

**2024-T3 AL ALAŞIMININ TEK AŞIRI
YÜK ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI**

Adem KARCI
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Eylül-2002

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Adem Karacı'nın "2024-T3 AI Alaşımının Tek Aşırı Yük Altında Yorulma Davranışı" başlıklı Sivil Havacılık Anabilim dalındaki, Yüksek Lisans tezi 25/09/2002 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı – Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yard. Doç. Dr. Dilek TURAN	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Cemal AKSEL	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 26.09.2002 tarih ve33/12..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. **Orhan ÖZER**
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

2024-T3 AL ALAŞIMININ TEK AŞIRI YÜK ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI

ADEM KARCI

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Dilek TURAN
2002, 79 sayfa

2024-T3 Alüminyum alaşımı ile yapılan bu çalışmada tek çekme aşırı yükünün yorulma çatlak ilerlemesine etkisi araştırılmıştır.

Gerilme oranı 0,11 alınarak iki adet sabit genlikli yorulma deneyi yapılmıştır. Bu deneylerle 2024-T3 alüminyum alaşımının sabit genlikli yükleme altında yorulma davranışı incelenmiştir. Sabit genlikli yük deneyleri temel alınarak farklı aşırı yük oranlarında deneyler yapılmıştır. 1,3 – 1,5 – 1,7 ve 2 aşırı yük oranları kullanılarak hesaplanan yükler sabit genlikli yükleme sırasında yaklaşık eşit çatlak uzunluğunda bir defa uygulanarak gecikme çevrim sayıları hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre belirlenen çatlak ilerlemesindeki gecikmenin aşırı yük oranına göre değişimi grafiklerle gösterilmiştir. Ayrıca aşırı yük oranının 1,7 olduğu deneyde ertelenmiş gecikme olayı gözlenmiştir. Kırık yüzeyler taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve kırık yüzeylerde yorulma çizgileri ve aşırı yükün etkisi değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yorulma, çatlak ilerlemesi, alüminyum, sabit genlikli yükleme, aşırı yük

ABSTRACT**Master of Science Thesis****THE FATIGUE BEHAVIOUR OF 2024-T3 AL
ALLOY UNDER SINGLE OVERLOADING****ADEM KARCI****Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Aviation Program****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek TURAN
2002, 79 pages**

In this thesis, the effect of single tensile overloading on fatigue crack growth in 2024-T3 Aluminium alloy was investigated.

Two tests were made with the stress ratio at 0.11 under constant amplitude loading. The fatigue crack growth behaviour under constant amplitude loading was determined by these tests for the 2024-T3 aluminium alloy. The overloading tests were made at different overload ratios using the constant amplitude load tests. Applying the computed loads belonging to the overloading tests at about equal crack lengths, the number of retardation cycles was determined. The variation of the retardation of crack growth increase depending on the overload ratio was presented graphically. Moreover, the delayed retardation event was observed at the overload ratio of 1.7. Fractured surfaces were investigated using a scanning electron microscope in which overloading effects and fatigue striations were observed.

Keywords: Fatigue, crack growth, aluminium, constant amplitude loading, overload

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın gerekleőtirilmesinde ve deney dűzeneęinin kurulmasında bűyűk emeęi olan sayın hocam Yard. Do. Dr. Dilek TURAN'a uyarıcı ve yűnlendirici tavsiyelerinden dolayı teőekkűr ederim.

Ayrıca çalıőmam boyunca bana her tűrlű desteęi veren, eőim Derya KARCI'ya sonsuz teőekkűrler.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. YORULMA OLAYI VE AŞAMALARI.....	2
2.1. Çevrimsel Yük Tipleri ve Yorulma Teknik Terimleri.....	3
2.2. Yorulma Olayının Aşamaları.....	6
2.2.1. Yorulma çatlak başlangıcı.....	7
2.2.2. Yorulma çatlak ilerlemesi.....	8
2.2.3. Yorulma çatlak ilerleme hızı.....	10
2.3. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler.....	13
2.3.1. Mikro yapı etkisi.....	13
2.3.2. Üretim tekniklerinin yüzey işlemlerinin etkisi.....	15
2.3.3. Çevre faktörleri.....	16
2.3.4. Gerilmelerin etkisi.....	17
2.2.5. Parça geometrisi.....	18
2.4. Çatlak Ucunda Oluşan Gerilmeler.....	20
2.4.1. Gerilme şiddet faktörü.....	22
2.5. Çatlak Ucu Plastik Bölgesi.....	23
2.5.1. Plastik bölgenin şekli.....	26
2.6. Çatlak Kapanması.....	29
2.7. Değişken Genlikli Yorulma.....	32
2.7.1. Gecikme kavramı.....	33

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.7.2. Aşırı yükleme tipleri ve yorulma çatlak ilerleme hızına etkileri.....	36
2.7.2.1. Tek aşırı yükleme.....	38
2.7.2.2. Periyodik uygulanan aşırı yükler.....	40
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
3.1. Deney Malzemesi.....	42
3.1.1. Numune geometrisi.....	43
3.2. Kullanılan Cihazlar.....	44
3.3. Yorulma Ön Çatlağı.....	45
3.4. Yapılan Deneyler.....	47
3.4.1. Sabit genlikli yorulma deneyleri.....	47
3.4.2. Tek aşırı yükleme deneyleri.....	47
3.5. Deney Sonuçları.....	48
3.5.1. Sabit genlikli yorulma deney sonuçları.....	48
3.5.2. Tek aşırı yükleme deney sonuçları.....	56
3.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....	62
4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
4.1. Genel Sonuçlar.....	67
4.2. Öneriler.....	68
KAYNAKLAR.....	69
EKLER.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Yorulma çatlak başlangıcı ve hasar eğrisi.....	3
2.2. Yorulma parametreleri ve gerilme tipleri.....	4
2.3. Yorulma ömür aşamaları ve etkin faktörler.....	6
2.4. Kayma bantlarından dolayı oluşan girinti ve çıkıntılar.....	7
2.5. Çatlak başlangıcı için farklı merkezler.....	8
2.6. Plastik körelme modeline göre yorulma çatlak uzaması, a) Sıfır yük b) Küçük çekme yükü, c) Maksimum çekme yükü, d) Başlangıç noktasına dönme,e) Maksimum basma yükü.....	10
2.7. Çatlak ilerleme hızı eğrisi bölgeleri.....	11
2.8. Yorulma çatlak ilerleme davranışında yük oranının (R) etkisi.....	13
2.9. Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi.....	14
2.10. Soğuk haddelemenin S-N eğrisine etkisi.....	15
2.11. Koroze edici çevrenin S-N diyagramına ve çatlak ilerleme hızına etkisi.....	16
2.12. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği.....	18
2.13. Çentik civarında gerilme konsantrasyonunun değişimi.....	19
2.14. Yükleme tipleri.....	20
2.15. Çatlak ucu yakınındaki gerilmelerin durumu.....	21
2.16. Çatlak ucundaki σ_y elastik gerilmesi.....	22
2.17. Çatlak ucu plastik bölgesi.....	24
2.18. Irwin analizinin şematik gösterimi.....	25
2.19. Von Mises akma kriterine göre düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme plastik bölge şekilleri.....	28
2.20. Orta kalınlıkta bir levhada kalınlık boyunca plastik bölge değişimi.....	29
2.21. Çatlak kapanması.....	30
2.22. Yorulma çatlak ilerlemesi süresince çatlak kapanması.....	31
2.23. Yorulma deneyinde uygulanan değişken genlikli gerilme yükü.....	32
2.24. Aşırı yüklenmeden sonra meydana gelen yavaşlama.....	34
2.25. Yük seviyesindeki değişim ile çatlak kapanma gerilme şiddet faktörünün değişimi.....	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

2.26. Yorulma aşırı yüklemesinin plastik bölge boyutu üzerine etkisi.....	36
2.27. 2024-T3 Al plakasında periyodik değişken genlikli yükleme sirasına bağlı olarak değişen yorulma çizgileri.....	38
2.28. İki farklı aşırı yük çevriminin 2024-T3 Al alaşımında yorulma çatlak ilerlemesine etkisi.....	39
2.29. Periyodik aşırı yükün çatlak ilerlemesine etkisi.....	41
3.1. Merkez çatlaklı numune geometrisi.....	43
3.2. Deneyde kullanılan Instron 8501 cihazı ve yardımcı teçhizatlar.....	44
3.3. Çentik detayları ve yorulma ön çatlağı.....	46
3.4. Tek aşırı yükleme deneylerinin yük tipi.....	49
3.5. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 01 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafiği.....	50
3.6. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 02 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafiği.....	51
3.7. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 01 nolu deneyin çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiği.....	52
3.8. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 02 nolu deneyin çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiği.....	53
3.9. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 01 ve 02 nolu deneyin çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiği.....	54
3.10. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 02 nolu numunede yaklaşık $2a=54$ mm çatlak uzunluğunda SEM ile elde edilen görüntünün a) genel, b) detaylı görünümü.....	55
3.11. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sirasında 0,5 Hz frekans ve 1,3 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 03 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği.....	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

- 3.12. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,5 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 04 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği..... 58
- 3.13. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,7 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 05 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği..... 59
- 3.14. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 2 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 06 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği..... 60
- 3.15. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 2 oranında aşırı yükün uygulandığı bölgenin a) genel, b) detaylı görünüşü.....61
- 3.16. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,7 oranında aşırı yük uygulanan deneyde çatlak ilerleme hızının-çatlak boyu ile değişimi..... 62
- 3.17. Tek aşırı yük deneylerinde gecikme çevrim sayısının-aşırı yük oranı ile değişimi..... 63
- 3.18. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,3 – 1,5 - 1,7 - 2 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan deneylerin aşırı yüklemekten sonraki çatlak boyu $a-a_{OL}$ ve çevrim sayısı $N-N_{OL}$ grafikleri..... 64

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Değişken genlikli test tipleri ve ana değişkenler.....	37
3.1. 2024-T3 Al alaşımının kimyasal bileşimi.....	42
3.2. 2024-T3 Al alaşımının mekanik özellikleri.....	42
3.3. Yorulma ön çatlak deney bilgileri.....	46
3.4. Sabit genlikli yorulma deneyleri.....	47
3.5. Tek aşırı yükleme deneyleri.....	47
3.6. Sabit genlikli yükleme deney sonuçları.....	48
3.7. Tek aşırı yükleme deney sonuçları.....	56
3.8. 7075-T3 ve 2024-T3 Alüminyum alaşımlarında tek aşırı yükün yorulma çatlak ilerlemede geciktirme etkisi.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Çatlak boyu (mm)
a_{eff}	: Efektif çatlak boyu (mm)
B	: Numune kalınlığı (mm)
C, m	: Malzeme sabitleri
f	: Frekans (Hz)
h	: Çentik genişliği (mm)
K	: Gerilme şiddet faktörü ($MPa\sqrt{m}$)
K_t	: Gerilme konsantrasyon faktörü
N	: Çevrim sayısı
N_D	: Gecikme çevrim sayısı
OLR	: Aşırı yük oranı
P	: Yük (kN)
R	: Gerilme oranı
r_y	: Çatlak ucu plastik bölge boyutu (mm)
σ_{max}	: Maksimum gerilme (MPa)
σ_{min}	: Minimum gerilme
σ_m	: Ortalama gerilme (MPa)
σ_a	: Gerilme genliği (MPa)
σ_x, σ_y	: Normal gerilmeler (MPa)
σ_A	: Akma gerilmesi (MPa)
σ_{op}	: Çatlak açılma gerilmesi (MPa)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal gerilmeler
$\Delta\sigma$: Gerilme aralığı (MPa)
τ_{xy}	: Kayma gerilmesi (MPa)
ν	: Poission oranı
U	: Gerilme şiddet oranı
W	: Numune genişliği (mm)
ASTM	: American Society for Testing Materials
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scannig Elektron Microscope)

1. GİRİŞ

Yorulma terimi, çevrimsel gerilme veya deformasyon uygulanmasıyla malzemelerde çatlak veya hasara sebep olan değişikliklerin belirtilmesinde kullanılan bir terim şeklinde tanımlanmaktadır [1]. Metalik parçalar, statik dayanımından daha küçük yani elastik sınır altındaki tekrarlanan gerilmeler altında çalışmış olsalar bile belirli bir çevrim sayısı sonunda genellikle yüzeylerinde çatlaklar oluşmaktadır. Oluşan çatlaklar, tekrarlı yüklerin etkisiyle ilerlemekte ve meydana gelen kırılma olayı ile yapı kullanılamaz hale gelmektedir.

Makine ve yapısal parçalarda oluşan hasarların çoğunluğu, çalışmalarını sırasında maruz kaldıkları çevrimsel yük nedeniyle yorulma hasarı şeklinde görülmektedir. Sabit genlikli yorulma çalışmaları yorulma hasarının oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Fakat malzemeler çalışmalarını sırasında karmaşık bir şekilde değişken genlikli yüklemelere maruz kalmaktadır. Değişken genlikli yükleme altında yorulma çatlak ilerlemesi ilk defa uçak yapılarında dikkate alınmıştır. Daha sonra güç üniteleri, basınç kapları ve gemiler gibi endüstri alanlarında çalışmalar yapılmıştır [2].

Sabit genlikli yükleme sırasında uygulanan tek veya periyodik aşırı yüklerle malzemelerin değişken genlikli yorulma davranışları tahmin edilebilmektedir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde malzemelerin yorulma olayı ve özellikleri ile ilgili temel bilgiler verilmiş ve yorulma çatlak ilerlemesi, çatlak ucunda oluşan gerilmeler, çatlak ucu plastik bölgesi ve değişken genlikli yorulma özellikleri açıklanmıştır.

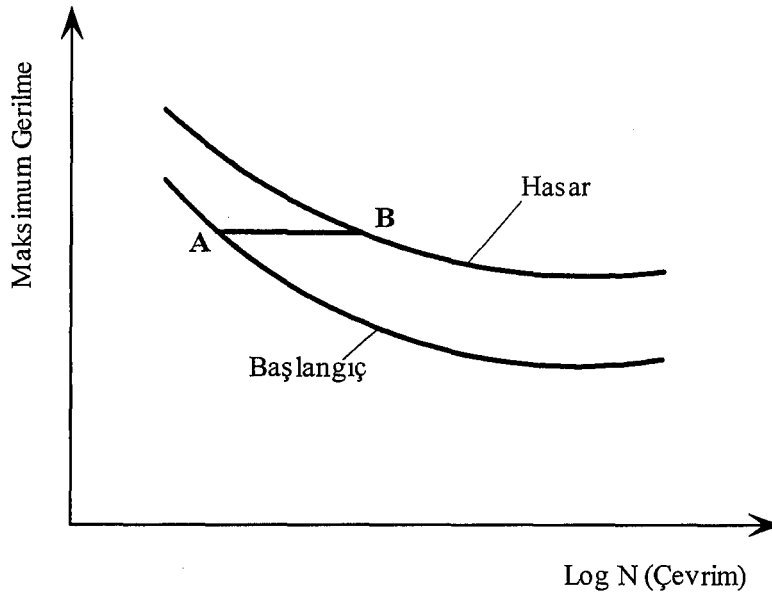
DeneySEL çalışmanın incelendiği bölümde, 2024-T3 alüminyum alaşımının sabit genlikli yükleme sırasında uygulanan tek aşırı yükün yorulma çatlak ilerlemesine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırma sabit genlikli yükleme deneyleri ve dört değişik aşırı yük oranında yapılan tek aşırı yük deneylerinden oluşmaktadır.

2. YORULMA OLAYI VE AŞAMALARI

Yorulma hasarı çevrimsel gerilme, çekme gerilmesi ve plastik deformasyonun eş zamanlı etkimesinden oluşmaktadır. Bu üç faktörden herhangi biri olmaz ise yorulma çatlak başlamayacak ve ilerlemeyecektir. Çevrimsel gerilme çatlak başlatmakta ve çekme gerilmesi çatlak ilerlemesini oluşturmaktadır [3].

Yorulma hasarları çok farklı şekillerde olmaktadır. Sadece artıp azalan (çevrimsel) gerilme veya deformasyon uygulanması ile mekanik yorulma oluşmaktadır. Yüksek sıcaklık ile çevrimsel gerilmeler birlikte uygulandığında sürünme yorulmasına, çevrimsel olarak yüklenmiş parçaya artıp azalan ısı uygulandığında ısı-mekanik yorulmaya neden olmaktadır. Tekrarlı yükler kimyasal veya koroze edici çevre şartlarında malzemeye uygulandığında korozyon yorulması oluşmaktadır. Genellikle çevresel etkiler, korozif çevre şartları aktif olmayan çevre şartlarına göre yorulma ömrünü azaltacak şekilde görülmektedir. Birleştirilmiş parçalara tekrarlı gerilmelerin uygulanması nedeniyle parçalar arasında oluşan temas yorulması, bu gerilmelerin darbe şeklinde parçalara etkimesiyle malzemede sürtünen yüzeyler arasında aşınma yorulmasına yol açmaktadır. Makine ve yapısal parçalarda görülen hasarların çoğu, yukarıda belirtilen yorulma hasarlarından biri şeklinde gerçekleşmektedir. Genellikle bazı hasarlar, maksimum değerleri statik kırılma analizlerindeki güvenli yüklerden önemli derecede küçük çevrimsel yük etkileri altında oluşmaktadır [1].

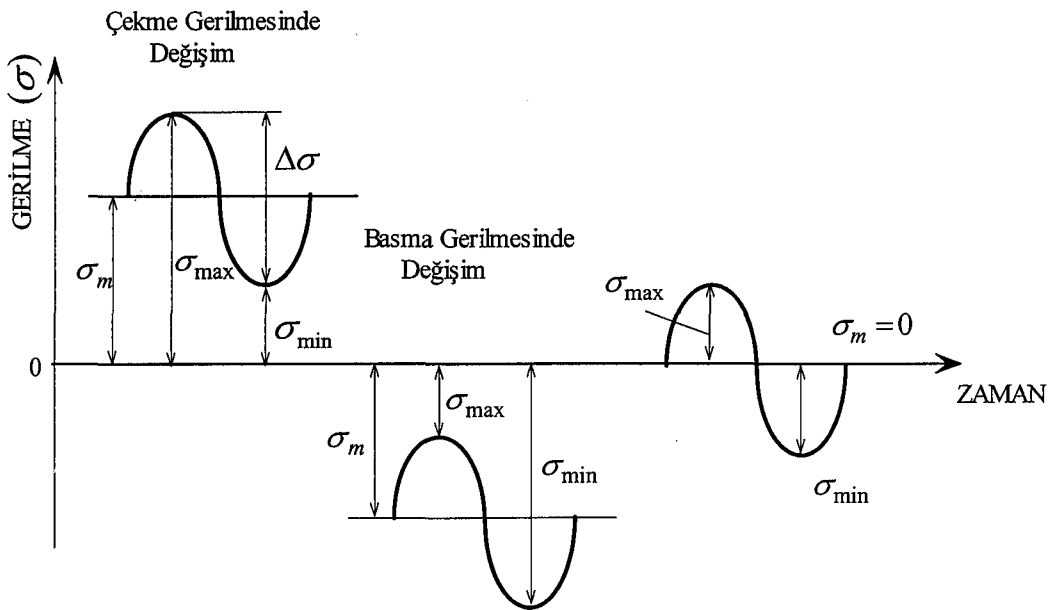
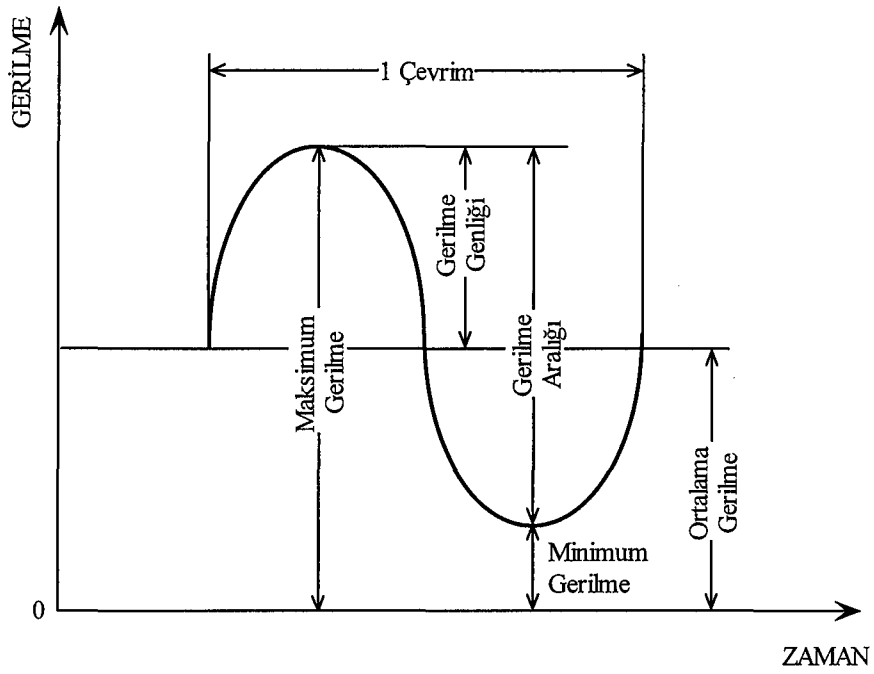
Metallerin yorulması, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi hasar oluşuncaya kadar logaritmik çevrim-gerilme aralığı ($\Delta\sigma$ -logN) grafiğinin kullanılmasıyla karakterize edilmektedir. Bu grafikte gerilme aralığı maksimum gerilmeye eşit olması için minimum gerilme sıfır alınmıştır. Verilen maksimum gerilme için alt eğri çatlak başlangıcını, üst eğri hasar oluşumunu göstermektedir. A-B arasındaki yatay çizgi ise yorulma ömrünün çatlak oluşumu, ilerlemesi ve son kırılma aşamalarını belirtmektedir. Ayrıca A'dan başlayan yatay çizgi belirtilen maksimum gerilme için hasar eğrisi ile kesişmez ise başlayan çatlak ilerlemiyor veya durdurulmuştur [4].



Şekil 2.1. Yorulma çatlak başlangıcı ve hasar eğrisi [4]

2.1. Çevrimsel Yük Tipleri ve Yorulma Teknik Terimleri

Yorulma deneylerinde yorulma özellikleri belirlenecek olan parçanın çalışma şartlarında karşılaşılabileceği yüklere benzer şekilde yük dağılım tipleri uygulanabilmektedir. Sabit genlikli yorulma araştırmalarında Şekil 2.2'de gösterildiği gibi bu yükler çekme-çekme, çekme-basma ve basma-basma şeklinde olabilmektedir. Uygulanan yüklere göre yorulma deneyleri, eksenel gerilmeli yorulma deneyi, eğme gerilmeli yorulma deneyi, burma gerilmeli yorulma deneyi ve birleşik gerilmeli yorulma şeklinde sınıflandırılmaktadır. Eksenel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluk ekseni boyunca değişen değerlerde çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Eğme gerilmeli yorulma deneyinde numuneye bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmeleri uygulanabileceği gibi, dönme hareketi yapan numuneye tekrarlanan eğme gerilmeleri uygulanabilir. Burma gerilmeli yorulma deneyinde deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma gerilmeleri uygulanmaktadır. Yukarıda belirtilen farklı gerilme türlerinden en az



Şekil 2.2. Yorulma parametreleri ve gerilme tipleri [5]

ikisinin ya da daha fazlasının bir arada uygulandığı yorulma deneyleri ise birleşik gerilmeli yorulma deneyleri olarak adlandırılır [5,6].

Yorulma ile ilgili araştırmalarda uygulanan gerilmeler ve elde edilen sonuçlar ile ilgili kullanılan bazı teknik terimler vardır. Bunlar;

Çevrim (N): Şekil 2.2'de görölen gerilme zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına çevrim denilmektedir.

Maksimum Gerilme (σ_{max}): Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en büyük değere sahip olan gerilmedir. Değeri negatif, pozitif veya sıfır olabilir.

Minimum Gerilme (σ_{min}): Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en küçük değere sahip olan gerilmedir. Değeri negatif, pozitif veya sıfır olabilir.

Ortalama Gerilme (σ_m): Maksimum ve minimum gerilme değerlerinin aritmetik ortalamasına eşittir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.1)$$

Gerilme Aralığı ($\Delta\sigma$): Maksimum ve minimum gerilme değerleri arasındaki farka eşittir.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.2)$$

Gerilme Genliğı (σ_a): Gerilme aralığı değerinin yarısına eşittir.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2.3)$$

Gerilme Oranı (R): Minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı şeklinde ifade edilmektedir.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.4)$$

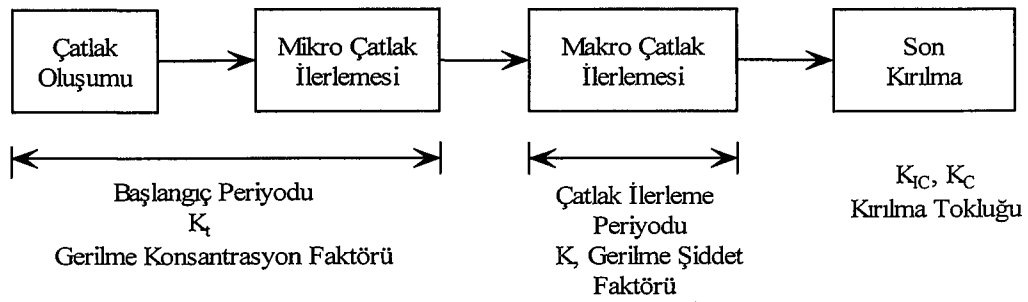
Yorulma dayanımı (N çevrim için): Malzemenin belirli bir N çevrim sayısı sonunda çatlama veya kopma gösterdiği gerilme değeri olarak tanımlanır.

Yorulma Ömrü: Benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme değeri altında çatlama veya kopma olayı gösterdikleri N çevrim sayılarının ortalaması yorulma ömrü şeklinde tanımlanabilir.

2.2. Yorulma Olayının Aşamaları

Yorulma olayı genel olarak üç aşamada incelenmektedir.

- Çatlak oluşumu ve başlangıcı
- Çatlak ilerlemesi
- Kalan malzeme kesitinin kırılması

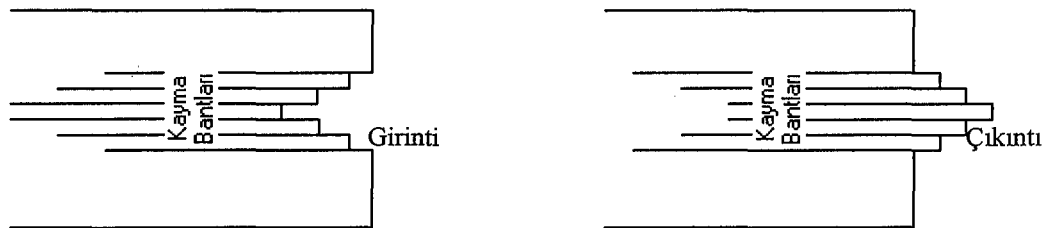


Şekil 2.3. Yorulma ömür aşamaları ve etkin faktörler [7]

Yorulma aşamasının başlangıç periyodunda önemli bir etki gösteren gerilme konsantrasyon faktörü (K_t), en büyük bölgesel gerilmenin nominal ortalama gerilmeye oranıdır.

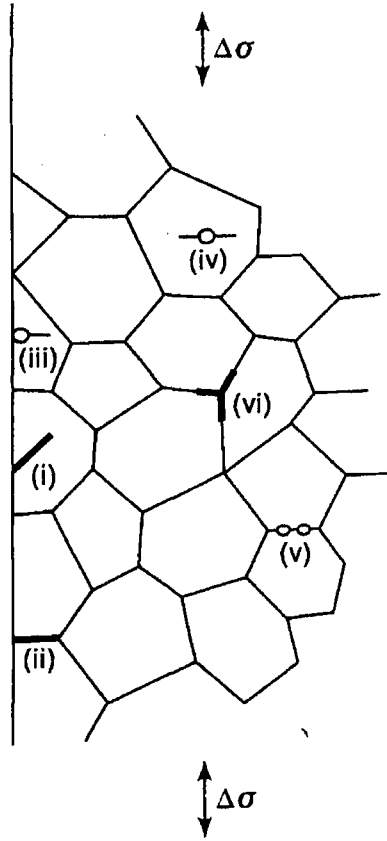
2.2.1. Yorulma çatlak başlangıcı

Yorulma çatlakları iç yapıda bulunan kusurlar veya malzeme yüzeyindeki çentik civarında oluşan bölgesel deformasyonların çok şiddetli olduğu bölgelerden başlamakta ve ilerlemektedir. Malzemede bulunan çatlak, çentik, boşluk, sert parçacıkların, ani kesit değişimlerinin çevresindeki gerilmeler parçanın maruz kaldığı dış gerilmelere göre daha büyük değerlerdedir. Bu gerilmeler etkisinde yapı içerisinde plastik şekil değişimi meydana gelir. Bir metal parçada maruz kalınan elastik sınır altındaki yükler nedeniyle mikro yapı içerisindeki mevcut hatalar (dislokasyonlar) bölgesel olarak hareket ederler ve Şekil 2.4'te görülen kayma bantlarını oluştururlar. Kayma bantlarının oluşumu sonucu yüzeyde girinti ve çıkıntılar gerilim yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Gerilme yığınlarının etkisiyle yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Mikro çatlaklar zamanla büyüyerek ilerler ve yapı içerisinde yayılırlar [8].



Şekil 2.4. Kayma bantlarından dolayı oluşan girinti ve çıkıntılar [9]

Şekil 2.5'te değişik çatlak başlangıç merkezleri; (i) taneleri kesen (ii) taneler arası (iii) yüzeyde bulunan kalıntı veya boşluk, bunların ilk ikisi kayma bantlarının oluşturduğu yüzey çatlaklarıdır, üçüncüsü ise bazı ticari alaşımlarda gözlemlenir. Bunların yanında (iv) malzeme içerisindeki kalıntılar (v) tane sınırlarındaki boşluklarda çatlak başlangıç merkezleri olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Çatlak başlangıcı için farklı merkezler [10]

Metalik parçaların imalatında alaşım ve yapısal elementlerin üretimi çok önemlidir. Çatlak başlangıcı için potansiyel merkezler, parça servise sokulduktan kısa bir süre sonra çatlak oluşturan boşluk ve kırılma kalıntılarıdır. Bu hatalar özellikle yüzey tabakasına yerleşmiş ise kayma başlangıç merkezleri gibi gerilim yoğunlaşmasına sebep olmaktadır [4].

2.2.2. Yorulma çatlak ilerlemesi

Birinci aşama çatlak ilerlemesinin başlangıcı sürekli kayma bantları boyunca olmaktadır. Çok kristalli metallerde çatlak, ikinci aşama çatlak ilerlemesine geçmeden önce sadece birkaç tane boyutunda ilerlemektedir. Genellikle birinci aşamada çatlak ilerleme hızı, ikinci aşama çatlak ilerleme hızı ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Yorulma sonucunda oluşan kırılma yüzeyleri

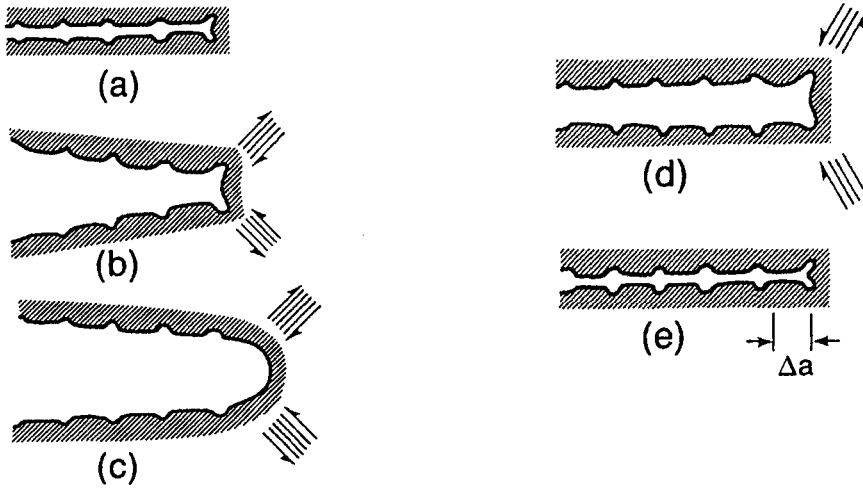
incelendiğinde birinci aşama çatlak ilerleme izini gösteren önemli bir özellik yoktur [11].

Tek eksenli yükleme durumunda maksimum kayma gerilmesinin normal uygulanan gerilme ile 45 derecelik bir açı yapar. Böylece mikro çatlaklar 45° açıyla yönlendirilmiş kristallerdeki yaklaşık maksimum kayma gerilmeleri boyunca başlar. Maruz kalınan çevrimsel deformasyonla oluşan çatlakların birkaçı başlangıçta kayma bantları boyunca ilerler daha sonra baskın olan çatlak yavaş yavaş ortaya çıkar ve yönünü değiştirerek yükleme eksenine dik hale gelir. Bu aşamanın uzunluğu malzemeye ve yükün genliğine bağlı olup genellikle 3-4 tane boyutu kadardır. Birinci aşamada oluşan çatlak uzunluğu malzemenin ortalama tane büyüklüğünün artışıyla ve gerilme veya deformasyon genliğinin azalmasıyla artar [10].

Yorulma çatlak ilerleme mekanizması hakkında yapılan çalışmalarda kesin bir fikir birliği oluşmamakla birlikte Laird ve Smith [9] plastik körelme modeli yaygın bir kabul görmüştür. Şekil 2.6'da yük artışı ile çatlak ucunun açılması, ilerlemesi ve yükün azalması ile körelmesi şematik olarak gösterilmektedir. Çekme yükünün uygulanmasıyla, maksimum kesme gerilmesinin kayma düzlemleri boyunca bölgesel plastik deformasyon oluşmaktadır (Şekil 2.6b). Yükün daha fazla artması ile kayma bantları genişlemekte ve çatlak ucu yarım daire şeklinde körelmektedir (Şekil 2.6c). Bu körelme sonucunda çatlak, yaklaşık çatlak ucu açılma mesafesinin yarısı kadar uzamaktadır. Basma yüklemesi süresince kayma yön değiştirmekte ve çatlak yüzeyleri arasındaki mesafe azalmaktadır. Çekme yüklemesi süresince oluşturulan yeni yüzey uç kısmında çift çentik gibi kıvrımlıdır (Şekil 2.6d). Maksimum basma gerilmesinde çatlak ucu tekrar keskinleşir ve çevrim başına çatlak ilerlemesi, (Δa) gerçekleşir (Şekil 2.6e).

II. bölge yorulma süresince çatlağın açılıp kapanması ile kırılan yüzeylerde birbirine paralel ve çatlak ilerleme yönüne dik yorulma çizgileri oluşmaktadır. Düzenli yorulma çizgilerinin oluşumu ilerleyen çatlak ucunda yeterince büyük plastik deformasyonun oluşumunu gerektirir. Plastik körelme modeline göre çatlak ucunda plastik deformasyon oluşmasından dolayı her bir yorulma çevrimi için çatlak uzaması artışları yorulma çizgileri şeklinde görülmektedir. Genellikle

düzgün bir yükleme yapıldığında yorulma, çatlak başlangıcından uzaklaştıkça yorulma çizgileri arasındaki mesafede artar [1].

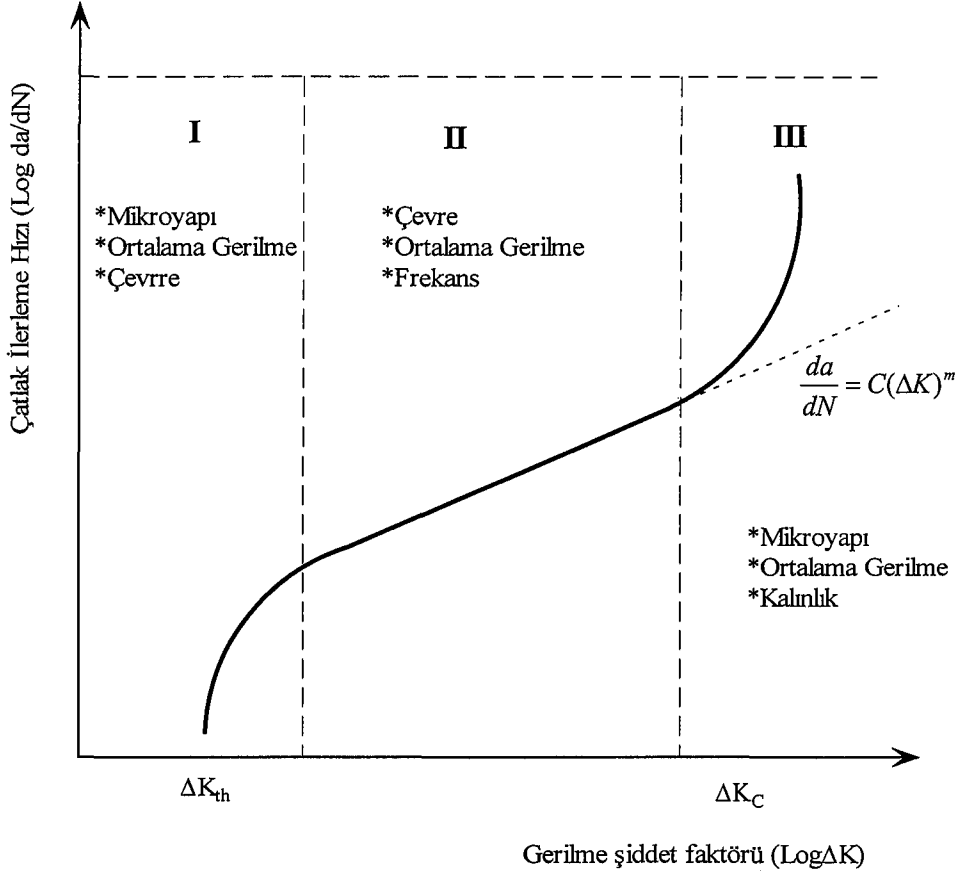


Şekil 2.6. Plastik körelme modeline göre yorulma çatlak uzaması, a) Sıfır yük, b) Küçük çekme yükü, c) Maksimum çekme yükü, d) Başlangıç noktasına dönme, e) Maksimum basma yükü [10]

2.2.3. Yorulma çatlak ilerleme hızı

Bir parçanın yorulma sürecinde çatlak ilerleme hızı üç aşamada incelenmekte ve her bir aşama süresince değişik parametreler ve mekanizmalar çatlak ilerleme hızını etkilemektedir.

Şekil 2.7’de gösterilen çatlak ilerleme hızı ve gerilme şiddet faktörü ($da/dN-\Delta K$) grafiğinin I. bölgesinde mikroyapı, ortalama gerilme, çevre şartlarının etkisi büyüktür. Bu bölge düşük gerilme şiddet değerlerinde, çatlak davranışı bir eşik değer ΔK_{th} ile sınırlandırılmaktadır. Eşik gerilme şiddet faktörü değeri (ΔK_{th}), altında çatlak ilerlemesi oluşmamakta veya çatlak, ölçülemeyecek kadar yavaş ilerlemektedir. Yorulma nedeniyle kırılan yüzeyler incelendiğinde bu bölgede yorulma çizgileri görülmez. Çelikler için gerilme şiddet faktörü eşik değeri, 35-105 $MPa\sqrt{m}$ ve alüminyum alaşımları için 21-42 $MPa\sqrt{m}$ değerleri arasında değişmekte ve bu değerler gerilme oranı ($R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$) ile ters orantılıdır [12].



Şekil 2.7. Yorulma çatlak ilerleme hızı, da/dN - ΔK eğrisinin bölgeleri ve bu bölgelerde etkili olan özellikler [10]

Genellikle yapıların ve parçaların çalıştığı II. bölgede eğri lineer olarak değişmektedir. II. bölgede mikroyapı, çevre, ortalama gerilme ve frekans çatlak ilerleme hızını etkilemektedir.

II. bölgede çatlak ilerleme davranışı genellikle linear elastik kırılma mekaniği (LEFM) kavramlarının kullanılmasıyla tanımlanmaktadır. Linear elastik kırılma mekaniği çatlak ucu civarında gerilme değeri ve dağılımının, uygulanan gerilme, çatlak boyutu-şekli ve çatlaklı parçanın malzeme özellikleri arasındaki ilişkinin belirtilmesinde kullanılmaktadır. 1960'lı yıllarda önerilen Paris eşitliği ikinci bölge çatlak ilerlemesi için yaygın bir kabul görmüştür.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (2.5)$$

Burada C ve m malzeme sabitleri olup deneysel olarak tayin edilmektedir. Eşitlik 2.5 kullanılarak çatlak ilerleme ömrü (hasar oluşuncaya kadar geçen çevrim sayısı) hesaplanabilir.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6'daki a_i ve a_f sırasıyla başlangıç ve son (kritik) çatlak uzunluğudur.

Son olarak yüksek ΔK değerlerinin bulunduğu III. bölgede, çatlak ilerleme hızı çok yüksek ve yorulma ömrü çok kısadır. Bu bölgede mikroyapı, ortalama gerilme ve malzeme kalınlığının etkisi fazla iken çevrenin etkisi daha azdır.

Düzensiz ve hızlı çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği III. bölge, toplam çatlak ilerleme ömrünü önemli derecede etkilemediğinden bazı mühendislik uygulamalarında ihmal edilmektedir. II. bölgeden III. bölgeye geçiş noktasındaki davranış, malzeme akma mukavemetine, gerilme şiddet faktörüne ve gerilme oranına bağlıdır [12].

Bu bölgede da/dN hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan Forman eşitliği (Eşitlik 2.7), Paris eşitliğinden türetilmiş ve da/dN değişikliklerini yük oranı (R) ve kritik gerilme şiddet değerini (K_C) dikkate almaktadır.

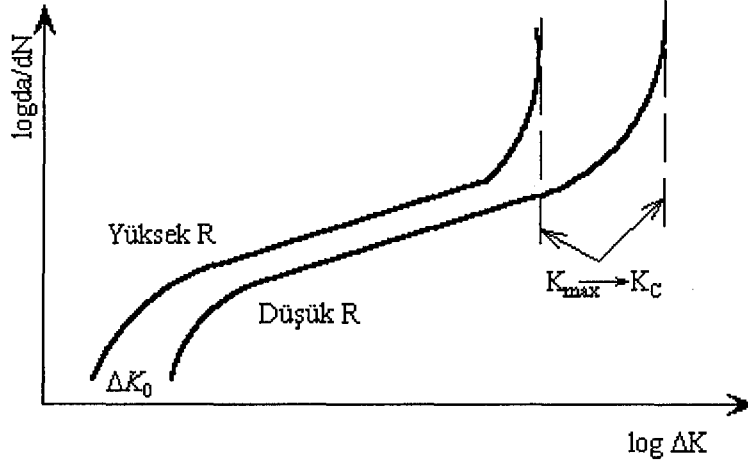
$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)(K_c - \Delta K)} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7'deki C ve n, Paris eşitliğindeki malzeme sabitleri ile aynı malzeme sabitleri olmasına rağmen bu eşitlikteki değerleri farklıdır. Forman eşitliğinin kullanılmasının avantajı, yüksek ΔK değerlerini dikkate almasıdır [3]. Şekil 2.8'de çatlak ilerleme hızı değişimleri, yük oranı (R) ve ΔK 'nın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Yorulma çevrimleri için maksimum gerilme şiddet faktörü, malzemenin kırılma tokluğuna yaklaştığı kritik durumun bir sonucu olarak III. bölgede çatlak ilerleme hızına R'nin etkisi daha fazladır [1].

Yorulma çatlak ilerleme hızı üzerine R'nin etkisini incelemek üzere yaygın olarak kullanılan diğer bir eşitlik Walker eşitliğidir (Eşitlik 2.8).

$$\frac{da}{dN} = C_b \left\{ \frac{\Delta K^{m_b}}{(1-R)^{c_1}} \right\} \quad (2.8)$$

Bu eşitlikteki C_b , m_b , c_1 malzeme sabitleridir.



Şekil 2.8. Yorulma çatlak ilerleme davranışında yük oranının (R) etkisi [1]

2.3. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler

Yorulma ömrünü etkileyen faktörler genel olarak aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir.

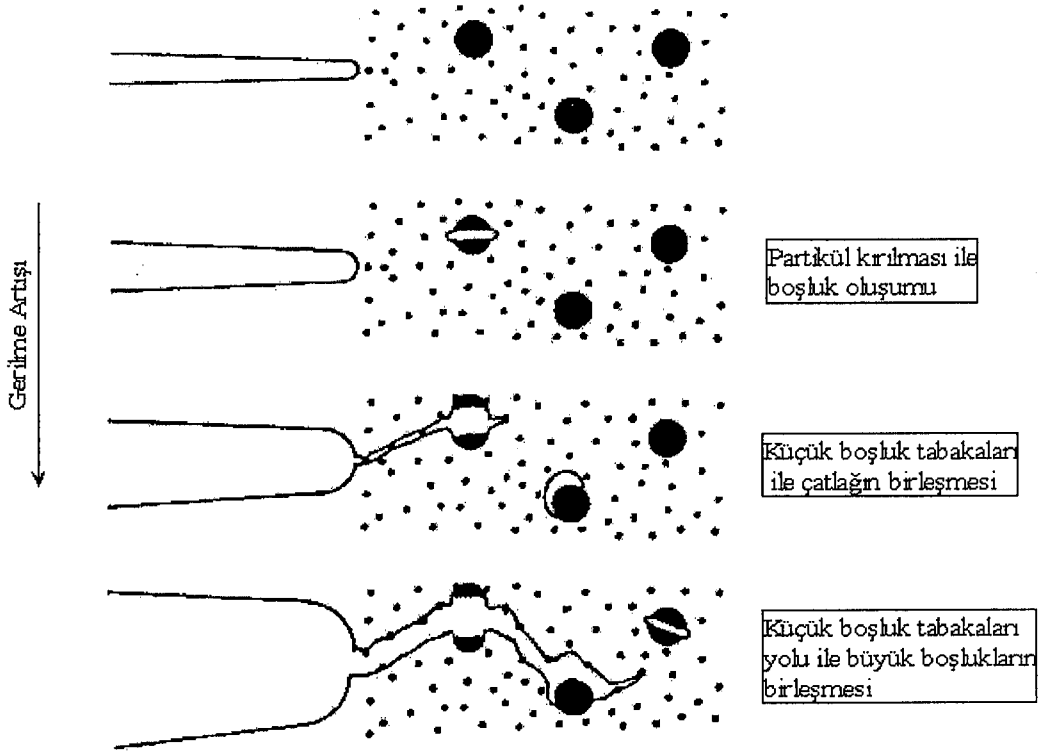
- Malzemenin mikro yapısı: Tane boyutu ve malzemenin yapısı,
- Üretim süreci: İmalat ve yüzey işlemleri,
- Yük dağılımı: Çevrim şekli, değeri, frekansı ve yük geçmişi,
- Çevre: Sıcaklık ve korozif ortam,
- Parça geometrisi: Yüzey düzgünlüğü, çentikler, kaynaklama, birleştirmeler ve parça kalınlığı.

2.3.1. Mikro yapı etkisi

Tane yapısı, ortalama tane boyutu ve mikro yapı hataları yorulma ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Döküm şekli, sıcak ve soğuk şekil verme fazlarının dağılımı farklı malzeme mikro yapıları oluşturmaktadır. Tane büyüklüğünün uzun

ömürlü yorulma koşullarını etkilemesinin değerlendirilmesi zordur. Çünkü tane büyüklüğünü değiştirmek için uygulanacak olan işlemler, malzemenin yorulma özelliklerinde olumsuz bir değişime neden olabilir [13].

Genellikle hata olarak tanımlanan malzeme içerisindeki kalıntılar ve boşluklar gerilme yığılmalarına sebep olarak yapının mukavemetini dolayısıyla da yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü azaltmaktadır. Bu kalıntılar malzeme yapısına göre daha kırılıgandır ve yüklemenin etkisi ile matris gibi kolay şekil değiştiremediğinden kalıntı sınırlarında veya içerisinde mikro boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukların başlaması, ilerleme ve birleşmesi Şekil 2.9'da gösterildiği gibi çatlak uzamasını karakterize edebilmektedir. Büyük kalıntılar küçük kalıntılara göre daha büyük boşluk oluşturmaktadır [1,6,14].



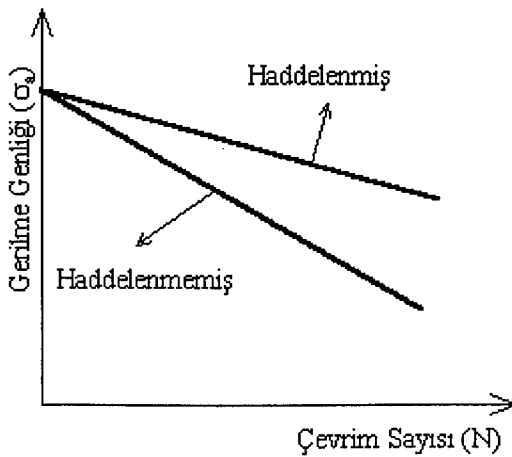
Şekil 2.9. Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi [14]

2.3.2. Üretim tekniklerinin ve yüzey işlemlerinin etkisi

Dövme, haddelme ve ekstrüzyon gibi üretim teknikleri tane yönelmesinden dolayı malzemelerde yöne bağlı mekanik özellikler oluşturmaktadır [10]. Metal plakaların haddelme yönünde tane, kalıntı ve boşlukların şekillerinde değişim olmakta, yani yöne bağlı olarak malzemenin mikro yapısı değişmektedir. Gerilmenin, mikro yapı elemanların uzama yönüne dik olduğu durumlarda yorulma dayanımı düşmektedir [15].

Isıl işlem, sertleştirme işlemleri, soğuk ve sıcak işleme, yüzey kaplaması yorulma ömrünü etkilemektedir [10]. Bazı yüzey işlemleri parçada kalıntı iç gerilmeler oluşturmaktadır. Kalıntı gerilmeler dışarıdan malzemeye herhangi bir yük uygulanmaksızın malzemede oluşan denge gerilmeleridir. Çekiçleme, soğuk haddelme ve statik ön yük gibi işlemler malzemede basma kalıntı gerilmeleri oluşturmaktadır. Malzeme yüzeyinde kalıntı basma gerilmeleri yorulma ömrünü artırırken kalıntı çekme gerilmeleri azaltmaktadır.

Malzeme çatlak uçunda oluşan kalıntı gerilme, dışarıdan uygulanan eşit büyüklükteki basma gerilmesi ile aynı etkiyi göstermektedir. Bu verilen belirli bir alternatif gerilme seviyesinde yorulma ömrünü artıracaktır. Malzeme yüzeyinde oluşan kalıntı basma gerilmelerinden dolayı, çeliğin σ -N eğrisine soğuk haddelenmenin etkisi Şekil 2.10'da görülmektedir [12].



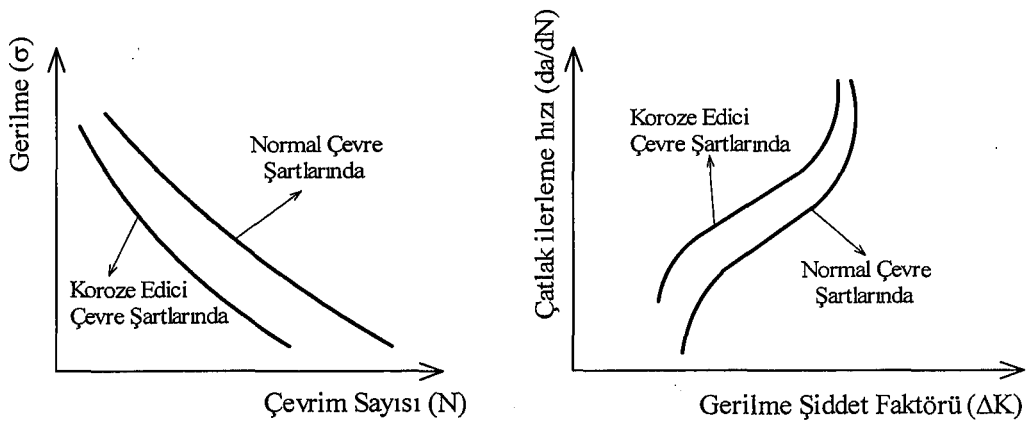
Şekil 2.10. Soğuk haddelenmenin σ -N eğrisine etkisi [12]

Üretimden sonra malzemeye ısı işlem uygulanması bazı özellikleri iyileştirirken basma kalıntı gerilmelerini azaltmaktadır.

2.3.3. Çevre faktörleri

Yorulma yükleri korozif çevre şartlarında uygulandığında, zararlı etkiler yorulma ve korozyonun ayrı ayrı uygulanmasından daha fazladır.

Yorulma çatlak başlangıç aşaması süresince, korozyon yorulmasının temel mekanizması metal yüzeyini korozif çevrenin bozması ve parça yüzeyinde oksit film tabakasının oluşturulmasıdır. Genellikle bu oksit tabakası bir koruyucu tabaka gibi davranarak metalin daha fazla koroze olmasını önlemektedir. Fakat çevrimsel yükler bu tabakada bölgesel çatlaklar oluşturmakta ve metalin tekrar çevre ile temasını sağlamaktadır. Aynı zamanda korozyon yüzey düzgünlüğünü bozduğundan gerilme konsantrasyonlarına sebep olmaktadır [12]. Şekil 2.11'de korozif çevre koşullarının gerilme-ömür ve çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiklerine etkisi görülmektedir.



Şekil 2.11. Korozif çevrenin σ -N diyagramına ve çatlak ilerleme hızına etkisi [13]

Korozif ortamda yorulma dayanımı yük frekansına önemli derece bağlıdır. Yorulma dayanımı çevrim frekansının azalması ile düşmektedir. Bu etki özellikle 10 Hz'den daha düşük çevrimlerde önem kazanmaktadır [13].

Çevrimsel yüklere maruz mühendislik parçaları servis süresince korozif çevrede çalıştıklarında malzeme yüzeyinde çatlak oluşumunu kolaylaştıran merkezler vardır. Bu merkezler;

- Yüzeyde oluşan kayma basamakları veya çıkıntılar
- Koruyucu oksit tabakasının kırıldığı yerler
- Yüzeye yakın kalıntılar [1].

Yorulma olayında ortam sıcaklığının da etkisi vardır. Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Fakat sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik etkisi hassasiyetini arttırmaktadır. Oda sıcaklığının üstünde yapılan deneylerde sıcaklık yükseldikçe yorulma dayanımı düşmektedir. Deney sıcaklığının belirli değere yükselmesi halinde meydana gelen sürünme olayı daha etkili hale gelmektedir [13].

2.3.4. Gerilmelerin etkisi

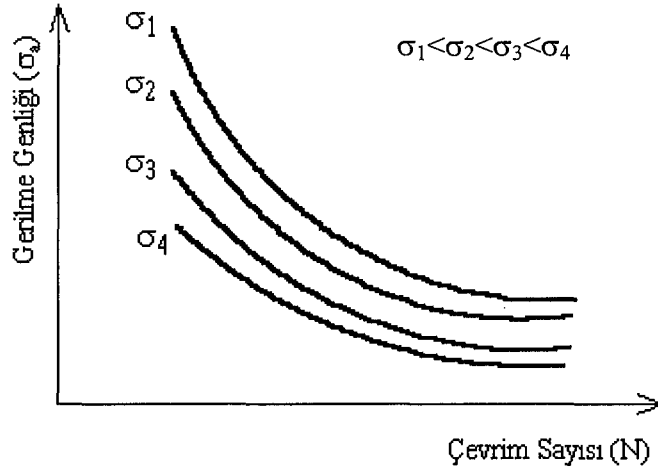
Yorulma ömrü, yüklemenin şekli, büyüklüğü, ve hızından etkilenmektedir. Gerçek çalışma koşullarında parçanın maruz kaldığı gerilmeler sabit genlikli değildir. Malzemeye zaman zaman diğer gerilmelere göre daha büyük gerilmeler uygulanabilir. Parçaya etkiyen aşırı gerilmeler yorulma ömrünü farklı şekillerde etkilemektedir [10].

Ortalama gerilme, gerilme genliği ve gerilme oranı değerleri bir malzemenin yorulma dayanımı özelliklerini etkilemektedir.

Eksenel yorulma testlerinde gerilme genliği (σ_a), hasar oluşturan çevrim sayısının bir fonksiyonu olarak gösterildiğinde, σ -N eğrileri uygulanan ortalama gerilme seviyeleri ile değişmektedir. Şekil 2.12'de metalik malzemeler için dört farklı ortalama gerilme seviyesinin bir fonksiyonu olarak tipik σ -N grafikleri gösterilmektedir. Ortalama gerilme seviyesinin artması ile yorulma ömrü azalmaktadır [1].

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesin olarak saptanamamakla birlikte 3-170 Hertz'lik frekansın yorulma ömrünü pek etkilemediği kabul edilmektedir. Fakat çok düşük deney hızlarında çevrenin etkisinin daha fazla

olması ve çok yüksek deney hızlarında malzemede oluşan ısılarda kısa zamanda yayınamaması yorulma deneyi sonuçlarını olumsuz yönde etkileyeceği kabul edilmektedir [5,14].



Şekil 2.12. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği [1]

2.3.5. Parça geometrisi

Delik, çentik ve birleştirme yerleri gibi parçalardaki geometrik süreksizlikler gerilme yığılmalarına sebep olarak çatlak başlangıç merkezleri oluşturmaktadır. Sürekliliğin bozulduğu bu bölgelerde gerilme ve deformasyon uygulanan gerilme ve deformasyondan daha büyüktür. Parçanın yüzey pürüzlülüğü, yüzey parlatma işlemleri ile giderilebilmekte, fakat fonksiyonel özelliklerinden veya birleştirme gerekliliklerinden dolayı endüstriyel parçalarda çentikler kaçınılmazdır [10].

Gerilme konsantrasyon faktörü K_t , geometrik süreksizlikten dolayı oluşan maksimum gerilmenin nominal gerilmeye oranı şeklinde tanımlanmaktadır.

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (2.9)$$

K_t 'nin tanımlanmasında önemli bir noktada çentiğin şeklidir. Şekil 2.13'de gösterilen dairesel ve eliptik çentiklerin ucunda oluşan maksimum gerilme;

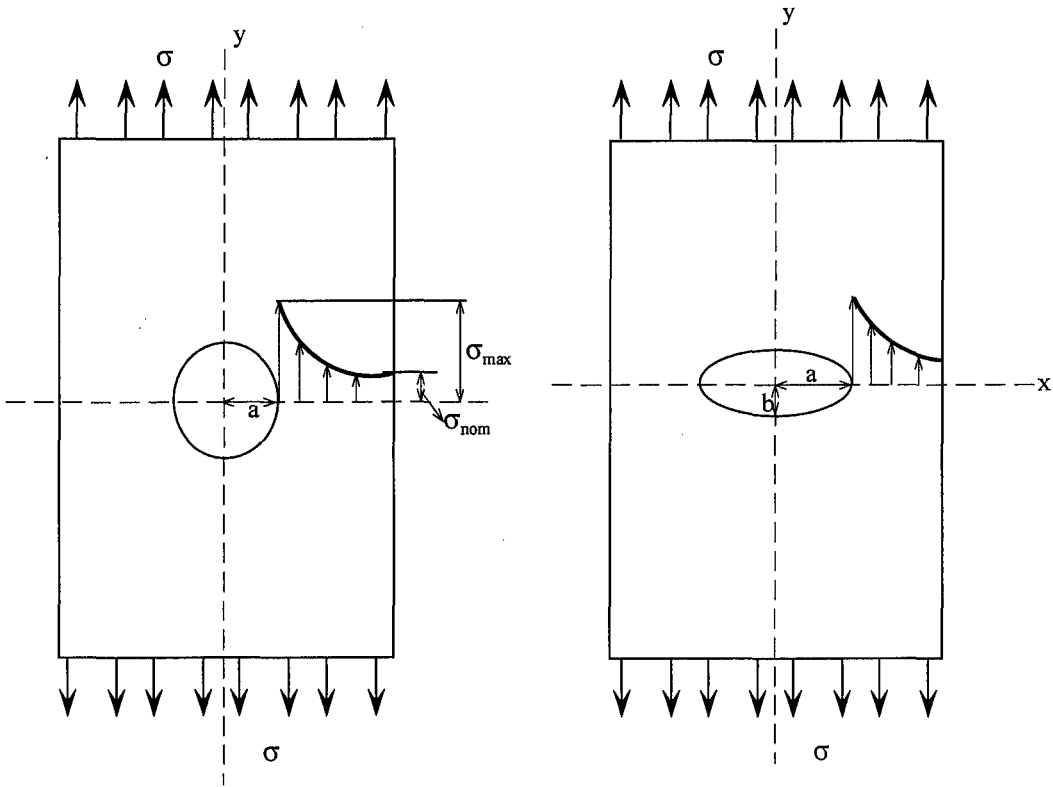
$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right) \quad (2.10)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

a: Deliğin genişliği,

b: Deliğin yüksekliğidir.

Çentiğin keskinliğine (a/b oranına) bağlı olarak çentik ucundaki maksimum gerilme değeri değişmektedir. Çentik ucundan uzaklaştıkça gerilme yoğunluğu azalmaktadır [15].



Şekil 2.13. Çentik civarında gerilme konsantrasyonunun değişimi [15]

Yüzey düzgünlüğü çatlak başlangıcında önemli bir etkiye sahiptir. Parça yüzeyinde bulunan çizik, mikro-çentikler ve işleme işaretleri erken bölgesel gerilmelere sebep olarak çatlak başlangıç ömrünü azaltmaktadır [14].

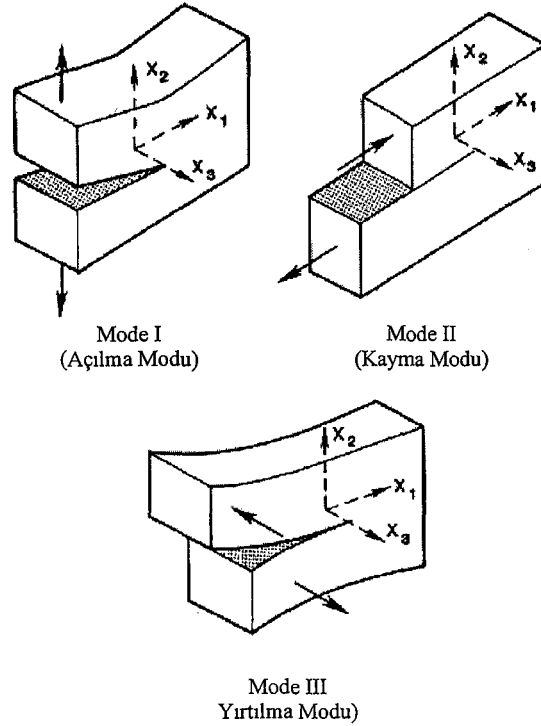
2.4. Çatlak Ucunda Oluşan Gerilmeler

Çatlak ucundaki olaylar (gerilme, şekil değişimleri) çatlak ucu bölgesel gerilmeleri ile ilgili olduğundan, bu gerilmelerin çatlaklı malzemeye uygulanan gerilmenin bir fonksiyonu olarak tanımlanması gerekmektedir. Çatlak ucu yakınındaki gerilme sistemleri, Şekil 2.14'te gösterilen yükleme tiplerine ayrılarak çıkarılmaktadır [16,17].

I. Tip yüklemde çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzlemine diktir. Bu tip, açılma (çekme) olarak adlandırılmaktadır.

II. Tip yüklemde (kesme) çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzleminindedir.

III. Tip yüklemde (yırtılma) çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi yine çatlak düzleminde, fakat yer değiştirme yönü kesme yüklemesinin sebep olduğu yönden farklıdır. Uygulamalarda çatlakların büyük çoğunluğu I. Tip yüklemde kaynaklanmaktadır [17].



Şekil 2.14. Yükleme tipleri [18]

Çatlak ucundaki gerilmeleri tarif etmek için I. tip (çekme) yükleme altında çatlak içeren sonsuz büyüklükte bir plaka düşünüldüğünde çatlak ucundan r mesafede ve Θ açısı ile belirtilen pozisyonda (Şekil 2.15) elastik gerilme alanı denklemleri;

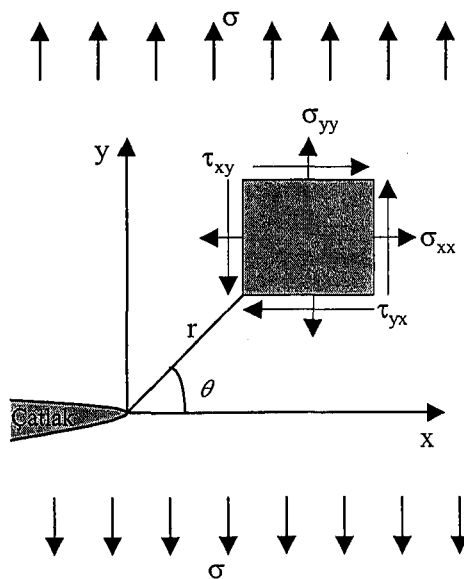
$$\sigma_x = \frac{\sigma\sqrt{\Pi a}}{\sqrt{2\Pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma\sqrt{\Pi a}}{\sqrt{2\Pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2} \right) \quad (2.12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma\sqrt{\Pi a}}{\sqrt{2\Pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3\Theta}{2} \quad (2.13)$$

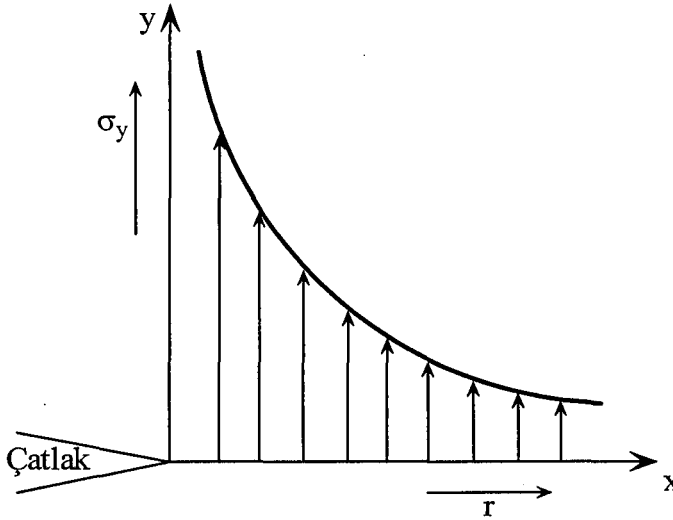
$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{düzlem şekil değişimi}) \quad (2.14)$$

şeklindedir. Bu denklemlerdeki a : çatlak boyunun yarısı, ν : poisson oranı, σ_x , x yönündeki σ_y , y yönündeki ve τ_{xy} kayma gerilmesini belirtmektedir.



Şekil 2.15. Çatlak ucu yakınındaki gerilmelerin durumu [18]

Bu eşitlikler gösteriyor ki elastik durum gerilmeleri dışarıdan uygulanan gerilmenin (σ) belirli bir oranıdır. Gerilmeler çatlak boyunun karekökü (\sqrt{a}) ile değişmekte ve Şekil 2.16'da görüldüğü gibi küçük r değerlerinde sonsuza gitmektedir. Gerçekte çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyon gerilmenin sonsuza gitmesini engeller [17].



Şekil 2.16. Çatlak ucundaki σ_y elastik gerilmesi [18]

2.4.1. Gerilme şiddet faktörü

Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasında, gerilme şiddet faktörü geliştirilmiştir. Gerilme şiddet faktörü (K) uygulanan gerilmenin, çatlak boyut ve şeklinin bir fonksiyonudur.

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\Pi a} \quad (2.15)$$

burada a : Çatlak boyu, σ : gerilme ve $f(g)$ test parçasına ve çatlak geometrisine bağlı düzeltme faktörüdür.

Kırılma Tokluğu: Kırılmanın gerçekleştiği gerilme şiddet faktörünün kritik bir değeri K_c vardır. K_c genellikle kırılma tokluğu olarak isimlendirilir ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Şekil 2.14’de gösterilen I. tip yükleme için sınırlı boyutta bir plaka düşünüldüğünde;

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\Pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (2.16)$$

burada, a : çatlak boyutu, σ_c : kırılma gerilmesi, w : plaka genişliğidir. K_{IC} malzemenin çatlak direncinin bir ölçüsüdür [17].

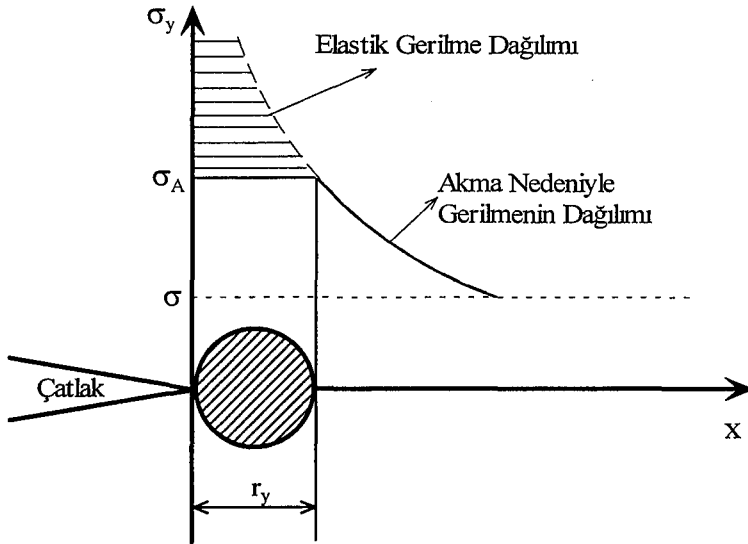
2.5. Çatlak Ucu Plastik Bölgesi

Çatlak ucunda gerilmelerin r 'ye bağlı olarak sonsuz bir değerde olacağı elastik gerilme eşitliklerinden (Eşitlik 2.11, 2.12, 2.13) görülmektedir. Ancak malzemeler (özellikle metaller) bir akma gerilmesine sahiptir. Çatlak ucu civarındaki gerilmeler teorik olarak çok yüksek olduklarından akma gerilmesinden daha büyüktür ve malzeme bölgesel olarak plastik şekil değişimine neden olurlar. Bu yüzden çatlak ucunu çevreleyen bir plastik bölge meydana gelmektedir [16,17,18].

Oluşan plastik bölgenin boyutunu hesaplamak için değişik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu konu ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda Şekil 2.17’de gösterilen σ_y yerine σ_A kullanılarak r_y hesaplanmaya çalışılmıştır.

$$r_y = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_A^2} = \frac{\sigma^2 a}{2\sigma_A^2} \quad (2.17)$$

Ancak Şekil 2.17’de gösterilen taralı bölge hesaba katılmadığından plastik bölge boyutunun daha büyük olacağı açıktır.



Şekil 2.17. Çatlak ucu plastik bölgesi [16]

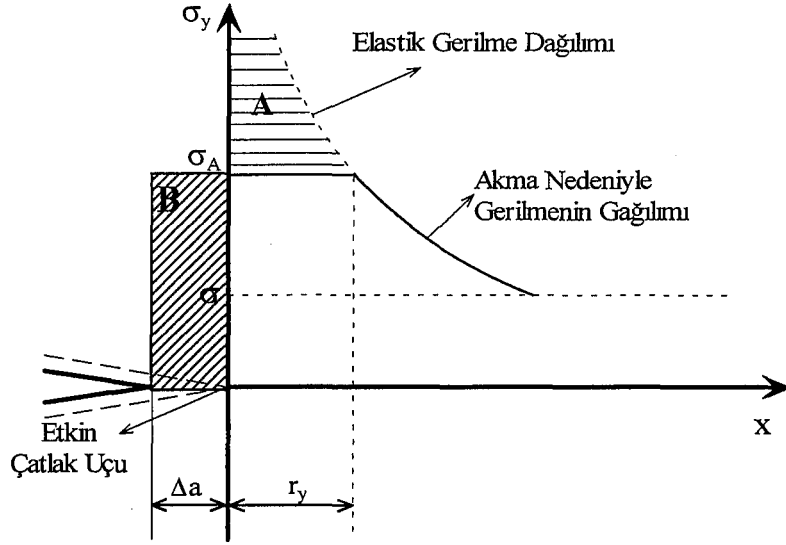
Irwin, plastisitenin oluşumunun, çatlağın fiziksel boyutundan daha uzunmuş gibi davranmasına yol açtığını öne sürmüştür. Etkin çatlak boyutu a_{eff} :

$$a_{eff} = a + \Delta a \quad (2.18)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda fiziksel çatlak uzunluğu a 'nın yerini daha büyük bir değer olan $a + \Delta a$ almaktadır. Etkin çatlak ucundaki gerilme, Şekil 2.18'de görüldüğü gibi bir akma gerilmesi σ_A ile sınırlandırılmıştır. Benzer şekilde fiziksel çatlağın önünde Δa uzaklığında etkiyen gerilme σ_A 'a eşittir. Dolayısıyla Δa , A ile gösterilen (Şekil 2.18) kesilmiş alanda kaybolan yükü taşıyacak kadar büyük olmalıdır. Şekil 2.18'deki r_y uzaklığı;

$$r_y = \frac{\sigma^2 (a + \Delta a)}{2\sigma_A^2} \quad (2.19)$$

şeklinde yeniden yazılabilir.



Şekil 2.18. Irwin analizinin şematik gösterimi [16]

Şekil 2.18'den B alanı $\sigma_A * \Delta a$ değerine eşit olduğu görülmektedir. A ve B alanlarının eşitliğinden;

$$\Delta a * \sigma_A = \int_0^{r_y} \left[\sigma \sqrt{\frac{a + \Delta a}{2r}} dr \right] - \sigma_A r_y \quad (2.20)$$

eşitliğinden

$$\sigma_A (r_y + \Delta a) = \frac{2\sigma \sqrt{a + \Delta a}}{\sqrt{2}} \sqrt{r_y} \quad (2.21)$$

elde edilir. 2.19 eşitliği;

$$\sigma \sqrt{a + \Delta a} = \sigma_A \sqrt{2r_y} \quad (2.22)$$

şeklinde yeniden yazılır ve 2.21 eşitliğinde yerine koyulursa;

$$\sigma_A (r_y + \Delta a) = \frac{2\sigma_A \sqrt{2r_y}}{\sqrt{2}} \sqrt{r_y} \quad (2.23)$$

$$2r_y = r_y + \Delta a = r_p \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.24'ten görüldüğü gibi Irwin'nin analizinden elde edilen plastik bölge boyutu, ilk yaklaşımdan elde edilen değerden iki kat büyüktür. Δa değeri Irwin plastik bölge düzeltmesi olarak adlandırılmaktadır [16,17].

2.5.1. Plastik bölgenin şekli

Buraya kadar yapılan açıklamalarda, plastik bölge ile ilgili analizler X eksenini boyunca ($\Theta = 0$) yapılmış ve plastik bölge şekli dairesel kabul edilmiştir. Plastik bölgenin daha doğru bir ifadesi sıfırdan farklı Θ açıları için akma durumları incelenerek elde edilmektedir. Genellikle bu işlemde Terasca veya Von Mises akma kriterlerinden biri kullanılmaktadır [17].

Von Mises akma kriteri asal gerilme terimleri kullanılarak;

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \sigma_{ys}^2 \quad (2.25)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Plastik bölge sınırları, asal gerilme denklemleri;

$$\sigma_1 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\Theta}{2}\right) \quad (2.26)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2}\right) \quad (2.27)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (\text{düzlem gerilme}) \quad (2.28)$$

$$\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.29)$$

Eşitlik 2.25'de kullanılarak Θ açısının bir fonksiyonu şeklinde;

düzlem şekil değiştirme:

$$\frac{K^2}{2\pi r} \left[\frac{3}{2} \sin^2 \Theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \Theta) \right] = 2\sigma_A^2 \quad (2.30)$$

düzlem gerilme:

$$\frac{K^2}{2\pi r} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \Theta + \cos \Theta \right) = 2\sigma_A^2 \quad (2.31)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Plastik bölgenin boyutu Θ 'nın bir fonksiyonu olarak;

düzlem şekil değişimi:

$$r_p(\Theta) = \frac{K^2}{4\pi\sigma_A^2} \left[\frac{3}{2} \sin^2 \Theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \Theta) \right] \quad (2.32)$$

düzlem gerilme:

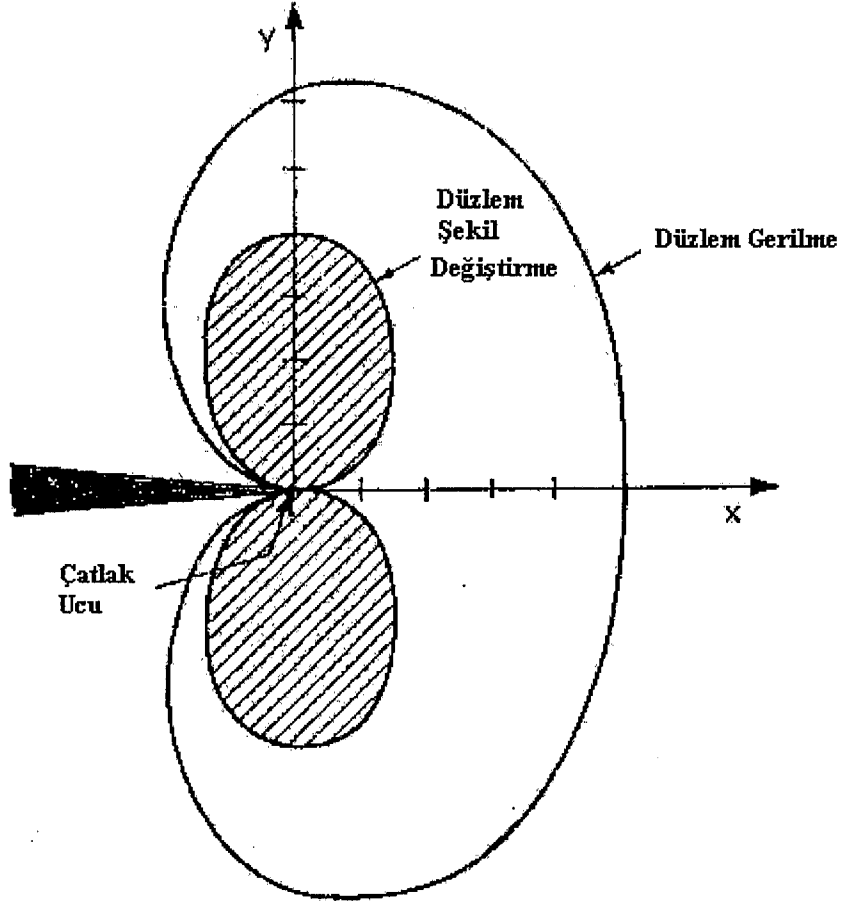
$$r_p(\Theta) = \frac{K^2}{4\pi\sigma_A^2} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \Theta + \cos \Theta \right) \quad (2.33)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [17,18].

Düzlem gerilme için $\Theta = 0$ alındığında Eşitlik 2.17'in elde edildiği görülmektedir. Düzlem şekil değişimi durumunda plastik bölge boyutu Şekil 2.19'da görüldüğü gibi düzlem gerilme durumundaki plastik bölgesinden küçüktür.

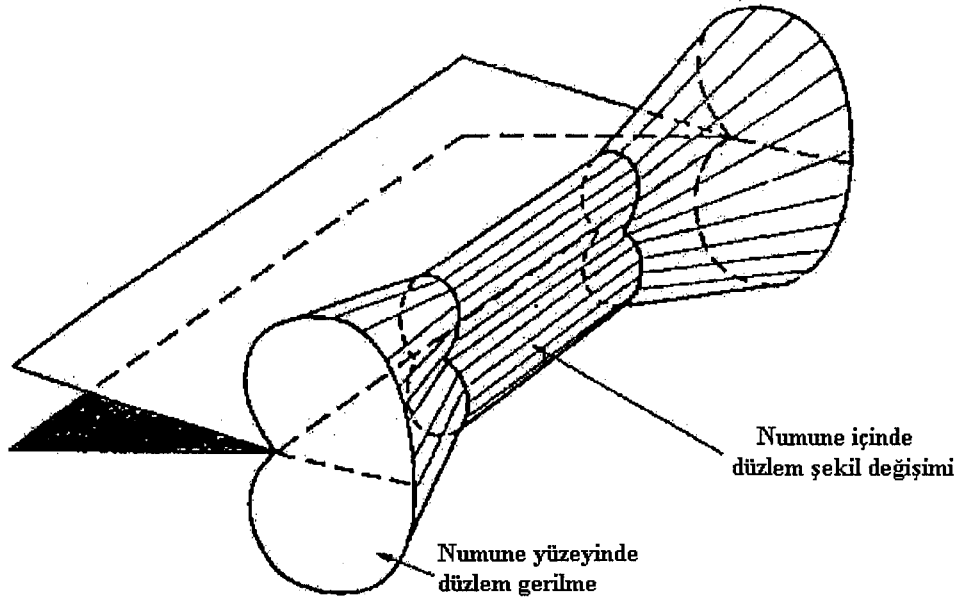
Malzeme kalınlığı yönünde gerilme ve şekil değişimleri farklılık göstermektedir. Malzeme bir levha olarak düşünüldüğünde çatlak ucu yan yüzeylerinde kalınlık yönünde gerilme yoktur ve düzlem gerilme durumu sözkonusudur. Levhanın içine doğru ilerledikçe (kalınlık yönünde) artan oranda üç eksenli gerilme ve sonuç olarak düzlem şekil değiştirme durumuna varılabilir.

Böylece plastik bölge ve boyutunun kalınlık boyunca Şekil 2.20'deki gibi değiştiği kabul edilmektedir [16].



Şekil 2.19. Von Mises akma kriterine göre düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme plastik bölge şekilleri [14]

Gerilme durumları ve plastik bölge boyutu birbirini etkilemektedir. Plastik bölge boyutu numune kalınlığından büyük ise akma kalınlık yönünde yüzeydeki gibi olmaktadır. Plastik bölge boyutu küçük ise akma kalınlık boyunca aynı boyutta gerçekleşmez. Fakat kalınlık yönündeki şekil değişimi ε_z malzemenin elastik kısmı tarafından zorlanarak $\varepsilon_z=0$ olması sağlanır. Sonuç olarak küçük plastik bölge düzlem şekil değişimi altında, büyük plastik bölge düzlem gerilme durumu altında oluşmaktadır [17].



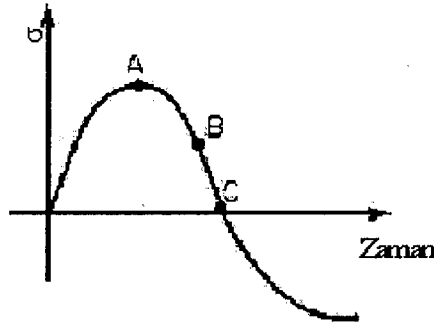
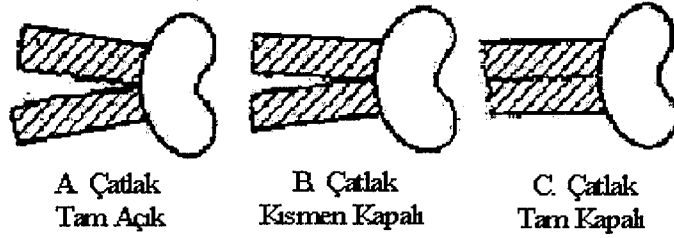
Şekil 2.20. Orta kalınlıkta bir levhada kalınlık boyunca plastik bölge değişimi [14]

2.6. Çatlak Kapanması

Gerilme oranının, çatlak ilerleme hızına etkilerinin incelenmesinde çatlak kapanma kavramı kullanılmaktadır [12]. Çatlak ucunda kalıcı bir şekilde oluşan deformasyon bölgesi yük kaldırıldıktan sonra elastik deformasyona uğrayan bölge ile uyum içerisinde olmalıdır. Elastik bölgedeki malzeme orjinal boyutunu korurken plastik bölgedeki malzeme boyutu değişmiş olur ve elastik alan bu boyut değişimine uyum sağlamak zorundadır. Bunun sonucu olarak çatlak ucunu çevreleyen elastik alan bu bölgedeki plastik alana basma yönünde kuvvet uygular [19]. Şekil 2.7’de gösterilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü $(\frac{da}{dN} - \Delta K)$ grafiğinin doğrusal olarak değiştiği II. bölgesinde Paris kanunu olarak bilinen 2.5 eşitliği doğru sonuç vermektedir. Ancak söz konusu eğrinin her iki ucundaki bölgede eğri R oranına bağlı olarak değişmektedir [6].

1970 yılında Elber çatlaklı malzemeye dışarıdan uygulanan çekme yükü olmasına rağmen çatlak yüzeylerinin birbirine temas ettiğini (kapandığını) ve bir sonraki yükleme çevriminde etkin bir gerilme değerine kadar açılmadığını dikkate alarak çatlak kapanma teorisini geliştirmiştir. Şekil 2.21’de görüldüğü gibi

yüklem eğrisinin B noktasında gerilme değeri sıfırdan büyük olduğu halde çatlak ucunda kapanma olmaktadır. Çatlak kapanması malzemenin akma gerilmesinin aşılması ile oluşan çatlak ucu plastisitesinin bir sonucudur [12].



Şekil 2.21. Çatlak kapanması [12]

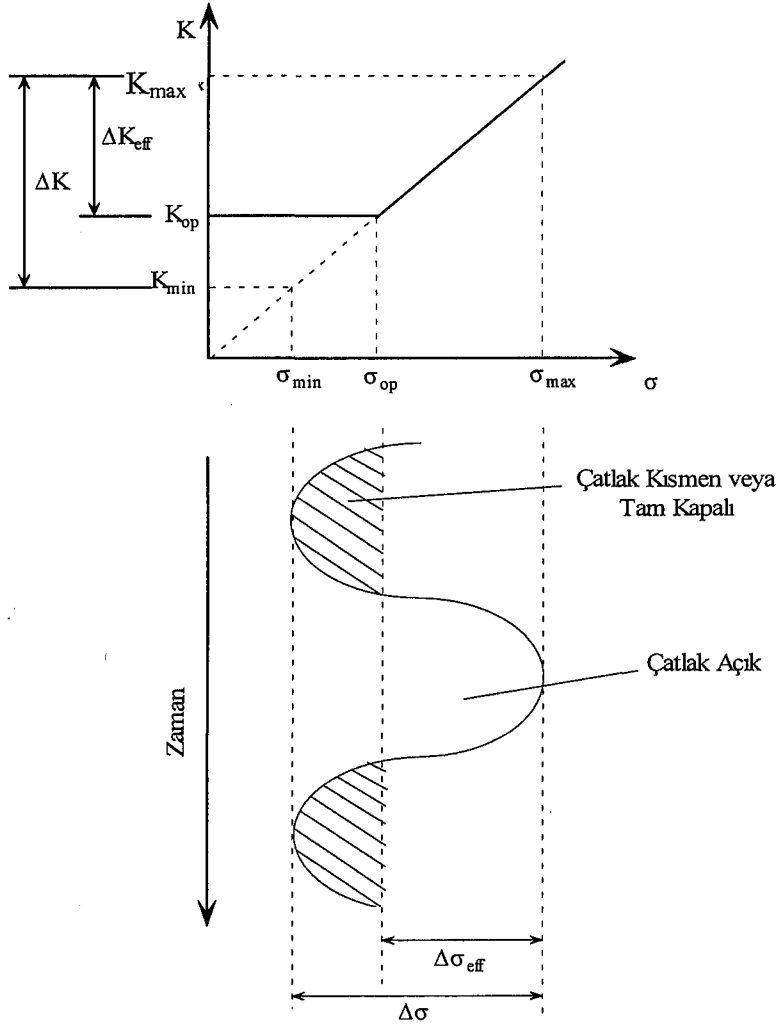
Yorulma çatlak ilerlemesinin meydana gelmesi için çatlağın tam açık olması gerekmektedir. Elber çatlağın tamamen veya kısmen açık olduğu bir çatlak açılma gerilme değeri σ_{op} tanımlamakta ve Şekil 2.22’de görüldüğü gibi çatlak σ_{op} ’dan küçük gerilme değerinde tamamen veya kısmen kapalıdır [12].

σ_{op} kullanılarak tanımlanan etkin gerilme şiddet aralığının (ΔK_{eff}), azalması ile yorulma çatlak ilerleme hızında azalma olacaktır. Numune maksimum gerilme şiddet değeri K_{max} ve minimum gerilme şiddet değerinde K_{min} çevrimsel olarak yüklendiğinde, çatlak açılma gerilme şiddet değerinin K_{op} altında çatlak yüzeyleri birbirine temas edecektir. Elber, çevrimin K_{op} altındaki kısmının çatlak ilerlemesine bir katkısının olmadığını kabul etmiş ve Eşitlik 2.34’deki gibi etkin gerilme şiddet aralığını tanımlamıştır.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (2.34)$$

Ayrıca etkin gerilme şiddet oranı U tanımlamaktadır [18].

$$U = \frac{K_{\max} - K_{op}}{K_{\max} - K_{\min}} \quad (2.35)$$



Şekil 2.22. Yorulma çatlak ilerlemesi süresince çatlak kapanması [14]

Elber, Paris-Erdoğan eşitliğini değişik R oranlarında yorulma çatlak ilerleme bilgileri ile ilgili başarılı sonuçlar veren Eşitlik 2.36 şeklinde değiştirmiş ve deneysel olarak 2024-T3 Al alaşımı için 2.37 eşitliğini bulmuştur [1].

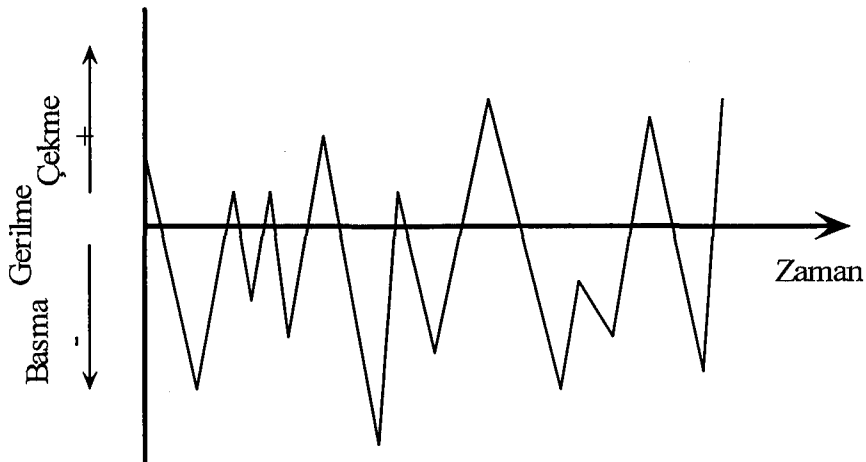
$$\frac{da}{dN} = C\Delta K_{eff}^m \quad (2.36)$$

$$\frac{K_{op}}{K_{max}} = 0.5 + 0.1R + 0.4R^2 \quad (2.37)$$

2.7. Değişken Genlikli Yorulma

Yorulma yüklemesine maruz kalan parçalar laboratuvar dışındaki gerçek yüklemelerde, değişken genlikli yükler sabit genlikli yüklere nazaran çok daha yaygındır. Şekil 2.23'de gösterildiği gibi parçaya etkiyen servis yükleri sabit genlikli yüklemeden çok farklı ve karmaşıktır.

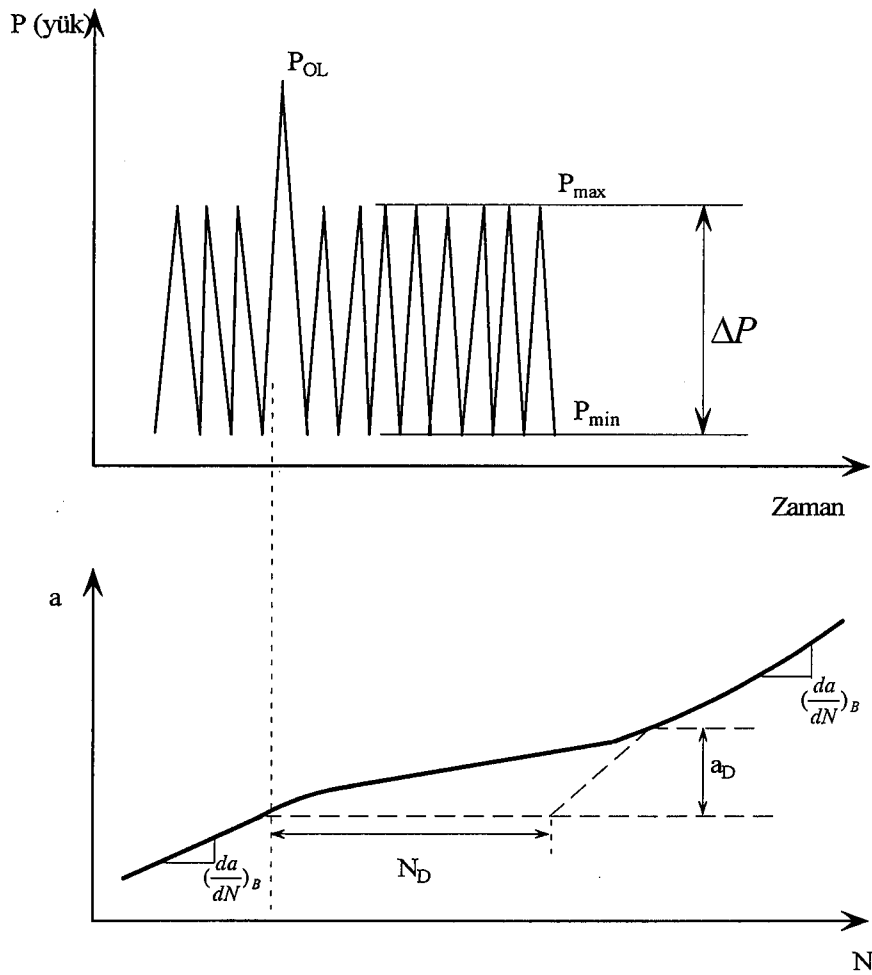
Özellikle uçak endüstrisinde rassal yükler altında yapıların yorulma davranışı büyük önem kazanmıştır [20]. Örneğin bir yolcu uçağının kanat alt yüzeyinin maruz kaldığı yükler, uçak yerde ve uçuş halinde iken farklılık göstermektedir. Yerde kanat alt yüzeyi basma yüklemesinde iken uçuş süresince çekme yükünün etkisindedir. Bir uçuş süresince kanada etkiyen çevrimsel yük değerlerinin hesaplanmasında dikkate alınan olaylar; yakıt ikmali, taksi hareketi, kalkış hareketi, kalkışta flap pozisyonu, normal seyir uçuşu, manevra hareketi, düşey rüzgar, inişte flap pozisyonu, iniş takımlarının ilk piste çarpması şeklinde sıralanmaktadır [1,7].



Şekil 2.23. Değişken genlikli yükleme [21]

2.7.1. Gecikme kavramı

Bir çok araştırmacı değişken genlikli yorulma durumunda yük etkileşiminin yorulma çatlak ilerlemesine etkilerini araştırmış ve genel çatlak ilerleme ifadelerini kullanarak yapılan tahminlerde hatalı sonuçlar bulunduğunu göstermiştir. Özellikle sabit genlikli yükleme sırasında Şekil 2.24'de görüldüğü gibi uygulanan aşırı yük, takip eden sabit genlikli çatlak ilerlemesinde gecikmeye sebep olmaktadır [7].



Şekil 2.24. Aşırı yüklemeye maruz kalan malzemenin yorulma durumu ve çatlak ilerleme hızının zamanla değişimi [7]

Sabit genlikli bir yük çevrimine uygulanan çekme aşırı yükü Şekil 2.24'de gösterilen $(\frac{da}{dN})_B$ çatlak ilerleme hızını azaltmaktadır. Çatlak boyunun a_D

uzunluğu boyunca aşırı yüklemenin şiddetine bağlı olarak bir gecikme olurken daha sonra çatlak ilerleme hızı önceki değerine ulaşmaktadır.

Aşırı yükleme yeterince büyük olduğunda çatlak tamamen durdurulabilmekte ve takip eden çevrimlerde yorulma çatlak ilerlemesi olmamaktadır.

Tek aşırı yüklemekten sonra dikkate alınan çatlak ilerlemesindeki gecikmeye sebep olan mekanizmalar, kalıntı gerilme, çatlak kapanması, deformasyon sertleşmesi ve plastik körelme ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Çatlak sapması, farklı genlikli iki çevrim arasındaki etkileşim etkilerini çatlak ucu yönlendirilmesindeki uyumsuzluk olarak tanımlanmaktadır. Düşük K değerleri için yönlenme yük istikametine dik, yüksek K değerlerinde yükleme yönü ile 45° lik açı oluşturmaktadır. Aşırı yükten dolayı oluşan çatlak ucundaki deformasyon sertleşmesi, akma gerilmesini yükselttiğinden aşırı yükü takip eden çevrimlerde çatlak ilerleme hızında yavaşlamaya sebep olmaktadır [22]. Plastik körelme, bir yük çevriminin oluşturacağı hasar, körelmiş veya keskinleşmiş çatlak geometrisine ve bir önceki çevrimin genliğine bağlıdır. Yüksek ΔK değerleri çatlak ucunu köreltirken, düşük ΔK değerlerinde çatlak ucu sivrileşmektedir[4]. Bu mekanizmalardan önceki bölümde incelenen kalıntı gerilme ve çatlak kapanması uygulama ve deneylerde yaygın olarak kullanılmaktadır .

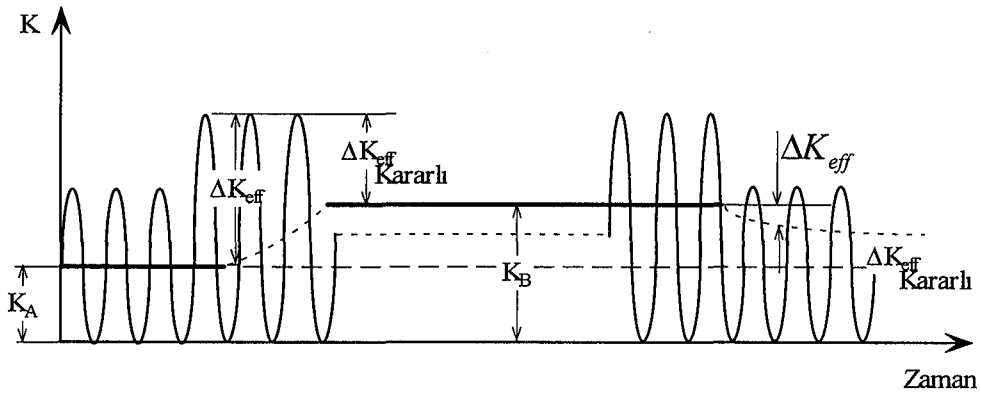
Aşırı yüklemekten hemen sonra çatlak hızı minimum değere ulaşmamaktadır. Bu minimum değer, çatlak yaklaşık aşırı yükleme plastik bölgesi içerisinde plastik bölge boyutunun 1/4-1/8 arasında bir uzunluğa ulaştığında gerçekleşmektedir. Bu davranış ertelenmiş gecikme olarak tanımlanmaktadır.

Aşırı yükleme sonucunda oluşan çatlak ucu körelmesinden dolayı çatlak ucundaki gerilme yığılmaları daha küçük şiddette olmaktadır. Bundan dolayı çatlak ucu körelme teorisi yorulma çatlak ilerlemesinin daha yavaş olacağını belirtmektedir. Aşırı yüklemekten sonra çatlak körelmesi maksimum olduğundan en küçük çatlak ilerleme hızının aşırı yük uygulamasından hemen sonra gerçekleşeceği beklenmektedir. Fakat maksimum gecikme, çatlak aşırı yükleme plastik bölgesinde bir miktar ilerledikten sonra gerçekleşmektedir.

Yük etkileşim etkilerini hesaplamak için önerilen basma kalıntı gerilmeleri aşırı yüklemenin oluşturduğu büyük çatlak ucu plastik bölgesinden dolayı bu

kalıntı gerilmeleri aşırı yüklemeye kalktıktan sonra çatlak ucunu kapatacak şekilde sıkıştırmaktadır. Bu model maksimum gecikmenin aşırı yüklemeden hemen sonra gerçekleşeceğini beklediğinden ertelenmiş gecikme olayını tahmin edememektedir.

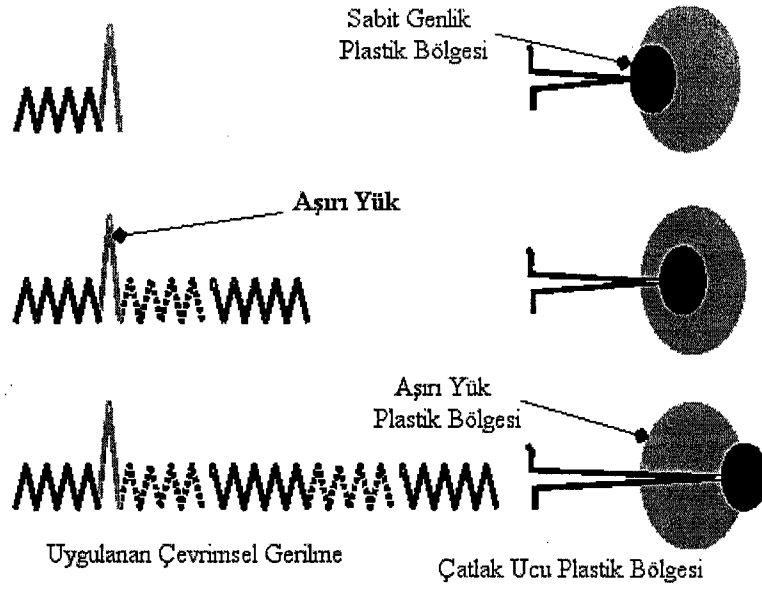
Önceki bölümlerde açıklandığı gibi çatlak kapanma etkisinden dolayı yorulma çatlak ilerlemesinde gecikme olmaktadır. Çatlak kapanma teorisi Şekil 2.24'de gösterilen düşük-yüksek yük sıralamasında çatlak ilerleme hızının artışı ve yüksek-düşük yük sıralamasında çatlak ilerleme hızının azalışını başarılı bir şekilde açıklamaktadır.



Şekil 2.25. Yük seviyesindeki değişim ile çatlak kapanma gerilme şiddet faktörünün değişimi [12]

Şekil 2.25'de gösterilen K_A düşük yük seviyesinde gerilme şiddet faktörü, K_B yüksek yük seviyesindeki gerilme şiddet faktörüdür. Düşük-yüksek şeklindeki yüklemelerde yüksek yük seviyesine geçerken çatlak ilerleme hızı bir geçiş yükselmesi gösterirken, yüksek-düşük şeklindeki yüklemelerde azalarak çatlak ilerlemesinde gecikme gerçekleşmektedir. Çatlak aşırı yüklemeye plastik bölgesi içerisinde ilerlerken ilerleme hızındaki yavaşlama, çatlak aşırı yüklemeye plastik bölgesi içerisinde bir miktar ilerledikten sonra gerçekleşmektedir. Çatlak kapanma teorisine göre aşırı yüklemeye plastik bölgesi çatlakın ön kısmında olduğundan aşırı yükten hemen sonra kalıntı basma gerilmeleri çatlak açılma gerilmesini etkilemez. Çatlak bu plastik bölgede bir miktar ilerlediğinde basma kalıntı gerilmeleri çatlak yüzeylerine daha fazla etkiyecektir. Ertelenmiş gecikme olayını çatlak kapanması açıklayabilmektedir [12].

Yük etkileşimi sebebiyle çatlak ilerlemesindeki gecikmenin fiziksel açıklaması aşırı yükten dolayı oluşan daha büyük plastik bölge oluşumu ile açıklanmaktadır. Şekil 2.26'da farklı aşamalarda çatlak ucunda oluşan plastik bölge boyutları gösterilmektedir. Sabit genlikli yükleme altında plastik bölge boyutu (siyah daire) aşırı yüklemeye kadar oluşmuş plastik bölge boyutundan (gri daire) oldukça küçüktür. Çatlak aşırı yük nedeni ile oluşmuş büyük plastik bölge içerisinde ilerlerken malzemenin çatlak ilerleme direnci arttığından ilerleme hızında yavaşlama olmaktadır. Çatlak aşırı yük plastik bölgesinden çıktığında normal çatlak ilerleme hızına tekrar ulaşır [23].



Şekil 2.26. Yorulma aşırı yüklemesinin plastik bölge boyutu üzerine etkisi [23]

2.7.2. Aşırı yükleme tipleri ve yorulma çatlak ilerleme hızına etkileri

Değişken genlikli yorulma testlerinde karmaşık yük tiplerinin uygulanması modern yorulma makinelerinin (kapalı devre bilgisayar yük kontrollü) gelişimi ile mümkün olmaktadır. Farklı tip yorulma testlerinde uygulanan test tipleri, Çizelge 2.1'de basitten daha kompleks yapıya sahip yükleme şekillerine göre

verilmektedir. Test tiplerine göre ana değişkenler yükleme tipinin karmaşıklığına bağlı olarak artış göstermektedir.

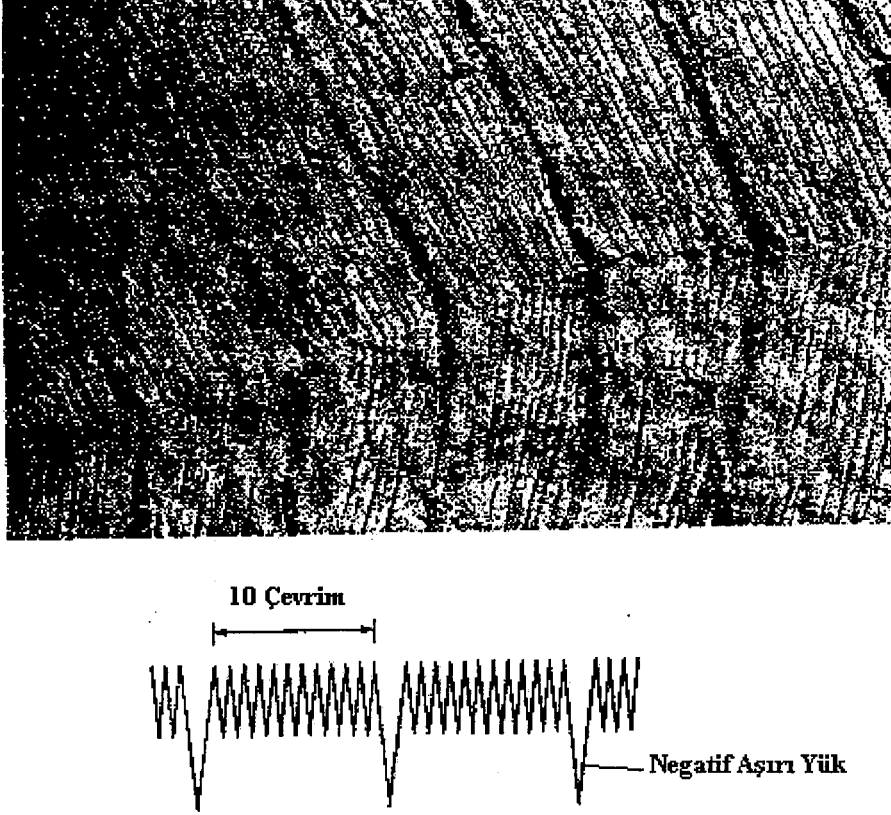
Çizelge 2.1. Değişken genlikli test tipleri ve ana değişkenler [7]

Test Tipi	Ana Değişkenler
Basit Testler	
Aşırı Yükleme Sabit Genlikli Yorulma Testleri	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Tek aşırı yük</i> • <i>Tekrarlı aşırı yükler</i> • <i>Blok aşırı yükler</i> • <i>R'ye bağlı aşırı yük değeri</i> • <i>Aşırı yük çevrim düzeni</i>
Blok Testler	<ul style="list-style-type: none"> • <i>İki bloklu Yüksek-Düşük ve Düşük-Yüksek düzeni</i> • <i>Tekrarlı bloklar</i> • <i>R'ye bağlı artış değerleri</i>
Orta Dereceli Kompleks Testler	
Program Testleri	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Genlik düzeni</i> • <i>Blokların ne kadar uygulanacağı</i> • <i>Genlik fonksiyon dağılımı</i>
Kompleks Testler	
Rassal Yük Testleri	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Dağılım yoğunluk fonksiyonu (dar/geniş band)</i> • <i>Düzensizlik faktörü</i>
Servis Similasyon Testleri	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Simüle edilecek servis yük tipi değişkenleri</i>

Aşırı yük ve basamak yükleme tipleri çatlak ilerleme mekanizmalarının temel prensiplerini anlamayı amaçlayan çalışmalarda kullanılır. Programlanmış blok yükleme, rassal yükler ve uçuş simülasyon yükleri ise daha çok çatlak ilerleme modellerini denemek için kullanılır [24].

Yorulma çatlak ilerlemesinde dikkate alınan karakteristiklerden biride yorulma sebebiyle kırılan yüzeyde düzenli çizgilerin oluşmasıdır (Şekil 2.27). Çevrimsel yük (tekrarlı 10 küçük çevrim +1 aşırı çevrim) ve çizgi düzeni

arasındaki ilişki her çevrim başına çatlak ilerlemesi olduğunu göstermektedir. Yorulma çizgileri mikro-plastik deformasyonun bıraktığı izlerdir. Fakat bu mekanizma bütün malzemeler için aynı değildir. Yorulma çizgilerinin görünümü uygulanan yük çevrim şiddetine bağlıdır [7]. Şekil 2.27’de aşırı yüklenme sonucu oluşan çizgi farklılıkları görülmektedir.

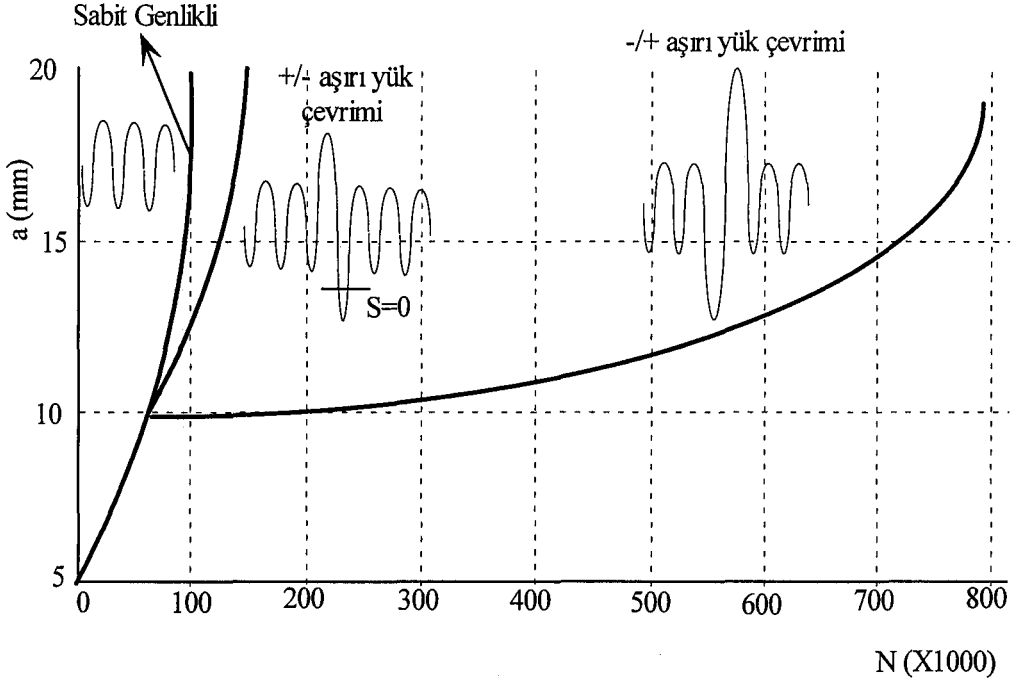


Şekil 2.27 2024-T3 Al plakasında periyodik değişken genlikli yüklenme sırasına bağlı olarak değişen yorulma çizgileri [7]

2.7.2.1. Tek aşırı yüklenme

Tek aşırı yüklenme değişken genlikli yüklemenin temelini oluşturmakta ve yorulma çatlak ilerlemesinde yavaşlamaya neden olan en ilkel yüklenme şeklidir. Malzemenin tek aşırı yüklemeye karşı davranışının iyi anlaşılması rassal yükler altındaki yorulmanın modellenmesi için önşart oluşturmaktadır.

Şekil 2.28’de 2024-T3 Al alaşımında sabit genlikli yükleme altında çatlak ilerlerken iki farklı aşırı yük tipinin $a=10$ ’da uygulanması sonucu ortaya çıkan yavaşlama görülmektedir.



Şekil 2.28. İki farklı aşırı yük çevriminin 2024-T3 Al alaşımında yorulma çatlak ilerlemesine etkisi ($\sigma_a=25$ MPa, $\sigma_m=80$ MPa, aşırı yük $\sigma_a=80$ MPa) [7]

Aşırı yük çevrimi maksimum basma-maksimum çekme (-/+) şeklinde uygulandığında çatlak ilerlemesinde daha fazla gecikme oluşturmaktadır. Maksimum aşırı çekme yükü çatlak ucunda büyük değerlerde plastik bölge oluşturarak basma kalıntı gerilmelerinin oluşmasına sebep olmaktadır [7]. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi bu olay plastik bölge boyunca çatlak ilerlemesini yavaşlatmaktadır. Aşırı yük plastik deformasyonundan dolayı daha fazla çatlak kapanması gerçekleşecek ve çatlak açılma gerilmesi (σ_{op}) yükselirken etkin gerilme değeri (σ_{eff}) düşecektir.

Şekil 2.28’de gösterilen diğer yükleme tipinde (+/- yük çevrimi) dikkate alınan gecikme değeri çok küçüktür. Pozitif aşırı yükleme büyük çatlak ucu

plastik bölgesi oluştururken, bunu takip eden negatif aşırı yükleme plastik bölgeyi küçültmektedir. Böylece kalıntı çekme plastik şekil değişimi önemli derecede azalarak kalıntı gerilme alanı daha az etkili olmaktadır [7].

Tek aşırı yük deneyleri sabit yük aralığında veya sabit gerilme şiddet faktörü aralığında yapılabilmektedir. Bu aşırı yükleme ile ilgili olarak yapılan deneylerde üç tane fikir birliği oluşmuş özellik vardır [24].

- Yavaşlamanın süresini tayin eden ana faktör aşırı yükün şiddetidir.
- Akma mukavemeti düşük olan malzemelerde yavaşlama daha fazladır.
- Net kesit kalınlığı arttıkça yavaşlama azalmaktadır.

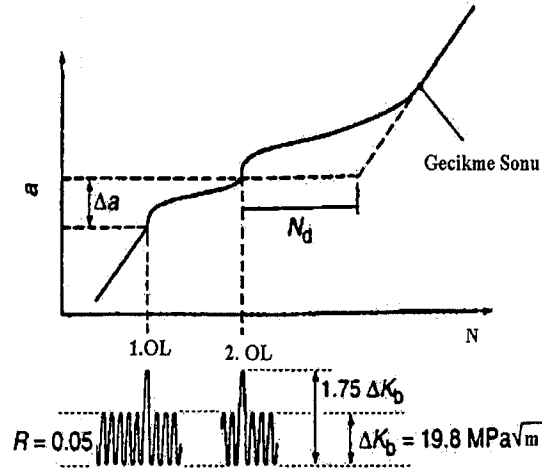
Düzlem şekil değişimi ve düzlem gerilme için plastik bölge boyutu farklıdır. İnce levhalar için çatlak ucundaki gerilme durumu düzlem gerilme baskın olacak şekilde iken kalın numunelerde düzlem şekil değişimi baskındır. Mills ve Hertzberg çalışmalarında ince levhalarda gecikme periyodunun daha fazla bulmuşlardır [7].

2.7.2.2. Periyodik uygulanan aşırı yükler

Tek aşırı yükleme periyodik olarak uygulandığında ortaya çıkan yavaşlama aşırı yükler arasındaki etkileşmeye bağlı olarak değişir. Aşırı yükler birbirinden çok uzak olduğunda ayrı olaylar olarak hareket edecekler, birbirine çok yakın olduğunda ise yavaşlama yerine hızlanmaya neden olacaklardır [24].

Mills ve Hertzberg sabit genlikli yükleme üzerine belirli bir çevrim sayısı aralığında iki aşırı yük uygulayarak yaptığı deneyde gecikmenin aşırı yükler arasındaki aralığa bağlı olarak değiştiğini bulmuştur. Bu çalışmaya göre maksimum etkileşim; çatlak, ilk aşırı yüklemenin oluşturduğu plastik bölgenin % 25'ne kadar ilerlediğinde ikinci aşırı yükleme uygulanırsa gerçekleşmektedir (Şekil 2.29) [7].

Periyodik aşırı yükleme ile ilgili Tür ve Vardar'ın 7075-T6 Al alaşımı ile yaptığı deneylerde başlangıçta aşırı yükler arasındaki çevrim sayısının (n_{CA}) artması ile gecikme artarken, belirli bir n_{CA} değerinden sonra azalmaktadır [24].



Şekil 2.29. Periyodik aşırı yüklemenin çatlak ilerlemesine etkisi [7]

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalarda, sabit genlikli yükleme sırasında uygulanmış tek aşırı yükün 2024-T3 alüminyum alaşımının yorulma çatlak ilerleme hızına etkisi incelenmiştir. Önce bu malzemenin sabit genlikli yükleme altında yorulma çatlak ilerleme deneyleri yapılmıştır. Sonraki deneylerde aynı çevrimsel yükleme sırasında değişik aşırı yük oranlarında tek aşırı yük uygulanarak çatlak ilerleme hızında oluşan gecikme sayısı hesaplanmıştır. Numunelerin kırılmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Uygulanan yük değerleri malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

3.1. Deney Malzemesi

Deney çalışmalarında kullanılan malzeme, 6 mm kalınlığında plaka şeklinde 2024-T3 Alüminyum alaşımıdır. 2024 Al alaşımında alüminyumun yanında ana element olarak bakır ve manganez bulunmaktadır. Bu malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1 ve 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. 2024-T3 Al alaşımının kimyasal bileşimi [25]

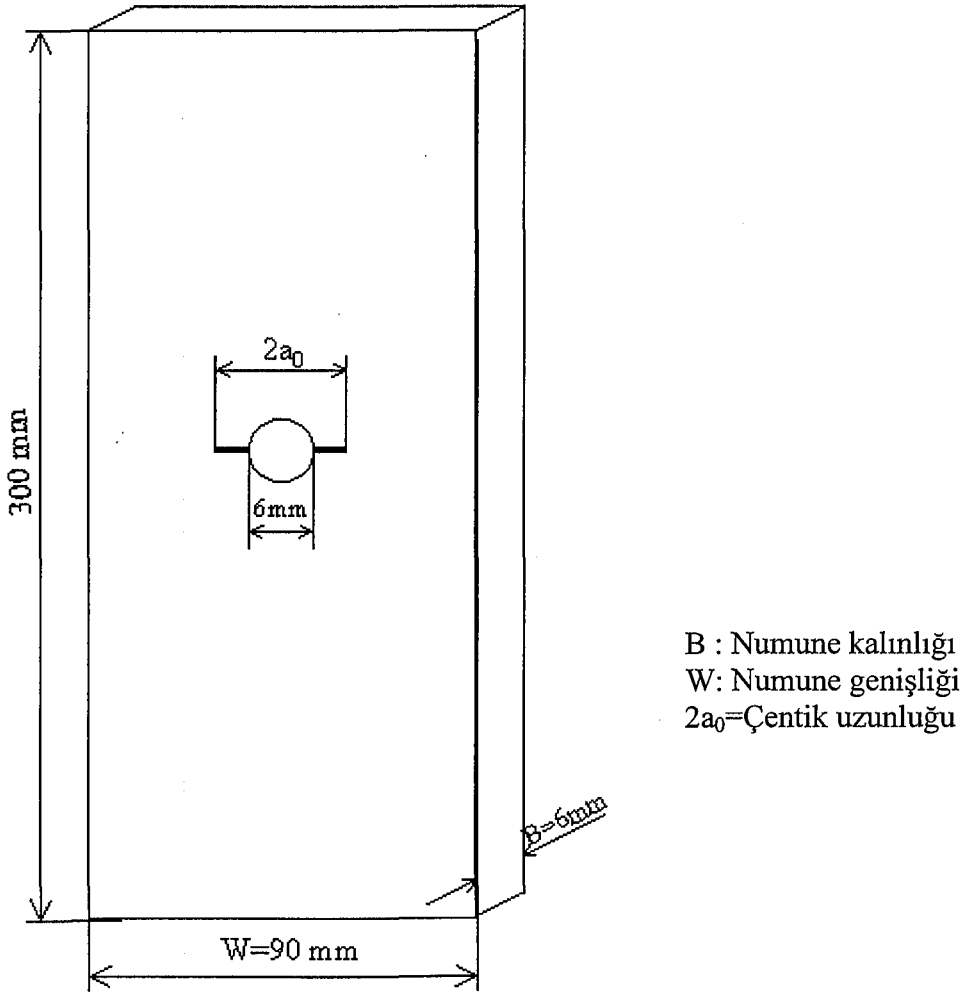
Element	Cu	Mg	Mn	Cr	Fe	Si	Ti	Al
% Miktarı	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	Max 0,1	Max 0,5	Max 0,5	Max 0,15	93,5

Çizelge 3.2. 2024-T3 Al alaşımının mekanik özellikleri [25]

Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (50 mm’de % olarak)
485	345	18

3.1.1. Numune geometrisi

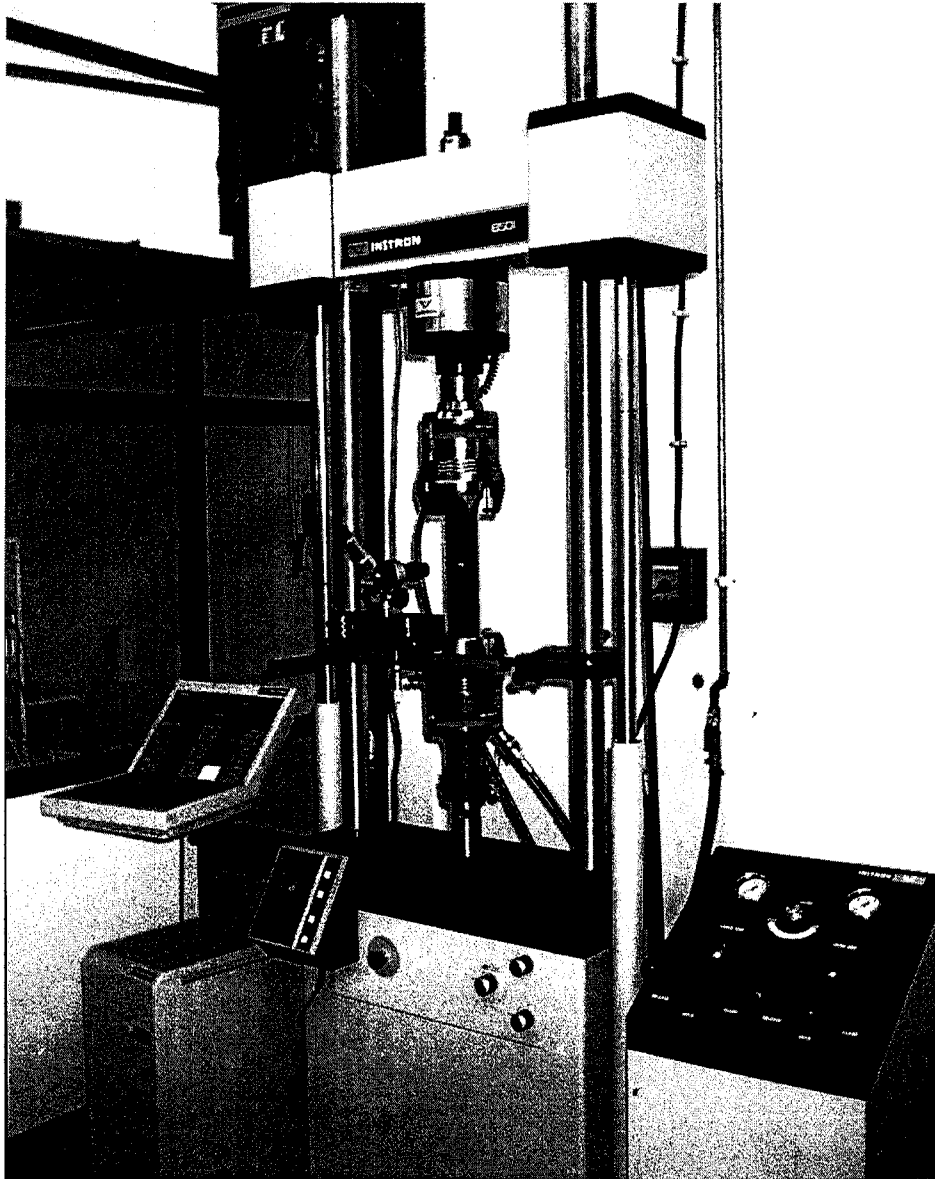
Yorulma çatlak ilerleme testleri merkez çatlaklı çekme numuneleri (MT) ile yapılmıştır. Merkezinde 6 mm delik bulunan plaka şeklinde temin edilen numuneye atölyemizde kesici alete (matkap) 23,5 mm çaplı kesici disk takılarak çentik açılmıştır. Numuneler ASTM E-647 standardına uygun olarak hazırlanmıştır [26].



Şekil 3.1. Merkez çatlaklı numune geometrisi

3.2. Kullanılan Cihazlar

Deneyle 200kN statik, 100kN dinamik yük kapasiteli bilgisayar kontrollü, Instron (8500 model) test cihazında yapılmıştır. Numune cihaz çenelerine hidrolik basınçla sıkıştırılan kavrama teçhizatı ile yük dağılımı düzgün olacak şekilde bağlanmıştır.



Şekil 3.2. Deneyle kullanılan Instron 8501 cihazı ve yardımcı teçhizatlar

Deneylerin bilgisayar kontrolünde MAX paket programı kullanılmıştır. Bu programda deneyler, ortalama yük değeri, genlik, frekans ve çevrim sayısı bilgileri girilerek yapılmaktadır. Değişken genlikli yükleme için deney verileri her farklı seviye için ayrı ayrı oluşturularak daha sonra istenilen sıraya göre sıralanıp deney durdurulmadan uygulanabilmektedir.

Deney sırasında çatlak ilerlemesinin ölçülmesinde gezici optik mikroskoba (10X) monte edilmiş, $\pm 0,003$ mm hassasiyete sahip uzunluk ölçer kullanılmıştır. Çatlak uzunluğunun kolay ölçülebilmesi için numune yüzeyi çatlak ilerlemesine dik doğrultuda zımparalanmıştır. Çatlak boyu a , mikroskop okusunda bulunan x-y eksen takımının y eksenini referans alınarak ölçülmüştür. Daha sonra çentik uzunluğu da dikkate alınarak, gerekli hesaplamaların yapılmasıyla $2a$ çatlak uzunluğu bulunmuştur.

Deney numunelerinin delik kenarlarına çentik oluşturulmasında Kesici alet (matkap), ucuna 23,5 mm çaplı kesici disk takılarak Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Bakım Merkezinde gerekli değişiklikler yapılarak kullanılmıştır.

Yorulma deneyleri sonucunda kopan parçaların kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda (SEM-CamScan) incelenmiştir.

3.3. Yorulma Ön Çatlağı

Çentik etkilerinden kurtulmak için numunelerin tamamında yorulma ön çatlağı oluşturulmuştur. Ön çatlağın oluşturulmasıyla numune kalınlığı doğrultusunda yük dağılımının simetrik olması sağlanmaktadır. Şekil 3.3'de gösterilen ön çatlağın boyu (a_0 - a_n), ASTM E-647 standardına göre en az numune kalınlığının (B) 0,1 katı veya h uzunluğundan büyük olmalıdır [26]. Bütün numunelerin yorulma ön çatlağı aynı sabit genlikli yükleme altında, Çizelge 3.3'teki deney verileri kullanılarak yapılmıştır.

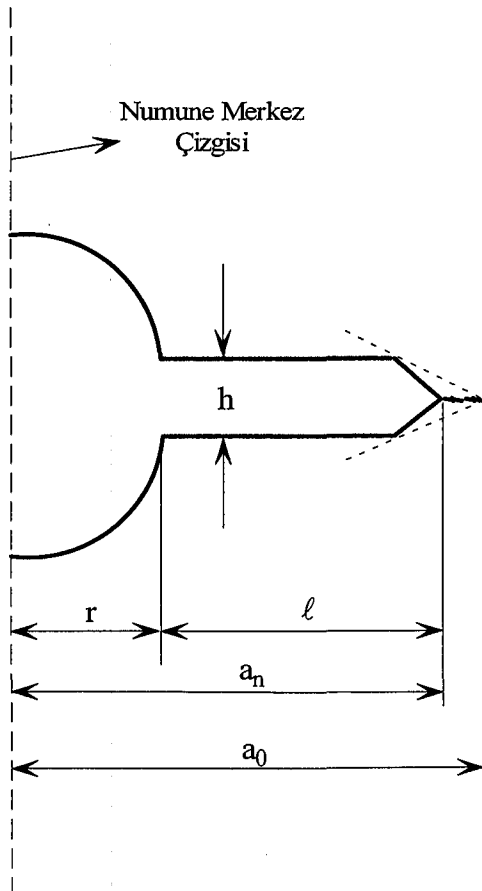
Çizelge 3.3. Yorulma ön çatlağı deney bilgileri

Maksimum Yük P_{Max} (kN)	Minimum Yük P_{Min} (kN)	Gerilme Oranı R	Frekans F (Hz)
27	3	0,11	5

Gerilme şiddet faktörü ifadeleri ASTM standartlarından alınmıştır. Merkez çatlaklı (MT) levha için bu ifade eşitlik 3.1'deki gibidir [26].

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2W} \sec \frac{\pi \alpha}{2}} \quad (3.1)$$

burada; $\alpha=2a/W$, B: numune kalınlığı, W:numune genişliğidir. Eşitlik 3.1, $2a/W < 0,95$ olması halinde geçerlidir.



Şekil 3.3 Çentik detayları ve yorulma ön çatlağı [26].

3.4. Yapılan Deneyler

3.4.1. Sabit genlikli yorulma deneyleri

Sabit genlikli yorulma çatlak ilerleme deneyleri 2024-T3 alüminyum alaşımının sabit genlikli yükleme altında çatlak ilerleme davranışını karakterize etmek için Çizelge 3.4'te belirtilen plana göre yapılmıştır. Bu deneylerde uygulanan yük sinüs eğrisi şeklindedir. Deneyler yük kontrollü olarak yapılmıştır.

Çizelge 3.4. Sabit genlikli yorulma deneyleri

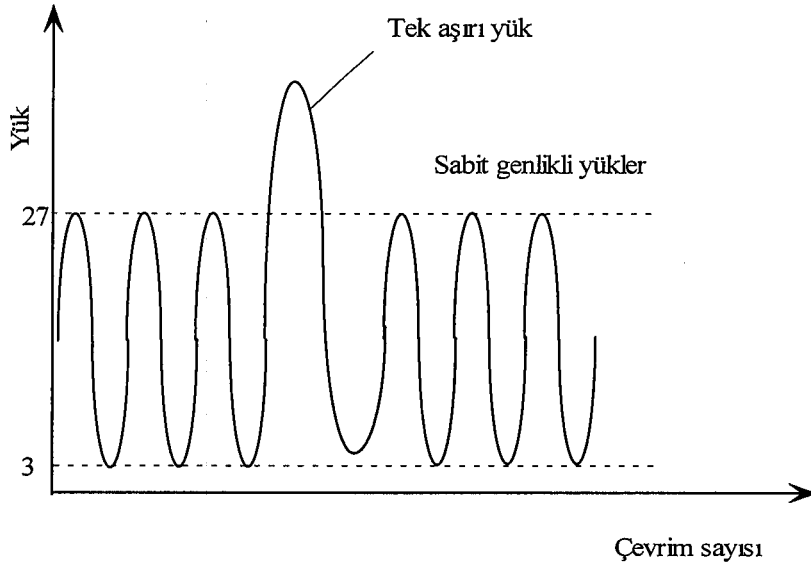
P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	Gerilme Oranı R	Frekans (Hertz)
27	3	0,11	5

3.4.2. Tek Aşırı Yükleme Deneyleri

Deneysel çalışmanın bu kısmında, tek aşırı yükün yorulma çatlak ilerlemesine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla sabit genlikli yorulmada kullandığımız deney verileri temel alınarak, deneyler farklı tek aşırı yük oranlarında yapılmıştır. Aşırı yük oranı (OLR), aşırı yükün maksimum değerinin sabit genlikli yükün maksimum değerine oranıdır. Deneylerin tamamı yük kontrollü olarak yapılmış ve kullanılan yük sinüs eğrisi şeklindedir. Şekil 3.4'de gösterilen aşırı yükün değeri belirlenen aşırı yük oranına göre değişmektedir. Çizelge 3.5'de deney bilgileri gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Tek aşırı yükleme deneyleri

Numune No	Aşırı yük oranı (OLR)	Minimum aşırı yük P_{OLmin} (kN)	Maksimum aşırı yük P_{OLmax} (kN)	Frekans (Hertz)
03	1,3	3	35	0,5
08	1,5	4,5	40,5	0,5
06	1,7	5,1	45,9	0,5
07	2	6	54	0,5



Şekil 3.4. Tek aşırı yükleme deneylerinin yük tipi

Gecikme sonuçlarını daha doğru karşılaştırmak için aşırı yükler yaklaşık eşit çatlak uzunluğunda ($2a$) uygulanmıştır.

3.5. Deney Sonuçları

3.5.1. Sabit genlikli yorulma deney sonuçları

Çizelge 3.6'te sabit genlikli yükleme sonuçları görülmektedir. $2a_i$ ve $2a_f$ sırasıyla ölçülen ilk ve son çatlak uzunluğudur.

Çizelge 3.6. Sabit genlikli yükleme deney sonuçları

Numune No	ΔP (kN)	$2a_i - 2a_f$ (mm)	da/dN ($\mu\text{m}/\text{çevrim}$)	ΔK ($MPa\sqrt{m}$)
01	27 - 3	22,815-56,171	0,068-1,018	8,764-17,694
02	27 - 3	22,943-53,767	0,048-0,946	8,792-16,800

Gerilme şiddet faktörü, Eşitlik 3.1 ve çatlak ilerleme hızı ASTM E-647’de önerilen secant metodu [26] kullanılarak hesaplanmıştır. Bu metot Eşitlik 3.2 şeklinde ifade edilmektedir.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (3.2)$$

Yapılan sabit genlikli deneylerde 2024-T3 Al alaşımının sabit genlikli yüklemeye altında yorulma çatlak ilerleme hızı da/dN , $4,8 \times 10^{-5} - 1,01 \times 10^{-3}$ mm/çevrim arasında değişmektedir. Bu yüklemeye tipinde 2a’ya bağlı olarak değişen gerilme şiddet faktörü değerleri ΔK , $8,764-17,694 \text{ MPa}\sqrt{m}$ arasındadır. Yapılan deneylerin 2a-N bilgileri Ek-1’de verilmiştir.

Sabit genlikli deney sonuçları Eşitlik 2.25’te olduğu gibi Paris eşitliği şeklinde tanımlanırsa; (en küçük kareler metodu kullanılarak).

$$\frac{da}{dN} = 2,3 \times 10^{-5} (\Delta K)^{3,45} \quad (3.3)$$

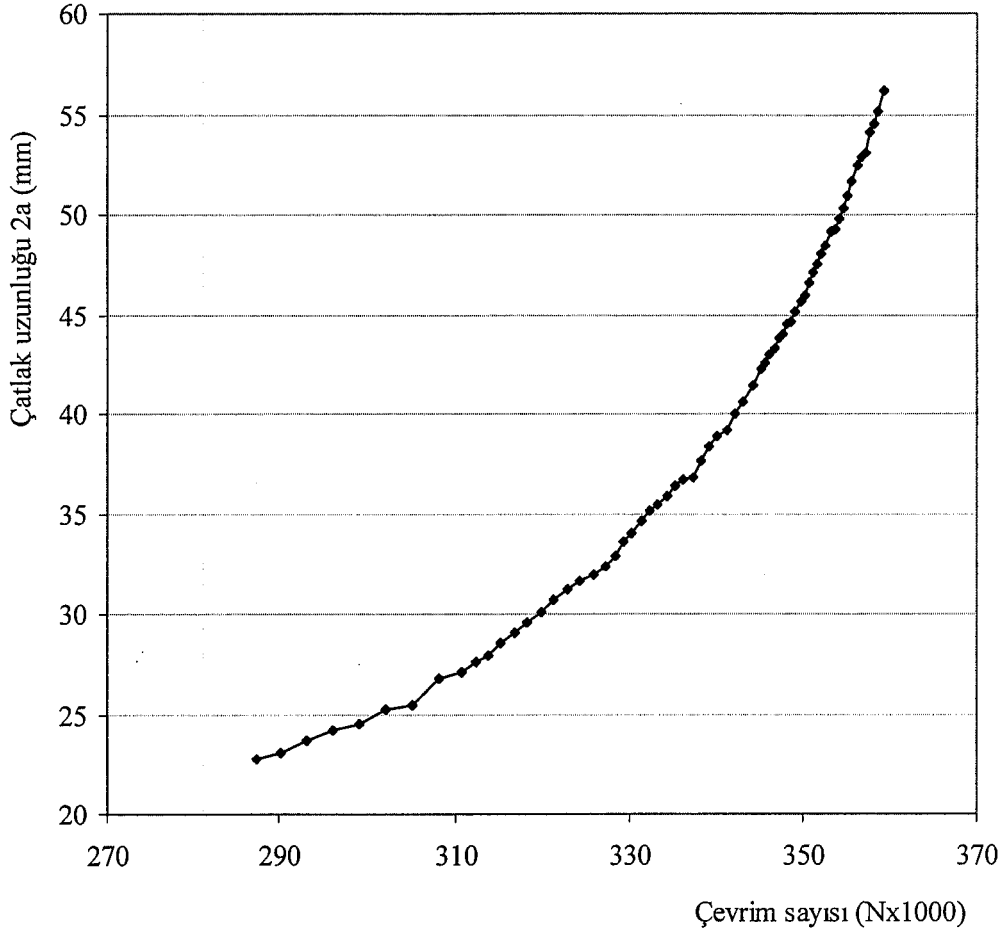
Paris eşitliğindeki malzeme sabitleri 2024-T3 Al alaşımı için;

$$C = 2,3 \times 10^{-5}$$

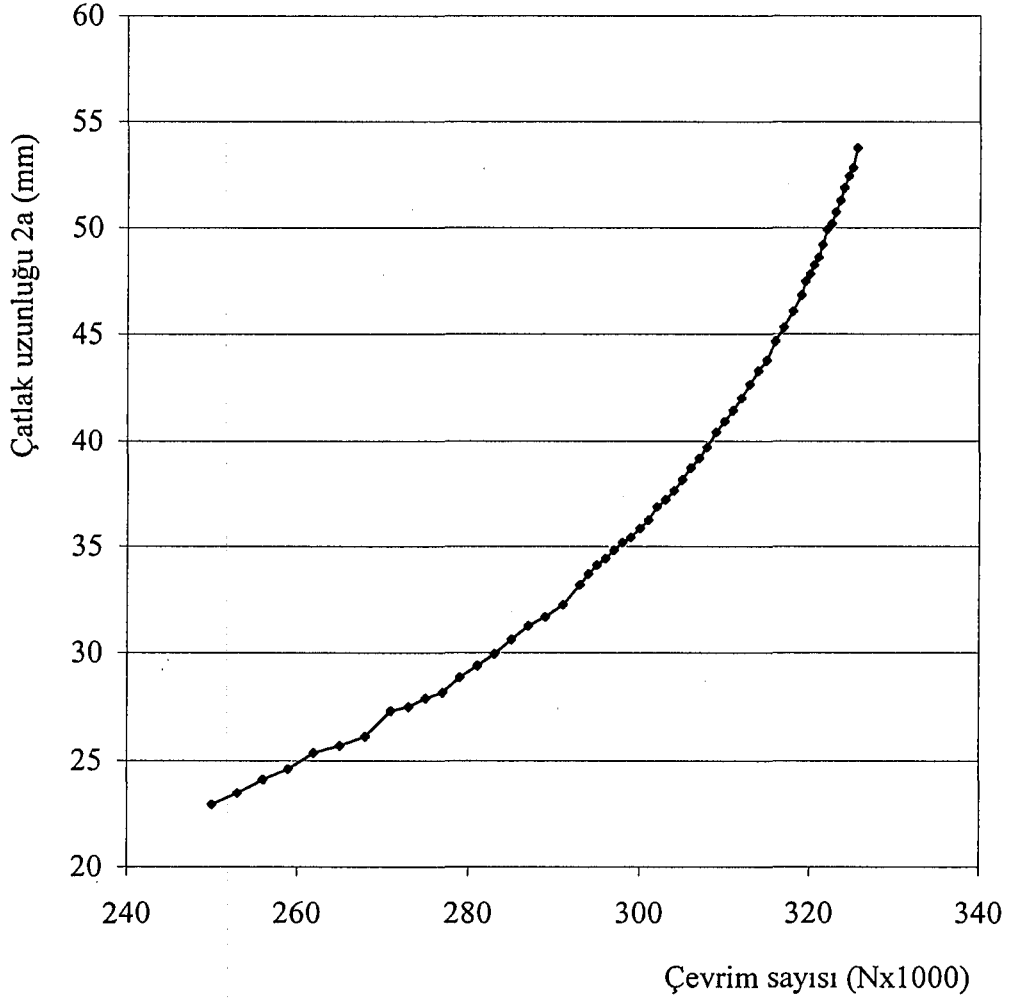
$$m = 3,45 \text{ dir.}$$

Bu sabitlerin hesaplanmasında da/dN için $\mu\text{m}/\text{çevrim}$, ΔK için $\text{MPa}\sqrt{m}$ birimleri kullanılmıştır.

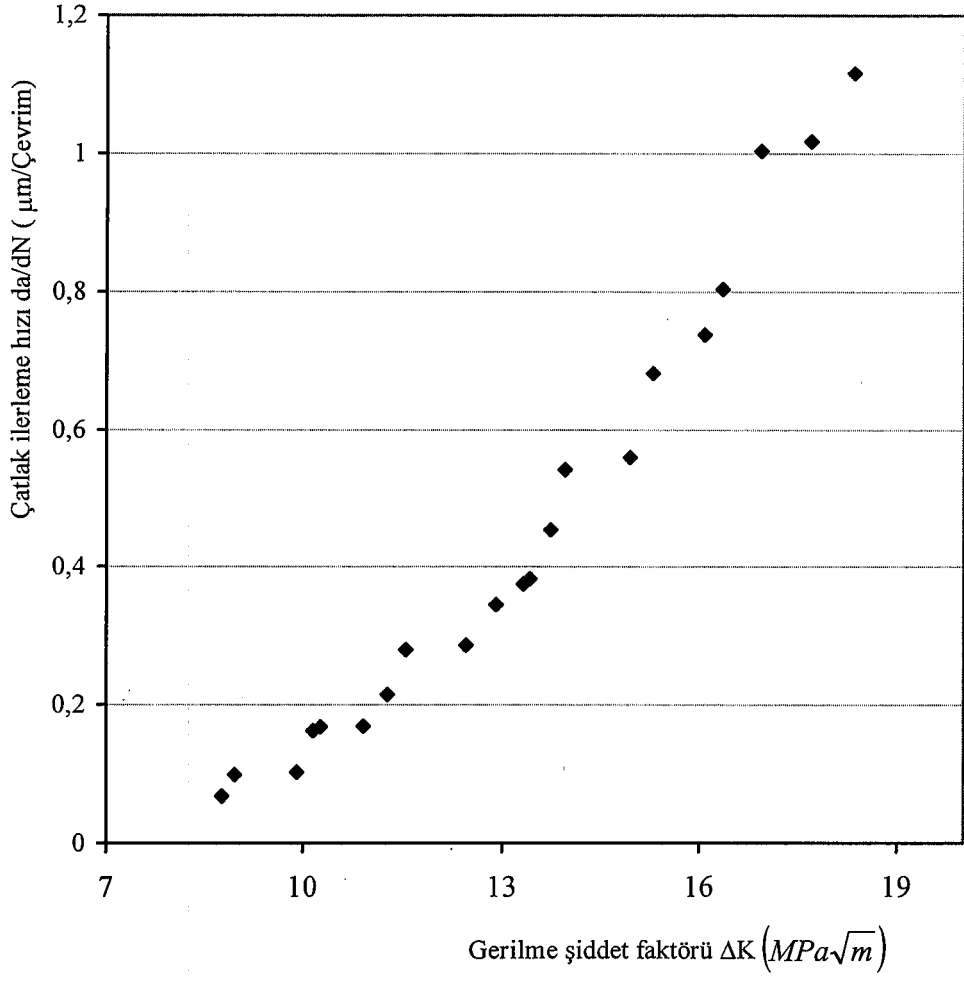
Şekil 3.5-6’da çatlak boyu (2a), çevrim sayısı (N) ve Şekil 3.7-8’de çatlak ilerleme hızı (da/dN), gerilme şiddet faktörü (ΔK) grafikleri görülmektedir. Şekil 3.9’da aynı deney koşullarında yapılan iki sabit genlikli yorulma deneyinin (01 ve 02) çatlak ilerleme hızı-logaritmik gerilme şiddet faktörü grafiği birlikte gösterilmektedir. Şekil 3.10’da yaklaşık $2a=54 \text{ mm}$ ’de sabit genlikli yüklemeye sonucu kırık yüzeylerin genel görünümü ve yorulma çizgileri görülmektedir.



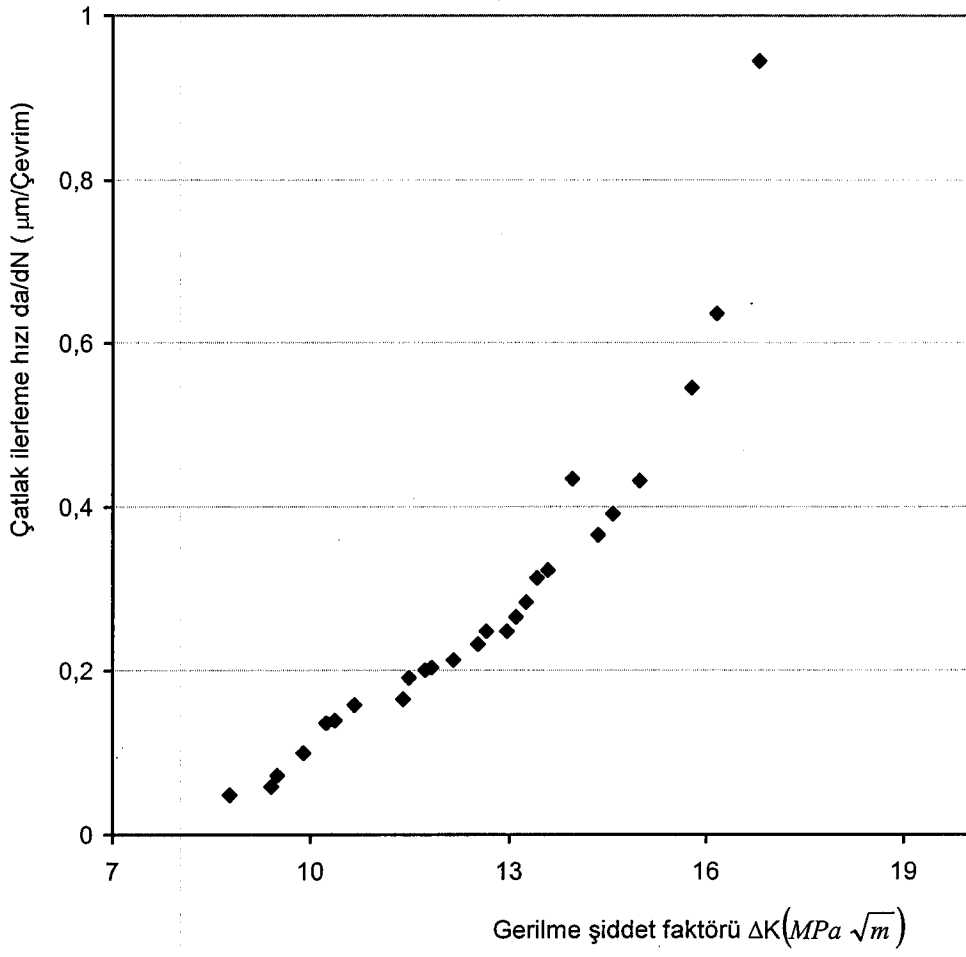
Şekil 3.5. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 01 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafiği



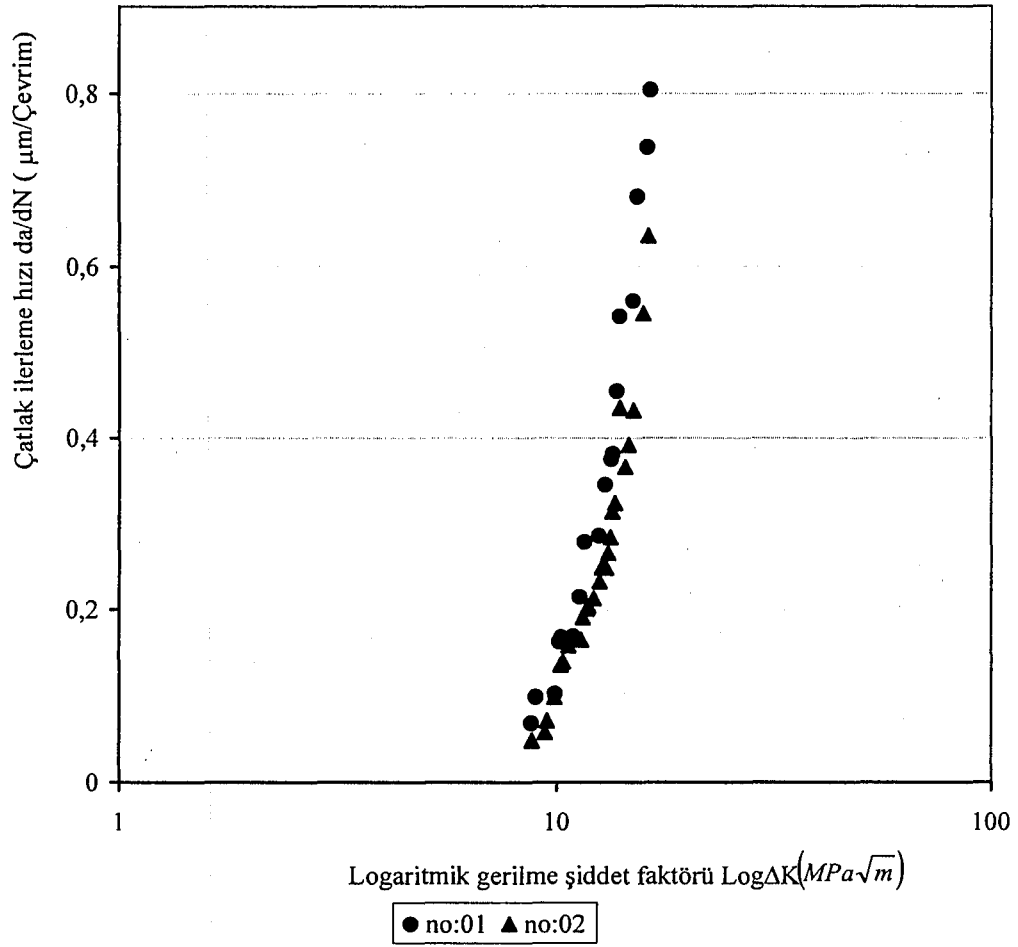
Şekil 3.6. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 04 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı grafiği



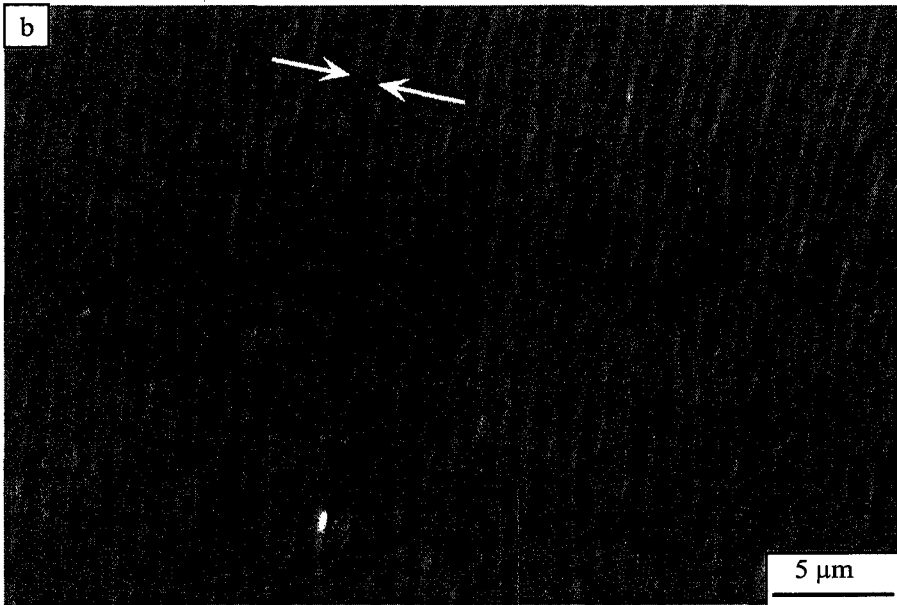
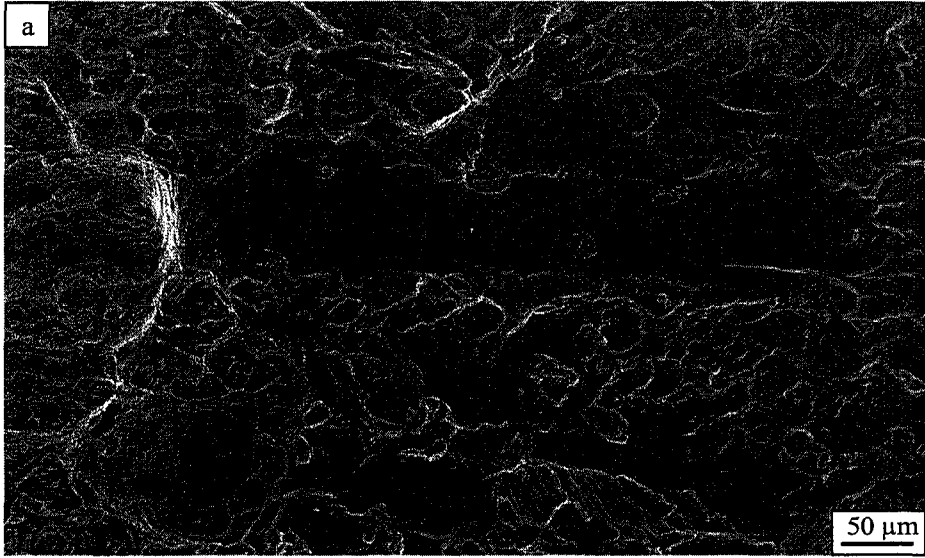
Şekil 3.7. $P_{\max}=27kN$, $P_{\min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 01 nolu deneyin çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiği



Şekil 3.8. $P_{\max}=27kN$, $P_{\min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 02 nolu deneyin çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiği



Şekil 3.9. $P_{\text{max}}=27\text{kN}$, $P_{\text{min}}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 01 ve 02 nolu deneyin çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiği



Şekil 3.10. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5\text{ Hz}$ değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 02 nolu numunede yaklaşık $2a=54\text{ mm}$ çatlak uzunluğunda SEM ile elde edilen görüntünün a) genel, b) detaylı görünümü

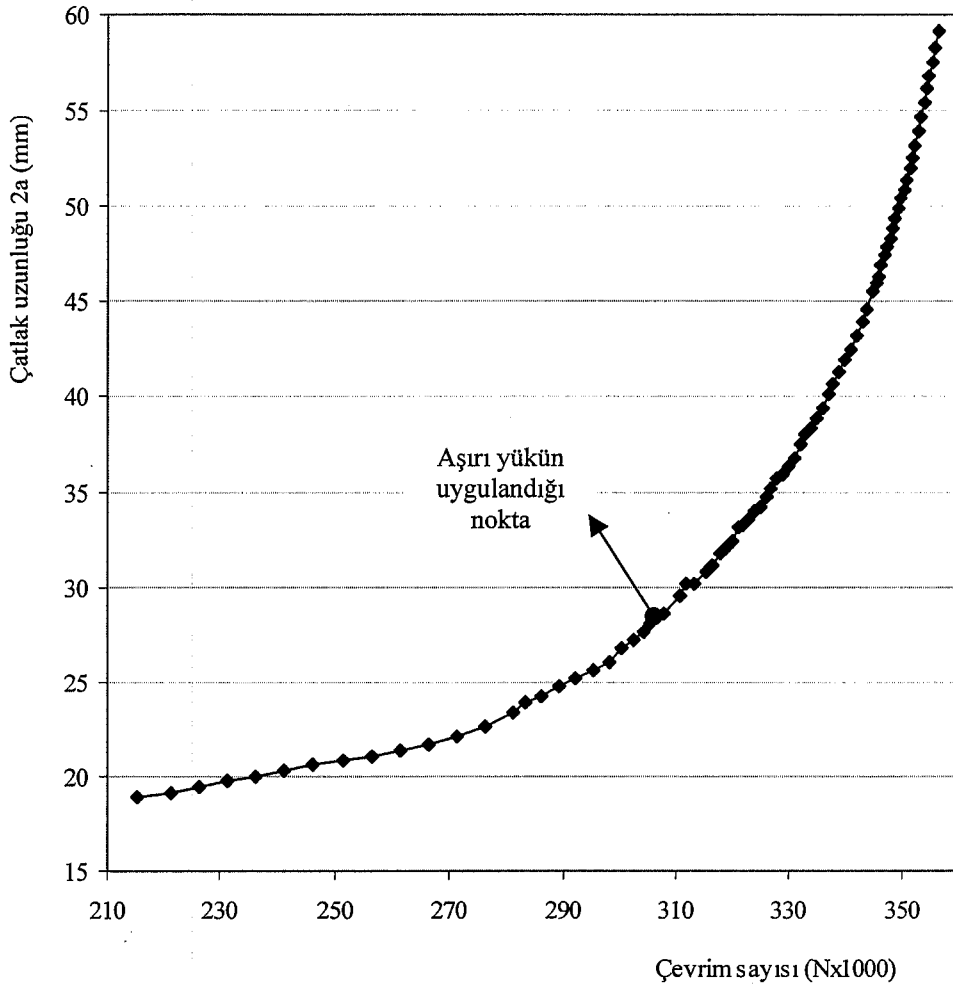
3.5.2. Tek aşırı yükleme deney sonuçları

Çizelge 3.7’de hesaplanan gecikme sonuçları ve Şekil 3.11-14 aşırı yükleme deneyleri için çatlak uzunluğu $2a$, çevrim sayısı N grafiklerini göstermektedir. $2a$ - N grafiklerinde (1,3 aşırı yük oranı hariç) aşırı yükün uygulandığı nokta açıkça görülmekte ve aşırı yük oranına bağlı olarak grafikteki yatay bölge (çatlak ilerlemesinin olmadığı veya yavaş ilerlediği) artmaktadır. Şekil 3.15’de $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 2 oranında aşırı yükün uygulandığı bölge görülmektedir.

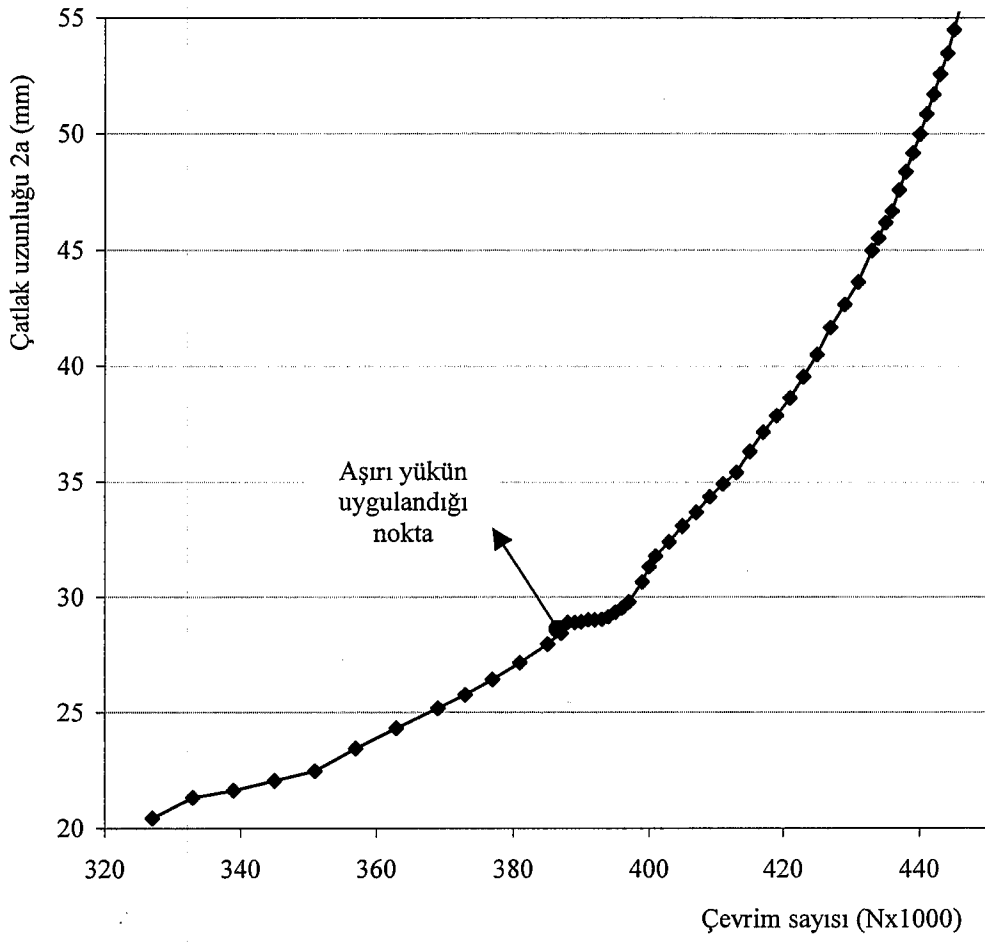
Çizelge 3.7’de verilen gecikme çevrim sayısı N_D , belirli bir çatlak uzunluğu (25-50 mm) için sabit genlikli yükleme ve tek aşırı yükleme deneylerinde belirlenen çevrim sayıları karşılaştırılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.7. Tek aşırı yükleme deney sonuçları

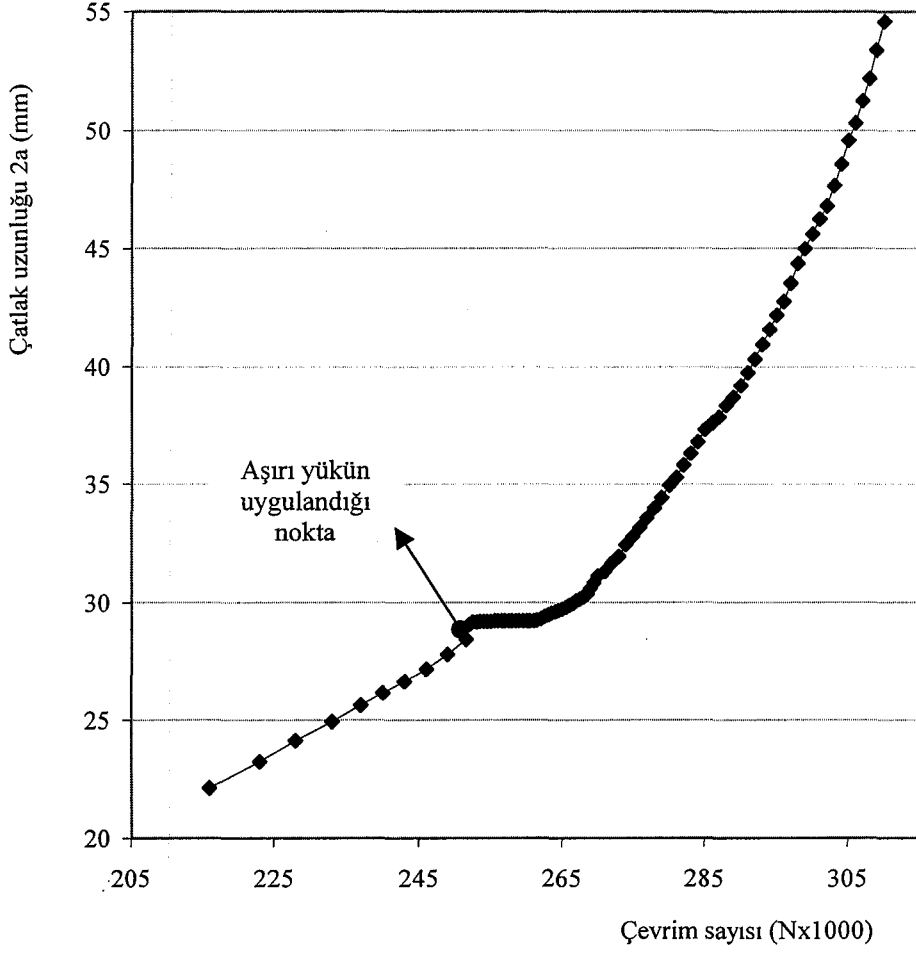
Numune No	Aşırı yük oranı (OLR)	N_D	$2a_i - 2a_f$ (mm)	ΔK_{OL} ($MPa\sqrt{m}$)
03	1,3	997	22,691-58,299	13,131
04	1,5	14003	22,544-57,912	15,026
05	1,7	15183	22,140-57,032	17,024
06	2	64676	22,736-53,004	19,842



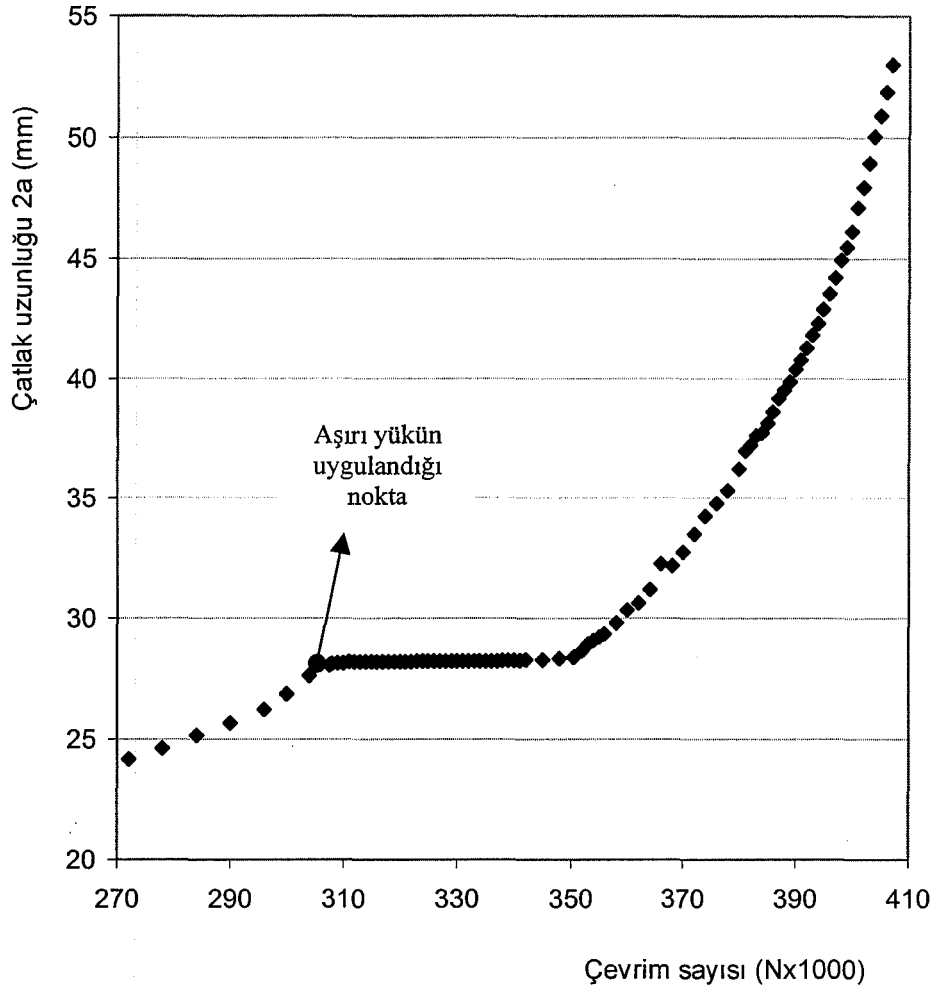
Şekil 3.11. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,3 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 03 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği



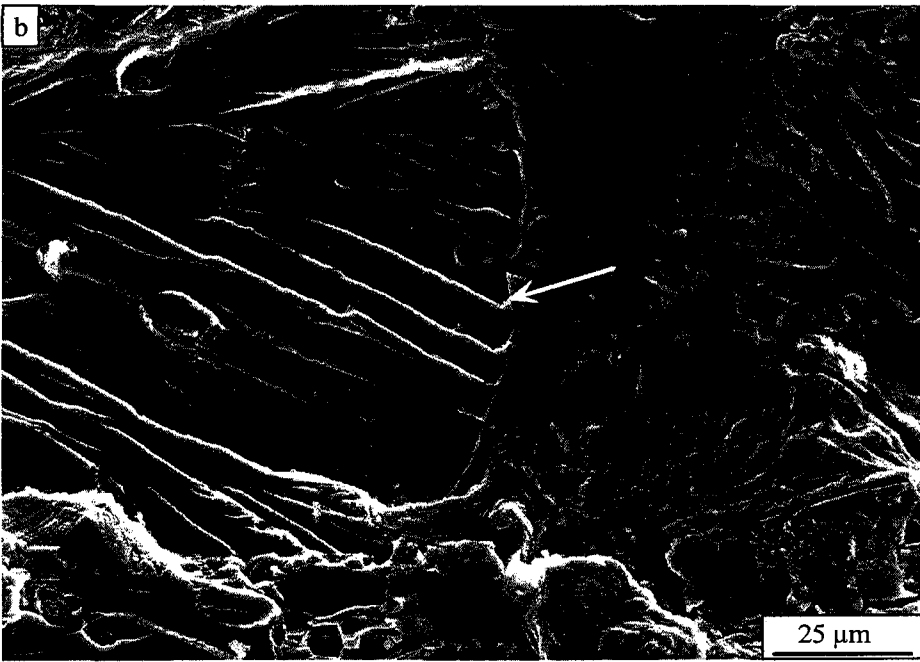
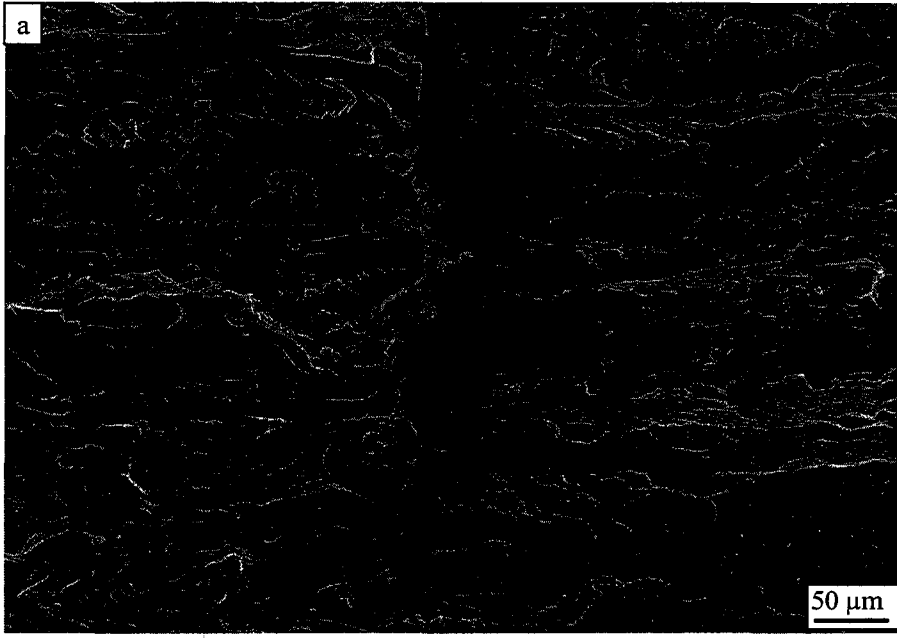
Şekil 3.12. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,5 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 04 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği



Şekil 3.13. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,7 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 05 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği

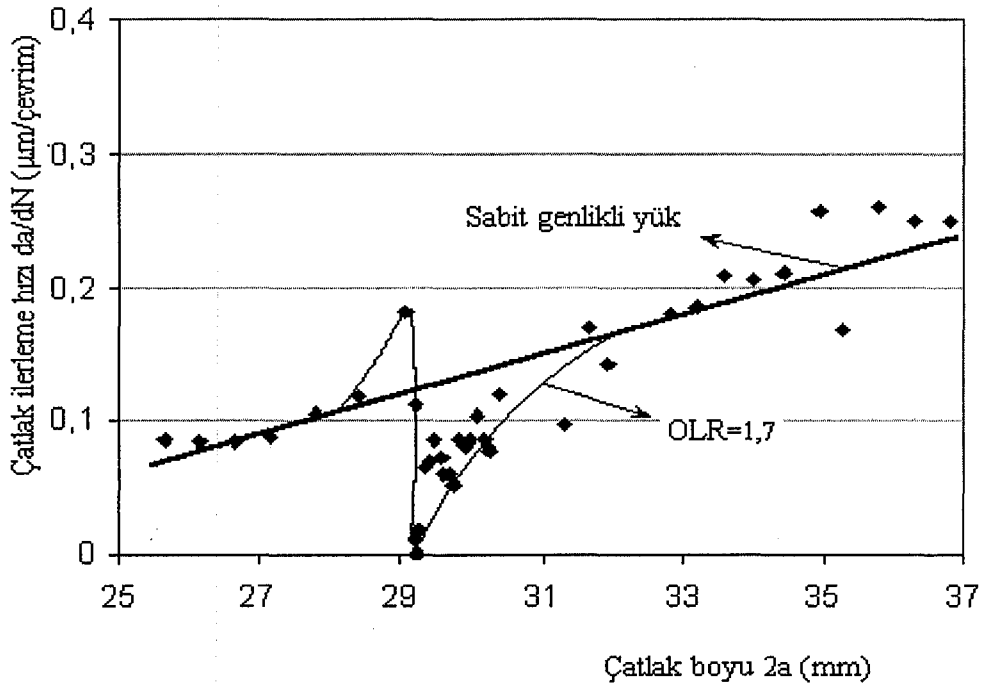


Şekil 3.14. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 2 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 06 nolu deneyin çatlak uzunluğu çevrim sayısı grafiği



Şekil 3.15. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 2 oranında aşırı yükün uygulandığı bölgenin a) genel, b) detaylı görünüşü

Sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,7 oranında aşırı yük uygulanan deneyde aşırı yükten hemen sonra çatlak ilerleme hızının arttığı, bu hızlanmayı takiben minimum değerine ulaştığı ve daha sonra sabit genlikli yükleme hızına kademeli olarak yükseldiği deney sırasında ölçüler sık aralıklarla alınarak gözlenmiştir (EK-1). Şekil 3.16 OLR=1,7 için aşırı yüklemeye sonraki çatlak boyu $a-a_{OL}$ ve çatlak ilerleme hızı davranışını göstermektedir.



Şekil 3.16. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,7 oranında aşırı yük uygulanan deneyde çatlak ilerleme hızının-çatlak boyu ile değişimi

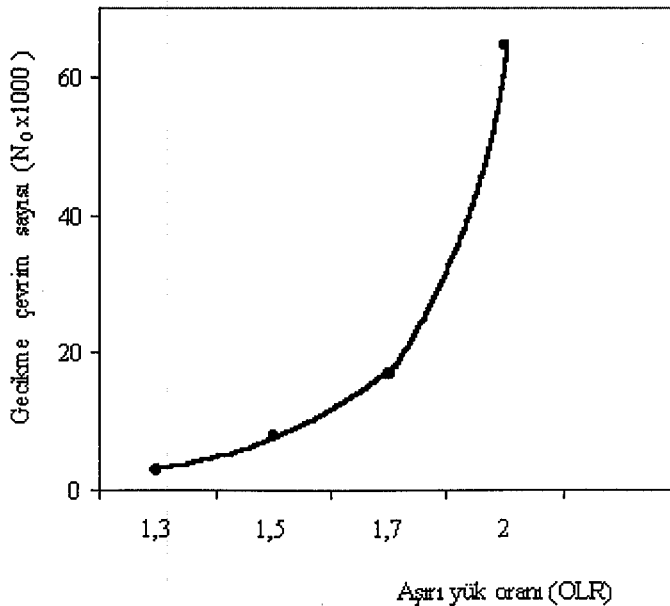
3.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Çizelge 3.6'da bulunan sonuçlar 2024-T3 alüminyum alaşımı ile yapılmış sabit genlikli deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir. TÜR ve VARDAR'ın [24] yaptığı çalışmalarda $\Delta K=13 \text{ MPa}\sqrt{m}$ için çatlak ilerleme hızı $2,45 \times 10^{-4} \text{ mm/çevrim}$ dir.

Sabit genlikli yükleme altında $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle yapılan 02 nolu numunenin kırık yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda incelendiğinde büyük çatlak uzunluğunda yorulma çizgileri görülürken, çentiğe yakın kırık yüzeyin büyük bir kısmında görülemediği. Büyük çatlak uzunluğunda yorulma çizgilerinin görülmesi, çatlak uzunluğunun artması ile yorulma çizgisi oluşturacak kadar gerilme şiddetinin oluşması ile açıklanabilir.

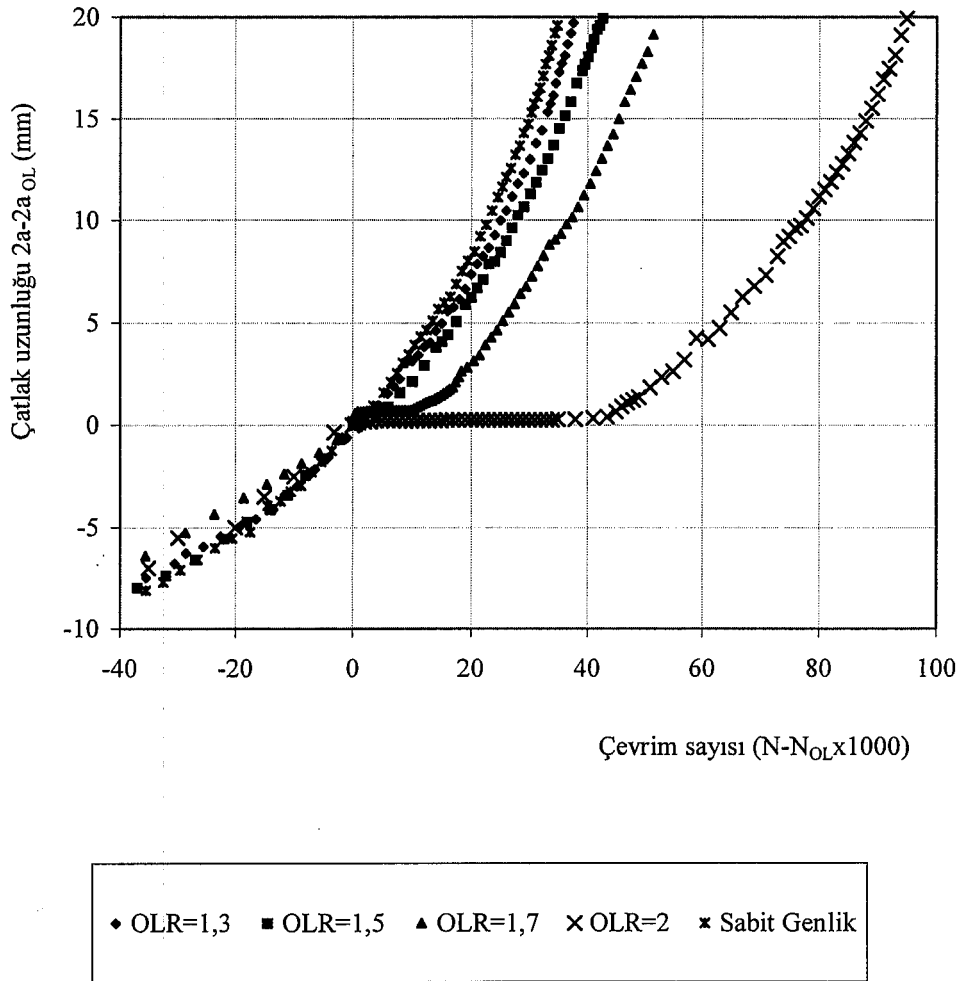
Şekil 3. 10b'de görülen yorulma çizgilerinin ilerleme hızı, deney sırasında yaklaşık eşit çatlak uzunluğunda gezici mikroskop ile elde edilen verilerle hesaplanan çatlak ilerleme hızı bir birbirine çok yakındır (Çizelge 3.6). Bu ilişki yapılan çalışmalarda yorulma çizgileri ve yorulma çatlak ilerleme hızı arasında 1/1 bağıntı olduğu belirtilmektedir [27].

Tek aşırı çekme yükünü takip eden sabit genlikli yüklemelerde, gecikme çevrim sayısı aşırı yük oranının artmasıyla yükselmektedir. Fakat bu artış oranı Şekil 3.17'de görüldüğü gibi doğrusal değildir. Aşırı yük oranının yükselme aralıklarına bağlı olarak gecikme çevrim sayısı artış miktarları hızlı olmaktadır. Tek aşırı yük değerinin artması ile çatlak kapanma yükü daha fazla artmaktadır [28].



Şekil 3.17. Tek aşırı yük deneylerinde gecikme çevrim sayısının-aşırı yük oranı ile değişimi

$P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,3 – 1,5 - 1,7 - 2 oranlarında aşırı yük uygulanarak yapılan deneylerin aşırı yüklemekten sonraki çatlak boyu $a-a_{OL}$ ve çevrim sayısı $N-N_{OL}$ grafikleri Şekil 3.18’de gösterilmektedir. Bazı çalışmalarda gecikme miktarının gösteriminde Şekil 3.18’deki grafik kullanılmaktadır [29]. Grafikte görüldüğü gibi aşırı yük oranının artması ile gecikme çevrim sayısında (N_D) artış gözlenmektedir.



Şekil 3.18. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,3 – 1,5 - 1,7 - 2 oranlarında aşırı yük uygulanarak yapılan deneylerin aşırı yüklemekten sonraki çatlak boyu $a-a_{OL}$ ve çevrim sayısı $N-N_{OL}$, grafikleri

Çatlak ucunda oluşan plastik bölgeyi çevreleyen elastik kısım yük kalktıktan sonra orijinal boyutunu korumaya çalıştığından çatlak kapanma gerilmelerini oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalarda çatlak kapanma gerilmesinin aşırı yük oranı ile arttığı ve bu artışa, aşırı yükü takip eden yaklaşık 10 çevrimde ulaşıldığı belirtilmektedir [28]. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 0,5 Hz frekans ve 1,7 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan deneyde çatlak ilerleme hızı minimum değerine aşırı yük uygulandıktan bir süre sonra ulaşmıştır. Bu ertelenmiş gecikme davranışı konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalarla uygunluk göstermektedir [29,30].

7075-T3 Alüminyum alaşımı ile yapılan tek aşırı yük yorulma çatlak ilerleme deneyleri [30] ile 2024-T3 alüminyum alaşımı deney sonuçları karşılaştırıldığında, 2024-T3 Al alaşımı daha fazla gecikme göstermektedir (Çizelge 3.8). Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarda gecikmeyi etkileyen temel mekanizmalar çatlak kapanması, kalıntı basma gerilmeleri ve çatlak körelmesi ile açıklanmaya çalışılmaktadır [22]. 7075-T3 Al alaşımına göre, 2024-T3 Al alaşımı daha sünek bir malzemedir. Aşırı yüklenmeden dolayı çatlak ucunda oluşan plastik bölge boyutu aşırı yük değerine ve malzemenin akma gerilmesine bağlıdır [31]. Bu yüzden 2024-T3 Al alaşımında çatlak ucunda oluşan plastik bölge boyutu daha büyüktür. Plastik bölge boyutunun büyük olması çatlak açılma gerilmesini (σ_{op}) artırdığından 2024-T3 Al alaşımında daha fazla gecikme çevrim sayısı görülmektedir.

Çizelge 3.8. 7075-T3 ve 2024-T3 Alüminyum alaşımlarında tek aşırı yükün yorulma çatlak ilerlemede geciktirme etkisi

OLR	N_D (7075-T3 Al)	N_D (2024-T3 Al)
1,3	200	997
1,5	550	14003
1,7	2000	15183
2	7600	64676

Aşırı yükleme ile yapılmış deney numunelerinin kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde aşırı yükten önce ve sonra yorulma çizgileri görülememiştir. Ancak Şekil 3.10'da aşırı yükün malzemede oluşturduğu farklılık açıkça görülmektedir.

Amacı ve yönelik olduğu görevler ne olursa olsun servise sokulan parçalar imalat, montaj, çalışma ve bakım sırasında bir takım hatalar içerir. Hasar toleransı tasarım yaklaşımının benimsediği bu kabul günümüzde havacılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır. Hasar toleransı yaklaşımı öncelikle uçak, helikopter ve diğer uzay araçlarının parça ve yapılarından optimum ömür boyunca hasara uğramadan yararlanmayı amaçlamaktadır [32]. Parça veya yapının güvenli maksimum ömründen faydalanmak için periyodik aralıklarla kontrol yapılmaktadır.

Kontrol aralıklarının ve parçanın kalan mukavemetinin belirlenmesi için en önemli noktalardan biri yorulma çatlak ilerleme hızının belirlendiği laboratuvar deneylerinin yapılmasıdır. Yorulma çatlağının ilerlemesi süresince hasar doğrudan çatlak boyu ile ilgilidir. Çatlak boyunun ölçülebilir olması havacılık endüstrisinde düzenli kontrol aralıklarının belirlenmesi bakımından önemli bir avantajdır [12]. Değişken genlikli yükleme altında çalışan parça ve yapılara gelen yükler, rassal olarak düzensiz bir şekilde etkimektedir. Yük sıra etkisinin yorulma çatlak ilerleme hızını önemli derecede etkilediği yapılan çalışmalardan görülmektedir [7,33]. Tek aşırı yük deneyleri değişken genlikli yorulma çalışmasının temelini oluşturması bakımından önemlidir.

4. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Genel Sonuçlar

2024-T3 alüminyum alaşımının sabit genlikli ve tek çekme aşırı yüklemesi altında yorulma deneyleri yapılmıştır. Sabit genlikli ve aşırı yükün çatlak ilerlemesine etkisinin araştırıldığı deneyler ve kırık yüzeylerin SEM incelemesi ile bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan deneylerde 2024-T3 Al alaşımının çatlak ilerleme hızı da/dN ve gerilme şiddet faktörü aralığı ΔK arasında aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$\frac{da}{dN} = 2,3 \times 10^{-5} (\Delta K)^{3,45}$$

2. Tek çekme aşırı yüklemesini takip eden çatlak ilerlemesinde gecikme olmaktadır. Gecikme çevrim sayısı aşırı yük oranının artması ile artmaktadır.
3. SEM mikroskobunda alınan kırılma yüzeyi resimlerinden yorulma çizgileri gözlemlenmiştir. Gezici mikroskop ile alınan ölçülerle hesaplanan çatlak ilerleme hızı ve yorulma çizgileri arasında yakın bir ilişki vardır.
4. Aşırı yükün şiddetine bağlı olarak sabit genlikli yükleme sırasında uygulanan tek aşırı yük kırık yüzeylerde belirgin bir iz oluşturmaktadır.
5. Tek aşırı yüklenmeden sonra yorulma çatlak ilerleme hızı artmakta bir süre sonra en küçük değerine ulaşmaktadır.

4.2. Öneriler

Uygun sabit genlikli yük değerleri ve aşırı yük oranı seçilerek yapılan tek aşırı yükleme deneyinde deney sırasında alınan ölçülerle hesaplanan çatlak hızlanması, yavaşlaması ve ertelenmiş gecikme değerleri SEM incelemeleri ile karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. SURESH, S., *Fatigue of materials*, Cambridge University Press, New York, USA, (1991).
2. PETIT, J., DAVIDSON, D.L., SURESH, S. ve RABBE, P., *Fatigue crack growth under variable amplitude loading*, Elsevier Science Publishers Ltd., England, (1988).
3. CZYRYCA, J.E., *Fatigue crack initiation*, Metals handbook Volume 8, 9th ed., Mechanical Testing (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, Ohio, USA, 363-376 (1978).
4. CARLSON, R.L. ve KARDOMATEAS, G. A., *An introduction to fatigue in metals and composites*, Chapman and Hall, UK, (1996).
5. KAYALI, E. S., ENSARİ, C. ve DİKEÇ, F., *Metalik malzemelerin mekanik deneyleri*, Teknik Üniversite Matbası, İstanbul, Türkiye (1984).
6. TETİK, D., 2024-T3 Alüminyum alaşımının simüle edilmiş uçuş yükleri altında yorulma davranışı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (1999).
7. SCHIJVE, J., *Fatigue crack growth under variable amplitude loading*, Metals Handbook Volume 19, Fatigue and Fracture, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, USA 110-131 (1998).
8. ANTOLOVICH, S. D. ve SAXENA, A., *Fatigue failures*, Metals Handbook; 9th edition Volume 11: Failure analysis and prevention, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, Ohio, USA 102-135 (1986).

9. PASCOE, K. J., *An introduction to the properties of engineering materials*, ELBS, UK, (1978).
10. ELLYIN, F., *Fatigue damage, crack growth and life prediction*, Chapman & Hall, London, (1997).
11. DIETER, G. E., *Mechanical metallurgy*, McGraw-Hill Book Co., London, (1988).
12. BANANTINE, J. A. ve COMER, J. J., *Fundamentals of metal fatigue analysis*, Prentice-Hall Inc., USA (1990).
13. LAIRD, C., *Fatigue failures*, Metals Handbook Desk Edition, (Ed: BOYER, H.E., GALL, T.L.), American Society for Metals, Ohio, USA, 32.13-32.17 (1985).
14. EWALDS, H.L. ve WANHILL R.J.H., *Fracture mechanics*, Edward Arnold Ltd., (1984).
15. DOWLING, E. N., *Mechanical behavior of materials*, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey, USA (1993).
16. UĞUZ, A., *Kırılma mekaniğine giriş*, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, Türkiye (1996).
17. BROEK, D., *Elementary engineering fracture mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, Netherlands (1984).
18. ANDERSON, T.L., *Fracture mechanics, fundamentals and applications*, 2nd ed., Boca Raton, Flo., CRC Press, USA (1995).

19. TÜRKDOĞAN, A., *Yorulma açısından uçak yapılarının incelenmesi ve manevra kabiliyeti yüksek bir uçakta kanat kökü yüklerinin hesaplanması*, Tez (doktora), Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (1996).
20. VARDAR, Ö. ve KALENDEROĞLU, V., *Rassal yükler altında yorulma çatlağı ilerlemesi*, J. Of. Engineering and environmental sciences, **14**, 489-504 (1990).
21. CALLISTER, W. D., *Materials science and engineering an introduction*, 4th ed., New York, USA (1997).
22. HALLIDAY, M.D., ZHANG, P.P. ve BOWEN, P., *In situ sem observation of the contrasting effects an overload on small fatigue crack growth at two different load ratios in 2024-T351 aluminium alloy*, Int. J. Fatigue, **19**, 273-282, (1997).
23. RAY, A. ve PATANKAR, R., *Fatigue crack growth under variable amplitude loading: part I-model formulation in state space setting*, Applied Mathematical Modelling, **25**, 979-994, (2001).
24. TÜR, Y. K. ve VARDAR, Ö., *Periodic tensile overloads in 2024-T3 Al alloy*, Engineering Fracture Mechanics, **53**, 69-77, (1996).
25. HATCH, J.E., *Alumunium: properties and physical metelurgy*, American Society For Metals, Ohio, (1984).
26. ROBERTA, A., *Standart test method for constant-load-amplitude fatigue crack growth rates above 10^{-8} mm/cycle*, ASTM E-647, Anual Book of ASTM Standarts Metals Test Methods and Analytical Procedures, **03.01**, 739-759, (1985).

27. TOPUZ, A., *Alüminyum-silisyum alaşımlarında yorulma-çatlak ilerlemesi*, 2. Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri, (Ed: DORUK, M.), Karadeniz Üniversitesi, Türkiye, 139-147, (1987).
28. KUMAR, R., *A review on crack closure for single overload, programed and block loadings*, Engineering Fracture Mechanics, **42**, 151-158 (1992).
29. BORREGO, L. P., FERREIRA, J. M. ve COSTA, J. M., *Fatigue crack growth and crack closure in an AlMgSi alloy*, Fatigue Fract Engng Mater Struct, **24**, 255-265 (2000).
30. VARDAR, Ö., *Effect of single overload in FCP*, Engineering Fracture Mechanics, **30**, 329-335 (1988).
31. CARLSON, R. L., KARDOMATEAS, G. A. ve BATES, P. R., *The effect of overloads in fatigue crack growth*, Int J Fatigue, **13**, 453-460 (1991).
32. DORUK, M., *Hasara tolerans yaklaşımı ve uygulamaları*, 2. Ulusal Kırılma Konferansı Bildirileri, (Ed: DORUK, M.), Karadeniz Üniversitesi, Türkiye, 1-23, (1987).
33. RICHARD, A. ve EVERETT, J., *The effect of load sequencing on the fatigue life of 2024-T3 aluminium alloy*, Int. J. Fatigue, **19**, 289-293 (1997).

EK-1. DENEY VERİLERİ

1. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5\text{ Hz}$ değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 01 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı bilgileri

2a (mm)	N*1000 (Çevrim)
22,815	287,251
23,097	290,251
23,689	293,251
24,213	296,251
24,569	299,251
25,209	302,251
25,423	305,251
26,815	308,251
27,097	310,751
27,641	312,251
27,949	313,751
28,565	315,251
29,053	316,751
29,557	318,251
30,121	319,751
30,737	321,251
31,195	322,751
31,605	324,251
31,913	325,751
32,421	327,251
32,913	328,251
33,569	329,251
33,999	330,251
34,599	331,251
35,157	332,251
35,439	333,251
35,899	334,251
36,381	335,251
36,679	336,251
36,807	337,251
37,595	338,251
38,301	339,251

38,873	340,251
39,223	341,251
39,977	342,251
40,667	343,251
41,489	344,251
42,239	345,251
42,621	345,751
42,967	346,251
43,331	346,751
43,785	347,251
44,023	347,751
44,565	348,251
44,663	348,751
45,205	349,251
45,721	349,751
46,027	350,251
46,547	350,751
47,067	351,251
47,487	351,751
48,047	352,251
48,505	352,751
49,187	353,251
49,271	353,751
49,805	354,251
50,359	354,751
50,933	355,251
51,671	355,751
52,475	356,251
52,925	356,751
53,129	357,251
54,133	357,751
54,557	358,251
55,153	358,751
56,171	359,251

2. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme altında yapılan 02 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı bilgileri

2a (mm)	N*1000 (evrim)
22,816	320,338
23,184	325,338
23,508	330,338
24,232	335,338
25,102	340,338
25,74	345,338
26,324	348,338
26,864	351,338
27,62	353,338
27,868	355,338
28,464	357,338
28,71	359,338
29,216	361,338
30,192	363,338
30,448	365,338
31,224	367,338
31,752	369,338
32,372	370,338
32,678	371,338
32,96	372,338
33,434	373,338
33,64	374,338
33,882	375,338
34,076	376,338
34,346	377,338
34,6	378,338
35,38	379,338
35,674	380,338
36,226	381,338
36,632	382,338
37,28	383,338
37,772	384,338

38,166	385,338
38,454	386,338
39,202	387,338
39,8	388,338
40,272	389,338
40,818	390,338
41,494	391,338
42,046	392,338
42,768	393,338
43,27	394,338
43,708	395,338
44,406	396,338
45,098	397,338
45,53	398,338
46,658	399,338
47,12	399,838
47,682	400,338
48,002	400,838
48,642	401,338
49,288	401,838
49,472	402,338
49,708	402,838
49,928	403,338
50,28	403,838
50,668	404,338
51,076	404,838
51,926	405,338
53,004	405,838
53,688	406,338
53,888	406,838
54,286	407,338
54,708	407,838
56,81	408,338

3. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 1,3 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 03 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı bilgileri

2a (mm)	N*1000 (çevrim)
22,113	271,324
22,691	276,324
23,401	281,324
23,905	283,324
24,219	286,324
24,713	289,324
25,169	292,324
25,593	295,324
26,063	298,324
26,767	300,324
27,195	302,445
27,681	304,360
AŞIRI YÜK	
28,015	305,446
28,613	307,737
29,577	310,824
30,173	311,824
30,181	313,324
30,789	315,324
31,101	316,324
31,723	317,824
32,057	318,824
32,397	319,824
33,193	320,824
33,299	321,824
33,577	322,824
33,991	323,824
34,197	324,824
34,779	325,824
35,135	326,824
35,711	327,824
35,923	328,824
36,285	329,824
36,799	330,824
37,513	331,824

38,031	332,824
38,399	333,824
38,833	334,824
39,463	335,824
40,171	336,824
40,663	337,824
41,345	338,824
41,973	339,824
42,501	340,824
43,197	341,824
43,967	342,824
44,615	343,824
45,527	344,824
45,943	345,324
46,361	345,824
46,959	346,324
47,481	346,824
47,893	347,324
48,289	347,824
48,837	348,324
49,387	348,824
49,887	349,324
50,467	349,824
50,889	350,324
51,435	350,824
52,031	351,324
52,615	351,824
53,225	352,324
53,917	352,824
54,653	353,324
55,403	353,824
56,157	354,324
56,779	354,824
57,549	355,324
58,299	355,824
59,115	356,324

4. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 1,5 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 04 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı bilgileri

2a (mm)	N*1000 (çevrim)
20,443	328
21,327	334
21,647	340
22,067	346
22,475	352
23,461	358
24,309	364
25,181	370
25,773	374
26,427	378
27,159	382
27,969	386
28,439	387,004
AŞIRI YÜK	
28,924	388
28,928	389
28,942	390
29,018	391
29,018	392
29,05	393
29,162	394
29,356	395
29,568	396
29,822	397
30,67	399
31,344	400
31,816	401
32,436	403

33,108	405
33,692	407
34,356	409
34,9	411
35,42	413
36,3	415
37,138	417
37,858	419
38,646	421
39,556	423
40,516	425
41,69	427
42,68	429
43,648	431
44,996	433
45,514	434
46,202	435
46,69	436
47,622	437
48,394	438
49,194	439
50,024	440
50,888	441
51,722	442
52,582	443
53,468	444
54,498	445
55,628	446
56,858	447

5. $P_{\max}=27\text{kN}$, $P_{\min}=3\text{kN}$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 1,7 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 05 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı bilgileri

2a (mm)	N*1000 (Çevrim)
22,14	216
23,262	223
24,174	228
24,968	233
25,652	237
26,152	240
26,656	243
27,178	246
27,81	249
28,424	251,612
AŞIRI YÜK	
29,07	252
29,182	252,5
29,182	253
29,192	253,5
29,204	254
29,204	254,5
29,204	255
29,222	255,5
29,222	256
29,238	256,5
29,238	257
29,238	257,5
29,238	258
29,238	258,5
29,238	259
29,238	259,5
29,238	260
29,238	260,5
29,238	261
29,256	261,5
29,32	262
29,39	262,5
29,476	263
29,548	263,5
29,608	264
29,668	264,5
29,72	265
29,806	265,5
29,886	266
29,972	266,5
30,076	267

30,162	267,5
30,24	268
30,36	268,5
30,594	269
30,854	269,5
31,126	270
31,318	271
31,656	272
31,94	273
32,438	274
32,798	275
33,168	276
33,588	277
34	278
34,424	279
34,94	280
35,276	281
35,798	282
36,298	283
36,798	284
37,318	285
37,578	286
37,86	287
38,346	288
38,708	289
39,2	290
39,758	291
40,334	292
40,956	293
41,576	294
42,196	295
42,758	296
43,518	297
44,374	298
44,992	299
45,628	300
46,256	301
46,816	302
47,664	303
48,558	304
49,572	305
50,308	306
51,26	307
52,174	308

2a (mm)	N*1000 (Çevrim)
53,382	309
54,598	310

6. $P_{max}=27kN$, $P_{min}=3kN$ ve $f=5$ Hz değerleriyle sabit genlikli yükleme sırasında 2 oranında aşırı yük uygulanarak yapılan 06 nolu deneyin çatlak uzunluğu-çevrim sayısı bilgileri

2a (mm)	N*1000 (Çevrim)
19,97	213
20,448	218
20,816	224
21,226	230
21,678	236
22,002	242
22,254	248
22,736	254
23,162	260
23,698	266
24,178	272
24,636	278
25,172	284
25,678	290
26,254	296
26,896	300
27,636	304
28,006	307,049
AŞIRI YÜK	
28,068	307,5
28,122	308
28,138	309
28,138	310
28,204	311
28,204	312
28,204	313
28,204	314
28,204	315
28,204	316
28,204	317
28,204	318
28,204	319
28,204	320
28,204	321
28,204	322
28,24	323

28,24	324
28,24	325
28,24	326
28,24	327
28,24	328
28,24	329
28,24	330
28,24	331
28,24	332
28,24	333
28,24	334
28,24	335
28,24	336
28,24	337
28,258	338
28,258	339
28,258	340
28,258	341
28,274	342
28,274	345
28,33	348
28,398	350,5
28,648	352
28,924	353
29,094	354
29,216	355
29,366	356
29,82	358
30,344	360
30,628	362
31,198	364
32,274	366
32,19	368
32,744	370
33,496	372
34,252	374
34,804	376
35,318	378
36,232	380

2a (mm)	N*1000 (Çevrim)
36,98	381
37,236	382
37,646	383
37,75	384
38,152	385
38,614	386
39,186	387
39,528	388
39,898	389
40,392	390
40,802	391
41,298	392
41,854	393

42,324	394
42,918	395
43,56	396
44,23	397
44,964	398
45,476	399
46,134	400
47,11	401
47,94	402
48,93	403
50,042	404
50,898	405
51,88	406
53,004	407