

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YAŞLANDIRMA SÜRESİNİN Zn-27Al-1Cu ALAŞIMININ YAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Fatih ŞENASLAN**

**HAZİRAN 2016  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Fatih ŞENASLAN Tarafından Hazırlanan**

**YAŞLANDIRMA SÜRESİNİN Zn-27Al-1Cu ALAŞIMININ YAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 24 / 05 / 2016 gün ve 1654 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Doç. Dr. Murat AYDIN**

**Üye : Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ**

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar üstün mekanik ve tribolojik özellikler sergilemesi, üretim maliyetlerinin düşük olması, alaşım elementlerinin kolay ve ucuza temin edilmesi, ısı işleme elverişli olması vb. avantajlara sahip olması nedeniyle endüstriyel alanda çalışan firmaları ve araştırmacıları bu popüler malzemeyi araştırmaya ve geliştirmeye yöneltmiştir. Bu çalışmalar daha üstün özellikler sergileyen yeni bileşimlere sahip alaşımlar geliştirmek ve var olan alaşımların özelliklerini iyileştirmek üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak bu alaşımların farklı ısı işlem koşullarındaki yorulma davranışları hakkında literatürde detaylı bilgiye rastlanmamıştır. Bu durum söz konusu alaşımların dizaynında önemli bir eksiklik ve kullanımını kısıtlayıcı bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının farklı ısı işlem koşullarındaki yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, özellikle yaşlandırma süresinin söz konusu alaşımların yorulma performansına etkileri incelenerek yorulma ömürlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, kokil döküm yöntemiyle üretilen Zn-27Al-1Cu alaşımının gerek dökülmüş gerekse ısı işlem görmüş durumlardaki alaşımın yapı ve mekanik özellikleri araştırıldıktan sonra, yorulma deneyleri dönel eğmeli bir yorulma deney makinası yardımıyla gerçekleştirildi. Farklı yaşlandırma sürelerinde yorulma deneyine tabi tutulan alaşımın yorulma ömürleri belirlendi. Yaşlandırma süresinin söz konusu alaşımın yorulma performansı üzerindeki etkileri ise yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde her türlü yardım ve fedakârlığını esirgemeyen, değerli fikir ve tecrübeleriyle bana yol gösteren sayın danışmanım Doç. Dr. Murat AYDIN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmaya katkılarından dolayı Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ'a, KTÜ Müh-Mim. Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri Laboratuvarlarında çalışan tüm araştırma görevlisi meslektaşlarıma ve Takım Tezgâhları Laboratuvarlarında görevli teknisyenlere teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışma süresince manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve sevdiklerime teşekkür ederim.

Fatih ŞENASLAN  
Trabzon 2016

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yaşlandırma Süresinin Zn-27Al-1Cu Alaşımının Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Murat AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/06/2016

Fatih ŞENASLAN

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko Esaslı İkili ve Üçlü Alaşımların Faz Diyagramları .....	2
1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı .....	2
1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı.....	4
1.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Özellikleri .....	5
1.3.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yapısal Özellikleri.....	5
1.3.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri .....	6
1.3.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri.....	7
1.3.4. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri.....	11
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	14
2. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	16
2.1. Alaşımın Üretimi ve Kimyasal Analizi .....	16
2.2. Isıl İşlemler.....	16
2.3. Yapısal ve Fiziksel Özelliklerin İncelenmesi .....	17

2.4.	Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi .....	17
2.4.1.	Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri.....	17
2.4.2.	Yorulma Deneyi .....	18
3.	BULGULAR .....	22
3.1.	Alaşımın Kimyasal Bileşimi ve Yoğunluğu.....	22
3.2.	Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular .....	22
3.3.	Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	27
3.3.1.	Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular .....	27
3.3.2.	Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular .....	30
3.3.2.1.	Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu.....	33
3.3.2.2.	Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular .....	37
4.	İRDELEME .....	47
5.	SONUÇLAR .....	51
6.	ÖNERİLER .....	53
7.	KAYNAKLAR.....	54

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

YAŞLANDIRMA SÜRESİNİN Zn-27Al-1Cu ALAŞIMININ YAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Fatih ŞENASLAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Murat AYDIN  
2016, 58 Sayfa

Bu çalışmada Zn-27Al-1Cu alaşımı kokil kalıba döküm yöntemi ile üretildi. Dökülmüş durumdaki alaşıma çözündürme, su verme sonrası farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulandı. Gerek dökülmüş gerekse ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşımın yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma davranışları incelendi. Yapılan incelemeler sonucunda, Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin  $\eta$  ve ötektoid  $\alpha + \eta$  fazları ve bakırca zengin  $\epsilon$  fazından oluştuğu görüldü. Uygulanan ısıtılmış işlem sonucunda dendritik yapının tamamen ortadan kalktığı, bunun yerini çinko ve bakırca zengin çökeltiler içeren ve alüminyumca zengin  $\alpha$  tanelerinden oluşan bir içyapının aldığı gözlemlendi. Söz konusu ısıtılmış işlemin genelde bu alaşımın sertlik ve çekme dayanımını artırdığı, süneklik ve tokluk değerlerini ise azalttığı belirlendi. Zn-27Al-1Cu alaşımından en yüksek yorulma ömrü 0,5 saat yaşlandırma işlemi sonrasında elde edildi. Bütün mekanik özelliklerin yorulma davranışı üzerinde etkili olduğu ancak yorulma performansının çekme dayanımından daha çok sünekliğe ve özelliklede tokluğa bağlı olduğu sonucuna varıldı. Yapılan korelasyonlar sonucunda gerek dökülmüş gerekse ısıtılmış işlem görmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma davranışının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği belirlendi. Bütün yorulma örneklerinin özelliklede ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşıma ait yorulma örneklerinin gevrek kırılma davranışı sergilediği görüldü.

**Anahtar Kelimeler:** Çinko-alüminyum alaşımları, Yorulma özellikleri, Yaşlandırma, Mekanik özellikler, Basquin bağıntısı.

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF AGING TIME ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF Zn-27Al-1Cu ALLOY

Fatih ŞENASLAN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Doç. Dr. Murat AYDIN  
2016, 58 Pages

In this study, Zn-27Al-1Cu alloy was produced by permanent mould casting. As-cast alloy aged at different periods after subjected to solution treatment and water quenching. The structural, mechanical and fatigue behavior of heat treated alloy and as-cast alloy were investigated. As a result of the researches, it was determined that the microstructure of as-cast Zn-27Al-1 Cu alloy consisted of aluminum-rich  $\alpha$  dendrites surrounded by zinc-rich  $\eta$  and eutectoid  $\alpha + \eta$  phase and copper-rich  $\epsilon$  phase. The quench-ageing treatment removed the dendritic microstructure of the alloy and produced aluminum-rich  $\alpha$  grained microstructure together with zinc-rich and copper-rich precipitates. As the hardness and tensile strength increased, ductility and toughness values decreased with the heat treatment. The longest fatigue life was obtained from the Zn-27Al-1Cu alloy after 0.5 hour aging time. It has been concluded, all the mechanical properties have considerable effect on fatigue behavior. However fatigue performance mostly depends on the ductility and especially toughness. It was also found that Basquin's equation could be used to express the fatigue behaviour of Zn-27Al-1Cu alloy in both as-cast and in heat treated states. All the fatigue samples, especially the heat treated fatigue samples showed brittle fracture behavior.

**Keywords:** Zinc-aluminum alloys, Fatigue properties, Aging treatment, Mechanical properties, Basquin's equation.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı .....	3
Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti.....	4
Şekil 3. Zn-27Al-1Cu alaşımından elde edilen (a) çekme ve (b) darbe deney örneklerinin şematik resmi .....	18
Şekil 4. Dönel eğmeli yorulma deney makinesi .....	20
Şekil 5. Deney örneğinin kırılması durumunda açısal hareket serbestliğine sahip yatakların genel görünümü .....	21
Şekil 6. Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutları .....	21
Şekil 7. Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı .....	23
Şekil 8. Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	23
Şekil 9. 100 °C sıcaklıkta 0,5 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı .....	24
Şekil 10. 100 °C sıcaklıkta 1 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı .....	24
Şekil 11. 100 °C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı .....	25
Şekil 12. 100°C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı .....	25
Şekil 13. 100 °C sıcaklıkta 10 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı .....	26
Şekil 14. Zn-27Al-1Cu alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri.....	27
Şekil 15. (a) dökülmüş, (b) 0,5 h, (c) 1 h, (d) 2 h, (e) 3 h ve (f) 10 h yaşlandırılmış durumlarda çekme deneyine tabi tutulan Zn-27Al-1Cu alaşımın boylarındaki değişimini gösteren fotoğraf.....	28
Şekil 16. Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki Zn-27Al-1Cu alaşımının mekanik özelliklerinin uygulanan yaşlandırma süresine göre değişim grafiği.....	29
Şekil 17. Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımına ait gerilme-çevrim sayısı eğrileri .....	32
Şekil 18. Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin yaşlandırma süresine göre değişimi.....	34

Şekil 19.	Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma ömrü, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin yaşlandırma süresine göre değişimi.....	34
Şekil 20.	Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımının logN–logσ eğrileri .....	36
Şekil 21.	146 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı.....	39
Şekil 22.	146 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	39
Şekil 23.	119 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı.....	40
Şekil 24.	119 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı.....	40
Şekil 25.	174 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren .....	41
Şekil 26.	174 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı .....	41
Şekil 27.	160 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 1 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı .....	42
Şekil 28.	160 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 1 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı .....	42
Şekil 29.	160 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 3 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı .....	43
Şekil 30.	160 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 3 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı .....	43
Şekil 31.	92 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 10 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı .....	44
Şekil 32.	92 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 10 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı .....	44
Şekil 33.	Yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin kırılma yüzeyinin detayını gösteren fotoğraf.....	45

- Şekil 34. Yorulma deneyine tabi tutulan, yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin kırılma yüzeyinin detayını gösteren fotoğraf..... 45
- Şekil 35. Yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlakları oluşumunu gösteren detay fotoğrafı ..... 46
- Şekil 36. Yorulma deneyine tabi tutulan, yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlakları oluşumunu gösteren detay fotoğrafı ..... 46



## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.	İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri .....	3
Tablo 2.	Çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri .....	5
Tablo 3.	Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri .....	6
Tablo 4.	Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri .....	7
Tablo 5.	Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların mekanik özellikleri .....	10
Tablo 6.	Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların yorulma özellikleri .....	13
Tablo 7.	Zn-27Al-1Cu alaşımının kimyasal bileşimi ve yoğunluğu.....	22
Tablo 8.	Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem uygulanmış durumdaki sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri .....	28
Tablo 9.	Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımına ait yorulma deney sonuçları.....	31
Tablo 10.	Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı (c) değerleri .....	36

## SEMBOLLER DİZİNİ

BSD	: Brinell sertlik değeri
c	: Korelasyon katsayısı
EKAE	: Eş kanalda açısız ekstrüzyon
h	: Saat
P	: Örneğe uygulanan yük
SEM	: Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskopy)
YMK	: Yüzey merkezli kübik
$N_f$	: Çevrim sayısı
$\sigma_{eğ}$	: Eğme gerilmesi
$\sigma$	: Gerilme genliği
$M_{eğ}$	: Eğme momenti
$W_{eğ}$	: Eğme için mukavemet momenti

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar uzun süreli inceleme ve araştırmalar sonucunda geliştirilmiştir [1]. İlk defa 1920'li yıllarda geliştirilen zamak-2, zamak-3 ve zamak-5 adlı çinko esaslı alaşımlar günümüzde de kullanılmaktadır [2]. İkinci dünya savaşı sırasında özellikle bakır vb. hammadde teminindeki güçlükler nedeniyle, beyaz metal ve bronz gibi geleneksel yatak malzemelerin yerine kullanılmak üzere düşük oranda bakır içeren çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar yapılmıştır [3,4]. 1962 yılında International Lead-Zinc Research Organization tarafından %12 ve %16 oranlarında alüminyum içeren ZA-12 ve ZA-16 alaşımları üretilmiştir [3-5]. 1970'li yıllarda ise Noranda Araştırma Merkezi tarafından ZA-8 ve ZA-27, Vöest-Alpina firması tarafından da ALZEN 305 ve ALZEN 501 olarak adlandırılan çinko-alüminyum esaslı ticari alaşımlar geliştirilmiştir [6-8]. Belirli bileşimlerde yoğunlaştırılarak çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar günümüzde halen devam etmektedir.

İkili çinko-alüminyum esaslı alaşımların faz diyagramlarının oluşturulması üzerine yapılan araştırmalar, ötektik ( $Zn-5Al$ ), ötektoid ( $Zn-22Al$ ) ve monotektoid ( $Zn-40Al$ ) yapıya sahip başlıca üç ana faz dönüşümünün olduğunu göstermektedir [7,9,10]. Ancak ikili çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerinin, özelliklede mukavemet değerlerinin bazı mühendislik uygulaması için yetersiz olduğu bilinmektedir [11]. Bu nedenle son yıllarda yapılan kapsamlı çalışmalarda, düşük oranda Cu ve/veya Si gibi katkı elementlerinin Zn-Al esaslı alaşımların sertlik, çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve aşınma direncini artırmada oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Bunun üzerine yakın ötektoid ve monotektoid bileşime sahip üçlü ( $Zn-27Al-2Cu$ ,  $Zn-40Al-2Cu$  ve  $Zn-40Al-2Si$ , vb.) ve dördü ( $Zn-40Al-2Cu-2Si$  ve  $Zn-60Al-2Cu-2Si$ , vb.) çinko-alüminyum esaslı alaşımlar geliştirilmiştir [10-14,17].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar sahip oldukları üstün fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerinden dolayı birçok mühendislik uygulamasında özellikle yatak malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1,16,17]. Bunun nedeni söz konusu alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre bazı avantajlara sahip olmasıdır. Bu avantajların

başında üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, ideal döküm kabiliyetine sahip olmaları, işlenme özelliklerinin iyi olması, ısı işleme elverişli olmaları, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması ve yüksek sönümlenme kapasitesine sahip olmaları vb. gelmektedir [5,8,19]. Ayrıca söz konusu alaşımların aşırı yüklenme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile ideal bir tribolojik davranış sergilemesi nedeniyle günümüzde bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almışlardır [6,10-12]. Ancak, bu üstünlüklerinin yanı sıra boyutsal kararsızlık, düşük süneklik ve sınırlı çalışma sıcaklığı gibi dezavantajları olduğu da bilinmektedir [13-15]. Boyutsal kararsızlık, sıvı metalin katılaşması sırasında oluşan metastabil fazların zamanla kararlı hale dönüşmesinden, düşük süneklik, çinko ve bakırca zengin fazların gevrek davranış sergilemesinden ve sınırlı çalışma sıcaklığı ise bu alaşımların düşük ergime sıcaklığına sahip olmalarından kaynaklanmaktadır [15-18,19]. Bu sorunlar, araştırmacıları söz konusu alaşımlar için en uygun bileşim oranını ve ısı işleme belirlemeye yöneltmiştir.

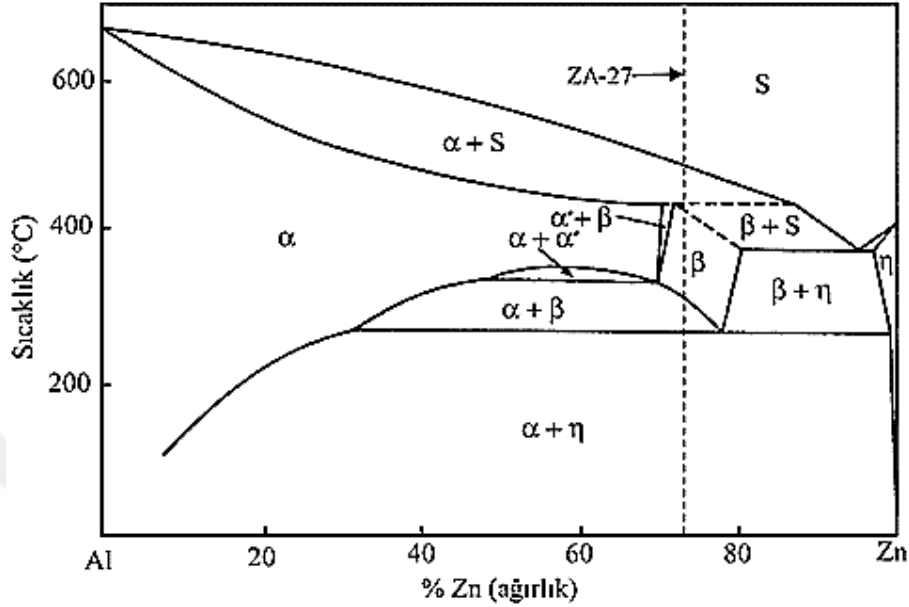
Günümüzde çinko-alüminyum esaslı alaşımlar başta otomotiv ve yapı sektörleri olmak üzere iş makineleri, otomobil parçaları, spor aletleri, madencilik, hırdavat, dekoratif parçalar, elektrikli ev aletleri, beyaz eşya parçaları, ara bağlantı elemanları gibi farklı amaçlı malzemelerin üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır [8,16]. Ancak söz konusu alaşımların farklı ısı işleme koşullarındaki yapı ve mekanik özellikleri ve özellikle yorulma davranışları hakkında literatürde yeterli bilgiye rastlanmamıştır. Isı işleme özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, alaşımların kullanım ömrünün uzatılmasında yararlı olabileceği ve böylelikle kullanım alanlarının genişletilebileceği düşünülmektedir.

## **1.2. Çinko Esaslı İkili ve Üçlü Alaşımların Faz Diyagramları**

### **1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı**

İkili çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1’de verilmiştir [20]. Bu diyagramdaki  $\alpha$  alüminyumca zengin,  $\eta$  ise çinkoca zengin faz bölgelerini göstermektedir. Çinko, alüminyum içerisinde % 83 oranına kadar çözünerek yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip  $\alpha$ ,  $\alpha'$  ve  $\beta$  olarak adlandırılan üç farklı faz bölgesi oluşturmakta, bu fazların her birinin hızlı soğuması sonucunda aşırı doymuş katı çözeltiler elde edilmekte ve daha sonra uygulanan yaşlandırma işlemi sırasında bir takım geçiş fazları oluşmaktadır [22, 25, 31]. İkili çinko-

alüminyum alaşım sisteminde dengeli soğuma sırasında meydana gelen faz dönüşümleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [5, 20, 24].

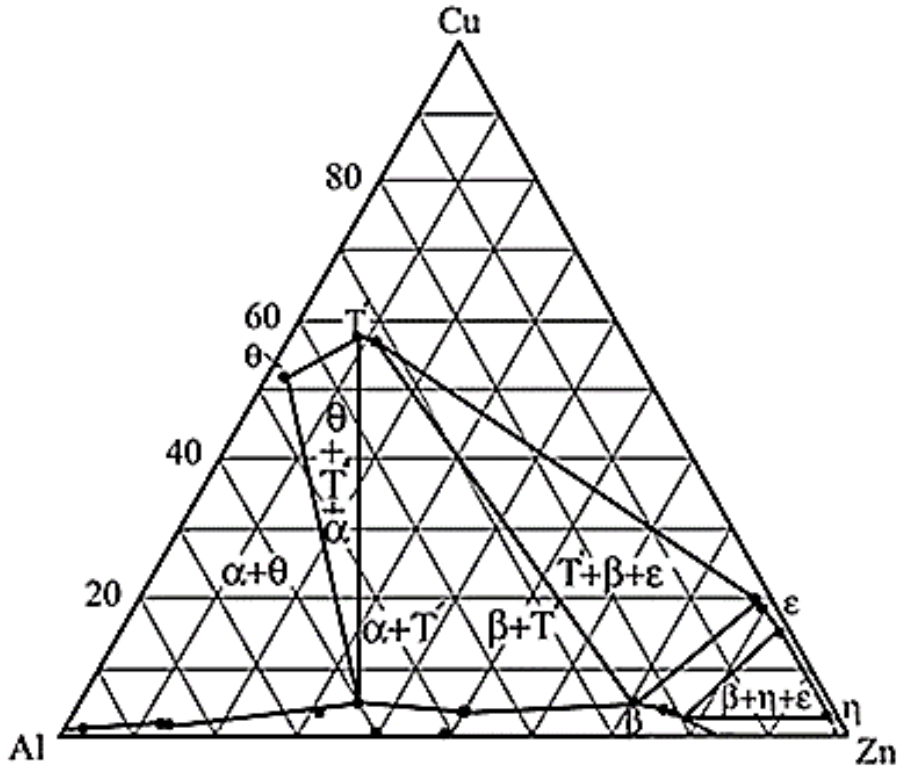
İkili çinko-alüminyum alaşımlardaki alüminyum oranı, alaşımın ergime sıcaklığını ve içyapısını değiştirir. Şöyle ki; Zn-Al faz diyagramında, %5 Al bileşim oranında 382°C sıcaklıkta ötektik dönüşüm gerçekleşirken, % 22 Al bileşim oranında 276°C sıcaklıkta ötektoid dönüşüm gerçekleşmektedir. Ötektik dönüşüm sonrasında, yüzey merkezli kübik yapılı  $\beta$  ve sıkı düzenli hegzagonal yapılı  $\eta$  fazını içeren bir yapı oluşur [22-26]. Ötektoid dönüşüm sonrasında ise  $\beta$  fazı, alüminyumca zengin  $\alpha$  ve çinkoca zengin  $\eta$  fazlarından oluşan bir yapıya dönüşür [15, 22-25].

Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [15,17].

Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Ötektoid (I)	$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	78	276
	(II) $\alpha/\alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	52	340
Peritektik	$\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	72	443

### 1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı

Üçlü Zn-Al-Cu faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiş olmakla birlikte, bu diyagramın düşük bakır oranına sahip olan kısmı Murphy [7] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Zn-Al-Cu faz diyagramının 350°C sıcaklık için belirlenen izotermal kesiti Şekil 2’de, bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri ise Tablo 2’de verilmiştir [7,15].



Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti [7].

Tabloda yer alan  $\alpha$  ve  $\eta$  sırasıyla alüminyumca zengin ve çinkoca zengin fazları,  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ),  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) sembolleri de bu alaşımlarda oluşan bakırca zengin bileşikler göstermektedir [21-23]. Yapılan incelemeler sonucunda  $\epsilon$  bileşiğinin yarı kararlı (metastabil),  $\theta$  ve  $T'$  bileşiklerinin ise kararlı yapıya sahip oldukları belirlenmiştir [17,23-25].

Tablo 2. Çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [22,25]

Dönüşüm	Dönüşüm Sıcaklığı (°C)
$T' + \beta \rightleftharpoons \alpha + \varepsilon$	288
$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	275
$\beta + \varepsilon \rightleftharpoons \alpha + \eta$	276
$\alpha + \varepsilon \rightleftharpoons T' + \eta$	268

### 1.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Özellikleri

#### 1.3.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yapısal Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların dökülmüş durumdaki içyapıları alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin fazlardan oluşur. Bakır içeren üçlü alaşımların yapısında  $\varepsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ),  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) gibi bakırca zengin fazlar bulunmaktadır. Zn, Al, Cu ve Si içeren dördümlü alaşımların yapısında ise  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\varepsilon$  fazlarının yanı sıra sert Si parçacıkları bulunmaktadır.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar geleneksel döküm şartlarında tipik dendritik yapıya sahiptir [45]. Dendritik yapı, düşük süneklığe ve homojen olmayan bir yapıya neden olmaktadır [46]. Bu durum alaşımların içyapısını olumsuz yönde etkilemektedir. Yapı içerisindeki oluşan dendrit, dendrit boyutu ve dendrit kol aralığı ise döküm parametrelerine bağlıdır [41]. Bu nedenle söz konusu alaşımların içyapılarını iyileştirmek ve dendritik yapılarını ortadan kaldırmak için bir takım çalışmalar yapılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir [18,33,41]. Söyle ki; döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve katılaşma hızı gibi parametreler optimize edilerek ve/veya bir takım ısıl işlemler uygulanarak bu alaşımların kararsız yapıları giderilmiş ve kararlı, homojen yapılar elde edilmiştir.

Piyasada yaygın olarak kullanılan Zamak-3, Zamak-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27 ve ZA-35 gibi bazı çinko esaslı ticari alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 3'de verilmiştir. Bu alaşımlardan ZA-8 ötektik, ZA-27 ötektoid, ZA-35 monotektoid noktaya yakın bileşimlere sahip alaşımlardır [1,7,17]. Zamak-3 dışında diğer alaşımlar % 5'den düşük oranda bakır elementi, ZA-35 hariç diğer alaşımlar ise düşük oranda magnezyum elementi

içermektedirler. Söz konusu alaşımlardan farklı olarak ZA-35 alaşımı yaklaşık % 1 oranında silisyum katkı elementi içermektedir [26].

Tablo 3. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri [4,26]

Alaşım	Kimyasal bileşim (%)				
	Al	Mg	Cu	Si	Zn
Zamak-3	3,8 – 4,3	0,03 – 0,06	-	-	Kalan
Zamak-5	3,8 – 4,3	0,03 – 0,06	0,75 – 1,25	-	Kalan
ZA-8	8,0 – 8,8	0,01 – 0,03	0,8 - 1,3	-	Kalan
ZA-12	11,0 - 11,5	0,01 – 0,03	0,5 – 1,5	-	Kalan
ZA-27	25,0 – 28,0	0,01 – 0,02	2,0 - 2,5	-	Kalan
ZA-35	30,0 – 35,0	-	3 - 5	0,5 - 1,0	Kalan

### 1.3.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlarının yoğunluğu ve ergime sıcaklığı içerdiği alüminyum oranına göre değişiklik gösterir [27]. Şöyle ki; ötektik dönüşüm sonrası artan alüminyum oranı ile söz konusu alaşımların ergime sıcaklığı yükselir ve katılaşma aralığı ise daralır [27-29]. Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime noktasının düşük olması bu alaşımların üretiminde daha az enerjiye ihtiyaç duyulması ve döküm işlerinde kullanılan araç gereçlerin ömrünün daha uzun olması gibi avantajlar sağlar.

Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ve bronz, pirinç, dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri Tablo 4’de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi çinko-alüminyum esaslı alaşımların yoğunluğu geleneksel yatak malzemelerinin yoğunluğundan düşük olup, alaşımların içerdiği alüminyum oranı arttıkça yoğunluk değeri düşmektedir. Örneğin % 8 Al içeren ZA-8 alaşımının yoğunluğu  $6,30 \text{ g/cm}^3$  iken %27 Al içeren ZA-27 alaşımının yoğunluğu  $5 \text{ g/cm}^3$  tür.

Tablo 4. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri [30].

Fiziksel Özellikler	Alaşımlar					
	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	6,30	6,03	5,00	8,50	8,83	6,94
Katılma Sıcaklık Aralığı(°C)	404-375	430-480	490-380	1010-855	975-855	1232
Katılma Büzülmesi(%)	1,0	1,2	1,3	-	-	1,0
Isıl genleşme Katsayısı (µm/mK)	23,2	24,1	26,0	18,0	18,0	11,9

### 1.3.3. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, demir olmayan birçok metalden ve dökme demirden daha yüksek mukavemete sahiptir [30]. Farklı döküm yöntemleriyle üretilmiş bazı ticari çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinden olan dökme demir ve bronzun mekanik özellikleri Tablo 5’de verilmiştir. Bu tablodan ZA-27 alaşımının ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarından daha yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olduğu, ayrıca döküm yönteminin söz konusu alaşımların mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir [30,42]. Şöyle ki; basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımlar, kum döküm ve kokil döküm yöntemleriyle üretilen alaşımlardan daha iyi mekanik özellikler sergilemektedirler. Bu durum, basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımların ortalama tane boyutunun daha küçük ve gözenek miktarının daha az olmasına dayandırılmıştır [18,43]. Bu tablodan ayrıca, söz konusu alaşımların dökme demir ve bronzdan daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir.

Her ne kadar üstün mekanik özelliklere sahip olsalar da ikili çinko-alüminyum alaşımların mekanik özelliklerinin bazı mühendislik uygulamaları için yetersiz olduğu bilinmektedir [1-4,31]. Söz konusu alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılan çalışmalarda en etkili yöntemin alaşım elementi katkısı olduğu belirlenmiştir [32,33]. Çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştiren katkı elementlerinin başında bakır, nikel, silisyum ve magnezyum gelmektedir [33]. İkili çinko-

alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerini artırmada bakırın önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir [32-35]. Özellikle % 2 oranına kadar katılan bakır bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerini önemli ölçüde artırmakta, bu oranın üzerindeki bakır katkısı ise sertliği artırırken, çekme dayanımını düşürmektedir [13,34]. Söz konusu alaşımların içerdiği bakır oranının belirli bir değeri aşması durumunda çekme dayanımlarının düşmesi, çökme sertleşmesi mekanizmasının etkisinin azalmasına dayandırılarak açıklanmıştır [35]. Şöyle ki; üçlü Zn-Al-Cu alaşım sisteminde alaşımların içerdiği bakır oranı belirli bir değeri (%2) aşması durumunda bu alaşımların yapısında çinko ve bakırca zengin  $\epsilon$ ,  $T'$  ve  $\theta$  gibi intermetalik fazların olduğu bilinmektedir [7]. Çökme sertleşmesi mekanizmasının gerçekleşmesi için gerekli olan bakırın büyük bir kısmı bu bileşiklerin oluşumu için harcanırken, azalan bakır oranı ise çökme sertleşmesi mekanizmasının etkin bir şekilde çalışması için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, çinko-alüminyum alaşımlarına % 2-3'e kadar bakır katkısı tavsiye edilmektedir [14,35,53].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların kimyasal bileşiminin de yani ana alaşım elementlerinin oranı da mekanik özellikler üzerinde etkilidir. Şöyle ki; monotektoid bileşime sahip ikili Zn-40Al alaşımının, ötektik (Zn-5Al) ve ötektoid (Zn-22Al) bileşime sahip alaşımlardan çok daha yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir [14,44]. Alüminyum oranının artmasıyla ikili çinko-alüminyum alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen bu artış, katı çözümlü sertleşmesi mekanizmasına dayandırılarak açıklanmıştır [24,25].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların ergime sıcaklıklarının düşük ve katılaşma aralıklarının geniş olması, içyapıda gözeneklerin oluşmasına neden olmaktadır [10,30]. Katılaşma esnasında içyapıda oluşan bu gözenekler alaşımların mukavemet değerlerini önemli ölçüde düşürmektedir [18]. Bu nedenle, döküm sıcaklığı, katılaşma hızı ve kalıp sıcaklığı gibi parametrelerin optimize edilerek gözenek oluşumunun önlenmesi ya da en aza indirilmesi için bazı çalışmalar yapılmış ve önemli sonuçlar elde edilmiştir [32,33]. Ayrıca düşük ergime noktasına sahip olan bu alaşımların mukavemet değerlerinin sıcaklık arttıkça düşmesi nedeniyle 120 °C'nin altında ki sıcaklıklarda kullanılmaları tavsiye edilmektedir [30,40].

Dökülmüş durumdaki çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer faktörde bu alaşımların katılaşma sırasındaki soğuma hızıdır. Soğuma hızının çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerine etkisi üzerine yapılan bir çalışmada soğuma hızı arttıkça bu alaşımların gözenek oranının ve ikincil dendrit kol

aralığının azaldığı, sertlik, mukavemet, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir [47]. Söz konusu alaşımların mekanik özelliklerindeki iyileşme gözenek oranının ve ikincil dendrit kol aralığının azalması ile ilişkilendirilmiştir [30,41,47].

Yapılan literatür araştırmaları, aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan eş kanalda açısız ekstrüzyon (EKAE) yönteminin de çinko-alüminyum esaslı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmede oldukça etkili olduğunu göstermektedir [56,57]. Bu yöntem malzemelerin aşırı oranda plastik deformasyona tabi tutularak tane boyutunun küçültülmesi, yeniden yapılandırılması ve böylece mekanik özelliklerinin büyük ölçüde iyileştirilmesi esasına dayanır. Geleneksel yöntemlerle alaşımların mukavemet değerleri artırılmak istendiğinde süneklik değerleri düşmektedir. Söyle ki; uygulanan diğer yöntemlerle malzemenin sertlik ve çekme dayanımı arttırıldığında kopma uzaması değerinin düştüğü, yine aynı şekilde kopma uzaması arttırıldığında ise sertlik ve çekme dayanım değerleri düştüğü bilinmektedir [33]. Ancak eş kanalda açısız ekstrüzyon yöntemi uygulanan malzemelerin mukavemet ve süneklik değerleri birlikte arttırılabilmekte, özellikle deformasyonu zor olan gevrek yapıları malzemelerin şekillendirilebilirlik özellikleri de büyük ölçüde iyileştirilebilmektedir [57].

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların döküm sonrası oluşan kararsız yapılarını ortadan kaldırmak, alaşım elementi olarak katılan bakırın oluşturduğu boyutsal farklılıkları gidermek ve alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerini iyileştirmek için söz konusu alaşımlara bazı ısı işlemleri uygulanmıştır [36-39]. Örneğin kararlı bir içyapı elde etmek için uygulanan stabilizasyon (T5) ısı işlemi sonrasında, alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinde büyük ölçüde düşme, kopma uzamasında ise artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durum yapı içerisindeki kalıntı gerilmelerinin giderilmesine ve döküm sonrası oluşan metastabil fazların kararlı fazlara dönüşmesine dayandırılmaktadır [22,33,39]. Hem daha homojen ve kararlı içyapı elde etmek hem de mukavemet ve sertlik değerlerini arttırmak için bu alaşımlara çözündürme su verme ve yapay yaşlandırma aşamalarını (T6,T9) içeren çökelme sertleşmesi uygulanmış söz konusu değerlerde önemli artışlar elde edilmiştir [36-39, 59]. Ancak sözü edilen ısı işleminin bu alaşımların mekanik özelliklerine etkileri detaylı bir şekilde ortaya konulamamıştır. Bu nedenle bu çalışmada çözündürme ve su verme işlemi sonrasında farklı sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulan ve ticari ZA-27 alaşımına yakın bileşime sahip olan Zn-27Al-1Cu alaşımının mekanik özellikleri incelenecektir. Böylece yaşlandırma süresine bağlı olarak ortaya çıkan yapısal değişimin mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılacaktır.

Tablo 5. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların mekanik özellikleri [5].

Mekanik özellikleri	ZA-8			ZA-12			ZA-27				Dökme demir	Bronz
	Kum döküm	Kokil döküm	Basıncılı döküm	Kum döküm	Kokil döküm	Basıncılı döküm	Kum döküm	Kokil döküm	Basıncılı döküm	Kum* döküm	Dökme demir	Bronz
Çekme dayanımı (MPa)	263	240	374	299	328	404	421	441	426	318	214	241
%0,2'lik akma dayanımı (MPa)	198	208	290	211	268	320	371	376	371	257	124	124
Kopma uzaması (%)	1,7	1,3	8	1,52	2,2	5	4,6	2,5	2,5	9,4	-	20
Sertlik (BSD)	85	87	103	94	89	100	113	114	119	94	170-269	65
Darbe enerjisi (J)	20	-	42	25	-	29	48	-	13	58	-	100
Young modülü (GPa)	85,5	85,5	85,5	82,7	82,7	82,7	77,9	77,9	77,9	89,6	100	77,9

(\*Döküm sonrası 321°C sıcaklıkta 3 saat tavlandıktan sonra fırında soğutulmuş)

### 1.3.4. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özellikleri

Tekrarlı gerilmelerin etkisi altında çalışan makine parçalarında çalışma sırasında meydana gelen hasarların %80 veya daha fazlasının yorulmadan kaynaklandığı bilinmektedir [48-50]. Bu durum dinamik yüklere maruz kalan parçaların tasarım ve imalatında yorulmanın dikkate alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Başta kaymalı yatak olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamasında kullanılan çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma özellikleri hakkında literatürde detaylı bilgi bulunmamakla birlikte farklı döküm yöntemleriyle üretilmiş ticari ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarının yorulma dayanımı değerleri Tablo 6'da verilmiştir [5]. Tablodan çinko-alüminyum esaslı alaşımların üretiminde uygulanan döküm yönteminin alaşımların yorulma dayanımı üzerinde oldukça etkili olduğu ve ZA-27 alaşımının diğerlerine göre daha yüksek yorulma dayanımı sergilediği görülmektedir. Bu durum, döküm yönteminin çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışları üzerine etkisini incelemek için yapılan bir çalışmada [43] daha detaylı açıklanmıştır. Söz konusu çalışmada, kokil döküm ve basınçlı döküm yöntemleriyle çinko-alüminyum esaslı alaşımlar (ZA-8, ZA-12, ZA27) üretilmiş ve yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımının, aynı yöntemle üretilen ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarından daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarının kokil döküm yöntemiyle üretilen ZA-27 alaşımına yakın yorulma dayanımı sergilediği görülmüştür. Bu durum, yapı ve mekanik özelliklere dayandırılarak açıklanmıştır. Şöyle ki; basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımların, kokil döküm yöntemiyle üretilen alaşımlardan daha düşük tane boyutuna ve gözenek miktarına sahip olmasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [43]. Nitekim en düşük yorulma dayanımı sergileyen alaşımın (ZA-8, kokil d.) en büyük ortalama tane boyutuna ve en yüksek gözenek miktarına sahip olduğu gözlenmiştir. Gözenek miktarının etkisi bazı çalışmalarda incelenmiş ve çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışlarını olumsuz yönde etkileyen en önemli unsurlardan birisi olduğu tespit edilmiştir [51,52]. Söz konusu alaşımların gerek yorulma dayanımı gerekse mukavemet değerleri artan gözenek miktarı ile düştüğü bilinmektedir [19,51,52]. Bu durum gözeneklerin çentik etkisi oluşturduğu bölgelerde, yorulma çatlağının oluşmasına yol açan gerilme yığılmasının çok daha etkili olmasından kaynaklanmaktadır [48-52]. Ayrıca yapılan bir çalışmada [43], çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma dayanımı çekme dayanımları

ile ilişkilendirilmiştir. Şöyle ki; söz konusu alaşımların çekme dayanımı arttıkça yorulma dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum döküm yönteminin yanı sıra alaşımın kimyasal bileşiminin de yorulma davranışı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır [43,51]. Nitekim Savaşkan ve Aydın tarafından yapılan bazı çalışmalarda [52-55], kimyasal bileşimin kokil döküm yöntemiyle üretilen ikili Zn-(20-80)Al ve üçlü Zn-40Al-(1-5)Cu alaşımlarının yorulma davranışlarına etkileri incelenmiş ve bu incelemeler sonucunda ikili çinko-alüminyum alaşımların yorulma dayanımı artan alüminyum oranı ile arttığı belirlenmiştir [52]. İkili çinko-alüminyum alaşımlara düşük oranda bakır katılması durumunda ise yorulma dayanımının daha da arttığı görülmüştür. Ancak bakır katkısının % 2'yi aşması durumunda söz konusu alaşımların yorulma davranışı olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. Bu durum, söz konusu alaşımların yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanmıştır [52,53]. Şöyle ki; sertlik ve mukavemet değerleri arttıkça yorulma dayanımının arttığı, ancak üçlü alaşımların yorulma dayanımının sertlikten çok çekme dayanımına bağlı olduğu ileri sürülmüştür [52]. Örneğin ikili Zn-Al alaşımlar içerisinde en yüksek yorulma dayanımı en yüksek sertlik ve mukavemete sahip olan Zn-80Al alaşımından, üçlü Zn-Al-Cu alaşımlar içerisinde ise en yüksek yorulma dayanımı yine en yüksek mukavemete sahip olan Zn-40Al-2Cu alaşımından elde edilmiştir. Ayrıca, çalışma ortamının da çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışları üzerinde etkilerini incelemek amacıyla, ikili Zn-(20-80)Al ve üçlü Zn-40Al-(1-5)Cu alaşımların hava ve değişik ortamlardaki yorulma deneyleri yapılmıştır [53-55]. Bu deneyler sonucunda söz konusu alaşımların kuru hava ortamında en yüksek, tuzlu su (% 3.5 NaCl) çözeltisinde daha düşük, asit (% 1 HCl) çözeltisinde ise en düşük yorulma dayanımı sergilediği görülmüştür. Bu durum, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışları üzerinde asitli ortamın, tuzlu su ortamından daha etkili olduğunu göstermektedir. İkili çinko-alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı ve yorulma ömrü her iki korozif ortamda da artan alüminyum oranı ile düştüğü belirlenmiştir [54]. Ayrıca korozif ortamın bu alaşımların yorulma dayanımı üzerindeki etkisi düşük gerilme değerlerinde daha etkili olduğu görülmüştür. Yapılan bir başka çalışmada [55], monotektik bileşime sahip üçlü Zn-40Al-Cu alaşımlarının içerdiği bakır oranı bu alaşımların korozif ortamdaki yorulma davranışlarını etkilediği ileri sürülmüştür. Şöyle ki; bakır katkısı söz konusu alaşımın tuzlu su ve asitli ortamlarındaki yorulma ömrünü özellikle yüksek gerilmelerde az da olsa arttırdığı ancak belirli bir değer üzerinde bakır katkısı söz konusu alaşımın düşük gerilmelerdeki yorulma ömrünü fazla etkilemediği belirlenmiştir.

Tablo 6. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile bazı ticari alaşımların yorulma özellikleri [5].

Alaşım	Döküm yöntemi	Yorulma dayanımı(MPa)
ZA-8	Kum döküm	
	Kokil döküm	52
	Basınçlı döküm	103
ZA-12	Kum döküm	103
	Kokil döküm	-
	Basınçlı döküm	117
ZA-27	Kum döküm	172
	Kum döküm*	103
	Basınçlı döküm	145
Dökme demir (lam.graf)	-	97
Bronz (SAE660)	Kum döküm	110

(\* Isıl işlem görmüş durumda)

Son yıllarda geliştirilen ve en etkili plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan eş kanalda açısız ekstrüzyon yönteminin de söz konusu alaşımların yorulma performanslarını önemli ölçüde iyileştirdiği bilinmektedir [56-58]. Nitekim Aydın tarafından yapılan bazı çalışmalarda [57,58], eş kanalda açısız ekstrüzyon yönteminin ikili Zn-60Al ve Zn-80Al alaşımlarının yorulma dayanımını büyük oranda artırdığı belirlenmiştir. Yorulma dayanımındaki bu büyük orandaki artış söz konusu alaşımların yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanmıştır. Şöyle ki; bu alaşımların artan mukavemet ve süneklik değerlerine bağlı olarak ile yorulma performansında önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Yapılan çalışmada, eş kanalda açısız ekstrüzyon işlemiyle döküm sonrası oluşan tipik dendritik yapı tamamen ortadan kaldırılmış, bunun yerine ince ve şerit gibi uzamış fazlardan (alüminyumca zengin  $\alpha$  ve çinkoca zengin  $\alpha+\eta$ ) oluşan bir yapı elde edilmiştir. Ayrıca söz konusu alaşımların mekanik özellikleri ve yorulma performansı uygulanan paso sayısına ve işlem rotasına bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Şöyle ki; Zn-60Al alaşımına farklı rota ve paso sayıları kullanılarak uygulanan EKAE işlemi sonucunda söz konusu alaşımın yorulma dayanım sınırındaki artış yaklaşık olarak %82.5 gibi çok yüksek bir orana ulaşırken, Zn-80Al alaşımının yorulma dayanım sınırında ise 1 paso sonunda %74 ve 2 paso sonunda %89'luk artışlar elde edilmiştir. Yorulma davranışının iyileşmesi, söz konusu alaşımların artan mukavemet ve süneklik değerleriyle tokluğun artmasına dayandırılmış ve yorulma davranışı çekme dayanımından daha çok tokluğa bağlı olduğu belirlenmiştir [50,53,57,58].

Yapılan literatür araştırmaları, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışı üzerinde ısıtma işleminin etkisini inceleyen hemen hemen hiçbir çalışmanın olmadığını

göstermektedir. Ancak yapılan bir çalışmada[53], ısıl işlemin üçlü Zn-40Al-1Cu ve Zn-40Al-2Cu alaşımlarının yorulma davranışları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ileri sürülmüştür. Fakat söz konusu çalışmada sadece bir ısıl işlem parametresi uygulanmış olup ısıl işlemin çinko-alüminyum esaslı alaşımların yorulma davranışı üzerinde ki etkisi net bir şekilde ortaya konulamamıştır. Bu nedenle bu çalışmada kokil döküm yöntemi ile üretilmiş Zn-27Al-1Cu alaşımının farklı ısıl işlem koşullarında ki yorulma davranışları detaylı bir şekilde incelenerek, yorulma dayanım ve yorulma ömürlerinin belirlenmesine çalışılacaktır.

#### **1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı**

Başta kaymalı yatak imalatı olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında kullanılmak üzere pek çok çinko-alüminyum esaslı alaşım (ZA-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27, Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Cu-2Si, Al-25Zn-3Cu, Al-40Zn-3Cu-2Si vb.) geliştirilmiştir. Bu alaşımlar içerisinde en iyi mekanik özellikler monotektoid bileşime sahip (Zn-40Al) alaşımlardan ve ticari ZA-27 alaşımından elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar, çinko-alüminyum esaslı alaşımların geleneksel yatak alaşımlarından çok daha üstün fiziksel, mekanik ve tribolojik özellikler sergilediğini göstermektedir. Bu üstünlüklerin başında alaşım elementlerinin kolay ve ucuza temin edilmesi, üretim maliyetlerinin düşük olması, yüksek özgül mukavemete sahip olmaları, ısıl işleme elverişli olmaları ve yüksek sönümleme kapasitesine sahip olmaları gelmektedir. Bu üstünlüklerin yanı sıra, özellikle bakır içeren alaşımlarda boyutsal kararsızlık, düşük süneklik ve bazı uygulamalarda yetersiz kalan sertlik ve mukavemet gibi önemli sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunları ortadan kaldırmak, yapı ve mekanik özellikleri iyileştirmek için araştırmacılar bazı çalışmalar yapmış ve olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Şöyle ki; uygun döküm yönteminin seçimi ve döküm parametrelerinin (döküm sıcaklığı, katılma hızı, kalıp sıcaklığı) optimizasyonu ile sertlik ve mukavemet artırılmış, gözenek miktarı ise azaltılmıştır. Alaşım elementi katkısı ile aynı şekilde sertlik ve mukavemet değerlerinde artış elde edilmiştir. Söz konusu alaşımlara aşırı plastik deformasyon uygulanması durumunda ise içyapının tamamen değiştiği ve yeniden yapılandığı yani tipik dentritik yapının ortadan kalkarak bunun yerine ince şerit gibi uzanan bir içyapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum sertlik ve mukavemeti artırmakla birlikte sünekliğide iyileştirmiştir. Isıl işlem yöntemiyle ise alaşımın sertlik ve mukavemet değerleri artırılmış aynı zamanda kararlı ve homojen bir içyapı elde

edilmiştir. Yapılan çalışmalarda mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ile söz konusu alaşımların yorulma performansı ve tribolojik özelliklerinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar üzerine birçok çalışma yapılmasına rağmen farklı ısıtım işlem koşullarında ki yorulma davranışları hakkında literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu durum, bu alaşımlardan üretilen parçaların ve makine elemanlarının tasarımında önemli bir eksiklik olarak kendini göstermekte ve kullanım alanlarının genişletilmesine engel teşkil etmektedir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı; üstün mekanik özellikler sergileyen ticari ZA-27 alaşımına yakın bileşime sahip olan Zn-27Al-1Cu alaşımına uygulanan farklı ısıtım işlem koşullarının bu alaşımın yapı ve mekanik özellikleri, özelliklede yorulma davranışları üzerindeki etkisini incelemek ve kullanım amacına göre uygun ısıtım işlemin belirlenmesine katkıda bulunmaktır.

## **2. DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **2.1. Alaşımın Üretimi ve Kimyasal Analizi**

Bu çalışmada üçlü Zn-27Al-1Cu alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde yüksek saflıkta (%99.99) çinko, ticari saflıkta (%99.80) alüminyum ve elektrolitik (99,99) bakır kullanıldı. Söz konusu alaşımın üretimi için gerekli olan bakır, intermetalik alüminyum-bakır (Al-50Cu) alaşımından karşılandı. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi. Ergitilen alaşımlar ergime sıcaklığının 40-50 °C üzerindeki sıcaklıkta başka bir deyişle 580 °C sıcaklıkta oda sıcaklığında tutulan 60x110x260 mm boyutlarındaki bir kokil kalıba dökülerek katılaştırıldı. Döküm sonrası, külçelerin üst kısmında çekilme boşluğu içeren yaklaşık 60 mm'lik kısım kesilip atıldı. Üretilen alaşımın kimyasal bileşimi atomik absorpsiyon spektrometri yöntemi ile belirlendi.

Üretilen Zn-27Al-1Cu alaşımına ait külçelerden bazılarında ısıl işlem uygulandı. Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki külçelerin her birinden talaşlı imalat yöntemi ile 1'er adet metalografi ve sertlik, 3'er adet çekme ve darbe örneği ile 21 adet yorulma örneği hazırlandı.

### **2.2. Isıl İşlemler**

Isıl işlemin üretilen Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapı ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla çözündürme, su verme ve yapay yaşlandırma aşamalarını içeren ısıl işlemler uygulandı. Döküm sonrası hazırlanan örnekler ilk olarak elektrikli bir ısıl işlem fırınında 375 °C sıcaklıkta 24 saatlik bir süreyle çözündürme işlemine tabi tutulduktan sonra su verme (suda soğutma) işlemi uygulanarak örnekler oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Çözündürme ve su vermeyi izleyen yapay yaşlandırma işlemi 100 °C sıcaklıkta 0,5 saat, 1 saat, 2 saat, 3 saat ve 10 saatlik süreyle yapıldı. Ayrıca çözündürme ve su vermeyi izleyen yaşlandırma işlemi sırasında alaşımın sertliği 96 saatlik bir süre boyunca belirli aralıklarla ölçülerek sertliğin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri elde edildi.

### 2.3. Yapısal ve Fiziksel Özelliklerin İncelenmesi

İçyapı incelemeleri için, dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumlardaki alaşımdan alınan örnekler, standart metalografi yöntemiyle hazırlandı. Dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki örnekler % 3'lük nital çözeltisi (%3 nitrik asit + %97 alkol) içerisinde dağlandı. Hazırlanan metalografi numuneleri ve yorulma örneklerinin kırık yüzeyleri hem ışık mikroskobu hem de taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğraflar çekildi. Diğer taraftan alaşımın içyapısında ki fazlar enerji dispersif spektroskopisi (EDS) yöntemiyle analiz edilerek belirlendi.

Alaşımın yoğunluğunu belirlemek için talaşlı işleme silindirik örnekler hazırlandı. Bu örneklerin boyutları  $\pm 0,001$  mm hassasiyetine sahip mikrometreyle ölçülerek hacimleri hesaplandı. Örneklerin kütleleri ise  $\pm 0,01$  mg hassasiyetine sahip bir terazide ölçüldü. Elde edilen değerler doğrultusunda örneklerin yoğunlukları kütle-hacim ilişkisinden yararlanılarak belirlendi.

### 2.4. Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

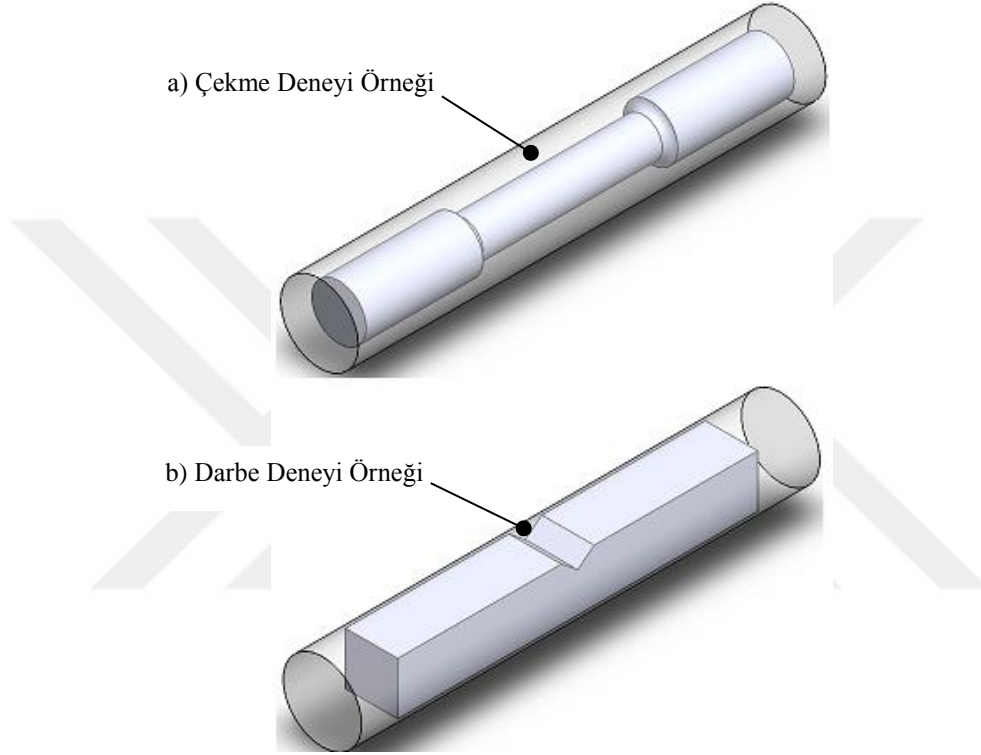
#### 2.4.1. Çekme, Sertlik ve Darbe Deneyleri

Çekme deneyleri için, gerek dökülmüş gerekse ısıtılmış işlem görmüş durumlardaki Zn-27Al-1Cu alaşımından talaşlı işlem ile çapı 5 mm ve ölçü uzunluğu 25 mm olan TS EN ISO 6892-1 standardına uygun örnekler hazırlandı. Çekme deney örneğinin şematik resmi Şekil 3a'da verilmiştir. Hazırlanan örnekler üniversal bir çekme deney makinesinde  $0,02$  mm/s'lik çekme hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Her bir koşul için 3 örnek kullanıldı. Söz konusu alaşımın çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri bu üç örnekten elde edilen verilerin ortalaması alınarak belirlendi.

Sertlik deneyi için dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşımdan alınan örnekler talaşlı imalat yöntemi ile yüzeyleri paralel olacak şekilde işlendi ve parlatıldı. Sertlik ölçümleri; Brinell sertlik ölçme yöntemi ile 31,25 kg yük altında ve 2,5 mm çaplı bilye uç kullanılarak gerçekleştirildi. Her örnek üzerinde beş ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı.

Darbe deneyleri için gerek dökülmüş gerekse ısıtılmış işlem görmüş durumlardaki Zn-27Al-1Cu alaşımından talaşlı işleme  $10 \times 10 \times 55$  mm<sup>3</sup> ölçülerinde örnekler hazırlandı.

Örneklerin tam orta bölümünde derinliği 2 mm olan  $45^\circ$  açığa sahip çentik açılmış olup, çentiğin uç kısmı yarıçapı 0,25 mm olacak şekilde işlendi. Söz konusu darbe deney örneklerinin şematik resmi Şekil 3b’de verilmektedir. Darbe deneylerinde her bir durum için üç adet numune kullanılmış olup deneyler maksimum darbe enerjisi 500 kg.cm ( $\pm 0,5$  kg.cm) olan bir Charpy deney düzeneğinde yapılmıştır.



Şekil 3. Zn-27Al-1Cu alaşımından elde edilen (a) çekme ve (b) darbe deney örneklerinin şematik resmi

#### 2.4.2. Yorulma Deneyi

Gerek dökülmüş gerekse farklı sürelerde ısıtılmış durumda ki üçlü Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma davranışı laboratuvarında imal edilen dönel eğmeli bir yorulma deney düzeneği yardımıyla incelendi. Şekil 4’de genel görünümü verilen bu deney düzeneği; 2 kW gücünde bir elektrik motoru, iki adet mil, millerin yataklanmasında kullanılan iki adet ana yatak, motor çıkış milinden aldığı hareketi ana yatak miline ileten bir kardan kavrama, örnek tutucuları, yük askı kolu, otomatik kumanda ünitesi, anahtar ve devir sayacı gibi temel elemanlardan oluşmaktadır.

Deney makinesinin dönme hareketi yanında açısai hareket serbestliğini de sağlayabilmesi için özel bir yataklama sistemi tasarlanmıştır. Motor ile deney düzeneği mili arasındaki bağlantıyı sağlayan özel bir kardan kavraması sisteme açısai ve eksenel hareket serbestliği kazandırmaktadır. Ayrıca, deney sistemindeki eksenel hareketi sağlayabilmek için bir sonsuz vida mekanizması kullanılmış ve motor hareketli bir tabla üzerine yerleştirilmiştir. Deney örneğinin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısını belirlemek için bir elektronik devir sayacı, örnek kırıldığında düzeneğin otomatik olarak durmasını sağlamak için de bir anahtar kullanılmıştır. İki farklı devir sayısında (1500 ve 3000 d/d) çalışabilen deney makinesi opsiyonel yük uygulama seçeneği sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Şöyle ki; yükleme işlemi yük hücresi yardımıyla otomatik olarak veya ağırlık asmak suretiyle manuel olarak gerçekleştirilebilmektedir.

Talaşlı yöntemle yüzeyi hassas bir şekilde işlenerek hazırlanan yorulma örneği iki ucundan yorulma makinasının örnek tutucularına bağlanarak sabitlenmektedir. Yük askı koluna ağırlık asılarak veya yük hücresi ve kontrol ünitesi kullanılarak örneğe eğme yükü uygulanmakta, bu eğme yükü iki yükleme kolu arasında sabit bir eğme momenti ve bu eğme momenti de örneğin en dar kesiti olan orta noktasında maksimum eğme gerilmesi oluşturmaktadır. Söz konusu örnek elektrik motoru ile sürekli olarak döndürülmekte ve örneğin en dar kesiti üzerindeki her bir nokta ortalama gerilme sıfır olacak şekilde sinüzoidal bir değişim gösteren çekme ve basma gerilmelerinin etkisi altında kalmaktadır. Yorulma deneyine tabi tutulan örneklerin kırıldıktan sonraki durumunu gösteren resim Şekil 5’de verilmiştir. Yorulma numunesine etkiyen eğme gerilmesi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{eğ} = \frac{M_{eğ}}{W_{eğ}} \rightarrow \sigma_{eğ} = \frac{P.l}{\frac{\pi.d^3}{32}} \quad (1)$$

Burada  $\sigma_{eğ}$  eğme gerilmesini,  $M_{eğ}$  eğme momentini,  $W_{eğ}$  ise mukavemet momentini göstermektedir. Örneğin çapı  $d=4$  mm ve moment kolu uzunluğu  $l=117$  mm olan büyüklükler (1) bağıntısında yerine konup hesaplandığında, örneğe uygulanan yük (P) ile örneğin en dar kesitinde oluşan eğme gerilmesi ( $\sigma_{eğ}$ ) arasında aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilen bir ilişkinin olduğu belirlendi.

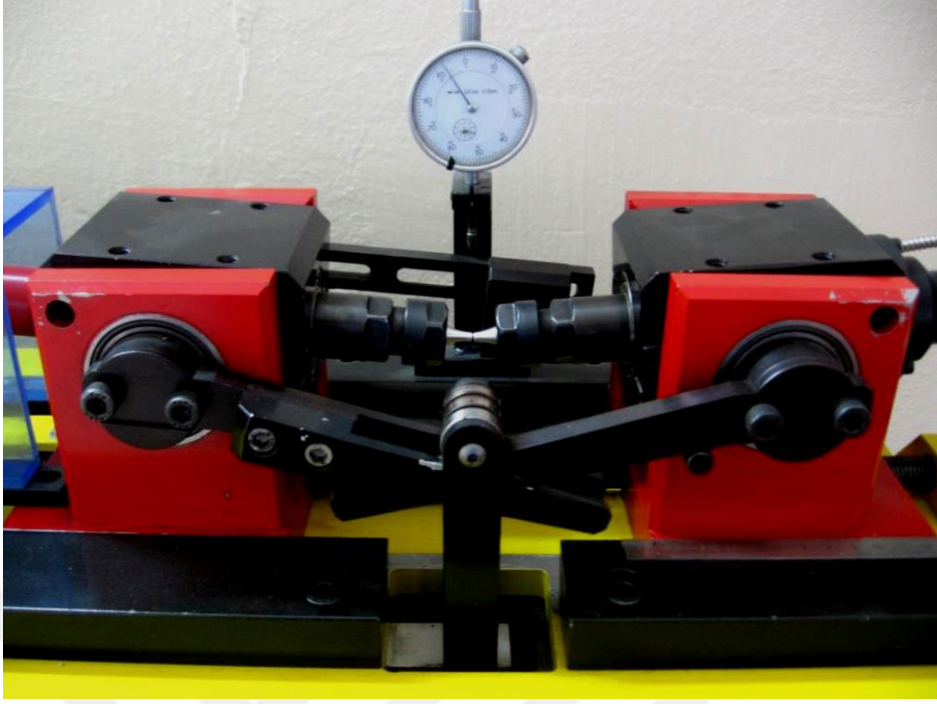
$$\sigma_{eğ} = 18,6 P \quad (2)$$

Burada P'nin birimi N,  $\sigma_{eg}$ 'nin birimi ise MPa'dır.

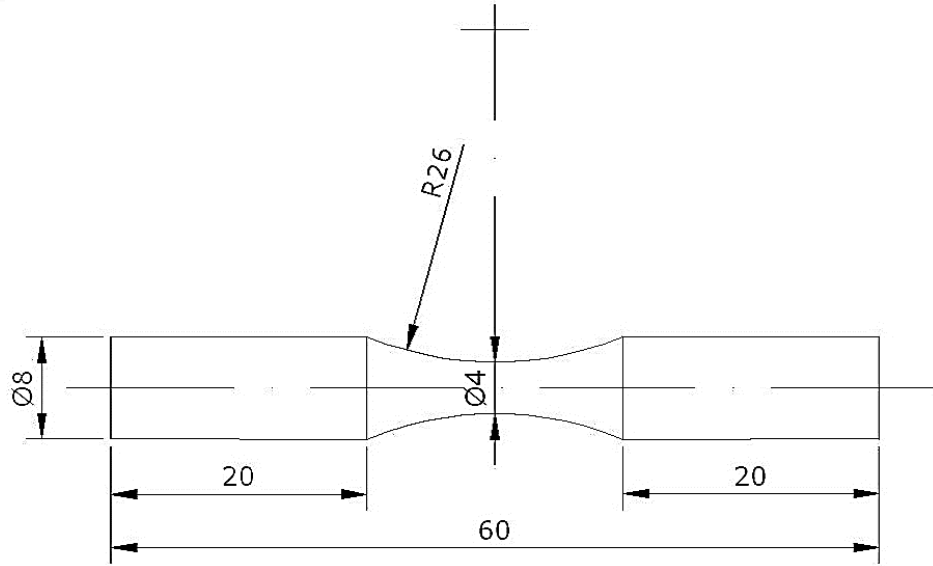


Şekil 4. Dönel eğmeli yorulma deney makinesi

Bu çalışma için üretilen Zn-27Al-1Cu alaşımından gerek dökülmüş gerekse farklı ısı işlem görmüş durumdaki numunelerden ASTM E-466 standardına uygun ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,4  $\mu\text{m}$  olan yorulma örnekleri talaşlı imalat yöntemiyle (CNC tezgâhında) üretildi. Bu örneklerin teknik resmi Şekil 6'da verilmiştir. Dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumdaki örnekler, sözü edilen deney düzeneğinde 3000 dev/dak'lık sabit bir devir sayısında ve farklı gerilmeler altında yorulma deneyine tabi tutuldu. Yorulma deneyleri dökülmüş durumdaki örnekler için 132 - 200 MPa ve ısı işlem görmüş durumdaki örnekler için ise 78 - 200 MPa arasında değişen farklı gerilmelerde yapıldı. Her bir gerilme değeri için üç yorulma deneyi yapıldı ve örneklerin kırılmasına kadar geçen çevrim sayıları bu değerlerden elde edilen verilerin ortalaması alınarak belirlendi. Elde edilen verilerden yararlanılarak alaşımların gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri çizildi.



Şekil 5. Deney örneğinin kırılması durumunda açısız hareket serbestliğine sahip yatakların genel görünümü



Şekil 6. Yorulma deney numunesinin şekli ve boyutları

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Alaşımın Kimyasal Bileşimi ve Yoğunluğu

Üretilen Zn-27Al-1Cu alaşımının kimyasal bileşimi ve yoğunluğu Tablo 7’de verilmiştir.

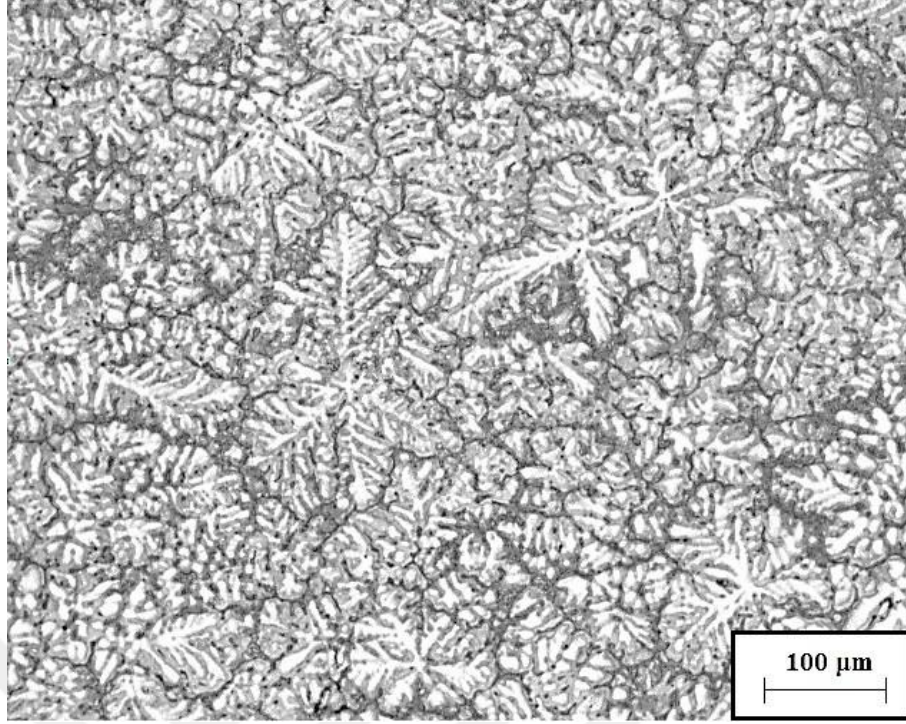
Tablo 7. Zn-27Al-1Cu alaşımının kimyasal bileşimi ve yoğunluğu

Alaşım	Kimyasal bileşim (%)			Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
	Zn	Al	Cu	
Zn-27Al-1Cu	72,2	26,7	1,1	4,906

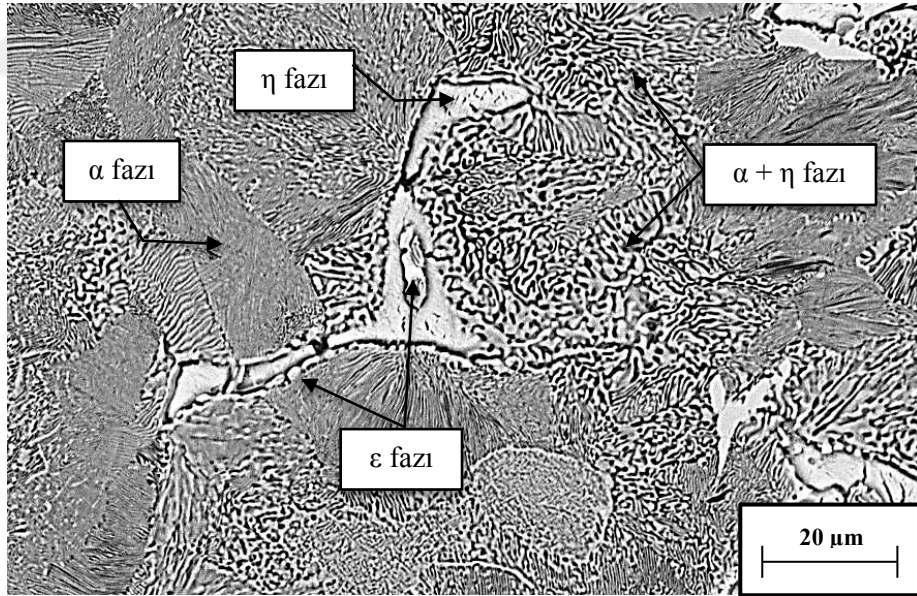
#### 3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

Dökülmüş ve ısıtılmış işlem uygulanmış durumdaki üçlü Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısını gösteren fotoğraflar Şekil 7-13’de verilmiştir. Şekil 7’de görüldüğü gibi dökülmüş durumdaki alaşımın içyapısı alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin  $\eta$  fazından oluşmaktadır. Söz konusu alaşımı oluşturan fazların detaylı görünümü Şekil 8’deki SEM fotoğrafında verilmiştir. Bu fotoğraftan ötektoid dönüşüm sonucu oluşan ve  $\alpha$  ve  $\alpha + \eta$  fazlarını içeren lamelli yapı ile çinkoca zengin  $\eta$  fazı ve bakırca zengin  $\epsilon$  fazı görülmektedir.

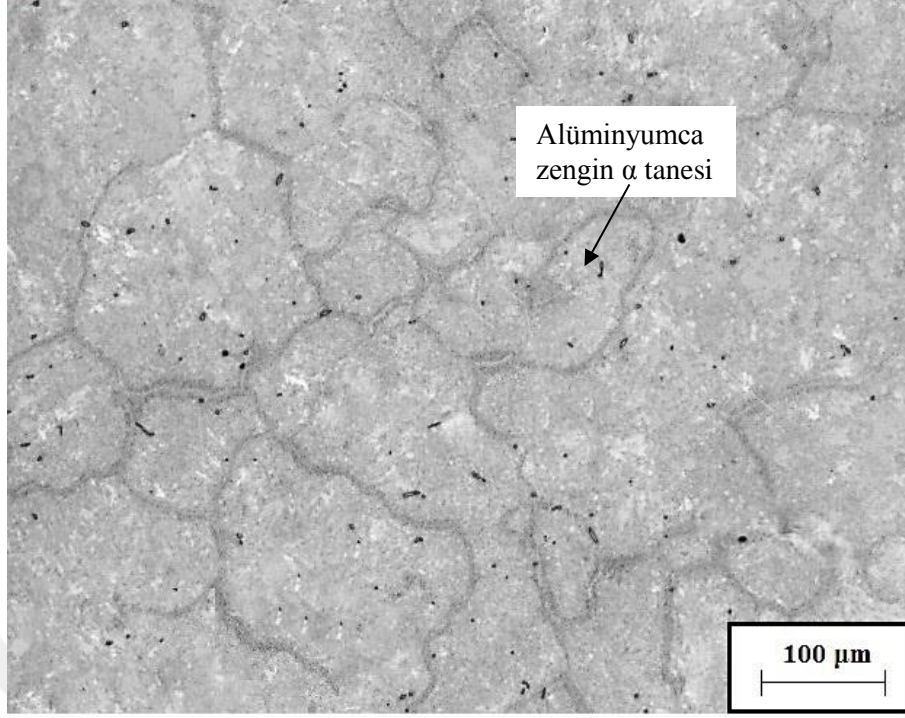
Çözündürme ve su verme sonrası farklı sürelerde yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımın içyapısının ise tamamen değiştiği görüldü. Nitekim uygulanan ısıtılmış işlemler sonucunda Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki dendritik yapısının tamamen ortadan kalktığı ve bunun yerine iri  $\alpha$  tanelerini içeren bir içyapının oluştuğu gözlemlendi. Ayrıca alaşımın tane sınırları ve tane içi bölgelerinde çinko ve bakırca zengin çökeltilerinde oluştuğu görüldü. Farklı yaşlandırma sürelerinde ısıtılmış işleme tabi tutulan alaşımın yaşlandırma süresi arttıkça tane boyutunun arttığı, tane sınırlarının genişlediği ve tane sınırlarında oluşan çökeltilerin daha da yoğunlaştığı gözlemlendi, Şekil 9-13.



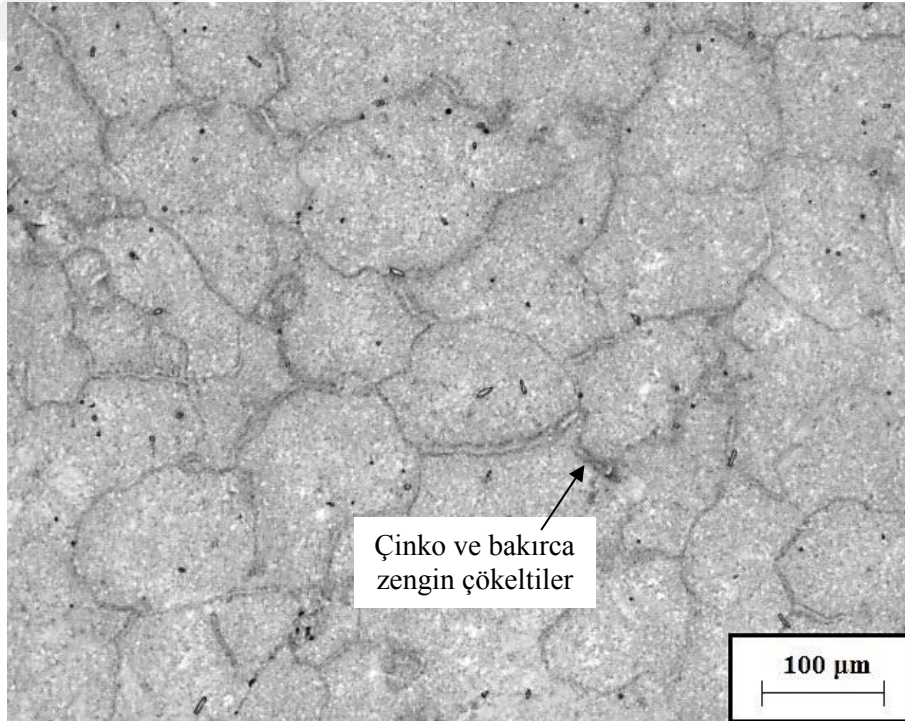
Şekil 7. Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



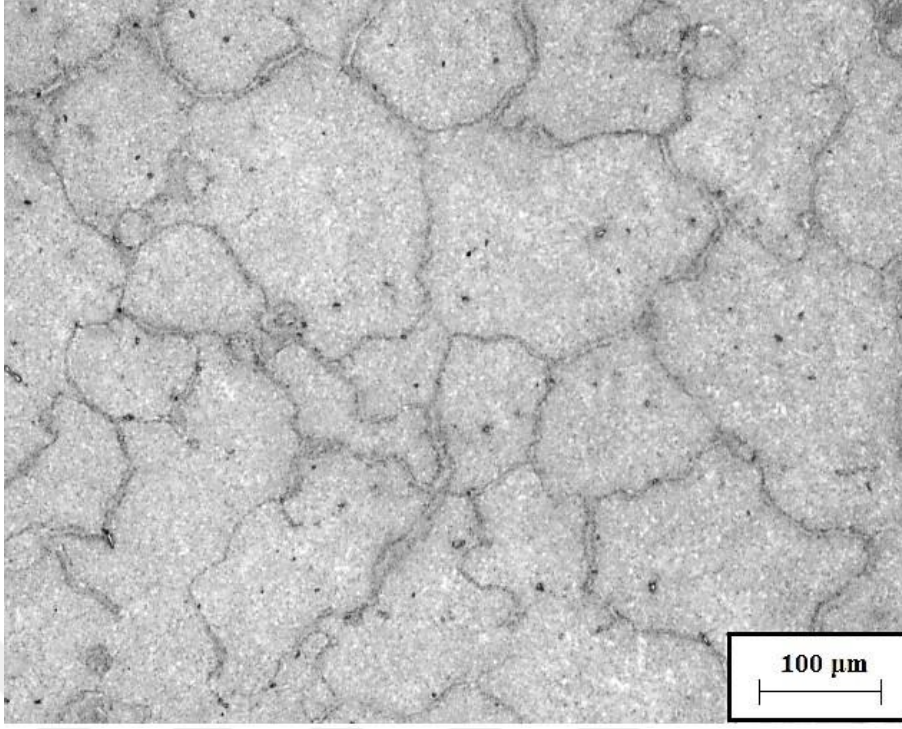
Şekil 8. Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının detayını gösteren SEM fotoğrafı



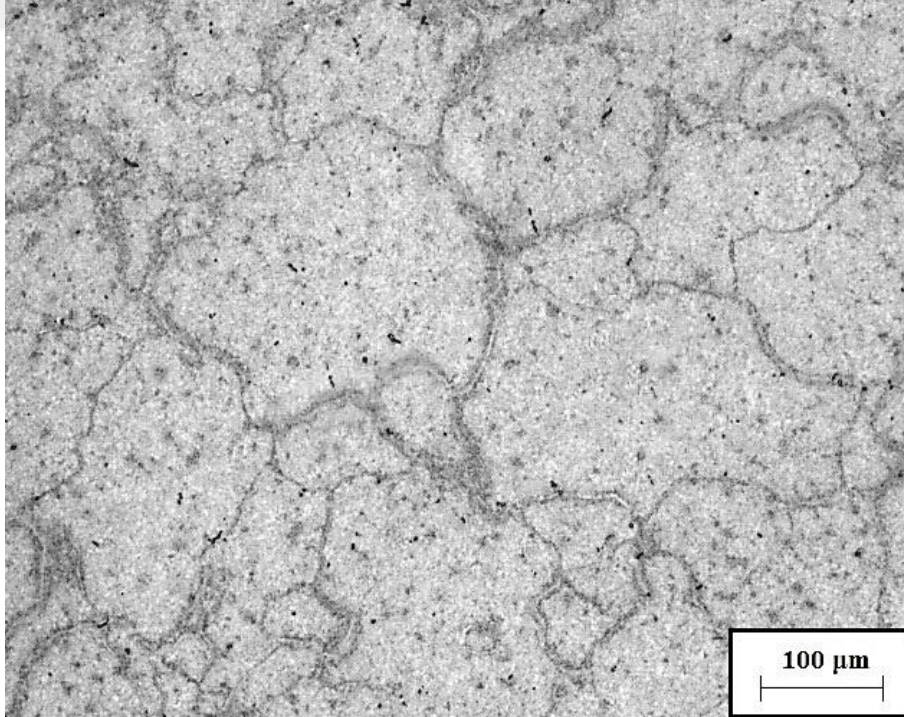
Şekil 9. 100 °C sıcaklıkta 0,5 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı



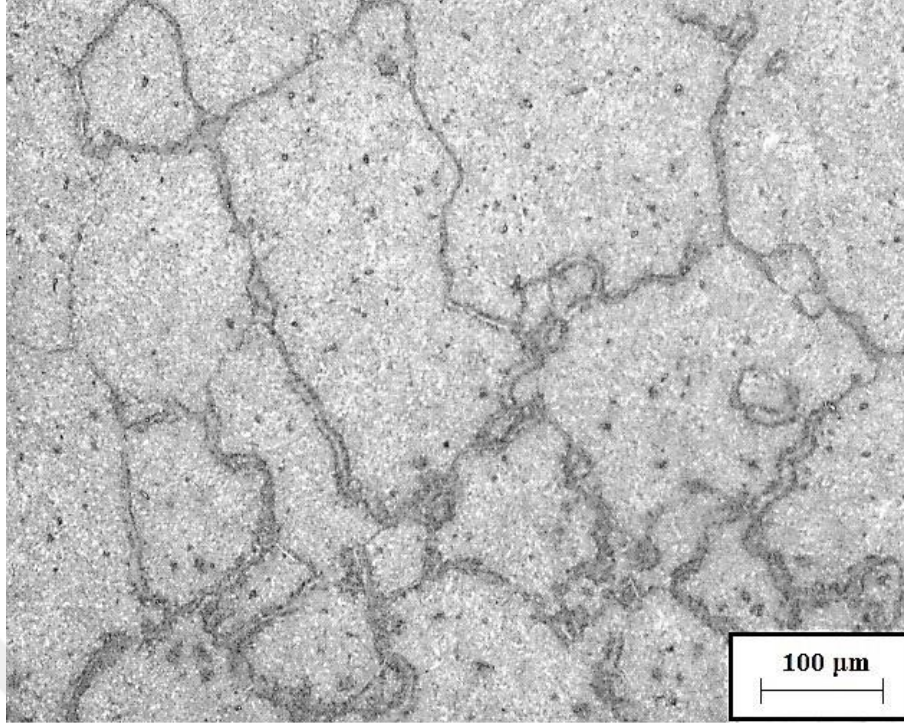
Şekil 10. 100 °C sıcaklıkta 1 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı



Şekil 11. 100 °C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı

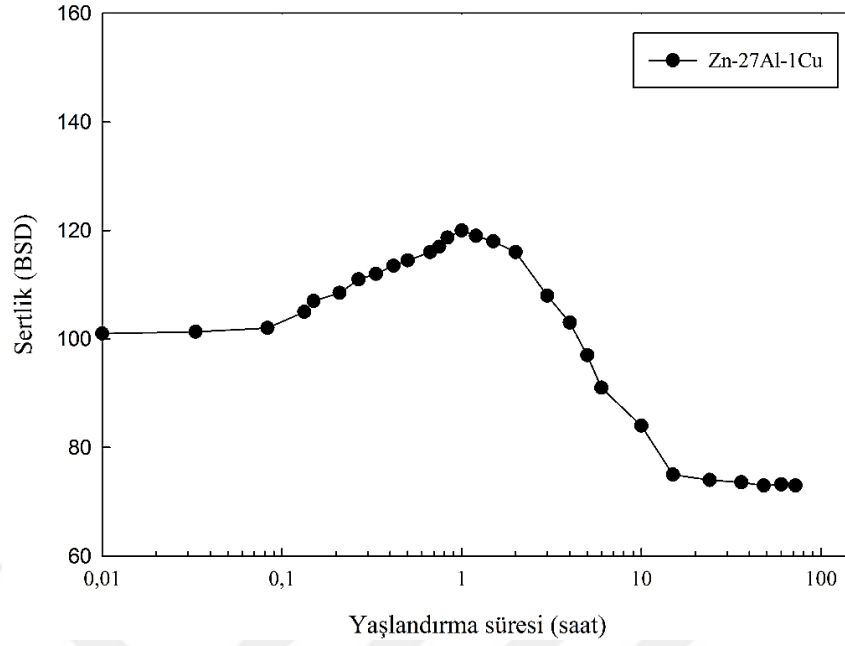


Şekil 12. 100 °C sıcaklıkta 3 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı



Şekil 13. 100 °C sıcaklıkta 10 saat yaşlandırılan Zn-27Al-1Cu alaşımının içyapısı

Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yaşlandırma işlemine tabi tutulan Zn-27Al-1Cu alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri Şekil 14’de verilmiştir. Bu eğri yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımın sertliğinin artan yaşlandırma süresi ile artarak en yüksek sertlik değerine 1 saatin sonunda ulaştığı, bu süre sonrasında yaşlandırma süresi arttıkça sertliğin giderek düştüğü, 10 saat sonrasında yapılan yaşlandırma işlemlerinde ise yaklaşık sabit kalmakla birlikte en düşük sertlik değerine ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 14. Zn-27Al-1Cu alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri

### 3.3. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

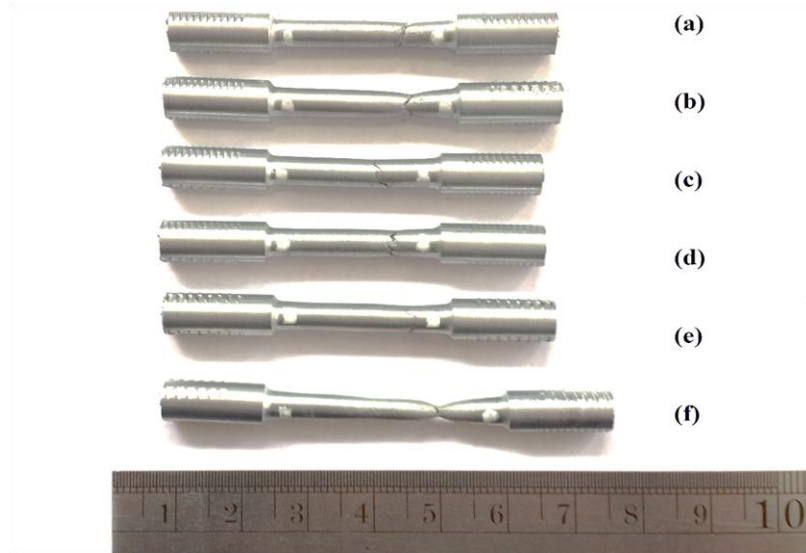
#### 3.3.1. Sertlik, Çekme ve Darbe Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Zn-27Al-1Cu alaşımının sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Bu tablodan genel anlamda çözündürme ve su verme işlemi sonrasında farklı sürelerde yapay yaşlandırma işlemi uygulanan alaşımların dökülmüş durumdakine göre genelde daha yüksek sertlik ve çekme dayanımı değerleri sergilediği görülmektedir. Bunun aksine 10 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın bu değerleri ise dökülmüş durumdan daha düşüktür. Kopma uzaması ve darbe direnci değerleri ise söz konusu alaşıma uygulanan yaşlandırma süresine göre farklılık göstermektedir. En düşük kopma uzaması değeri en yüksek sertlik ve çekme dayanımına sahip olan 1 saatlik yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulan örnekten, en yüksek kopma uzaması değeri en düşük sertlik ve çekme dayanımına sahip olan 10 saatlik yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulan örnekten elde edilmiştir. Yaşlandırma işlemi uygulanmış örnekler içerisinde sıra dışı kopma uzaması gösteren 10 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın çekme deneyi sonucu oluşan boy değişimini ve diğer durumlarla arasındaki farkı gösteren fotoğraf Şekil 15’te verilmiştir. Diğer taraftan ısı işlem görmüş örnekler içerisinde 0,5 saatlik yapay yaşlandırma

işlemine tabi tutulan örnek hariç diğer durumdaki örnekler dökülmüş durumdakinden daha düşük darbe direnci sergilemişlerdir.

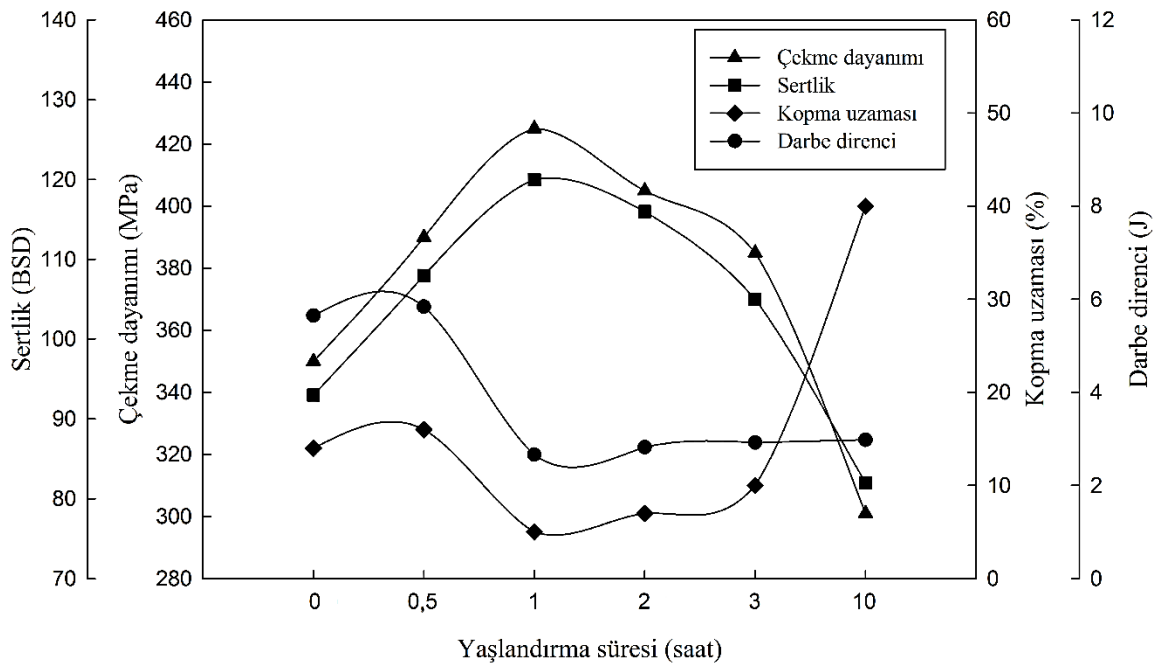
Tablo 8. Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem uygulanmış durumdaki sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri

Alaşım	Durum	Sertlik (BSD)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Darbe Direnci (J)
Zn-27Al-1Cu	dökülmüş	93	345	14	5,65
	0,5 saat	108	390	16	5,84
	1 saat	120	425	5	2,66
	2 saat	116	405	7	2,82
	3 saat	105	385	10	2,92
	10 saat	82	301	42	2,98



Şekil 15. (a) dökülmüş, (b) 0,5 h, (c) 1 h, (d) 2 h, (e) 3 h ve (f) 10 h yaşlandırılmış durumlarda çekme deneyine tabi tutulan Zn-27Al-1Cu alaşımının boylarındaki değişimini gösteren fotoğraf

Dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumlardaki Zn-27Al-1Cu alaşımının bazı mekanik özelliklerinin uygulanan yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğriler Şekil 16' daki grafikte verilmiştir. Söz konusu grafikten alaşımın sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğrilerin uyum içinde olduğu görülmektedir. Ayrıca yaşlandırma süresine bağlı olarak artan sertlik ve mukavemet ile alaşımın kopma uzamasının düştüğü ve uzun süreli yaşlandırma işlemlerinde ise söz konusu değerlerin arttığı görülmektedir. Başka bir deyişle 0,5 saatten 1 saate kadar olan yaşlandırma süresinde alaşımın sertlik ve çekme dayanımı artmış kopma uzaması düşmüştür. 1 saatten 10 saate kadar olan yaşlandırma süresinde ise alaşımın sertlik ve mukavemeti düşerken kopma uzaması artmıştır. Kopma uzaması değerinde 1 saat yaşlandırma süresi sonunda ani bir düşme, 10 saat yaşlandırma süresi sonunda ise önemli oranda bir artış meydana gelmiştir. Öte yandan darbe direnci 0,5 saat yaşlandırma süresi sonunda az da olsa artmış, 1 saatlik yaşlandırma işlemi sonrasında ise keskin bir şekilde düşmüştür. İlerleyen yaşlandırma işlemiyle söz konusu alaşımın darbe direnci yaklaşık sabit kalmakla birlikte azda olsa artmıştır.



Şekil 16. Dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumlardaki Zn-27Al-1Cu alaşımının mekanik özelliklerinin uygulanan yaşlandırma süresine göre değişim grafiği

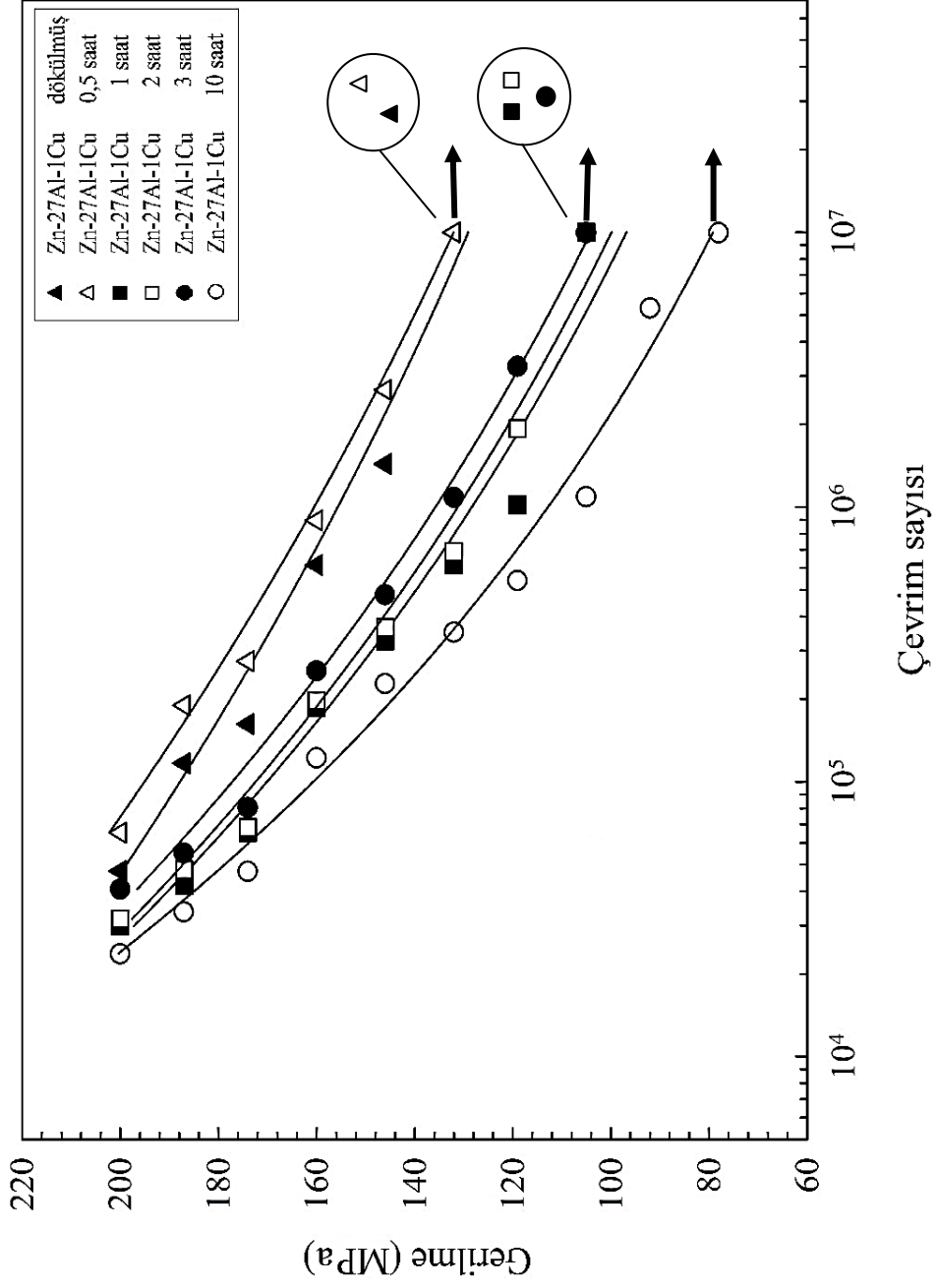
### 3.3.2. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Dökülmüş ve ısıt işleme görmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımının farklı gerilmeler altında yapılan yorulma deneylerinden elde edilen bulgular Tablo 9'da verilmiştir. Bu tabloda yorulma örneklerine uygulanan gerilmeler ile söz konusu örneklerin kırılmasına kadar geçen çevrim sayıları yer almaktadır. Yorulma deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılarak çizilen gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrileri ise Şekil 17'de verilmiştir. Bu şekilden söz konusu alaşımın en yüksek yorulma ömrünü 0,5 saat yaşlandırılmış durumda, en düşük yorulma ömrünü ise 10 saat yaşlandırılmış durumda sergilediği görülmektedir. Ayrıca dökülmüş ve en yüksek yorulma ömrü sergileyen 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımların yorulma eğrilerinin birbirine yakın olduğu, 1-3 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımlara ait eğrilerin ise yatay eksene doğru kayarak bunlardan uzaklaştığı görülmektedir. Yaşlandırma süresi 1saatten 3 saate çıkarıldığında söz konusu alaşımların birbirine yakın değerler sergilemekle birlikte yorulma performansının iyileştiği ancak dökülmüş durumdaki alaşımın yorulma ömrü değerine ulaşamadığı görülmektedir.

Tablo 9. Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımına ait yorulma deney sonuçları

Gerilme (MPa)	Dökülmüş	Çevrim sayısı					
		Çözündürme ve su verme sonrası yaşlandırma işlemi uygulanmış					
		0,5 saat	1 saat	2 saat	3 saat	10 saat	
78	-	-	-	-	-	> 10x10 <sup>6</sup>	
92	-	-	-	-	-	5321110	
105	-	> 10x10 <sup>6</sup>	> 10x10 <sup>6</sup>	> 10x10 <sup>6</sup>	> 10x10 <sup>6</sup>	1093930	
119	-	-	1021220	1930790	3263030	540720	
132	> 10x10 <sup>6</sup>	> 10x10 <sup>6</sup>	617740	687620	1088600	351070	
146	1434500	2671650	325620	364590	480290	228180	
160	616450	894600	186746	196938	254070	122490	
174	162169	274190	65430	68310	80850	47320	
187	116890	189700	41927	47850	55120	33710	
200	47316	65340	29910	31680	40770	23740	

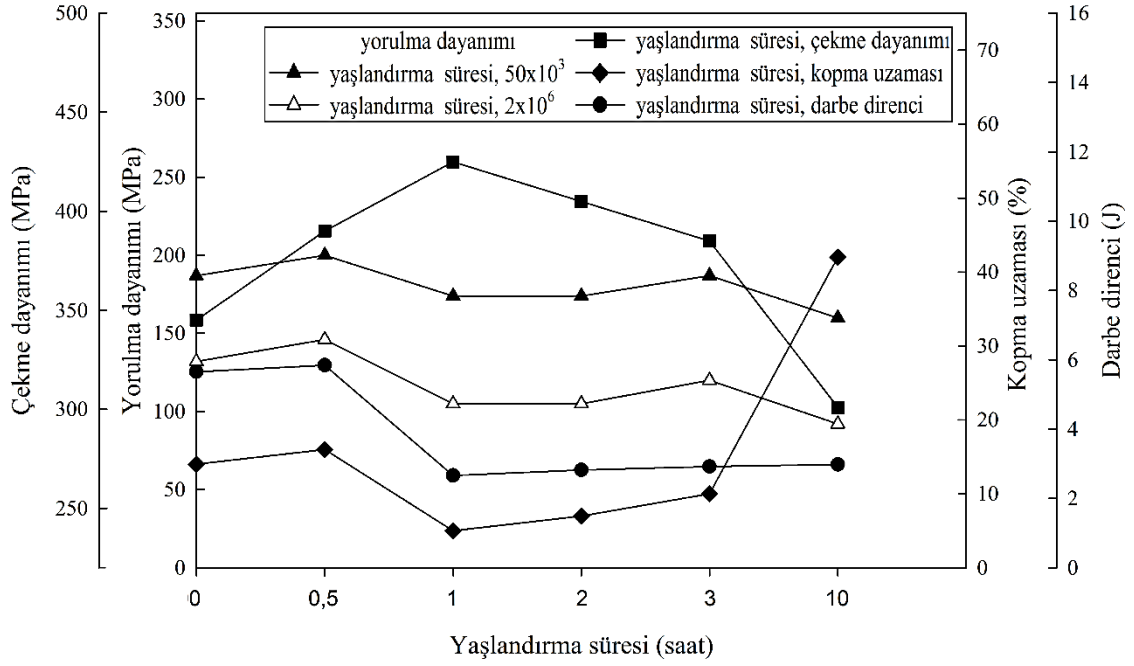
(&gt; Çevrim sayısı bu değeri aşmasına karşın örnek kırılmadı )



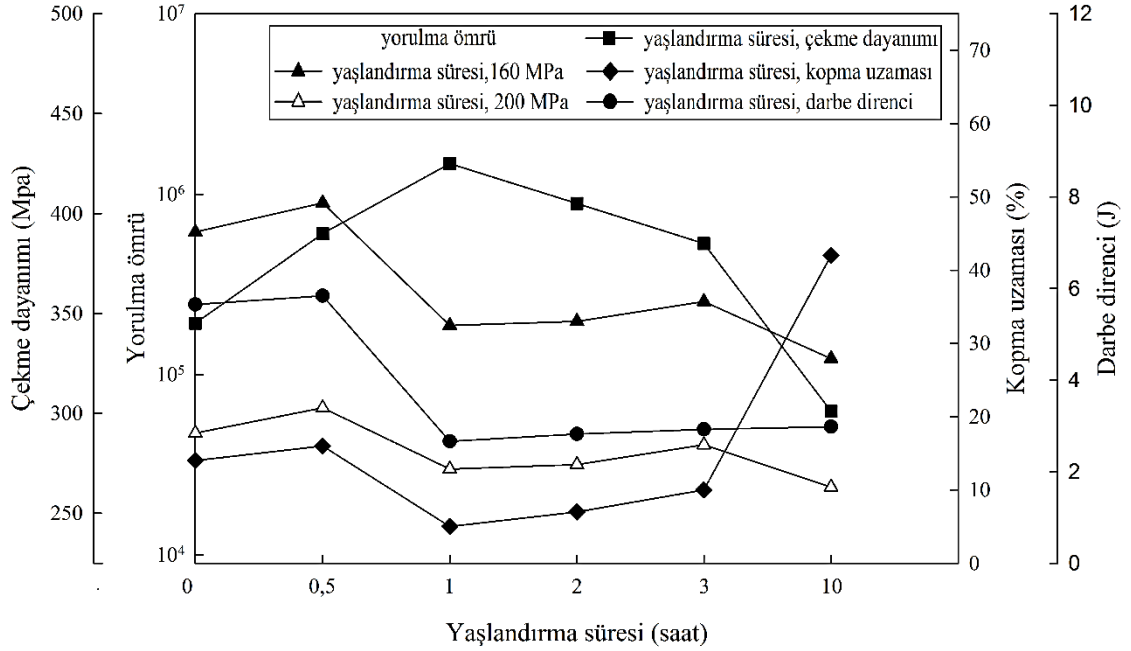
Şekil 17. Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımına ait gerilme-çevrim sayısı eğrileri

### 3.3.2.1. Yorulma Deneylerinden Elde Edilen Verilerin Korelasyonu

Isıl işlemin alaşımların yorulma özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, yaşlandırma süresinin yorulma dayanımı ve yorulma ömrüne göre değişimini gösteren eğriler yorulma deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılarak çizilmiştir, Şekil 18-19. Ayrıca yorulma davranışı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direncinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğriler de bu grafiklere eklenmiştir. Şekil 18, Zn-27Al-1Cu alaşımının düşük ( $N_f \leq 50 \times 10^3$ ) ve yüksek ( $N_f \geq 2 \times 10^6$ ) çevrim sayısında gerçekleştirilen yorulma deneylerinden elde edilen yorulma dayanım değerlerinin, Şekil 19 ise bu alaşımın farklı gerilme seviyelerindeki (160 ve 200 MPa) yorulma ömrü değerlerinin yaşlandırma süresine göre değişimini göstermektedir. Bu şekillerden, dökülmüş durumdaki alaşımın yorulma dayanımı ve yorulma ömrü değerlerinin 0,5 saat yapay yaşlandırma işlemi sonrasında az da olsa arttığı, yaşlandırma süresinin 0,5 saati aşması durumunda ise alaşımın yorulma dayanımı ve yorulma ömründe azalma meydana geldiği görülmektedir. Yaşlandırma süresi 1 saatten 3 saate çıkarıldığında yorulma özelliklerinin iyileşmesine rağmen dökülmüş durumdaki alaşımın yorulma performansını yakalayamadığı, yaşlandırma süresi 10 saate ulaştığında ise söz konusu alaşımın yorulma dayanımı ve yorulma ömrünün daha da azaldığı ve tüm koşullar içerisinde en kötü yorulma performansı sergilediği görülmektedir. Ayrıca bu grafiklerden, 10 saat yaşlandırılmış durum hariç diğer tüm durumlarda alaşımın yorulma davranışının yaşlandırma süresine bağlı olarak değişen kopma uzaması ve darbe direnci ile doğrudan ilişkili olduğu ancak çekme dayanımı ile genelde farklı davranış sergilediği görülmektedir. Şöyle ki; 3 saate kadar yapılan yaşlandırma sonrasında kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin söz konusu alaşımın yorulma dayanımını ve yorulma ömrüne benzer bir davranış sergilediği, 10 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımın ise kopma uzaması yüksek oranda artmasına rağmen yorulma performansının düştüğü görülmüştür. 1 saat yaşlandırma işlemi sonucunda söz konusu alaşımın çekme dayanımı artarken yorulma performansı düşmüş, yaşlandırma süresi 1 saatten 3 saate ulaştığında ise çekme dayanımı düşerken yorulma performansı iyileşmiştir. 0,5 saat ve 10 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın yorulma özellikleri ise çekme dayanımına paralel bir değişim göstermiştir.



Şekil 18. Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin yaşlandırma süresine göre değişimi



Şekil 19. Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma ömrü, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin yaşlandırma süresine göre değişimi

Uzun ömürlü yorulmada, ortalama gerilmenin sıfır olması durumunda malzemelerin yorulma dayanımı ve yorulma ömrü arasında aşağıdaki formülle ifade edilen Basquin bağıntısının geçerli olduğu bilinmektedir [50].

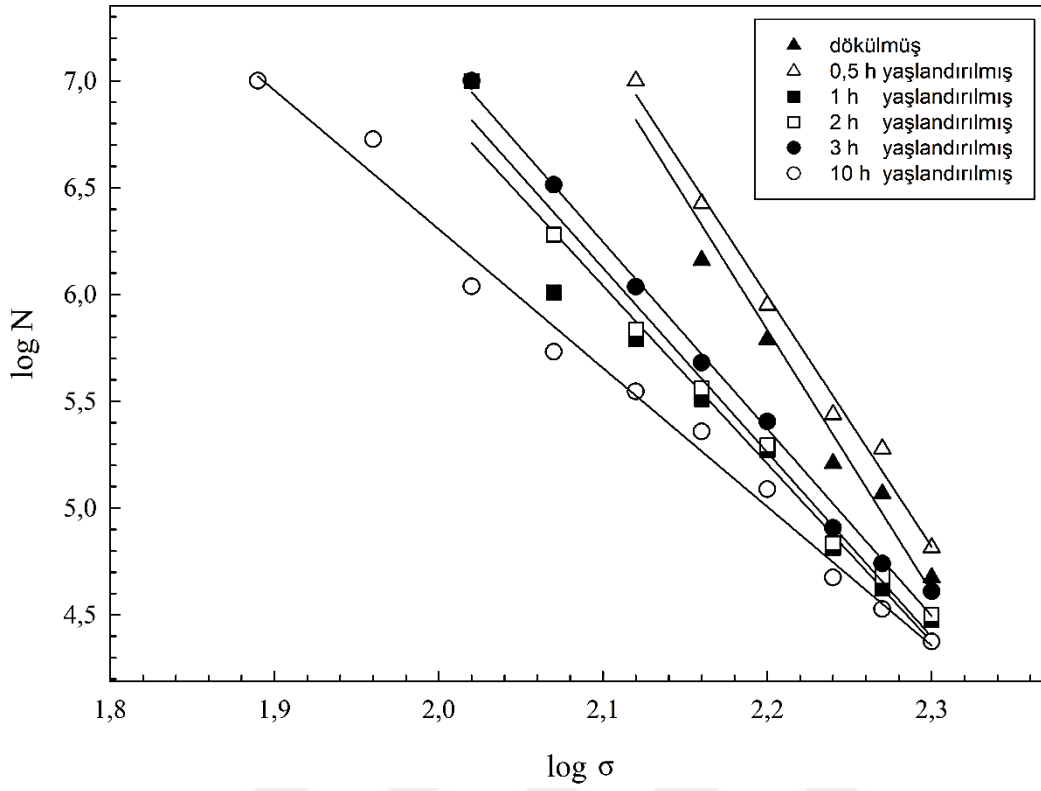
$$N = A \sigma^{-k} \quad (3)$$

Burada  $\sigma$  gerilme genliği, N örnek kırılıncaya kadar dayanabildiği çevrim sayısı yani yorulma ömrü, k ve A sabitlerdir. Bu bağıntının logaritması alındığında söz konusu bağıntı,

$$\log N = -k \log \sigma + \log A \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eğer Basquin bağıntısı bir malzeme için geçerli ise  $\log N$ 'nin  $\log \sigma$ 'ya göre değişiminin lineer yani doğru biçiminde olması ve bu doğrunun eğiminin de k olması gerekir [50]. Daha önce yapılan çalışmalarda, Zn-Al alaşımlarının gerek kuru hava gerekse tuzlu su ve HCl çözeltisi gibi değişik korozyon ortamlarındaki yorulma davranışının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği belirlenmiştir [53,54]. Bu çalışmada incelenen Zn-27Al-1Cu alaşımının gerek dökülmüş gerekse ısıtılmış durumda yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak çizilen ve yorulma ömrünün ( $\log N$ ) – gerilme genliğine ( $\log \sigma$ ) göre değişimini gösteren doğruları içeren grafik Şekil 20'de verilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen bu doğruların korelasyon katsayılarının (c) 1'e çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, dökülmüş ve ısıtılmış durumda yorulma davranışının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış durumdaki k ve A sabitleri ile c ( korelasyon katsayısı ) değerleri belirlenmiş ve bu değerler Tablo 10'da verilmiştir. Bu tablodan, söz konusu alaşımın en yüksek k ve A değerlerini dökülmüş ve 0,5 saat yaşlandırılmış durumda sergilediği görülmektedir. Yaşlandırma süresi 1 saate çıkarıldığında bu değerlerin düştüğü, 1saatten 3 saate kadar olan yaşlandırma süresinde ise azda olsa arttığı belirlenmiştir. Yaşlandırma süresi 10 saate çıkarıldığında ise söz konusu değerlerin daha da düştüğü görülmektedir.



Şekil 20. Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımının logN–logσ eğrileri

Tablo 107. Dökülmüş ve farklı sürelerde yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımının k ve A sabitleri ile korelasyon katsayısı (c) değerleri

Alaşım	İşlem durumu	k	A	c
Zn-27Al-1Cu	Dökülmüş	12,28	32,85	0,98
	0,5 h yaşlandırılmış	11,75	31,86	0,99
	1 h yaşlandırılmış	8,34	23,55	0,98
	2 h yaşlandırılmış	8,63	24,26	0,99
	3 h yaşlandırılmış	8,75	24,63	0,99
	10 h yaşlandırılmış	6,49	19,29	0,99

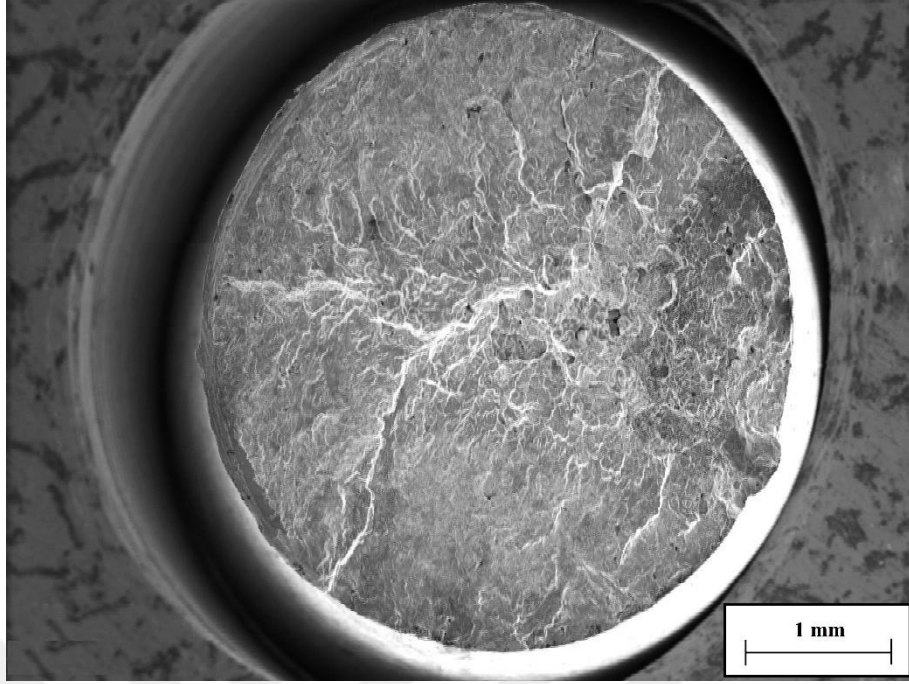
### 3.3.2.2. Yorulma Örneklerinin Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Dökülmüş ve farklı sürelerde yapay yaşlandırma işlemi uygulanmış Zn-27Al-1Cu alaşımına ait yorulma örneklerinin kırık yüzeylerini gösteren SEM fotoğrafları Şekil 21-32’de verilmiştir. Dökülmüş durumdaki yorulma örneklerinin kırık yüzeylerini gösteren fotoğraflardan (Şekil 21-24), kırılma yüzeylerinin oldukça kaba ve pürüzlü olup, bir miktar porozite içerdiği gözlenmiştir. Farklı sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulan örneklerin ise benzer kırılma yüzeyleri sergilediği ve son kırılma bölgesinin dışında kalan kısmın nispeten düzgün ve pürüzsüz bir görünüme sahip olduğu Şekil 28-32’de görülmektedir. Ayrıca yaşlandırılmış durumdaki alaşımlara ait örneklerin genelde gevrek kırılma davranışı sergilediği, uygulanan gerilme değeri arttıkça kırılma bölgesinin genişlediği tespit edilmiştir, Şekil 26, 30, 32.

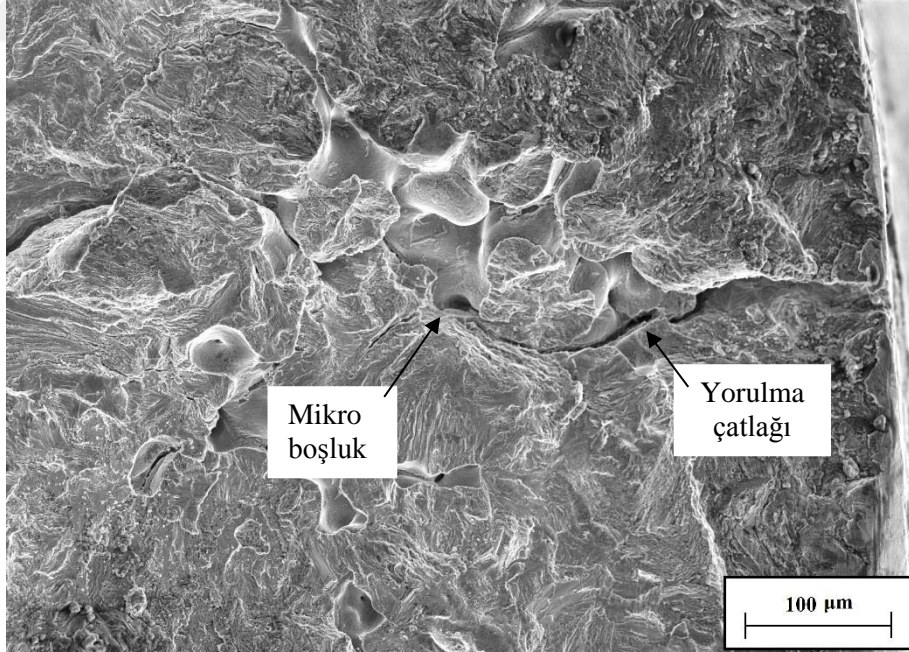
Şekil 21’de 146 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin kırılma yüzeyini, Şekil 22’deki SEM fotoğrafı ise detayını göstermektedir. Şekil 22’deki fotoğraftan kırılma yüzeyinin oldukça kaba ve pürüzlü olduğu ve yorulma çatlığının yüzeyden başlayarak iç kısımlara doğru ilerlediği görülmektedir. 119 MPa’lık gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki alaşıma ait örneğin kırılma yüzeyinin genel görünümü Şekil 23’de, söz konusu yüzeyin detayını gösteren SEM fotoğrafı ise Şekil 24’de verilmiştir. Bu detay fotoğraftan görüldüğü gibi yorulma çatlığı porozitede başlamakta ve tane sınırları boyunca ilerlemektedir. 174 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın kırılma yüzeyinin diğer şartlarda elde edilen kırılma yüzeylerine göre nispeten daha dalgalı ve pürüzlü olduğu görülmektedir. 1-10 saat yapay yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneklerin yorulma deneyi sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerinin ise hemen hemen aynı görünüme sahip olduğu gözlemlendi. Bu nedenle, örnek olması açısından 1 ve 3 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşıma ait yorulma örneklerinin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 27-30’da verilmiştir. Bu fotoğraflardan kırılma yüzeylerinin nispeten düzgün ve pürüzsüz olduğu ayrıca alüminyumca zengin sünek tanelerde ise duraklama çizgilerinden oluşan yorulma izlerine rastlandığı görülmektedir. Şekil 32’de ise 92 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan 10 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşıma ait örneğin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı verilmiştir. Bu fotoğraftan düşük gerilme değerinde gerçekleştirilen

yorulma deneyi sonucunda elde edilen örneğin kırık yüzeylerinde belirgin duraklama çizgilerinin oluştuğu görülmektedir.

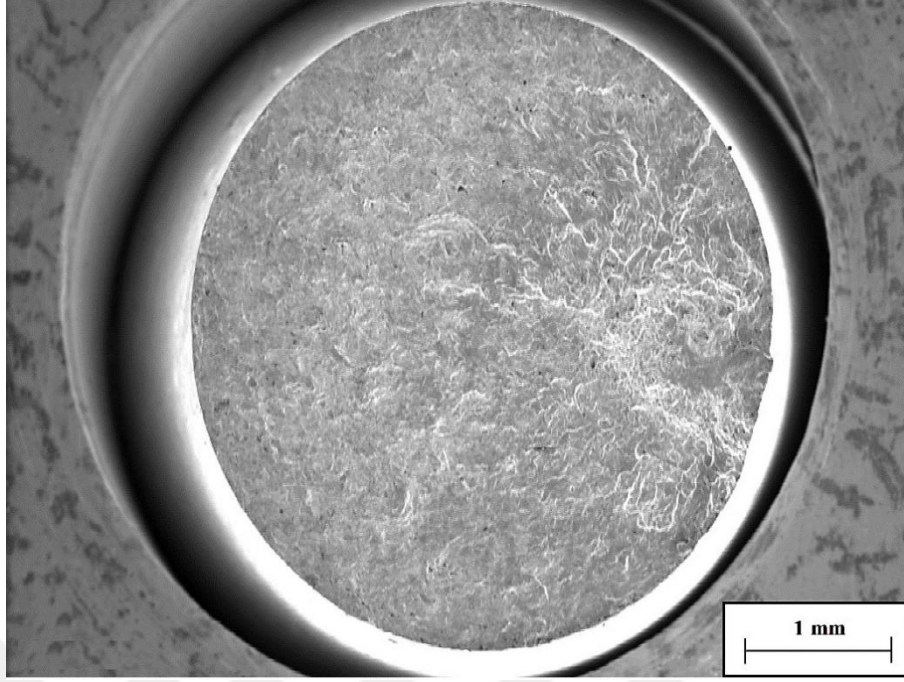
Dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşımın yorulma deneyi sonucu oluşan kırılma yüzeylerinde meydana gelen kırılmanın ve çatlak oluşumunun hangi faz bölgelerinde gerçekleştiğini belirlemek amacıyla kırık yüzeylerin içyapısı incelendi. Bu incelemeler sonucunda elde edilen fotoğraflar Şekil 33-36'da verilmiştir. Bu fotoğraflardan, Şekil 33 dökülmüş durumdaki alaşımda kırılmanın genelde çinkoca zengin  $\eta$  ve  $\alpha + \eta$  fazlarının bulunduğu bölgelerde gerçekleştiğini, Şekil 34 ise yaşlandırma işlemi görmüş durumdaki alaşımda kırılmanın genelde tane sınırlarında gerçekleştiğini göstermektedir. Benze bir şekilde dökülmüş durumdaki alaşımda çatlak oluşumunun dentritler arası bölgede yani ötektoid dönüşüm ürünü olan çinkoca zengin  $\alpha + \eta$  faz bölgesinde, yaşlandırılmış durumdaki alaşımda ise çinko ve bakırca zengin çökeltileri içeren tane sınırları bölgesinde meydana geldiği sırasıyla Şekil 35 ve Şekil 36'da görülmektedir.



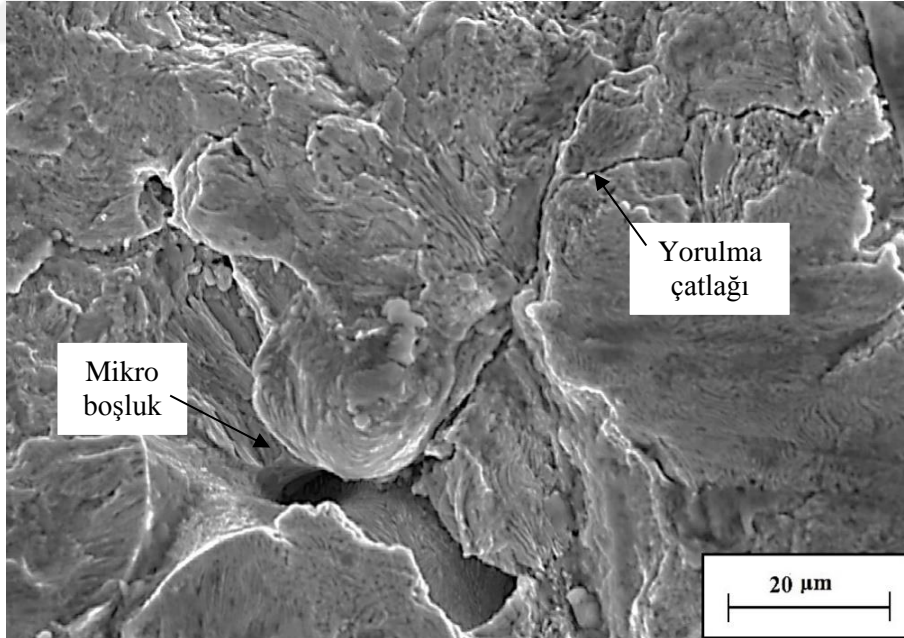
Şekil 21. 146 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



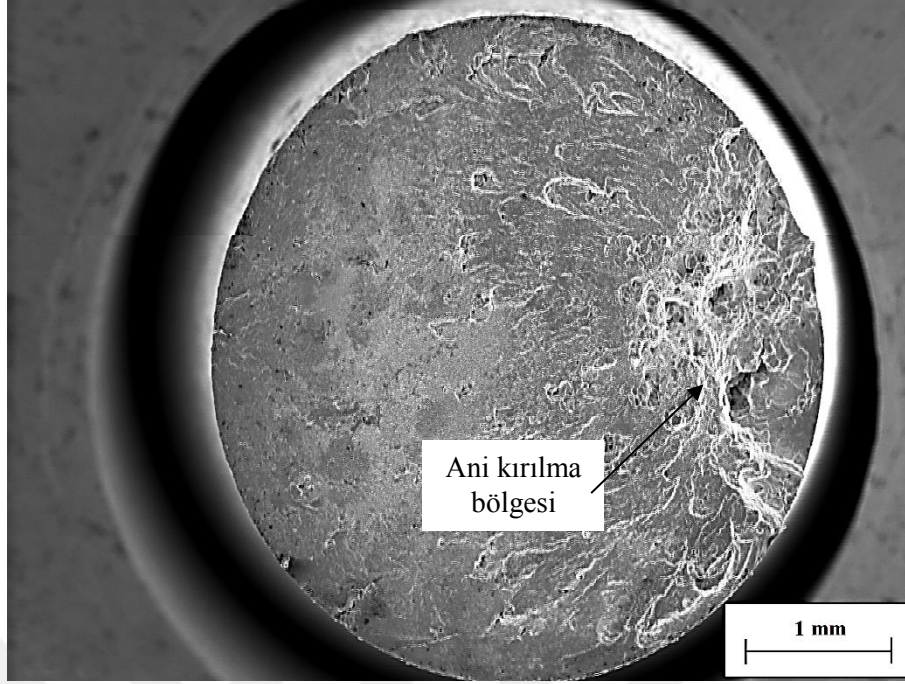
Şekil 22. 146 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



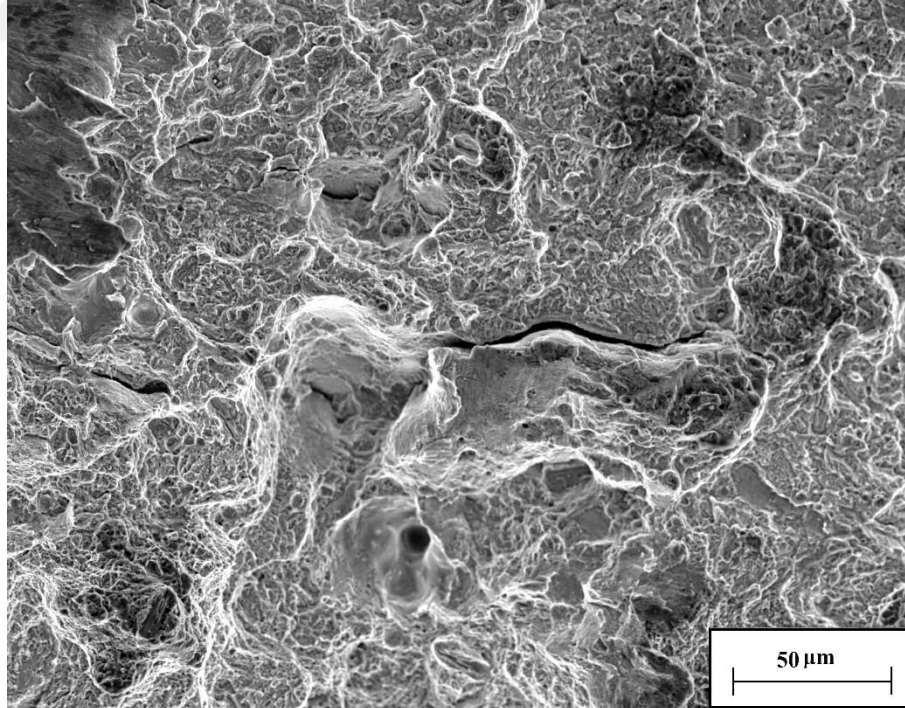
Şekil 23. 119 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



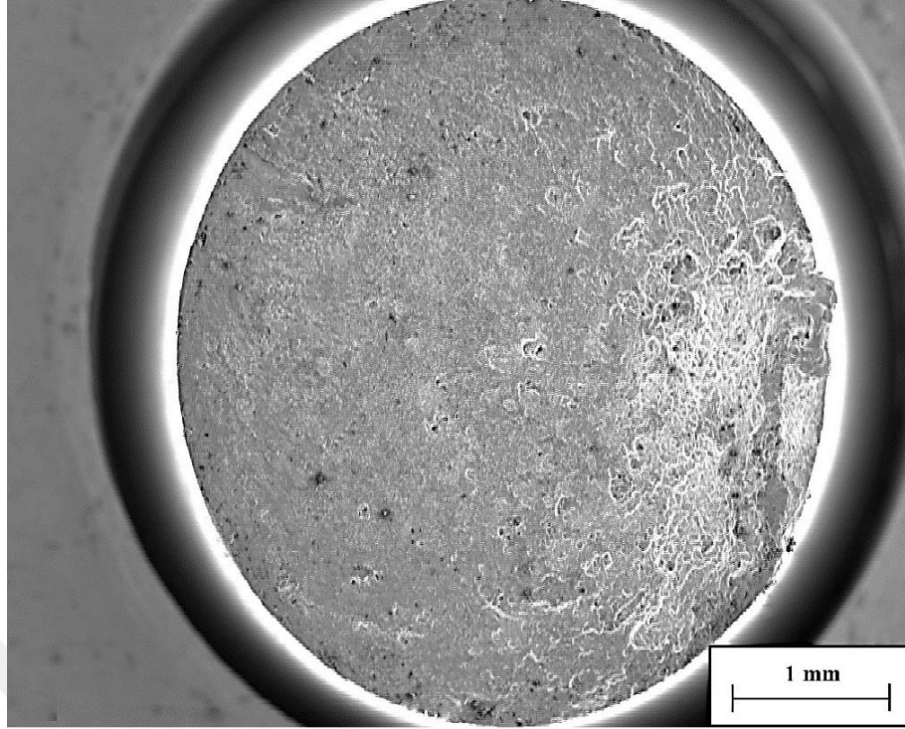
Şekil 24. 119 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



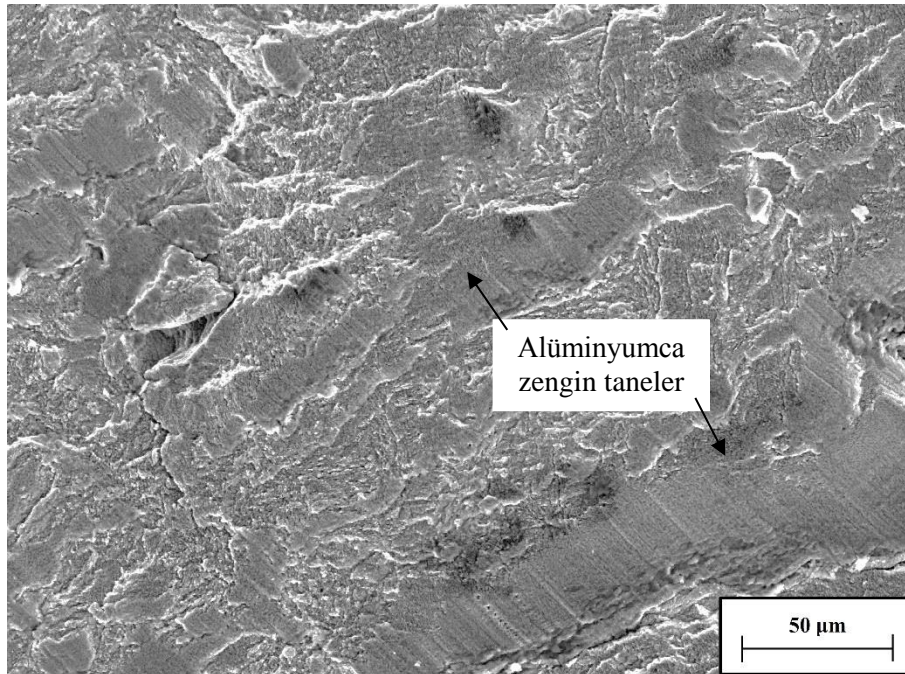
Şekil 25. 174 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren



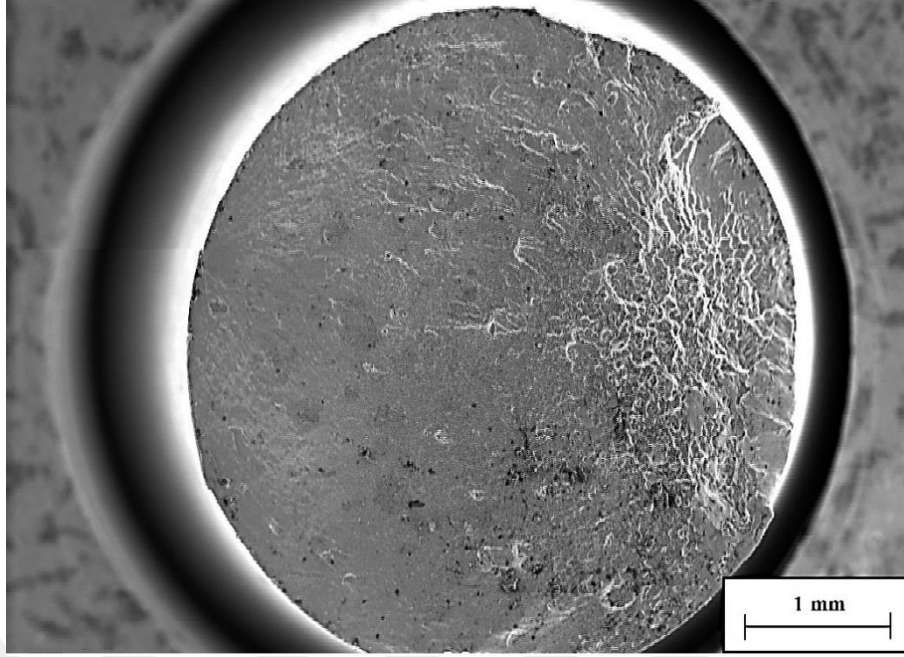
Şekil 26. 174 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



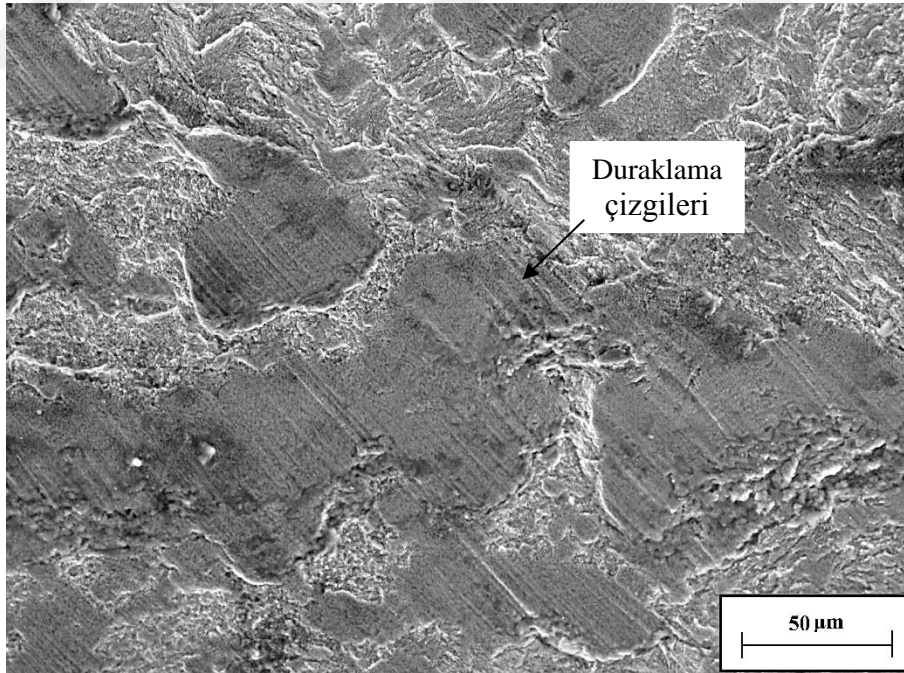
Şekil 27. 160 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 1 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



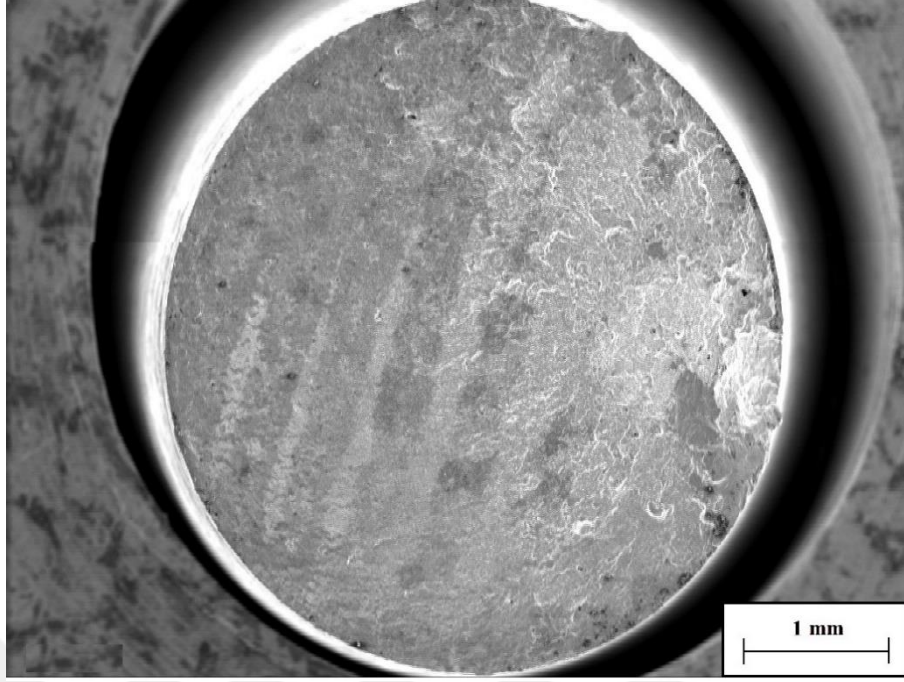
Şekil 28. 160 MPa gerilme değerinde yorulma deneyine tabi tutulan, 1 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



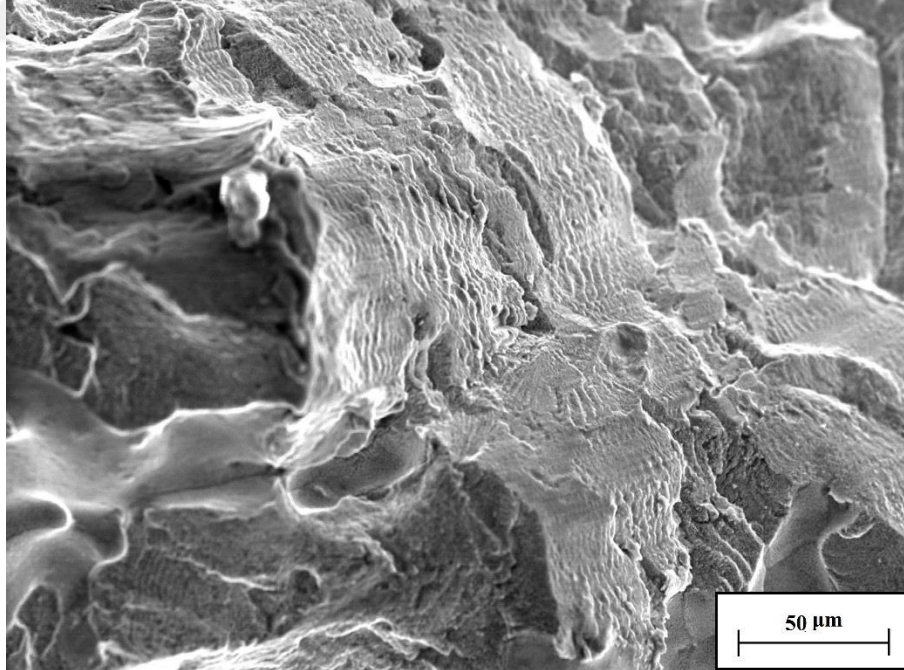
Şekil 29. 160 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, 3 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



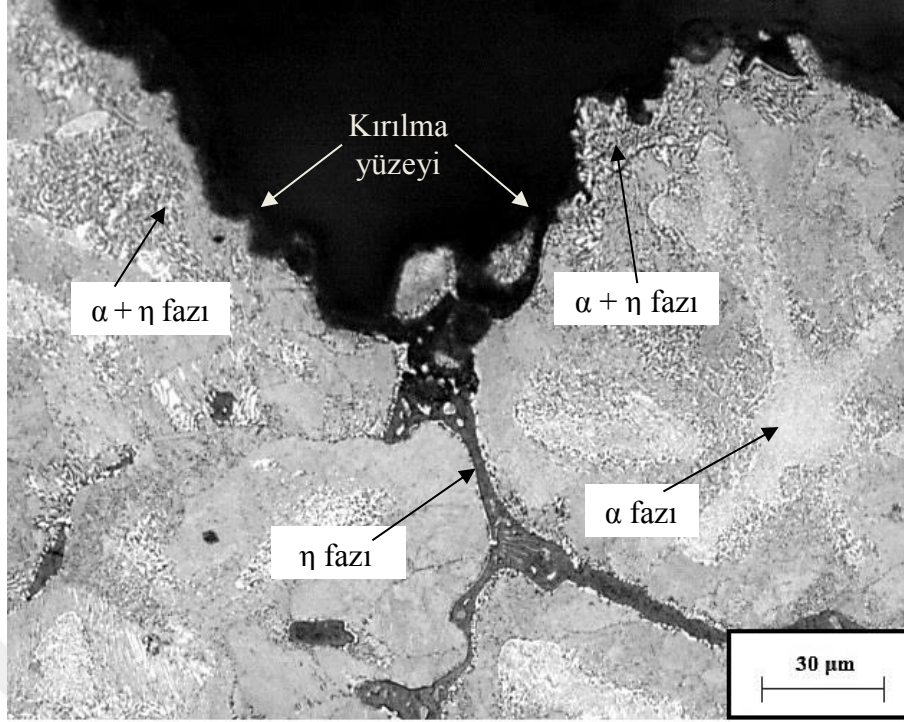
Şekil 30. 160 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, 3 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



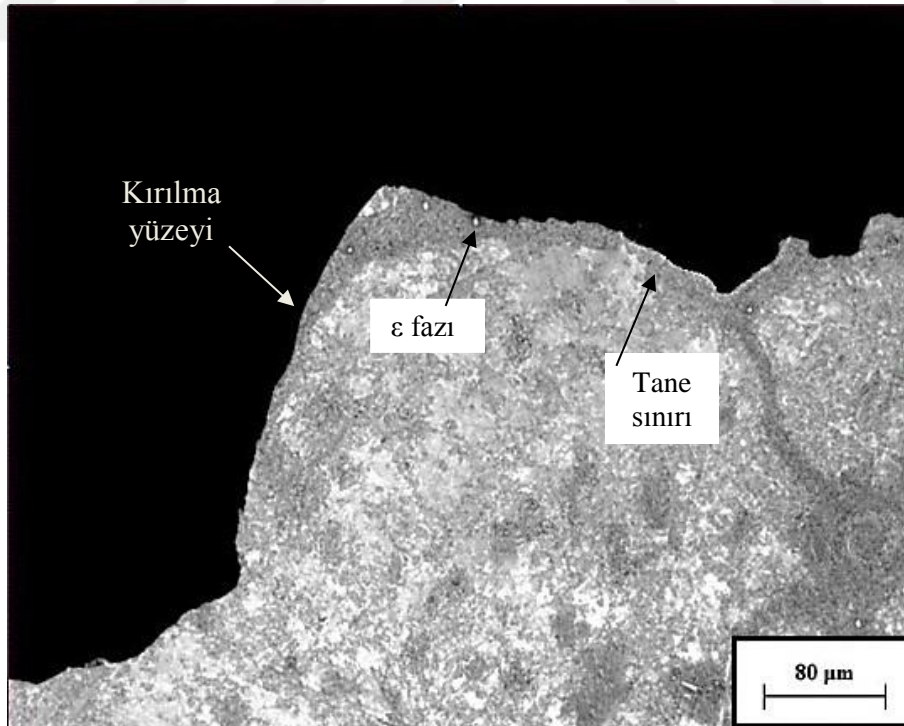
Şekil 31. 92 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, 10 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyini gösteren SEM fotoğrafı



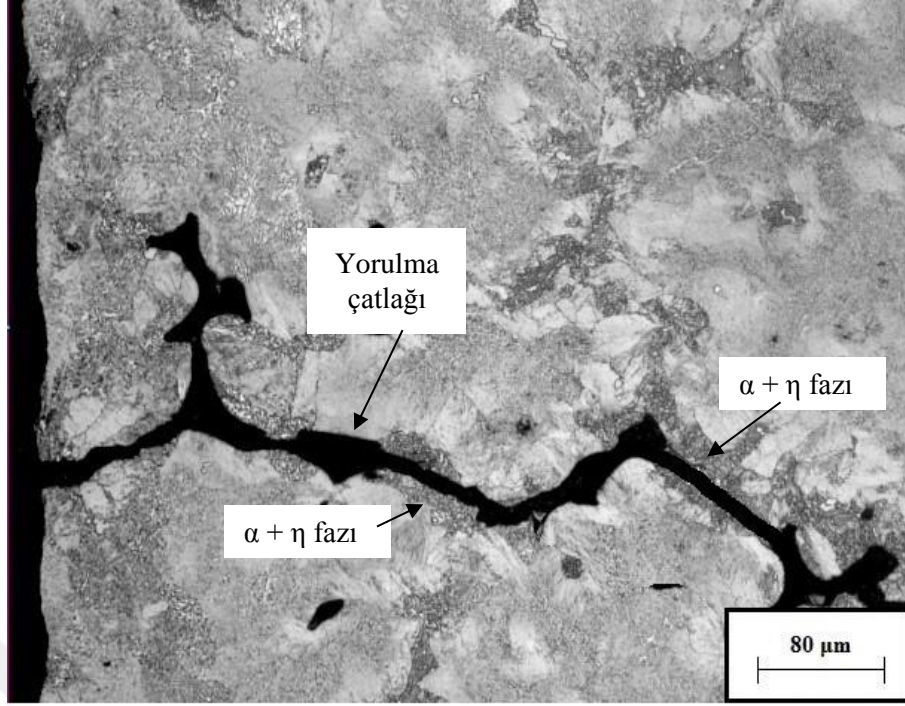
Şekil 32. 92 MPa gerilme değeriinde yorulma deneyine tabi tutulan, 10 saat yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinin detayını gösteren SEM fotoğrafı



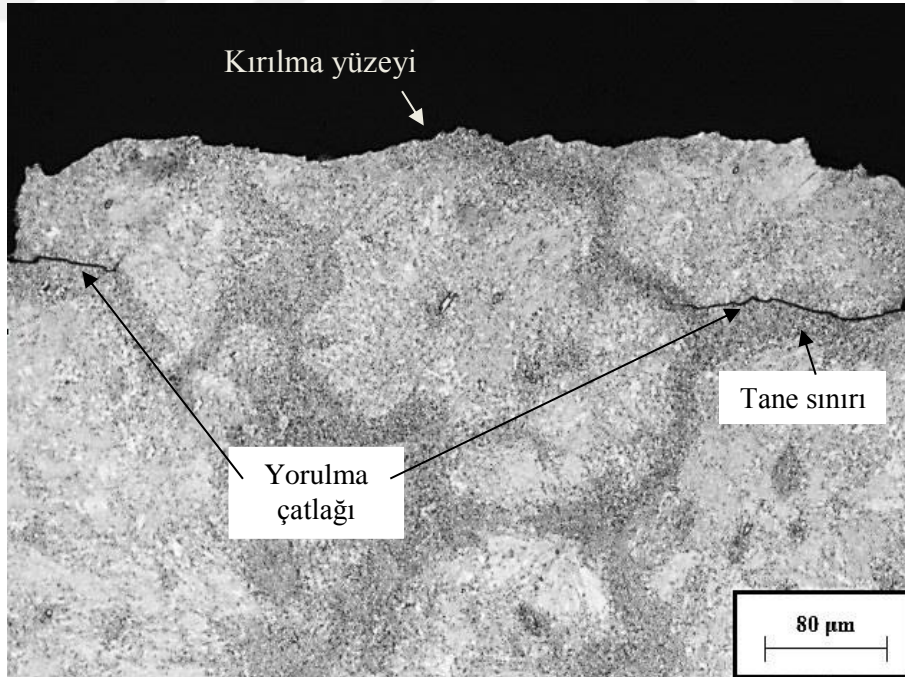
Şekil 33. Yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin kırılma yüzeyinin detayını gösteren fotoğraf



Şekil 34. Yorulma deneyine tabi tutulan, yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin kırılma yüzeyinin detayını gösteren fotoğraf



Şekil 35. Yorulma deneyine tabi tutulan, dökülmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlağı oluşumunu gösteren detay fotoğrafı



Şekil 36. Yorulma deneyine tabi tutulan, yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait örneğin yorulma çatlağı oluşumunu gösteren detay fotoğrafı

#### 4. İRDELEME

Bu çalışmada incelenen Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin  $\eta$  ve ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlarından oluştuğu gözlemlendi. Ayrıca dendritler arası bölgelerde bakırca zengin  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazının yer aldığı görüldü, Şekil 8-9. Çözündürme ve su verme sonrası farklı sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımın içyapısının ise tamamen değiştiği gözlemlendi. Bu yapısal değişim difüzyonla gerçekleşen homojenizasyon ve çökeltmeden kaynaklanmaktadır. Şöyle ki; döküm sonrası katılaşma esnasında bileşim farklılıklarından kaynaklanan kararsız (metastabil) bir yapı meydana gelir. Bu kararsız yapı çözündürme ve su vermeyi izleyen yaşlandırma işlemiyle giderilerek homojen ve kararlı bir hale dönüşmektedir. Başka bir deyişle, çözündürme işlemi esnasında döküm yönteminin doğası gereği matris içerisinde çözünen elementler birbirinden ayrılır. Çünkü alaşım elementleri aşırı doymuş bölgede kararsız durumdadır. Homojenizasyon sayesinde bu kararsız durumdaki elementler yüksek sıcaklıklarda uygun bölgelere difüze olarak intermetalik partiküllerin birleşmesine ve büyümesine neden olurlar. Nitekim uygulanan ısı işlemi sonucunda Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki dendritik yapısının tamamen ortadan kalktığı ve bunun yerine iri  $\alpha$  tanelerini içeren bir içyapının oluştuğu gözlemlendi. Ayrıca yaşlandırma süresi arttıkça tane boyutunun arttığı, tane sınırlarının genişlediği ve bu bölgelerde oluşan çökeltilerin daha da yoğunlaştığı görüldü, Şekil 11-14. Bu gözlemlerin literatürde [15,25,60-63] verilen bulgularla uyum içinde olduğu görüldü.

Uygulanan ısı işlemi sonucunda ortaya çıkan yapısal değişime bağlı olarak mekanik özelliklerin de değiştiği gözlemlendi. Şöyle ki; 1 saat yaşlandırma işlemi sonrasında en yüksek sertlik ve mukavemet elde edilirken kopma uzamasının önemli ölçüde düştüğü görüldü. Yaşlandırma süresi 1 saatten 3 saate çıkarıldığında ise sertlik ve çekme dayanımının düştüğü, kopma uzamasının ise arttığı gözlemlendi. 10 saatlik yaşlandırma süresi sonunda ise mukavemet değerleri en düşük seviyesine gerilerken süneklik değerinde oldukça önemli bir artış elde edildi. 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın ise bütün mekanik özelliklerinin iyileştiği görüldü. Mukavemet ve süneklik değerlerinde görülen bu değişimler çökeltme sertleşmesi mekanizmasına ve alaşımın farklı durumlardaki içyapısına dayandırılarak açıklanabilir. Bilindiği gibi çözündürme ve su verme işleminden sonra aşırı doymuş katı çözeltiler elde edilir

[61]. Yani katı çözeltili sertleştirme mekanizması etkin hale geçer. 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen artış bu mekanizmaya dayandırılarak açıklanabilir. Ancak aşırı doymuş katı çözeltili kararsız bir yapıdır. Bu yapının kararlı hale dönüşmesi için yaşlandırma devresinin tamamlanması gerekir. Yaşlandırma işleminin bu aşamasında yeni fazların çökmesi nedeniyle ortaya çıkan bağdaşıklık kafes durumu aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltilisinin kafes düzlemlerini çarpıtarak alaşımın sertlik ve mukavemetinin artmasına sünekliğinin azalmasına neden olur. Yani sertlik ve mukavemetin artmasının esas nedeni katı çözeltili sertleşmesinin yanı sıra bağdaşık kafes durumudur. Bu durum en yüksek sertlik ve mukavemet değerine ulaşıldığı 1 saatlik yaşlandırma süresi sonunda meydana gelmiştir. Aşırı yaşlandırma devresinde ise alaşımın mekanik özelliklerinde bunun tam tersi bir durum meydana gelir. Yani sertlik ve mukavemet düşerken süneklik önemli ölçüde artar. Bu durum bağdaşıklık gerilmesinin zamanla ortadan kalkması ve ayrıca tane boyutunun büyümesinden kaynaklanmaktadır. Alaşımın mekanik özelliklerinin değişimine neden olan bir diğer husus ise yaşlandırma devresinde ortaya çıkan çökeltilerdir. Şöyle ki; yaşlandırma devresinde meydana gelen çökeltiler malzemede dislokasyon hareketini engelleyici bir etki yaparak sertlik ve mukavemetin artmasına neden olur. Aşırı yaşlandırma devresine girildiğinde ise bu çökeltiler bir araya gelerek büyür ve sayıları azalır. Yani dislokasyonların önündeki engeller azalır ve dislokasyon hareketi kolaylaşır. Bu durum sertlik ve mukavemetin düşmesine sünekliğin ise artmasına neden olur. Öte yandan tane boyutunun da mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi vardır. Şöyle ki; tane boyutu büyüdükçe malzemedeki tane sayısı ve dolayısıyla tane sınırı miktarı azalır. Yani dislokasyon önündeki engeller azalır. Bunun sonucunda dislokasyonlar kolay hareket eder. Nitekim, Hall-Petch bağıntısından tane boyutu arttıkça akma dayanımının düştüğü bilinmektedir [64]. Bu bilgiler doğrultusunda en yüksek sertlik ve mukavemete ulaşılan 1 saat yaşlandırma işlemi sonrasında çökme sertleşmesi mekanizması ve bağdaşık kafes durumunun tam olarak gerçekleştiği, 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşım için ise bu mekanizmaların tam etkin olmadığı sonucuna varılabilir. Ayrıca 10 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişim aşırı yaşlandırma devresine girilmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Alaşımın darbe direnci ise 0,5 saat yaşlandırılmış durum hariç diğer bütün durumlarda uygulanan yaşlandırma işlemi ile önemli ölçüde düşmüştür. Bu durum ısı işlem sonrası tane içi ve tane sınırlarında çökelen bakırca zengin sert  $\epsilon$  fazının bu bölgelerde çentik etkisi yaparak yapıdaki

artık gerilmelerin değerini artırmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim artık gerilmelerin gevrekleşmeye yol açtığı bilinmektedir [65].

Yorulma deneylerinden elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda yaşlandırma süresinin alaşımın yorulma davranışını önemli ölçüde etkilediği görüldü. 0,5 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın, dökülmüş durumdakinden daha iyi yorulma performansına sahip olduğu belirlendi. 1saat yaşlandırma işlemi sonrasında alaşımın yorulma ömrünün düştüğü, artan yaşlandırma süresiyle yorulma ömrünün iyileştiği ancak dökülmüş durumdaki seviyeye ulaşamadığı, aşırı yaşlandırılmış durumdaki alaşımın ise yorulma ömrünün önemli ölçüde düştüğü görüldü. Uygulanan ısıl işlemle alaşımın yorulma özelliklerindeki bu değişim yapı ve mekanik özelliklere dayandırılarak açıklanabilir. Yorulma, çatlak oluşumu ve ilerlemesi şeklinde meydana geldiğinden söz konusu alaşımın mukavemetinin artması çatlak oluşumu için gerekli olan gerilmeyi artırır. Bu durum ise çatlağın geç oluşmasına ve yorulma dayanımının artmasına neden olur. Öte yandan sünekliğin artması da çatlak oluşumu ve ilerlemesini engelleyici bir etki yapar. Nitekim literatürde [58] artan sertlik ve mukavemetle birlikte süneklik değerinin de artırılmasıyla yorulma performansının iyileştiği ileri sürülmüştür. Bu çalışmada 1 saat yaşlandırılmış durumdaki alaşımın sertlik ve mukavemeti önemli ölçüde artarken süneklik ve tokluğu keskin bir şekilde düşmüştür. Benzer bir şekilde 10 saat aşırı yaşlandırılmış durumdaki alaşımın süneklik değeri büyük orandan artarken çekme dayanımı düşmüş tokluk değerinde ise önemli bir iyileşme elde edilememiştir. Bu nedenle her iki durumda da alaşımın yorulma performansı kötüleşmiştir. Ancak 0,5 saat yaşlandırılmış durumda alaşımın bütün mekanik özelliklerinde bir iyileşme meydana gelmiştir. Bu nedenle söz konusu alaşımın yorulma performansı iyileşmiştir. Uygulanan ısıl işlemle gerçekleşen yapısal değişimin yorulma performansı üzerindeki etkisi ise çökme ile açıklanabilir. Şöyle ki; yaşlandırma işlemi ile tane sınırlarında yoğunlaşan sert  $\epsilon$  fazın ve çinkoca zengin çökeltilerin taneler arası bölgeleri gevrekleştirerek çatlak oluşumunu ve ilerlemesini kolaylaştırmış, bu da yorulma performansını olumsuz etkilemiştir. Nitekim yapılan çalışmada kopma uzaması ve darbe direnci düştükçe söz konusu alaşımın yorulma performansının kötüleştiği görülmüştür. Bu nedenle bütün mekanik özelliklerin yorulma davranışını etkilediği açıktır. Ancak yorulma performansının çekme dayanımından çok sünekliğe özelliklede tokluğa bağlı olduğu sonucuna varılabilir.

Bu çalışmada incelenen Zn-27Al-1Cu alaşımının gerek dökülmüş gerekse ısıl işlem görmüş durumdaki yorulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak yorulma ömrü

(log N) – gerilme genliği (log  $\sigma$ ) grafiği çizildi, Şekil 20. En küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilen doğruların korelasyon katsayılarının (c) 1'e çok yakın olduğu belirlendi. Bu nedenle, dökülmüş ve ısıl işlem uygulanmış durumdaki bu alaşımın yorulma davranışının Basquin bağıntısı ile ifade edilebileceği sonucuna varılabilir. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarda [53,58] benzer bulgular elde edilmiştir.

Bu çalışmada incelenen gerek dökülmüş gerekse ısıl işlem görmüş durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımına ait yorulma örneklerinin kırık yüzeylerinde genelde çok belirgin yorulma izlerine rastlanmadı. Ayrıca ısıl işlem uygulanmış durumdaki alaşıma ait yorulma örneklerinin kırılma yüzeylerinin dökülmüş durumdakine göre daha düzgün olduğu görüldü. Bu durum söz konusu alaşımın gevrek kırılma davranışı sergilemesinden kaynaklanmaktadır. Ancak 10 saat yaşlandırılmış durumdaki bu alaşıma ait yorulma örneklerinin kırılma yüzeyleri üzerinde yüksek büyütmelede yapılan SEM incelemelerinde  $\alpha$  tanelerinde duraklama çizgilerini içeren yorulma izlerine rastlandı, Şekil 32. Bu durum da bu alaşımın matrisini oluşturan  $\alpha$  fazının nispeten sünek olmasından kaynaklanmaktadır [66]. Ayrıca dökülmüş durumdaki alaşımda kırılmanın ve çatlak oluşumunun genelde çinkoca zengin  $\eta$  ve ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlarını içeren bölgede, ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımda ise tane sınırlarında yer alan bakır ve çinkoca zengin çökeltilerin olduğu bölgelerde gerçekleştiği gözlemlendi. Bu durum Şekil 33-36'daki fotoğraflardan açıkça görülmektedir. Bu fotoğraflar, bakır ve çinkoca zengin çökeltilerin taneler arası bölgeleri gevrekleştirerek çatlak oluşumu ve ilerlemesini kolaylaştırdığı sonucuna varılan daha önceki açıklamaları desteklemektedir. Ayrıca Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma örneklerinin kırık yüzeylerinin bir miktar gözenek (mikro boşluk) içerdiği özellikle ısıl işlem uygulanmış durumdaki alaşımın ani kırılma bölgelerinde bu durumun daha yoğun olduğu görülmüştür, Şekil 25,27. Gözenek miktarının alaşımların yorulma performansını önemli ölçüde etkilediği daha önce yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır [33,43]. İyçyapıda bulunan gözenekler gerilme yığılmasına neden olduğundan çatlak oluşumu ve ilerlemesini kolaylaştırmakta, bu da yorulma performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum yüzeyde başlayan çatlağın gözenek etkisiyle birleşerek iç kısımlara doğru ilerlediğini gösteren Şekil 22'deki fotoğraftan açıkça görülmektedir.

## 5. SONUÇLAR

Farklı sürelerde uygulanan yaşlandırma işleminin Zn-27Al-1Cu alaşımının yapı ve mekanik özellikleri ile yorulma performansına etkisinin incelendiği bu çalışmada aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1. Zn-27Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı, alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin  $\eta$  ve ötektoid  $\alpha + \eta$  fazlardan oluşur. Ayrıca dendritler arası bölgelerde bakırca zengin  $\epsilon$  fazı yer alır.
2. Çözündürme ve su verme sonrası yaşlandırma işlemi sonucunda alaşımın dendritik yapısı tamamen ortadan kalkmakta ve bunun yerini çinko ve bakırca zengin çöktelleri içeren ve  $\alpha$  tanelerinden oluşan bir içyapı almaktadır.
3. Uygulanan yaşlandırma işlemiyle genelde Zn-27Al-1Cu alaşımının sertlik, çekme dayanımı değerleri artar, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri ise azalır. Ancak yaşlandırma işleminin ilk safhalarında alaşımın bütün mekanik özellikleri iyileşir. Aşırı yaşlandırma safhasında ise alaşımın sertlik ve çekme dayanımı düşerken süneklik değerleri artar.
4. Zn-27Al-1Cu alaşımından en yüksek sertlik ve çekme dayanımı 1 saat yaşlandırma işlemi sonrasında elde edilmiştir. Ayrıca söz konusu alaşım bu ısıl işlem ile ticari ZA-27 alaşımının sertlik ve mukavemet değerlerine ulaşmıştır.
5. Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma davranışı uygulanan yaşlandırma süresine göre değişiklik göstermekle birlikte en yüksek yorulma ömrü 100 °C sıcaklıkta 0,5 saat yaşlandırma işlemi sonunda elde edilir.
6. Zn-27Al-1Cu alaşımının yorulma davranışı mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Isıl işlem sonrası ortaya çıkan yapısal değişimler ile mekanik özelliklerdeki iyileşmeye paralel olarak yorulma ömrü de artar. Ancak söz konusu alaşımın yorulma performansı çekme dayanımından çok sünekliğe ve özellikle tokluğa bağlıdır.
7. Gerek dökülmüş gerekse farklı sürelerde yaşlandırılmış durumdaki Zn-27Al-1Cu alaşımının uzun ömürlü yorulma davranışları Basquin bağıntısı kullanılarak ifade edilebilir.

8. Yaşlandırılmış durumdaki alaşımın yorulma sonucunda oluşan kırık yüzeyleri dökülmüş durumdakine göre nispeten daha düzgün ve pürüzsüzdür. Ayrıca gerilme arttıkça alaşımlara ait yorulma örneklerinin kırılma yüzeylerinde ortaya çıkan ani kırılma bölgesi genişlemektedir.
9. Yorulma deneyine tabi tutulan gerek dökülmüş gerekse ısıl işlem görmüş durumdaki alaşım genelde gevrek kırılma davranışı sergiler ve söz konusu alaşımın kırık yüzeylerinde çok belirgin yorulma izlerine rastlanmaz. Ancak alüminyumca zengin sünek tanelerde yorulma kırılmasını işaret eden duraklama çizgileri görünür.



## 6. ÖNERİLER

1. Aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biri olan eş kanalda açısız ekstrüzyon yönteminin üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının yapı ve mekanik özellikleri, özellikle yorulma davranışları üzerindeki etkileri incelenebilir.
2. Yaşlandırma işleminin Zn-27Al-1Cu alaşımının tribolojik özellikleri üzerine etkisi incelenerek, farklı uygulamalara yönelik tasarım bilgileri elde edilebilir.



## 7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminum Based Bearing Alloys, Ph.D. Thesis, The University of Aston, Birmingham, 1970.
2. Lynch, R. F., Zinc: Alloying, Thermomechanical Processing, Properties, and Applications, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Second Edition, Wyckoff, New Jersey, 2001.
3. Calayag, T. ve Ferres, D., High-Performance, High-Aluminum Zinc Alloys for Low-Speed Bearings and Bushings, SAE Annual Conference, 1983, 2241-2251.
4. Barnhurst, R.J., Zinc-Aluminum Alloy Design Manuel for Continuous Rotation Bearings, Noranda Sales Corporation Ltd., Toronto, January, 1988.
5. Goodwin, E. ve Ponikvar, A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, Third Edition, International Lead Zinc Research Org. Inc., 1989.
6. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25Al Based Alloys, Wear, 116 (1987) 211-224.
7. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System, Zeitschrift Für Metallkunde, 71 (1980) 96-102.
8. Lyon, R., Engineering Applications of ZA Alloys, Proceeding Second Conference on Material Engineering, London, 1985, 221-227.
9. Wakefield, E.C., Copper-Aluminum Zinc Alloy Excels in Tough Conditions, Design Engineering, December 1973, 1-4.
10. Zhu, Y.H., Savaşkan, T. ve Murphy, S., Phase Transformations in Quench-Aged Zn-Al-Si Alloys, Mat. Res. Soc. Proc., 21 (1984) 835-840.
11. Lee, P. P., Savaşkan, T. ve Laufer, E., Wear Resistance and Microstructure of Zn-Al-Si and Zn-Al-Cu Alloys, Wear, 117 (1987) 79-89.
12. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Murphy, S., Sliding Wear of Cast Zinc-Based Alloy Bearing under Static and Dynamic Loading Conditions, Wear, 252 (2002) 693-703.
13. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Hekimoğlu, A.P., Effect of Copper Content on the Mechanical and Tribological Properties of ZnAl27-Based Alloys, Tribology Letters, 15, 3 (2003) 257-263.

14. Savaşkan, T., Hekimoğlu, A.P. ve Pürçek, G., Effect of Copper Content on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Monotectoid-Based Zinc-Aluminum-Copper Alloys, Tribology International, 37 (2004) 45-50.
15. Zhu, Y.H., Murphy, S. ve Yeung, C., Early Stages of Phase Transformation in Quenched Zinc-Aluminum Based Alloys, Journal of Materials Processing Technology, 94 (1999) 78-84.
16. Calayag, T., The Practicality of Using Zinc-Aluminum Alloy for Friction-Type Bearings, 25th Ann. CIM Conf. Of Metallurgists, Toronto, International Symposium on Zinc-Aluminum Casting Alloys, August 1986, 305-312.
17. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Influence of Rare Earth Element Additions on Phase Transformations in the Zn-27% Al Alloy, J. Mater. Res., 18, 12 (1993) 3043-3049.
18. Durman, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikro yapısal Özelliklerinin İncelenmesi, Nisan 1993, Denizli, Bildiriler Kitabı: 177-191.
19. Gervais, E., Loong, C.A., New ZA Alloys in Die Casting, 11th International Pressure Die Casting Conference, June 1984, Lyon, 1-25.
20. Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A. ve Chrevyakova, V.V., The Aluminum-Zinc Phase Diagram, Russian Journal of Physical Chemistry, 35, 6 (1961) 632-633.
21. Gervais, E., ZA Alloys A Challenge to the Metals Industry, CIM Bulletin, 80, 900 (1987) 67-142.
22. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Microstructures of Thermomechanically Treated Eutectoid Zn-Al Alloys, Journal of Materials Science and Technology, 10 (1994) 121-126.
23. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behavior of Zn-Al-Based Alloys in an Automotive Engine Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
24. Zhu, Y.H., Phase Transformations of Eutectoid Zn-Al Alloys, Journal of Materials Science, 36, 16 (2001) 3973-3980.
25. Zhu, Y.H., General Rule of Phase Decomposition in Zn-Al Based Alloys (II)-on Effects of External Stresses on Phase Transformation, Materials Transactions, 45, 11 (2004) 3083-3097.
26. Zhu, Y.H., Biao, Y., ve Wei, H., Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35), Journal of Materials Science and Technology, 11 (1995) 109-113.
27. Lyon, R., The Properties and Applications of ZA Alloys, The British Foundryman, August/September 1986, 344-349.

28. Pürçek, G., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Statik ve Dinamik Yük Altındaki Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 2000, Trabzon.
29. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Murphy, S., Sliding Wear of Cast Zinc-Based Alloy Bearings under Static and Dynamic Loading Conditions, Wear, 252, 9 (2002) 693-703.
30. Barnhurst, R.J., Gervais, E. ve Boyles, F.D., Gravity Casting of Zinc-Aluminum Alloys-Solidification Behavior of ZA-8, ZA-12 and ZA27, AFS Transactions, 81 (1983) 569.
31. Mykura, N., Zhu, Y.H. ve Murphy, S., Solid-State Reactions in Zn-Al Based Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 2 (1986) 151-159.
32. Erdöl, M. Ş., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarda Mukavemet Artırma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karedeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
33. Turhal, M. Ş. ve Savaşkan, T., Çinko-Alüminyum Alaşımlar İçin Mukavemet Artırma Yöntemleri, Mühendis ve Makine, 38, 450 (1997) 32-38.
34. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Mechanical and Tribological Properties of Al-40Zn-Cu Alloys, Tribology International, 41 (2009) 176-182.
35. Azaklı Z. ve Savaşkan. T., An Examination of Frictional and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Case of Oil Cut Off, Tribology International, 41 (2008) 9-16.
36. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Decomposition of Zn-Al-Alloys on Quench-Aging, Materials Science and Technology, 6 (1990) 695-700.
37. Carpenter, G.J.C. ve Garwood, R. D., The Ageing of a Quenched Aluminium-22,5% Zinc Alloy, Metal Science Journal, 1 (1967) 202-211.
38. Akhter, R., Ivanchev, L. ve Burger, H. P., Effect of Pre/post T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Laser Welded SSM cast A356 Aluminum Alloy, Materials Science and Engineering A, 447 (2007) 192-196.
39. Savaşkan, T. ve Bican, O., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys in the As-Cast and Heat-Treated Conditions. Tribology Letters, 40 (2010) 327-336.
40. Barnhurst, R.J., Zinc and Zinc Alloys, Metals Handbook, Vol 2, Ohio, 1991.
41. Turhal, M.Ş., and Savaşkan, T., Relationships between Secondary Dendrite Arm Spacing and Mechanical Properties of Zn-40Al-Cu Alloys, Journal of Materials Science, 38, 12 (2003) 2639-2646.

42. Durman, M., ve Murphy, S., An Electron Metallographic Study of Pressure Die-Cast Commercial Zinc–Aluminum-Based Alloy ZA27, Journal of Materials Science, 32, 6 (1997) 1603-1611.
43. Çay, F. ve Kurnaz, C., Hot Tensile and Fatigue Behaviour of Zinc–Aluminum Alloys Produced By Gravity and Squeeze Casting, Materials and Design, 26 (2005) 479-485.
44. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Effects of Silicon Content on the Mechanical Properties and Lubricated Wear Behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys, Tribology Letters, 29 (2008) 221-227.
45. Türk, A., Durman, M. and Kayalı, E.S., The Effect of Cu and Al on The Mechanical Properties of Gravity-Cast Hyper-Eutectic Zn–Al-based alloys, Zeitschrift für Metallkunde, 94, 9 (2003) 1001-1005.
46. Miroslav, B., Slobodan, M. ve Branislav, J., The Influence of Heat Treatment on The Sliding Wear Behavior of a ZA-27 Alloy, Tribology International, 43 (2010) 16-21.
47. Turhal, M. Ş., Soğuma Hızının Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Yapı ve Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
48. Sines, G. ve Waisman, J.L., Metal Fatigue, Mc Graw Hill Book Company Inc., New York, 1959.
49. Perry, C. C., Fatigue Testing in Materials Laboratory Courses, Fatigue Dynamics Inc., USA, 1988.
50. Swanson, S. R., Handbook of Fatigue Testing, ASTM Special Technical Publication 566, USA, 1974.
51. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
52. Savaşkan, T., Aydın, M. ve Odabaşoğlu H.A., Fatigue Behaviour of Zn–Al Casting Alloys, Materials Science and Technology, 17, 6 (2001) 681-685.
53. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
54. Aydın, M. ve Savaşkan, T., Fatigue Properties of Zinc-Aluminium Alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl Solutions, International Journal of Fatigue, 26 (2004) 103-110.
55. Savaşkan, T. ve Aydın, M., Fatigue Behaviour of Monotectoid-based Zn-Al-Cu Alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl Solutions, Materials Characterization, 52 (2004) 269-278.

56. Pürçek, G., Aydın, M., Saray, O. ve Küçükömeroğlu, T., Enhancement of Tensile Ductility of Severe Plastically Deformed Two-Phase Zn-12Al Alloy by Equal Channel Angular Extrusion, Materials Science Forum, 633 (2010) 437-447.
57. Aydın, M., High-Cycle Fatigue Behavior of Severe Plastically Deformed Binary Zn-60Al Alloy by Equal-Channel Angular Extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 212, 8 (2012) 1780-1789.
58. Aydın, M. ve Heyal, Y., Mechanical Properties of Equal-Channel Angular Extrusion-Processed Al-20Zn Alloy, Advanced Materials Research, 445 (2012) 195-200.
59. Prasad, B.K., Influence of Heat Treatment on the Physical, Mechanical and Tribological Properties of a Zinc-Based Alloy, Zeitschrift Für Metallkunde, 87 (1996) 226-232.
60. Prasad, B.K., The Effect of Heat Treatment on Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy Containing Nickel and Silicon, Tribology Letters, 15, 3 (2003) 333-341.
61. Liu, Y., Li, H-Y., Jiang, H-F. ve Lu, X-C., Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of ZA-27 Alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc., 23 (2013) 642-649.
62. Zhu, Y.H. ve Lee, W.B., Tensile Deformation and Phase Transformation of Furnace-Cooled Zn-Al Based Alloy, Materials Science and Engineering, A293 (2000) 95-101.
63. Zhu, Y.H., Man, H.C. ve Lee, W.B., Exothermic Reaction in Eutectoid Zn-Al Based Alloy, Materials Science and Engineering, A268 (1999) 147-153.
64. Savaşkan, T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Altıncı Baskı, Trabzon, 2012.
65. Zhongming, Z., Jincheng, W., Gencang, Y. ve Yaohe, Z., Microstructural Evolution of The Supersaturated ZA27 Alloy and Its Damping Capacities, Journal of Materials Science, 35 (2000) 3383-3388.
66. Hekimoğlu, A.P., Savaşkan, T., Structure and Mechanical Properties of Zn-(5 – 25) Al Alloys, Int. J. Mater. Res. (formerly Z. Metallkd.) 105 (2014) 1084 – 1089

## ÖZGEÇMİŞ

Fatih ŞENASLAN; 1989 yılında Sivas'da doğdu. 2006 yılında Sivas Lisesi'ni bitirdi. 2012 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Makine Mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Ağustos 2013'de Gümüşhane Üniversitesi tarafından Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atanan Fatih ŞENASLAN, orta derecede İngilizce bilmektedir.

