D., HÜCK, M. and SCHÜTZ, W. *Standardized Flight Loading Program for Fighters*, FALSTAFF, LBF-Report No.3045, 1976.
16. SALVETTI, A., *An Assessment of Fatigue Crack Growth Prediction Models for Aerospace Structures*, AGARD 797, 1-11, 1993.
17. LOWAK, H., JONGE, J.B., FRANZ, J. and SCHÜTZ, D., *MINI TWIST, A Shortened Version of TWIST*, Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Report No. T13 146-152, 1979.
18. DORUK, M., *Hasar Tolerans Yaklaşımı ve Uygulamaları*, İkinci Ulusal Kırılma Konferansı, 1-23, 1987.
19. ANDERSON, T., *Fundamentals and Applications of Fracture Mechanics*, Dept. of CRC Press, Boca Raton, 1991.
20. ESHELBY, J.D., *Stress Analysis: Elasticity and Fracture Mechanics*, ISI Publ. 121, 13-48, 1968.
21. DIXON, J.R., *Stress and Strain Distributions Around Cracks in Sheet Materials Having Various Work Hardening Characteristics*, Int. J. Fract. Mech., 1. 224-243, 1965.
22. BROEK, D., *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Fracture Search Inc., 59-66, 1989.
23. BARSOM, J.M., *Fracture and Fatigue Control in Structures*, Prentice-Hall, 307-320, 1987.
24. IRWIN, G.R., *Fracture Dynamics*, Fracturing of Metals, ASM, Cleveland, Ohio, 147-166, 1949.
25. EWALDS, H.L., *Fracture Mechanics*, Edward Arnold Ltd., 12-60, 1984.



26. SWIFT, T., *Damage Tolerance Analysis of Redundant Structures*, AGARD, Agard Lecture Series No. 97, Fracture Mechanics Design Methodology, 2-5, 1979.
27. BROEK, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, 1.1-1.6, 2.1-2.5, 1984.
28. IRWIN, G.R., *Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness*", Proc. 7<sup>th</sup> Sagamore Conf., 53-63, 1960.
29. SURESH, S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, 315-340, 1991.
30. ANTOLOVICH, S.D. and SAXENA, A., *Fatigue Failures*, Metals Handbook; Volume 11: Failure analysis and prevention, American Society for Metals, 102-135, 1986.
31. LANGE, A.G., *Systematic Analysis of Technical Failures*, Deutsche Gesellschaft Für Metallkunde, 373-397, 1986.
32. MUNZ, D., *Microscopic Features of Fatigue Failure*, Deutsche Gesellschaft Für Metallkunde 160-179, 1986.
33. WOOD, W.A., *Recent Observations on Fatigue Fracture in Metals*, ASTM STP 237, 110-121, 1958.
34. BROEK, D., *A Study on Ductile Fracture*, Nat. Aerospace Ins. Amsterdam TR 72021, 1972.
35. PELLOUX, R.M. and WARREN, A.S., *Fatigue Striations and Failure Analysis*, Proceedings of the International Conference on Failure Analysis, 45-49, 1991.
36. DAINTY, R.V., *Application of Optical and Electron Microscopic Techniques in the Fractographic Determination of Fatigue Crack Growth Rate*, AGARD 376, 15-1-16-16, 1984.
37. KALWEIT, M., *Generation of Marker Lines on Fatigue Fracture Surfaces*, AGARD 376, 9-1-9-5, 1984.
38. PUTTICK, K.E., *Ductile Fracture in Metals*, Philosophical Magazine, 4, 964-969, 1959.

39. ALIABADI, G.M.L., *Numerical Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, 5-12, 1991.
40. PASCOE, K.J., *An Introduction to the Properties of Engineering Materials*, 255-300, 1985.
41. PARIS, P.C., GOMEZ, M.P. and ANDERSON, W.P., *A Rational Analytic Theory of Fatigue*, *The Trend in Eng.*, Vol. 13, 9-14, 1961.
42. FORMAN, R.G., *Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures*, *Trans. Am. Soc. Mech. Engineers*, Vol.89, 459-464, 1967.
43. KLESNIL, M. and LUCAS, P., *Influence of Strengh and Stress History on Growth and Stabilisation of Fatigue Cracks*, *Engineering Fracture Mechanics*, 4, 77-92, 1972.
44. DOWLING, E.N., *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice Hall Inc., 285-430, 1993.
45. ELBER, W., *Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension*, *Engineering Fracture Mechanics*, 2, 37-45, 1970.
46. CHEN, D.L., WEISS, B. and STICLER, R., *Contribution of the Cyclic Loading Portion Below the Opening Load to Fatigue Crack Growth*, *Materials Science and Engineering A208*, 181-187, 1996.
47. SUNDER, R., *Contribution of Individual Spectrum Load Cycles to Damage in Notch Root Crack Initaition, Short and Long Crack Growth*, *Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques: Second Volume*, ASTM STP., 19-29, 1993.
48. ZOU, Z. and ZWERNEMAN., F.J., *Fatigue Damage Due to Sub-Threshold Load Cycles Between Periodic Overloads*, *Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques: Second Volume*, ASTM STP., 45-53, 1993.
49. MAWSOUF, N.M., *Study of the Tensile Fracture Mechanism and Prediction of the Fracture Criterion in Aluminium alloys*, *Journal of Materials Science Letters*, 128-131, 1993.
50. WEI, R.P. and SHIH, T.T., *Delay in Fatigue Crack Growth*, *Int. J. of Fracture*, 10, 77-85, 1974.

51. VARDAR, Ö., *Fracture Mechanics*, Boğaziçi University Publication, 250-279, 1988.
52. HIMMELEIN, M.K. and HILLBERRY, B.M. *Effect of Stress Ratio and Overload Ratio on Fatigue Crack Delay and Arrest Behavior due to Single Peak Overloads*, ASTM STP 590, Amer. Soc. for Testing and Materials, 321-330, 1976
53. SCHIJVE, J. *Observations on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation Under Variable Amplitude Loading*, ASTM STP 595, Amer. Soc. for Testing and Materials, 3-23 1976.
54. CARLSON, R.L., *An Introduction to Fatigue in Metals and Composites*, Chapman and Hall, 116-133, 1996.
55. VARDAR, Ö. ve TÜR, Y., *Periodic Tensile Overloads in 2024-T3 Al-Alloy*, Engineering Fracture Mechanics, 53,. 69-77, 1996.
56. LING, H.R.and SCHIJVE, J., *Fractographic Analysis Fatigue Crack Growth Under Simple Variable-Amplitude Loading in 2024-T351 Material*, Delft University of Technology Report LR 516, The Netherlands, 1987.
57. DESHPANDE, N.U., *Relationship Between Fracture Toughness, Fracture Path and Microstructure of 7050 Aluminum Alloy*, Metallurgical and Materials Transactions A, 1191-1201, 1998.
58. BROEK, D., *The Role of Inclusions in Ductile Fracture and Fracture Toughness*, Engineering Fracture Mechanics, 5, 55-56, 1973.
59. BROEK, D., *Particles and Crack Growth in Aluminium Alloys*, Held at Delft University of Technology, The Netherlands, 19-33, 1974.
60. ALMER, J.D., *The Effects of Residual Macrostress and Microstress on Fatigue Crack Propagation*, Metallurgical and Materials Transactions A, 2127-2136, 1998.
61. KAYNAK, C., *Behaviour of Short Fatigue Cracks in a Steel with Elongated Inclusions*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 1994.
62. GRAY, G.T., *The Effect of Microstructure on Fatigue Crack Path and Crack Propagation Rate*, Metallurgical Society of AIME, 131-143, 1985.

63. BROEK, D., *Some Contributions of Electron Fractography to the Theory of Fracture*, Nat. Aerospace Ins. Amsterdam TR 72029, 1972.
64. ROGERS, H.C., *The Tensile Fracture of Ductile Metals*, AIME Trans. 218, 498-506, 1960.
65. RAVICHANDRAN, K.S., *Effects of Crack Aspect Ratio on the Behavior of Small Surface Cracks in Fatigue*, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 28A, 149-156, 1997.
66. HATCH, J.E., *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, American Society for Metals, 351-377, 1984.
67. KAYALI, E.S., ENSARİ, C. ve DİKEÇ, F., *Metalik Malzemelerin Mekanik DeneYleri*, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, 1983.
68. YU, W. and RITCHIE, R.O., *Fatigue Crack Propagation in 2090 Aluminium-Lithium Alloy: Effect of Compression Overload Cycles*, J. of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 109, 81-85, 1987.
69. ZAIKEN, E. and RITCHIE, R.O., *On the Role of Compression Loads in Influencing Crack Closure and the Threshold Condition for Fatigue Crack Growth in 7150 Aluminium Alloy*, Engineering Fracture Mechanics, 2, 35-48, 1985.
70. LIBERGE, A. And BLEUZEN, C., *Effect Of Flight Sequences In Complex Load Histories On Crack Front Marking*, AGARD 376, 7-1, 1984.