

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK FREKANSLI, GENLİK AYARLI EĞİLME YORULMASI**  
**TEST CİHAZI TASARIMI ve 1100-H14 ALÜMİNYUM LEVHASININ**  
**EĞİLME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muharrem ER**

**Balıkesir, Mart - 2006**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK FREKANSLI, GENLİK AYARLI EĞİLME YORULMASI**  
**TEST CİHAZI TASARIMI ve 1100-H14 ALÜMİNYUM LEVHASININ**  
**EĞİLME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Muharrem ER**

**Balıkesir, Mart - 2006**

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK FREKANSLI, GENLİK AYARLI EĞİLME YORULMASI  
TEST CİHAZI TASARIMI ve 1100-H14 ALÜMİNYUM LEVHASININ  
EĞİLME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muharrem ER

Tez Danışmanı : Doç. Dr. İrfan AY

Sınav Tarihi : 22. 03. 2006

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ali BAYRAM

Doç. Dr. İrfan AY

Yrd. Doç. Dr. Sare ÇELİK

(ÜÜ)

(Danışman-BAÜ)

(BAÜ)

Balıkesir, Mart – 2006

## ÖZET

# YÜKSEK FREKANSLI, GENLİK AYARLI EĞİLME YORULMASI TEST CİHAZI TASARIMI ve 1100 H-14 ALÜMİNYUM LEVHASININ EĞİLME YORULMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Muharrem ER**

**Balıkesir Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**( Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı : Doç.Dr. İrfan AY )**

**Balıkesir , 2006**

Bu çalışmada kimyasal içeriği 99.4 Al – 0.002 Cr – 0.001 Cu – 0.494 Fe – 0.005 Mg – 0.001 Mn – 0.001 Ni – 0.098 Si – 0.014 Ti – 0.008 Zn olan 1100 –H14 alüminyum alaşımını numunelerin eğilme yorulması davranışları incelenmiştir.

Çalışmanın hedefi , alüminyum alaşımlarından yapılmış rüzgar türbin ve eksenel fan kanatlarındaki eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı basite indirgeyerek incelemeye yöneliktir. Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme şekline benzer bir yorulma yapabilmek için çalışmanın amacına uygun olarak düzlemsel eğme gerilmeli yorulma cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Deneyler iki bölümde gerçekleştirilmiş olup ; birinci bölümde hadde yönünde kesilmiş 1100 – H14 alüminyum numunelerin yorulma testleri yapılmış , ikinci bölümde ise hadde yönüne dik kesilmiş 1100 – H14 alüminyum numunelerin yorulma testleri yapılmıştır. Bütün yapıların yorulma sınırını tespit edebilmek için elde edilen deneysel veriler kullanılarak alüminyum numunelerin S – N diyagramları ( Wöhler eğrileri ) çizilmiştir.

Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak , ortalama  $N = 10^7$  çevrimine karşılık gelen eğilme gerilmesi alınmıştır. Deney verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi için iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılmıştır. Kırılma yüzeylerinin optik mikroskopta 50X ve 100X büyütülmüş fotoğrafları çekilmiş ve çatlak başlangıcı , çatlak ilerlemesi( yorulma bölgesi ), zoraki kopma safhaları incelenmiştir. Eğilme yorulması deneylerinin yanı sıra , çekme ve üç noktadan eğilme testleri de gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Test sonuçlarına göre en yüksek yorulma ömrü hadde yönünde kesilmiş 1100 – H14 alüminyum numunelerde elde edilmiştir. Test sonuçlarının üretim esnasında meydana gelen artık gerilmelerden ve numunelerin kesim yönlerinden etkilendiği görülmüştür.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER** : 1100-H14 alüminyum levhası / yorulma / eğilme yorulması / eğilme yorulması test cihazı / S- N eğrileri

## **ABSTRACT**

# **IVESTIGATION ABOUT THE BENDING FATIGUE BEHAVIOUR OF THE 1100-H14 ALUMINUM PLATE AND REPRESENTATION OF A AMPLITUDE REGULATED, HIGH FREQUENCY BENDING FATIGUE TEST MACHINE**

**Muharrem ER**

**Balıkesir University , İnstitute of Science , Department of Mechanical  
Engineering**

**( Ph. D. Thesis / Supervisor : Doç. Dr. İrfan AY )**

**Balıkesir – Turkey , 2006**

In this study is examined the bending fatigue behaviour of 1100-H14 aluminum plate which has a chemical content of 99.4 Al – 0.002 Cr- 0.001 Cu- 0.494 Fe- 0.005 Mg- 0.001 Mn- 0.001 Ni- 0.098 Si- 0.014 Ti- 0.008 Zn .

The aim of study is to find the ways to decrease the damage caused by bending fatigue in using turbine and its axis fan wings made of aluminum alloy . To create a similar fatigue as to loading and stress type in this elements, a plane bending stress fatigue machine is projected and produced in order to reach the goal of the study.

The experiments are carried out in two parts ; in the first part, the sample of 1100-H14 aluminum which have been cut on the way of rolling have done fatigue tests, in the second part , this tests are applied to aluminum samples which have been cut verticall on the way of rolling have done. The S-N diagram ( Wöhler curves)

of the aluminum samples are drawn by using the obtained experimental data in order to determine the fatigue limits of all the structures.

The bending stress which is equal to an average of  $N = 10^7$  cycle is accepted as damage criteria and fatigue limit. The Weibull dispersion with two parameters is used to evaluate the numerical data of the experiments. The 50X and 100X enlarged pictures of the broken surfaces are taken by means of an optical microscope and the initiation of cracks, crack propagation, final-fracture zone are studied. Besides the bending fatigue experiments, tensile and three-point-bending tests are also carried out and the results are evaluated.

According to the test results, the longest fatigue life are obtained from 1100-H14 aluminum samples which have been cut on the way of rolling. The test results are affected by the residual stress and the cutting directions of the samples during the production.

**KEY WORDS :** 1100-H14 aluminum plate / fatigue / bending fatigue / bending fatigue test machine / S-N curves

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET , ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
ABSTRACT , KEY WORLD	iv
İÇİNDEKİLER	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖNSÖZ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. KONUNUN TEORİK İNCELEMESİ	17
3.1 Alüminyum	17
3.1.1 Alüminyum Bileşimleri	18
3.1.2 Alüminyum Alaşımları	19
3.1.3 Alüminyum Üretimi	22
3.1.4 Alüminyum Birincil Ürünleri	22
3.1.4.1 Alüminyum Hadde Ürünleri	23
3.1.4.2 Alüminyum Ekstrüzyon Ürünleri	24
3.1.4.3 Alüminyum İletken Teller	24
3.1.4.4 Alüminyum Parça Dökümler	24
3.1.5 Alüminyumun Kullanım Alanları	25
3.2 Yorulma	27
3.2.1 Yorulma Analizi	28
3.2.2 Yorulma Kınılmasını Etkileyen Faktörler	28
3.2.2.1 Yüzey Durumu	29
3.2.2.2 Sıcaklık	29
3.2.2.3 Çevre	30
3.2.2.4 Frekans	30
3.2.2.5 Gerilme Koşulları	31
3.2.3 Yorulma Çatlaklarının Özellikleri	32
3.2.4 Yorulma Kırıklarının Görünümü	33



3.2.5	Yorulma Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	37
3.2.6	Yorulma Deneyleri	38
3.2.6.1	Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi	39
3.2.6.2	Eğilme Gerilmeli Yorulma Deneyi	40
3.2.6.3	Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi	42
3.2.6.4	Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi	43
3.2.7	Rüzgar Türbin ve Vantilatör Kanatlarındaki Yorulma	43
3.2.7.1	Yorulma ile İlgili Yükler (Kuvvetler)	45
3.2.7.2	Kanat Malzemelerindeki Yorulma Özellikleri	45
3.3	Yorulma Verilerinin İstatistiksel Değerlendirilmesi	47
3.3.1	Yorulma Ömür Verilerinin Weibull Dağılımı ile İstatistiksel Analizi	48
3.3.1.1	Weibull Parametrelerinin Bulunması	49
3.3.1.2	Örnek Weibull Uygulaması	51
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	52
4.1	Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı	52
4.1.1	Elektronik Kontrol Ünitesinin Çalışması	58
4.2	Spektrum Analiz Testleri ve Sonuçları	60
4.3	Çekme Testleri ve Sonuçları	61
4.4	Sertlik Testleri ve Sonuçları	64
4.5	Üç Noktadan Eğilme Testleri ve Sonuçları	65
4.6	Eğilme Yorulması Testleri	67
4.6.1	Yorulma Testi Numuneleri	67
4.6.2	Test Parametreleri	69
4.6.3	Yorulma Testinin Analizi	69
4.6.4	Yorulma Testlerinin Yapılışı	71
4.6.5	Yorulma Testi Sonuçları	72
4.6.6	Yorulma Sonuçlarının Weibull İstatistiksel Dağılımı ile Analizi	76
4.6.7	Yorulma Kırılması Bölgelerinin İncelenmesi	81
5.	SONUÇ ve TARTIŞMA	98
5.1	Genel Sonuçlar	101
	KAYNAKLAR	103

## SEMBOL LİSTESİ

<b><u>Simge</u></b>	<b><u>Adı</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
S	Eğilme gerilmesi	MPa
N	Tekrar sayısı	(-)
$\alpha$	Ferrit	(-)
$\gamma$	Ostenit	(-)
R	Gerilim oranı	(-)
TEM	Transmission Elektron Mikroskobu	(-)
FEM	Finite Element Model	(-)
$R_d$	Şekil değiştirme oranı	(-)
Matched <sup>TM</sup>	Sayısal program paketi	(-)
SAMCEF <sup>TM</sup>	Ticari sonlu elemanlar paket programı	(-)
ALCAO	Aluminum Company of America	(-)
ANSI	American National Standards Institute	(-)
$\sigma_m$	Toplam gerilme	MPa
$\sigma_{or}$	Ortalama gerilme	MPa
$\sigma_a$	Değişken gerilme genliği	MPa
$da / dN$	Çatlak ilerleme hızı	m/saykıl
K	Gerilim şiddeti faktörü	MN /m <sup>-3/2</sup>
C	Deneysel sabitler	(-)
M	Deneysel sabitler	(-)
$da$	Çatlak boyu	m
$dN$	Belirli bir gerilim altında malzeme kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki tekrar sayısı	saykıl
$\sigma_r$	Gerilme dağılımı	MPa
$\sigma_a$	Gerilme genliği	MPa
$\bar{\sigma}$	Ortalama gerilme	MPa
n	Deney sayısı	(-)
$\sigma_i$	Sıralamadaki her bir gerilme değeri	MPa
d	Standart sapma	(-)
r	Katsayıların dağılım oranıdır	(-)
$F_f(x)$	Hasar olasılığı	(-)
$F_s(x)$	Hasarsız ömrünü sürdürme olasılığıdır	(-)
$\alpha$	Şekil parametresi ( boyutsuz ) ve Weibull doğrusunun eğimidir	(-)
$\beta$	Weibull doğrusunun x eksenini kestiği noktada bulunan yerleşim parametresidir veya ömür dağılımındaki ölçüm parametresidir	(-)
P	Sıra ortalaması	(-)

$\dot{I}$	Hasar sıra numarası	(-)
n	Her testteki numunelerin toplam sayısı	(-)
TS – EN	Türk Standartları Enstitüsü	(-)
ASTM	Amerikan Standartları Enstitüsü	(-)
$\sigma_{tu}$	Maksimum çekme mukavemeti	MPa
Fmax	Maksimum kuvvet	N
A	Kesit alanı	mm <sup>2</sup>
$\sigma_{ty}$	Akma mukavemeti	MPa
$\sigma_e$	Maksimum eğilme gerilmesi	MPa
F <sub>e</sub>	Maksimum eğme yükü	N
L	Destek mesafesi	mm
B	Numune genişliği	mm
H	Numune kalınlığı	mm
l	Moment kolu	mm
f	Genlik	mm
E	Elastikiyet modülü	daN/cm <sup>2</sup>
I	Atalet momenti	cm <sup>4</sup>

## ŞEKİL LİSTESİ

<b>Şekil Numarası</b>	<b>Adı</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1	Deney cihazının şematik gösterimi	13
Şekil 3.1	Çatlak ilerleme mod 'ları	32
Şekil 3.2	Pürüzsüz bir numunede çoklu yorulma çatlak başlangıcı	34
Şekil 3.3	Alüminyum alaşımının kırılma yüzeyindeki duraklama çizgileri	35
Şekil 3.4	Yorulma kırılmalarının yüzeylerindeki işaretlerin şematik gösterimi	35
Şekil 3.5	7055 Alüminyum alaşımının S – N eğrileri	37
Şekil 3.6	Yorulma testi için sinüzoidal yükleme	38
Şekil 3.7	Eksenel gerilmeli yorulma deneyi cihazı	40
Şekil 3.8	Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazı şematik gösterimi	41
Şekil 3.9	Sabit eğme momentli yorulma cihazı	42
Şekil 3.10	Ankastre kiriş türü yorulma deneyi cihazı	42
Şekil 3.11	Burulma momenti sağlayan deney düzeneği	43
Şekil 3.12	Çeşitli kanat malzemelerinin yorulma özellikleri	46
Şekil 4.1	Düz örgülü cam/ epoksi kompozit malzemelerin eğme yorulmasında kullanılan yorulma cihazı	52
Şekil 4.2	Motor mil bağlantısı	53
Şekil 4.3	Çekme yönünde hareket	53
Şekil 4.4	Basma yönünde hareket	53
Şekil 4.5	Kauçuk bağlantı takozları	54
Şekil 4.6	Dijital sayaç	54
Şekil 4.7	Çevrim sayacı sensörleri	55
Şekil 4.8	Elektrik motoru stop sensörleri	55
Şekil 4.9	Yorulma cihazının şematik resmi	56
Şekil 4.10	Elektronik kontrol ünitesi	57
Şekil 4.11	Yorulma cihazının genel görüntüsü	59
Şekil 4.12	Spektrum analiz test cihazı	60
Şekil 4.13	Spektrum analiz test numunesi	61
Şekil 4.14	ASTM E 8M – 04 'e göre test numunesi boyutları	61
Şekil 4.15	ASTM E 8M – 04 'e göre hazırlanmış alüminyum çekme numunesi	62
Şekil 4.16	Çekme deney cihazı	62
Şekil 4.17	Brinell sertlik deney numunesi	64
Şekil 4.18	Brinell sertlik test cihazı	64
Şekil 4.19	ISO 7438 : 2005 (E ) 'ye göre test numunesi boyutları	65
Şekil 4.20	Üç noktadan eğme test cihazı	66

Şekil 4.21	Hadde yönüne paralel kesilmiş numune	68
Şekil 4.22	Hadde yönüne dik kesilmiş numune	68
Şekil 4.23	Test numunesi boyutları	68
Şekil 4.24	Haddeleme yönüne paralel kesilmiş alüminyum numunelerin S-N eğrileri	75
Şekil 4.25	Haddeleme yönüne dik kesilmiş alüminyum numunelerin S-N eğrileri	75
Şekil 4.26	Haddeleme yönüne paralel ve dik kesilmiş alüminyum numunelerin S-N eğrilerinin kıyaslanması	76
Şekil 4.27	Hadde yönüne paralel kesilmiş numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	78
Şekil 4.28	Hadde yönüne dik kesilmiş numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri	78
Şekil 4.29	Bütün numune grupları için kırılmama ( ömrünü sürdürme) olasılıkları grafiği	80
Şekil 4.30	1100-H14 alüminyum numune yüzeylerindeki ezilme ve çatlaklar	81
Şekil 4.31	1100-H14 alüminyum numunesinin yorulma kırılması yüzeyi	82
Şekil 4.32	Dikdörtgen kesitli numunelerin zıt yönlü eğme yorulması kırılma yüzeylerinin şematik resimleri	82
Şekil 4.33	Kırılma yüzeyindeki çatlaklar	83
Şekil 4.34	Çatlak ilerleme yönü	83
Şekil 4.35	10mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	84
Şekil 4.36	10mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	85
Şekil 4.37	4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	86
Şekil 4.38	4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	87
Şekil 4.39	1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	88
Şekil 4.40	1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	89
Şekil 4.41	10 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	90
Şekil 4.42	10 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	91
Şekil 4.43	4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	92

Şekil 4.44	4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	93
Şekil 4.45	1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	94
Şekil 4.46	1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları	95

## ÇİZELGE LİSTESİ

<b><u>Çizelge Numarası</u></b>	<b><u>Adı</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
Tablo 3.1	Alüminyum elementinin özellikleri	18
Tablo 3.2	Dövülebilen alüminyum alaşım grupları	19
Tablo 3.3	Ana menevişleme işaretleri	20
Tablo 3.4	Döküm alüminyum alaşımları	20
Tablo 3.5	R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları	39
Tablo 4.1	Elektronik kontrol ünitesi devre elemanları	58
Tablo 4.2	Alüminyum numunelerin kimyasal kompozisyonu	60
Tablo 4.3	ASTM E 8M – 04 ‘e göre test numunesi boyutları	62
Tablo 4.4	Çekme deneyi sonuçları	63
Tablo 4.5	Üç noktadan eğme testi sonuçları	67
Tablo 4.6	Haddeleme yönünde kesilmiş alüminyum numunelerin S-N verileri	73
Tablo 4.7	Haddeleme yönüne dik kesilmiş alüminyum numunelerin S-N verileri	74
Tablo 4.8	Hadde yönüne paralel kesilmiş numuneler için Weibull parametreleri	77
Tablo 4.9	Hadde yönüne dik kesilmiş numuneler için Weibull parametreleri	77
Tablo 4.10	Hadde yönüne paralel kesilmiş numuneler için Weibull güvenilirlik değerleri	79
Tablo 4.11	Hadde yönüne dik kesilmiş numuneler için Weibull güvenilirlik değerleri	79

## ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım sırasında tecrübe ve bilgisi ile beni yönlendiren , deneysel çalışmalarda kullandığım yorulma cihazının tasarımında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. İrfan AY ‘a sonsuz teşekkürlerimi sunarım .

Literatür araştırmalarımnda ve tez çalışmalarımıla ilgili teorik hesaplamalarda yardımlarını esirgemeyen Dr. Raif SAKİN ‘ e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda kullandığım numunelerin temin edilmesinde ve mekanik deneylerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Ütğm. Cüneyt AKMANA , deneysel çalışmalarımnda kullandığım yorulma cihazının , tasarımında ve yapımında en büyük desteği veren Öğ.Yb. İbrahim TÜFEKÇİ’ye , Öğ. Bnb. Nida BİRGÜL’e , Öğ.Yzb. İsmail ERSÖZLÜ’ye , Veysel ALABAHAM’a , Yaşar CÖMERT’e , Akif ERTAN ‘a , yorulma cihazının elektronik aksamının yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Öğ.Ütğm. Serkan GÜRKANA şükranlarımı bir borç bilirim.

Çalışmalarım esnasında bana sonsuz destek veren , kendilerine ait olan zamanlarını da bana bağışlayan eşim Yeliz ve kızım Eda Naz ER ‘e sonsuz teşekkürlerimi sunarım .

**Balıkesir , 2006**

**Muharrem ER**



## 1. GİRİŞ

Günümüzde , çelikten sonra en çok tüketilen metalik malzeme alüminyum ve alaşımlarıdır. Bu durum alüminyumun önemini açık olarak ortaya koymaktadır. Alüminyum diğer metallerle birleşmiş olarak yer kabuğunun % 8' ni oluşturmaktadır. 19. yüzyılın ikinci yarısından beri endüstriyel çapta üretilen çok genç bir metal olmasına rağmen, bugün bakır ve alaşımları, kurşun, kalay ve çinko gibi tüm demir dışı metallerin toplam kullanımından daha çok miktarda kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları ; hafif olması , oksidasyonunun kolay olmasına rağmen pek çok ortamda kararlılığının bozulmadan kullanılması, elastik bir malzeme oluşu, işleme kolaylığı, ısı ve elektrik iletkenliğinin iyi olması ve şekillendirmek amacıyla döküm, dövme, haddeleme ,presleme ,ekstrüzyon ve çekme gibi tüm metodların uygulanabilirliği gibi üstün özelliklere sahip olması nedeniyle otomotivden inşaat sektörüne, ulaşım, tarım , elektrik ve bunlar gibi birçok endüstri sektörünün vazgeçilmez temel maddesidir [1,2 ].

Endüstriyel uygulamalardaki birçok malzeme çekme mukavemetinin çok altındaki tekrarlı gerilme veya şekil değişimlerine maruz kalmaktadır. Tekrar eden veya çevrimli yüklere maruz kalan parçalar tek bir statik gerilme uygulanması halinde dayanabilecekleri gerilmenin çok daha altındaki bir gerilmede koparlar. Bu kopmalara yorulma kopması adı verilir. Malzemelerin kullanılabilirliğine yorulma özellikleri incelenerek daha iyi karar verilebilir. Malzemelerin yorulma özellikleri hesaplamak için genellikle S – N (Wöhler ) eğrileri kullanılmaktadır [2,3,4].

Yorulma deneylerindeki zorluktan bir tanesi deney zamanıdır. Bir malzemenin yorulma özelliklerini belirlemede , dayanma sınırı civarındaki deney verileri çok önemlidir. Dayanma sınırı, gerçek zaman ölçeğinde kırılmanın olmadığı gerilmenin altındaki bir gerilmedir. Dayanma sınırına ulaşmak için gereken çevrim sayıları malzemelere göre farklılık gösterir.

Yorulma deneylerinin genel bir eğilimi ise deney sonuçlarının geniş dağılımlı olmasıdır. İstatistiksel olarak güvenilir sonuçlar için önemli sayıda numunenin test edilmesi gerekir. Sonuç olarak malzemenin yorulma özelliklerinin belirlenmesi için gereken deney zamanı oldukça uzun olmaktadır [4].

Yorulma özellikleri tamamen malzemenin kendine özgü özelliklerinden değil numunenin özelliklerinden de etkilenmektedir. Numunenin işlenmesi esnasında oluşan mikro boşluklar ve yüzey kusurlarının hepsi deney numunesinin yorulma özelliklerini etkiler [3,4]

Bu çalışmada , hadde yönünde ve hadde yönüne ters plaka şeklinde kesilmiş alüminyum numunelerin spektrum analizleri yaptırılarak kimyasal içerikleri tespit edilmiştir. Spektrum analiz sonucunda 1100 – H14 alüminyum alaşımı sınıfından olduğu tespit edilen numunelerin Brinell sertlik test cihazında Brinell sertlikleri , çekme cihazında maksimum çekme ve % uzama değerleri , üç noktadan eğme test cihazında ise eğme dayanımı değerleri ölçülerek mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Eğilme yorulması testleri ise çalışmanın hedefine uygun tasarlanıp imal edilen yüksek frekanslı ve genlik ayarlı yorulma test makinesinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın hedefi , alüminyum alaşımlarından yapılmış rüzgar türbin ve eksenel fan kanatlarındaki eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı basite indirgeyerek incelemeye yöneliktir. Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme şekline benzer bir yorulma yapabilmek için çalışmanın amacına uygun olarak düzlemsel eğme gerilmeli yorulma cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Yüksek frekanslı genlik ayarlı yorulma test makinasında ; 10 mm, 8 mm, 6.4 mm, 5.12 mm , 4 mm , 3.2 mm , 2.5 mm , 2 mm , 1.6 mm ve 1.3 mm genlik durumlarında hem hadde yönünde kesilmiş numunelerin hemde hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin yorulma testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre S – N diyagramları (Wöhler eğrileri ) elde edilmiştir.

Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak , ortalama  $N = 10^7$  çevrimine karşılık gelen eğilme gerilmesi alınmıştır. Sonuçlar kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir. Deney verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi için ise iki parametrelili Weibull istatistik dağılımı kullanılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Alüminyumun sahip olduğu özelliklerin birleşimi onu son derece faydalı bir mühendislik malzemesi haline getirir. Yüzeyinde meydana gelen sağlam oksit filmi nedeniyle , doğal ortamların çoğuna karşı iyi bir yemim direnci gösterir. Saf haldeki alüminyumun düşük dayanımına rağmen , alaşımlanarak dayanımı 690 MPa 'ya kadar çıkarılabilir. Alüminyum , düşük yoğunluğu ( $2.70\text{g/cm}^3$ ) nedeniyle özellikle otomotiv ve hava araçları endüstrisinde tercih edilir. Bu endüstri alanları için yorulma yüklemeleri genellikle kaçınılmaz bir durumdur. Bu sebepten dolayı , yorulma analizi yapılmadan yapılan son tasarımlar malzemelerin mekanik özellikleri açısından tam doğru değildir [2].

Değişken gerilmelere maruz moment aktaran hareketli parçaların buharlı makinaların gelişmesi ile birlikte yaygın olarak kullanılması, tekrarlı değişken yüklere maruz kalan bu parçalarda hasarların ortaya çıkmasını kaçınılmaz kılmıştır. Bu sebeple yorulma hasarını önlemeye yönelik çalışmalar yapılmış ve halende yapılmaya devam etmektedir. Yorulma hasarını önlemek veya yorulma ömrünü artırmak için uygulanmakta olan değişik önlemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları malzemenin iç yapısında değişiklik meydana getirecek ısıl işlemlerden ,normalizasyon, yüzey sertleştirme, komple sertleştirme ve ostemperleme gibi işlemlerdir. Diğer yöntemler ise malzeme yüzeyinde kalıcı deformasyon gerilmesi oluşturacak olan bilyalı dövme ve yüzey ezme işlemleridir [3].

Yorulma hasarını önleme veya yorulma ömrünü artırma yöntemini belirlerken kırılma mekaniğinin çok iyi bilinmesi olayın çözümüne büyük katkı yapacaktır. Bu nedenle yorulma olayını kendi içinde geniş bir incelemeye tabi tutarak olayın gelişimini safha safha incelemek gerekir [3] .

D. E. Berg ve P. C. Klimas , düşey eksenli rüzgar türbini kanatlarının yapımında kullanılan , kimyasal kompozisyonu ; 0.4 % Si , 0.7 % Mg olan

6063 alüminyum alaşımının yorulma karakteristiğini incelemişlerdir. Yorulma analizi için iki çeşit parametre ölçülmüştür. (1) Gerilim değerine karşı kırılma için gerekli titreşim sayısı ( S- N ). (2) Yorulma çatlak ilerleme oranı ( da / dN ) (mm / cycle). Yorulma çatlak ilerleme oranı ( da / dN ) ; 0.09 , 0.3 , 0.5 yük oranlarında ( R ) ölçülmüştür. Düzlemsel eğme yorulması testleri , 6063 alüminyum alaşımından elde edilmiş yüz adet kanat numunesi üzerinde uygulanmıştır. Deney sonuçları Goodman diyagramı çizilerek yorumlanmıştır. Sonuç olarak S –N diyagramlarına bakıldığında; yüksek gerilme değerlerinde numunelerin yorulma ömrünün kısaldığı , düşük gerilme değerlerinde ise kırılma için gerekli titreşim sayısı (N)'in arttığı tespit edilmiştir. Kırılan yüzeyler scanning elektron mikroskopunda incelenmiş ; çatlakların öncelikli olarak tane sınırlarında oluştuğu , taneler arası bölgelerde ise kırılan yüzeylerin çoğunlukta olduğu tespit edilmiştir. Malzemelere yapılan ekstrüzyon uygulamalarının , mikro yapıdaki iri tanelerin ve tane sınırı özelliklerinin taneler arası kırılmayı tetiklediği saptanmıştır [5] .

T. S. Srivatsan , kimyasal kompozisyonu ; 2.41 % Cu , 2.00 % Mg , 8.20 % Zn , 0.11 % Zr , 0.005 % Mn , 0.003 % Cr olan 7055 alüminyum alaşımının artan sıcaklıklarda yorulma esnasındaki titreşim deformasyonu ve hasar karakteristiğini incelemiştir. Test numunesi 25 mm kalınlığında , 7751 C °'de temperlenmiş dövme plakadır. Alaşım numunesi , ayarlanabilir gerilme genliği altında çekme- basma yükü ( eğme gerilmesi ) kullanılarak titreşimsel deformasyona uğratılmıştır. Artan test sıcaklıklarında alaşım numunesinin kırılması esnasında yumuşamanın olduğu tespit edilmiştir. Test sıcaklığındaki artış ile birlikte yumuşama değeri de artmaktadır. Artan test sıcaklıklarında , çatlak başlangıcının hızlandırılmasında ve düzgün çatlak ilerlemesinde önemli bir rol oynayan titreşim gerilmesinin uygulanmasıyla tane sınırında lokal oksitlenme ve gevremeden dolayı çatlamların oluştuğu tespit edilmiştir [6].

G. S. Langdon ve G. K. Schleyer yaptıkları araştırmalarında ; darbeli basınç yükü altındaki alüminyum plakaların kırılma ve elastik olmayan deformasyonunu deneysel ve analitik yöntemlerle incelemişlerdir.

Deneysel çalışmada ; 0.5 m x 0.5 m ölçülerindeki kenarlarından bağlanmış alüminyum plakaya hız seçicili basınç cihazı kullanılarak darbeli basınç yükü uygulanmıştır. Dinamik test sonuçları kırılma yüzeylerinin araştırma sonuçları ile birlikte scanning elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Plakalardaki maksimum şekil değişikliği tahmini için analitik yöntem olarak , plakaların elastik-plastik analizinde kullanılan finite strip metodu ( sonlu şerit metodu) kullanılmıştır. Plakalardaki kalıcı şekil değişiminin ölçümü için rigid-plastic ( katı plastik ) metodu kullanılmıştır. Sonuç olarak plakalardaki maksimum şekil değişikliği tahmini için kullanılan elastik-plastik analiz değerleri ile deneysel sonuçlar arasında mantıklı bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Fakat plakalardaki kalıcı şekil değişiminin ölçümü için kullanılan rigid-plastic ( katı plastik ) metodu analiz değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında , rigid-plastic ( katı plastik ) metodunun güvenilirliğinin az olduğu gözlemlenmiştir [7].

E. Bayraktar , C. Bathias , X. Hongquian , T. Hao ; yaptıkları araştırmalarında çift fazlı ( $\alpha_2 + \gamma$ ) Ti Al ( Titanyum Alüminyum ) alaşımının yüksek titreşimdeki yorulma davranışını incelemiştirlerdir. Ti – Al alaşımları ( $\alpha_2 - Ti_3Al$ ) ve ( $\gamma - TiAl$ ) olmak üzere iki farklı faza sahiptir. Bu yapı daha sonra ( $\alpha_2 + \gamma$ ) olarak adlandırılmıştır. Araştırmada kimyasal kompozisyonu 45 %Al , 1.5 % Nb , 0.05 % W , 0.1 % Mo , 0.005 B olan Ti- 45 Al -10 Nb alaşım numunesi kullanılmıştır. Yorulma deneyleri ; iki farklı gerilme oranında ( R =0.1 ve R = 0.5 ), 20 kHz frekanslı, 3 noktadan eğmeli ultrasonik test cihazında yapılmıştır. Yorulma testleri esnasında maximum  $10^{10}$  kırılma titreşim sayısına kadar ulaşılmıştır. Sonuç olarak ; gerilme oranının değişmesiyle yorulma dayanımının büyük ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir.  $10^6$  çevrimde dinamik yorulma dayanımı R = 0.1’de 202 MPa , R =0.5’de 301 MPa olduğu tespit edilmiştir.  $10^9$  çevrimde çevrimde dinamik yorulma dayanımı R = 0.1’de 180 MPa , R =0.5’de 150 MPa olduğu tespit edilmiştir. Gerilme oranı R = 0.1 ve R = 0.5 durumlarında, yorulma kırılma sonuçları karşılaştırıldığında yorulma sınırları  $10^7$  ‘den fazla olan numunelerde benzer durumların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu benzer sonuçlar ; aynı çatlak büyüklüğü , çatlak yüzeylerinin oluşumu ve iç yorulma başlangıçlarıdır. Fakat iç yorulma başlangıçları düşük çevrimlerde oluşmamıştır. Kırılma yüzeyleri çoğunlukla lamel yapıya dik bir yönelme göstermiştir.

Çatlak yüzeylerin  $\gamma$  ve  $\alpha$  fazları arasında oluştuğu gözlemlenmiştir. Kırılma yüzeyi üzerinde yarık desenleri genellikle  $\gamma$  fazı yanında görülmüştür. Üç noktadan eğmeli ultrasonik yorulma testinin , yüksek titreşimli yorulma testleri için ideal bir deney olduğu saptanmıştır [8].

T. Pardoen , Y. Marchal ve F. Delannay ince alüminyum plakalarda kalınlığın çatlama direncine etkisini araştırmışlardır. 1-6 mm kalınlıklarındaki 6082T0 ince alüminyum plakalar , çatlak ( Double Edge Notched Tension) çift ağızlı, çentikli çekme numunesi olarak deneyler için hazırlanmışlardır. Hazırlanan numunelerin çekme testinden faydalanarak deneysel ve sayısal araştırma yapılmıştır. Kritik J – İntegrali ( $J_c$ ) , kritik CTOD ( $\delta_{CTODc}$ ) ve kırılma işi  $W_c$  analitik hesaplama yöntemleri olarak kullanılmıştır. Deney ve analitik hesaplama yöntemleri sonuçları incelendiğinde ; kritik J – İntegrali ( $J_c$ ) , kritik CTOD ( $\delta_{CTODc}$ ) ve kırılma işi  $W_c$  'de ince malzemelerde kalınlık ve kırılma dayanımı değerleri ile birlikte artış sağlanmıştır. Daha büyük kalınlıklar için ; kırılma işi ( $W_c$ ) kalınlık ile birlikte lineer artış göstermesine rağmen , kritik J – İntegrali ( $J_c$ ) ve kritik CTOD ( $\delta_{CTODc}$ ) kalınlık ile lineer olmayan bir artış göstermektedir. Bu farklılığın özellikle 5-6 mm kalınlığındaki numuneler için çatlak ucunun ön tarafındaki daralan bölgenin hızlı gelişmesi ile ilgili olduğu tespit edilmiştir [9].

M. P. Szolwinski ve T. N. Farris , kimyasal kompozisyonu ; 4.51 % Cu , 1.51 % Mg , 0.63 % Mn , 0.07 % Si , 0.20 % Fe , 0.01 % Cr , 0.08 % Zn , 0.03 % Ti olan 2024 –T351 alüminyum alaşımının aşınma ( fretting )( korozyon) yorulmasını incelemiştir. Titreşimli yüklere maruz kalan malzemelerde aşınmanın bir sonucu olarak malzeme kenarlarındaki çatlak oluşumları aşınma yorulması olarak tanımlanmıştır. Aşınma yorulması , hava taşıtlarının yapısal birleştirmelerinde ve türbin kanatlarında önemli bir yorulma kırılması mekanizmasıdır. Aşınma yorulması testi için ; dijital kontrollü , güvenli bir grafik çizim yazılımına sahip, tek eksenli servo-hidrolik yorulma test makinası kullanılmıştır. Numunelerin aşınma yorulmasını karakterize etmek için bağımsız ve kontrol edilebilir dört parametre seçilmiştir. Bu parametreler ; normal yük , aşındırma desteklerinin eğim yarıçapı , hacimsel gerilme ve uygulanan eksenel yükün / eksenel yüke oranıdır. Test makinası ile hem normal hemde titreşimli teğetsel aşındırma yükleri uygulanarak numune

üzerindeki hacimsel yük birleşimi gözlenmiştir. Ara yüzeylerdeki sürtünme katsayısındaki artış ve yüzeylerdeki mikro kaymalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Titreşimli gerilme sonuçları , aşınma yorulması çatlak başlangıcının tahmini için teorik gerilme ömrü ve tek eksenli yorulma değerleri ile bağıntılı olarak yorumlanmıştır. Yapılan deneylerde kırılma olayına numunenin arka kenarındaki çekirdeklenmelerin ve çatlak başlangıçlarının sebep olduğu tespit edilmiştir. Aşınma ile ilişkili mikro kayma yüzeyleri, temas gerilimleri ve gerinmelerin yorulma çatlağının oluşmasında kritik bir rol oynadığı gözlemlenmiştir [10].

K. C. Kim ve S. W. Nam , Al – Zn - Mg alaşımının yorulma mekanizması üzerinde Mn ( mangan ) dağılımının etkisini incelemişlerdir. Kimyasal kompozisyonu ; Al - 4.6 % Zn , 2.0 % Mg , 0.75 % Mn , 0.15 % Zr ve Al – 4.0 % Zn, 2.6 % Mg , 0.15 % Zr olan iki farklı 7xxx serisi alüminyum alaşımı, oda sıcaklığında tek eksenli yorulma test cihazı ile yorulmuş ve kırılma yüzeylerinin fotoğrafları çekilmiştir. Titreşim deformasyonundan sonra iç dislokasyon yapısının gözlemlenmesi için Transmission Elektron Mikroskobu ( TEM ) kullanılmıştır. Mangan içeren alüminyum alaşımının ( Al-0,75 wt % Mn) dislokasyon yapısı Transmission Elektron Mikroskobu'nda incelendiğinde , alaşımın dislokasyon yapısının düzgün bir dağılım gösterdiği gözlemlenmiştir. Mangan içermeyen alaşımların ise sadece etkin kayma düzlemleri üzerinde düzlemsel tipte dislokasyon konsantrasyonu oluşturduğu tespit edilmiştir. Al-0,75 wt % Mn alaşımındaki homojen olarak dağılmış dislokasyonların, homojen bir deformasyona ve mekanik özelliklerin artmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Mn ( mangan ) içeren alüminyum alaşımındaki mangan dağılımının homojen bir deformasyon sağladığı, yorulma hasarı yığılmasını geciktirdiği ve yorulma ömrünü artırdığı tespit edilmiştir [11].

K. M. Gruenberg , B. A. Craig , B. M. Hillbery, R. J. Bucci ve A. J. Hinkle , 2024 T3 alüminyum alaşımlarının , kırılma yükü testlerinden elde edilen sonuçlara göre malzemelerin aşınmadan önceki yorulma ömürlerinin tahmini üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu araştırmanın amacı yorulma ömrü üzerinde korozyonun etkisini ölçmek için kolay ve pratik bir yöntem geliştirmektir. Bu çalışma için , üç farklı grupta üretilmiş 2024 T 3 alüminyum alaşımının kırılma yükü



numuneleri üç aşamada korozyona maruz bırakılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla bütün kırılma yükü testleri tek eksenli, genişim ölçer bağlanmış test makinasında , 15 test korozyonlu numuneler , 6 test korozyonsuz numuneler için gerçekleştirilmiştir.

Her bir test durumu için 5 adet numune denenmiştir. Korozyona maruz bırakılmış numunelerin kırılma yükü sonuçları ve yorulma ömrü sonuçları arasında , çatlak boyu değişiminin etkisi ile bir bağıntı geliştirilerek ömür tahmini çalışması yapılmıştır. Geliştirilen ömür tahmini tekniği ile elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla elde edilen ömür süresinden ortalama % 20 daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu araştırma sayesinde geliştirilen ömür tahmini metodu , hava araçlarının dizaynı için kullanılacak malzemenin ölçümü, üreticiler için farklı aşımaların ölçümü yada hava araçlarının bakım zaman aralıkları için çok önemli bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir [12].

K. H. Chung ve W. H. Yang yaptıkları araştırmalarında ; kompozit malzeme ile yamanmış 6061 –T6 kalın alüminyum plakanın yorulma çatlak büyüme davranışını incelemiştirler.  $0^{\circ}$  ,  $15^{\circ}$  ,  $30^{\circ}$  ,  $45^{\circ}$  ve  $60^{\circ}$  çatlak eğimli yamalı plakalar , 25 ton yük kapasiteli, hidrolik yorulma test makinası ile yorulmuşlardır. Yama malzemesi 40 x 25 x 2.5 mm boyutlarında HT 145 / RS 1222 kompozit malzemedir. Yapılan deneyler sonucunda , yamanın ve çatlak eğim açısının 6061-T6 alüminyum plakanın yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir. Araştırma sonucunda ; yamalı plakanın yorulma ömrünün çatlak eğimi ile birlikte yaklaşık 2.4 – 5 kat artış gösterdiği tespit edilmiştir. Yamanın yapılması ile birlikte çatlak ilerleme oranında önemli bir şekilde azalma gözlenmiştir. Eğim açısının  $0^{\circ}$  –  $30^{\circ}$  'ye artırılırken alüminyum numunenin yorulma ömrünün azaldığı , eğim açısının  $30^{\circ}$  'den  $60^{\circ}$  'ye artırıldığında yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir. Çatlak ilerlemesinin kalın plakaların tamir edilen kalınlığı boyunca aynı olmadığı gözlemlenmiştir [13].

G. C. Tsai ve S. B. Shen yaptıkları araştırmada ; kompozit yama ile birleştirilmiş çatlak kalın alüminyum plakaların yorulma analizlerini hem deneysel hemde analitik hesap yöntemi ile incelemiştirler. Deneysel çalışma için , 11.43 mm kalınlığındaki 7075-T7351 alüminyum plaka çatlakları , 5521/4 boron /epoxy

kompozit malzemesi ile yamanmıştır. Gerilme analizi 4 farklı numune tipine uygulanmıştır. Çatlaksız numune , çatlak numune , çatlak ve bir yüzü yamalı numune , iki yüzü yamalı numuneler. Gerilim şiddeti faktörü analizi ve yorulma ömrü tahminleri ,çatlak alüminyum plakalar ve kompozit yamayla tamir edilmiş alüminyum plakalar için uygulanmıştır [14].

Yorulma testleri gerilim oranı  $R = 0.1$  de , 50 ton yük kapasiteli yorulma test makinasında yapılmıştır. Paris kanunu ve lineer olmayan malzeme özellikleri FEM ( Finite Element Model ) sonlu eleman modeli ile birleştirilerek yorulma ömür tahmini yapılmıştır. Sonuç olarak , çatlaksız alüminyum plakada gerilme 1,27 mm boyundaki çatlağa sahip olan plakadan daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Yama ile tamir edilmemiş çatlak alüminyum plakalar için gerilmenin , farklı çatlak boylarında büyük farklılık göstermediği tespit edilmiştir. Yorulma restlerinden ve hesaplamalardan , plakaların her iki düzleminin yamanması ile malzemenin yorulma ömrünün arttığı gözlemlenmiştir. Yorulma çatlak ilerleme karakteristiğinde , FEM ( Finite Element Model ) sonlu eleman modelinden alınan sonuçlarla deneysel sonuçların uyum sağladığı tespit edilmiştir [14].

Q. Y. Wang ve R. M. Pideparti yaptıkları araştırmada ; kompozit malzeme ile yamanmış alüminyum plakaların statik karakteristiklerini ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. V tipi çentik açılmış 7075 –T6 alüminyum plakalar 1-, 2- ve 4 kat Textron's 5521 boron-epoxy kompozit malzemesi ile yamanmıştır. Üç farklı katta yamanmış alüminyum plakaların , 3 Hz frekansta ve 0.1 yükleme oranında servo- hidrolik yorulma test makinası ile yorulma testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar , kompozit yamalarla tamir edilmiş alüminyum plakalarda hem statik mukavemetin hemde yorulma ömrünün önemli bir şekilde artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Farklı katlardaki yama uygulamalarının yorulma ömründe 5-14 kat artış gösterdiği gözlemlenirken , gerilim şiddeti faktöründe ise 2-4 kat azalma meydana getirdiği tespit edilmiştir. 4 kat kompozit yama uygulamasının , deney numunesinin statik kırılmalarının önlenmesinde ve yorulma ömrünün artmasında önemli bir etken olduğu tespit edilmiştir [15].

M. N. James ve A. E. Paterson yaptıkları çalışmalarında ; kaynaklı birleştirme yapılmış , kimyasal kompozisyonu 0.74 % Mg , 0.63 % Si , 0.19 % Fe , 0.26 %Cu , 0.025 % Zn ve 0.016 % Ti olan 6261- T6 alüminyum alaşımı plakaların sabit ve değişken genlikli yükler altındaki yorulma performansını incelemişlerdir. Sabit genlikli deneysel çalışmalarda ; numuneye kaynak edilen takviye plakasının geometrik şekli , numunenin boyutları , ısı , titreşim gerilmesi boşalması , üretim kalitesi farklılıkları ve kaynak kalitesinin yorulma performansı üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Dikdörtgen , eşkenar dörtgen ve oval şeklindeki takviye plakalarının numunelerin yorulma dayanımları arasında  $10^5$  titreşimde %26 ,  $10^6$  titreşimde ise %23 oranında fark oluşturduğu tespit edilmiştir. Değişken genlikli deneysel çalışmalar , lineer hasar simülasyon yöntemiyle yapılan yorulma ömür tahmininden daha kısa sürede yorulma ömrünü tespit edebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmada da titreşim gerilmesi boşalması , üretim kalitesi farklılıkları ve kaynak kalitesinin yorulma performansı üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir [16].

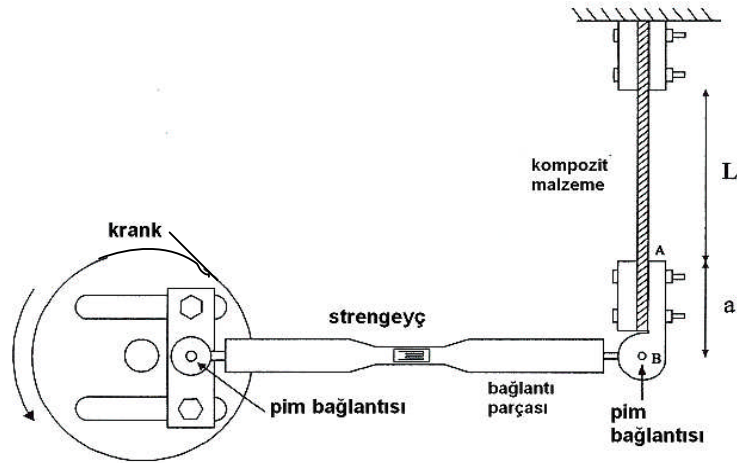
W. Y. Lee ve J. J. Lee yaptıkları araştırmalarında ; kompozit yamalı alüminyum plakaların yorulma çatlak ilerleme davranışını belirlemek için 3 D FE ( three –dimensional successive finite element method ) ( üç boyutlu ardışık sonlu eleman metodu ) analiz tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada ; 2 mm , 6 mm , ve 10 mm kalınlığında plaka şeklindeki alüminyum numuneler incelenmiştir. Çatlak şekli tarafından etkilenen çatlak ucundaki gerilim şiddeti faktörü hesaplanmıştır. Gerilim şiddeti faktörü , gerçek çatlak şekli gelişiminin tahmini ve yorulma davranışı analizinin yapılmasında kullanılmıştır. Gerilim şiddeti faktörünün çatlakın bulunduğu yüzdeki dağılımını belirlemek ve yorulma çatlak ilerleme bağıntısı ile tespit edilmiş noktalardaki çatlak ilerleme hızını ölçmek için üç boyutlu geometrik lineer olmayan sonlu eleman analizi yapılmıştır. Bu yöntemin ard arda uygulanması ile yamalı plakaların yorulma ömrüne güvenilir doğrulukta değer biçilmiştir. Analitik sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında , yorulma ömrü tahminleri ile deneysel sonuçların uyduğu gözlemlenmiştir [17].

T. J. George , J. Seidt , M. H. Shen , T. Nicholas ve C. J. Cross ; yüksek frekanslarda malzemelerin yorulma dayanım sınırını belirlemek için yeni bir test

metodu geliştirmişlerdir. 20 kHz frekansa kadar ayarlanabilen , titreşim esaslı ultrasonic test metodu , yüksek frekanslarda hem tek eksenli hemde çift eksenli eğme gerilmesi değerlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Bu test metodunun kullanımını yorulma dayanım sınırlarının ,  $10^6$  ve  $10^7$  yüksek titreşim durumlarında ölçülmesine imkan sağlamıştır. Plaka şeklindeki çelik numuneler , 6061 –T6 alüminyum numuneler ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımı numuneler hem servo-hidrolik yorulma test makinası hemde ultrasonic test makinası ile yorularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. 6061-T6 alüminyum alaşımı kullanılarak yapılan yorulma testlerinde ; gerilim oranı  $R = -1$ ' de  $10^6$  titreşim sayısına 60 Hz frekansta servo-hidrolik yorulma test makinası ile 4.6 saat' te ulaşılırken , 1600 Hz frekansta ultrasonic test makinası ile 10 dakikada ulaşılmıştır. Çelik plakalar kullanılarak yapılan yorulma testlerinde ; gerilim oranı  $R = -1$ ' de  $10^7$  titreşim sayısına 60 Hz frekansta servo- hidrolik yorulma test makinası ile 46 saat'te ulaşılırken , 1200 Hz frekansta ultrasonic test makinası ile 2 saat 18 dakikada ulaşılmıştır. Ti-6Al-4V titanyum alaşımı kullanılarak yapılan yorulma testlerinde ; gerilim oranı  $R = -1$ ' de  $10^6$  titreşim sayısına 60 Hz frekansta servo- hidrolik yorulma test makinası ile 4.6 saat' te ulaşılırken , 1500 Hz frekansta ultrasonic test makinası ile 11 dakikada ulaşılmıştır. Sonuç olarak ultrasonic yorulma test makinasının , onlarca saat gerektiren yorulma testlerinin sadece birkaç saat içerisinde yapılmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Bu test metodunun , yüksek titreşim yorulmasına maruz kalan malzemelerin özellikle türbin kanatlarının yapımında kullanılan malzemelerin yorulma dayanımının ölçülmesinde kullanılması tavsiye edilmiştir [18].

W. V. Paepegem ve J. Degrieck , fiber takviyeli kompozit malzemelerin yorulma dayanımları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışma esnasında çalışmanın amacına uygun düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test makinası tasarlanmıştır. Deneysel çalışma esnasında kullanılan motorun devir sayısı 185 d/dak dır. Güç , V kayışıyla ikinci bir kasnağa iletilmiştir. Bu esnada kullanılan frekans 2.23 Hz dir. Bu deneysel çalışmada genlik değiştirilebilen ve Şekil 1.1'de görüldüğü gibi ayarlanabilen bir parametredir. Bu mekanizma ile sıfırdan maksimuma doğru , tek yönde veya her iki yönde eğme gerçekleştirilebilmektedir. Burada şekil değiştirme oranı ( $R_d$ ),  $R_d = U_{min}/U_{max}$  olarak tanımlanmakta ve tek yönde yükleme yapıldığı için  $U_{max} = 32.3$  mm ,  $U_{min} = 0$  ve dolayısıyla  $R_d = 0$

olmaktadır. Eğilme yorulması için Şekil 2.1’de gösterilen test düzeneği kullanılmıştır. Daha sonra , hem sayısal bir program paketi ( Matched™) hem de ticari bir sonlu elemanlar paket programı ( SAMCEF™) kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Sonuçta bu çalışmadaki deneysel veriler ve bahsedilen yazılımlardan elde edilen sonuçlar , birçok kompozit yapının yorulma hasarlarını modellemeyi ve geriye kalan rijitliklerini tahmin etmeyi sağlamaktadır [19].



Şekil 2.1 Deney cihazının şematik gösterimi[19].

T. S. Srivatsan , S. Anand , S. Sriram ve V. K. Vasudevan , kimyasal kompozisyonu ; 2.4 % Cu , 2.00 % Mg , 8.20 % Zn , 0.11 % Zr , 0.005 % Mn , 0.003 % Cr olan 7055 alüminyum alaşımının yüksek titreşim yorulması ve kırılma davranışını incelemişlerdir. Test numuneleri 26 mm kalınlığında , hem hadde yönünde hemde hadde yönüne dik olarak kesilerek hazırlanmış plakalar şeklindedir. Deney için hazırlanan numunelerin hem çevre sıcaklığında hemde artan sıcaklıklarda çekme ve yorulma testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ; hadde yönünde ve hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin akma ve maksimum çekme dayanımlarının çevre sıcaklığında yaklaşık olarak aynı değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklığın artışı ile birlikte numunelerin dayanımında marjinal bir azalma saptanmıştır. Sıcaklık artışının kırılma uzamasının da artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Artan gerilme genliklerinde titreşim yorulması ömründe bozulmalar meydana gelmiştir.

Yüksek test sıcaklıklarında ve yüksek titreşim genliklerinde hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin yorulma ömürlerinin hadde yönünde kesilmiş numunelere nazaran kısaldığı tespit edilmiştir [20].

T. S. Srivatsan , D. Kolar ve P. Magnusen , kimyasal kompozisyonu ; 0.036 % Si , 0.0825 % Fe , 4.315 % Cu , 0.578 % Mn , 1.395 % Mg , 0.008 % Zn olan 2524 –T351 alüminyum alaşımının titreşim yorulmasını ve kırılma davranışını incelemişlerdir. Alüminyum test numuneleri hadde yönünde ve hadde yönüne dik kesilerek hazırlanmış plakalar şeklindedir.

Her iki grup test numunesi hem çekme testine hemde yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Kırılma için bütün mekanik testler 100kN'luk yükleme ünitesi ile donatılmış, tam otomatik servo-hidrolik test makinası ile yapılmıştır. Çekme testleri laboratuvar ortamında ; çevre sıcaklığında 27C° 'de , kriyojenik sıcaklıkta -54C° 'de ve artan sıcaklıkta 94C° 'de gerçekleştirilmiştir. Ayarlanabilir gerilme genlikli yüksek titreşimli yorulma restleri; çevre sıcaklığında 27C° 'de , kriyojenik sıcaklıkta -54C° 'de ve artan sıcaklıkta 94C° 'de , gerilim oranı (  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$  ) 0.1' de gerçekleştirilmiştir. Yorulan numunelerin kırılma yüzeyleri , scanning elektron mikroskopunda baskın olan makro kırılma modunu belirlemek ve kırılma yüzeyi üzerindeki değişiklikleri belirlemek için incelenmiştir. Çekme testleri incelendiğinde ; test sıcaklığındaki artışın hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin akma dayanımı üzerinde herhangi bir etki meydana getirmezken , hadde yönünde kesilmiş numunelerin akma dayanımı üzerinde marjinal bir azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Hadde yönünde kesilmiş numunelerin akma dayanımındaki maksimum azalma %9 olarak ölçülmüştür. Test sıcaklığındaki artışın hem hadde yönünde hem de hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin maksimum çekme dayanımını azalttığı tespit edilmiştir. Yorulma testleri incelendiğinde ; gerilme genliğindeki azalmaların hem hadde yönünde hem de hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin yorulma ömürlerini artırdığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık artışının hem hadde yönünde hem de hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin yorulma ömürlerini azalttığı tespit edilmiştir [21].

T. Shih ve Q. Y. Chung , kimyasal kompozisyonu ; 5.6 % Zn , 1.1 % Mg , 0.43 % Mn ve 0.13 % Fe olan ekstrüzyon (extruded) 7005 alüminyum alaşımının yorulma davranışını incelemiştir. Deney numunesi iki farklı gerinim oranında (strain rate) ,  $1.85 \times 10^{-2}$  ve  $1.85 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  'de çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonucunda elde edilen 240 Mpa 'lık akma gerilmesi değeri , döner eğmeli yorulma testi için maksimum gerilme değeri olarak kabul edilmiştir. Döner eğmeli yorulma testleri 180 MPa ve 240 MPa gerilme genliklerinde , 8mm çapında işlenmiş 20' şer adet test numunesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.  $10^7$  titreşim durumunda yorulma dayanımı ve ömür tahminleri incelenmiştir. Kırılan yüzeylerin optik mikroskop fotoğrafları ve scanning elektron mikroskobu fotoğrafları çekilmiş ve yorumlanmıştır.

Düşük gerilme genliğinde , test numunesinin yüzeyine yakın artık taneciklerde çatlamların başladığı gözlemlenmiştir. Çatlağın maksimum kesme gerilmesi yönünde boyuna yayıldığı görülmüştür. Tane sayısındaki artışın çatlak yayılma oranını artırdığı ve kırılma için gerekli çevrim sayısını azalttığı tespit edilmiştir. Döner eğme gerilmeli yorulma testinde gerilme genliğinin azalmasının dislokasyonların oluşum zamanını artırdığı gözlemlenmiştir. Yüksek gerilme genliği seviyesinde çatlak başlangıcının , numunenin yüzeyine yakın ikinci faz taneciklerinde başladığı tespit edilmiştir [22].

Bizim tez çalışmamızın hedefi , alüminyum alaşımlarından yapılmış rüzgar türbin ve aksel fan kanatlarındaki eğilme yorulmasından dolayı oluşan hasarı basite indirgeyerek incelemeye yöneliktir. Bu elemanlardaki yükleme ve gerilme şekline benzer bir yorulma yapabilmek için çalışmanın amacına uygun olarak düzlemsel eğme gerilmeli yorulma cihazı tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Yüksek frekanslı genlik ayarlı yorulma test makinasında ; 10 mm, 8 mm, 6.4 mm, 5.12 mm , 4 mm , 3.2 mm , 2.5 mm , 2 mm , 1.6 mm ve 1.3 mm genlik durumlarında 1100-H14 alüminyum levhasından , hem hadde yönünde kesilmiş numunelerin hemde hadde yönüne dik kesilmiş numunelerin yorulma testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre S – N diyagramları (Wöhler eğrileri ) elde edilmiştir.

Hasar kriteri ve yorulma ömür sınırı olarak , ortalama  $N = 10^7$  çevrimine karşılık gelen eğilme gerilmesi alınmıştır. Sonuçlar kıyaslamalı olarak yorumlanmıştır. Deney verilerinin güvenilir olup olmadıkları Weibull İstatistik dağılımı kullanılarak değerlendirilmiştir.



### 3. KONUNUN TEORİK İNCELENMESİ

Bu bölümde alüminyum alaşımları ve yorulma olayı üzerine yapılan araştırmalar sonucu elde edilen bilgiler aktarılmıştır.

#### 3.1 Alüminyum

Günümüzde çelikten sonra en çok tüketilen metalik malzeme alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyum diğer metaller ile birleşmiş olarak yer kabuğunun % 8 'ini oluşturmaktadır. Hafif bir metal oluşuyla tanınır ve bu yüzden hafif metaller sınıfına dahil bir elementtir. Saf alüminyum gayet yumuşak ve demirden yaklaşık üç kat daha hafiftir. Diğer metallerin çok az katılmasıyla alaşımlandırıldığında , yoğunluğunun az artmasına karşılık , mekanik dayanımında önemli oranlarda artışlar meydana gelmektedir [1,2,23].

Alüminyumun çekici özelliklerinin başında ; oksidasyonunun diğer metallere göre en kolay olmasına karşılık , pek çok ortamda kararlılığının bozulmadan kullanılması gelir. Kuru oksijenli ortamlarda alüminyum yüzeyinde , 2.5 ile 3 nanometre kalınlığında , sık ve koruyucu bir oksit tabakası meydana gelir. Ortamdaki nem oranı arttıkça bu tabakanın kalınlığı da artmakta ve neme doymuş ortamlarda iki katına kadar çıkabilmektedir. Saydam görünümlü oksit tabakası sayesinde , alt kısımlarda kalan alüminyum özellikleri korunabilmektedir. Dolayısıyla da ana metal korozyon nedeniyle aşınmamaktadır. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi  $2.7 \text{ g/cm}^3$  olan yoğunluğu , hafif bir metal olmasını sağlamaktadır. Ergime sıcaklığının  $660 \text{ C}^\circ$  olması dökülerek işlenmesini kolaylaştırmanın yanında , yüksek sıcaklıklarda kullanılmasını engellemektedir. En önemli özelliklerinden biri olan elektrik iletkenliği , bakırın yaklaşık % 65 'i kadardır. Bu özelliklerinin yanı sıra , dekoratiflik , soğuk ve sıcak işlenebilme gibi karakteristikleri ile her nevi

döküm işlemine uygun olması ve kaynakla birleştirilebilme gibi özelliklere sahip bulunmaktadır [1, 23].

Tablo 3.1 Alüminyum elementinin özellikleri[1]

Kimyasal Simgesi	Al
Öz Kütlesi ( Yoğunluğu )	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26.98 g/atom
Ergime Derecesi	660 C°
Rengi	Parlak gümüşü

### 3.1.1 Alüminyum Bileşimleri

Kimya ve seramik alanında kullanılan birçok alüminyum bileşimi vardır. Bu bileşimlerden alümina , alüminyum metali üretiminde kullanılan basit bir oksittir. Alümina sentetik yollarla üretilen zımparalarda aşındırıcı olarak kullanılır. Ayrıca porselen , refraktör tuğla ve seramik yapımında kullanılan kil 'in temel bileşimini oluşturur [1].

Hidrata alümina (  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  ); katalizör olarak kullanılır. Cam ve emaye yapımında dayanım artırıcı olarak görev görür. Alüminyum hidroksit ; suda çözünmeyen beyaz ince toz halindedir. Boya yapımında , tekstil ve kağıt kaplamada ıslanmayı önlemek için kullanılır. Alüminyum sülfat ; kağıt , deri ve tekstil endüstrisinde önemli malzemelerden biridir [1].

### 3.1.2 Alüminyum Alaşımaları

Alüminyum alaşımları ; plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilmiş dövme alüminyum alaşımları , ergitme ve katılaştırma işlemleri ile şekillendirilmiş döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki grupta sınıflandırılır [2, 23]. ALCAO (Aluminum Company of America) , içerdikleri alaşım elementlerine göre dövme alüminyum alaşımlarını Tablo 3.2’de belirttiği gibi gruplandırmıştır.

Tablo 3.2 Dövülebilir alüminyum alaşım grupları [2, 23]

<b>Ana alaşım elementi</b>	<b>Alaşım sayısı</b>
Minimum % 99 Al	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Magnezyum +Silisyum	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer elementler( Lityum dahil)	8XXX
Kullanılmayan seri	9XXX

Tablo 3.2 ‘de gruplandırılmış dövülebilir alüminyum alaşımlarını tanımlamak için dört rakamlı bir işaret kullanılır. İlk rakam belirli alaşım elementlerini içeren alaşım grubunu belirtir. Son iki rakam alüminyum alaşımını tanımlar veya alüminyumun saflığını belirtir. İkinci rakam başlangıçtaki alaşım üzerinde yapılan değişiklikleri veya katışkı sınırlarını belirtir [2, 23].

Dövülebilir alüminyum alaşımları için menevişleme işaretleri bir uzatma işareti ile ayrılmıştır. (örneğin , 1100-0 ) . Ana menevişleme işleminin alt grubu , harflerle belirtilen ana menevişlemeyi izleyen ek bir rakam daha alır. (örneğin , 1100-H14 ). Ana menevişleme işaretleri Tablo 3.3 ‘te belirtilmiştir [23].

Tablo 3.3 Ana menevişleme işaretleri [23]

<b>F</b>	Üretildiği gibi. Deformasyon sertleşmesinin miktarı üzerinde bir denetim yok , mekanik özellikler sınırı yok
<b>O</b>	Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş. En düşük dayanım ve en yüksek süneklilik için menevişlenmiş.
<b>H</b>	Deformasyon sertleştirilmesi yapılmış.
<b>T</b>	F veya O ' dan başka kararlı menevişler için ısı işlem görmüş

Döküm alüminyum alaşımları ANSI'ye (American National Standards Institute) göre Tablo 3.4 'te belirtildiği gibi gruplandırılmıştır [2,23]. Alaşım elementlerine göre son iki rakamı arasına bir nokta konan dört rakamla tanımlanmaktadır.

Tablo 3.4 Döküm alüminyum alaşımları[2,23 ]

<b>Ana alaşım elementi</b>	<b>Alaşım sayısı</b>
Minimum % 99 Al	1XX.0
Bakır	2XX.0
Silisyum , bakır ve magnezyum	3XX.0
Silisyum	4XX.0
Magnezyum	5XX.0
Kullanılmayan seri	6XX.0
Çinko	7XX.0
Kalay	8XX.0
Diğer elementler	9XX.0

Alüminyumun ; silisyum ve magnezyum gibi elementler ile yaptığı alaşımlar , uygulamada en çok kullanılanlardır. Alüminyumun bu elementler ile yaptığı alaşımlar , mekanik özelliklerini iyileştirilmesi açısından önem taşır [1,2].

Alüminyum – bakır alaşımları ; duralüminyum olarak adlandırılan alaşımlar bu grup içerisinde değerlendirilir. % 2-6 oranında bakır içeren bu alaşım en yaygın

kullanılan alüminyum alaşımıdır. Korozyona karşı direnci , diğer alaşım gruplarına göre düşüktür. Kaynak kabiliyeti ise sınırlıdır. (örneğin, Al 2024 , Al 2025)[1,2].

Alüminyum – silisyum – magnezyum alaşımları ; iç yapısında % 1.3 ‘e kadar silisyum ( Si ) ve magnezyum (Mg) eşit olarak bulunur. Az miktarda bakır (Cu) , krom ( Cr) yada kurşun (Pb) yaşlandırma durumunda korozyon direncini ve dayanımını artırmak amacıyla ilave edilir. Vida , makine parçaları , mobilya ve köprü taşıma elemanları üretiminde kullanılır. (örneğin, Al 6061 , Al 6063) [1].

Alüminyum-magnezyum-çinko alaşımları ; iç yapılarında % 1-7.5 çinko ve 3.3 magnezyum vardır. Krom (Cr) ve bakır (Cu) dayanımını artırmak amacıyla alaşıma ilave edilir. Bu son eklemeler kaynak yeteneğini olumsuz yönde etkiler . En yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları bu grup içerisinde ele alınırlar. Yapısal malzeme olarak uçak yapımında kullanılırlar. (örneğin, Al 7055, Al 7075 ) [1,23].

Alüminyum – magnezyum alaşımları ; döküm alaşımı olarak tanınırlar ve korozyon dirençlerinin yüksekliği otomotiv ve uçak üretiminde kullanılmalarına olanak sağlar. İç yapılarında % 10 ‘ a kadar magnezyum (Mg) vardır. (örneğin, Al 332.0 , Al 512.0 ) [1, 23].

Alüminyum - silisyum alaşımları ; tuzlu ortamlarda oluşan korozyona karşı yüksek dayanımları nedeniyle deniz ulaşımında kullanılan taşıtların yapımında kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Bilinen en yaygın kullanılan döküm alaşımlarıdır. (örneğin, Al 413.0 , Al 443.0) [1,23].

Alüminyum – kalay alaşımları ; alaşımın oluşumunda kullanılan kalay (Sn) miktarı %20 – 30 ‘dur. Yüksek yük taşıma yetenekleri , yorulma dirençlerinin fazlalığından kaynaklanır. Otomotiv sektöründe bağlama elemanı ve ambalaj sektöründe konserve kutusu olarak kullanılır. (örneğin, Al 821.0 , Al 832.0) [1, 23].

### 3.1.3 Alüminyum Üretimi

Alüminyum üretiminin ana ham maddesi alüminadır. Alümina üretimi için gerekli olan ham madde ise boksittir. Alüminyumun ticari evsafındaki bir filizi olan boksit bir mineral cinsi olmayıp , içerisinde alüminyum hidroksitleri bileşen olarak bulunduran bir kayadır. Boksit, kimyasal karışım ve fiziksel görünüm bakımından en çok değişkenlik gösteren ham maddedir. Boksit maden yataklarında değişik renklerde görülebilir. Bunlar ; beyaz , gri , pembe , kahverengi , sarı , ten rengi , yeşil ve siyaha yakın renklere sahiptir. Öz kütlesi 1.3 ile 1.9 arasında değişmekte ve bazen 3.7 kadar yoğun olabilmektedir. Bu değişiklikler , boksitin gözeneklerinin çokluğu yada azlığı ile içinde bulunan demirli minerallerin miktarından ileri gelmektedir. Boksitin kimyasal özellikleri ve karışımı , üretilmesi açısından karar verici esas faktör olmaktadır. En önemli bileşenleri alüminyum oksit ve silikadır [1,2, 23].

Boksitten alümina üretimi için , öncelikle öğütülmesi , ardından kimyasal reaksiyona sokulması gerekir. Kimyasal reaksiyon sonucunda , sodyum alümina boksitten ayrılmış ve bir çözelti haline gelmiş olur. Bu çözelti hidroliz edilerek hidrat elde edilir. Daha sonra da yıkanmış hidrat döner fırınlarda ısıtılmak suretiyle fiziksel ve kimyasal suyu uçurulur ve alümina üretilmiş olur. Boksitten elde edilen alüminanın (  $Al_2O_3$  ) % 90 'dan fazlası alüminyum metali üretiminde , geri kalan kısmı da aşındırıcı , refraktör ve kimyasal maddeler yapımında kullanılmaktadır [1,2, 23].

### 3.1.4 Alüminyum Birincil Ürünleri

Alüminyum üretim fabrikalarında üretilen sıvı alüminyum , birçok işleme tabi tutularak alüminyum birincil ürünleri yada nihai olarak kullanılmaya hazır bir ürün haline getirilir [2].

Alüminyum birincil ürünleri üretim kademelerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir :

a) Döküm ingotu : Ticari arı, EC Grade yada alaşımlı külçe ve T ingotlarıdır. Ağırlıkları 2 kg ile 1000 kg arasında değişir.

b) İşleme ingotu : Genel olarak yuvarlak ve yassı ingot olarak iki ana gruba ayrılır. Yuvarlak ingot , çekme ürünleri üretiminde kullanılır. Bu ingotlar 80 – 240 mm çaplarında ve çeşitli boylarda üretilmektedir. Ağırlıkları 300 kg kadar olabilmektedir. Yassı ingotlar ise hadde ürünleri üretiminde kullanılır. Dikdörtgen prizmalar biçiminde ve ağırlıkları 2500 kg ile 10000 kg arasında değişmektedir.

c) Sürekli döküm çubuk : Filmaşın

d) Sürekli döküm levha

e) Platina : En fazla 400 mm kalınlığa kadar olan plakalardır.

f) Granüle alüminyum : 3-20 mm çapındaki taneciklerdir. Çelik endüstrisinde deoksidant olarak kullanılmaktadır [1,2].

g) Toz alüminyum : Boya endüstrisinde kullanılmaktadır.

### **3.1.4.1 Alüminyum Hadde Ürünleri**

Alüminyum hadde ürünleri iki grupta sınıflandırılır.

a) Levha : Sıcak haddelenmiş , kalınlıkları 6 mm ve daha üstü ölçülerde üretilir. Soğuk haddelenmiş olanları ise 0.2 mm ve daha üstü kalınlıklarda üretilir.

b) Folyo : Kalınlığı 7 – 200 mikron arasındadır. Folyo ürünleri ; kaplama , boyama , gofraj oluklandırma , disk halinde kesme , laminasyon , aklama , boyama , baskı gibi işlemlere tabi tutulmaktadır[2].

### **3.1.4.2 Alüminyum Ekstrüzyon Ürünleri**

Alüminyumun , plastik şekil değiştirme özelliğinden yararlanılarak yarı mamüllerine yüksek basınç uygulanma suretiyle belirli bir açıklıktan geçirilmesi ile elde edilir. Örnek olarak ; her kesitteki içi dolu profil , içi dolu çubuk filmaşın ve yine her kesitte , içi boş profiller ve borular gösterilebilir[2].

### **3.1.4.3 Alüminyum İletken Teller**

İletken , elektrik enerjisini iletmeye yarayan bir yada birden fazla telden meydana gelen ve yalıtılmamış olan tel yada tel demetidir. Yüksek elektrik iletkenliği , hafifliği , sınırsız ömrü , mekanik dayanımı ve ekonomikliğı dolayısıyla çelik özlü yada sade alüminyum iletkenler enerji iletimi ve dağıtımında vazgeçilmez bir malzemedir. İki tür alüminyum iletken bulunmaktadır. Çelik özlü alüminyum iletken ; genellikle tel yada örgülü çelik tel üzerine ve bunun eksenine etrafına helisel olarak bir yada bir çok tabaka halinde alüminyum tellerin sarılmasıyla elde edilen tel grubudur. Sade alüminyum iletken ise aynı anma çapındaki alüminyum tellerin bunlardan birisinin üzerine ve bunun eksenine etrafına helisel şekilde bir ya da birkaç tabaka halinde sarılmasıyla elde edilen tel grubudur [2].

### **3.1.4.4 Alüminyum Parça Dökümler**

Alüminyum parça döküm ürünlerini üç grupta sınıflandırabiliriz.

a) Kum döküm ürünleri : Model kullanmak suretiyle yapılan maçalı yada maçasız kum kalıplama , gerekli şekillerdeki sıvı alüminyum dökülüp , soğutulmasıyla elde edilir. Temizlendikten sonra , gerektiğinde mekanik ve ısıl işleme tabi tutulur.



b) Kokil döküm ürünleri : Mekanik işlemler ile üretilmiş , pik yada çelik kalıplarda , kum yada çelik maçalar kullanılmak suretiyle , gerekli şekillerdeki sıvı alüminyumun dökülüp soğutulması ile elde edilir.

c) Basınçlı döküm : Sıcak iş takım çeliklerinden üretilen kalıplarda , ayrı malzemeden maça kullanılmak suretiyle , gerekli şekillerdeki sıvı alüminyumun yüksek basınç ve hızla kalıp boşluğunda dondurulması ile elde edilir. Parçalar temizlendikten sonra gerektiğinde ısıl ve mekanik işlem uygulanır [1,2].

### 3.1.5 Alüminyumun Kullanım Alanları

Özellikleri kısmında açıklandığı üzere, birçok üstünlüğe sahip olan alüminyum ve alaşımları, üretim sektörünün hemen hemen her dalında, kullanılmaktadır. Özellikle çelik ve bakır yerine alüminyum ve alaşımlarının kullanılmasıyla (makine üretim endüstrisinde, çeşitli konstrüksiyonlarda ve taşıt araçları üretiminde), ağırlıkların önemli ölçüde azaltılmasını sağlamıştır. Bu yüzden alüminyum ve alaşımları, otomotivden inşaat sektörüne kadar endüstrinin çeşitli dallarında uygulama alanı bulmuş ve bu endüstrilerin vazgeçilmez bir temel girdisi durumuna gelmiştir [1,2].

1991 Yılında Avrupa'da yapılan araştırmada, sektörel bazda alüminyumun kullanıldığı alanlar şu şekilde tespit edilmiştir:

- |                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| . İnşaat %27               | . Ulaşım %24           |
| . Ambalaj %15              | . Elektrik %10         |
| . Genel mühendislik %9     | . Metalurji %3         |
| . Kimya ,tarım ilaçları %1 | . Mobilya ev eşyası %6 |
| . Diğer sektörler %7       |                        |

Burada görüleceği üzere tüketim alanlarının başında ilk üç sırayı inşaat, ulaşım ve ambalaj sanayi almaktadır. Gerçekte de dünya alüminyum üretiminin

büyük çoğunluğu bu sektörler tarafından kullanılmaktadır. Bunun nedenlerinin başında, alüminyumun uygulamada kullanılan metaller içinde en hafif ve en çok korozyona dayanan metal olması gelmektedir [1,2].

Eloksal kaplama olarak adlandırılan anodik oksidasyon ile çeşitli renklerde üretilen alüminyum , inşaat sektöründe değişik uygulama alanları bulunmaktadır. Pencere ve kapı yapımı ile dış cephe kaplamaları buna en güzel örnekleri oluşturur.

Günümüzde üretilen 1 ton alüminyumun, 250 kilogramı ulaşım sektöründe ya otomobil ya uçak ya da hızlı tren yapımında kullanılır. Alüminyumun sağladığı hafiflik, ulaşım sektörünün hızlı olması gereken taşıtlarına önemli bir kolaylık sağlar. Bir otomobilde ortalama olarak 80 kg oranında alüminyum kullanımı söz konusudur. Aynı işlevi görecekt çelik ve alaşımlarından birinin yerine kullanılan bu miktardaki alüminyum, üretilen otomobilin toplam ağırlığından 160 kg tasarruf yapılmasına olanak tanır. Bu da otomobilin kullanım süresince 2400 litrelik yakıt tasarrufu oluşması demektir. Diğer bir ulaşım aracı olan uçak yapımında kullanılan alüminyum miktarı daha da yüksek oranlarda olmaktadır. Ortalama bir uçağın yapımında kullanılan metallerin %70'ini alüminyum ve alaşımları oluşturur. Yüksek oranda hız yeteneğine sahip günümüz trenleri de ana malzeme olarak alüminyum ve alaşımlarından yapılır [1,2].

Avrupa tüketiminde %15 ile üçüncü sırada saydığımız ambalaj sanayi, alüminyum ve alaşımlarının en çok kullanıldığı sektörlerden biridir. Alüminyumun özellikle ince folyo olarak üretilmesi ve folyonun hava ile teması önlemesi, ambalaj sanayiinde kullanımını artırır. Bunun yanında, mor ötesi ışınların ulaşımını da engellemesi açısından, gıda maddelerinin uzun süreler bu tür ambalajlar içinde saklanmasına olanak tanımaktadır. Diğer yandan, ilaç kutuları, içecek kutuları, dış macunu kapları ilk başta sıralanabilecek örnekler içerisindedir [1,2].

### 3.2 Yorulma

Hareketli parçaların , içten ve dıştan yanmalı motorların gelişimi ile birlikte yaygın olarak kullanılması tekrarlı ,sabit ve değişken yüklere maruz kalması sonucu kalıcı hasarlara uğradığı bir gerçektir. Malzemelerin yorulma kırılmasına uğrama limitini ( yorulma dayanımını ) artırmak için değişik deney ve çalışmalar yapılmaktadır. Yorulma hasarını veya yorulma ömrünü artırmak için uygulanmakta olan değişik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları malzemenin iç yapısında değişiklik meydana getiren ısı işlemlerden , normalizasyon , yüzey sertleştirme , komple sertleştirme ve ostemperleme gibi ısı işlemlerdir. Diğer yöntemler ise malzeme yüzeyinde kalıcı (artık ) gerilme oluşturan bilyeli dövme ve yüzey ezme (haddeleme) gibi plastik deformasyon işlemleridir [3,24].

Kırılmanın görüldüğü parçaların görevlerini belirli bir süre yerine getirdiği düşünülerek , tekrarlı olarak uygulanan yüklere karşı malzemenin dayanım gücünün azaldığı , ve bunun sonucu olarak da yorulduğu fikri ilk defa 1840 ve 1850 ‘li yıllarda ortaya atılmıştır. Yorulma ile ilgili ilk sistematik çalışmalar Almanya’da 1850-1860 yılları arasında “Agust Wöhler” tarafından yapılmıştır [24,25]. Demir yolu vagonlarının aksları üzerinde yapılan bu sistematik çalışmalarda Wöhler , kendi geliştirdiği yorulma deneyi cihazını kullanmıştır. Metal malzemeler üzerinde yapılan deneylerde , uygulanan yüklerin büyüklüğü üzerinde durulmuştur. Deney sonuçlarından yararlanılarak yorulma olayında uygulanan maksimum gerilmeden ziyade gerilme aralığının (  $\sigma_{max}$  ve  $\sigma_{min}$  arasındaki fark) önemli olduğu sonucuna varılmıştır. İlk defa Wöhler tarafından gerilme – çevrim sayısı (S-N) diyagramları kullanılarak belirli bir gerilme değerinin altındaki değerlerde numunelerin kırılmadığı gösterilmiştir. 1850 ve 1865 yılları arasında “Hodgkinson ve Fairbairn” tarafından kiriş sistemleri üzerinde tekrarlı eğme deneyleri yapılmıştır. Statik yükleme durumunda 120 KN altında kırılma meydana gelirken , tekrarlı yükleme halinde 30 KN ‘luk yük kırılmaya yeterli olmuştur. 1870 ve 1890 ‘lı yıllarda yapılan Wöhlerin klasik çalışmaları genişletilerek değişik araştırmacılar tarafından sürdürülmüştür. 1900 ‘lü yıllarda yorulma mekanizmasının anlaşılmasında optik mikroskop kullanılmıştır. Mikro çatlakların meydana gelmesinden lokalize kayma doğrultuları ve kayma bantlarının önemli olduğu gözlenmiştir [24,25].

### 3.2.1 Yorulma Analizi

Yorulma kelimesi genel olarak malzemelerin statik gerilme ve uzamalar altındaki davranışlarından farklı olarak , değişken gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu durumlarda gösterdiği davranışlarını belirtmek üzere kullanılmaktadır. “Bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen , yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmasına sebep olan lokalize sürekli gelişen kalıcı yapı değişikliği olayıdır.” [3]. Tanımlamada üzerinde durulan dört faktör vardır.

- Süreklilik
- Lokalize olması
- Çatlakların büyümesi
- Kırılma

Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar [25].

Yorulma kırılması gevrek türde olduğundan nerede ve ne zaman olacağını önceden kestirmek zordur. Yorulma kopmaları, yapı parçası içerisindeki hesaplanan gerilmeler elastik bölgede (Hooke Eğrisi) bulunmasına rağmen, meydana gelir. Ancak bu olay genellikle düzensiz bir gerilme dağılımı söz konusu olduğu durumlarda ortaya çıkar. Yorulma kopmasına uğrayan parçalara örnek olarak miller, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli parçaları gösterebiliriz. Makinalardaki hasarların yaklaşık yüzde sekseninin yorulma kopmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir [3,25].

### 3.2.2 Yorulma Kırılmasını Etkileyen Faktörler

Yapısal parçaların yorulma performansını pek çok parametre etkiler. Bunlar, gerilme (yük), parçanın geometrisi ve özellikleri ve dış çevreyle ilgili

parametrelerdir. Gerilme parametreleri; gerilmenin durumu, gerilme genliği, gerilme oranı, sabit veya değişken yükleme frekansı ve maksimum gerilmeyi içerir. Parçanın geometrisi ve özellikleri; gerilim arttırıcılar, boyut, gerilim eğimi , esas metal , kaynakların metalürjik ve mekanik özelliklerini kapsar. Dış çevre parametreleri ise sıcaklık ve saldırgan çevreyi içerir [3].

### **3.2.2.1 Yüzey Durumu**

Yorulma kopmalarının çoğu metal yüzeyinde başladığından, yüzey durumundaki her değişiklik metalin yorulma ömrünü de etkileyecektir [25]. Yüzeydeki pürüzler çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır.Yüzey işleme kalitesi azaldıkça yorulma mukavemeti de azalır. Bunlar, parlatılmış, taşlanmış, talaş kaldırılmış, sıcak haddelenmiş ve dövme yüzeylerdir [26]. Parçanın kendinde olan basınçlı iç gerilmeler, örneğin haddeme sırasında soğuk şekil vermede, çekmede veya kum püskürtme ile oluşan iç gerilmeler, yorulma mukavemetini ve aynı zamanda yüzey tabakasının sertliğini arttırırlar [26]. Örneğin, çeliklere uygulanan karbürleme veya nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri yorulma ömrünü arttırmaktadır. Öte yandan, çelik yüzeyini yumuşatan karbon giderme ısıl işlemi yorulma ömrünü düşürmektedir. Metal yüzeyinde artık basma gerilmesi yaratan bir uygulama yorulma ömrünü arttırmaktadır [25].

### **3.2.2.2 Sıcaklık**

Sıcaklık genellikle mukavemetleri azaltıcı yönde etkilediğinden yorulma mukavemetinin de azalması doğaldır [25]. Yaklaşık 200°C'a kadar sıcaklığın bir etkisi yoktur; ancak daha yükselirse yorulma mukavemeti azalır. Cr Ni Mo-çelikleri 400°C'a kadar değişmezler. Metastabil iç yapıya sahip alaşımlar yüksek sıcaklıkta ayrışma yolu ile iç yapı değişimine uğrarlar. Bu ayrışma olayı yorulma mukavemetine etki eder [26].

### 3.2.2.3 Çevre

Değişken gerilme altında çevrenin kimyasal etkisi daha şiddetli olur, dolayısıyla yorulma ömrü kısalır [24]. Saldırgan ortamın yorulma ömrüne etkisi genellikle çok barizdir. Yorulma çatlakları, saldırgan olmayan bir ortaminkine göre daha az sayıda tekrar sonucu oluşur [27].

Özellikle asma köprülerde çelik kablo ile bağlantı kelepçelerinin temas yüzeylerinde bu tür korozyon oluşur, bu da köprü ömrünü etkileyen en önemli olaydır [24].

Vakumda yapılan deneylerde, numuneler normal yorulma deneyine göre daha fazla yük tekrarına dayanırlar. Korozyon etkisi yaratan gazların çok küçük miktarları bile sonucu kuvvetli bir şekilde etkiler. Sulu çözeltilerde yapılan yorulma deneylerinde Wöhler eğrisinin daha aşağıda yer aldığı ve  $10^9$  yük tekrarından sonra bile düşmeye devam ettiği görülmüştür [26].

### 3.2.2.4 Frekans

Normal koşullarda frekansın yorulma mukavemetine etkisi önemsizdir. Hidrolik yorulma makineleri 50 Hz'i geçmediği halde elektromıknatıslarla kuvvet uygulayan makinelerde bu değer 400 Hz'e kadar çıkartılabilmektedir. Çok yüksek frekanslarda plastik şekil değiştirme için daha az zaman kaldığından genellikle yorulma mukavemeti yaklaşık %10 kadar artar [25]. Metallerde  $10^4$  yük tekrarı/dakika'ya kadar ısınma meydana gelmez; bu nedenle bu bölgede frekansın bir etkisi yoktur. Plastik maddelerde 10 Hz civarında bile ısınma meydana gelir ve böylece yumuşar; yani mukavemet değerleri düşer [26]. Diğer taraftan saldırgan ortam içinde yorulma dayanımı frekansa kuvvetle bağlıdır. Korozyonlu yorulma dayanımı frekans azaldıkça azalır. Düşük frekanslarda ve özellikle düşük şekil değiştirme genliklerinde, malzemeyle çevresi arasındaki etkileşim için yeterli zaman mevcuttur. Buna karşılık yüksek frekanslarda ve özellikle yüksek şekil değiştirme

genliklerinde bu mümkün olmaz. Bu etki özellikle 10 Hz'ten küçük frekans değerlerinde çok barizdir [27].

### 3.2.2.5 Gerilme Koşulları

Yapı elemanlarına kendi ağırlığından dolayı bir ön statik yük etkir ve elemanın taşıyacağı tekrarlı yük buna eklenir. Kendi ağırlığından doğan statik yükün oluşturduğu  $\sigma_{or}$  ortalama gerilmesine ek olarak servis yükünden doğan bir  $\sigma_a$  değişken gerilme genliği etkir [25]. Toplam gerilme ;

$$\sigma_m = \sigma_{or} + \sigma_a \quad (3.1)$$

$\sigma_m$  : Toplam gerilme (MPa) ,

$\sigma_{or}$  : Ortalama gerilme (MPa) ,

$\sigma_a$  : Değişken gerilme genliği (MPa)

Bu tip yükleme genellikle sabit durumda dönme periyodu süresince şaftlar ve rodler gibi makine parçalarında meydana gelir. Çoğu karmaşık değişken yük, çeşitli genlikte rasgele düzendedir. Bu tip yükleme gemiler, uçaklar, köprüler ve toprak işleri makinasını içeren çoğu yapılarda görülür [3,24].

Mühendislik elemanlarındaki artık gerilmelerin varlığı, yorulmalarına ve kırılma davranışlarına önemli şekilde etkide bulunabilir. Üretimden veya yüzey özelliklerinden ve ısıl işlemlerden meydana gelen artık gerilmeler, dışarıdan uygulanan gerilmelerin üzerine bindiğinde yorulma devri ve hasar görme süresinin seviyesi konusunda genellikle etkili olur. Artık gerilmeler, çekme gerilmesi varsa zararlı, basma gerilmesi varsa yararlı olarak bilinir [28].

### 3.2.3 Yorulma Çatlaklarının Özellikleri

Yorulma çatlakları genel olarak dört aşamada meydana gelir.

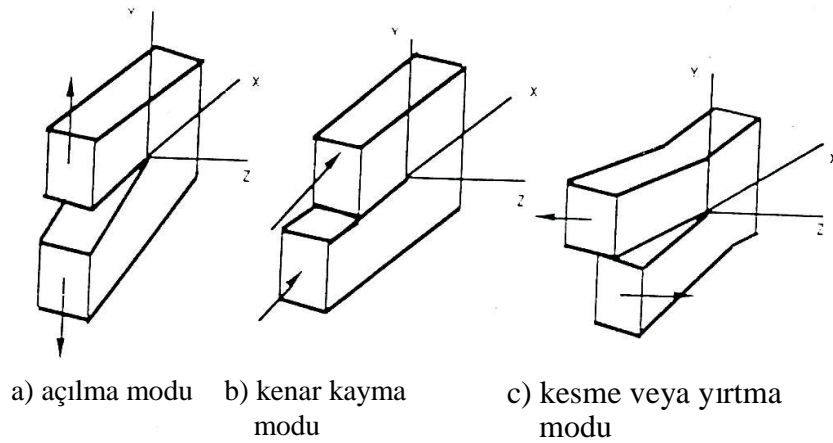
a) Çatlağın çekirdeklenmesi : Yorulma hasarı işlemi, çatlak başlangıçları için çekirdeklenme alanları gibi rol oynayan test malzemesi içinde en zayıf bağlantıları (süreksizlikleri) kullanır [27].

b) Çatlağın yerel kayma bandında ilerlemesi : Çatlak, kayma gerilmelerinin yüksek olduğu ve çekme doğrultusuyla 45° lik açı doğrultusunda ilerlemesi.

c) Çatlağın  $\sigma_{\text{çmax}}$ 'nin (maksimum çekme gerilmesi) etki ettiği düzlemde ilerlemesi.

d) Çatlak uzunluğunun kritik bir değere ulaşmasıyla kalan kesitin kırılması [27].

Çatlak ilerlemesinde üç temel mod mevcuttur. (a) açılma modu , (b) kenar kayma modu , (c) Kesme veya yırtma modu (Şekil 3.1) [29].



Şekil 3.1 Çatlak ilerleme mod 'ları [29].



Gözlemler yorulma çatlak ilerleme hızının çatlak derinliğinin karesi ile arttığını göstermektedir. Çatlak ilerleme hızlarının hesaplanabileceği çeşitli denklemler geliştirilmiştir. Bu denklemlerden birisi Paris–Erdoğan denklemidir[29].

$$da / dN = C. (\Delta K)^m \quad (3.2)$$

da / dN : çatlak ilerleme hızı (m/saykıl),

K : gerilim şiddeti faktörü (MN /m<sup>-3/2</sup>),

C ve m : deneysel sabitlerdir

da : çatlak boyu (m) ,

dN : belirli bir gerilim altında malzeme kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki tekrar sayısı (saykıl),

m : çelikler için 3 , alüminyum alaşımlar için 3 veya 4 tür [29].

Bazı hallerde ise yorulma çatlakları kesitin tam olarak ayrılması ile sonuçlanmaz. Çatlak oluşması ile parça daha az zorlanır ve dolayısıyla gerilmenin üst sınırı malzemenin yorulma dayanımı değerinin altında kalırsa veya çatlak çevresinde gerilme durumunun değişmesi ile yerel bir malzeme pekleşmesi oluşursa çatlak ilerlemesi durabilir [3].

### 3.2.4 Yorulma Kırıklarının Görünümü

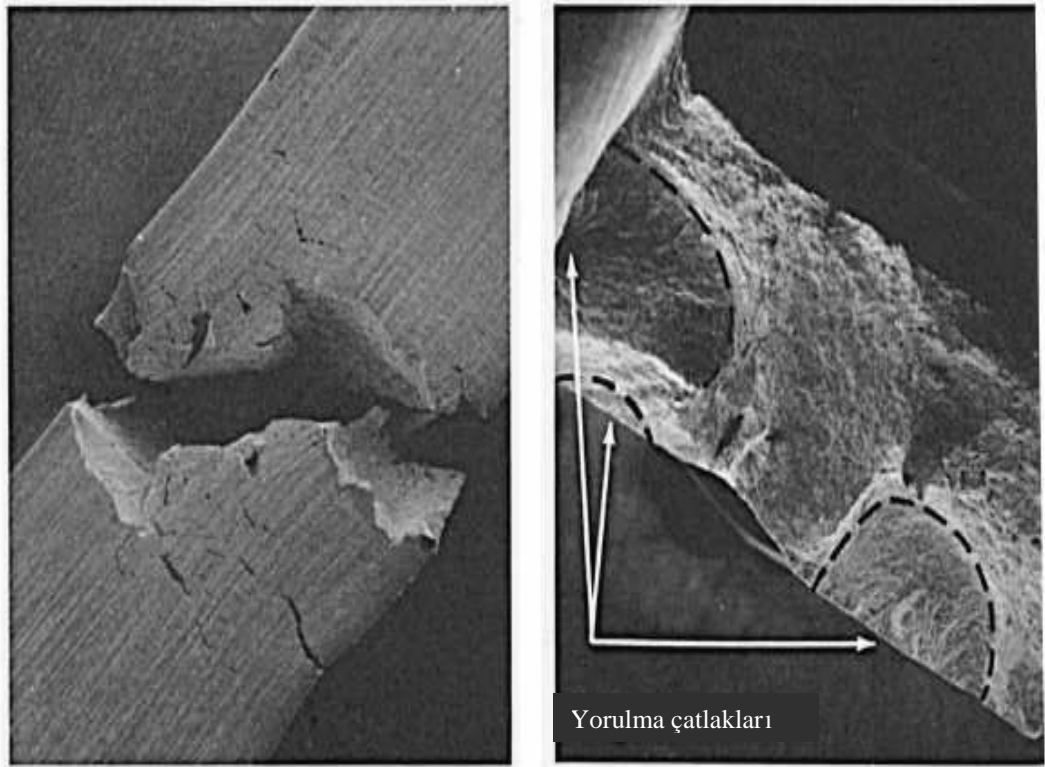
Yorularak hasara uğramış elemanların kırılma yüzeyleri yorulmaya has üç ayrı bölgeye sahiptir.

- Yorulma çatlaklarının çekirdeklendiği bölge.
- Yorulma çatlaklarının ilerlemesi sonucu oluşan bölge.
- Zoraki kırılma bölgesi [27].

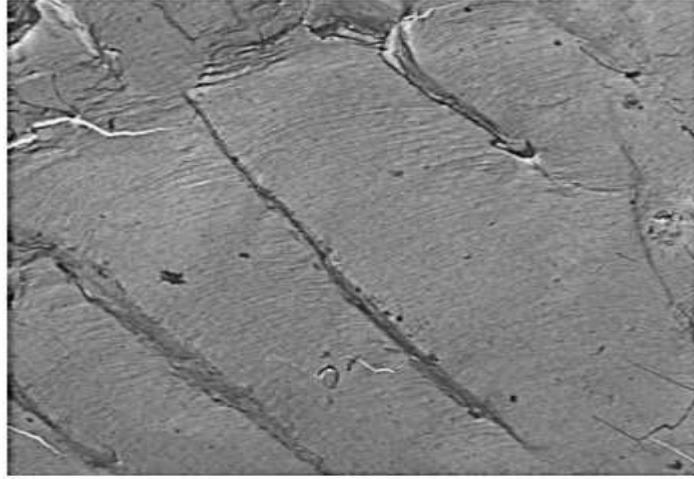
Çoğu yapısal parçalarda yorulma çatlakları, gerilim arttırıcılardan başlar ve yayılırlar. Kaynaklanmamış parçalardaki gerilim arttırıcılar, ya yüzey kusurları ya da geometrik değişikliklerdir(Şekil 3.2). Kaynaklı parçalardaki gerilim arttırıcılar, gaz

boşlukları gibi gömülmüş kusurlar, hapsolmuş curuf ve kaynaşma eksikliği, kaynak bitişleri ve kaynak çıkıntıları ya da geometrik değişikliklerdir [27].

Yorulma çatlağının ilerlemesi sonucu oluşan bölge, makroskopik olarak düz ve pürüzsüzdür. Çatlak zamanla yavaş ilerlerken karşılıklı yüzeylerin sürekli birbirine sürtünmesi sonucu yorulma kırılması yüzeyi parlak görünür[3]. Zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin değişimi nedeniyle, ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer *duraklama çizgileri* bulunabilir. (Şekil 3.3 , 3.4 ) Genellikle bu çizgiler alüminyumda çelikten daha çok belirgindir [3].

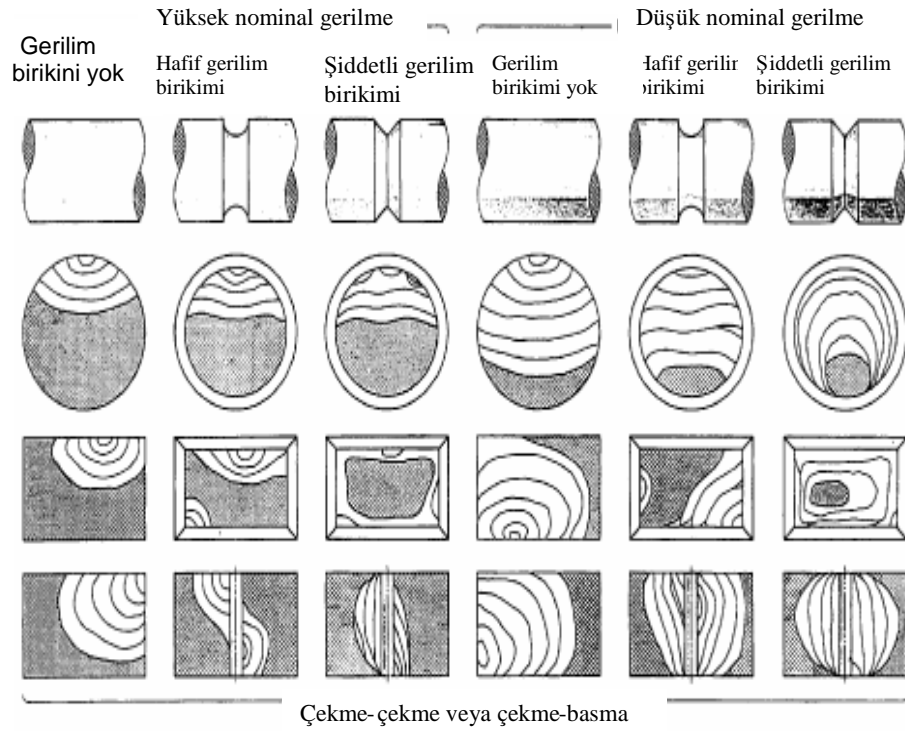


Şekil 3.2 Pürüzsüz bir numunede çoklu yorulma çatlak başlangıcı [27].

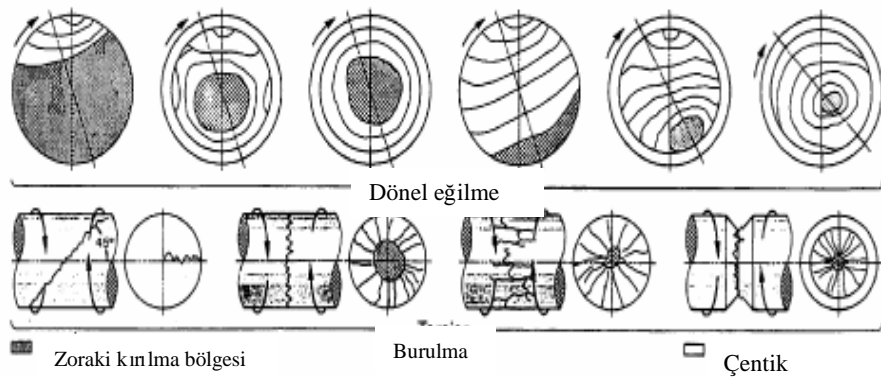
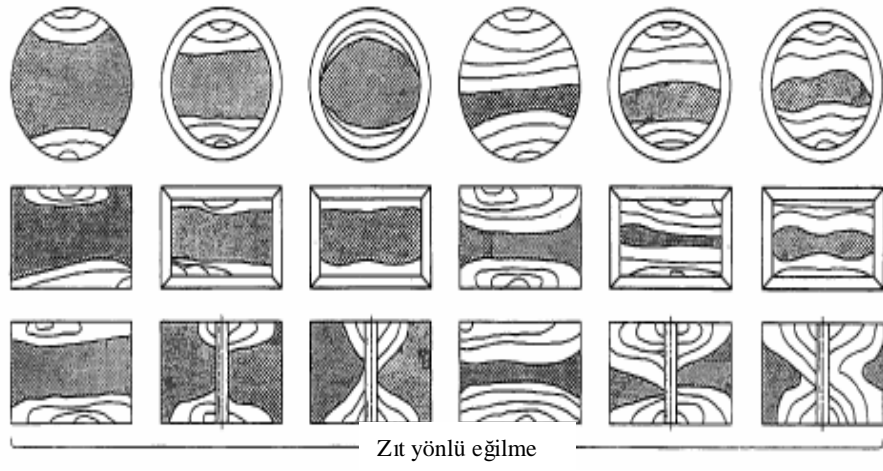
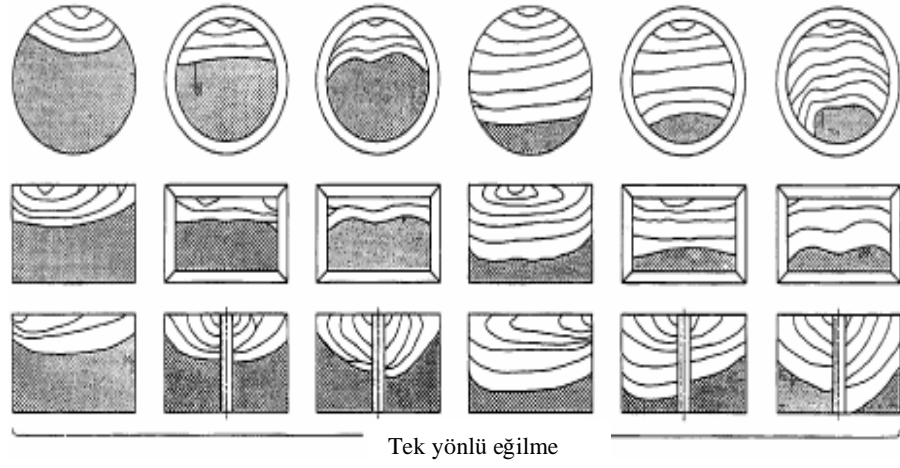


Şekil 3.3 Alüminyum alaşımının kırılma yüzeyindeki duraklama çizgileri[27].

Zoraki kırılma bölgesinin büyüklüğü, uygulanan yükün büyüklüğü konusunda bilgiler verir. Çatlak ilerleyip geri kalan dolu kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince ani kırılma meydana gelir ve kırılma yüzeyi taneli görünüştedir [3].



Şekil 3.4 Yorulma kırılmalarının yüzeylerindeki işaretlerin şematik gösterimi[3]

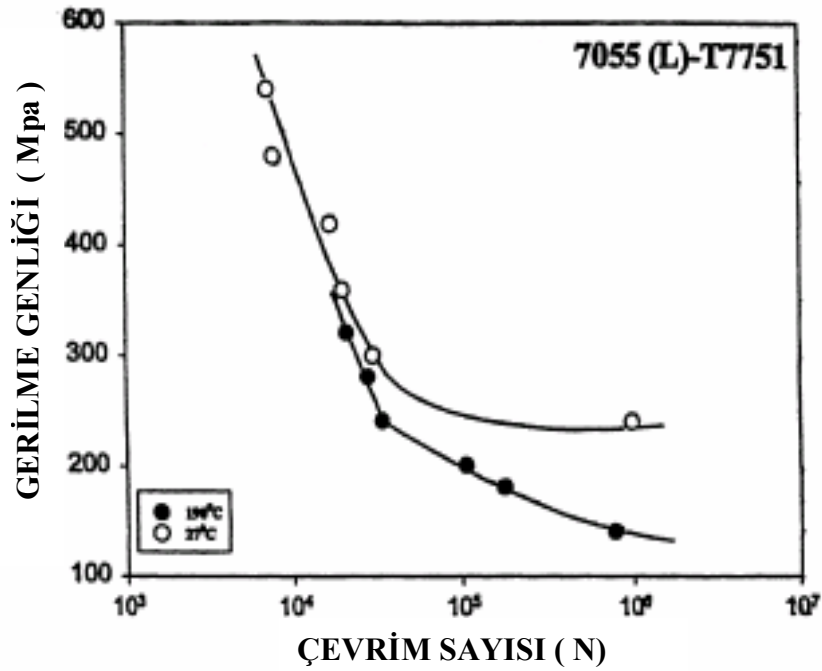


Şekil 3.4 'ün devamı : Yorulma kırılmalarının yüzeylerindeki işaretlerin şematik gösterimi [3 ,27]

### 3.2.5 Yorulma Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yorulma deneyinin sonuçları genellikle bir grafik halinde verilir. Deney esnasında uygulanan gerilme değeri ( S ) düşey eksen ve bu gerilme altında kırılıncaya kadar geçen süre içerisindeki çevrim sayısı ( N ) yatay eksen olmak üzere bir grafik çizilir [3,4,29].

Meydana getirilen bu grafiğe S-N eğrisi veya Wöhler diyagramı denilir. Her iki eksen verilerin logaritması alınarak tam logaritmik skala veya sadece çevrim sayısı eksenine logaritmik değerler alınarak yarı logaritmik skala kullanılabilir. [3,4,20]. ( Şekil 3.5)



Şekil 3.5 7055 Alüminyum alaşımının S – N eğrileri[20]

Değişken zorlamalarda malzemenin iç bünyesinde meydana gelen değişiklikler , N ile simgelenen yük değişme sayısına bağlıdır. Bu bakımdan alçak ve yüksek yük değişme sayılarına tekabül etmek üzere değişken zorlamalar iki bölgeye ayrılır. Kesin bir değer olmamakla beraber  $N \leq 10^4$  olduğu bölge alçak yük değişme sayılarını ( Low Cycle) ,  $N > 10^4$  olduğu bölge yüksek yük değişme sayılarını (High Cycle ) kapsar[4].

Alçak yük değişme sayısında meydana gelen kopma , statik kopma gibidir. Dolayısıyla , statik kopmadan farklı olan yorulma yüksek yük değişme sayılarının etkisi altında meydana gelen bir olaydır. Düşük gerilmelerde yorulma ömrü önemli ölçüde artar ve bazı durumlarda yorulma ömrü sonsuz olabilir. Bu durumda genellikle yüksek çevrimli yorulmadan bahsedilir. Bu durumun oluştuğu gerilmeye “*yorulma dayanım sınırı*“ denilir [4].

### 3.2.6 Yorulma Deneyleri

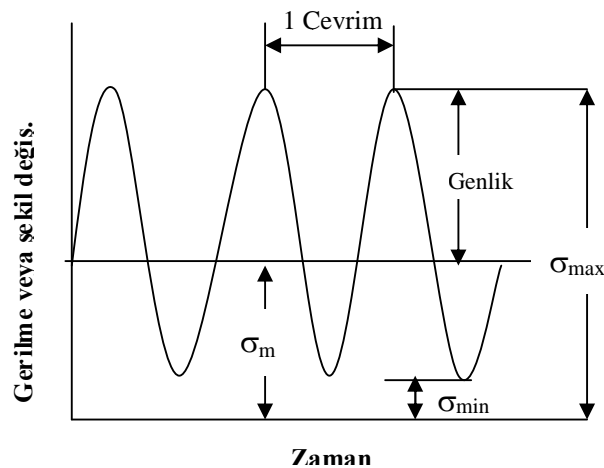
Yorulma testi , genellikle sinüzoidal yükleme ile yapılır. Böylece yorulma yükünün durumunu Şekil 3.6 ‘da gösterilen birkaç parametre ile tarif edilebilir. Maksimum ve minimum gerilmenin belirlenmesiyle , gerilme dağılımı ( $\sigma_r$  ) , gerilme genliği ( $\sigma_a$  ) , ortalama gerilme ( $\sigma_m$  ) ve gerilme oranı (  $R$  ) gibi diğer gerilme parametrelerine kolayca karar verilebilir [4].

$$\sigma_r = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (3.3)$$

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (3.4)$$

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \quad (3.5)$$

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (3.6)$$



Şekil 3.6 Yorulma testi için sinüzoidal yükleme

R değeri , yorulma yükünün modunu gösteren değerdir. Tablo 3.5 'te önemli yorulma modları özetlenmiştir[4].

Tablo 3.5 R değeri ile gösterilen yorulma yükü modları

Yorulma Gerilmesi Oranı	Yorulma Yükü Modu
$R = 1$	Statik Yükleme
$R = 0$	Çekme –Yüksüz
$0 < R < 1$	Çekme – Çekme
$R = -1$	Çekme – Basma, Tam Değişken
$-1 < R < 0$	Çekme – Basma

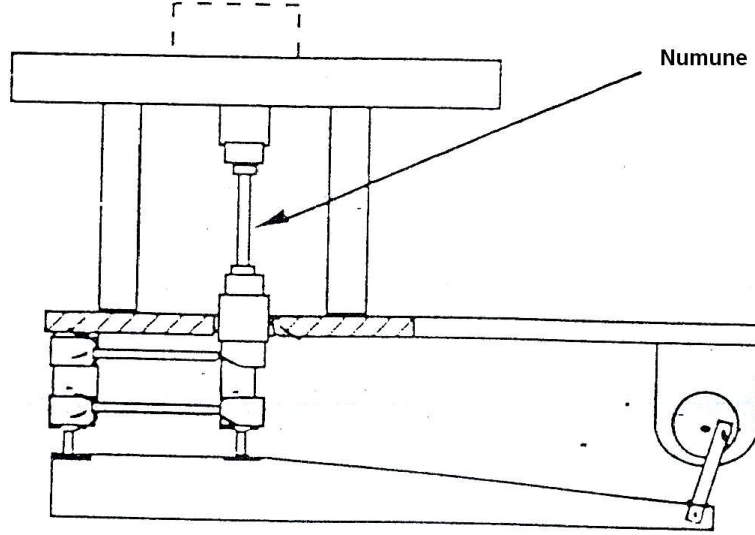
Yapılan araştırmalar sonucunda tam belirlenmiş bir yorulma testi ve numune boyutları bulunamamıştır. Çünkü makine parçasının yorulma ömrünü etkileyen pek çok faktör vardır ve yorulma çatlaklarının başlangıç ve yayılma aşamaları süresince farklı durumlar hedeflenir. Bu yüzden tekrarlı yüklemeye maruz çalışmakta olan makine parçasının yorulma ömrünü belirlemek için, mümkün olduğunca gerçek koşulların oluşturulması ve her deneysel durumda belirli bir koşulun sabit tutulup diğerlerinin değiştirilmesinden dolayı, her bir duruma uyan sayısız değişik test düzeneği ortaya çıkmaktadır [3,4].

Günümüzde kullanılan yorulma deney makinaları çekme, çekme-basma, döner eğme, ileri-geri eğme ve burma yanında bileşik zorlamaları da mümkün kılmaktadır. Yorulma deneylerinin esas gayesi malzeme veya makine parçalarının uygulanan yüklemeye karşı göstereceği performansını tespit etmektir. Deneyde kullanılan gerilme türü yorulma deneyine de adını vermektedir [3,4].

### 3.2.6.1 Aksel Gerilmeli Yorulma Deneyi

Bu tür yorulma deneyinde numuneye uzunluğu boyunca değişken çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Gerilme numune kesitinde homojen olarak dağılır.

Eksenel yükler mekanik, hidrolik, elektromekanik sistemler ile uygulanabilir. (Şekil 3.7) eksenel gerilmeli yorulma deneyi cihazını şematik olarak göstermektedir[3].



Şekil 3.7 Eksenel gerilmeli yorulma deneyi cihazı[3].

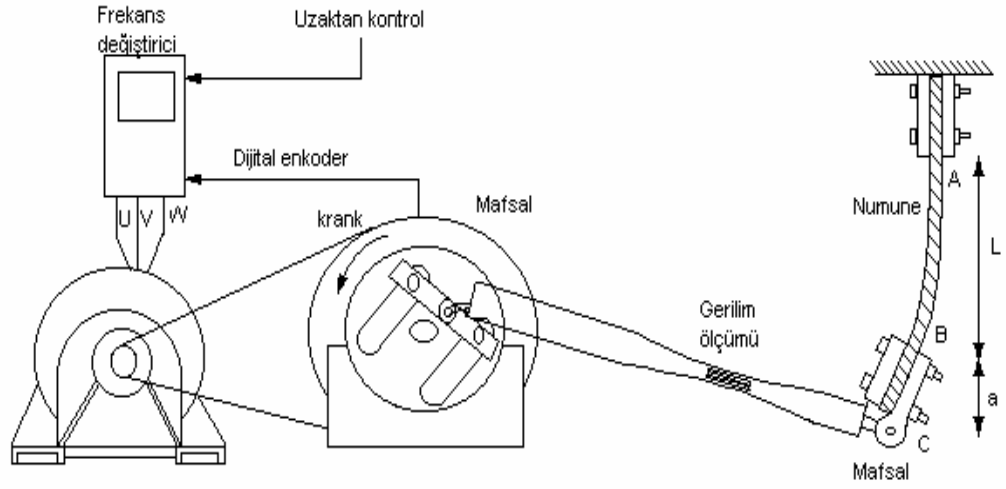
### 3.2.6.2 Eğilme Gerilmeli Yorulma Deneyi

Eğmenin türüne bağlı olarak;

- Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi,
- Döner eğme gerilmeli yorulma deneyi, olarak iki gruba ayrılır.

Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi türünde, numune nötr (tarafsız) bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmelerinin etkisi altındadır. Numune hareketsiz olup eğme yükü hareketlidir. (Şekil 3.8) düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazını (schenk) göstermektedir [3,19].





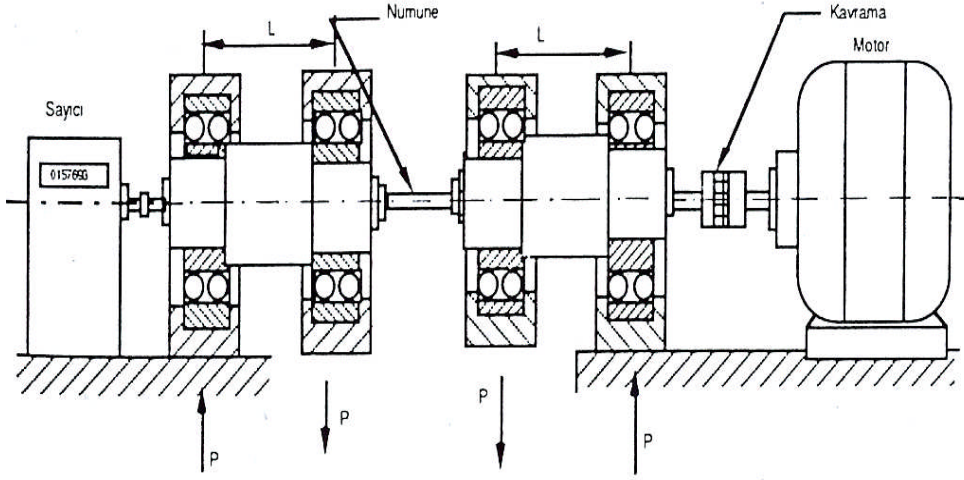
Şekil 3.8 Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazı şematik gösterimi [3,19].

Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyinde ise numune devamlı dönen ve nötrbir eksene göre tekrarlanan eğme gerilmesine maruz bırakılır. Bu tür yorulma deneyi ilk defa Wöhler tarafından geliştirilmiş ve demir yolu vagon akslarının yorulma dayanımı denenmiştir [3,26].

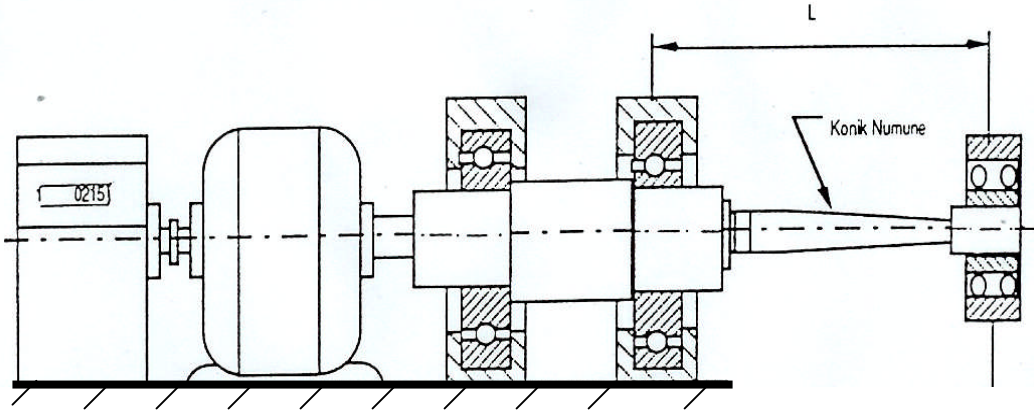
Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi cihazları yükün uygulama durumuna bağlı olarak iki gruba ayrılmıştır.

- Sabit eğme momentli (Şekil 3.9),
- Ankastre kiriş türü (Şekil 3.10)

Bu tür gerilmelere örnek olarak hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir [3].



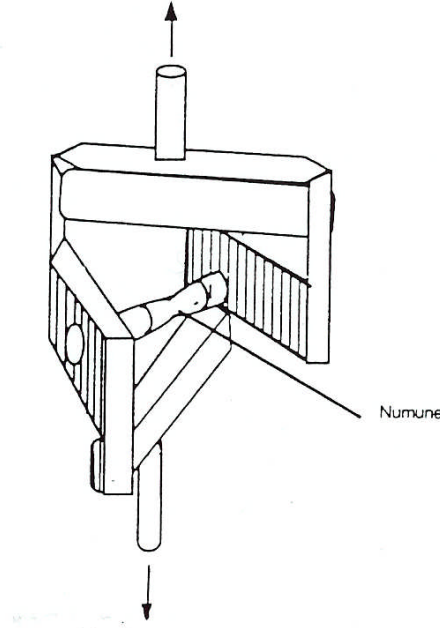
Şekil 3.9 Sabit eğme momentli yorulma cihazı [3].



Şekil 3.10 Ankastre kiriş türü yorulma deneyi cihazı [3].

### 3.2.6.3 Burma Gerilmeli Yorulma Deneyi

Deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma işlemi uygulanmaktadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme basma kuvvetlerinin uygulandığı bütün helisel yaylara bu tür burma gerilmeleri uygulanır [3]. (Şekil 3.11) belirli bir açıda burulmayı sağlayan deney düzeneğini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.11 Burulma momenti sağlayan deney düzeneği [3]

### 3.2.6.4 Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi

Aynı anda birden fazla gerilme türünün uygulanması halinde yorulma davranışını incelemekte kullanılır. Uygulamada en çok kullanılan bileşik gerilme durumu eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu durum ile aksel ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu durumdur. Motorların krank mili üzerinde bulunan biyel kolu yataklarındaki gerilme, eğme burma gerilmesinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir [3].

### 3.2.7 Rüzgar Türbin ve Vantilatör Kanatlarındaki Yorulma

Rüzgar türbinleri ve vantilatörler, etkiyen değişken yüklerin karmaşık sisteminden dolayı özellikle yorulma hasarından çok etkilenirler. Özellikle kanatlar risk altındadır. Bu nedenle bir çok araştırmacı, işletme ömrü süresince kanatların yorulma hasar olasılıklarını değerlendirebilmek için yoğun çaba sarf etmişlerdir [30].

Eğer yorulmadan dolayı oluşan hasar belirli bir seviyenin üzerine çıkmış ise çevrim yükleri altındaki bir rüzgar türbini kısa zamanda hasara uğrayabilir. İlk başlangıçta, kırılma olmaksızın çevrim yükü altında hasar büyür. Çünkü,

- Bölgesel olarak oluşan net gerilme, malzemenin maksimum gerilmesini aşmıştır, yada
- Hasar birikimden dolayı kritik bir çatlak oluşmuştur.

Bir elemandaki hasar büyüme oranı çevrimsel gerilme oranına bağlı ise, yük oranı R (uygulanan çevrim gerilmesinin malzemenin maksimum çekme mukavemetine bölümü) ve o andaki hasar değeri D ise,

$$\frac{dD}{dN} = f(\Delta\sigma, R, D) \quad (3.7)$$

$\Delta\sigma$  : Çevrim anındaki gerilme oranı

R : Uygulanan çevrim gerilmesinin malzemenin maksimum çekme mukavemetine oranı

D : Hasar değeri (kırılmaya konu olan bölgenin hasar yüzdesi)

N : Çevrim sayısı

Yorulma ömrü  $N_f$ , kırılmanın olduğu yerdeki başlangıç hasarını kırılma için en yüksek değerine yükselten veya hasar seviyesini kritik seviyenin üzerine çıkaran yük çevrim sayısıdır [30].

Bu nedenle,

$$N_f = \frac{dD}{f(\Delta\sigma, R, D)} \quad (3.8)$$

Bu durumda,  $N_f$  çevrim sayısını tanımlamak gerekecektir. Bu tanımlama için genellikle, S (gerilme)-N(çevrim) eğrileri kullanılır. Malzemeye uygulanan değişken

gerilme ve çevrim sayısı (N) gerilme genliğinin bir fonksiyonu olarak tarif edilir. S-N eğrisinin eğimi, malzeme yorulmasındaki direncin bir ölçüsüdür ve malzemeden malzemeye değişiklik gösterir [30].

### **3.2.7.1 Yorulma ile İlgili Yükler (Kuvvetler)**

S-N eğrileri , kanatlardaki yorulma özelliklerini izafi olarak verir. Ancak , S-N eğrileri çalışma süresince türbin kanatlarında etkili olan karmaşık ve farklı yük tekrarlarının etkilerini hesaba katmaz. Bu kuvvetler, kanatların kendi külesinden ve rüzgarın etkisiyle meydana gelir [30]. Bu kuvvetler;

- Yerçekimi (kanadın külesi üzerindeki dünyanın çekiminden dolayı, her çevrimde basma ve çekmeye sebep olur)
- Merkezkaç (kanadın dönmesinden dolayı)
- Rüzgarın itmesi (saldırısı, vuruşu) (kanat düzlemine dik bir kuvvet) (nispeten daha yavaş)
- Rüzgar türbülansından dolayı hızlı bir şekilde değişerek meydana gelen kuvvetler.

Araştırmalara göre, nispeten düşük frekans ve yüksek genlikli rüzgar itme kuvveti değişken eğilme gerilmeleri (çeki-bası) yaratacağından yorulma hasarı üzerinde oldukça etkilidir. Dolayısıyla, diğer bahsedilen yüklerle kıyaslandığında rüzgar itme kuvveti yorulma hasarı üzerinde çok daha fazla etkilidir [30].

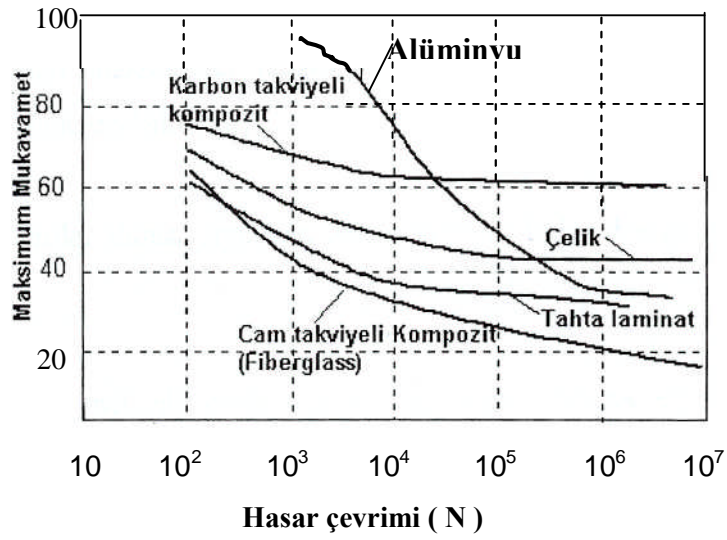
### **3.2.7.2 Kanat Malzemelerindeki Yorulma Özellikleri**

Türbin kanat malzemeleri üç grupta sınıflandırılabilir.

- Metaller
- Kompozitler
- Ahşap Laminantlar

Yumuşak çelik gibi bazı metaller nispeten daha iyi yorulma dayanımı gösterirler. Bu malzemelerin ; maksimum çekme dayanımının yarısından daha az titreşim gerilmesine maruz kalması sağlanırsa , iyi dizayn edilir , bakımları zamanın da yapılırsa uzun süreli çalışmalar için kanat malzemesi olarak kullanılabilir [30].

Ne yazık ki , çoğu hafif alaşım gibi alüminyum da zamanla birlikte sürekli düşüş gösteren bir S-N davranışı sergiler.(Şekil 3.12 )



Şekil 3.12 Çeşitli kanat malzemelerinin yorulma özellikleri [30]

Alüminyum malzemelerin yorulma sınırı yoktur. Bu yüzden malzeme uzun süre titreşimli gerilme şartları altında çalıştırılırsa kırılmanın oluşması oldukça muhtemeldir. Bu durum bir parçanın görünür bir zararı olup olmadığına bakılmaksızın kullanımdan kaldırılması gerektiği konusundaki “parçalar için sınırlı kullanım ömrü “ konseptini açıklamaktadır [30].

### 3.3 Yorulma Verilerinin İstatistiksel Değerlendirilmesi

Homojen olmayan bütün malzemelerde olduğu gibi, alüminyum malzemelerde de numuneden numuneye mukavemet ve yorulma ömrü açısından büyük farklılıklar görülebilir. Bu durum bizi, elde edilen verilerin güvenilirliğinin tespiti için istatistiksel analiz yapmaya zorlar. Kullanılan istatistiksel özellikler, genelde ortalama mukavemetin bulunduğu noktadaki normal dağılıma bağlıdır [4]. Bu dağılım ;

$$\bar{\sigma} = \sum \frac{\sigma_i}{n} \quad (3.9)$$

Standart sapma ;

$$d = \sqrt{\frac{(\sum \sigma_i^2) - n\bar{\sigma}^2}{(n-1)}} \quad (3.10)$$

Katsayıların dağılımı ise ;

$$r = \frac{100d}{\bar{\sigma}} \quad (3.11)$$

Burada ;  $\bar{\sigma}$  : ortalama gerilme , n : deney sayısı ,  $\sigma_i$  : sıralamadaki her bir gerilme değeri , d : standart sapma , r : katsayıların dağılım oranıdır.

Yorulma verilerinin değerlendirilmesinde ise , **Weibull dağılımı** , ömür ve mukavemet parametrelerindeki değişimin daha gerçek bir sunumudur [4].

### 3.3.1 Yorulma Ömür Verilerinin Weibull Dağılımı ile İstatistiksel Analizi

Yorulma ömrü sonuçları , bir olasılık yoğunluğu fonksiyonu  $F(x)$  ve aşağıda verilen ilgili kümülatif dağılım fonksiyonu  $F_f(x)$  ve  $F_s(x)$  kullanılarak istatistiksel analizi iki parametrelili Weibull dağılımı kullanılarak incelenebilir [4].

$$F(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left( \frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (3.12)$$

$$F_f(x) = 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (3.13)$$

$$F_s(x) = 1 - F_f(x) = \exp \left\{ - \left( \frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (3.14)$$

Burada ;  $F_f(x)$  hasar olasılığı ,  $F_s(x)$  hasarsız ömrünü sürdürme olasılığıdır.  $(\alpha)$  şekil parametresi ( boyutsuz ) ve Weibull doğrusunun eğimidir.  $(\beta)$  Weibull doğrusunun x eksenini kestiği noktada bulunan yerleşim parametresidir veya ömür dağılımındaki ölçüm parametresidir [4].

$$\ln(x) = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - F_f(x)} \right) \right) + \ln(\beta) \quad (3.15)$$

Denklem (3.15) , doğrusal bir fonksiyon denklemi olarak yazılabilir ve,

$$y = mx + b \quad (3.16)$$

Burada ,  $y = \ln(x)$  ,  $m = 1/\alpha$  ,  $b = \ln(\beta)$  ve  $x = \ln(\ln[1/(1 - F_f(x))])$



Denklem (3.15) ' deki değişkenler , yorulma ömrünün artan şekilde sıralanmış deneysel verileri ( $N_f$ ) ve aşağıdaki denklem ile hesaplanan ortalama sırası P 'dir.  $P = F_f(x)$  yerine yazılarak her bir değerin kırılma ihtimali ( sıra ortalaması = meydan sırası ) hesaplanır [4].

$$P = \frac{i}{n+1} \quad (3.17)$$

Daha gerçekçi sonuçlarda P değeri Denklem (3.18) ile hesaplanır [4]

$$P = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (3.18)$$

Burada , ( i ) hasar sıra numarası , n her testteki numunelerin toplam sayısı .  $\alpha$  ve  $\beta$  ' nin değerleri çeşitli istatistik metodlar ( en küçük kareler metodu gibi ) kullanılarak uygun bir değere karar verilir.

### 3.3.1.1 Weibull Parametrelerinin Bulunması

Weibull kümülatif dağılımının fonksiyonu , doğrusal bir çizgi denklemi olarak görüldüğünden ( $y = mx + b$ ) şeklinde yazılabilir.

Weibull matematiksel olarak denklemi aşağıdaki gibi yazılırsa[4] ;

$$F(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x}{\beta}\right]^\alpha} \quad (3.19)$$

$$1-F(x) = 1-e^{-\left[\frac{x}{\beta}\right]^\alpha} \quad (3.20)$$

$$\text{Ln}(1-F(x)) = -\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \quad (3.21)$$

$$\text{Ln}\left[\frac{1}{1-F(x)}\right] = \left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha \quad (3.22)$$

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right] = \text{Ln}\left[\alpha\left(\frac{x}{\beta}\right)\right] \quad (3.23)$$

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right] = \alpha \text{Ln}(x) - \text{Ln}(\beta) \quad (3.24)$$

Bu denklem basit çizgi denklemi olarak yazılırsa , denklemin sol tarafında  $y = \text{Ln}(x)$  ,  $m = 1/\alpha$  ve  $b = \text{Ln}(\beta)$  şeklinde yazılır. Burada lineer reaksiyon uygulanarak Weibull parametreleri bulunur. Burada doğrusal çizginin eğimi  $\alpha'$  dır.

$\beta$  parametresi ise ;

$$\beta = e^{-\left[\frac{b}{\alpha}\right]} \quad (3.25)$$

şeklinde hesaplanır [4].

### 3.3.1.2 Örnek Weibull Uygulaması

Weibull doğrusunu çizme aşamasında bu parametreleri elde etmek için , sırasıyla aşağıdaki işlemler yapılır [4] .

1) Veriler artan sırada yerleştirilir.

2) Her bir değere  $I = 1,2,3 \dots n$  şeklinde ifade elde edilir.

3) Her bir değer için kırılma ihtimali şu formülle hesaplanır , ( sıra ortalaması =  $i$  ) denklem (3.17) ' den veya denklem ( 3.18) hesaplanır. Burada denklem (3.17) kullanılacaktır.

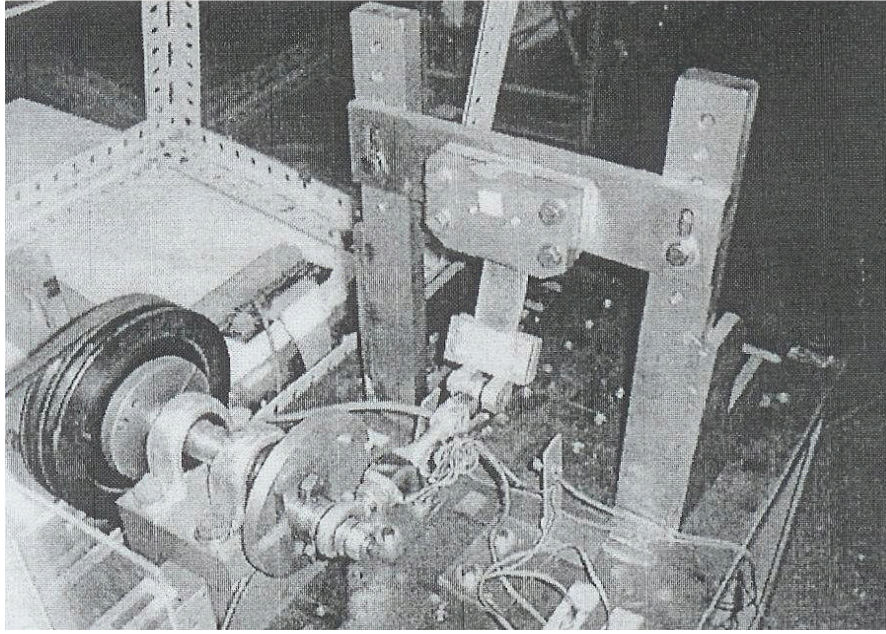
$$P = \frac{i}{n+1} \text{ olarak hesaplanır.}$$

4) Her bir değer için  $Ln$  (çevrim) ve  $\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{1-P} \right) \right]$  değerleri hesaplanır.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı

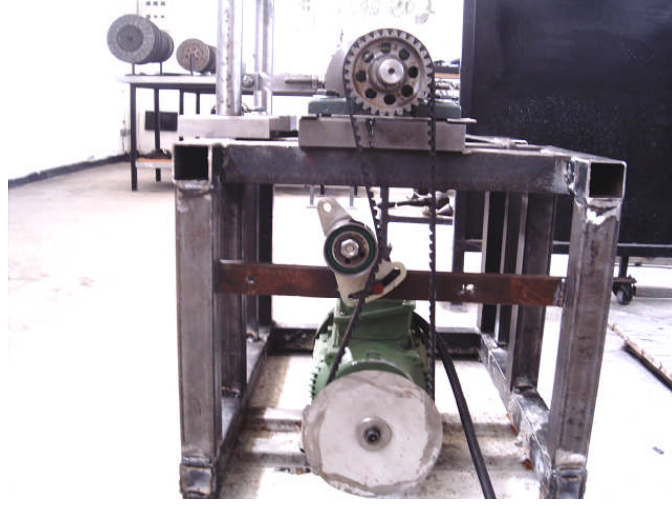
Rüzgar türbinlerinin kanatçıklarının yapımında kullanılan plaka şeklindeki alüminyum malzemelerin yorulma ömürlerinin tespit edilmesi amacıyla kullanılacak olan yorulma makinesi kompozit malzemelerin yorulmasında kullanılan düzlemsel eğme gerilmeli yorulma cihazı baz alınarak tasarlanmıştır.(Şekil 4.1 ) [19].



Şekil 4.1 Düz örgülü cam/ epoksi kompozit malzemelerin eğme yorulmasında kullanılan yorulma cihazı [19].

Cihazda kullanılan elektrik motoru , sargılarının bağlantı şekline göre 380V veya 220 V luk çift akımlı motordur. Motor devri 2850 dev/dak, motor gücü 0,75 KW ( 1 HP ) tır. Motorla mil arasındaki hareket iletimi triger kayışı ile sağlanmaktadır ( Şekil 4.2). Motor dişlisi ile mil dişlisi arasındaki hareket oranı

1,5 / 1 dir. Motor 2850 devirde dönerken mil 4275 dev / dak ile dönmektedir. Çalışma esnasında kullanılan frekans 70 Hz 'dir.

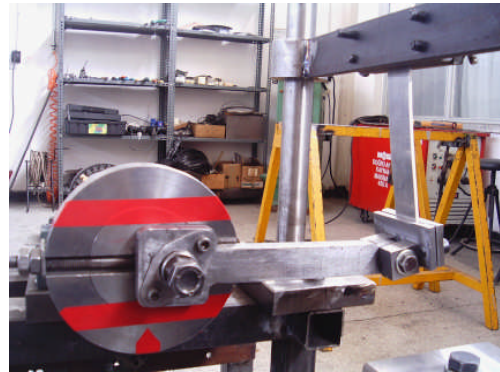


Şekil 4.2 Motor mil bağlantısı

Yorulma cihazı, yüksek frekanslı ve genlik ayarlı olup malzemeyi çift yönde eğme yapmak suretiyle maksimum yormaktadır. Şekil değiştirme oranı ( R ), çift yönde yükleme yapıldığı için  $R = ( U_{min}/U_{max} ) = -1$  olarak seçilmiş ve tüm numuneler için uygulanmıştır. Volana bağlı biyel kolu ayar mekanizması ile sıfır noktasından itibaren ileri veya geri hareket ettirilmek suretiyle malzemeye hem çekme hemde basma yönünde 0 \_ 4cm arasında sehim verebilmektedir. (Şekil 4.3 , 4. 4)

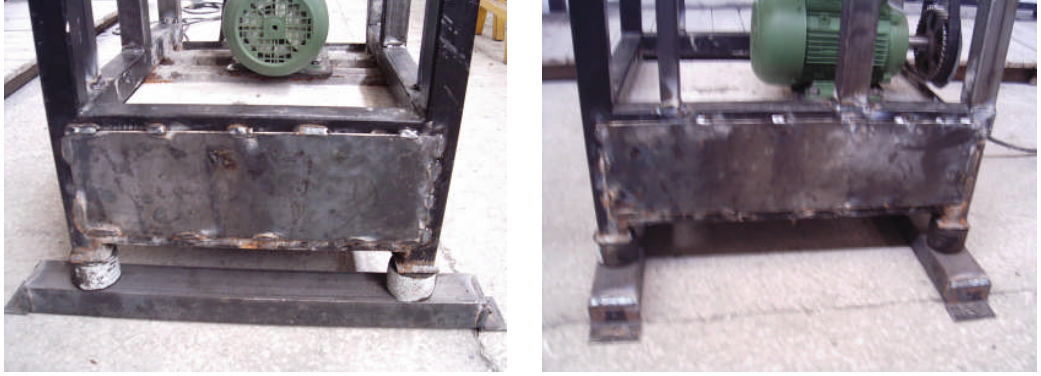


Şekil 4.3 Çekme yönünde hareket



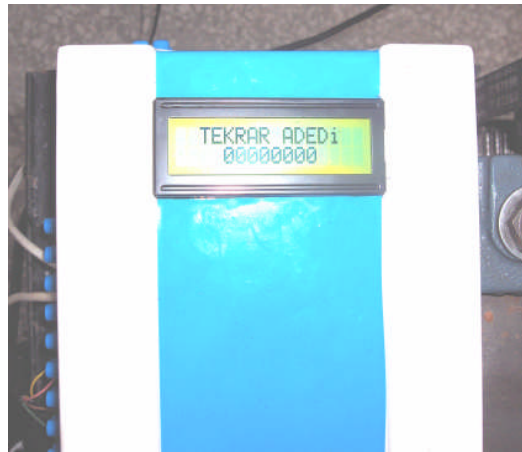
Şekil 4.4 Basma yönünde hareket

Cihazın çalışma esnasında sarsıntı yapmadan rijit olarak çalışması için bağlantı sehpasının alt kısmına tekne yapılarak içerisine çimento dökülmüştür. Bağlantı sehpasının ayaklarına kauçuk motor takozları bağlanarak zeminle doğrudan teması engellenmiştir. Bu sayede cihazın çalışma esnasındaki bütün sarsıntısı motor takozları tarafından absorbe edilmiştir. (Şekil 4.5 )

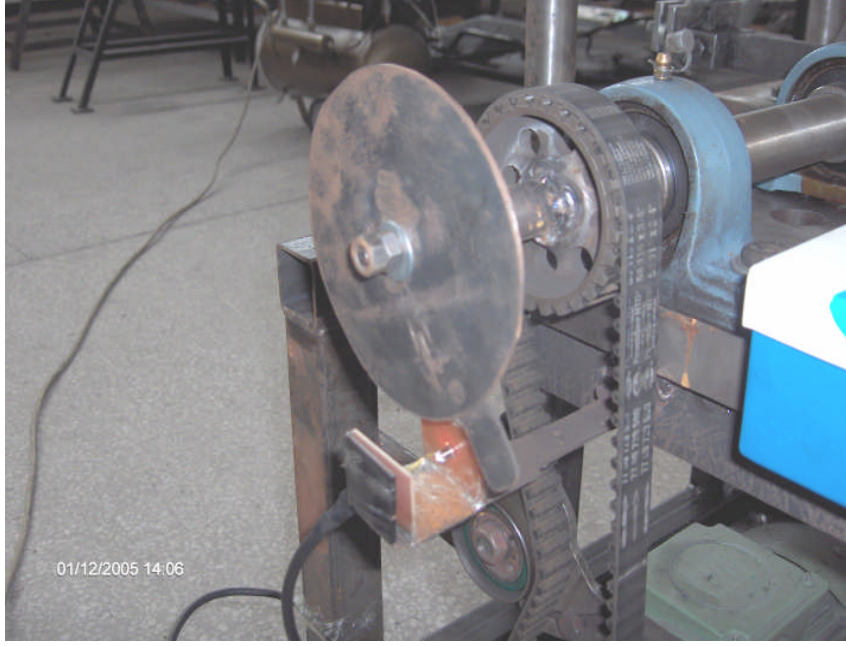


Şekil 4.5 Kauçuk bağlantı takozları

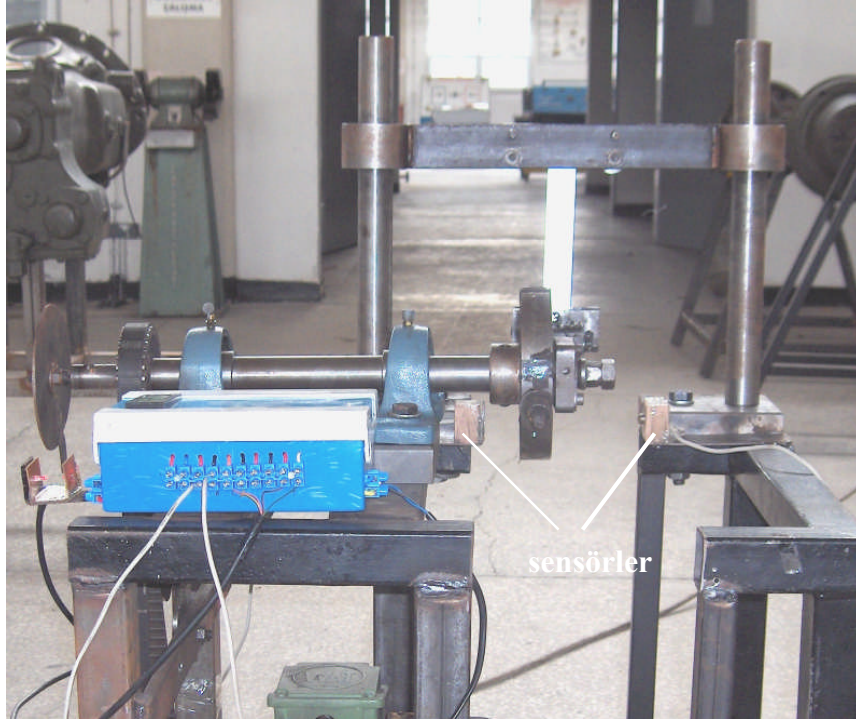
Numunenin kaç tekrar sayısında ( N ) koptuğunu ölçmek amacıyla sekiz haneli (  $10^7$  tekrar sayma kapasiteli ) elektronik sayaç cihaza monte edilmiştir. (Şekil 4.6 ). Tekrar sayısını dijital ekrana yazdıran çevrin sayacı ünitesi Şekil 4.7 'de gösterilmiştir. Kırılan numuneyi algılayıp elektrik motorunu durdurmak amacıyla foto transistörler ile uyumlu çalışan mikro denetleyici ve elektrik motoru sürücüsü ( rölesi) kullanılmıştır. (Şekil 4.8)



Şekil 4.6 Dijital sayaç

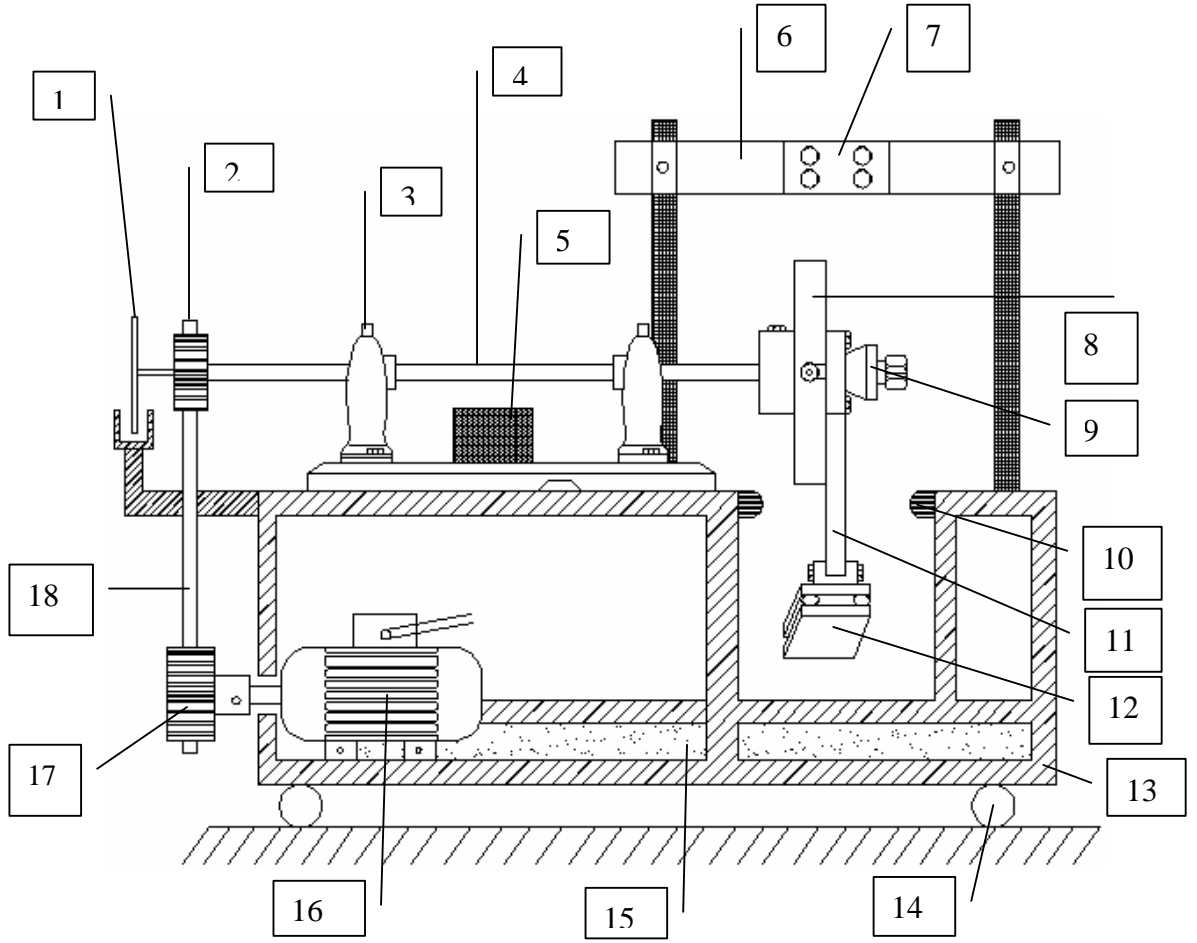


Şekil 4.7 Çevrim sayacı sensörleri



Şekil 4.8 Elektrik motoru stop sensörleri

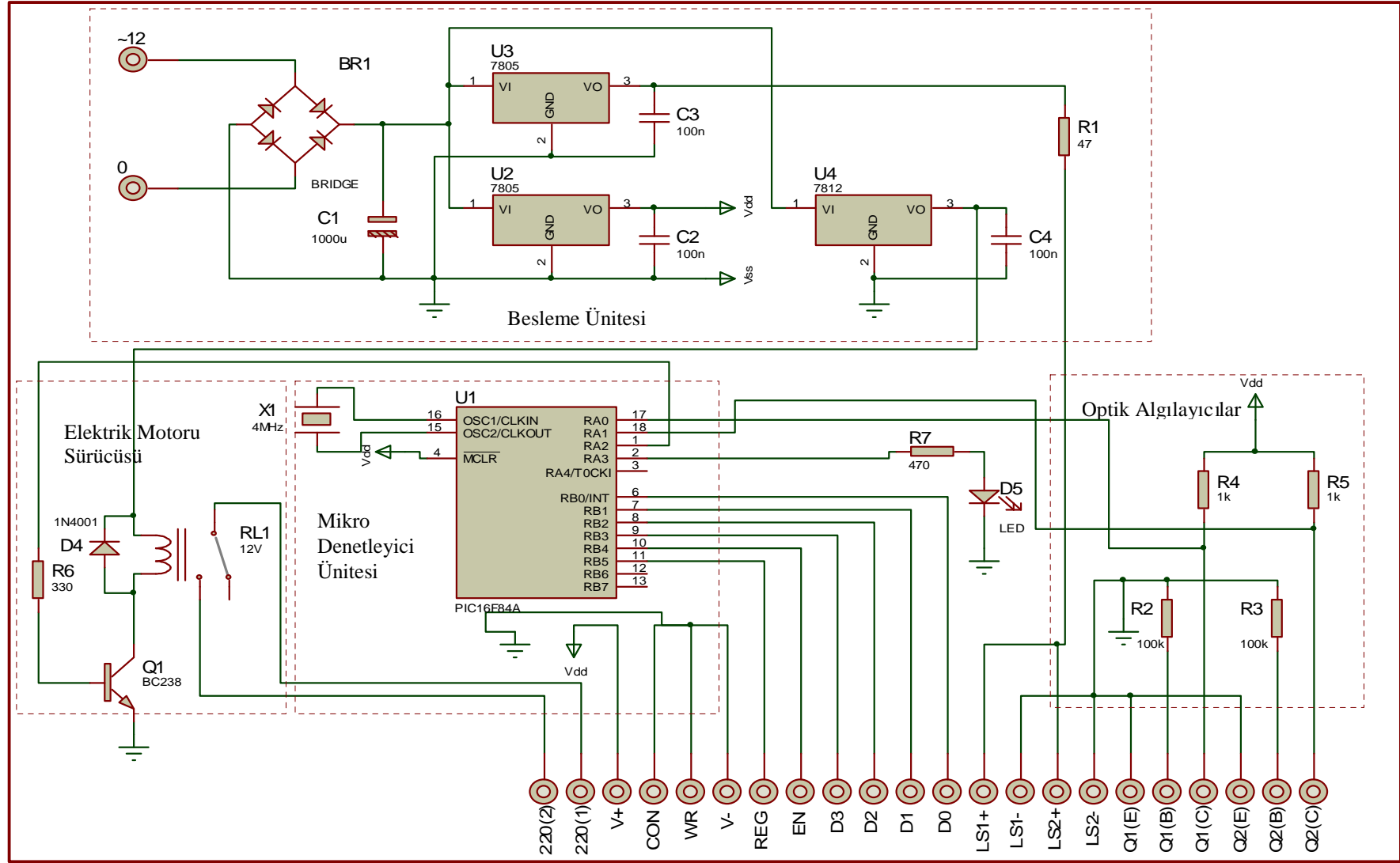
Şekil 4.9’da imal edilen test cihazının şematik olarak detay resmi görülmektedir.



Şekil 4.9 Yorulma cihazının şematik resmi

- |                                 |                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Çevrim sayaç volanı          | 10. Stop mekanizması algılama sensörü |
| 2. Mil dişlisi                  | 11. Biyel kolu                        |
| 3. Oynak yatak                  | 12. Numune bağlama aparatı            |
| 4. Mil                          | 13. Cihaz sehpası                     |
| 5. Elektronik kontrol ünitesi   | 14. Kauçuk takozlar                   |
| 6. Numune boyu ayarlama aparatı | 15. Beton denge ağırlığı              |
| 7. Numune bağlama aparatı       | 16. Elektrik motoru                   |
| 8. Genlik ayar volanı           | 17. Motor dişlisi                     |
| 9. Genlik ayar civatası         | 18. Triger kayışı                     |





Şekil 4.10 Elektronik kontrol ünitesi

Tablo 4.1 Elektronik kontrol ünitesi devre elemanları

Semboller	Açıklaması
BR1 , C1	Weston köprüsü ve kondansatör,Adaptör ünitesini oluşturur
U <sub>2</sub> , U <sub>3</sub> ,U <sub>4</sub>	Regüle entegreleri
C <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> ,C <sub>4</sub>	Kondansatörler
U <sub>1</sub>	PIC 16F84A Mikro denetleyicisi
X1	4 MHz 'lik kristal
R2,R3,R4,R5	Dirençler , Foto transistor ler için uygun gerilmeleri sağlarlar
Q1, R6, D4, RL1	Motor sürücü devresi elemanları
Q2(E ) , Q2(B ) Q2(C )	Stop transistorü bağlantı uçları
Q1(E ) , Q1(B ) Q1(C )	Tekrar transistorü bağlantı uçları
LS2+ , LS2-	Stop lazer bağlantıları
LS1+ , LS1-	Tekrar lazer bağlantıları
V+ , CON, WR, V- REG,EN,D3,D2,D1,D0	LCD Bağlantı uçları
220(1), 220(2)	Elektrik motoru bağlantı uçları

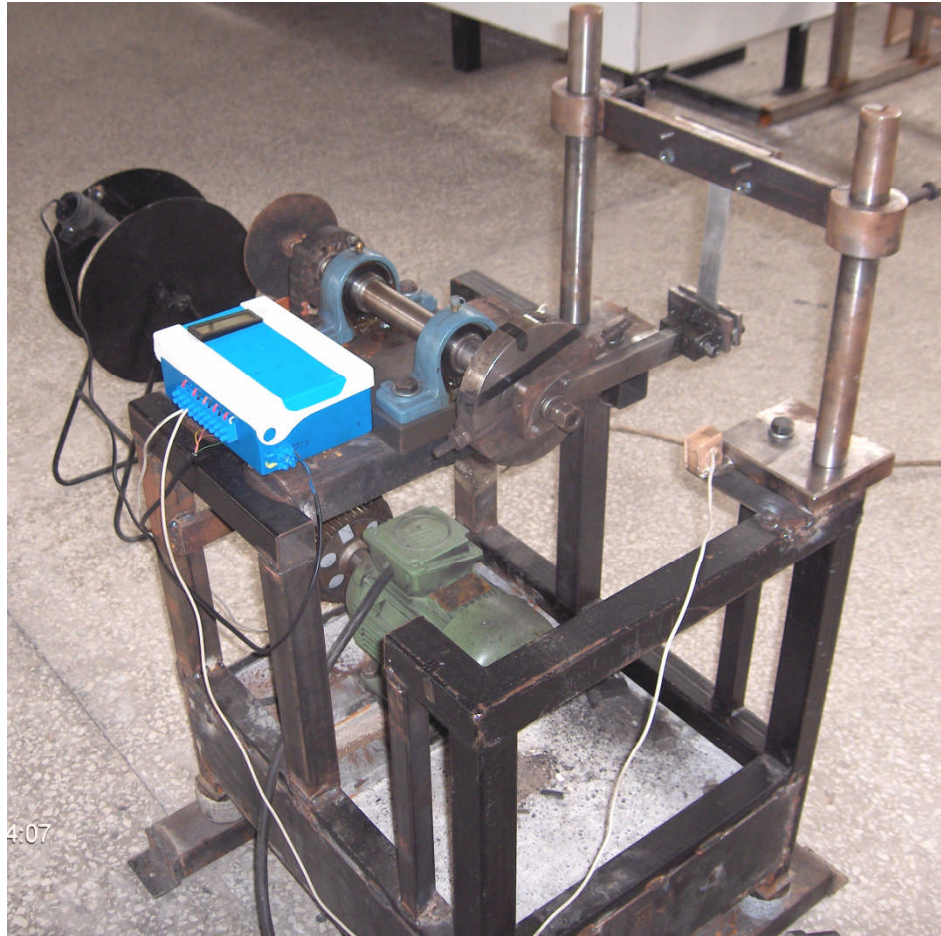
#### 4.1.1 Elektronik Kontrol Ünitesinin Çalışması

Elektronik kontrol ünitesi 4 ana ünitelerden meydana gelmektedir. ( BR1 , C1, U<sub>2</sub>, U<sub>3</sub> ,U<sub>4</sub> ,C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> ,C<sub>4</sub> ) elemanları sistemin besleme ünitesini oluşturmaktadır. BR1 ve C1 elemanları besleme ünitesinin adaptör kısmını oluştururlar. 220 V 'luk AC gerilimi , sistemin çalışması için gerekli olan 12 V 'luk DC gerilime dönüştürür. U<sub>2</sub> regüle entegresi 12 V 'luk DC gerilimi 5 V 'ta düşürerek U<sub>1</sub> mikro denetleyicisini besler. U<sub>3</sub> regüle entegresi 12 V 'luk DC gerilimi 5 V 'ta düşürerek lazer diyotları besler (LS1+ , LS2+ ). U<sub>4</sub> regüle entegresi 12 V 'luk DC gerilimi sabit olarak elektrik motoru sürücüsüne iletir.

R2 , R3 , R4 , R5 dirençleri ; foto transistörler için uygun gerilimleri sağlarlar. Elektronik kontrol ünitesinin 'optik algılayıcılar' ünitesini oluştururlar.

U<sub>1</sub> : PIC16F84A mikro denetleyicisi olup foto transistörlerden gelen darbeleri değerlendirir ve buna bağlı olarak tekrar adedini hesaplar. Hesaplanan değeri LCD monitörüne yazar. Deney numunesi koptuğunda stop transistöründen gelen sinyali değerlendirerek motor sürücü ünitesine iletir . X1 elemanı 4 MHz 'lik bir kristal olup mikro denetleyicinin çalışması için gerekli olan osilasyon frekansını sağlar.

Q1 , R6 , D4 , RL1 elemanlarından oluşan devre bir sürücü devresi konumundadır. Foto transistörden mikro denetleyiciye gelen bir sinyal sayesinde parçanın kırıldığı algılanır ve sürücü devresi elektrik motorunu durdurur.



Şekil 4.11 Yorulma cihazının genel görüntüsü

## 4.2 Spektrum Analiz Testleri ve Sonuçları

Yorulma testleri için hazırlanan alüminyum numunelerin kimyasal kompozisyonunu belirlemek amacıyla Balıkesir 1012 Ana Tamir Fabrikası Fizik-Kimya laboratuvarında spektrum analiz testleri yapılmıştır. Spektrum analiz testleri için kullanılan ölçüm cihazı Şekil 4.12’ de gösterilmiştir. Test için toplam 8 yakma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13). Test sonuçlarına göre numunelere ait kimyasal analizler Tablo 4.2 ‘ de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Alüminyum numunelerin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	Kimyasal Bileşim ( % Ağırlık )									
	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Zn
Alüminyum Plaka	99.4	0.002	0.001	0.494	0.005	0.001	0.001	0.098	0.014	0.008

Spektrum analiz sonucunda elde edilen veriler [www.MatWeb.com](http://www.MatWeb.com) [31] internet sitesindeki alüminyum gruplarına ait kimyasal içeriklerle karşılaştırılarak numunelerin 1100 serisi alüminyum alaşımı olduğu tespit edilmiştir.



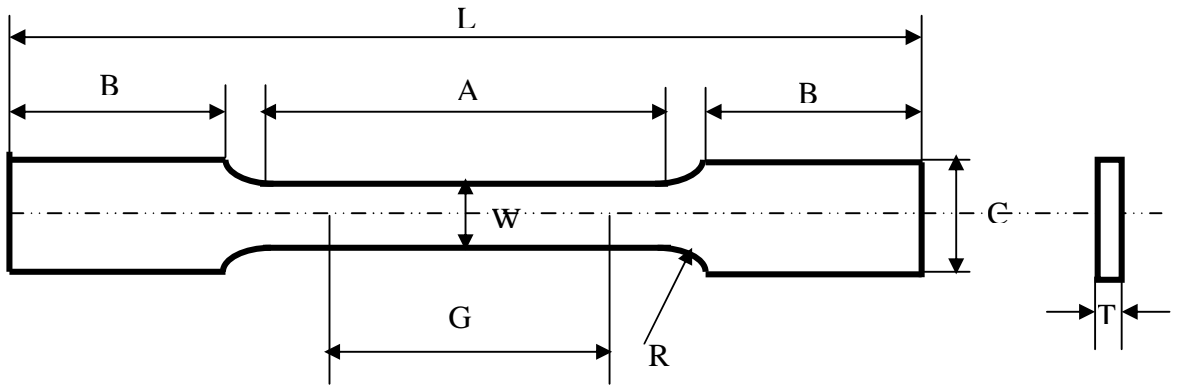
Şekil 4.12 Spektrum analiz test cihazı



Şekil 4.13 Spektrum analiz test numunesi

#### 4.3 Çekme Testleri ve Sonuçları

Alüminyum numunelerin çekme testleri ; TS – EN 485-2 [32] ve ASTM E 8M - 04 ( Standart Test Methods For Tension Testing Metallic Material ) [33] standartlarına uygun olarak Balıkesir 1012 Ana Tamir Fabrikası Fizik-Kimya laboratuvarında yapılmıştır. Deney numunelerinin boyutları Şekil 4.14’ de ve Tablo 43.3 ‘ de verilmiştir .



Şekil 4.14 ASTM E 8M – 04 ‘e göre test numunesi boyutları[33]

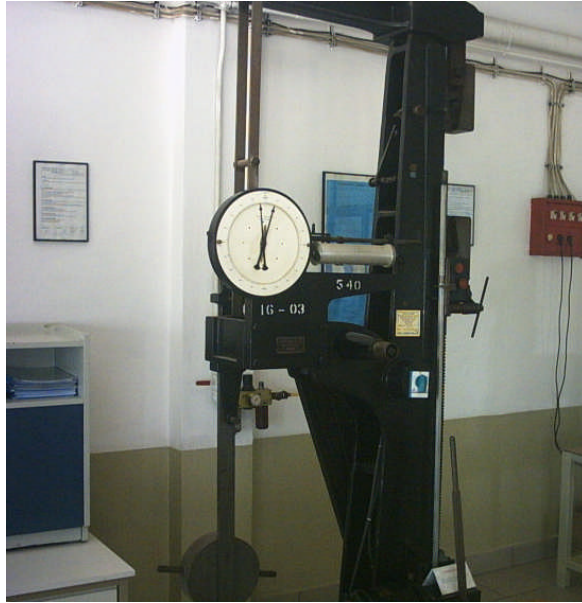
Tablo 4.3 ASTM E 8M – 04 ‘e göre test numunesi boyutları[33]

A	B	C	W	G	L	R	T
93mm	50mm	20mm	12.5mm	80mm	200mm	3,5mm	3mm

Hadde yönünde ve hadde yönüne dik kesilerek hazırlanmış toplam 6 adet çekme numunesi (Şekil 4.15 ) ; iki ton yük kapasiteli, analog ve standart bir çekme cihazında test edilmiştir. (Şekil 4.16) Her bir numune tipinden üçer adet parça yaklaşık 2 mm/ dak ‘lık çekme hızı altında teste tabi tutulmuştur. Numunelerin çekme testlerinden elde sonuçlar Tablo 4.4 ‘ te gösterilmiştir .



Şekil 4.15 ASTM E 8M – 04 ‘e göre hazırlanmış alüminyum çekme numunesi



Şekil 4.16 Çekme deney cihazı

Maksimum çekme mukavemeti ;

$$\sigma_{tu} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (4.1)$$

formülüyle hesaplanmıştır [4]. Bu formülde ;

$$\sigma_{tu} = \text{Maksimum çekme mukavemeti (MPa)}$$

$$F_{\max} = \text{Maksimum kuvvet (N)}$$

$$A = \text{Kesit alanı (mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_{ty} = \text{Akma mukavemeti (MPa)}$$

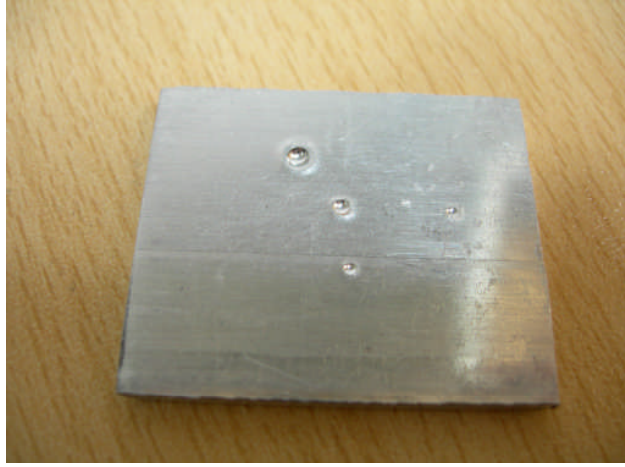
Tablo 4.4 Çekme deneyi sonuçları

Numune	Akma Kuv. ( $F_{ty}$ ) (kN)	Akma Muk. $\sigma_{ty}$ (MPa)	Çekme Kuv. ( $F_{tu}$ ) (kN)	Çekme Muk. $\sigma_{tu}$ (MPa)	% Uzama	Ort.Çekme Muk. (MPa)
Hadde Yönünde	4,5	120	4,76	127	9	126
	4,46	119	4,72	126	9	
	4,53	121	4,72	126	8	
Hadde Yönüne Dik	4,38	117	4,65	124	9	124
	4,5	120	4,61	123	7	
	4,42	118	4,65	124	9	

1100-H14 alüminyum malzemesinin [www.MatWeb.com](http://www.MatWeb.com) [31] internet adresinde çekme deneyi sonuçları ; ortalama akma mukavemeti : 120 MPa , ortalama çekme mukavemeti : 126 MPa ve ortalama % uzama : 9 olarak verilmiştir [31].

#### 4.4 Sertlik Testleri ve Sonuçları

Alüminyum numunelerin sertlik testleri ; TS – EN 485-2 [32] standartlarına uygun olarak Balıkesir 1012 Ana Tamir Fabrikası Fizik-Kimya laboratuvarında yapılmıştır. Hadde yönünde ve hadde yönüne dik kesilmiş alüminyum numunelerin yüzeyinde üçer noktadan Brinell Sertlik değeri ölçülmüştür.(Şekil 4.17 )



Şekil 4.17 Brinell sertlik deney numunesi

Brinell sertlik deneyi Şekil 4.18 ‘ de gösterilen test cihazı ile yapılmıştır.



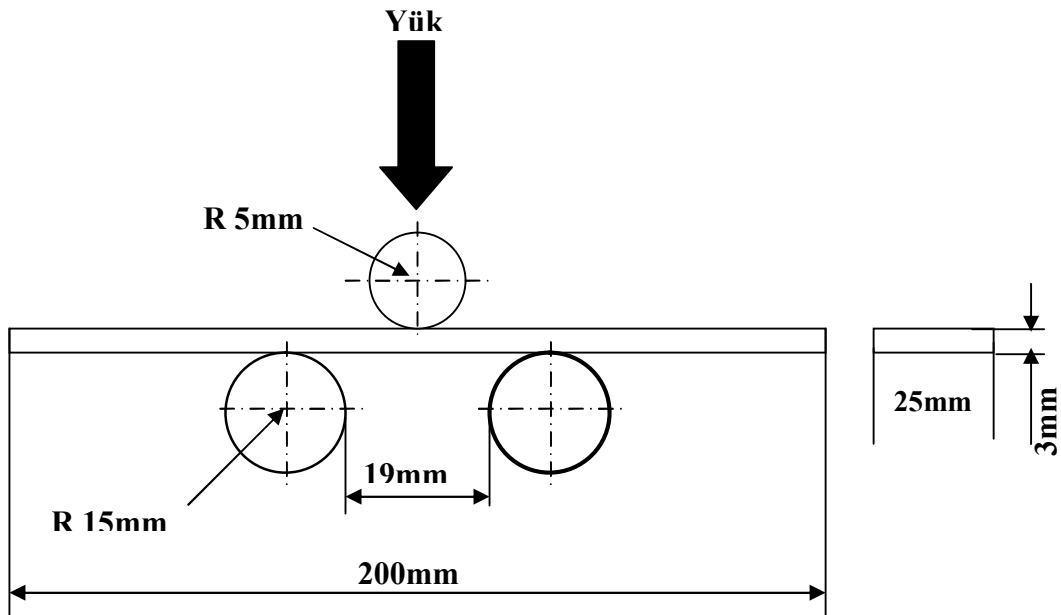
Şekil 4.18 Brinell sertlik test cihazı



Brinell sertlik deneyi sonucunda alüminyum numunenin ortalama 32 HB Brinell sertlik değerinde olduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarının [www.MatWeb.com](http://www.MatWeb.com) internet adresindeki 1100-H14 alüminyum malzemesinin ortalama sertlik değeri (32 HB) ile aynı olduğu tespit edilmiştir [31].

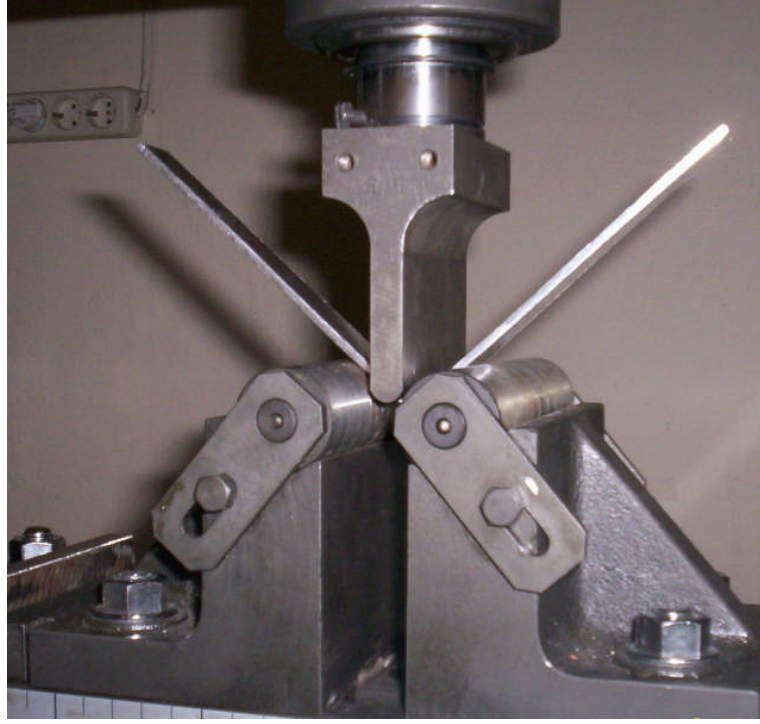
#### 4.5 Üç Noktadan Eğilme Testleri ve Sonuçları

Numunelerin statik olarak maksimumu eğilme gerilmelerini bulabilmek için üç noktadan eğilme testleri yapılmıştır. Üç noktadan eğilme testleri için ISO 7438 :2005(E) ( Metallic Materials – Bend Test ) standardına uygun olarak Şekil 4.19 ' da verilen numune boyutları kullanılmıştır [34].



Şekil 4.19 ISO 7438 : 2005 (E) 'ye göre test numunesi boyutları

Hem haddeme yönünde hemde hadde yönüne dik kesilmiş numuneler 9 Eylül Üniversitesi Fizik Laboratuvarında üç noktadan eğme test cihazı ile test edilmiştir. (Şekil 4.20) Her iki gruptan üçer adet numune teste tabi tutulmuştur.



Şekil 4.20 Üç noktadan eğme test cihazı

Maksimum eğilme gerilmesi için [ 4, 35 , 36]

$$\sigma_e = \frac{3FL}{2BH^2} \quad (4.2)$$

formülleri kullanılmıştır. Burada ;

$\sigma_e$  = Orta noktada oluşan maksimum eğilme gerilmesi (MPa)

F = Maksimum eğme yükü (N)

L = Destek mesafesi (mm )

B = Numune genişliği ( mm )

H = Numune kalınlığı ( mm )

Üç noktadan eğme testi sonuçları Tablo 4.5 'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5 Üç noktadan eğme testi sonuçları

Numune	Genişlik ( B ) ( mm )	Yükseklik ( H ) ( mm )	Eğme yükü ( F ) ( N )	Max. Gerilme ( $\sigma_e$ ) ( MPa )	Ort Gerilme ( $\sigma_e$ ) ( MPa )
Hadde Yönünde	25	3	947,37	120	120
	25	3	955,26	121	
	25	3	931,58	118	
Hadde Yönüne Dik	25	3	915,79	116	117
	25	3	923,68	117	
	25	3	931,58	118	

#### 4.6 Eğilme Yorulması Testleri

Eğilme yorulması testleri sonucu amaç , malzeme yorulması için en kötü hal olan tam değişken (  $R = -1$  ) yükleme halinde her bir alüminyum numune için S-N eğrilerini oluşturmak ve numunelerin yorulma kırılması yüzeylerini incelemektir.

##### 4.6.1 Yorulma Testi Numuneleri

Yorulma testleri için kullanılacak numunelerin ; spektrum analiz testi , çekme testi , sertlik testi ve üç noktadan eğilme testi verileri [www.MatWeb.com](http://www.MatWeb.com) internet sitesindeki sınıflandırılmış alüminyum alaşımlarının kimyasal ve mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak , yorulma testi numunelerinin Alüminyum 1100-H14 olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.21’de hadde yönüne paralel ve Şekil 4.22 ‘de hadde yönüne dik kesilmiş alüminyum numuneler gösterilmiştir.

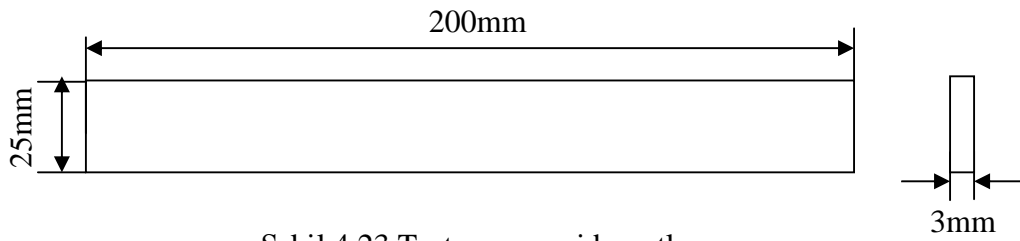


Şekil 4.21 Hadde yönüne paralel kesilmiş numune



Şekil 4.22 Hadde yönüne dik kesilmiş numune

Şekil 4.23 'de üç noktadan eğme testleri için kullanılan ISO 7438 : 2005(E) (Metalic Materials –Bend Test) standardındaki boyutlara benzer olarak hazırlanmış test numunesinin boyutları gösterilmiştir. Hadde yönüne paralel ve hadde yönüne dik kesilerek hazırlanmış plaka şeklindeki test numunelerinin boyutları aynıdır .



Şekil 4.23 Test numunesi boyutları

#### 4.6.2 Test Parametreleri

Deney sırasındaki test parametreleri aşağıdaki gibi sıralanabilir :

1. Gerilme Durumu : Zıt yönlü düzlemsel eğme gerilmesi uygulanmıştır. Tüm deney numuneleri aynı şartlar altında genlik ( sehim ) değişimi yapılarak yorulma deneyine tabii tutulmuştur.

2. Genlik : 10 mm , 8 mm , 6.4 mm , 5.12 mm , 4 mm , 3.2 mm , 2.56 mm , 2 mm , 1.6 mm , 1.3 mm genliklerde beşer adet numune yorulularak kırılmıştır.

3. Numune Çeşidi : Aynı malzemeden haddeleme yönüne paralel ve haddeleme yönüne dik kesilerek hazırlanmış iki grup numune kullanılmıştır.

4. Isıl İşlem Durumu : Herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır.

5. Sıcaklık : Deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır.

6. Numune Boyutu : Kullanılan deney numunelerinin boyutları sabittir. Numune boyutları Şekil 4.23 ' de belirtilmiştir.

7. Frekans : Deney esnasında frekans 70 Hz 'de sabit tutulmuştur. Yorulma cihazının dönen ana milinin 4275 dev/dak ile dönmesi sağlanmıştır.

#### 4.6.3 Yorulma Testinin Analizi

Eğilme yorulması testi , genlik ( sehim ) kontrollü yorulma testidir. Bu nedenle yorulma deneylerine başlayabilmek için numuneye uygulanacak maksimum genlik (sehim) değerinin hesaplanması gerekmektedir.

Ankastre kiriş türü bağlantı için maksimum genlik değeri (4.3) ve (4.4) formülleri kullanılarak hesaplanmıştır [35 ,36].

$$\sigma_e = \frac{6.F_e.l}{B.H^2} \quad (4.3)$$

formülü ile numuneye etki eden maksimum eğilme kuvveti hesaplanmıştır. Bu formüldeki maksimum eğilme gerilmesi ( $\sigma_e$ ) , literatür [4 , 22]'deki gibi üç noktadan eğilme testi sonucunda elde edilen ortalama eğilme gerilmesidir. Hadde yönüne paralel kesilen numunelerde  $\sigma_e$  : 120 MPa , hadde yönüne dik kesilen numunelerde  $\sigma_e$  : 117 MPa olarak belirlenmiştir.

- $F_e$  : Eğilme kuvveti (N)  
 $l$  : Moment kolu (mm) , moment kolu bütün numuneler için 160 mm olarak belirlenmiştir.  
 $B$  : Numune genişliği (mm), bütün numuneler için 25 mm olarak belirlenmiştir.  
 $H$  : Numune kalınlığı (mm) , bütün numuneler için 3 mm olarak belirlenmiştir.

$$f = \frac{F_e.l^3}{3.E.I} \quad (4.4)$$

- $f$  : Genlik (mm)  
 $F_e$  : Eğilme kuvveti (N)  
 $l$  : Moment kolu (mm) , moment kolu bütün numuneler için 160 mm olarak belirlenmiştir.  
 $E$  : Elastikiyet modülü ( daN/cm<sup>2</sup>) , Al 1100-H14 malzemesinin elastikiyet modülü [www.MatWeb.com](http://www.MatWeb.com) [31] internet adresinden , E : 0,689x10<sup>6</sup> daN/cm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir.

- $I$  : Atalet momenti (mm<sup>4</sup>)

Dikdörtgen kesitli cisimlerin atalet momenti ,

$$I = \frac{B.H^3}{12} \quad (4.5)$$

formülü ile hesaplanır [36].

Bu formülde ,

I : Atalet momentini (mm<sup>4</sup>),

B : numune genişliğini (mm) ,

H : numune kalınlığını (mm) 'nı belirtmektedir.

Formül (4.3 ) ve (4.4 ) kullanılarak hesaplanan maksimum genlik (sehim) değeri , hadde yönüne paralel kesilmiş numuneler için 9.91 mm ve hadde yönüne dik kesilen numuneler için ise 9.66 mm olarak hesaplanmıştır. Her iki grup numunenin maksimum genlik değerleri birbirine çok yakın olduğundan deney esnasında maksimum genlik değeri her iki grup numune için de 10 mm olarak alınmıştır.

#### 4.6.4 Yorulma Testlerinin Yapılışı

Yorulma testi için gerekli olan maksimum genlik ( sehim ) miktarı , formül (4.3 ) ve (4.4) kullanılarak 10 mm olarak hesaplanmıştır. Hadde yönüne paralel ve hadde yönüne dik olarak kesilmiş alüminyum numunelerin ilk yorulma testleri maksimum genlik verilerek yapılmış ve S-N eğrilerinin çizimi için gerekli (N) tekrar sayısı tespit edilmiştir.

Her iki grup numune için , maksimum genlik değerinden %20 azaltılarak on ayrı genlik değeri için S-N değerleri elde edilmiştir.

Her bir genlik değeri için hem hadde yönünde kesilmiş hem de hadde yönüne dik kesilmiş numunelerden beşer adet numune yorulma testine tabii tutulmuştur. Deneyle süresince toplam 100 adet numune kırılmıştır.

Maksimum genlik değerinden %20 azaltılarak elde edilen ; 8 mm, 6.4 mm, 5.12 mm , 4 mm , 3.2 mm , 2.5mm , 2mm , 1.6 mm ve 1.3 mm genlik değerleri için tekrar sayısı ( N ) cihazdaki dijital sayaç ile elde edilmiştir.

Eğilme gerilmesi ( $\sigma_e$ ) değerleri ise sırayla formül (4.4) ve formül (4.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Öncelikle formül (4.4) kullanılarak eğilme kuvveti ( $F_e$ ) değeri hesaplanmış daha sonra formül (4.3) kullanılarak da eğilme gerilmesi ( $\sigma_e$ ) değerleri hesaplanmıştır.

#### **4.6.5 Yorulma Testi Sonuçları**

Yorulma testleri sonucu kırılan parçalardan elde edilen veriler Tablo 4.6 ve Tablo 4.7 de verilmiştir. Elde edilen S-N eğrileri ise Şekil 4.24 - Şekil 4.26 'de verilmiştir.

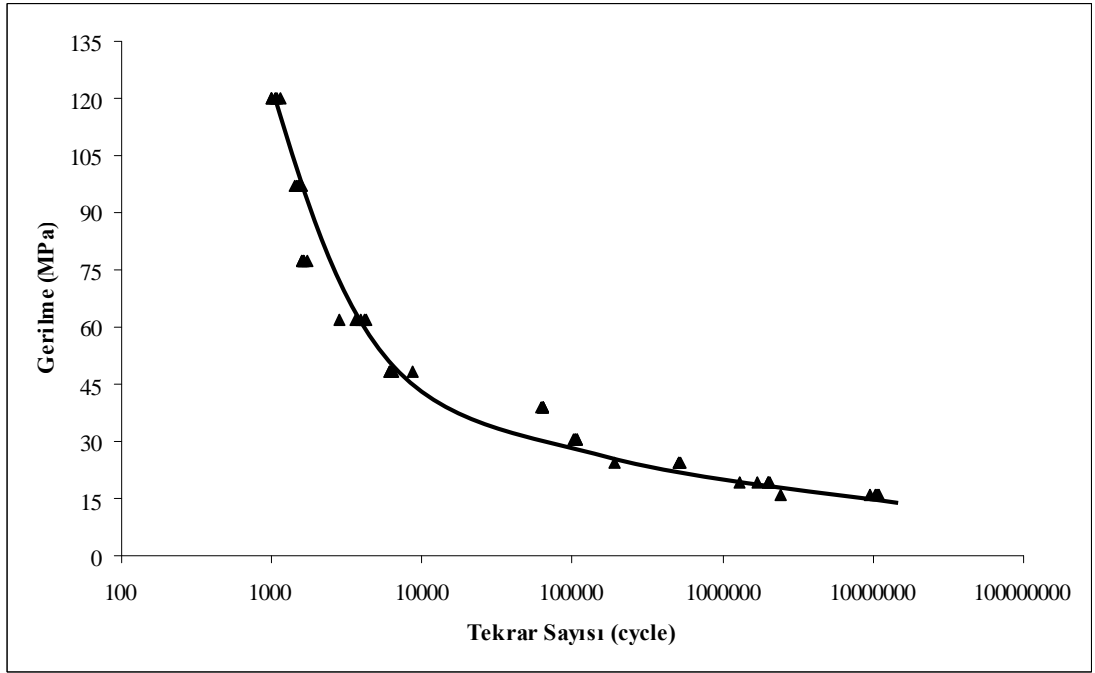


Tablo 4.6 Haddelenme yönünde kesilmiş alüminyum numunelerin S-N verileri

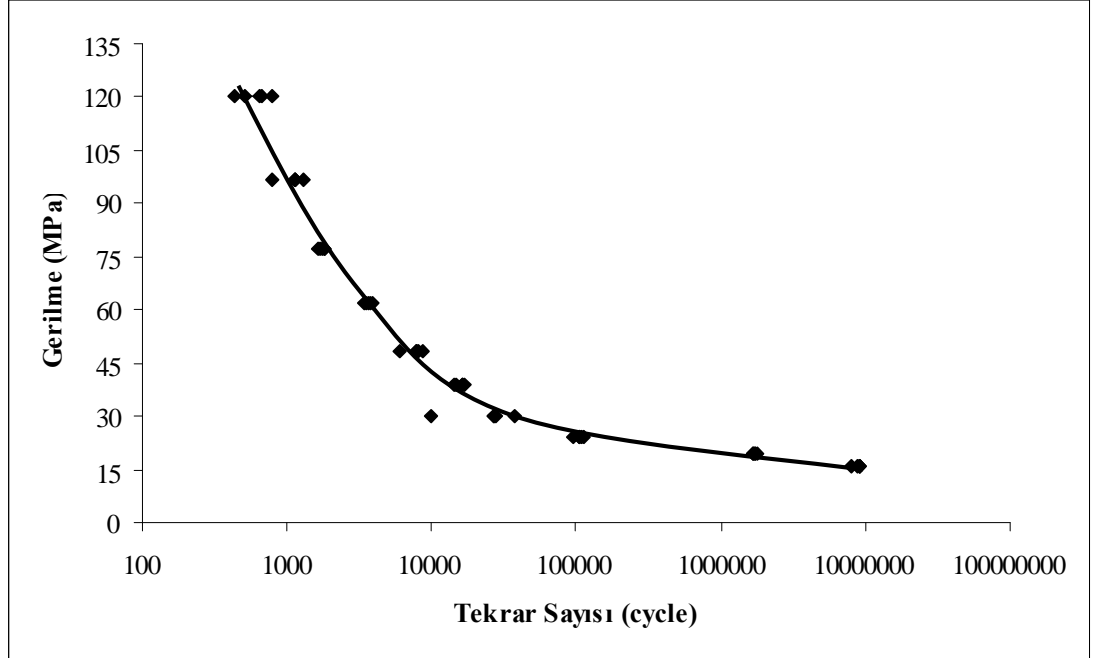
Numune	Genlik (mm)	Eğme Kuvveti F (Newton)	Yorulma Gerilmesi S ( Mpa)	Tekrar Sayısı N ( cycle )	Ort.Tekrar Sayısı N ( cycle )
1	10	28,13	120	998	1053
2				1140	
3				1068	
4				1065	
5				996	
1	8	22,7	96,853	1425	1488,6
2				1568	
3				1496	
4				1452	
5				1502	
1	6,4	18,16	77,482	1710	1626
2				1638	
3				1567	
4				1612	
5				1603	
1	5,12	14,53	61,99	4275	3749,2
2				2850	
3				3918	
4				3603	
5				4100	
1	4	11,35	48,42	6200	6655
2				6000	
3				6413	
4				8550	
5				6112	
1	3,2	9,08	38,74	64125	63478
2				61988	
3				64126	
4				63035	
5				64118	
1	2,56	7,09	30,25	104030	104566,8
2				106875	
3				102600	
4				106436	
5				102893	
1	2	5,68	24,23	513000	450664,2
2				192375	
3				525825	
4				512487	
5				509634	
1	1,6	4,54	19,37	1282500	18073824
2				2052000	
3				2010000	
4				1689412	
5				2003000	
1	1,3	3,69	15,74	10260000	10307252
2				2436750	
3				10773000	
4				10562000	
5				9634008	

Tablo 4.7 Haddelenme yönüne dik kesilmiş alüminyum numunelerin S-N verileri

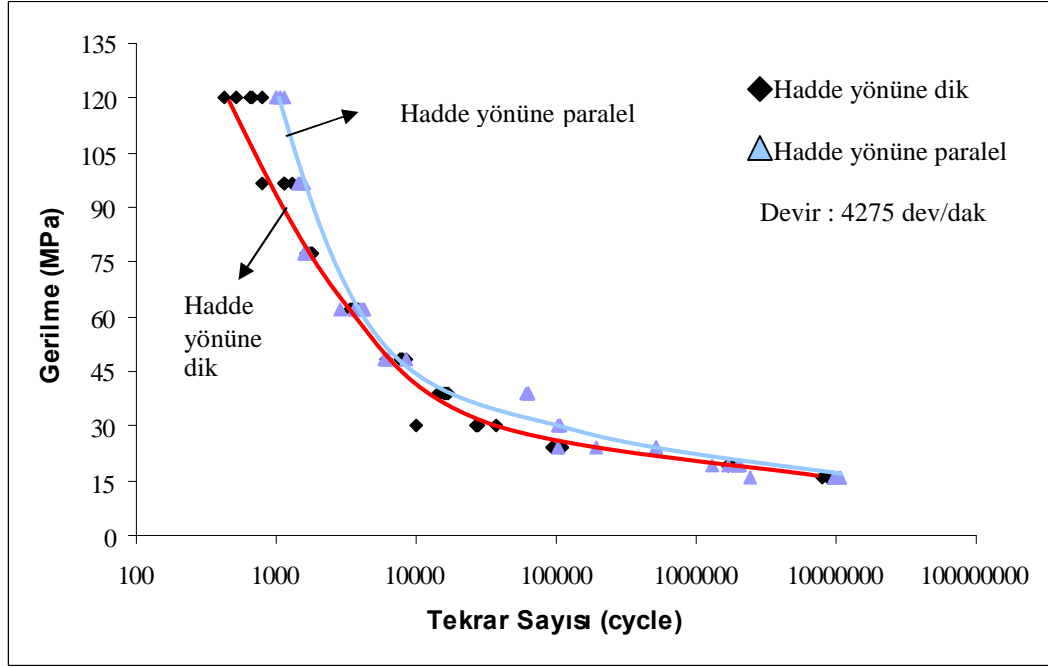
Numune	Genlik (mm)	Eğme Kuvveti F (Newton)	Yorulma Gerilmesi S ( Mpa)	Tekrar Sayısı N ( cycle )	Ort.Tekrar Sayısı N ( cycle )
1	10	28,13	120	784	609,4
2				643	
3				428	
4				514	
5				678	
1	8	22,7	96,853	784	1488,6
2				1140	
3				1283	
4				1152	
5				1148	
1	6,4	18,16	77,482	1710	1732,6
2				1782	
3				1782	
4				1636	
5				1753	
1	5,12	14,53	61,99	3848	3749,2
2				3491	
3				3633	
4				3718	
5				3398	
1	4	11,35	48,42	8550	7646,4
2				7980	
3				7908	
4				6038	
5				7756	
1	3,2	9,08	38,74	14250	63478
2				17100	
3				16103	
4				16509	
5				14658	
1	2,56	7,09	30,25	27888	25734,6
2				26719	
3				27075	
4				10006	
5				36985	
1	2	5,68	24,23	106875	105247
2				94050	
3				111150	
4				104062	
5				110098	
1	1,6	4,54	19,37	1795500	1716028
2				1710000	
3				1702659	
4				1689412	
5				1682571	
1	1,3	3,69	15,74	9234000	8847766
2				8721000	
3				9205678	
4				9112841	
5				7965312	



Şekil 4.24 Haddemeleme yönüne paralel kesilmiş alüminyum numunelerin S-N eğrileri



Şekil 4.25 Haddemeleme yönüne dik kesilmiş alüminyum numunelerin S-N eğrileri



Şekil 4.26 Haddelenme yönüne paralel ve dik kesilmiş alüminyum numunelerin S-N eğrilerinin kıyaslanması

#### 4.6.6 Yorulma Sonuçlarının Weibull İstatiksel Dağılımı ile Analizi

Mühendislikteki “güvenirlilik” terimi , bir ürünün veya sistemin özel bir zaman periyodunda , verilen çalışma şartları altındaki tasarım fonksiyonlarını yerine getirebilme olasılığına dayanır. Bu durum ise “hasara uğramadan çalışabileceği ömür olasılığı “ , “kırılmadan çalışma olasılığı” veya “kırılmadan devam edebileceği çalışma yüzdesi “ şeklinde açıklanır [4].

Yorulma testleri sonunda her bir genlik ( sehim ) değeri için ortalama 5 çevrim değeri ( tekrar sayısı ) bulunmuştur. Bu çevrim değerlerinin ortalaması yada karakteristik ortalama değeri için bölüm 3.3 ‘te anlatılan Weibull dağılım denklemleri kullanılmıştır. Bütün grup numunelerden elde edilen Weibull parametreleri Tablo 4.8 ve 4.9 ‘da , Weibull güvenirlilik değerleri ise Tablo 4.10 ve 4.11 ‘ de verilmiştir.

Yorulma testleri sonucunda elde edilen çevrim sayılarına ( tekrar sayılarına) karşılık oluşturulan Weibull grafikleri ve hasar olasılıklarını veren grafikler Şekil 4.27 ve 4.28 ‘ de verilmiştir. Ayrıca bütün numune grupları için kırılmama (ömürünü sürdürme) olasılıklarını gösteren grafikler Şekil 4.29 ‘ verilmiştir.

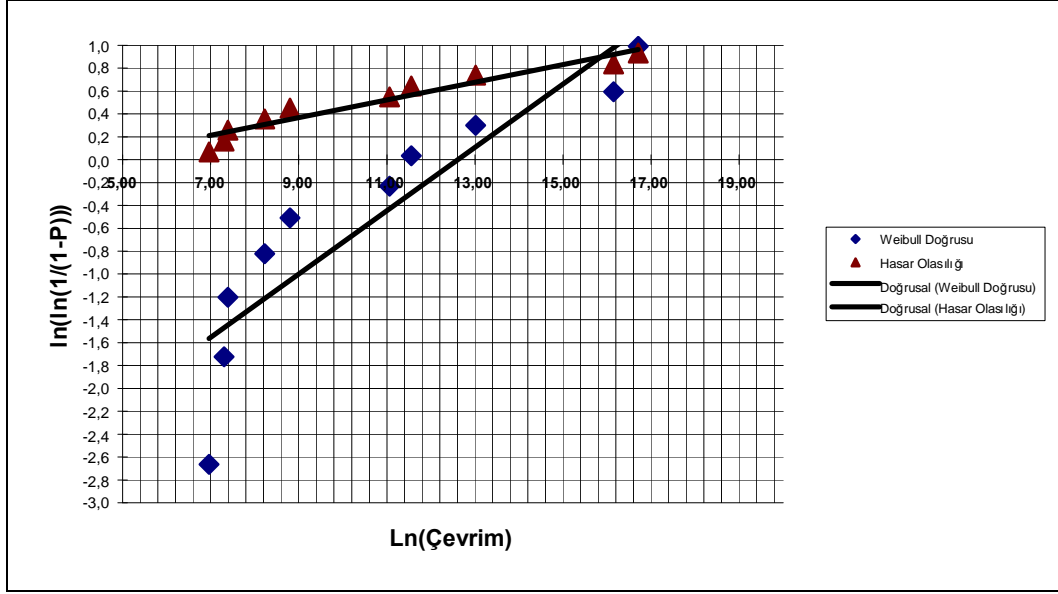
Bütün bulunan değerler ve grafikler , bölüm 3.3.1 ‘deki Weibull dağılım denklemleri kullanılarak Microsoft Excel yardımı ile bulunmuştur.

Tablo 4.8 Hadde yönüne paralel kesilmiş numuneler için Weibull parametreleri

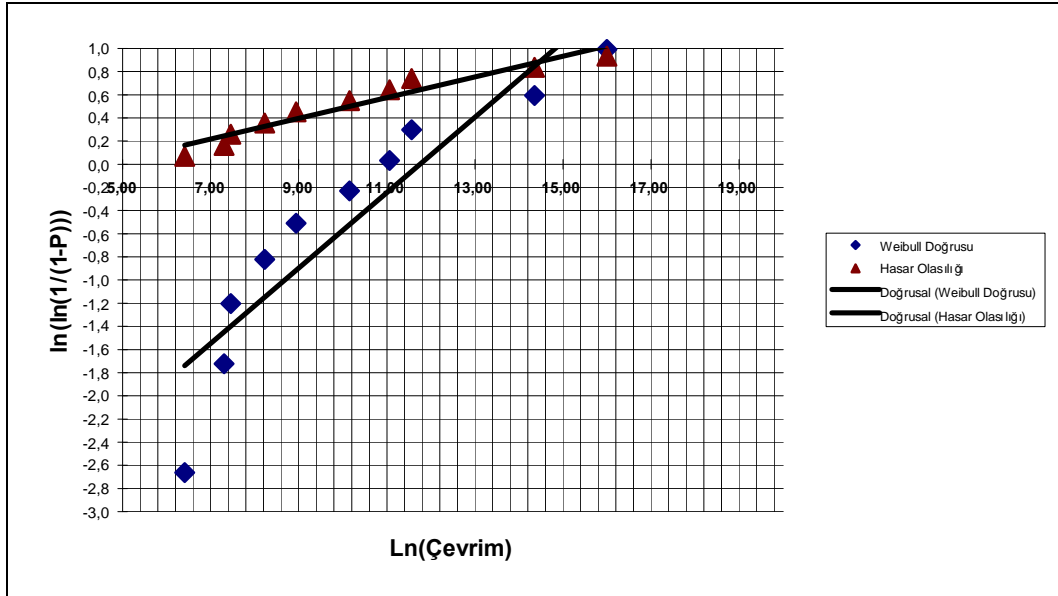
HADDE YÖNÜNE PARALEL						
Gerilme	Çevrim	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Çevrim)
120,000	1.053	1	0,067308	1,072165	-2,663843	6,959399
96,853	1.488	2	0,163462	1,195402	-1,723263	7,305188
77,480	1.626	3	0,259615	1,350649	-1,202023	7,393878
61,990	3.749	4	0,355769	1,552239	-0,821667	8,229244
48,420	6.655	5	0,451923	1,824561	-0,508595	8,803124
38,740	63.478	6	0,548077	2,212766	-0,230365	11,058449
30,250	104.566	7	0,644231	2,810811	0,032925	11,557574
24,230	450.664	8	0,740385	3,851852	0,299033	13,018477
19,370	10.307.252	9	0,836538	6,117647	0,593977	16,148358
15,740	18.073.824	10	0,932692	14,857143	0,992689	16,709975

Tablo 4.9 Hadde yönüne dik kesilmiş numuneler için Weibull parametreleri

HADDE YÖNÜNE DİK						
Gerilme	Çevrim	Sıra	P	1/(1-P)	ln(ln(1/(1-P)))	Ln(Çevrim)
120,000	609	1	0,067308	1,072165	-2,663843	6,411818
96,853	1.488	2	0,163462	1,195402	-1,723263	7,305188
77,480	1.732	3	0,259615	1,350649	-1,202023	7,457032
61,990	3.749	4	0,355769	1,552239	-0,821667	8,229244
48,420	7.646	5	0,451923	1,824561	-0,508595	8,941938
38,740	25.734	6	0,548077	2,212766	-0,230365	10,155568
30,250	63.478	7	0,644231	2,810811	0,032925	11,058449
24,230	105.247	8	0,740385	3,851852	0,299033	11,564065
19,370	1.716.028	9	0,836538	6,117647	0,593977	14,355523
15,740	8.847.766	10	0,932692	14,857143	0,992689	15,995676



Şekil 4.27 Hadde yönüne paralel kesilmiş numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri



Şekil 4.28 Hadde yönüne dik kesilmiş numuneler için Weibull ve hasar olasılığı grafikleri

Tablo 4.10 Hadde yönüne paralel kesilmiş numuneler için Weibull güvenirlilik değerleri

HADDE YÖNÜNE PARALEL				
Çevrim	Geriye Kalan Ömür İhtimali	Güvenirlilik	Güvenirlilik	Çevrim
0	0,0000	1,0000	0,01	74.344.428
1.000	0,1865	0,8135	0,1	6.079.943
10.000	0,3232	0,6768	<b>0,5</b>	<b>79.541</b>
100.000	0,5222	0,4778	0,9	88
150.000	0,5623	0,4377	0,99	0
250.000	0,6139	0,3861	<b>0,3679</b>	<b>298.851</b>
500.000	0,6843	0,3157		
1.000.000	0,7527	0,2473	<b>ALFA</b>	<b>BETA</b>
2.000.000	0,8159	0,1841	<b>298911</b>	<b>0,2768</b>
3.000.000	0,8495	0,1505		
4.000.000	0,8713	0,1287		
5.000.000	0,8871	0,1129		
6.000.000	0,8992	0,1008		
7.000.000	0,9088	0,0912		
8.000.000	0,9166	0,0834		
9.000.000	0,9232	0,0768		
10.000.000	0,9288	0,0712		
<b>298911</b>	<b>0,6321</b>	<b>0,3679</b>		

YarıÖmür

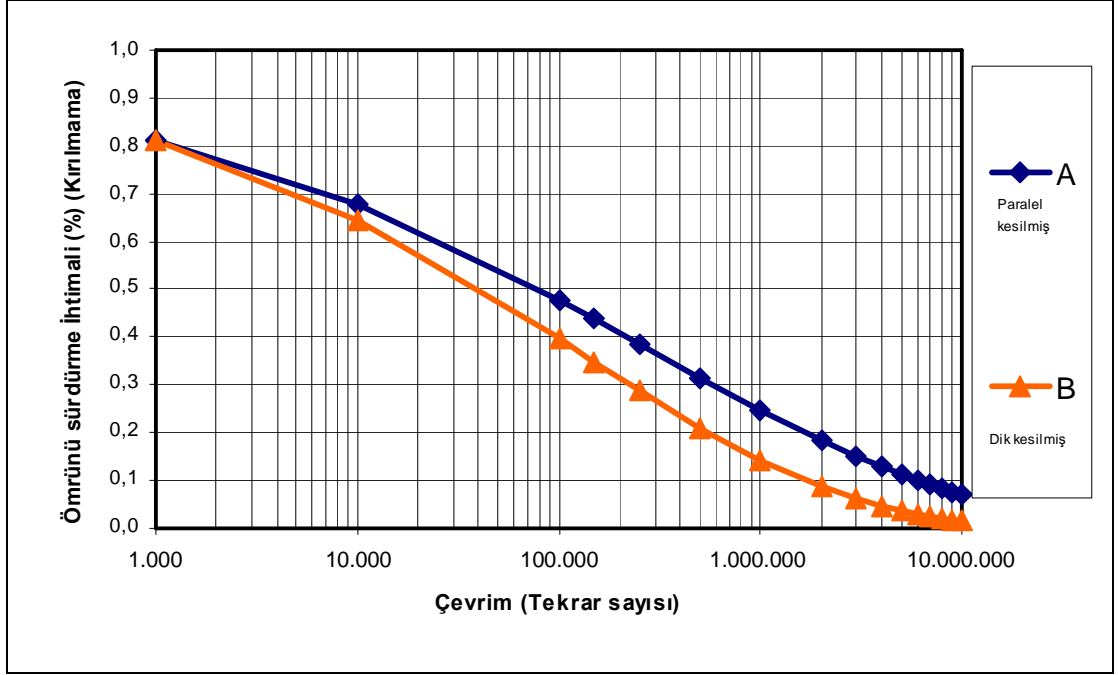
Karakteristik  
Ömür

Tablo 4.11 Hadde yönüne dik kesilmiş numuneler için Weibull güvenirlilik değerleri

HADDE YÖNÜNE DİK				
Çevrim	Geriye Kalan Ömür İhtimali	Güvenirlilik	Güvenirlilik	Çevrim
0	0,0000	1,0000	0,01	13.854.245
1.000	0,1865	0,8135	0,1	1.648.504
10.000	0,3539	0,6461	<b>0,5</b>	<b>41.290</b>
100.000	0,6033	0,3967	0,9	127
150.000	0,6518	0,3482	0,99	0
250.000	0,7123	0,2877	<b>0,3679</b>	<b>127.238</b>
500.000	0,7902	0,2098	<b>ALFA</b>	<b>BETA</b>
1.000.000	0,8587	0,1413	<b>127259</b>	<b>0,3256</b>
2.000.000	0,9139	0,0861		
3.000.000	0,9391	0,0609		
4.000.000	0,9537	0,0463		
5.000.000	0,9633	0,0367		
6.000.000	0,9700	0,0300		
7.000.000	0,9750	0,0250		
8.000.000	0,9787	0,0213		
9.000.000	0,9817	0,0183		
10.000.000	0,9841	0,0159		
<b>127259</b>	<b>0,6321</b>	<b>0,3679</b>		

Yarı Ömür

Karakteristik  
Ömür



Şekil 4.29 Bütün numune grupları için kırılmama ( ömrünü sürdürme) olasılıkları grafiği

**Yarı ömür** ; deneye tabi tutulan numunelerin % 50'sinin işe yaramaz hale geldiği ömürdür. Güvenirlik değeri 0.5 'e karşılık gelen çevrim değerinde bu gruba ait bütün test numunelerinin % 50 'sinin kırıldığını gösterir. Bu durumun güvenirliliği de 0.5 ( % 50) dir [4]. Haddelme yönüne paralel kesilmiş numunelerin *yarı ömrü* 79541 tekrar sayısı olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.10). Haddelme yönüne dik kesilmiş numunelerin *yarı ömrü* ise 41290 tekrar sayısı olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.11).

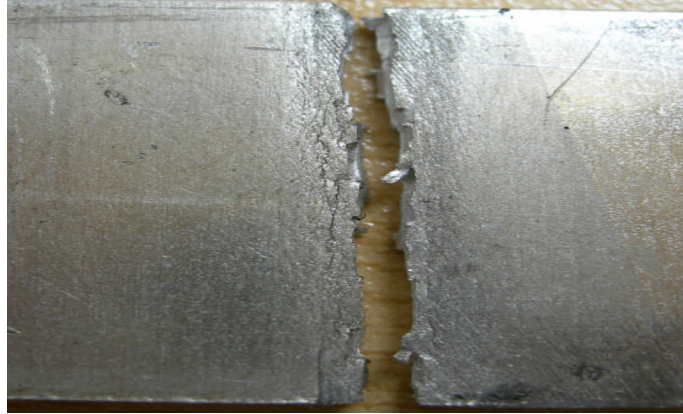
**Karakteristik ömür** ; deneye tabi tutulan numunelerin % 63.21'inin işe yaramaz hale geldiği ömürdür. Güvenirlik değeri 0.3679 'a karşılık gelen çevrim değerinde bu gruba ait bütün test numunelerinin % 63.21 'inin kırıldığını gösterir. Bu durumun güvenirliliği de 0.3679 ( % 36.79) dur [4]. *Karakteristik ömür* için % 63.21 değeri standart bir değerdir. Haddelme yönüne paralel kesilmiş numunelerin *karakteristik ömrü* 298851 tekrar sayısı olarak tespit edilmiştir. (Tablo 4.10). Haddelme yönüne dik kesilmiş numunelerin *karakteristik ömrü* ise 127238 tekrar sayısı olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.11).



Tablo 4.10 ve 4.11 deki güvenilirlik değerleri incelendiğinde % 99 güvenilirlik değerine karşılık gelen tekrar sayısının sıfır olduğu tespit edilmiştir. Bu durum 1100-H14 alüminyum levhasının yorulma sınırının olmadığına bir ispatı olarak değerlendirilebilir.

#### 4.6.7 Yorulma Kırılması Bölgelerinin İncelenmesi

Zıt yönlü eğme ( çekme – basma ) kuvvetleri etkisi altında yorulan 1100-H14 alüminyum numunelerin her iki dış yüzeyinde de ; basma kuvvetinin etkisi ile ezilmeler , çekme kuvvetinin etkisiyle de çatlamlar meydana gelmiştir. (Şekil 4.30 )



Şekil 4.30 1100-H14 Alüminyum numune yüzeylerindeki ezilme ve çatlamlar

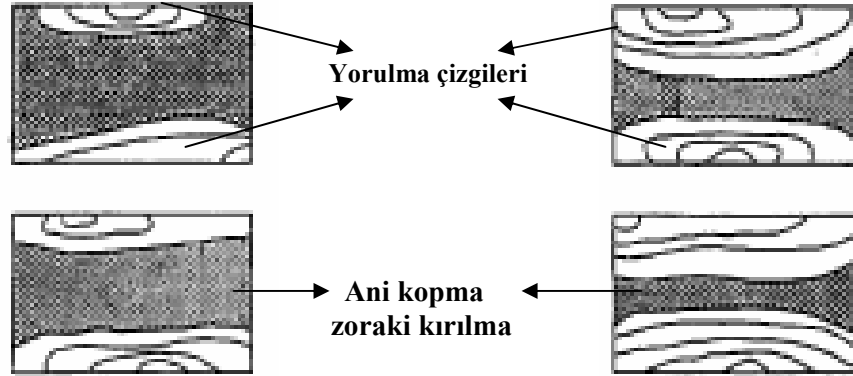
Tekrarlı zıt yönlü eğme kuvvetleri etkisi ile yorulan 1100-H14 alüminyum numunelerin , yorulma kırılması sonucu oluşan kırılma yüzeyleri Şekil 3.31 'de gösterilmiştir.

Dikdörtgen kesitli malzemelerin , zıt yönlü eğme yorulması kırılma yüzeylerinin şematik resimleri ( Şekil 4.32 ) [ 37] ile 1100-H14 alüminyum numunelerinin kırılma yüzeyleri resimleri kıyaslandığında ; yüzey görüntülerin benzerlik sağladığı gözlemlenmiştir.

Uygulanan zıt kuvvetlerin yönüne bağlı olarak , yorulma kırılması yüzeyinin her iki tarafında da yüzeyden merkeze doğru yorulma bölgelerinin oluştuğu , kırılma yüzeyinin merkezine yakın kısımlarda ise ani kopma (zoraki kırılma) bölgesinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

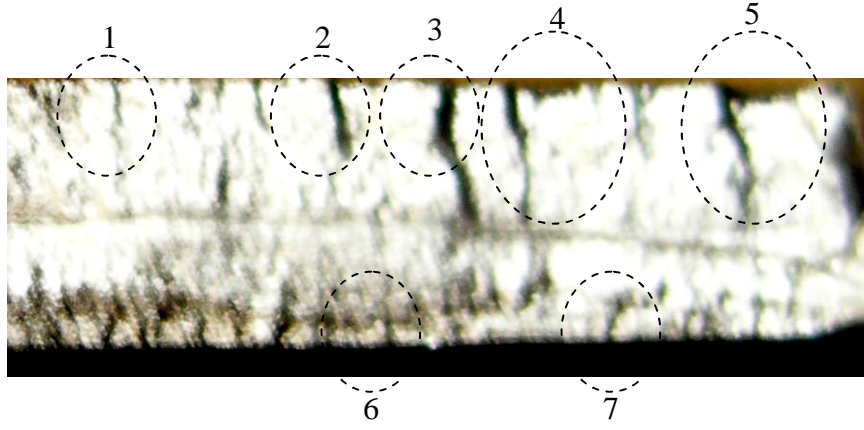


Şekil 4.31 1100-H14 alüminyum numunesinin yorulma kırılması yüzeyi

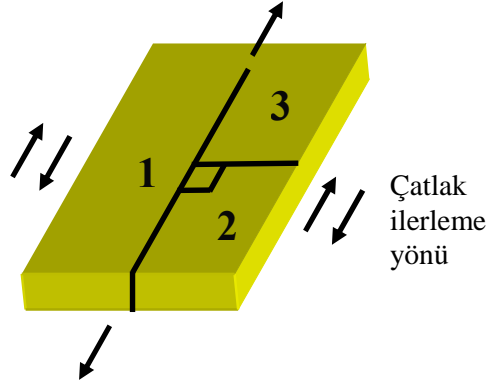


Şekil 4.32 Dikdörtgen kesitli numunelerin zıt yönlü eğme yorulması kırılma yüzeylerinin şematik resimleri [37].

1100-H14 alüminyum numunelerinin yorulma kırılması yüzeylerindeki çatlaklar incelendiğinde ; çatlakların kırılan yüzeyin her iki tarafında da birden fazla noktadan başladığı ve yüzeye dik açıyla ilerlediği gözlemlenmiştir. Şekil 4.33 'da kırılma yüzeyindeki çatlaklar gösterilmiştir.



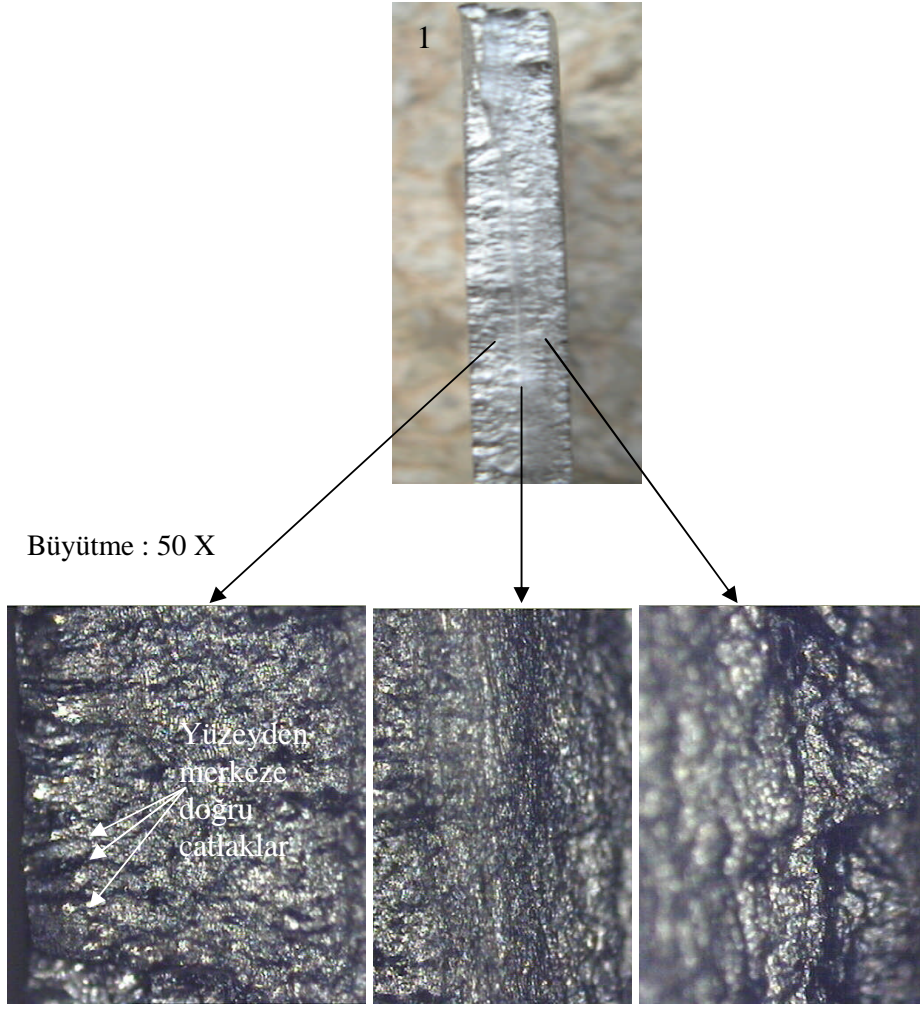
Şekil 4.33 Kırılma yüzeyindeki çatlaklar



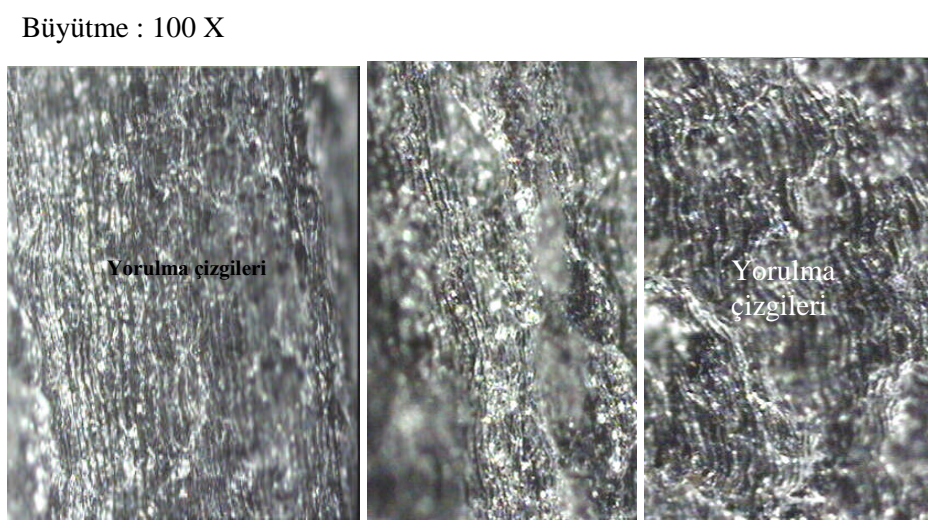
Şekil 4.34 Çatlak ilerleme yönü [38]

Çatlak , numunenin yüzeyinden başlıyor ve kırılan yüzeyin merkezine dik açı yapıyor ise çatlak ilerlemesi Şekil 4.34 'de gösterildiği gibi hem kuzey hemde güney yönünde olabilir [27,38].

1100-H14 alüminyum numunelerinin yorulma kırılması yüzeylerinin optik mikroskopta 50X ve 100X büyütülmüş makro fotoğrafları çekilmiştir. Çekilen makro fotoğraflar Şekil 4.35 – Şekil 4.46'de gösterilmiştir.



Büyütme : 50 X



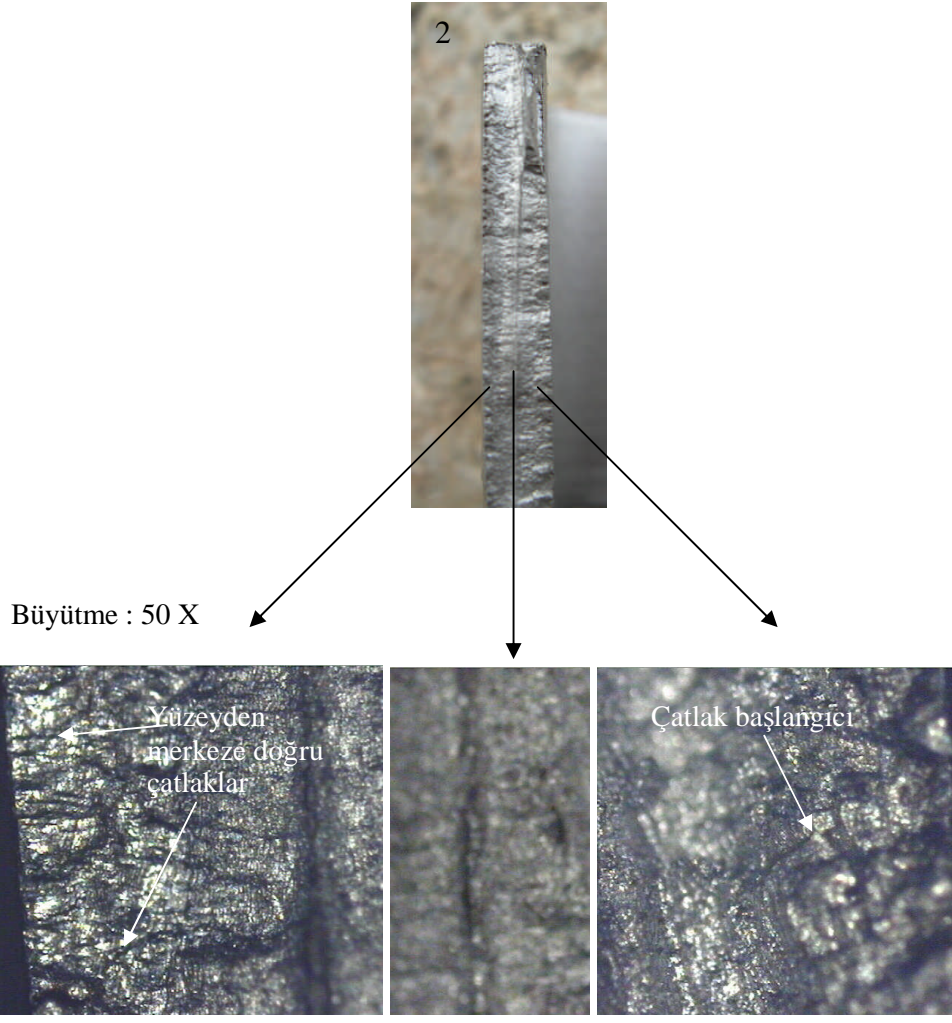
Büyütme : 100 X

Yorulma bölgesi

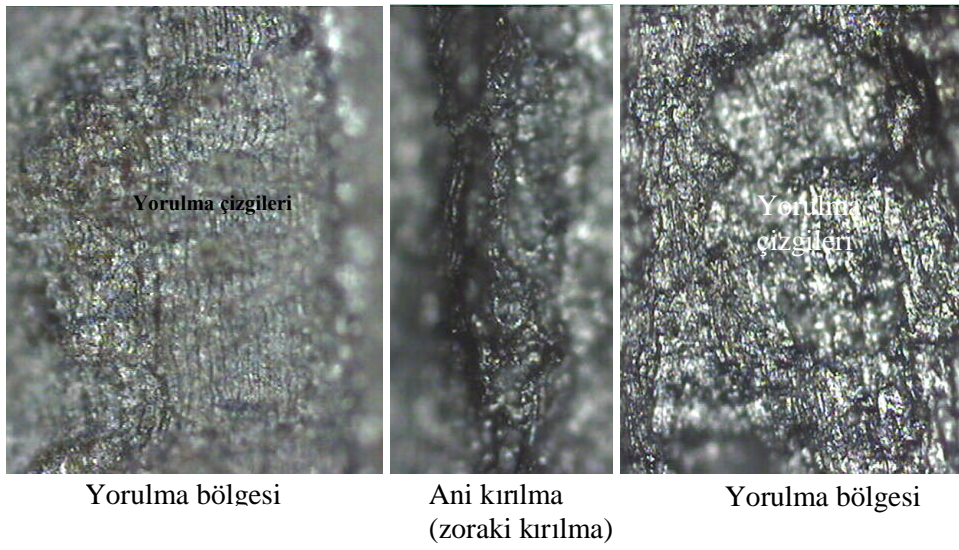
Ani kırılma  
(zoraki kırılma)  
bölgesi

Yorulma bölgesi

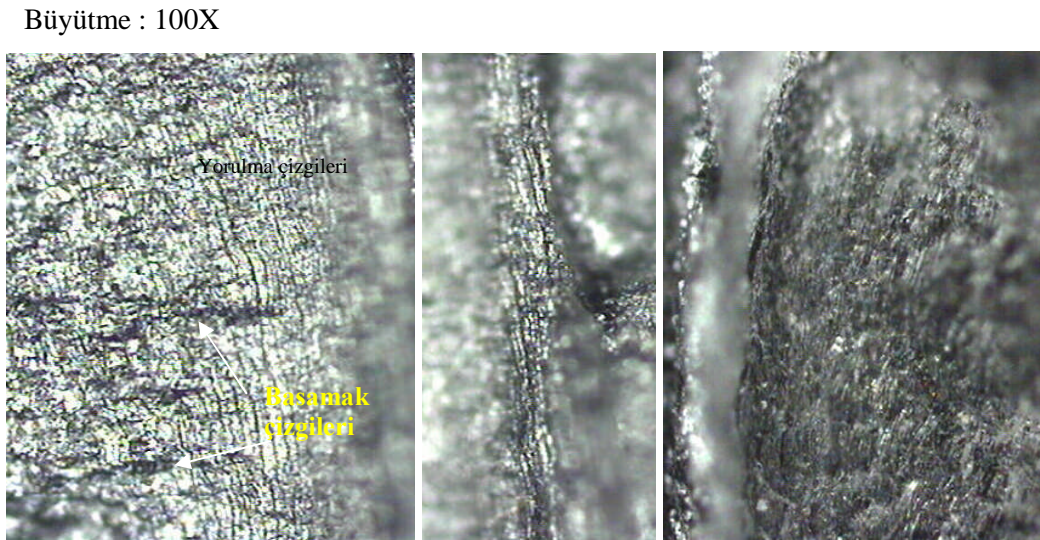
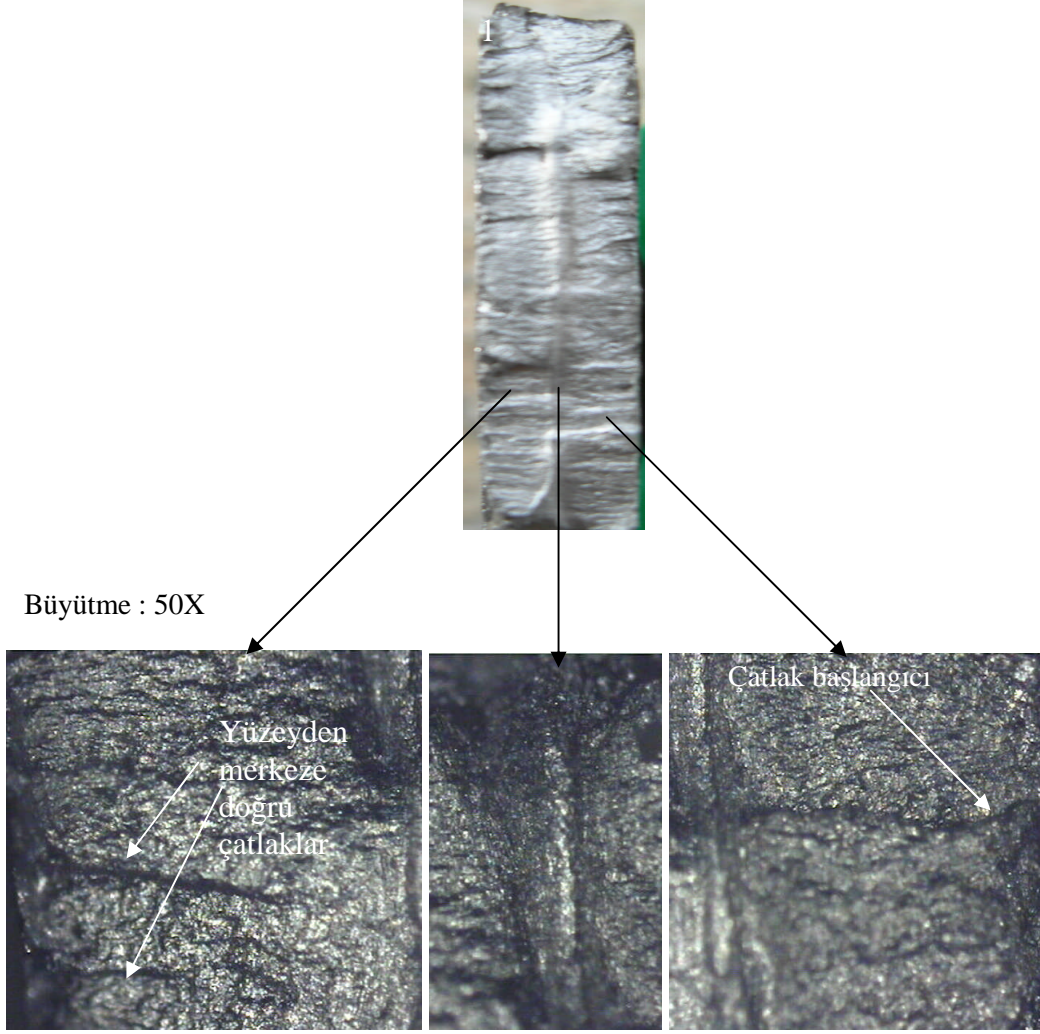
Şekil 4.35 10mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



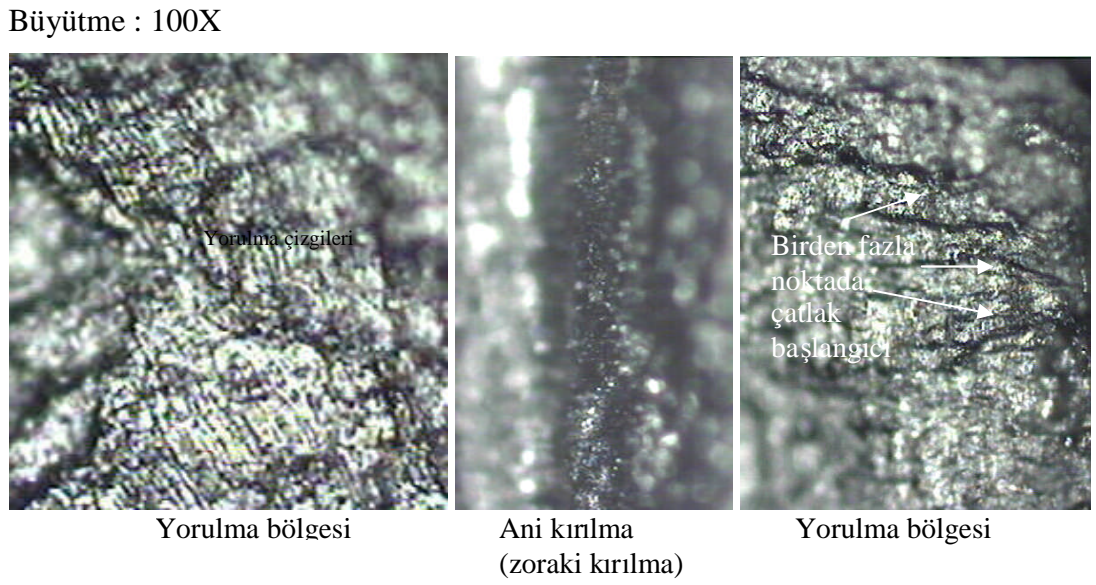
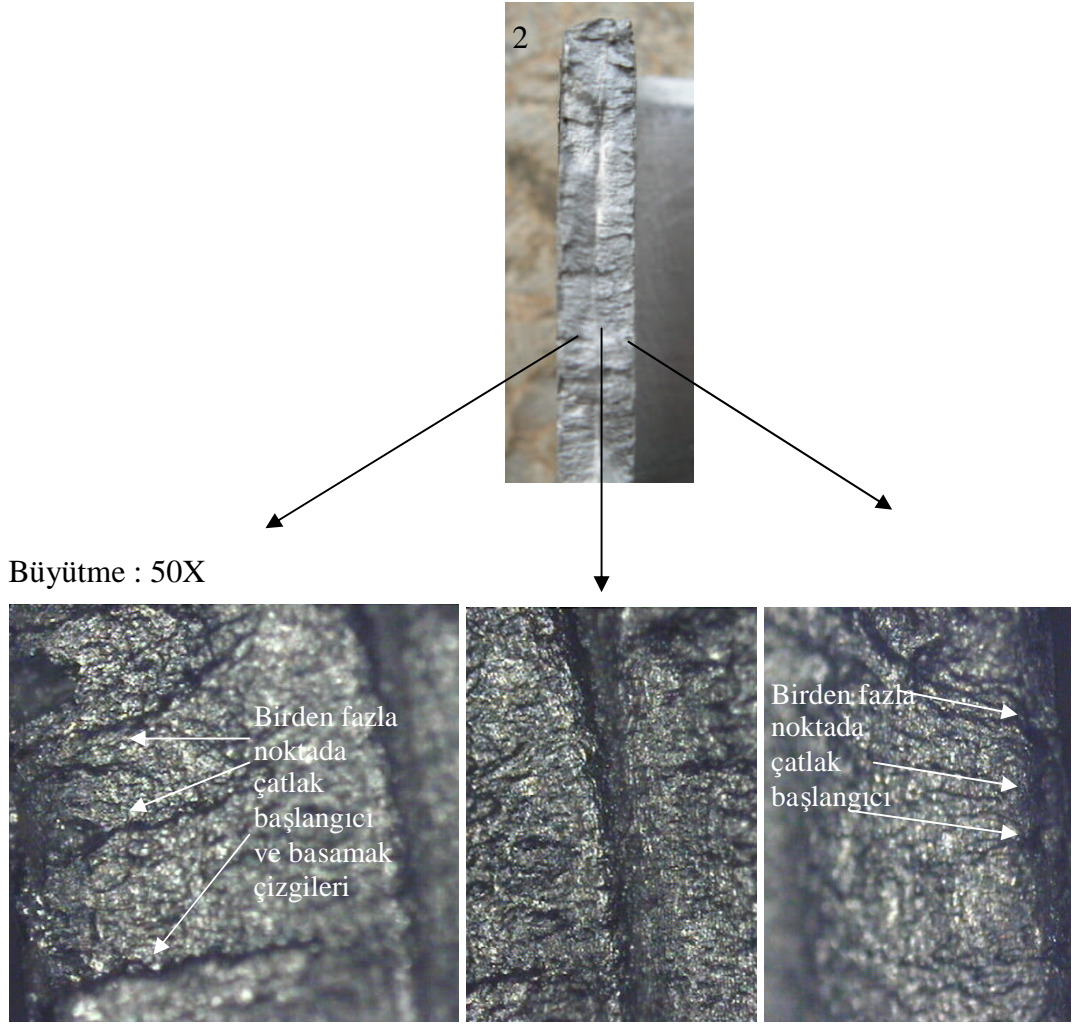
Büyütme : 100X



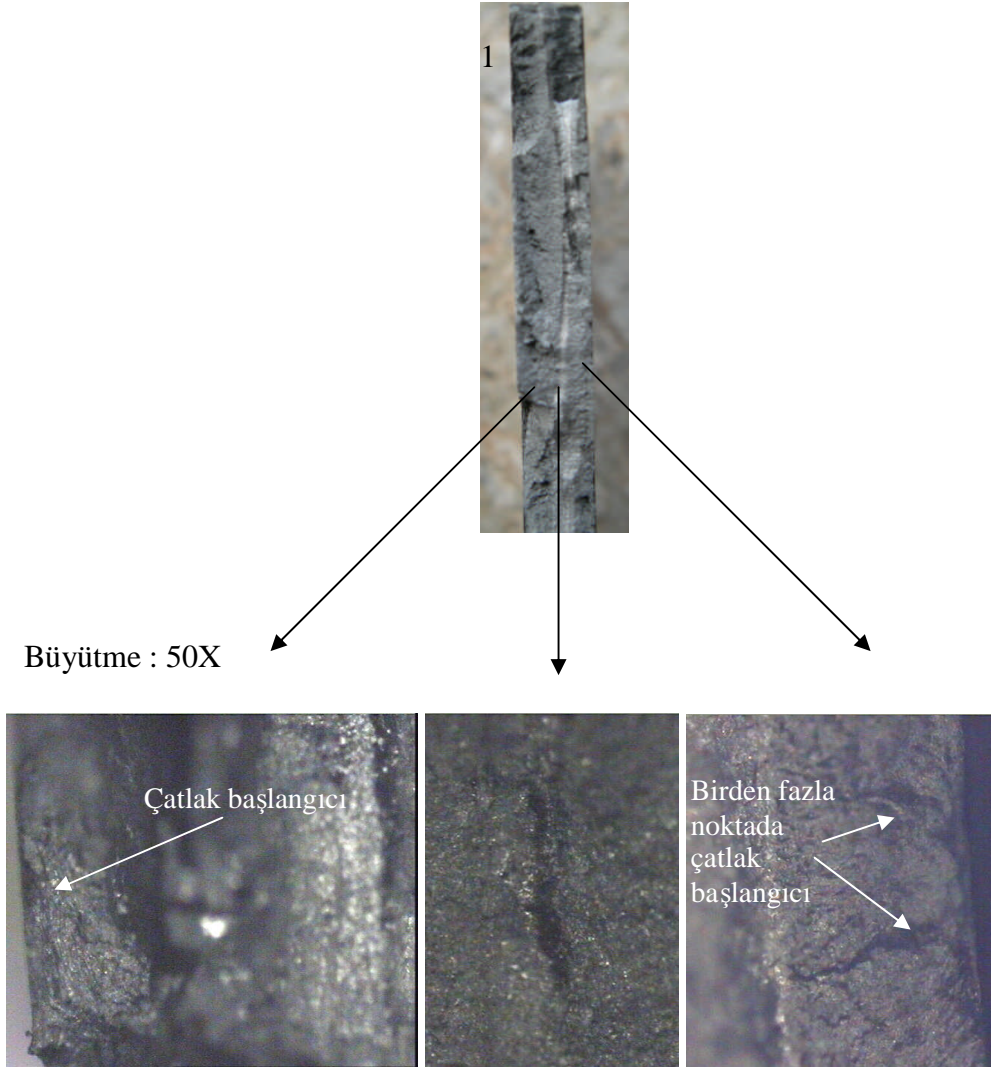
Şekil 4.36 10mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



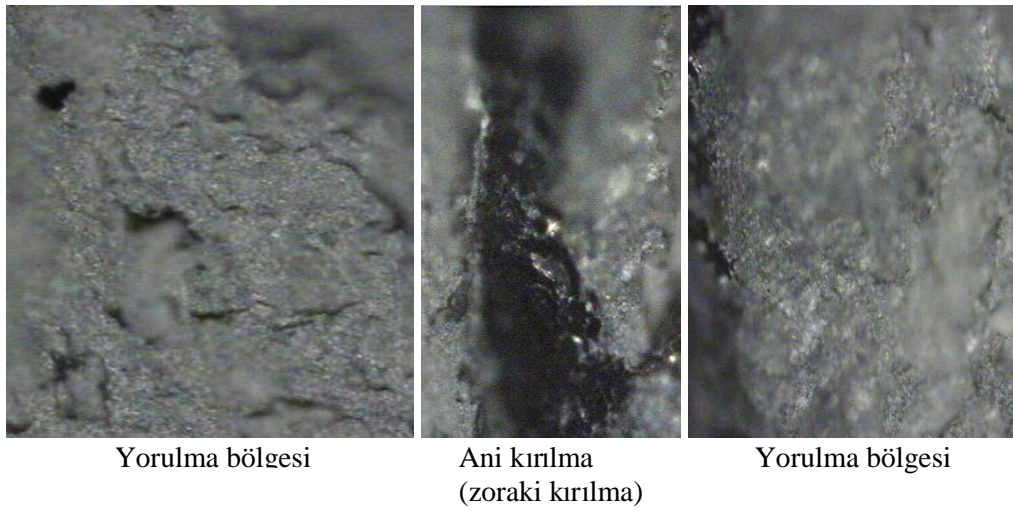
Şekil 4.37 4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



Şekil 4.38 4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları

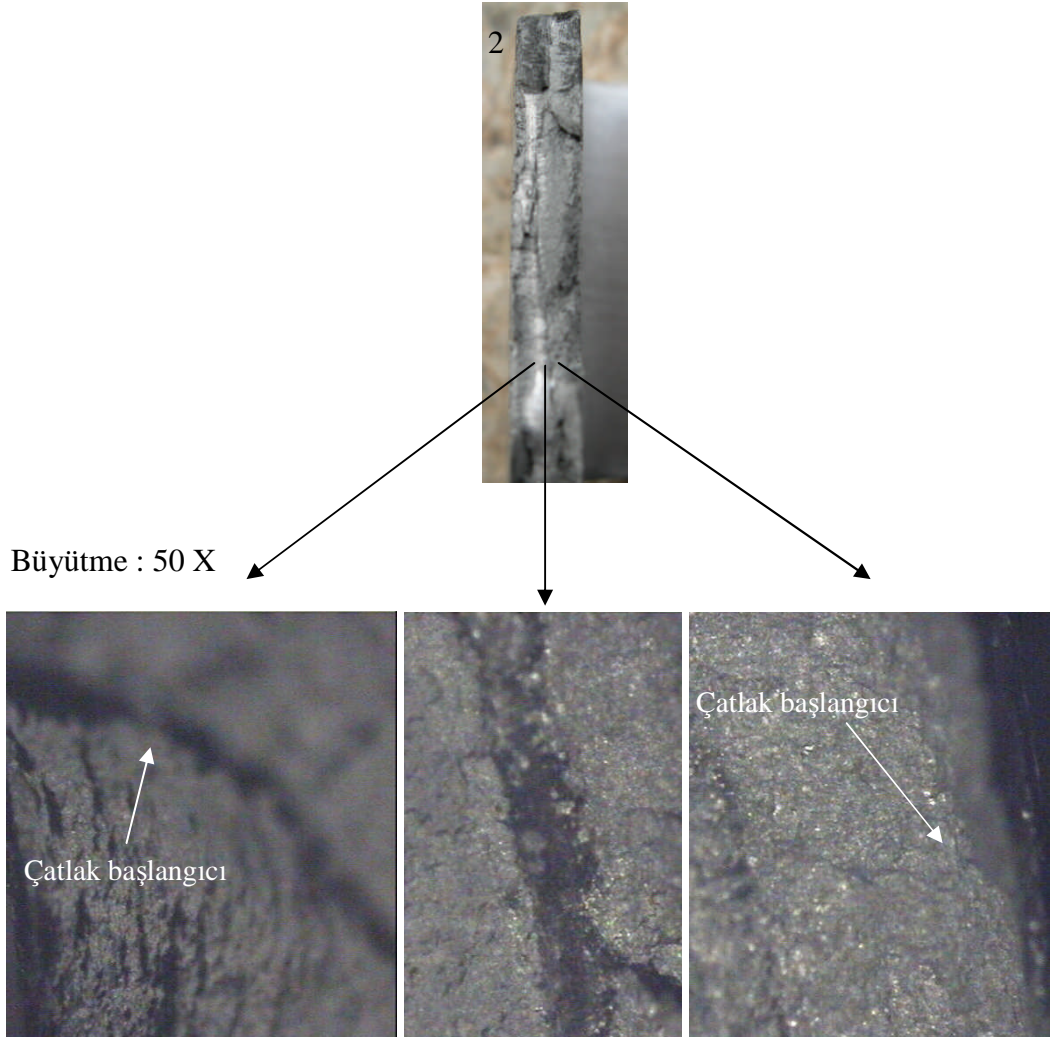


Büyütme : 100X

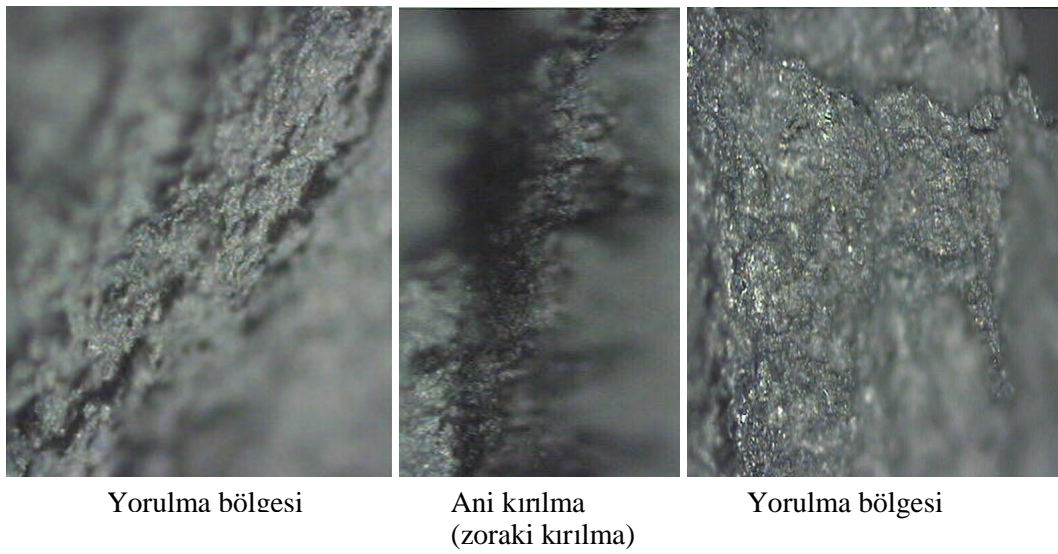


Şekil 4.39 1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları

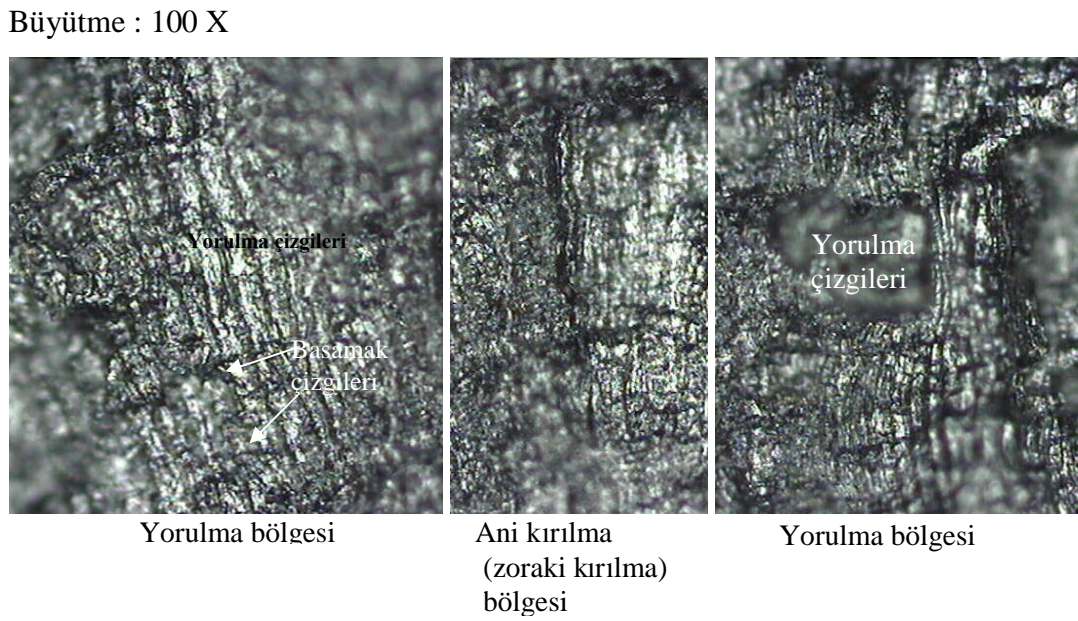
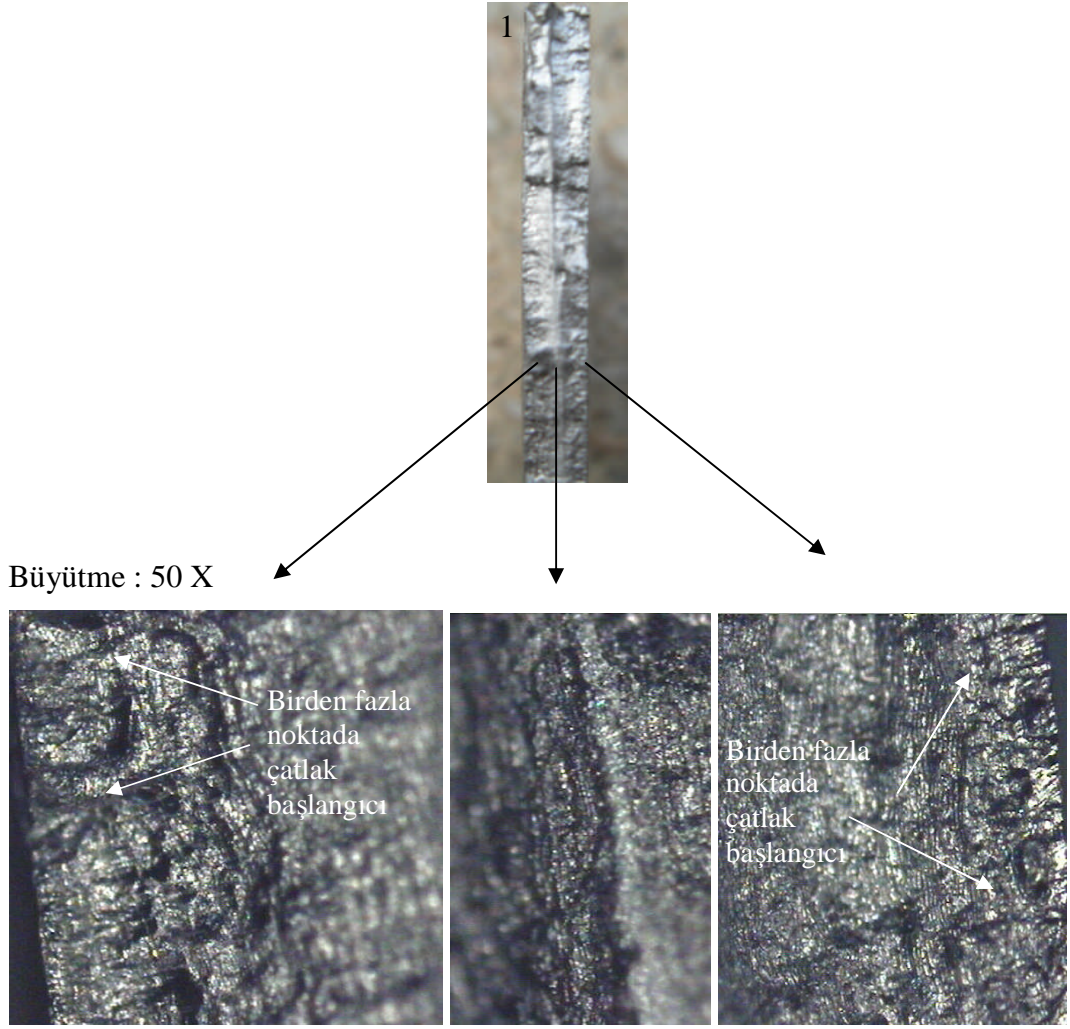




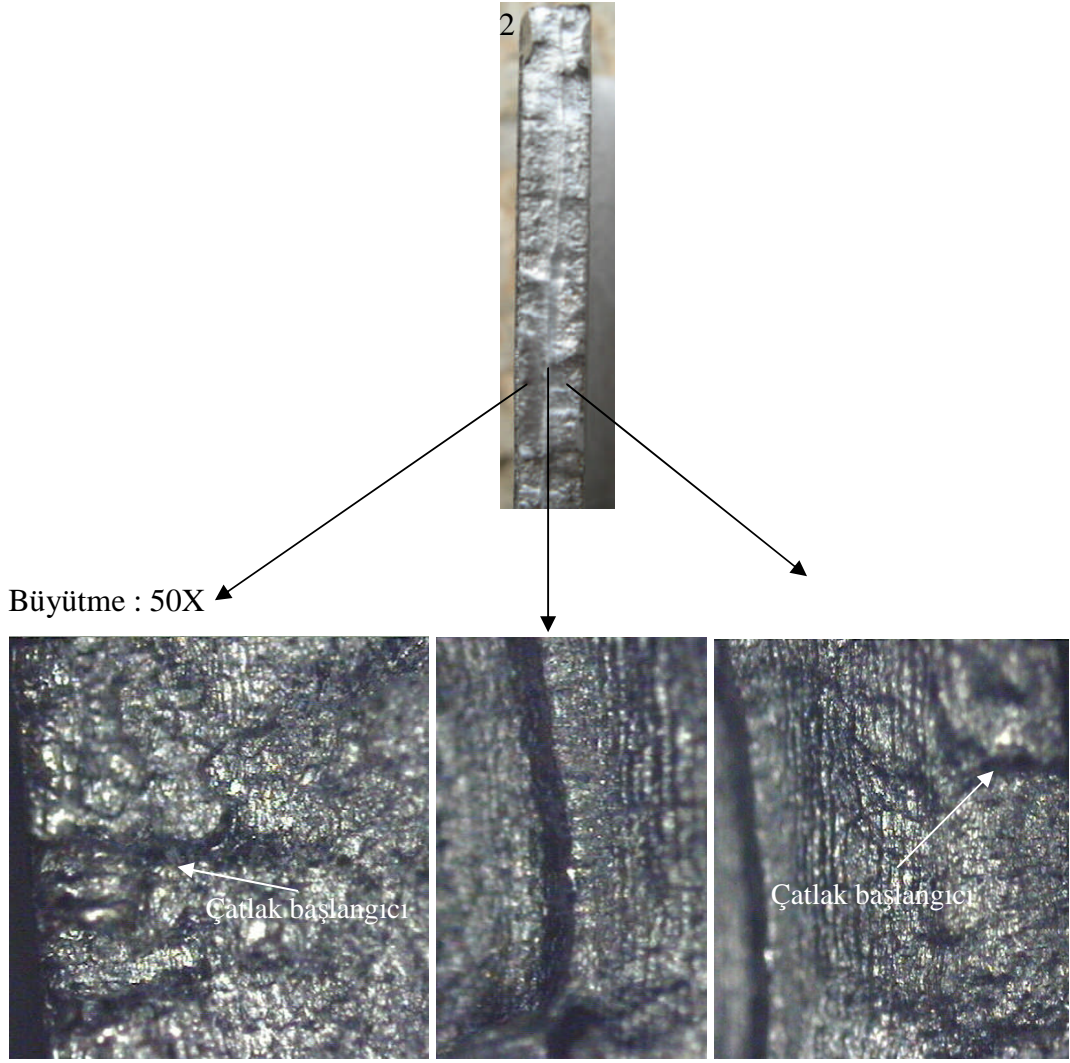
Büyütme : 100 X



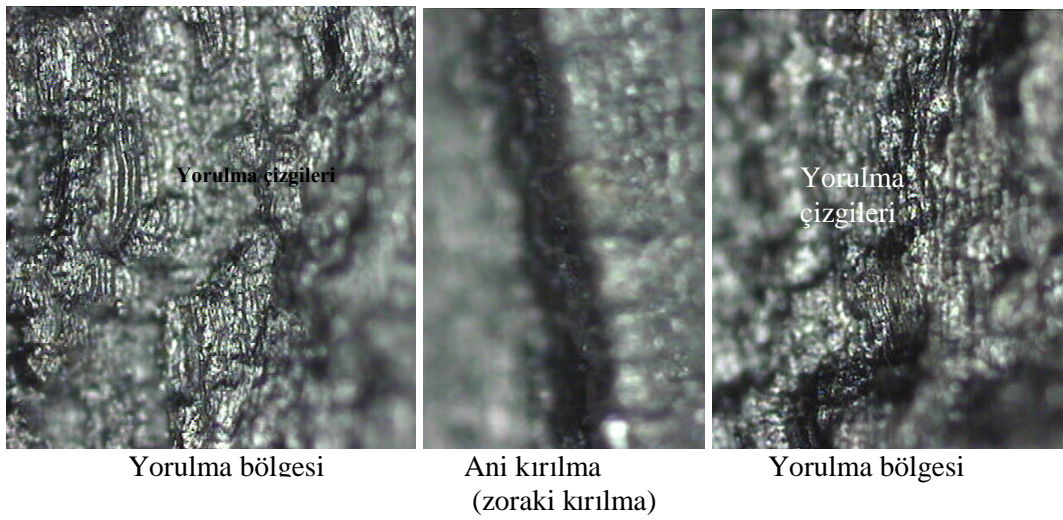
Şekil 4.40 1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne paralel 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



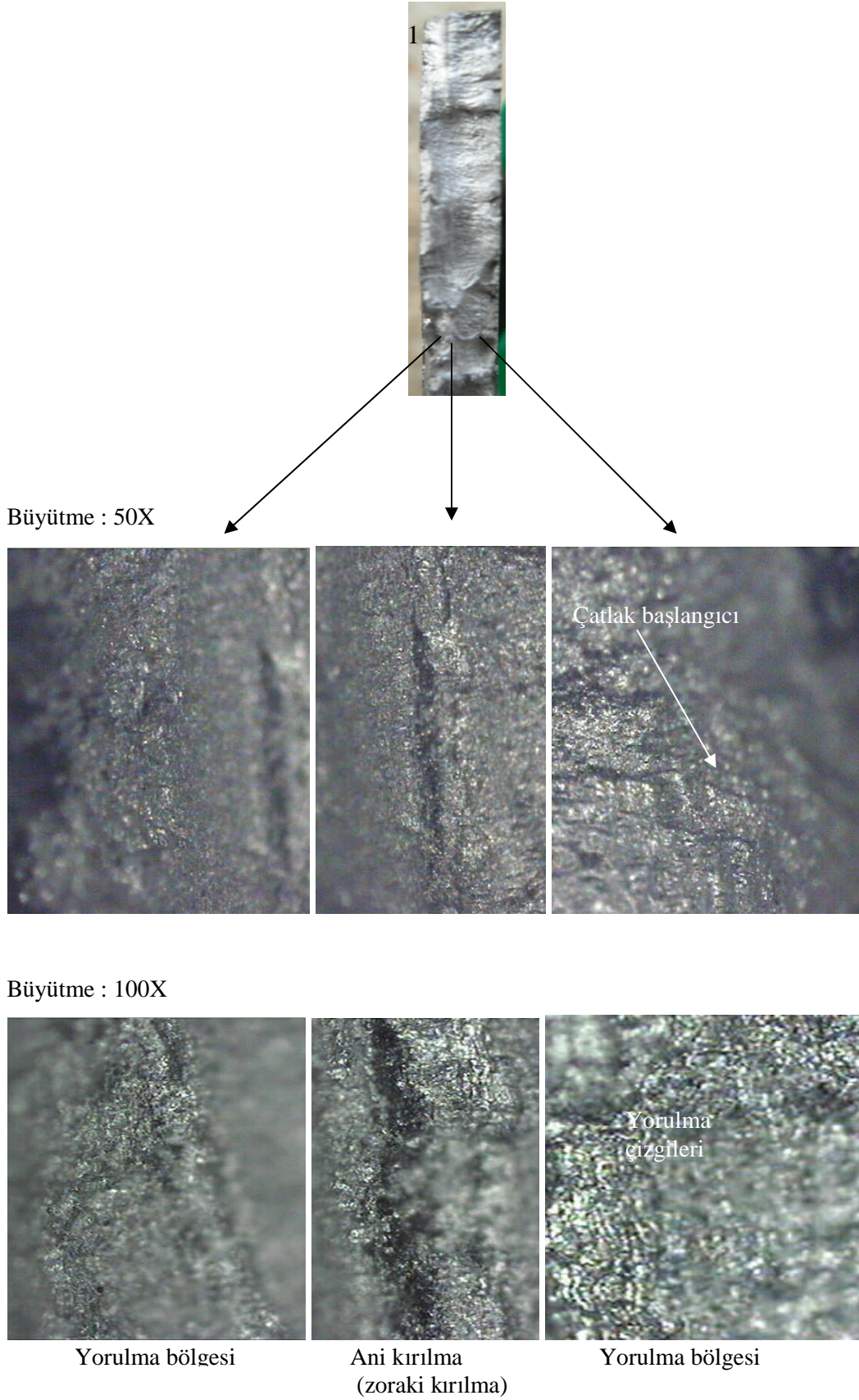
Şekil 4.41 10 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



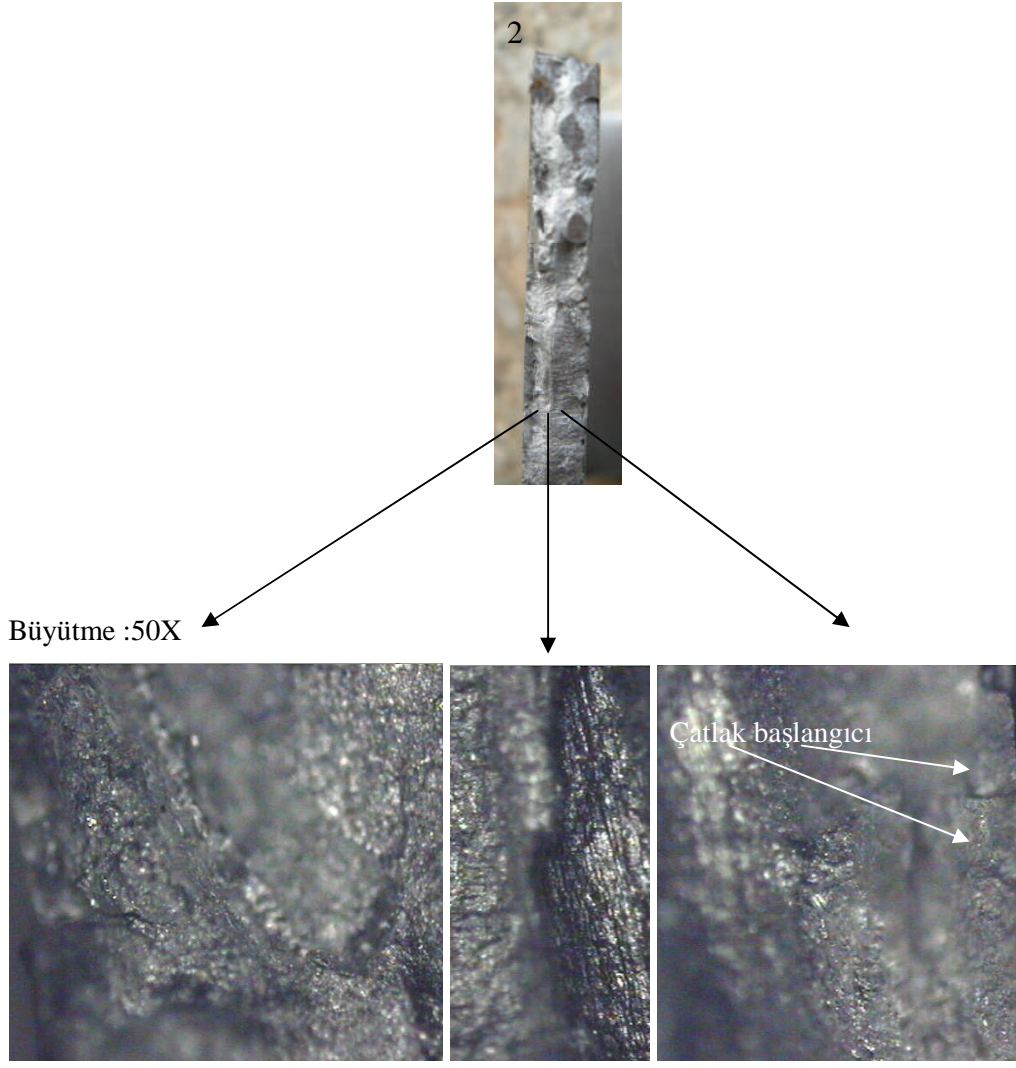
Büyütme : 100 X



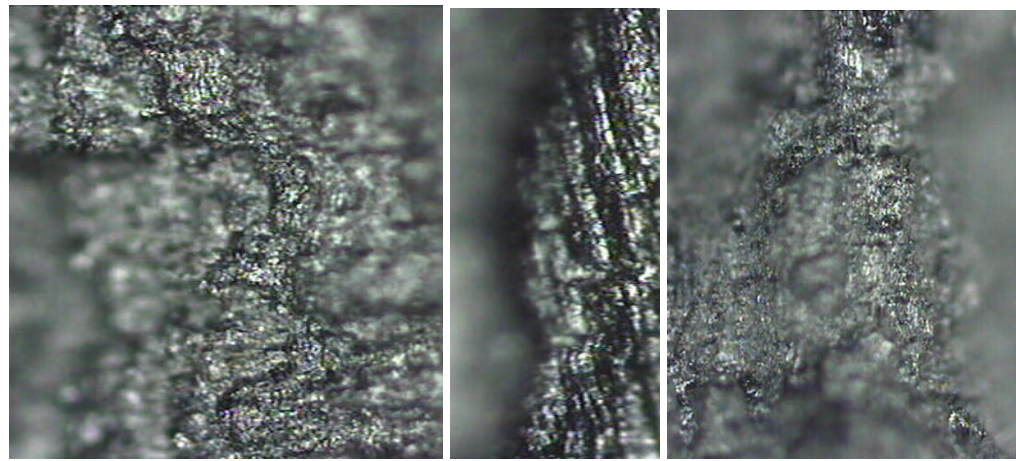
Şekil 4.42 10 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



Şekil 4.43 4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



Büyütme : 100 X

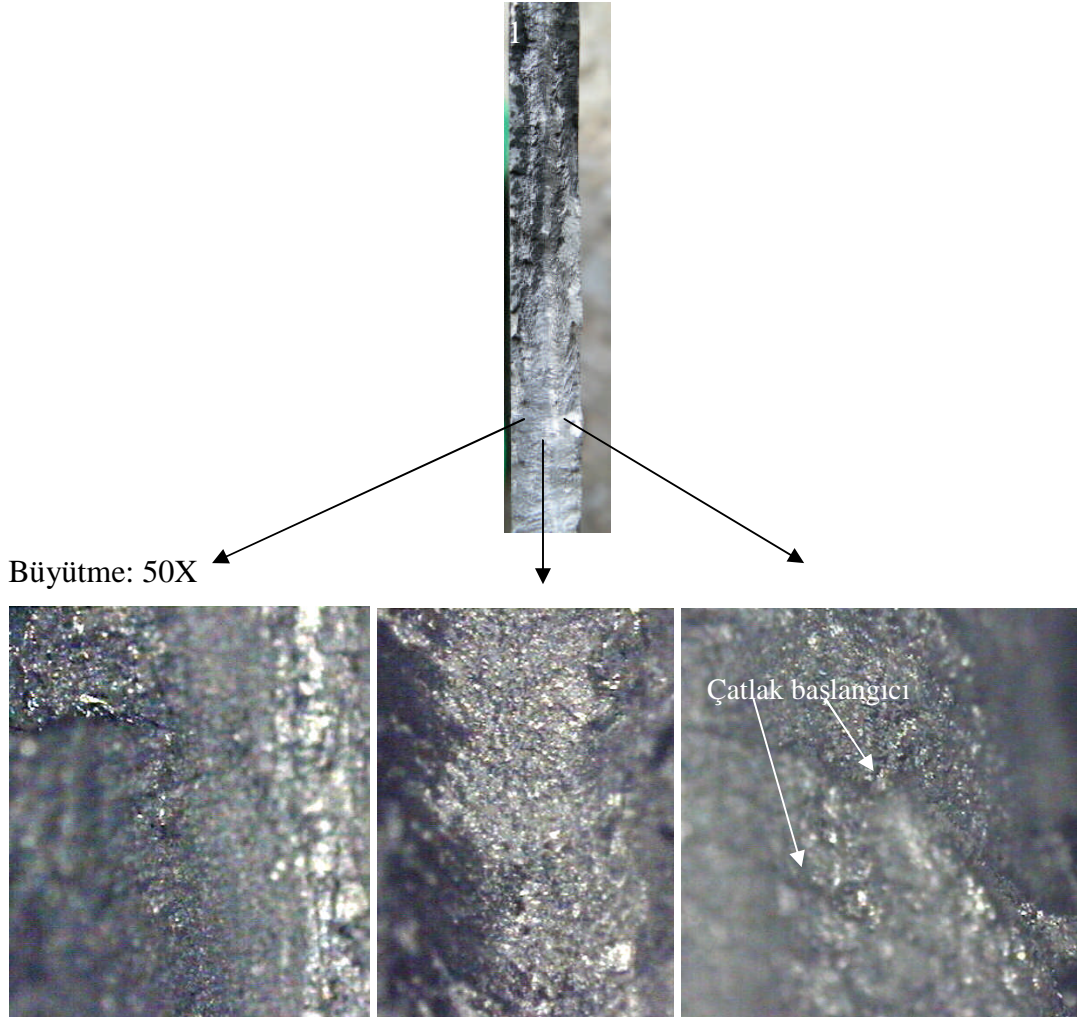


Yorulma bölgesi

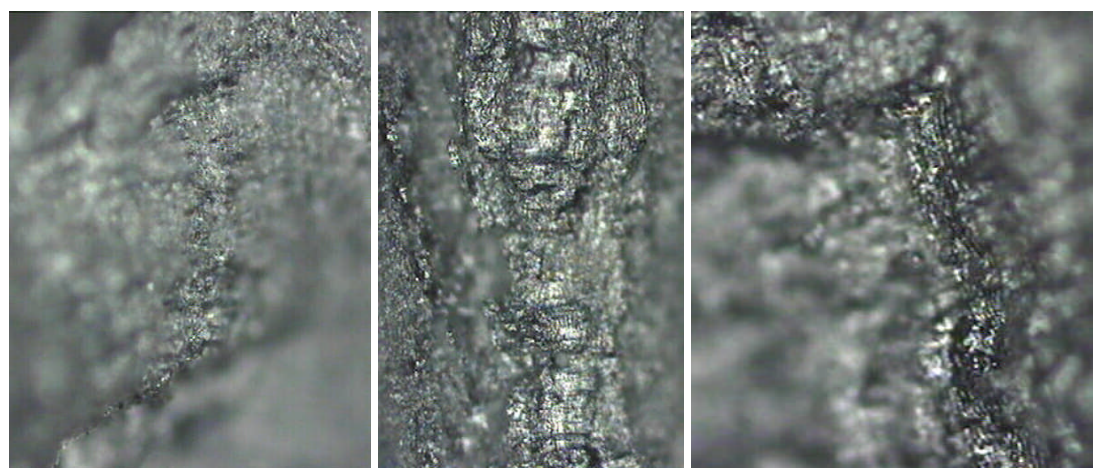
Ani kırılma  
(zoraki kırılma)

Yorulma bölgesi

Şekil 4.44 4 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 2 nolu kırılma yüzeyi makroskopik fotoğrafları



Büyütme : 100 X

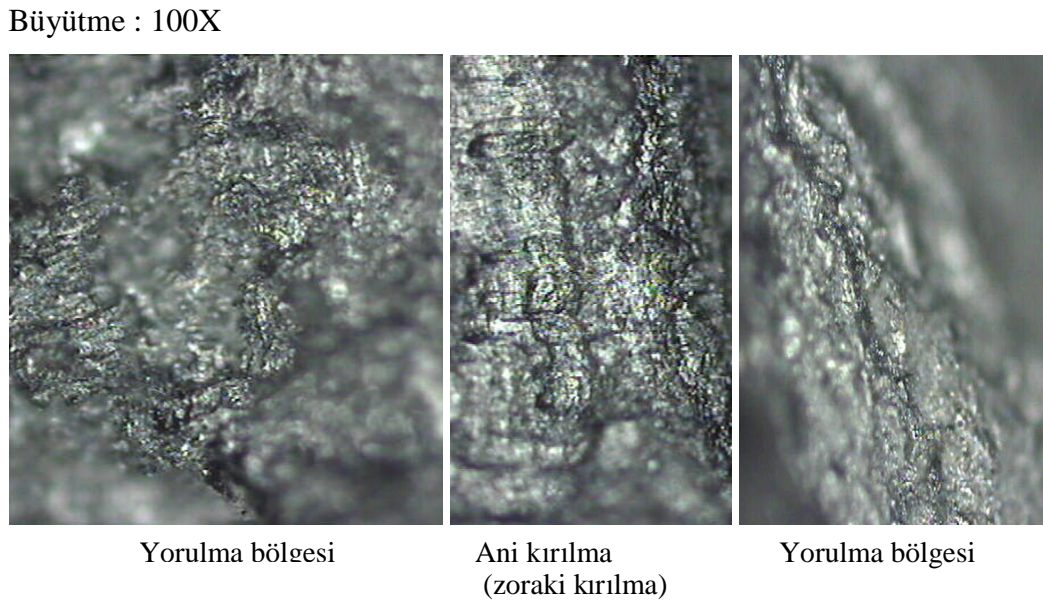
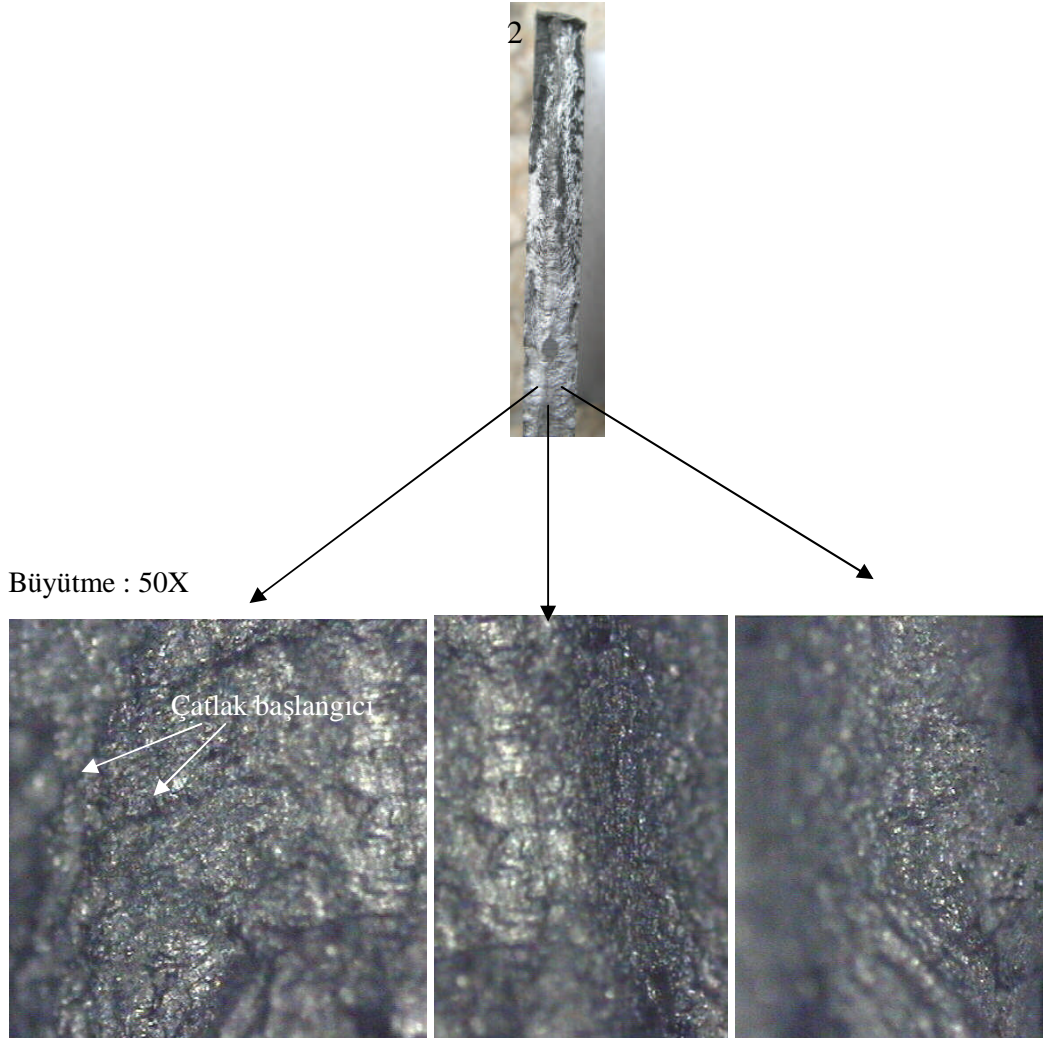


Yorulma bölgesi

Ani kırılma  
(zoraki kırılma)

Yorulma bölgesi

Şekil 4.45 1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları



Şekil 4.46 1,3 mm genlikte yorulmuş hadde yönüne dik 1100-H14 alüminyum numunesinin 1 nolu kırılma yüzeyi makroskobik fotoğrafları

Zıt yönlü eğme ( çekme – basma ) kuvvetleri etkisi altında yorulan 1100-H14 alüminyum numunelerin her iki dış yüzeyinde de ; basma kuvvetinin etkisi ile ezilmeler , çekme kuvvetinin etkisiyle de çatlamlar meydana gelmiştir (Şekil 4.30 ). Çünkü tekrarlı eğilmeden dolayı ( çeki – bası) en büyük gerilme üst ve alt yüzeylerdir. Yüzeyde düzlem gerilme halinin olması nedeniyle burada plastik şekil değişimi daha kolaydır.

Çatlakların kırılan yüzeyin her iki tarafında da birden fazla noktadan başladığı ve yüzeye dik açıyla ilerlediği gözlemlenmiştir. ( Şekil 4.33 ) Çekirdeklenmeye müsait bölgelerdeki yerel gerilmeler arttıkça çekirdeklenmenin başladığı nokta sayısı da artar. Kırılma yüzeyinde birden fazla noktadaki orjinlerden oluşmuş çatlaklar daha sonra birleşerek tek bir çatlak cephesi oluştururlar. Bu çatlaklar birleşmeden önce birbirlerinden farklı düzlemlerde ilerlediklerinden , birbirlerinden kırılma yüzeyine dik basamaklarla ayrılırlar. Bu basamaklar , yorulma yüzeyinde yorulma çizgilerine dik çizgiler şeklinde görülür. Bu çizgilere **basamak çizgileri** adı verilir [27]. Yorulma çizgilerine dik çizgiler şeklindeki basamak çizgileri Şekil 4.37, 4.38, 4.41 ‘ de gösterilmiştir. Çatlak , numunenin yüzeyinden başlıyor ve kırılan yüzeyin merkezine dik açı yapıyor ise çatlak ilerlemesi Şekil 4.34 ‘de gösterildiği gibi hem kuzey hem de güney yönünde olabilir [38].

B.Ü Necatibey Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü Materyal Geliştirme Laboratuvarın da bulunan OLYMPUS BX60 marka optik mikroskopta ,1100 Alüminyum numunelerinin yorulma kırılması yüzeylerinin 50X ve 100X büyütülmüş makro fotoğrafları çekilmiştir.( Şekil 4.35 – Şekil 4.46)

Haddeleme yönüne paralel ve haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelerin ; 10 mm , 4 mm ve 1,3 mm genlikte yorulma kırılması yüzeyleri incelendiğinde, çatlakların kırılan yüzeyin her iki tarafında da birden fazla noktadan başladığı ve yüzeye dik açıyla ilerlediği gözlemlenmiştir. 10 mm ve 4 mm genlikteki yorulma kırılması yüzeylerinin 100X büyütülmüş makro fotoğrafları incelendiğinde , yorulma çizgilerinin oluştuğu tespit edilmiştir.( Şekil 4.35-4.38 , Şekil 4.41-4.43 )



Uygulanan zıt kuvvetlerin yönüne bağılı olarak , yorulma kırılması yüzeyinin her iki tarafında da yüzeyden merkeze doğru yorulma çizgilerinin oluştuğu , kırılma yüzeyinin merkezine yakın kısımlarda ise ani kopma bölgesinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Genlik miktarı azaldıkça yorulma çizgilerinin incelendiği ve sıklaştığı tespit edilmiştir. Bu nedenle , 1.3 mm genlikteki yorulma kırılması yüzeyleri incelendiğinde ; yorulma çizgilerinin çok ince ve sık olmasından dolayı 100X büyütölmüş makro fotoğrafta yorulma çizgileri görölememiştir. 1.3 mm genlikte çatlak başlangıcı ve zoraki kırılma bölgesi gözlemlenmiştir (Şekil 4.39-4.40) (Şekil 4.45).

Şekil 4.41 incelendiğinde yorulma çizgileri ile ayrılmış birbirine paralel platolar gözlemlenmiştir. Bu platolar genellikle maksimum çekme gerilmesi yönündedir[37].

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

1. Tablo 4.4 'ten çekme deneyi sonuçları incelendiğinde ; en yüksek çekme mukavemeti 127 MPa 'lık gerilme değeri ile haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelere , en düşük çekme mukavemeti ise 123 MPa 'lık gerilme değeri ile haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelere ait olduğu tespit edilmiştir. Çekme mukavemeti değerleri kıyaslandığında haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelerin , haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelerden daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçları , literatür [31] 'deki Al 1100 H-14 malzemesi çekme testi sonuçları ile karşılaştırıldığında değerlerin benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

2. Tablo 4.5 'ten üç noktadan eğilme deneyi sonuçları incelendiğinde ,en yüksek eğilme mukavemeti 120 MPa 'lık gerilme değeri ile haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelere ,en düşük eğilme mukavemeti 116 MPa 'lık gerilme değeri ile haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelere ait olduğu tespit edilmiştir. Eğilme mukavemeti değerleri kıyaslandığında haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelerin ,haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelerden daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

3. Deney için tasarlanan ve imal edilen düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test cihazı ,dakikada 4275 devirle dönmekte ve zıt yönlü eğme işlemi yapabilmektedir. 0 - 40 mm değerleri arasında genlik ayarı yapılabilmektedir. Çalışma esnasında 70 Hz'lik sabit frekansa sahiptir. Bu özelliği ile servo-hidrolik yorulma test cihazlarının çalışma performansını yakalamıştır. Çalışma esnasındaki titreşim ;cihazın ayaklarına yerleştirilen kauçuk takozlarla (motor kulağı) ve dönen ana milin *oynak yataklar* kullanılarak yataklandırılması ile minimuma indirilmiştir. Titreşimin tamamen ortadan kaldırılamaması yorulma cihazının dezavantajıdır. Ayrıca çalışan aksamın tamamen metal olmasının zamanla bağlantı noktalarında ve dönen kısımlarda boşluk artışına sebep olacağı değerlendirilmektedir.

Bu dezavantajlarının yanında metal malzemelerin yorulma deneyi gibi yüksek frekans uygulaması gereken yorulma deneyleri için cihazın kullanılabilirliği mümkündür. Ayrıca titreşimin tamamen ortadan kaldırılamaması deneyler için dezavantaj gibi görülse de gerçek çalışma şartlarında da titreşimin bulunması , deney şartlarını gerçek çalışma şartlarına taşımaktadır.

4. Yorulma testi sonucu elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde ; her iki grup numune için çizilen eğrilerin sürekli düşüş gösterdiği ve test edilen 1100-H14 alüminyum numunelerin yorulma sınırının olmadığı tespit edilmiştir. Literatür [37] 'de bu sonuçları destekleyen açıklamalar yapılmıştır. Çoğunlukla demir dışı metallerde yorulma sınırı yoktur. Bu metallerde yorulma sınırı yerine , yorulma dayanımı söz konusudur. Bu dayanım metaller için spesifik tekrar sayısı olarak alınabilir. Bu tekrar sayısı için herhangi bir standart yoktur [37].

5. Uygulanan genlik değeri azaldıkça bütün numune grupları için kırılma tekrar sayılarının ( yorulma dayanımlarının ) arttığı tespit edilmiştir. Genlik değeri arttıkça , bütün numune gruplarının yorulma dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.

6. Yorulma testine tabi tutulan numunelerin S-N eğrileri incelendiğinde; haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelerin 1.3 mm genlikte en fazla  $1.07 \times 10^7$  tekrar sayısına ulaştığı , haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelerde ise 1.3 mm genlikte en fazla  $9.2 \times 10^6$  tekrar sayısına ulaştığı gözlemlenmiştir.

7. Bütün genlik durumlarındaki kırılma tekrar sayıları ve Şekil 4.26 'daki S-N eğrileri kıyaslandığında ; haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelerin yorulma dayanımlarının haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

8. Yorulma deney verilerinin istatistiksel değerlendirilmesi için kullanılan Weibull dağılımından elde edilen veriler incelendiğinde ; haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelerin *yarı ömrü* 79541 tekrar sayısı , haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelerin *yarı ömrü* ise 41290 tekrar sayısı olarak tespit edilmiştir.

Haddeleme yönüne paralel kesilmiş numunelerin *karakteristik ömrü* 298851 tekrar sayısı haddeleme yönüne dik kesilmiş numunelerin *karakteristik ömrü* ise 127238 tekrar sayısı olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.10, 4.11).

9. Tablo 4.10 ve 4.11 deki güvenilirlik değerleri incelendiğinde % 99 güvenilirlik değerine karşılık gelen tekrar sayısının sıfır olduğu tespit edilmiştir. Bu durum 1100-H14 alüminyum levhasının yorulma sınırının olmadığı bir ispatı olarak değerlendirilebilir.

10. Zıt yönlü eğme ( çekme – basma ) kuvvetleri etkisi altında yorulan 1100-H14 alüminyum alaşımı numunelerin her iki dış yüzeyinde de ; basma kuvvetinin etkisi ile ezilmelerin , çekme kuvvetinin etkisiyle de çatlamların meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.30 ).

11. Dikdörtgen kesitli malzemelerin , zıt yönlü eğme yorulması kırılma yüzeylerinin şematik resimleri ( Şekil 4.32 ) [ 37] ile 1100-H14 alüminyum numunelerinin kırılma yüzeyleri resimleri kıyaslandığında ; yüzey görüntülerin benzerlik sağladığı gözlemlenmiştir. Uygulanan zıt kuvvetlerin yönüne bağlı olarak , yorulma kırılması yüzeyinin her iki tarafında da yüzeyden merkeze doğru yorulma bölgelerinin oluştuğu , kırılma yüzeyinin merkezine yakın kısımlarda ise zoraki kırılma bölgesinin oluştuğu tespit edilmiştir.

12. 1100-H14 alüminyum numunelerinin yorulma kırılması yüzeylerindeki çatlaklar incelendiğinde ; çatlakların kırılan yüzeyin her iki tarafında da birden fazla noktadan başladığı ve yüzeye dik açıyla ilerlediği tespit edilmiştir. ( Şekil 4.33 ) Çekirdeklenmeye müsait bölgelerdeki yerel gerilmeler arttıkça çekirdeklenmenin başladığı nokta sayısı da artar. Kırılma yüzeyinde birden fazla noktadaki orjinlerden oluşmuş çatlaklar daha sonra birleşerek tek bir çatlak cephesi oluştururlar. Bu çatlaklar birleşmeden önce birbirlerinden farklı düzlemlerde ilerlediklerinden , birbirlerinden kırılma yüzeyine dik basamaklarla ayrılırlar. Bu basamaklar , yorulma yüzeyinde yorulma çizgilerine dik çizgiler şeklinde görülür. Bu çizgilere **basamak çizgileri** adı verilir [27].

13. Yorulma çizgilerine dik çizgiler şeklindeki basamak çizgileri Şekil 4.37, 4.38, 4.41 ‘ de gösterilmiştir. Çatlak , numunenin yüzeyinden başlıyor ve kırılan yüzeyin merkezine dik açı yapıyor ise çatlak ilerlemesi Şekil 4.34 ‘de gösterildiği gibi hem kuzey hem de güney yönünde olabilir [38].

14. 1100-H14 alüminyum numunelerinin yorulma kırılması yüzeylerinin 50X ve 100X büyütülmüş makro fotoğrafları incelendiğinde uygulanan zıt kuvvetlerin yönüne bağlı olarak , yorulma kırılması yüzeyinin her iki tarafında da yüzeyden merkeze doğru yorulma çizgilerinin oluştuğu , kırılma yüzeyinin merkezine yakın kısımlarda ise zoraki kırılma bölgesinin oluştuğu tespit edilmiştir.

15. Optik mikroskopta fotoğrafı çekilen 1.3 mm genlikteki yorulma kırılması yüzeyleri incelendiğinde ; yorulma çizgileri görülemez. 1.3 mm genlikte sadece çatlak başlangıcı ve zoraki kırılma bölgeleri gözlemlenebilmiştir.

16. Şekil 4.41 incelendiğinde yorulma çizgileri ile ayrılmış birbirine paralel platolar tespit edilmiştir. Bu platolar genellikle maksimum çekme gerilmesi yönündedir [37].

17. Kırılan yüzeylerdeki ince yorulma çizgileri optik mikroskopla görülemez. *İnce yorulma çizgileri* , her yük tekrarında çatlakın belirli bir miktar ilerlemesi sonucu oluşur. *İnce yorulma çizgileri* ancak elektron mikroskopu ile görülebilir [27].

## 5.1 Genel Sonuçlar

1. En yüksek çekme mukavemeti haddeleme yönüne paralel kesilmiş 1100-H14 alüminyum numunelerde, en düşük çekme mukavemeti haddeleme yönüne dik kesilmiş 1100-H14 alüminyum numunelerde tespit edilmiştir.

2. En yüksek eğilme mukavemeti haddeleme yönüne paralel kesilmiş 1100-H14 alüminyum numunelerde, en düşük eğilme mukavemeti haddeleme yönüne dik kesilmiş 1100-H14 alüminyum numunelerde tespit edilmiştir.

3. Deney için tasarlanan ve imal edilen düzlemsel eğme gerilmeli yorulma test cihazının , metal malzemelerin yorulma deneyi gibi yüksek frekans uygulaması gereken yorulma deneyleri için kullanılabilirliği mümkündür.

4. Yorulma testi sonucu elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde ; her iki grup numune için çizilen eğrilerin sürekli düşüş gösterdiği ve test edilen 1100-H14 alüminyum numunelerin yorulma sınırının olmadığı tespit edilmiştir. Uygulanan genlik değeri azaldıkça bütün numune grupları için kırılma tekrar sayılarının ( yorulma dayanımlarının ) arttığı tespit edilmiştir. Genlik değeri arttıkça , bütün numune gruplarının yorulma dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.

5. En yüksek yorulma mukavemeti ; haddeleme yönüne paralel kesilmiş 1100-H14 alüminyum numunelerde , en düşük yorulma mukavemeti ise haddeleme yönüne dik kesilmiş 1100-H14 alüminyum numunelerde tespit edilmiştir.

6. Yorulma ömrü için güvenilirlik değerleri Weibull istatistiksel dağılımı ile elde edilmiştir. Yorulma ömrü açısından kullanılan güvenilirlik dağılımının tasarım aşamasında son derece faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

7. Zıt yönlü eğme ( çekme – basma ) kuvvetleri etkisi altında yorulan 1100-H14 alüminyum numunelerin her iki dış yüzeyinde de ; basma kuvvetinin etkisi ile ezilmelerin , çekme kuvvetinin etkisiyle de çatlamların meydana geldiği tespit edilmiştir. 1100-H14 alüminyum numunelerinin yorulma kırılması yüzeylerindeki çatlakların kırılan yüzeyin her iki tarafında da birden fazla noktadan başladığı ve yüzeye dik açıyla ilerlediği tespit edilmiştir. Yorulma kırılması yüzeyinin her iki tarafında da yüzeyden merkeze doğru yorulma çizgilerinin oluştuğu, kırılma yüzeyinin merkezine yakın kısımlarda ise zoraki kırılma bölgesinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Kırılan yüzeylerdeki ince yorulma çizgileri optik mikroskopla görülemez.

## KAYNAKLAR

- [1] Serfiçeli, Y., S., Malzeme bilgisi, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, (2000), 181-186.
- [2] Simith, W.F., Malzeme bilimi ve mühendisliği, Kınikoğlu, N.G., Literatür yayınları, İstanbul, (2001), 290-294,499-503.
- [3] Değer, M., Perlitik-ferlitik ve küresel grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı üzerine mikro yapı ve yüzey işlemlerinin etkisi” Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Ana Bilim Dalı, Konya, (1995).
- [4] Sakin, R., Bilgisayar destekli , çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerde eğilme yorulması davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü , Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2004).
- [5] Berg, D.E., Klimas, P.C., “ Fatigue characterization of a wavy blade material “ , Proceedings of the Eighth ASME Wind Energy Symposium , New Mexico, (1989), 19-23.
- [6] Srivatsan, T.S., “ Mechanisms governing cyclic deformation and failure during elevated temperature fatigue of aluminum alloy 7055 “, *International Journal of Fatigue*,21, (1999), 557-569.
- [7] Langdon, G.S., Schleyer, G.K. , “ Inelastic deformation and failure of clamped aluminium plates under pulse pressure loading”, *International Journal of Impact Engineering*, 28, (2003), 1107-1127.
- [8] Bayraktar, E., Bathias, C., Hongquian, X., Hao, T., “ On the giga cycle fatigue behaviour of two-phase ( $\alpha_2 + \gamma$ ) TiAl alloy ”, *International Journal of Fatigue* , (2004).
- [9] Pardeon, T., Marchal, Y., Delennay, F., “ Thickness dependence of cracking resistance in thin aluminium plates “, *J. Mech. Phys. Solids* , 47 , (1999), 2093-2123.
- [10] Szolwinski, P.M., Farris, N.T., “ Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy”, *Wear*, 221, (1998), 24-36.

- [11] Kim, K.C., Nam, S.W., “ Effect of Mn-dispersoids on the fatigue mechanism in an Al-Zn-Mg alloy ”, *Materials Science and Engineering* , A244, (1998) 257-262.
- [12] Gruenberg, K. M., Craig, B.A., Hillberry, B.M., Bucci., R.J., Hinkle, A.J., “Predicting fatigue life of pre-corroded 2024-T3 aluminum from breakingload tests“,*International Journal of Fatigue* , 26, (2004), 615-627.
- [13] Chung, K.H., Yang, W.H., “ Mixed mode fatigue crack growth in aluminum plates with composite patches “,*International Journal of Fatigue* , 25, (2004), 325-333.
- [14] Tsai, G.C., Shen, S.B., “ Fatigue analysis of craced thick aluminum plate bonded with composite patches “, *Composite Structures*,64, (2004), 79-90.
- [15] Wang, Q.Y., Pidaparti, R.M., “Static characteristics and fatigue behavior of composite-repaired aluminum plates”, *Composite Structures*,56, (2002), 151-155.
- [16] James, M., N., Paterson, A., E., “Fatigue performans of 6261-T6 aluminium alloy – constand and variable amplitude loading of parent plate and welded specimens”, *International Journal of Fatigue* , 19, (1997), 109-118.
- [17] Lee, W.Y., Lee, J.J., “Successive 3D FE analysis technique for characterization of fatigue crack growth behavior in composite-repaired aluminum plate”, *Composite Structures*,66, (2004), 513-520.
- [18] George, T.J., Seidt, J., Shen, M.H., Nicholas, T., Cross, C.J., “Development of a novel vibration – based fatigue testing methodology”, *International Journal of Fatigue* , 26, (2004), 477-486.
- [19] Paepegem, W.V., Degrieck, J., “Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites”, *Composite Structures*,51, (2001), 1-8
- [20] Srivatsan, T.S., Anand, S., Sriram, S., Vasudevan, V.K., “The high-cycle fatigue and farcture behavior of aluminum alloy 7055”, *Materials Science and Engineering*, A281, (2000), 292-304.
- [21] Srivatsan, T., S., Kolar, D., Magnusen, P., “The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524”, *Materials and Desing*, 23, (2002), 129-139
- [22] Sihih, T.S., Chung, Q.Y., “Fatigue of as-extruded 7005 aluminum alloy”, *Materials Science and Engineering*, A348, (2003), 333-344.



- [23] [www.makinamuhendisi.com](http://www.makinamuhendisi.com), “Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının standart gösterimleri”, (2004).
- [24] Aytaç, A., Çift fazlı çeliklerde tavlama sıcaklığı – yorulma davranışı ilişkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2004).
- [25] Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, E., Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, (1983), 143-169.
- [26] Anık, S., Vural, M., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, (1993), 264.
- [27] Eryürek, İ.B., Hasar analizi, Birsen Yayınevi, İstanbul, (1993), 75-79,117.
- [28] Sobczyk, K., Trebicki, J., “Fatigue crack growth in random residual stresses” International Journal of Fatigue , 26, (2004), 1179-1187.
- [29] Ay, İ., Kırılma mekaniği ve yorulma, Ders Notları, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2002).
- [30] Rowley, P.N., “Section 3 – Dynamics and fatigue”, AMSET Wind Energy Trainin Course , Monfort University, (1996), 1-5.
- [31] [www.MatWeb.com](http://www.MatWeb.com), “1000 Series aluminum , aluminum alloy, nonferrous metal”, (2005), 1-2
- [32] TS EN 485-2, Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, (2005), 2-3.
- [33] ASTM E 8M –04 , Standart test methods for tension testing of metallic material, (2004), 2-3.
- [34] ISO 7438:2005(E) , Metallic materials – Bend test, (2005), 1-5.
- [35] Akkurt, M., Makine Elemanları Cilt I-II , Birsen Yayınevi, İstanbul, (2000), 206-212.
- [36] Durkal, D., Cisimlerin dayanımı, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, İstanbul, (1999), 218.

[37] Metal hand book , “Fatigue analysis and prevention “, American Society For Metals, (1975), 95-105

[38] Ay, İ., Kırılma mekaniği, Ders Notları, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü , Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, (2005).