

170923

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Zn-40Al-2Cu-2Si ALAŞIMININ YETERSİZ VE SÜREKLİ YAĞLAMA
DURUMLARINDAKİ SÜRTÜNME VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Zeki AZAKLI

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Makina Yüksek Mühendisi"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20.06.2005
Tezin Savunma Tarihi : 25.07.2005**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2005

Temel Savaşkan
F. Arslan
Ragıp Erdöl

Emin Zeki Başkent

ÖNSÖZ

Çinko esaslı alaşımlar üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, yağ kesilmesi durumunda bile iyi yataklama yapması, yüksek sönümleme kapasitesine sahip olmaları, aşırı yükleme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile ideal tribolojik davranış sergilemeleri nedeni ile bir çok geleneksel yatak alaşımının yerine başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada üretilen Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının gerek dökülmüş ve gerekse ısıtma işlemi görmüş durumlarda yapısal ve mekanik özellikleri araştırıldıktan sonra yetersiz ve sürekli yağlama şartlarındaki tribolojik özellikleri incelendi. Yapılan deneyler sonucunda bu alaşımın yetersiz yağlama durumunda 4 MPa basınç'a kadar ideal tribolojik davranış sergilediği, bu basınç değerinden sonra ise aşınma kaybının aniden arttığı gözlemlendi. Sürekli yağlama durumunda ise bu alaşımın geleneksel bir yatak alaşımı olan SAE 660 bronzundan daha üstün aşınma direnci sergilediği görüldü. Ayrıca uygulanan T6 ısıtma işlemi sonucunda bu alaşımın mekanik özelliklerinin ve aşınma direncinin daha da iyileştiği belirlendi.

Bu konunun seçiminde ve çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren ve her türlü fedakârlığı ve yardımı gösteren Sayın hocam Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamda yardım eden ve katkıda bulunan Arş. Gör. Osman BİCAN ve Öğr. Gör. Yasin ALEMDAĞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Takım Tezgahları laboratuvarlarında çalışan tüm teknisyenlere teşekkür ederim.

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

Zeki AZAKLI

Trabzon 2005

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları.....	2
1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı.....	2
1.2.2. Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramı.....	4
1.2.3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si Faz Diyagramı.....	5
1.3. Çinko Esaslı Alaşımların Özellikleri.....	6
1.3.1. Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri.....	6
1.3.2. Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri.....	6
1.3.3. Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri.....	8
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	11
2. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	13
2.1. Alaşımın Üretimi.....	13
2.2. Yapısal İnceleme.....	13
2.3. Alaşımın Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	13
2.4. Alaşımın Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi.....	14
3. BULGULAR.....	19
3.1. Alaşımın İç Yapısı.....	19
3.2. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	20
3.3. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular.....	22
3.4. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular.....	43
4. İRDELEME.....	50

5.	SONUÇLAR.....	55
6.	ÖNERİLER.....	57
7.	KAYNAKLAR.....	58
	ÖZGEÇMİŞ.....	64



ÖZET

Bu çalışmada Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait 4 adet külçe kokil döküm yöntemi ile üretildi. Üretilen külçelerin ikisi çözündürme, su verme ve yapay yaşlandırma aşamalarını içeren T6 ısıl işlemine tabi tutuldu. Alaşımın gerek dökülmüş gerekse ısıl işlem görmüş örneklerinin yapısal ve mekanik özellikleri incelendikten sonra yetersiz ve sürekli yağlama şartlarındaki tribolojik (sürtünme ve aşınma) davranışı disk-çubuk esaslı bir aşınma deney düzeneği yardımıyla araştırıldı.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısının alüminyumca zengin α fazı ile bu fazı çevreleyen çinkoca zengin η , bakırca zengin ϵ fazları ve silisyum parçacıklarından oluştuğu görüldü. Uygulanan ısıl işlem sonucunda alaşımın iç yapısında ince çökeltilerin oluştuğu, ancak silisyum parçacıklarının ısıl işleminden etkilenmediği görüldü. Ayrıca uygulanan ısıl işlemin bu alaşımın sertlik ve çekme dayanımını artırdığı belirlendi.

İncelenen alaşımın dökülmüş ve ısıl işlem görmüş örneklerinin sürtünme katsayılarının yetersiz yağlama durumunda artan basınç ile önce azalıp 3 MPa değerinden sonra arttığı; hıza göre ise düzensiz bir değişim sergilediği gözlemlendi. Alaşıma ait aşınma örneklerinin sıcaklıkları da artan basınç ve hız ile arttığı görüldü. Yetersiz yağlama durumunda söz konusu alaşımda meydana gelen aşınma kayıplarının artan basınç ile exponansiyel olarak arttığı; artan hız ile 4 MPa'a kadar lineer, bu basınç değerinden sonra da exponansiyel olarak arttığı belirlendi.

Sürekli yağlama durumunda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait aşınma örneklerinin sürtünme katsayılarının artan basınç ve hız ile azaldığı, sıcaklıkların ise bu parametreler ile arttığı görüldü. Söz konusu örneklerde meydana gelen aşınma kayıplarının da artan basınç ve hız ile lineer olarak arttığı belirlendi. Sürekli yağlama durumunda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait örneklerin gerek dökülmüş gerekse ısıl işlem görmüş durumlarda SAE 660 bronzundan, özellikle 4 MPa'dan daha yüksek basınçlarda çok daha üstün aşınma direnci sergiledikleri gözlemlendi.

Yapılan değerlendirme sonucunda, uygulanan ısıl işlemin Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik ve mukavemetinden başka sürtünme katsayısı, sıcaklık ve aşınma direncini de artırdığı belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı, Yetersiz yağlama. Sürekli yağlama, Sürtünme ve Aşınma.

SUMMARY

An Investigation of Friction and Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy Under Inadequate and Continuous Lubrication Conditions

In this study, four ingots of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy were produced by permanent mould casting. Two of the ingots were subjected to T6 heat treatment which consists of solution treatment, water quenching and artificial ageing. After examining microstructure and some mechanical properties of the alloy in both as-cast and in heat treated states, its friction and wear properties were investigated under inadequate and continuous lubrication conditions using a block-on-disk test machine.

It was observed that the microstructure of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy consisted of aluminium-rich α , zinc-rich η , copper-rich ϵ and silicon particles. The heat treatment produced fine precipitates in the microstructure but had no considerable effect on the silicon particles. It was also determined that the heat treatment increased the hardness and tensile strength of this alloy.

It was found that under inadequate lubrication condition the friction coefficients of the wear samples of the alloy decreased with increasing pressure up to approximately 3 MPa above which the trend reversed. However the friction coefficients showed irregular variations with speed. It was also observed that the temperature of the wear samples increased with increasing both pressure and speed. Wear loss of the alloy increased exponentially with pressure, but show a linear increase with speed. Above the pressure of 4 MPa the increase in wear loss of the Zn-40Al-2Cu-2Si alloy with speed became exponential.

Under continuous lubrication condition, the friction coefficients of the wear samples decreased with increasing pressure and speed but their temperatures increased with these parameters. It was also found that the wear loss of the alloy samples increased with increasing pressure and running speed. The wear samples of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy in either the as-cast and in the heat treated conditions exhibited much superior wear resistance than SAE 660 bronze, especially at pressures above 4 MPa.

As a result this work it was concluded that the T6 heat treatment does not increase only hardness and tensile strength of the Zn-40Al-2Cu-2Si alloy but also increase its friction coefficient, temperature during wear and wear resistance.

Key Words: Zn-40Al-2Cu-2Si alloy, Inadequate lubrication, Continuous lubrication, Friction and Wear.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı.....	3
Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti.....	4
Şekil 3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.....	5
Şekil 4. Aşınma deney düzeneğinin şematik resmi.....	16
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin genel görünümü.....	17
Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinde örnek, disk ve yük hücresinin yakından görünümü.....	17
Şekil 7. Yük hücresi kalibrasyon doğrusu.....	18
Şekil 8. Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan örneklerin teknik resmi.....	18
Şekil 9. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı	19
Şekil 10. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısı işlem görmüş durumdaki iç yapısı	20
Şekil 11. SAE 660 Bronzunun iç yapısı	20
Şekil 12. Çözündürme ve su verme işlemi sonrası 150°C sıcaklıkta yaşlandırılan Zn-40Al-2Cu-Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri	21
Şekil 13. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	23
Şekil 14. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	23
Şekil 15. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	24
Şekil 16. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	24

Şekil 17.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	25
Şekil 18.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	25
Şekil 19.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	26
Şekil 20.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	26
Şekil 21.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	27
Şekil 22.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	27
Şekil 23.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	28
Şekil 24.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	28
Şekil 25.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	29
Şekil 26.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	29
Şekil 27.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	30
Şekil 28.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtma işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	30
Şekil 29.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	31

Şekil 30.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	32
Şekil 31.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	32
Şekil 32.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler	33
Şekil 33.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinin sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini gösteren eğriler	36
Şekil 34.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinin çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	36
Şekil 35.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtıl işlem görmüş durumdaki örneklerinin sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	37
Şekil 36.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının işlem görmüş durumdaki örneklerinin çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	37
Şekil 37.	SAE 660 bronzu örneklerinin sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	38
Şekil 38.	SAE 660 bronzu örneklerinin çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.....	38
Şekil 39.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun ortalama sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	39
Şekil 40.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun ortalama çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	39
Şekil 41.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun ortalama sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	40
Şekil 42.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 Bronzunun ortalama çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	40
Şekil 43.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 Bronzunun hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimini gösteren eğriler.....	42
Şekil 44.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 Bronzunun hacim kaybı değerlerinin hıza göre değişimini gösteren eğriler.....	42
Şekil 45.	2 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	44
Şekil 46.	6 MPa'lık basınç, 100 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	44

Şekil 47.	6 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	45
Şekil 48.	2 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	45
Şekil 49.	6 MPa'lık basınç, 100 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	46
Şekil 50.	6 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	46
Şekil 51.	Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 2 MPa basınç altında 1 cm ³ /saat yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	47
Şekil 52.	Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 6 MPa basınç altında 1 cm ³ /saat yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	47
Şekil 53.	Isıtılmış Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 2 MPa basınç altında 1 cm ³ /saat yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	48
Şekil 54.	Isıtılmış Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 6 MPa basınç altında 1 cm ³ /saat yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü.....	48
Şekil 55.	2 MPa basınç altında 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait örneğin aşınma yüzeyinin görünümü.....	49
Şekil 56.	6 MPa basınç altında 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait örneğin aşınma yüzeyinin görünümü	49

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.....	3
Tablo 2. Zn-Al-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri.....	4
Tablo 3. Çinko esaslı alaşımlar ve bazı döküm alaşımlarının fiziksel özellikleri.....	7
Tablo 4. Çinko esaslı alaşımlar ve bazı döküm alaşımlarının mekaniksel özellikleri.....	7
Tablo 5. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ve SAE 660 bronzunun yoğunluk, sertlik ve çekme dayanımı değerleri.....	21
Tablo 6. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılma işlem görmüş durumlarındaki örneklerinde yetersiz yağlama durumunda meydana gelen aşınma kaybı değerleri.....	31
Tablo 7. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun 1 cm ³ /saat yağ debisi, 250 d/dk dönme hızı ve farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklıklarının sürekli rejim durumundaki değerleri.....	34
Tablo 8. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun 1 cm ³ /saat yağ debisi, 6 MPa basınç ve farklı dönme hızlarındaki sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklıklarının sürekli rejim durumundaki değerleri.....	35
Tablo 9. 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 250 d/dk'lık dönme hızında yapılan deneylerde Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunda farklı basınçlarda meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	41
Tablo 10. 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 6 MPa'lık basınç altında yapılan deneylerde Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunda farklı dönme hızlarında meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	41

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde çinko esaslı alaşımlar beyaz metal (babbit), bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaktadır [1-3]. Yapılan çalışmalar çinko esaslı Alüminyum, bakır ve/veya silisyum içeren alaşımların geleneksel yatak alaşımlarına göre üstün özelliklere sahip olduklarını göstermiştir. Bu üstünlüklerin başında özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, yüksek aşınma dayanımına sahip olmaları, yağ kesilmesi durumunda daha iyi yataklama yapması, düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları, üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, sert parçacıkları yutma özelliğine sahip olmaları, yüksek sönümlenme karakteristikleri nedeni ile sessiz çalışmaları ve aşırı yüklenme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile ideal tribolojik davranış sergilemeleri gelmektedir [1-6].

Çinko esaslı alaşımlarının bazı dezavantajları da vardır. Şöyle ki, bu alaşımların ergime sıcaklıkları düşük olduğundan çalışma sıcaklıkları oldukça sınırlıdır ve özellikle bakır içeren alaşımlarda faz dönüşümleri sonucunda boyutsal kararsızlık meydana gelmektedir. Boyutsal kararsızlık problemi alaşımlara ısıtma işlemi uygulamak veya uygun alaşım elementi katmak suretiyle giderilmeye çalışılmaktadır [1, 7-9].

İlk kez 1920'li yıllarda basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ötektoid bileşime sahip çinko-alüminyum alaşımlarının üstün mekanik ve döküm özelliklerine sahip oldukları görülmüştür [10]. İkinci Dünya Savaşı sırasında Almanya'da bakır ve kalay temininde karşılaşılan güçlükler nedeniyle bronzun yerine kullanılmak amacıyla yüksek oranlarda alüminyum ve düşük oranlarda bakır içeren çinko esaslı yatak alaşımları geliştirilmiştir [3,11,12]. Savaş sonrası, malzeme tedarikinde karşılaşılan zorluklar ortadan kalktığından kaymalı yatak üretiminde yeniden geleneksel yatak malzemeleri kullanılmaya başlanılmıştır. Ancak az sayıda olsa da bazı firmalar çinko esaslı alaşımları üretmeye ve geliştirmeye devam etmişlerdir. 1960'lı yıllarda, ILZRO (International Lead-Zinc Research Organization) adlı kuruluş tarafından %12 ve %16 oranlarında alüminyum içeren ILZRO-12 (ZA-12) ve ILZRO-16 (ZA-16) alaşımları üretilmiştir. ZA-12 alaşımının kum ve kokil döküm alaşımı olarak çekme ve darbe dayanımlarının yüksek olduğu belirlenmiştir. 1970'li yıllarda ise, Noranda Araştırma Merkezi tarafından ZA-8 ve ZA-27 alaşımları

geliştirilmiştir [13–15]. Aynı yıllarda, Voest Alpine of Linz adlı firma tarafından %27–70 Al, %0–5 Cu ve %0–5 Si içeren çinko esaslı yatak alaşımları üretilmiştir. Bunlardan %32 Al ve %5 Cu içeren ve Alzen 305 diye adlandırılan yatak alaşımı, birçok uygulamada bronzun yerine başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alaşımın özellikle yatak sarmalarının meydana geldiği yetersiz yağlama koşullarında bile üstün tribolojik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [16,17].

Günümüzde de çinko esaslı alaşımların geliştirilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu araştırmalar özellikle bu alaşımların kullanımını kısıtlayan faktörlerin ortadan kaldırılması ve bu alaşımlardan üretilen yatakların tasarımına yönelik yeni verilerin elde edilmesi yönünde sürdürülmektedir [18–20].

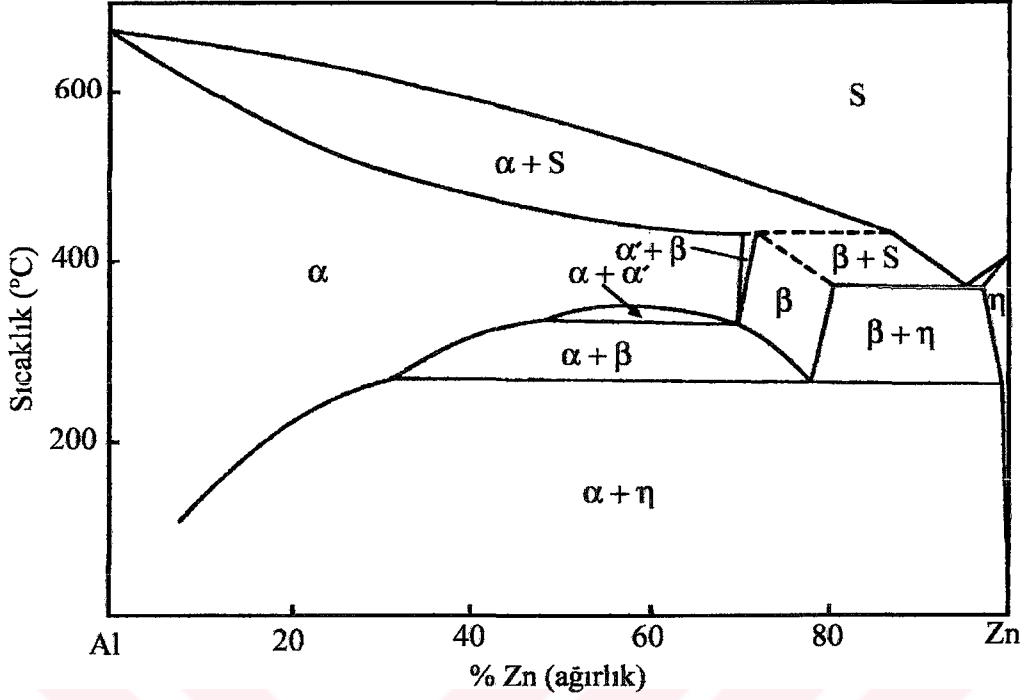
Çinko esaslı alaşımlardan üretilen yataklar, daha çok düşük hız ve aşırı yüklemenin söz konusu olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Nitekim kablolu kren ve taş kırma makinası gibi pek çok iş makinasında, maden işletme araçlarında, vites kutusu ve torna tezgâhı gibi yerlerde bu alaşımlardan üretilen yataklar kullanılmaktadır. Bu alaşımlardan tek tabakalı kaymalı yataklar imal edilebildiği gibi yatak burçları da üretilmektedir [6,21].

Söz konusu alaşımlar kaymalı yatak üretiminden başka mühendislik amaçlı bazı parçaların üretiminde de kullanılmaktadır. Özellikle otomobillerde kullanılan karbüratör parçaları, silindir kapağı, dişli kutusu kapakları, biyel kolu ve jant gibi parçalar bu alaşımlardan üretilmektedir [22,23].

1.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarının Faz Diyagramları

1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı

İkili çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1’de verilmiştir. Bu diyagramda yer alan α alüminyumca zengin faz bölgesini, η ise çinkoca zengin faz bölgesini göstermektedir [24]. Diyagramda da görüldüğü gibi alüminyum içerisindeki çinko katı çözeltisi %83 Zn oranına kadar uzanır ve α , α' ve β olarak adlandırılan değişik faz bölgeleri oluşturur. α ve α' fazlarının kafes parametreleri birbirine çok yakın olduğundan bu fazlar arasındaki sınır tam olarak belirlenememiştir. Yavaş soğutma sonucunda bu fazlar kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşürler [24,25].



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [26].

Zn-Al faz diyagramında 382°C sıcaklık ve %95 Zn oranında ötektik dönüşüm meydana gelir. Ötektik dönüşümün meydana gelmesi ile yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip β ile sıkı düzenli hegzagonal yapıya sahip η fazlarını içeren bir iç yapı oluşur. Alüminyumun η fazı içindeki katı çözünürlüğü azalan sıcaklıkla azalmakta ve 20°C sıcaklıkta %0,05 Al oranına kadar düşmektedir. β fazı ise 276°C sıcaklıkta %22 Al oranında meydana gelen ötektoid reaksiyon sonucunda α ve η fazlarına dönüşür [26-28].

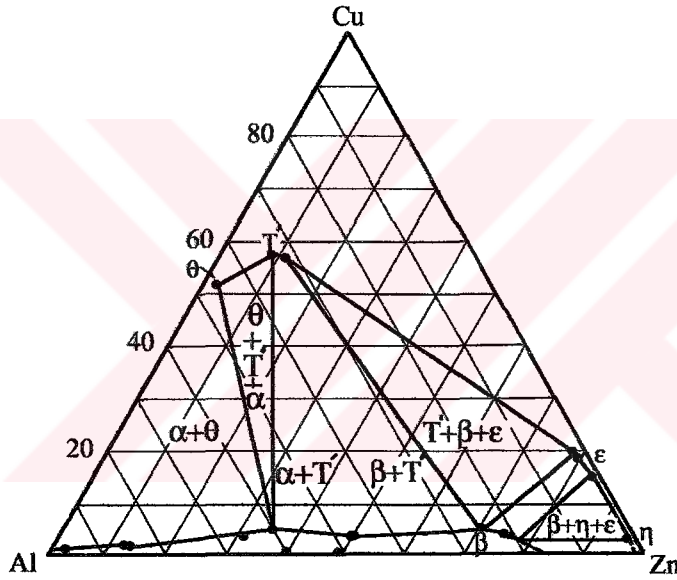
İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri, kimyasal bileşim oranı ve sıcaklık değerleri ile birlikte Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [24].

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 Zn-Al-Cu Faz Diyagramı

Üçlü Zn-Al-Cu faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiştir. Ancak, bu diyagramın bakır oranı düşük olan kısmı Murphy [25] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Zn-Al-Cu faz diyagramının 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti Şekil 2’de, bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri de Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloda α alüminyumca zengin fazı, β çinkoca zengin fazı, ϵ (CuZn_4) kararsız dengeli (metastabil) yapıya sahip olan bakırca zengin fazı ve T' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) sembolü de kararlı yapıya sahip bakırca zengin fazı göstermektedir [8,29-31].



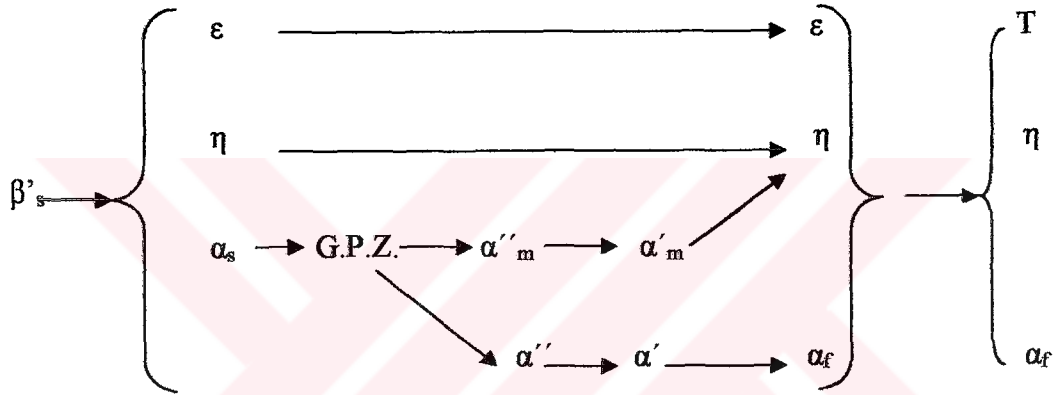
Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti [25].

Tablo 2. Zn-Al-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [24].

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

1.2.3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si Faz Diyagramı

Dörtlü Zn-Al-Cu-Si faz diyagramı tam olarak belirlenememiştir. Ancak bu sistemdeki bazı faz dönüşümleri birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir [32]. Silisyumun, çinko-alüminyum matrisi içersindeki çözünürlüğünün çok az olması nedeniyle bu alaşımlarda meydana gelen faz dönüşümlerini belirgin bir şekilde etkilemediği görülmüştür [32]. Çözündürme ve su verme işlemlerinden sonra yaşlandırılan Zn-20Al-3Cu-2Si alaşımında meydana gelen faz dönüşümleri aşağıda verilmiştir [33].



Şekil 3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [32].

Bu dönüşümler sırasında ilk önce G.P.Z. (Guiner-Preston zones) bölgeleri oluşmaktadır. Su verme işlemi sonunda elde edilen α_s fazı yaşlandırma işlemi sırasında Şekil 3'de görüldüğü gibi α''_m , α'_m , α'' , α' geçiş fazlarını oluşturmakta ve bu fazlar da en son çinkoca zengin η ve alüminyumca zengin α_f fazlarına dönüşmektedir [33–34].

Silisyum parçacıklarının büyüklük ve alaşım içersindeki dağılımlarının silisyum oranına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [35]. Özellikle yapı içindeki silisyum oranın %2'nin altında olması durumunda silisyum parçacıklarının iç yapıda homojen olarak dağıldıkları, %2'nin üzerine çıkması durumunda ise hem büyüdükleri hem de belirli bölgelerde toplanarak kümeleştikleri görüldü [35,36]. Bu durum bu alaşımların katılaşıma davranışlarına dayandırılarak açıklanmaktadır [37]. Nitekim son zamanlarda yapılan çalışmalarda dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlarında, %2,5 silisyum oranına kadar silisyum tanelerinin küçük boyutta olup homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Silisyum

oranının %2,5'in üzerine çıkması durumunda ise tane büyüklüğünün aşırı bir şekilde büyüdüğü ve belirli bölgelerde kümeleşerek toplandığı görülmüştür [37].

1.3. Çinko Esaslı Alaşımların Özellikleri

1.3.1. Çinko Esaslı Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri

Çinko esaslı alaşımların fiziksel özellikleri çoğunlukla içerdikleri alüminyum oranına göre değişmektedir [38,39]. Şöyle ki alüminyum oranı arttıkça alaşımların yoğunlukları düşmekte, buna karşılık ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve ısı genleşme katsayıları artmaktadır. [2,39]. Bu alaşımların ergime sıcaklıkları düşük olduğundan ergitme işlemi için daha az enerjiye gereksinim duyulur ve kullanılan kalıp, araç ve gereçlerin ömürleri daha uzun olur [40,41]. Çinko esaslı alaşımlar ile bazı döküm alaşımlarının fiziksel özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

Çinko esaslı alaşımların yoğunluğu geleneksel yatak alaşımlarının yoğunluğundan daha düşüktür [39]. Bu nedenle söz konusu alaşımlar geleneksel yatak alaşımlarından daha yüksek özgül mukavemet değerine sahiptirler [2]. Bu alaşımların alüminyum oranı arttıkça, yoğunluğu düşmekte ve dolayısıyla birim maliyeti azalmaktadır [3,40].

1.3.2. Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

Çinko esaslı alaşımlar demir dışı alaşımların pek çoğundan daha yüksek mukavemet değerine sahiptir [2]. Ancak bu alaşımların mekanik özellikleri alüminyum oranına göre değişmektedir [38,42]. Monotektoid bileşime sahip çinko esaslı alaşımlar, ötektik ve ötektoid bileşime sahip çinko esaslı alaşımlardan daha üstün mekanik özelliklere sahiptir [43,44]. Alaşım elementi olarak katılan alüminyum bu alaşımların hem döküm özelliğini iyileştirmekte hem de mukavemet değerlerini arttırmaktadır [1,2,42]. Çinko esaslı alaşımların mekanik özellikleri bazı uygulamalar için yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizlikleri gidermek için de bu alaşımlara bakır, magnezyum, silisyum, nikel gibi elementler katılmaktadır [37,45,46]. %2 oranındaki bakır katkısı bu alaşımların mukavemet, korozyon ve aşınma direncini, %2 oranındaki silisyum katkısı ise özellikle aşınma direncini arttırmaktadır [35,36,39,47,48].

Tablo 3. Çinko Esaslı Alaşımlar ve Bazı Döküm Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri [39].

Alaşım	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Aralığı (°C)	Isıl Genleşme Katsayısı ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{K}$)	Isıl İletkenlik (W/m ² K)	Elektriksel İletkenlik (%IACS)
ZA-8 Kokil D.	6.3	373-404	23.2	115	27.7
ZA-12 Kokil D.	6.03	377-432	24.1	116	28.3
ZA-27 Kum D.	5.0	375-484	26.0	125.5	29.7
Al. Alaşımları 356-T6	2,69	556-615	21.5	151	39
SAE-40 Pirinci	8.5	855-1010	18	72	15
SAE-660 Bronzu	8.83	855-975	18	59	12
Kır D. D. C30	6.94	1176	12.1	49-52	6

Tablo 4. Çinko Esaslı Alaşımlar ve Bazı Döküm Alaşımlarının Mekanik Özellikleri [2].

Alaşım	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Young Modülü (GPa)	Brinell Sertlik Değeri (BSD)	Darbe Dayanımı (J)
ZA-8 Kokil D.	221-255	200-214	1-2	85.5	85-90	13-18
ZA-12 Kokil D.	310-345	250-275	1.5-2.5	83	85-95	17-22
ZA-27 Kum D.	400-441	358-393	2-3	-	110-117	25-40
Al. Alaşımları 356-T6	262	186	5	72.4	80	-
SAE-40 Pirinci	255	117	30	83	60	15
SAE-660 Bronzu	240	124	20	100	65	8
Kır D. D. C30	214	124	-	90-113	210	-

Çinko esaslı alaşımların mukavemetini arttırmanın diğer bir yolu da alaşımlara ısı işlem uygulamaktır [45]. Ancak karalı bir iç yapı elde etmek için uygulanan stabilizasyon işlemi bu alaşımların mukavemet ve sertliğini büyük bir ölçüde düşürmekte ve özellikle % 2 bakır oranından daha fazla bakır içeren alaşımlarda boyutsal kararsızlığa neden olmaktadır [8,37,39]. Hem daha kararlı içyapı elde etmek hem de sertlik ve mukavemet değerlerinin arttırmak için bu alaşımlar çözündürme ve su verme işlemi sonrası doğal veya yapay olarak yaşlandırılmaktadır [39,48-50]. Bu işlemin sonunda yapı içerisindeki ϵ fazı $\alpha + \epsilon \rightarrow T' + \eta$ dönüşümü ile bakırca zengin T' ve çinkoca zengin η fazlarına dönüşmektedir [26].

Çinko esaslı alaşımların ergime sıcaklıklarının düşük olmasından dolayı kullanım sıcaklıkları da düşüktür. Sıcaklık arttıkça bu alaşımların sertlik ve mukavemeti düşerken sünekliliği artmaktadır [2,39,51]. Bu nedenle ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarının 90°C, ZA-27 alaşımının da 120°C'nin altındaki sıcaklıklarda kullanılmaları tavsiye edilmektedir [38].

Başka bir çalışmada soğuma hızının artmasıyla bu alaşımların ikincil dendrit kol aralığının azaldığı ve yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe enerjisi değerlerinin arttığı görülmüştür [52]. Dökülmüş durumdaki çinko esaslı alaşımlarının mekanik özelliklerinin ikincil dendrit kol aralığına bağlı olduğu görülmüştür [53]. Nitekim ikincil dendrit kol aralığı azaldıkça bu alaşımların sertlik, çekme mukavemeti, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin arttığı belirtilmiştir [52-54].

Diğer taraftan bu alaşımların yorulma dayanımı ve ömrünün artan alüminyum oranı, sertlik ve mukavemet değerleri ile arttığı görülmüştür [42]. Ayrıca alüminyum oranı arttıkça bu alaşımların kırılma tokluğunun da arttığı görülmüştür [2,38]. İkili çinko alüminyum alaşımlarının sürünme dirençlerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir. Ancak başta bakır olmak üzere magnezyum, silisyum ve nikel katkılarının bu alaşımların sürünme direncini arttırdığı belirlenmiştir [55].

1.3.2 Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Yapılan çalışmalar çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak alaşımlarından daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [1,2,49,56]. Bu durum bu alaşımların iç yapı ve yüzeylerinde oluşan oksit filmine dayandırılarak açıklanmaktadır [57]. Çinko esaslı alaşımlardaki alüminyumca zengin yüzey merkezli kübik yapıya sahip α

fazı yük taşıma görevi yaparken, çinkoca zengin sıkı düzenli hegzagonal yapıya sahip η fazı katı yağlayıcı gibi davranarak kaymayı kolaylaştırmakta ve sıvanmaya neden olmaktadır [5,58,59]. Bakır içeren çinko esaslı alaşımların yapısında bulunan sert intermetalik bileşiklerin (ϵ , T' ve θ) yük taşıma görevi üstlendikleri ileri sürülmektedir [56,59,60]. Bu alaşımların yapısında bulunan silisyum parçacıklarının ise aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir [35-37,61]. Aynı zamanda aşınma yüzeylerinde oluşan sert alüminyum oksit tabakasının yük taşıma görevi yaparken, çinko oksit tabakasının kaymayı kolaylaştırdığı ve özellikle sınırlı ve karışık yağlama durumlarında yağlayıcı gibi davrandığı ileri sürülmektedir [21].

Son zamanlarda yapılan çalışmalar sonucunda çinko esaslı bakır ve/veya silisyum içeren alaşımların düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahip oldukları görülmüştür.[35,45,62]. Monotektoid esaslı üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının sertlik, mukavemet ve aşınma dirençlerinin artan bakır oranı ile artarak %2 bakır oranında en yüksek seviyelere ulaştığı belirlenmiştir [59]. Bu seviyenin üzerinde ise bakır oranı arttıkça sertliğin artmaya devam ettiği, çekme dayanımının azaldığı, aşınma direncinin fazla değişmediği belirlenmiştir [59,62]. Bu durum katı çözelti sertleşmesi ve ϵ fazının oluşumuna dayandırılarak açıklanmaktadır. Şöyle ki, alüminyumun içerisinde en fazla % 1 oranında bakır çözünebildiğinden bu alaşımların sertlik, mukavemet ve aşınma direnci % 2 bakır oranına kadar katı çözelti sertleşmesi mekanizmasıyla artmaktadır. Bu seviyedeki bakır oranlarında dendritler arası bölgelerde hegzagonal kristal kafes yapısına sahip bakırca zengin ϵ fazı oluşmaktadır [59,63]. Sertliği yüksek olan ϵ fazı dispersiyon sertleşmesi yoluyla alaşımın genel sertliğini arttırmaktadır [63]. Bakır oranı arttıkça ϵ fazının hem oranı hem de boyutu artmakta ve dolayısıyla alüminyumca zengin α fazı içerisindeki bakır oranı azalmaktadır [59,60]. Bu durum katı çözelti sertleşmesi etkisinin azalmasına yol açmakta ve bunun sonucunda da alaşımın çekme dayanımı düşmektedir. Sertlikteki artış ise ϵ fazının yüzde oranının artmasından kaynaklanmaktadır. [62]. Bu alaşımların sertliğindeki artış çekme dayanımındaki azalmayla dengelendiğinden aşınma direncinde önemli bir değişim olmamaktadır [59].

Bu alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvanma belirtileriyle çiziklere rastlanılmıştır [62,64]. Alaşımların yüzeyinden aşınarak kopan alüminyum ve çinkoca zengin α ve η fazlarını içeren parçacıkların önce mil yüzeyine yapıştığı ardından da tekrar yatak yüzeylerine sıvandığı ileri sürülmüştür [3,21,46,61]. Çiziklerin ise yüzeyden kopan sert ϵ

parçacıkları tarafından oluşturulduğu ileri sürülmektedir [59,60]. Bakır oranının artması ile bu çiziklerin genişleyip derinleştiği, sayılarının ise azaldığı belirlenmiştir [60,62]. Bu durum da yüzeyden kopan sert ϵ parçacıklarının aşınma yüzeyinde abrazyon (kazıma) etkisi yapmasından kaynaklanmaktadır [60,62]. Bu bulgular adhezyon, sıvanma ve abrazyonun Zn-Al-Cu alaşımlarının aşınmasında önemli rol oynadıklarını göstermektedir [61,62,64].

Başka bir çalışmada matris yapıları aynı olduğu halde Zn-Al-Si alaşımlarının Zn-Al-Cu alaşımlarından daha üstün tribolojik davranış sergiledikleri görülmüştür [3,48]. Bu durum yapı içerisinde bulunan sert silisyum parçacıklarının aşınma direncini arttırmada T' fazından daha etkili olduklarını göstermektedir [28,61]. Zn-Al-Si alaşımlarının sertlik, mukavemet ve aşınma direncinin %2 silisyum oranına kadar artan silisyum ile arttığı, bu oranın üzerinde ise bu değerlerin artan silisyum oranı ile azaldıkları belirlenmiştir [35]. Bu durum silisyum parçacıklarının yapı içerisindeki dağılımlarına göre açıklanmaktadır. Şöyle ki çinko esaslı alaşımların içerdiği silisyum oranının %2 veya altında olması durumunda silisyum parçacıklarının iplik şeklini alıp homojen bir dağılım sergilediği görülmüştür [36]. Alaşımların içerisinde bulunan silisyum parçacıklarının sık ve homojen bir şekilde dağılmış olması dislokasyon hareketinin zorlaşmasına neden olmaktadır. Alaşımın matrisinden daha sert olan silisyum parçacıklarının çalışma sırasında yük taşıma görevi yaptığı ileri sürülmektedir [66,67]. Silisyum oranının bu değerin üzerine çıkarılması durumunda silisyum parçacıklarının büyüdüğü ve belirli bölgelerde toplanarak kümeleştikleri görülmüştür [36,37]. Silisyum parçacıklarının arasındaki mesafe azaldıkça bu alaşımların sertlik ve çekme dayanımının arttığı bilinmektedir [37]. Silisyum katkısı alaşımların sertlik ve çekme dayanımlarını artırarak bu alaşımlardan üretilen yatakların yük taşıma kapasitesini ve aşınma direncini arttırmaktadır [36,37,61,65].

Zn-Al-Si alaşımlarından alınan aşınma örneklerinin yüzeylerinde sıvanma izleri ile çiziklere rastlanılmıştır [36]. Bu alaşımların yapısındaki alüminyum ve çinko zengin fazlar sıvanmaya neden olurken, sert silisyum parçacıklarının yüzeyde çiziklerin oluşmasına yol açtığı ileri sürülmüştür. Alaşımlardaki silisyum oranının artmasıyla çiziklerin genişliğinin ve derinliğinin de arttığı görülmüştür [35]. Bu durumda söz konusu alaşımların aşınma davranışlarında abrazyon ve adhezyonun etkili olduğunu göstermektedir [35-37,61].

Çinko esaslı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar, bu alaşımların sertlik ve mukavemetini arttırmada bakırın silisyumdan, silisyumun ise aşınma direncini arttırmada

bakırdan daha etkili olduğunu göstermiştir [1,3,48,61]. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalarda ise Zn-40Al-2Cu-2Si bileşimine sahip alaşımın en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir [37,61,65]. Kuru sürtünme şartlarında Zn-40Al-2Cu-1Si alaşımının diğer alaşımlardan daha yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı sergilediği görülmüştür [61]. Ancak bu alaşımın farklı hızlarda ve değişik yük altında nasıl bir tribolojik davranış sergilediği ve özellikle yağ kesilmesi durumunda ortaya çıkan yetersiz yağlama durumlarındaki tribolojik özellikleri incelenmemiştir.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yatak malzemelerinden sertlik ve mukavemet değerlerinin yeterli, sürtünme katsayısının düşük ve aşınma direncinin yüksek olması istenir. Bu amaçla son zamanlarda geliştirilen çinko esaslı yatak alaşımları geleneksel yatak alaşımlarının yerine başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Çinko esaslı üçlü alaşımlardaki bakır ve silisyum oranlarının bu alaşımların yapı ve özelliklerine etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda üçlü Zn-40Al-2Cu alaşımının söz konusu alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine, Zn-40Al-2Si alaşımının ise en yüksek aşınma direncine sahip oldukları görülmüştür. Bu durum katı çözeltiler sertleşmesi, dispersiyon sertleşmesi ve parçacık boyutu ve dağılımı gibi mekanizmalara dayandırılarak açıklanmaktadır.

Bakır, alüminyumun içerisindeki çözünürlüğü %1 civarında olduğundan matris yapısında yer alarak katı çözeltiler etkisine sebep olmaktadır. Dispersiyon sertleşmesine ise çözünen elementin fazla olmasıyla oluşan bakırca zengin ϵ fazı ve yapı içerisinde homojen dağılmış küçük boyuttaki silisyum parçacıkları neden olmaktadır.

Üçlü Zn-Al-Si alaşımlarının mukavemet değerlerinin bazı uygulamalar için yetersiz olması, hem mukavemet hem de aşınma direnci yönünden daha üstün olan dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlarının geliştirilmesine neden olmuştur. Bu alaşımlar içerisinde Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci sergilediği görülmüştür. Bu durum yapı içerisindeki ϵ ve silisyum parçacıklarının birlikte bulunmasına dayandırılarak açıklanmaktadır. Bu çalışmalar Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının birçok yatak uygulamasında başarılı bir şekilde kullanılacağını göstermektedir. Ancak bu alaşımın değişik çalışma koşullarında (farklı yağlama durumu, farklı basınç ve farklı hız) tribolojik özellikleri

incelenmemiştir. Bu nedenle bu çalışmanın amacı dörüü Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının değişik yük altında, farklı hızlarda ve gerek yetersiz gerekse sürekli yağlama durumlarındaki sürtünme ve aşınma davranışlarını inceleyerek yatak tasarımına yönelik veriler elde etmektir.



2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Alaşımın Üretimi

Bu çalışmada Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait dört adet külçe kokil döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde yüksek saflıkta (%99,99) çinko, ticari saflıkta (%99,7) alüminyum, yüksek saflığa sahip (%99,99) elektrolitik bakır ve Al-12Si (Etial-140) alaşımı kullanıldı. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi. Ergitilen alaşım 630°C sıcaklıktan oda sıcaklığında bulunan bir çelik kalıba (kokil) dökülerek katılaştırıldı. Üretilen alaşıma ait külçelerin ikisi dökülmüş, ikisi de T6 ısıl işlemine [74] tabi tutulmuş durumda incelendi.

Söz konusu ısıl işlem (T6), alaşıma ait örneklerin 375°C sıcaklıkta 24 saat süreyle çözündürme işlemine tabi tutulduktan sonra suda soğutulması ve hemen ardından 150°C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırılması suretiyle gerçekleştirildi. Yaşlandırma işlemi sırasında örneklerin sertliği belirli aralıklarla ölçüldü.

2.2. Yapısal İnceleme

İç yapı incelemeleri için gerek dökülmüş ve gerekse ısıl işlem görmüş alaşımdan alınan numuneler standart metalografi yöntemiyle hazırlandı ve %5-20'lik nital (%5-20 nitrik asit + % 95-80 etil alkol) içerisinde dağlandı. Metalografik numuneler ışık mikroskopunda incelendi ve iç yapılarını gösteren fotoğraflar çekildi.

Aşınma örneklerinin yüzeyleri ise tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi.

2.3. Alaşımın Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Yoğunluk ölçümü için talaşlı işlemlerle hazırlanan numunelerin boyutları $\pm 0,001$ mm hassasiyete sahip bir mikrometre yardımıyla ölçülerek hacimleri hesaplandı. Numunelerin kütleleri ise $\pm 0,01$ mg hassasiyete sahip bir terazide ölçüldü. Kütle değerleri hacim değerlerine bölünerek yoğunluklar belirlendi. Her bir durum için 3 numune kullanıldı.

Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçme yöntemiyle 62,5 kg'lık yük altında 2,5 mm çapında bilya şeklinde uç kullanılarak yapıldı. Her bir numune üzerinde 5 ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı.

Gerek dökülmüş, gerekse ısı işlem görmüş külçelerden talaşlı imalat yöntemi ile 8x40 TS 138 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler, 0,25 mm.s⁻¹'lik sabit çene hızı veya 5,90 x 10⁻³ s⁻¹'lik ortalama deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutuldu. Her iki durum için 3 çekme numunesi kullanıldı. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak her iki durumdaki örneklerin çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri belirlendi.

2.6. Alaşımın Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Alaşımın yeterli ve yetersiz yağlama durumundaki tribolojik özelliklerinin incelenmesinde şematik resmi Şekil 4'de verilen blok-halka esaslı deney düzeneği kullanıldı. Deney düzeneği 3kW gücünde bir elektrik motoru, 12 kW gücünde bir hız kontrol ünitesi, mil, disk, örnek tutucusu, yükleme kolu, yağlama sistemi ve sürtünme kuvveti ölçüm sisteminden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan disk kaymalı yatak ünitesinde kullanılan mili, deney numunesi ise yatağı temsil etmektedir. Çapı 150 mm olan disk, SAE 4140 çeliğinden imal edilmiş ve 55 RSD-C değerine kadar sertleştirilmiştir. Disk, sertleştirme işleminden sonra ±3 µm'lik bir hassasiyetle taşlanmıştır. Deney düzeneğinin genel görünümü ve ayrıntılarını gösteren fotoğraflar Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

Yükleme işlemi yükleme kolunun ucuna ağırlık asılarak gerçekleştirilmektedir. Milin devir sayısını kontrol etmek için elektrik devresine monte edilen bir hız kontrol ünitesi kullanılmaktadır. Yağlama işlemi ise yüksek bir yere yerleştirilen bir depodan ince bir hortum yardımıyla alınan yağın bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra disk üzerine damlatılmasıyla gerçekleştirilmektedir.

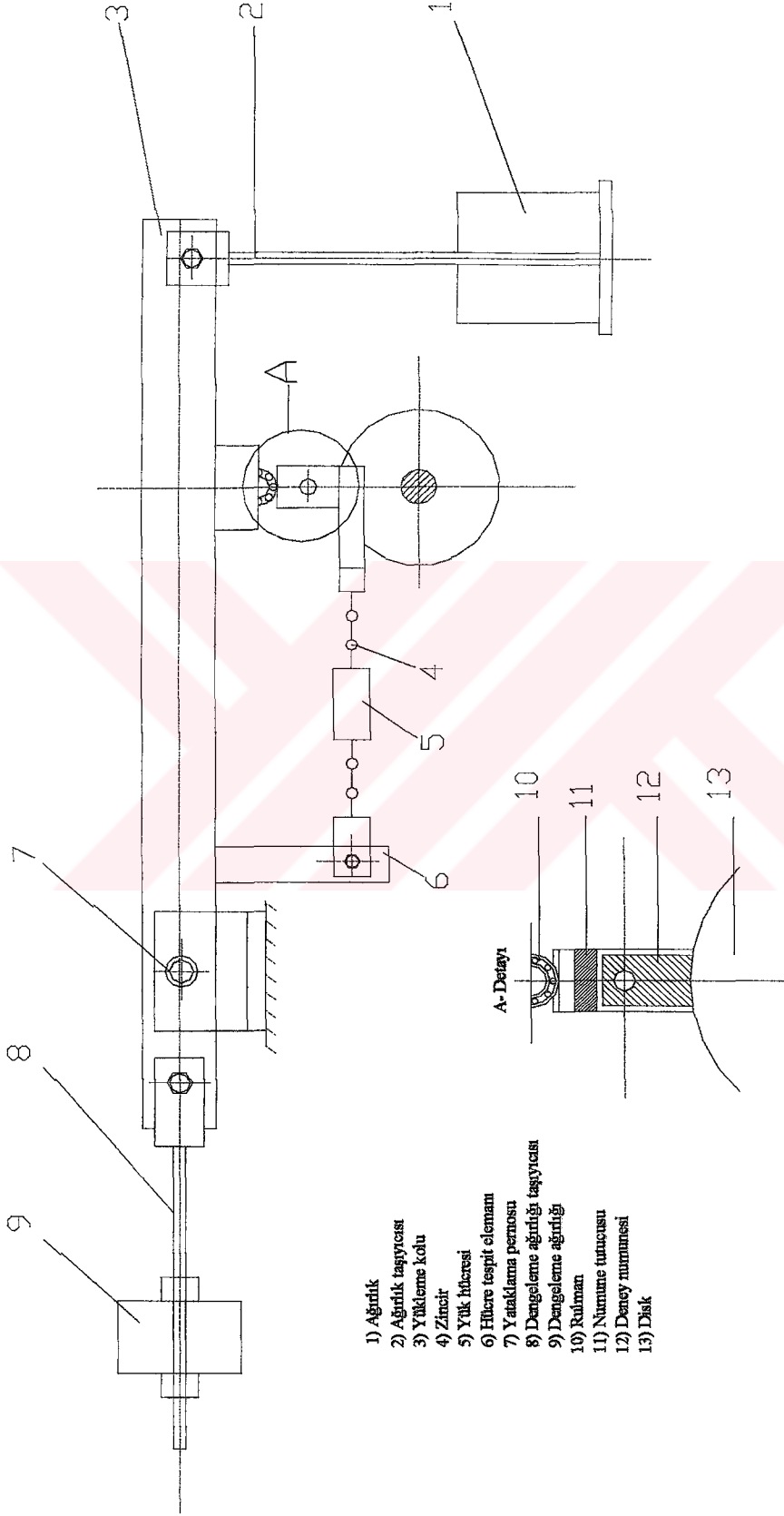
Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan örnekler, üretilen alaşımdan talaşlı yöntemle hazırlandı. Hazırlanan örneklerin uçları, iç çapı 149,6±0,05 mm olan bir kalıpta işlendi. Deney örneklerinin teknik resmi Şekil 8'de verilmiştir.

Bu örnekler sürtünme ve aşınma deneylerine başlamadan önce ve deneyler sonucunda kimyasal çözücüler (triklor etilen ve alkol-aseton) içerisinde ultrasonik temizleyici yardımıyla temizlendi. Kütleleri ise 0,01 mg'lık hassasiyete sahip terazi ile ölçüldü ve yoğunluklarına bölünerek aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları belirlendi.

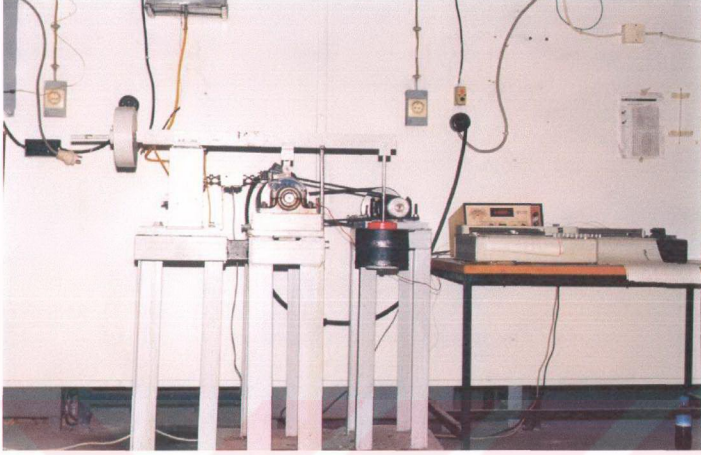
Bu çalışmada sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında deney örneklerinin temas yüzeylerinin 1,5 mm yukarısına açılan bir deliğe bakır-nikel termoeleman çifti yerleştirilerek sıcaklıkları ölçüldü ve zamana göre değişimi bir yazıcı ile kaydedildi. Sürtünme kuvvetini ölçmek için 50 kg kapasiteye sahip bir yük hücresi, örnek tutucusu ile düzenekteki sabit bir mesnet arasına yerleştirildi. Yük hücresinden alınan gerilim, bir yükselticide kuvvetlendirildikten sonra yazıcıya aktarıldı ve sürtünme kuvveti geriliminin zamana göre değişimi kaydedildi. Yük hücresi kalibresi için, ucuna belirli ağırlıklar asılarak gerilim-kuvvet grafiği belirlendi. Bu grafik Şekil 7'de verilmiştir. Ölçülen gerilim değerleri Şekil 7'deki grafik yardımıyla sürtünme kuvvetine çevrildi. Sürtünme kuvveti normal kuvvete bölünerek sürtünme katsayısı bulundu.

Yetersiz yağlama durumunu sağlamak için disk, 1 dakika boyunca 2 cm³/saat yağ debisinde yağlandı. Yağ kesildikten sonra yağın disk yüzeyine homojen bir şekilde dağılması için disk 5 dakikalık bir süre boyunca boşta çalıştırıldı. Deney numunesi yağ kütesinin üzerine gelecek şekilde deney düzeneğine yerleştirilerek 30 dakika boyunca sürtünme ve sıcaklık değerleri ölçüldü. Yetersiz yağlama durumlarındaki deneyler 4 farklı hız (100 d/dk, 150 d/dk, 200 d/dk, 250 d/dk) ve 6 değişik yük (1–6 MPa) altında gerçekleştirildi.

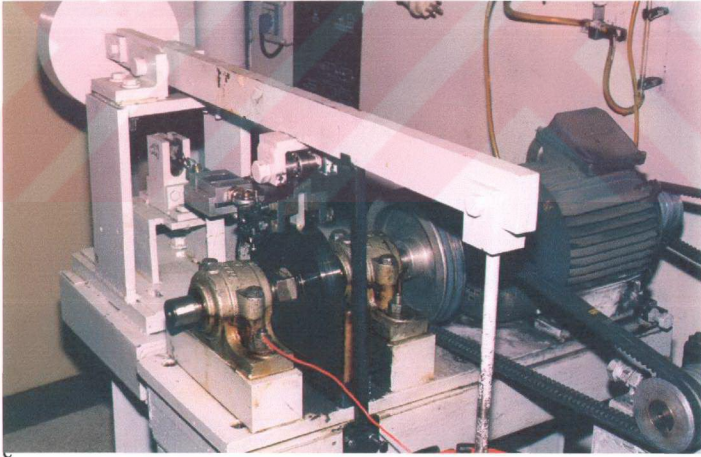
Yeterli yağlama durumunda ise yağ debisi 1 cm³/saat olarak seçildi ve deneyler değişik basınç altında (1–6 MPa) ve farklı hızlarda (100 d/dk, 150 d/dk, 200 d/dk, 250 d/dk) 120 dakika süreyle yapıldı. Deneylerde yağlayıcı olarak SAE 20W/50 normuna uygun motor yağı kullanıldı.



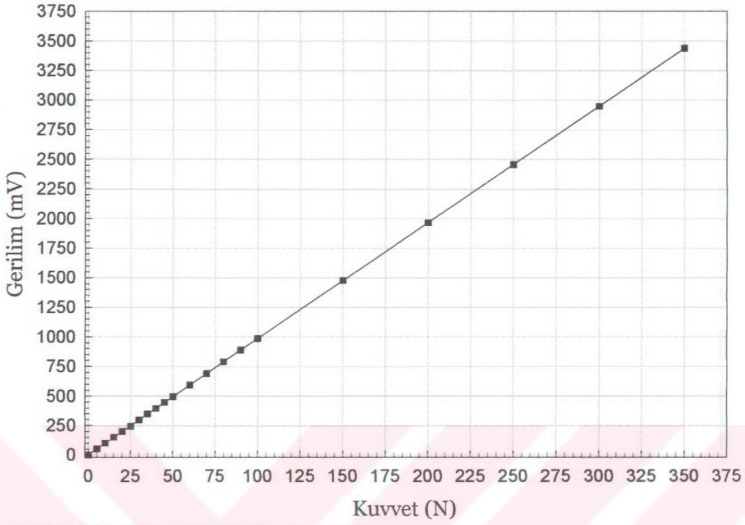
Şekil 4. Aşınma deney düzeninein şematik resmi.



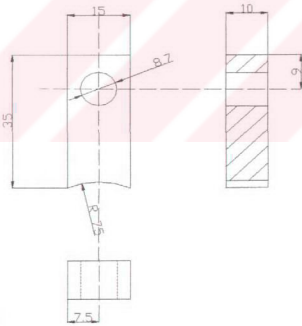
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinde örnek, disk ve yük hücresinin yakından görünümü.



Şekil 7. Yük Hücresi için kalibrasyon doğrusu.



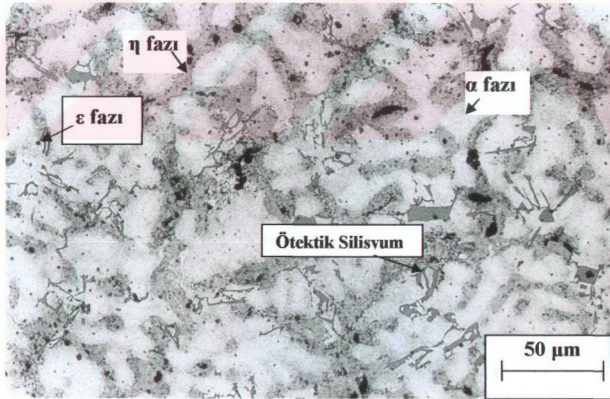
Şekil 8. Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan örneklerin teknik resmi.

3. BULGULAR

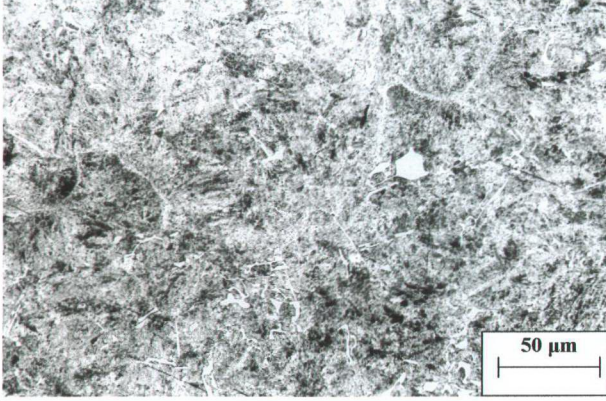
3.1. Alaşımın İç Yapısı

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısının, alüminyumca zengin göbekli α fazı ile bu fazı çevreleyen çinkoca zengin η fazı, bakırca zengin ϵ fazı ve silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlemlendi. Bu yapıyı gösteren optik mikrografi Şekil 9'da verilmiştir. Bu alaşımın ısıtılma işlemi görmüş durumdaki iç yapısının ise ince çökelti ve silisyum parçacıklarından oluştuğu görüldü. Bu durum uygulanan ısıtılma işleminin alaşımın dendritik yapısının tamamen ortadan kalktığını göstermektedir. Bu yapı Şekil 10'daki optik mikrografa görülmektedir.

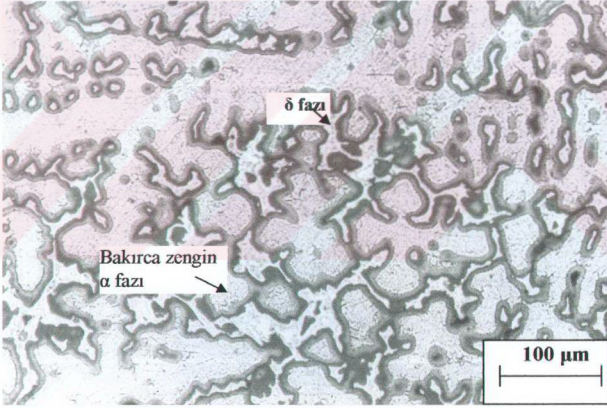
SAE 660 bronzunun iç yapısı ise bakırca zengin α dendritleri ile ötektoid α ve δ fazlarından oluşmaktadır. Bronzun iç yapısını gösteren mikrograf ise Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 9. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 10. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısı işlem görmüş durumdaki iç yapısı



Şekil 11. SAE 660 Bronzunun iç yapısı

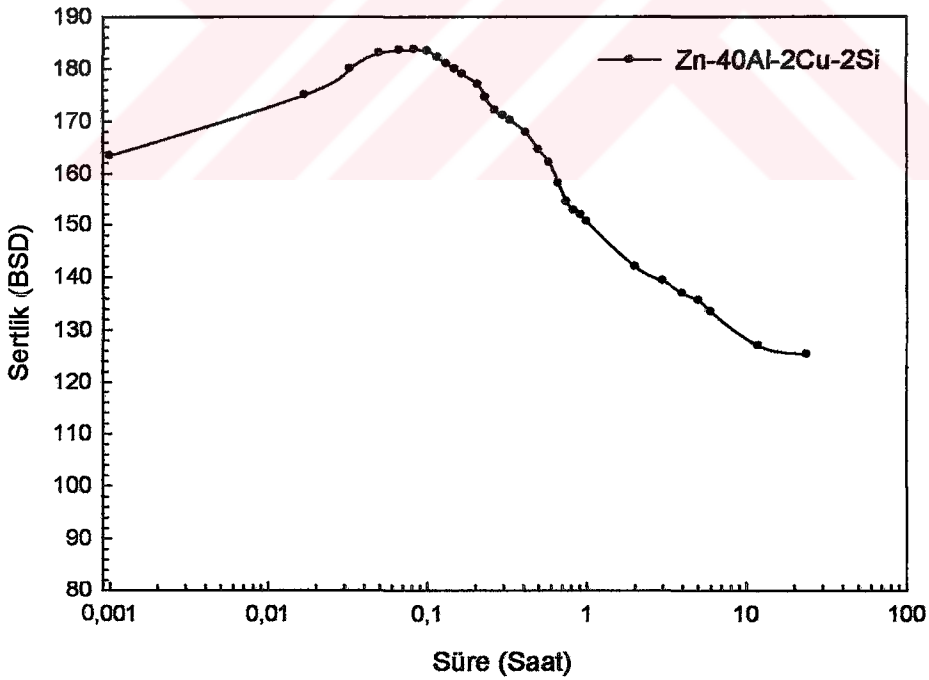
3.2. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

İncelenen Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının gerek dökülmüş gerekse ısı işlem uygulanmış durumlardaki yoğunluk, çekme dayanımı ve sertlik değerleri Tablo 5’de verilmiştir. Ayrıca bu alaşımın sertliğinin çözündürme ve su verme işlemi sonrası

uygulanan yaşlandırma işlemi sırasındaki değişimini gösteren eğri Şekil 12'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ve SAE 660 bronzunun yoğunluk, sertlik ve çekme dayanımı değerleri.

Alaşım	Yoğunluk (kg/m ³)	Sertlik (BSD)	Çekme Dayanımı (MPa)
Zn-40Al-2Cu-2Si (Dökülmüş)	4188	125	378
Zn-40Al-2Cu-2Si (Isıl İşlem Görmüş)	4175	143	431
SAE 660 Bronzu	8780	85	205



Şekil 12. Çözündürme ve su verme işlemi sonrası 150°C sıcaklıkta yaşlandırılan Zn-40Al-2Cu-Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri

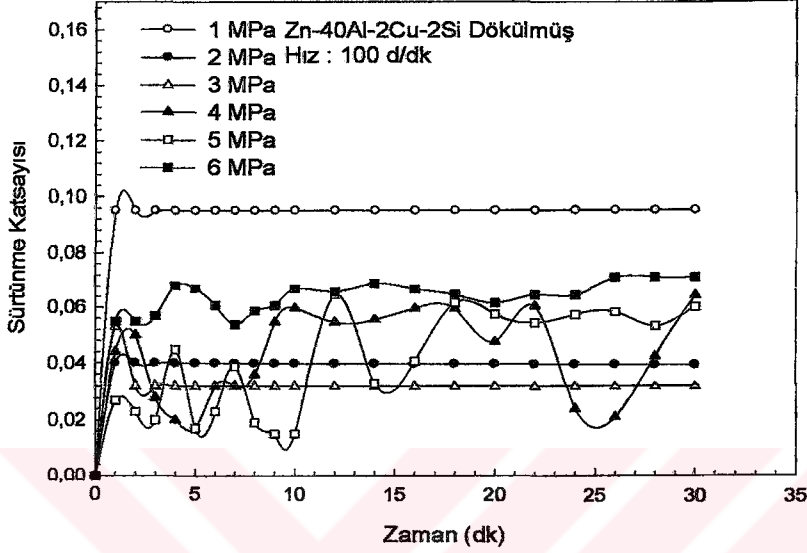
3.3 Sürtünme ve Aşınma DeneYlerinden Elde Edilen Bulgular

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıt işlemler görmüş durumlardaki örneklerinden farklı hızlarda (100 ve 250 d/dk) ve değişik basınçlarda (1-6 MPa), yağ kesilmesi durumunu temsil eden yetersiz yağlama şartlarında elde edilen sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklıklarının deney süresine göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 13-20'de verilmiştir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi sözü edilen alaşımların sürtünme katsayıları genelde çalışmanın başlangıcında hızlı bir artış gösterdikten sonra sürekli rejim halini temsil eden sabit değerlere yaklaşmaktadır. Diğer taraftan düşük hız ve hafif yüklerde fazla bir değişim göstermeyen sürtünme katsayısı artan yük ve hızla birlikte bir takım düzensizlikler sergileyerek artmaktadır. Alaşımların çalışma sıcaklıkları da deneylerin başlangıç aşamasında ani bir artış göstermekte, ancak ilerleyen zaman içerisinde artış hızı azalarak kararlı duruma ulaşmaktadır. Kararlı durumdaki sıcaklık değerlerinin de artan basınç ve hızla arttığı gözlemlendi.

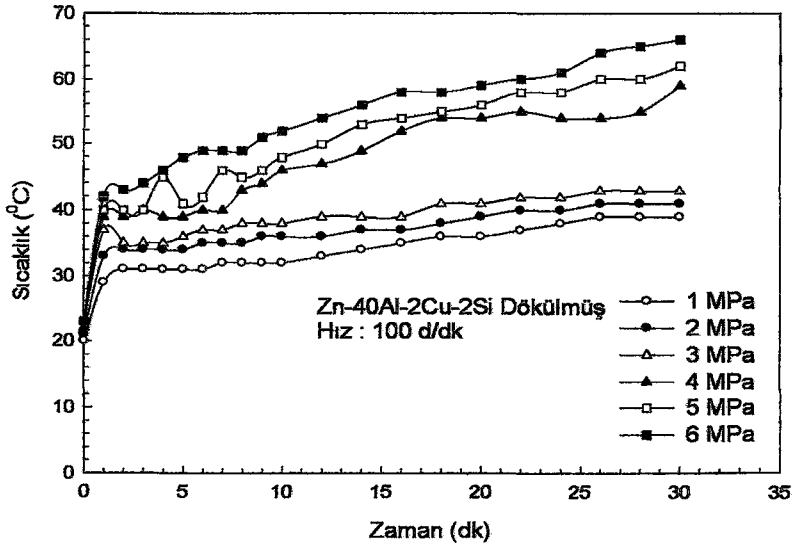
Alaşımın dökülmüş ve ısıt işlemler görmüş durumdaki örneklerinden 30 dakikalık deney süresi sonunda elde edilen sürtünme katsayıları ve sıcaklıklarının basınç ve hızla göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 21-28'de verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımın dökülmüş durumdaki örneklerinden elde edilen sürtünme katsayısı 3 MPa'lık basınca kadar artan basınç ile azaldığını, bu değerden sonra ise artan basınç ile arttığını göstermektedir. Bu eğriler ayrıca sürtünme katsayısının hızla göre dalgalı bir değişim sergilediğini, ancak genelde artan hızla arttığını sergilemektedir. Bu eğrilere bakıldığında dökülmüş durumdaki alaşımın çalışma sıcaklığının artan basınç ve hızla ile arttığı görülmektedir. Isıt işlemler görmüş durumdaki alaşımın sürtünme katsayısının ise 4 MPa'lık basınca kadar dalgalanma sergilediği, bu değerin üzerindeki basınçlarda ise artan basınç ile arttığı gözlenmektedir. Bu alaşımın çalışma sıcaklığı ise 4 MPa'lık basınca kadar kararlı bir şekilde, bu değerden sonra ise artan basınçla hızla bir artış sergilemektedir. Isıt işlemler görmüş alaşımın sürtünme katsayısı hızla göre düzensiz bir dağılım sergilemekte, sıcaklığı ise artan hızla ile artmaktadır.

Yetersiz yağlama durumunda söz konusu alaşımda meydana gelen hacim kayıpları Tablo 6'da, hacim kaybının basınç ve hızla göre değişimini gösteren eğriler ise Şekil 29-32'de verilmiştir. Bu eğriler yetersiz yağlama durumunda meydana gelen hacim kaybının 4 MPa'a kadar artan basınçla önemli bir değişim sergilemediği, bu değerden sonra ise genelde artan basınçla hızla bir şekilde arttığını göstermektedir. Diğer taraftan alaşımdan

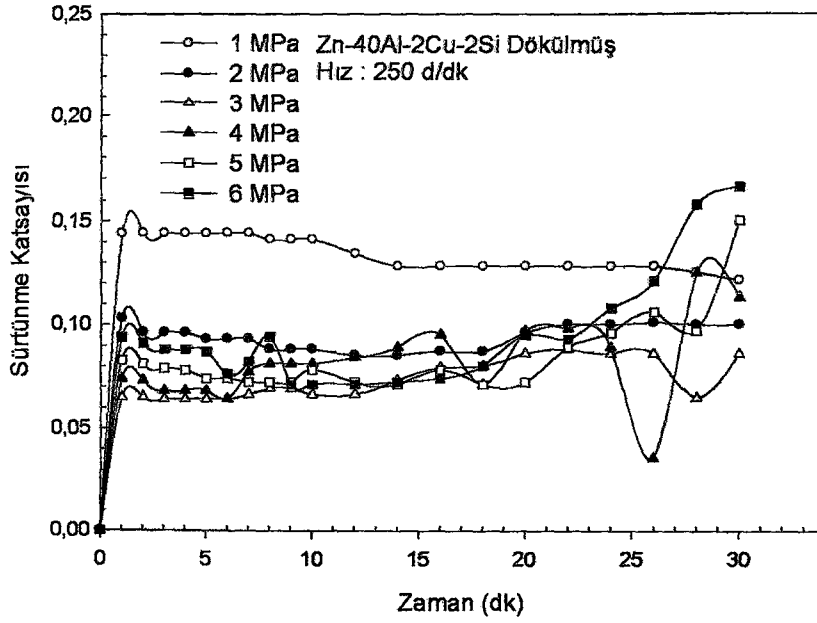
her iki durumda (dökülmüş ve ısıl işlem görmüş) elde edilen hacim kaybı düşük basınçlarda hız ile fazla değişmemekte, ancak 5 ve 6 MPa'lık basınçlarda exponansiyel olarak artmaktadır.



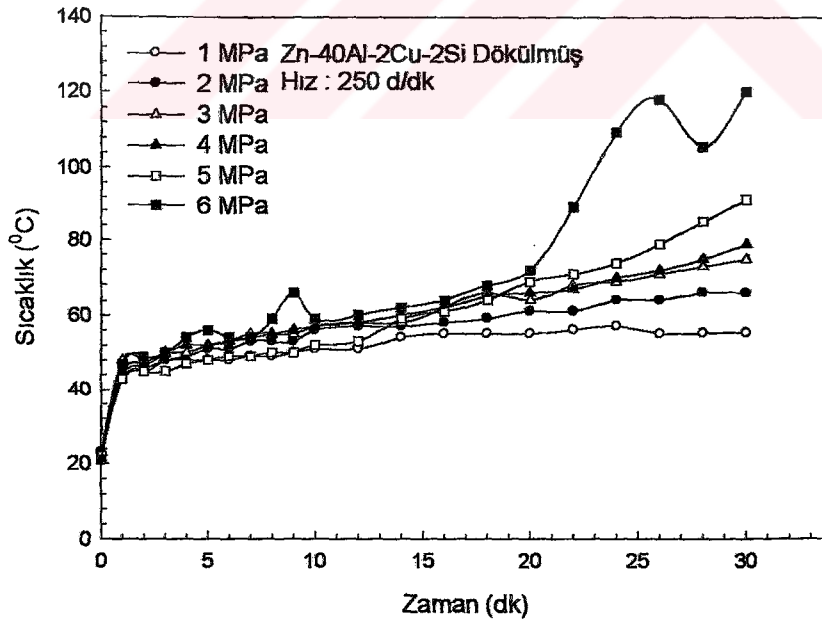
Şekil 13. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumundaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



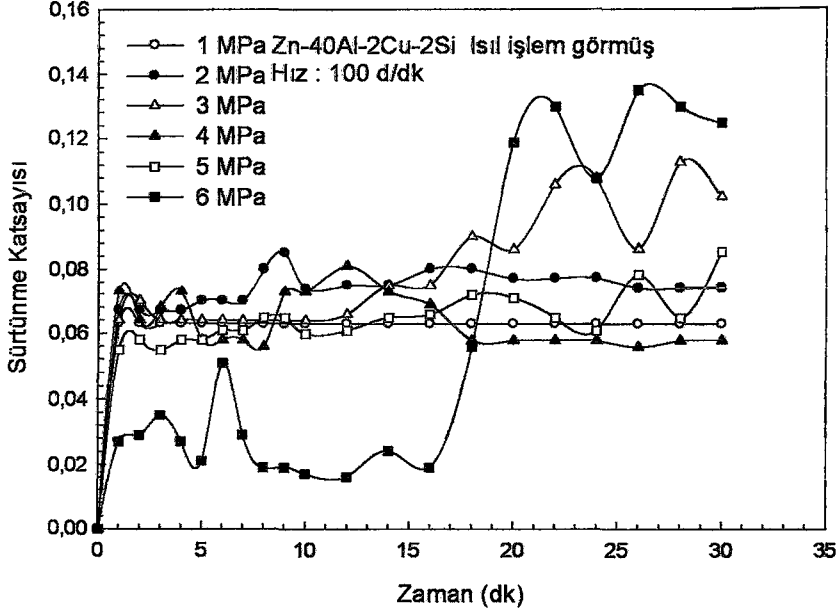
Şekil 14. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumundaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



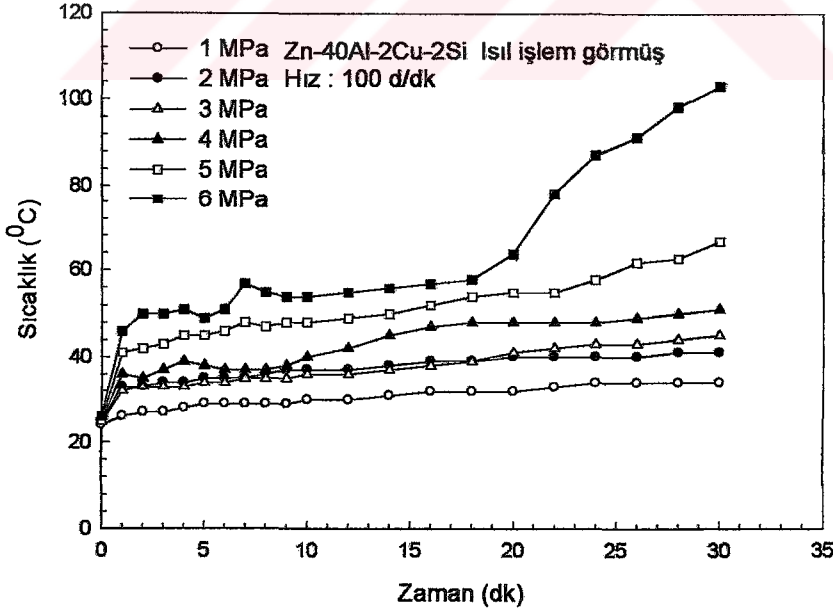
Şekil 15. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



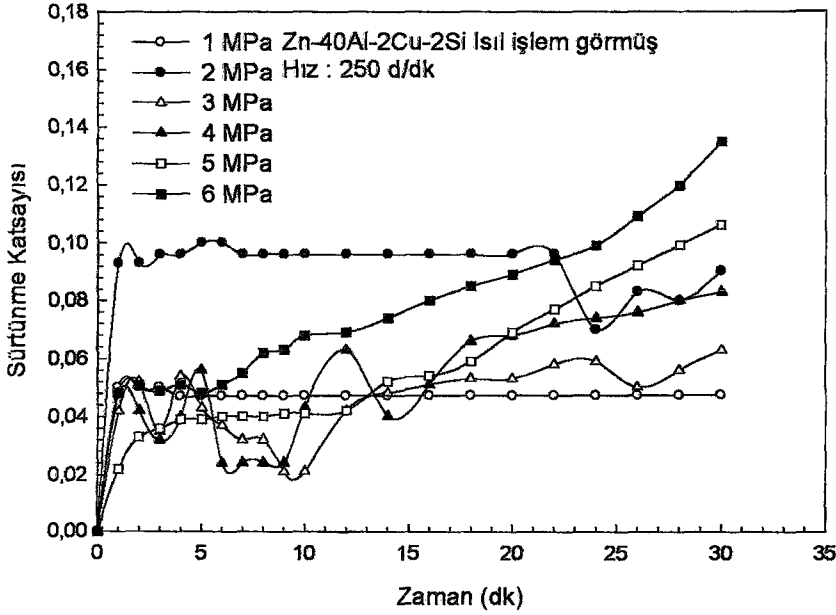
Şekil 16. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



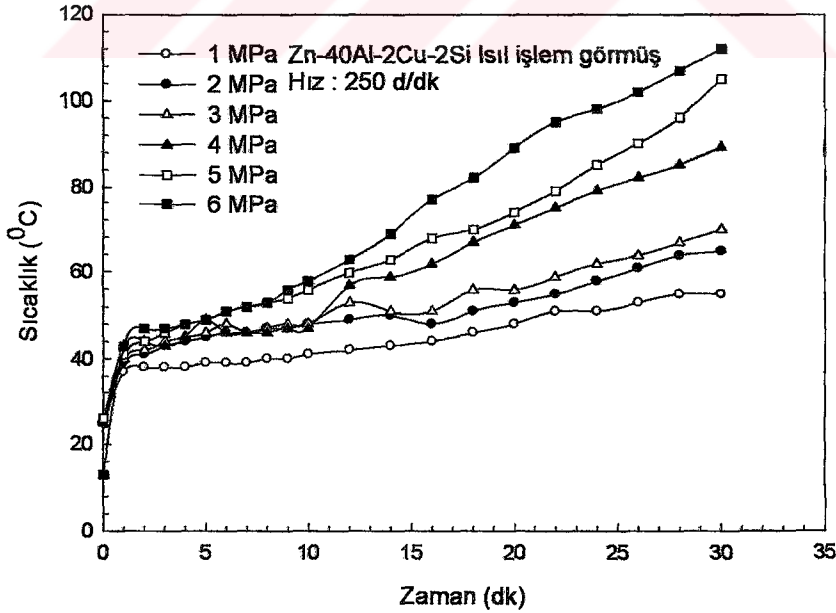
Şekil 17. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumda örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



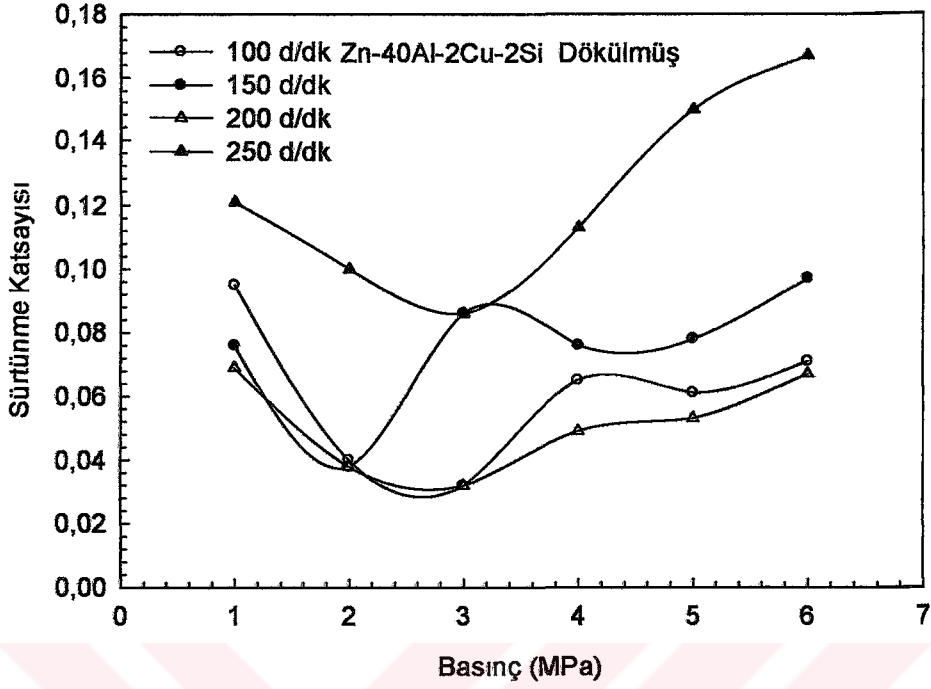
Şekil 18. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumda örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 100 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



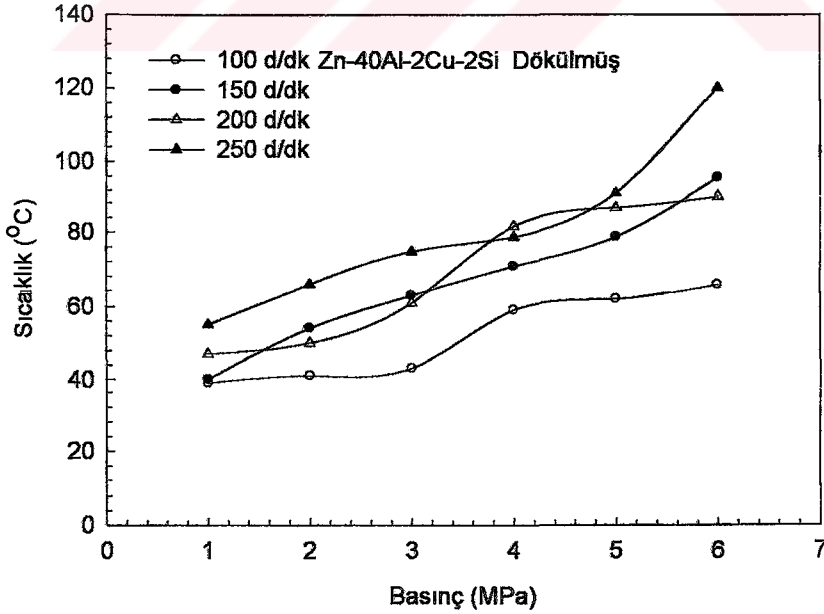
Şekil 19. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımasının ısı işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen sürtünme katsayısının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



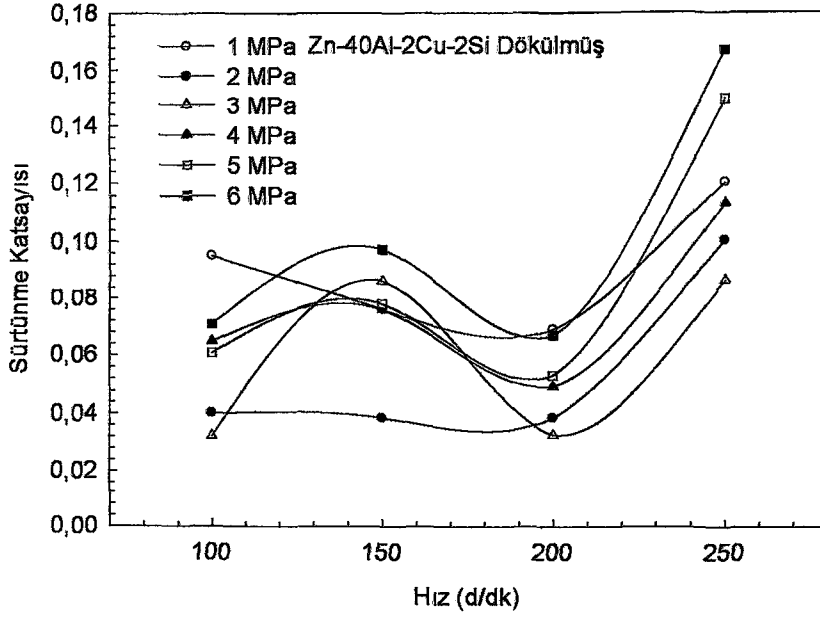
Şekil 20. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımasının ısı işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 250 d/dk'lık sabit dönme hızında ve farklı basınçlar altında elde edilen çalışma sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



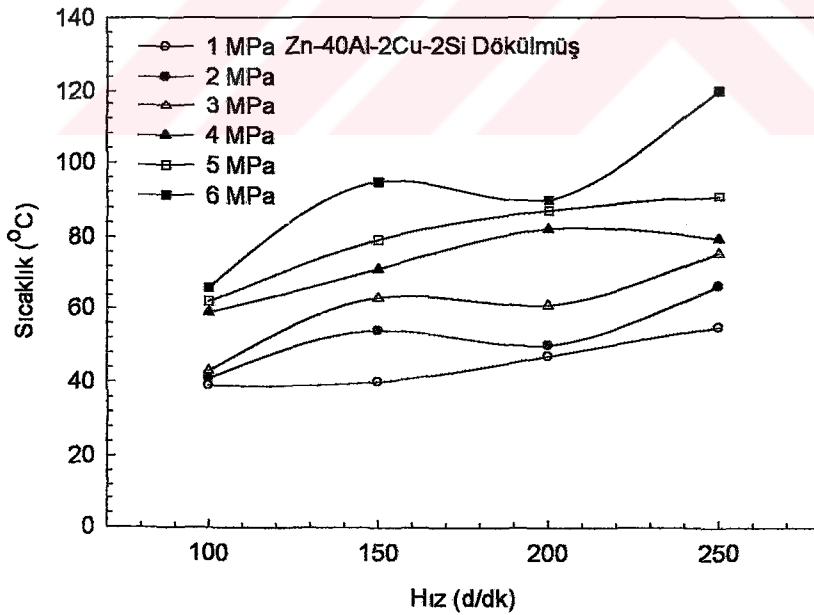
Şekil 21. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



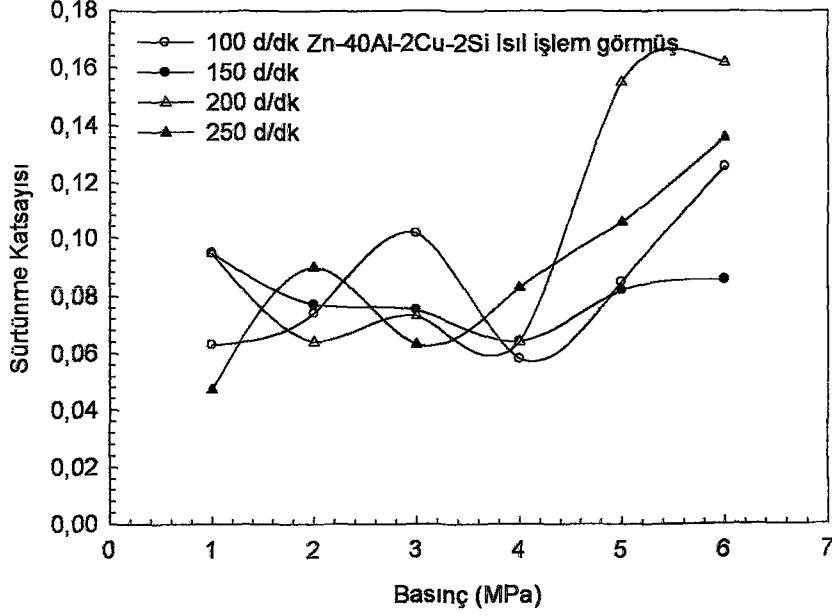
Şekil 22. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



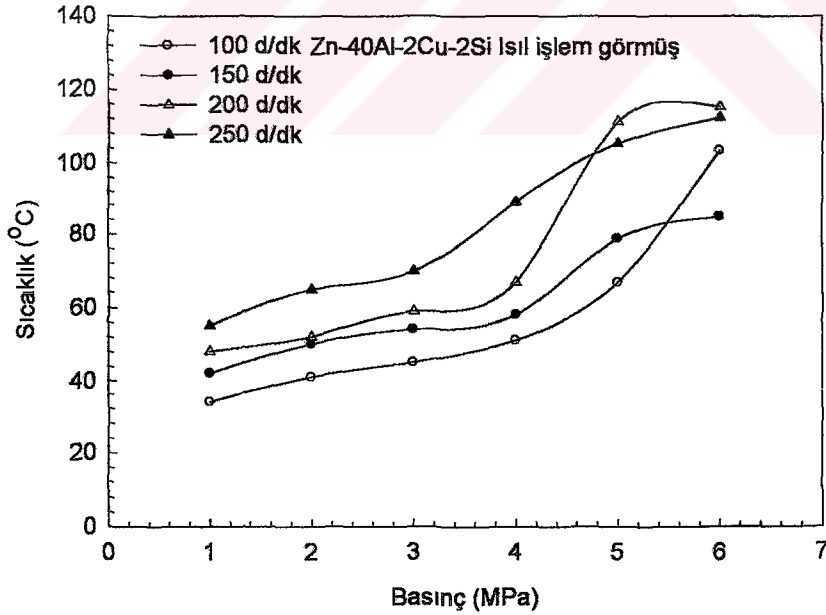
Şekil 23. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının hıza göre değişimini gösteren eğriler.



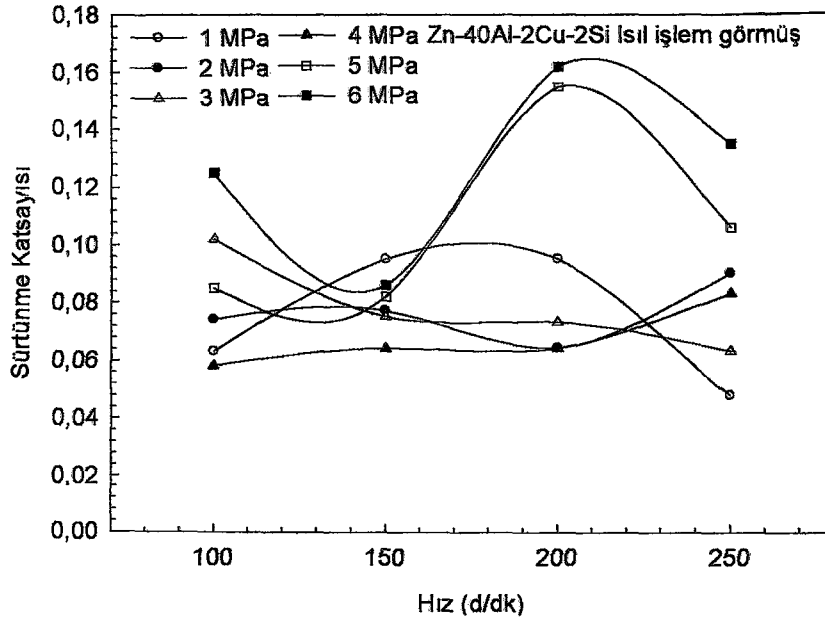
Şekil 24. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının hıza göre değişimini gösteren eğriler.



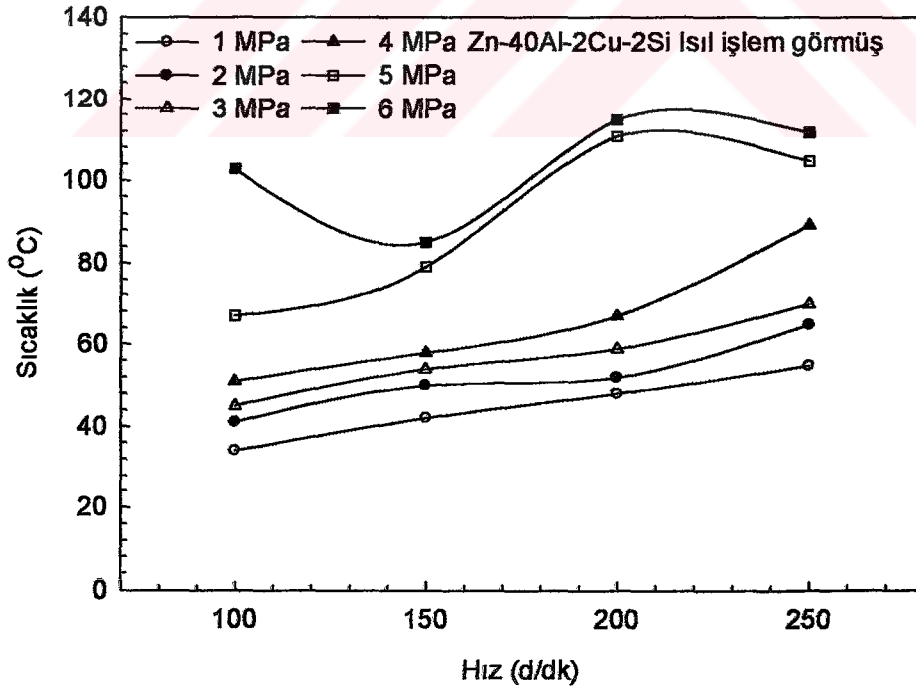
Şekil 25. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısı işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 26. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısı işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler



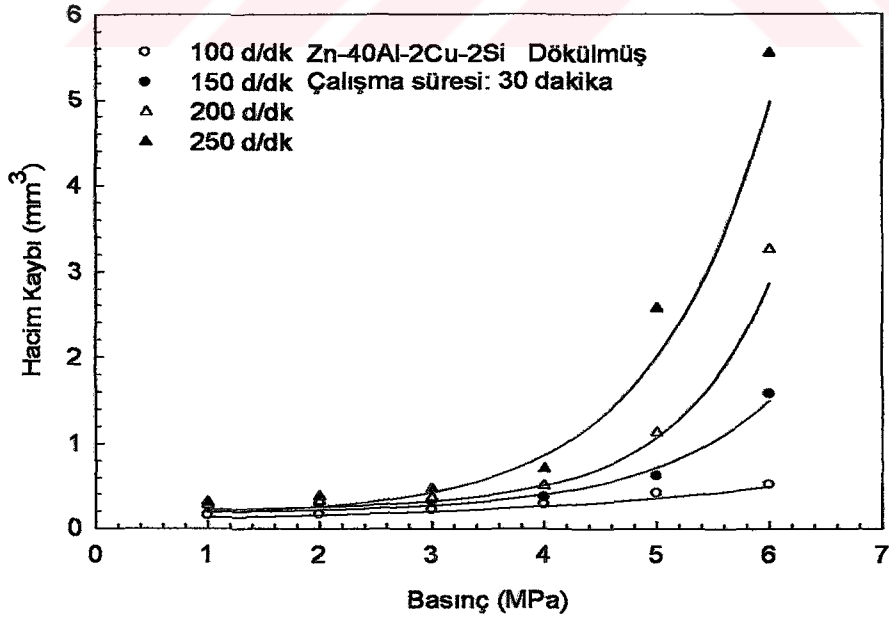
Şekil 27. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıl işlem görmüş durumundaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen sürtünme katsayılarının hıza göre değişimini gösteren eğriler



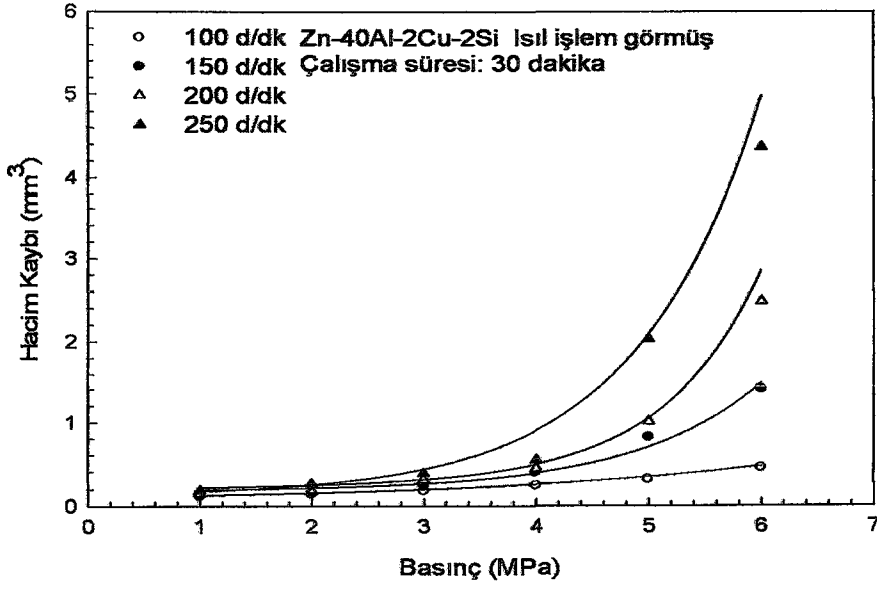
Şekil 28. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıl işlem görmüş durumundaki örneklerinden yetersiz yağlama şartlarında, 30 dakikalık süre sonunda elde edilen çalışma sıcaklıklarının hıza göre değişimini gösteren eğriler

Tablo 6. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlarındaki örneklerinde yetersiz yağlama durumunda meydana gelen aşınma kaybı değerleri.

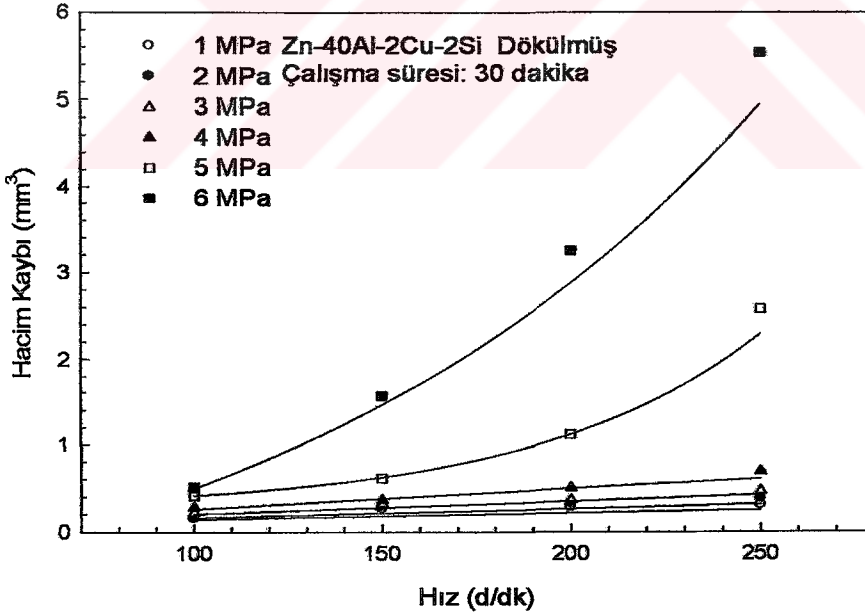
Alaşım	Basınç (MPa)	Çalışma Hızı (d/dk)			
		100	150	200	250
Dökülmüş Durum (mm ³)	1	0,153	0,263	0,281	0,303
	2	0,165	0,287	0,321	0,375
	3	0,220	0,320	0,365	0,463
	4	0,280	0,364	0,502	0,699
	5	0,410	0,617	1,125	2,571
	6	0,512	1,569	3,252	5,540
Isıl İşlem Görmüş Durum (mm ³)	1	0,112	0,124	0,150	0,186
	2	0,142	0,158	0,181	0,265
	3	0,180	0,240	0,320	0,392
	4	0,244	0,403	0,460	0,556
	5	0,320	0,829	1,023	2,015
	6	0,462	1,412	2,465	4,343



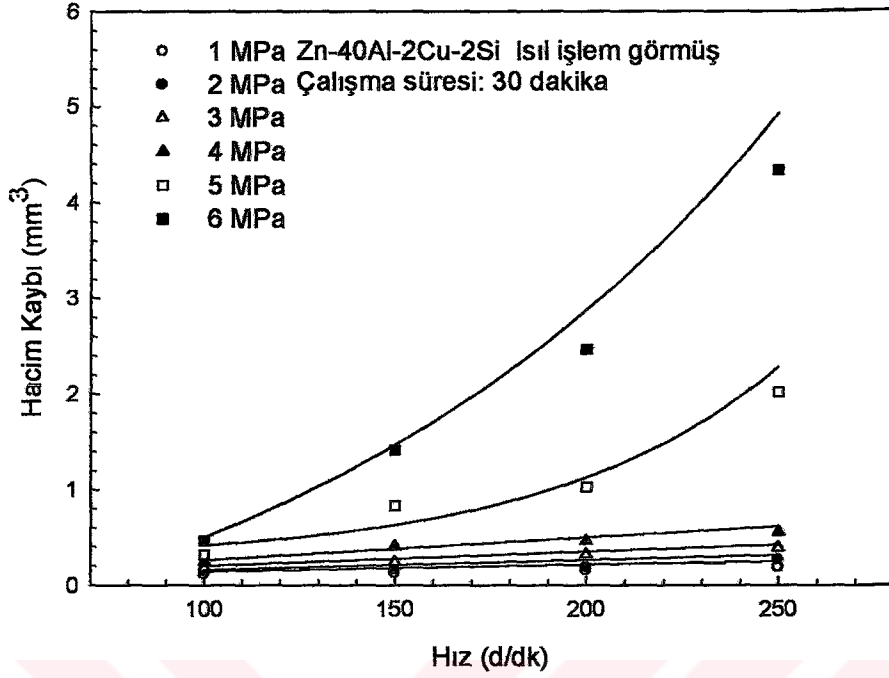
Şekil 29. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumundaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 30. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıl işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 31. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 32. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıl işlem görmüş durumdaki örneklerinden yetersiz yağlama durumlarında elde edilen hacim kaybının hıza göre değişimini gösteren eğriler.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ve SAE 660 bronzundan alınan örneklerden $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ yağ debisi ile sürekli yağlama durumunda elde edilen sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin deney süresine göre değişimlerini gösteren eğrilerden bazıları sırasıyla Şekil 32-37'de verilmiştir. Bu alaşımların sürekli rejim durumundaki sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri Tablo 7-8'de, bu değerlerin uygulanan basınç ve hıza göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 38-41'de verilmiştir. Bu eğrilerde görüldüğü gibi sürtünme katsayısı çalışmanın başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde artarak en yüksek değerlerine ulaşmakta ve daha sonra azalarak yaklaşık 30 dakikalık bir süre sonunda sabit değerlere erişmektedir. Sıcaklıklar ise yine başlangıç aşamasında hızlı bir artış sergiledikten sonra artış hızı gittikçe düşerek ortalama 30 dakikalık bir süre sonra sabit değerlere ulaşmaktadır.

Diğer taraftan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ve bronzun sürtünme katsayısı değerleri artan basınç ve hız ile azalmakta, sıcaklık değerleri ise söz konusu parametreler ile genelde artmaktadır.

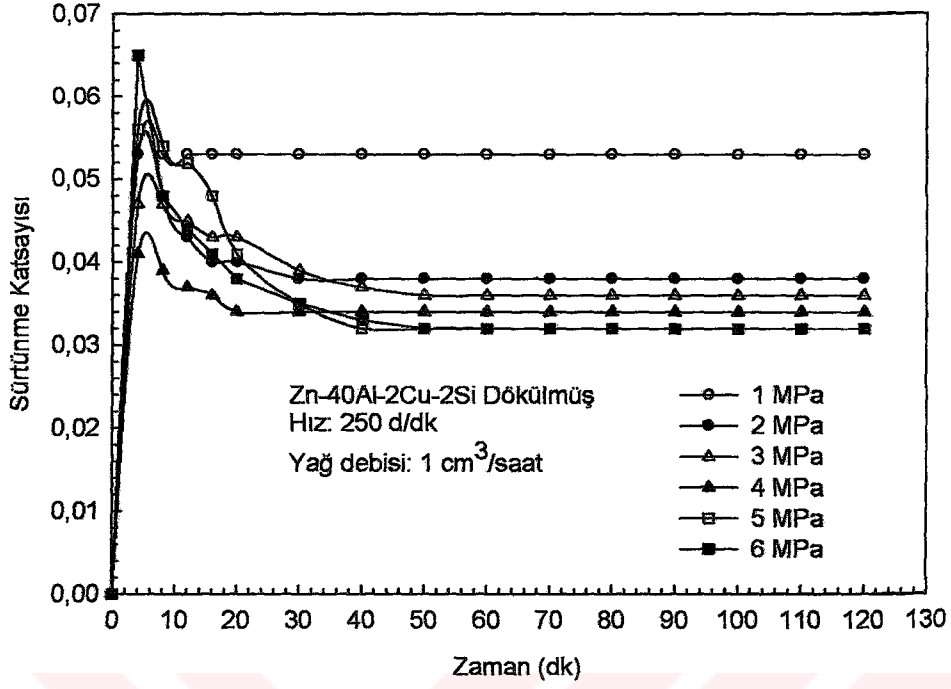
Tablo 7. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun 1 cm³/saat yağ debisi, 250 d/dk dönme hızı ve farklı basınçlardaki sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklıklarının sürekli rejim durumundaki değerleri.

Alaşım	Basınç (MPa)	Sürtünme Katsayısı	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Zn-40Al-2Cu-2Si (Dökülmüş)	1	0,053	31
	2	0,038	32
	3	0,036	38
	4	0,034	48
	5	0,032	50
	6	0,032	62
Zn-40Al-2Cu-2Si (Isıl İşlem Görmüş)	1	0,063	31
	2	0,048	40
	3	0,052	50
	4	0,042	52
	5	0,035	55
	6	0,039	66
SAE 660 Bronzu	1	0,050	42
	2	0,040	47
	3	0,034	52
	4	0,034	53
	5	0,027	62
	6	0,022	70

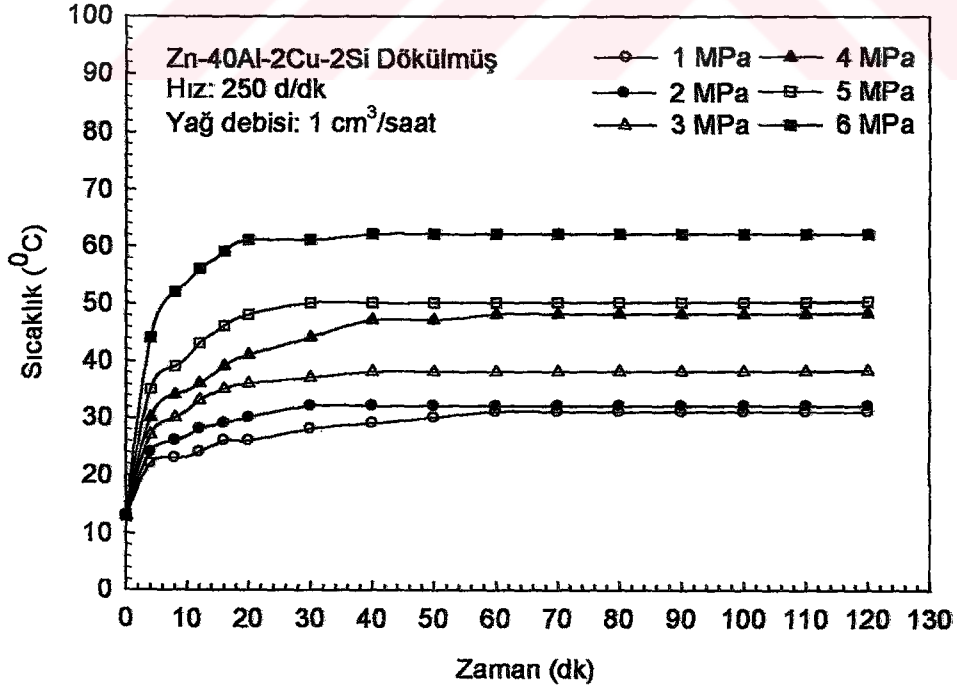
Tablo 8. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun 1 cm³/saat yağ debisi, 6 MPa basınç ve farklı dönme hızlarındaki sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklıklarının sürekli rejim durumundaki değerleri.

Alaşım	Dönme Hızı (d/dk)	Sürtünme Katsayısı	Çalışma Sıcaklığı (°C)
Zn-40Al-2Cu-2Si (Dökülmüş)	100	0,054	48
	150	0,043	54
	200	0,041	59
	250	0,032	62
Zn-40Al-2Cu-2Si (Isıl İşlem Görmüş)	100	0,061	52
	150	0,046	57
	200	0,047	63
	250	0,039	66
SAE 660 Bronzu	100	0,033	55
	150	0,034	58
	200	0,036	65
	250	0,022	70

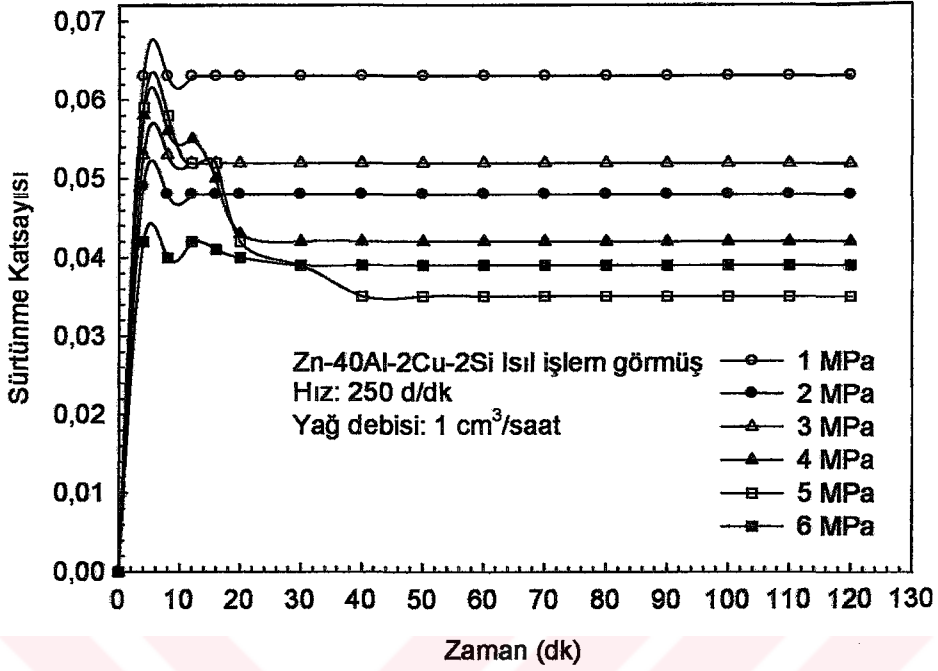
1 cm³/saat yağ debisi ile sürekli yağlama durumunda, Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzuna ait örneklerden elde edilen hacim kaybı değerleri Tablo 9 ve 10'da, bu değerlerin basınç ve hıza göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 42-43'de verilmiştir. Bu eğriler, Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından gerek dökülmüş gerekse ısıl işlem görmüş durumlarda elde edilen hacim kaybı değerlerinin basınç ve hız ile lineer olarak arttığını göstermektedir. Bronzun hacim kaybı ise 3 MPa'lık basınca kadar artan basınç ile lineer olarak artarken, söz konusu değerden sonra ise aniden yükselmektedir. Bronz örneğinde meydana gelen hacim kaybı hız ile logaritmik olarak artmaktadır. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile bronz hacim kaybı bakımından karşılaştırıldığında Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıl işlem görmüş durumda diğerlerinden daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmektedir. Ancak bronz, 4 MPa'nın altındaki basınçlarda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile hemen hemen aynı aşınma davranışı sergilerken, bu değerin üzerindeki basınçlarda ani hacim kaybına maruz kalmaktadır.



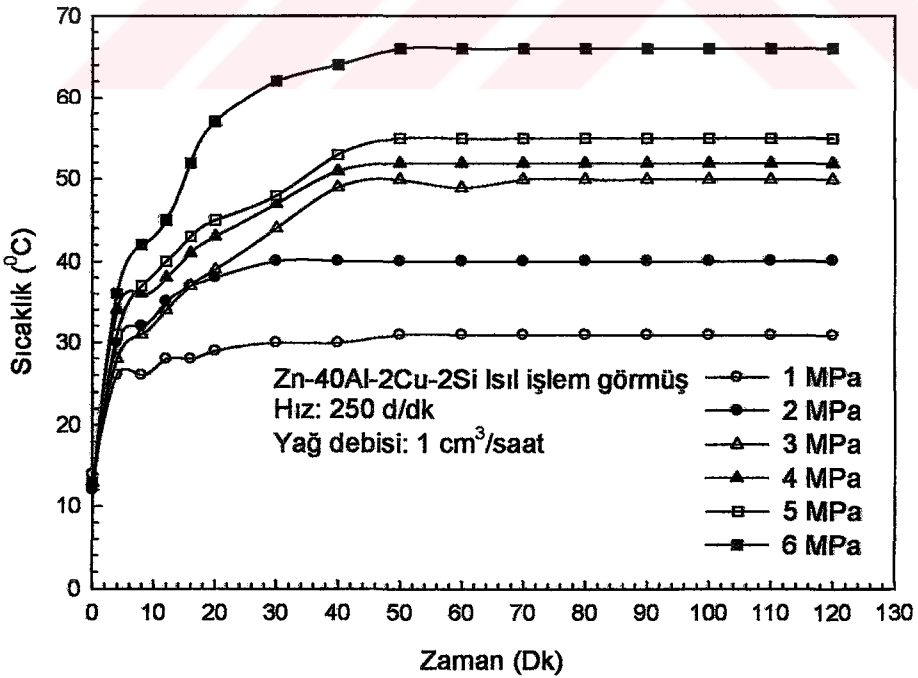
Şekil 33. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumundaki örneklerinin sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



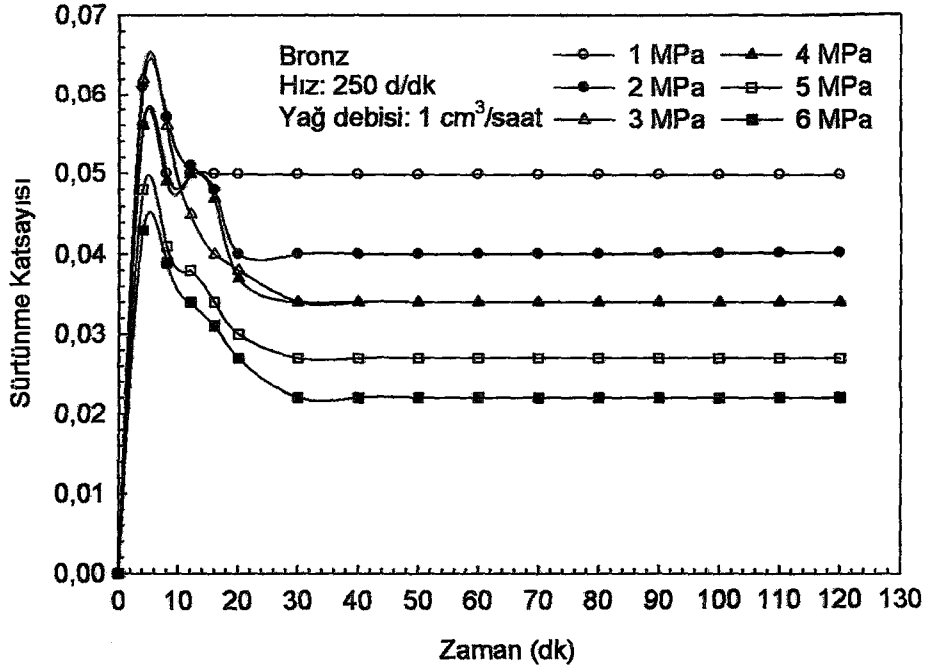
Şekil 34. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumundaki örneklerinin çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



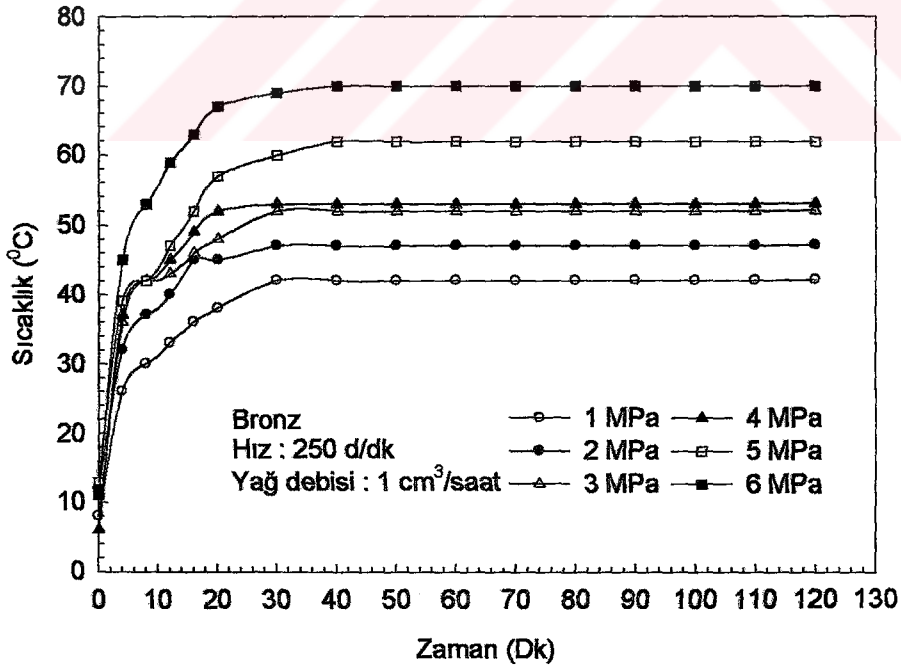
Şekil 35. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumdaki örneklerinin sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



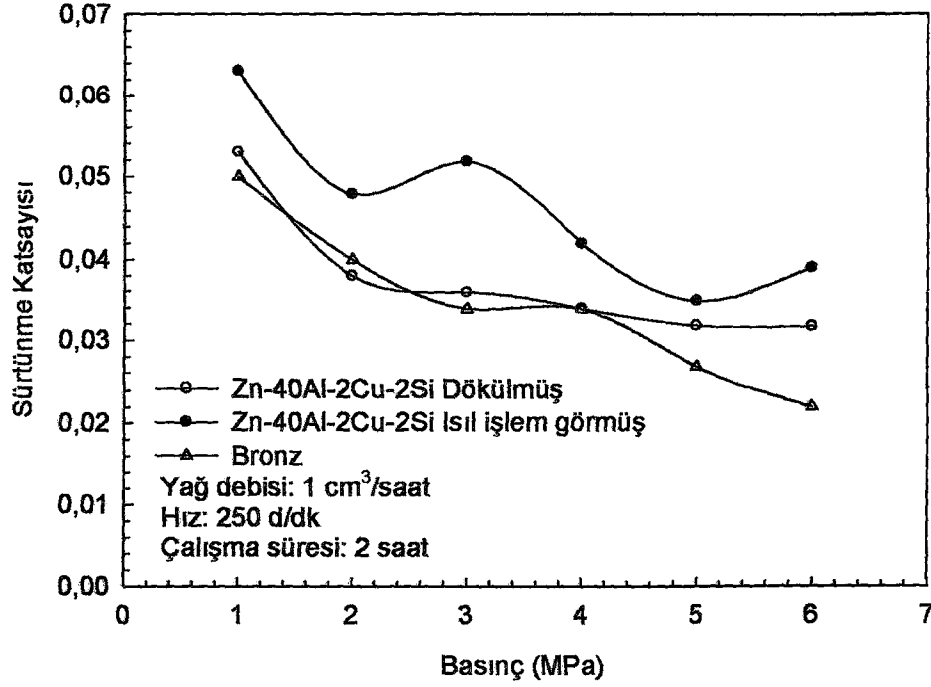
Şekil 36. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının işlem görmüş durumdaki örneklerinin çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



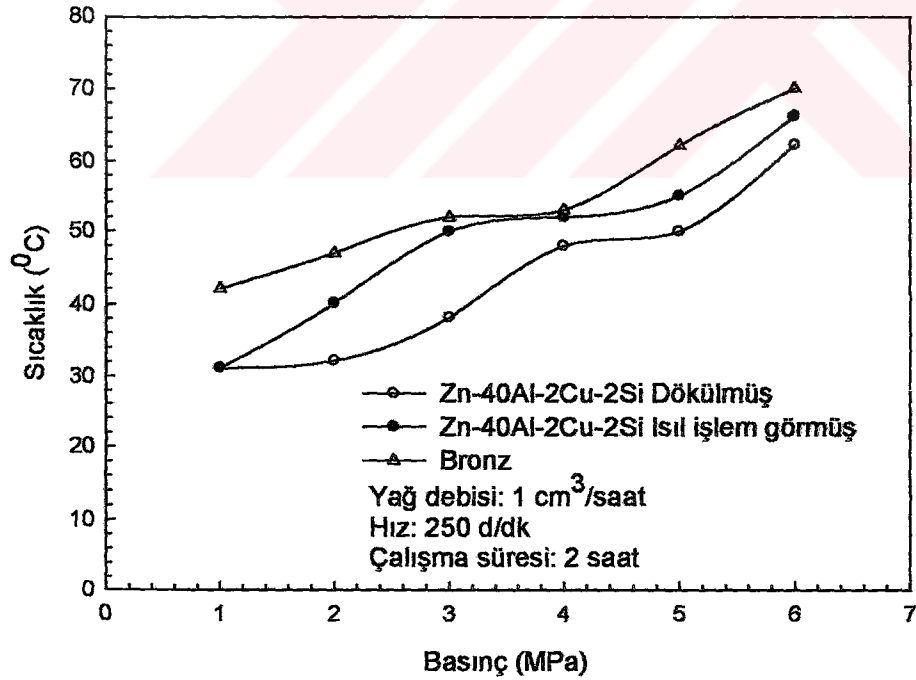
Şekil 37. SAE 660 bronzuna ait örneklerin sürtünme katsayılarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



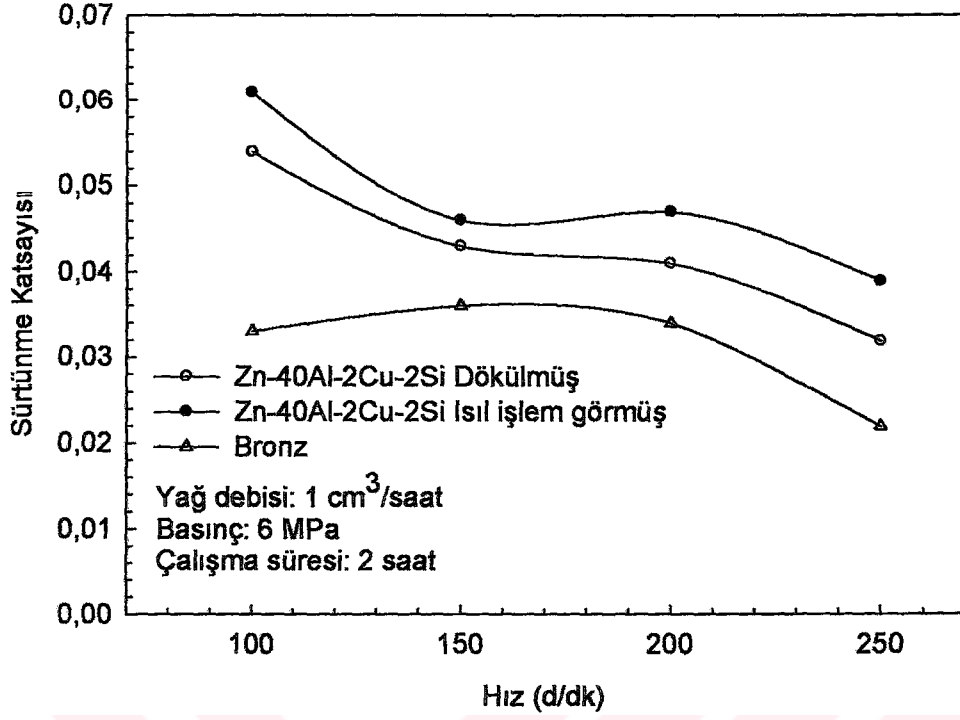
Şekil 38. SAE 660 bronzuna ait örneklerin çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren eğriler.



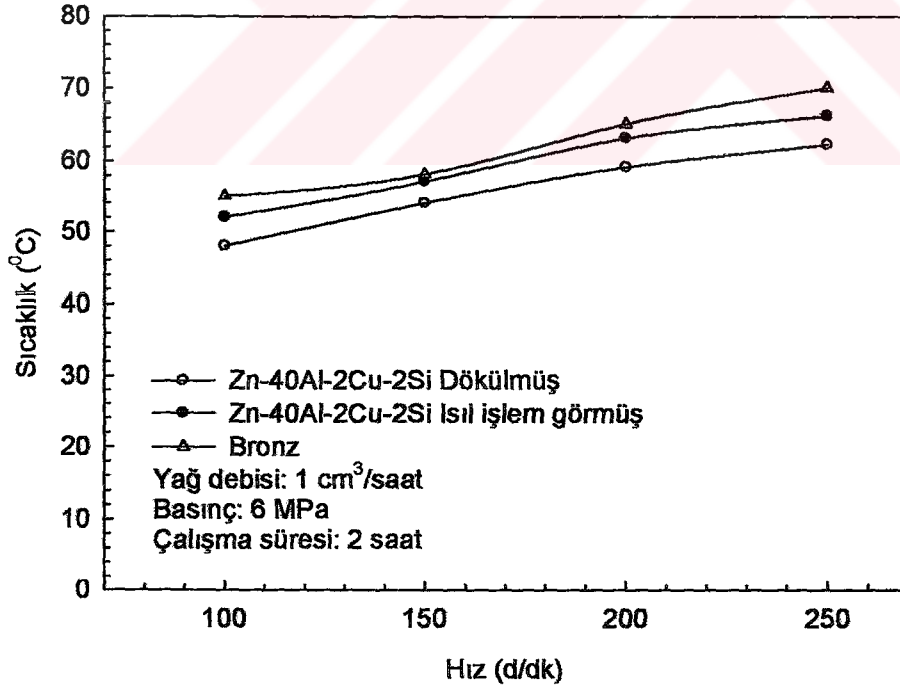
Şekil 39. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun ortalama sürtünme katsayısının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 40. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun ortalama çalışma sıcaklığının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 41. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun ortalama sürtünme katsayısının hıza göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 42. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun ortalama çalışma sıcaklığının hıza göre değişimini gösteren eğriler.

Bu durum Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının gerek dökülmüş gerekse ısıı işlem görmüş durumlarda özellikle 4 MPa'nın üzerindeki basınçlarda çok daha üstün aşınma direnci sergilediğini göstermektedir.

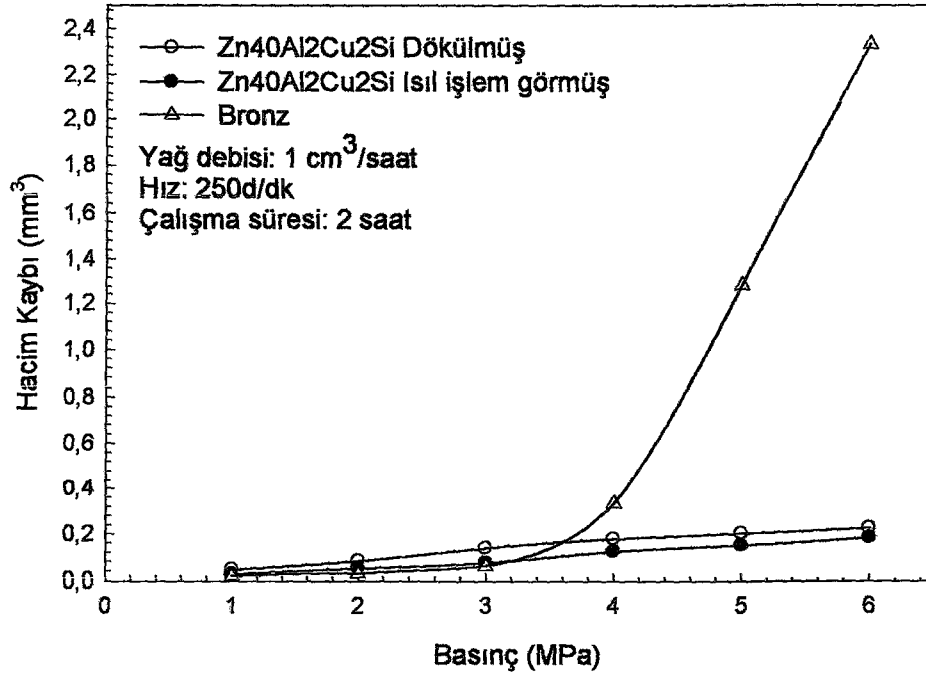
Diğer taraftan 6 MPa basınç altında, bronzda, Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıı işlem görmüş örneklerine göre çok daha yüksek hacim kaybı meydana gelmektedir. Ayrıca bu iki alaşım arasındaki hacim kaybı farkının artan hız ile arttığı görülmektedir.

Tablo 9. 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 250 d/dk'lık dönme hızında yapılan deneylerde Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunda farklı basınçlarda meydana gelen hacim kaybı değerleri

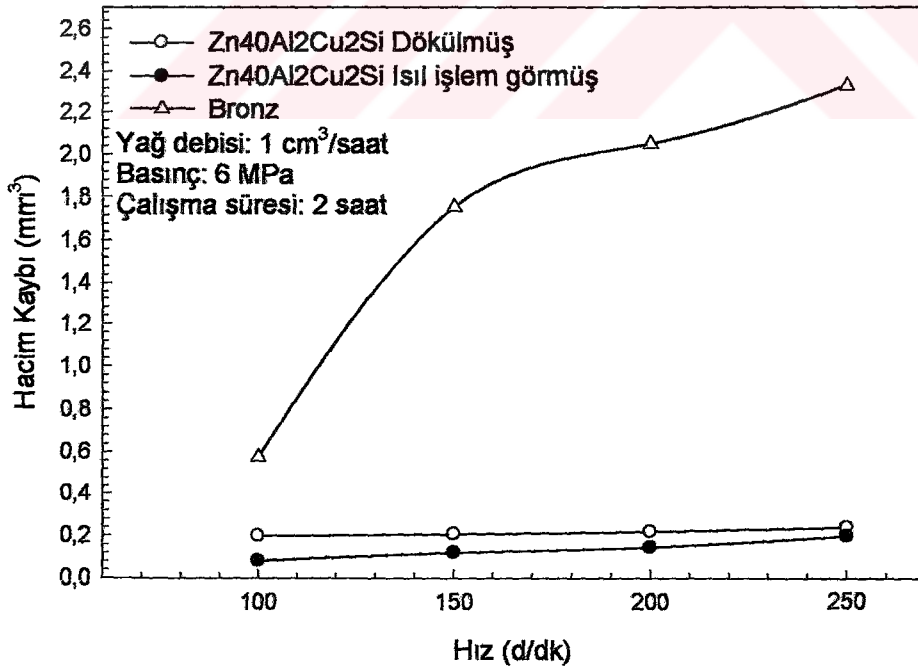
Alaşım	Basınç (MPa)					
	1	2	3	4	5	6
Zn-40Al-2Cu-2Si (Dökülmüş)	0,051	0,058	0,145	0,186	0,212	0,240
Zn-40Al-2Cu-2Si (Isıl İşlem Görmüş)	0,031	0,056	0,081	0,131	0,160	0,199
SAE 660 Bronzu	0,024	0,035	0,069	0,342	1,288	2,332

Tablo 10. 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 6 MPa'lık basınç altında yapılan deneylerde Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunda farklı dönme hızlarında meydana gelen hacim kaybı değerleri

Alaşım	Hız (d/dk)			
	100	150	200	250
Zn-40Al-2Cu-2Si (Dökülmüş)	0,198	0,207	0,219	0,240
Zn-40Al-2Cu-2Si (Isıl İşlem Görmüş)	0,081	0,119	0,145	0,199
SAE 660 Bronzu	0,574	1,758	2,057	2,332



Şekil 43. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimini gösteren eğriler.

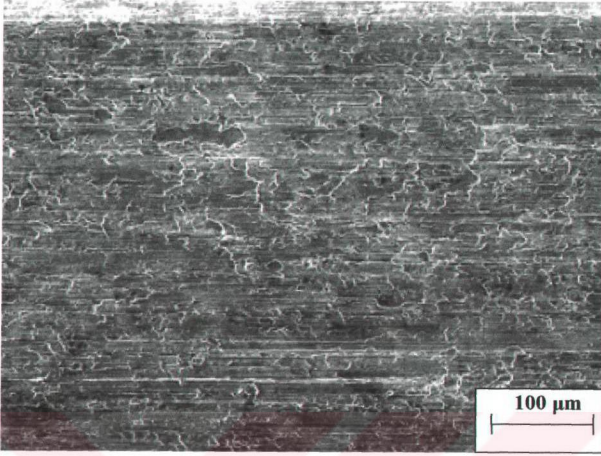


Şekil 44. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun hacim kaybı değerlerinin hıza göre değişimini gösteren eğriler.

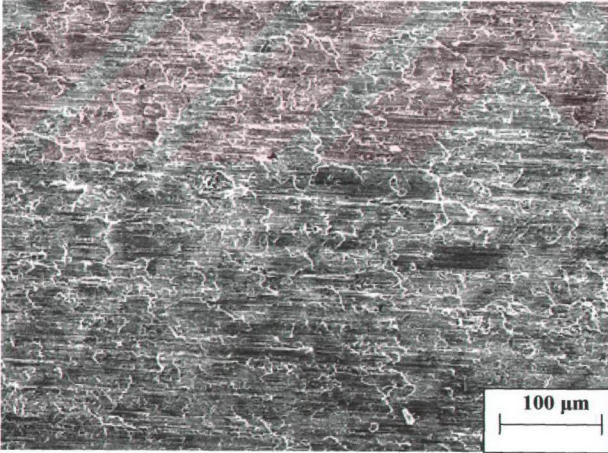
3.4. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının yetersiz yağlama durumunda denenen örneklerinin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 44-49'da verilmiştir. Bu görüntülere bakıldığında düşük devir ve basınçlarda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinde sıvanma tabakası ve ince aşınma çiziklerinin meydana geldiği görülmektedir. Ancak devir sayının ve basıncın artması durumunda bu alaşımın aşınma yüzeyinde derin çukurlar ve çiziklerin olduğu gözlenmektedir. Bu alaşımın ısıtılmış işlem görmüş durumdaki aşınma örneğinin yüzeyinde düşük devir ve düşük basınçlarda ince çizgiler ve sıvanma etkilerine rastlandı. Devir sayısı ve basınç arttıkça bu alaşımın aşınma yüzeyinde oluşan sıvanma tabakalarının belirginleştiği ve çukurların derinleştiği gözlemlendi.

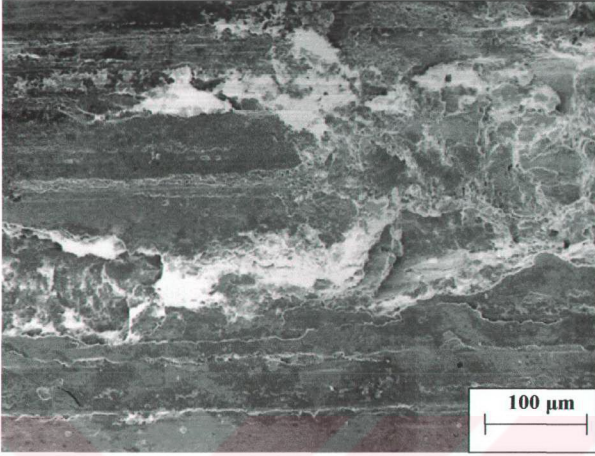
Sürekli yağlama durumunda deneye tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzuna ait örneklerin aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM fotoğrafları Şekil 50-55'de verilmiştir. Bu resimler, Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait örneklerin dökülmüş durumda aşınma yüzeylerinde ince çizgiler ve hafif sıvanma tabakalarının oluştuğunu göstermektedir. Basıncın artması ile sıvanma tabakaları daha belirgin bir hal almaktadır. Ayrıca ısıtılmış işlem görmüş durumdaki alaşımın aşınma yüzeyindeki sıvanma ve çizilme etkisinin daha belirgin bir hal aldığı gözlenmektedir. SAE 660 bronzuna ait aşınma örneklerinin yüzeylerinde ise sıvanma ve dağlanma izlerine rastlandı.



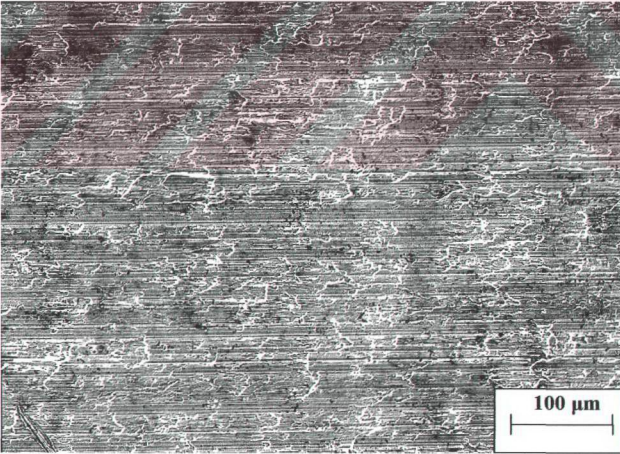
Şekil 45. 2 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



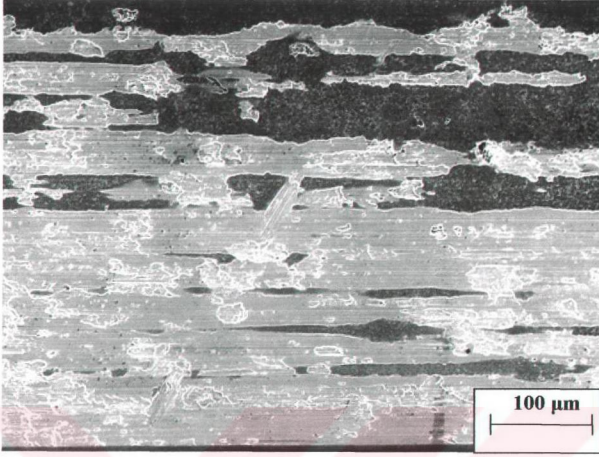
Şekil 46. 6 MPa'lık basınç, 100 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



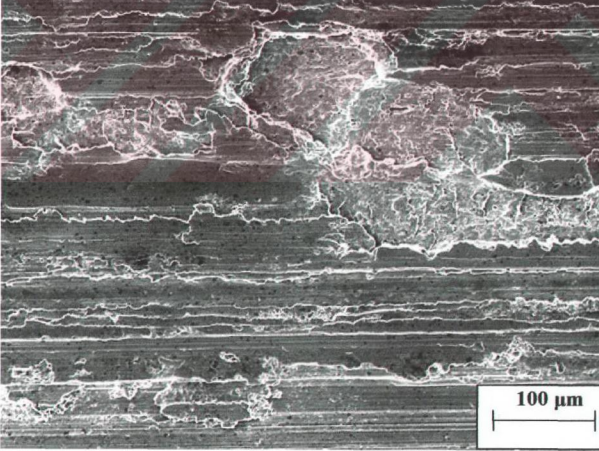
Şekil 47. 6 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



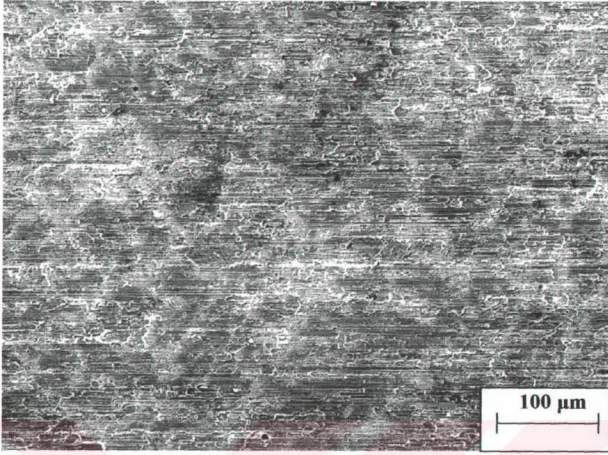
Şekil 48. 2 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



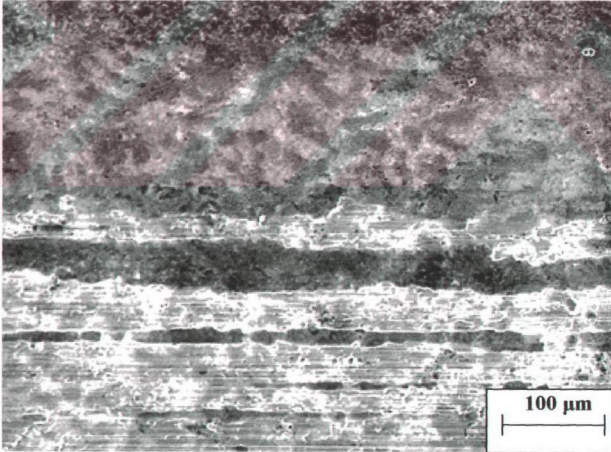
Şekil 49. 6 MPa'lık basınç, 100 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış ve ısıtılmamış durumundaki örneklerinin aşınma yüzeyinin görünümü



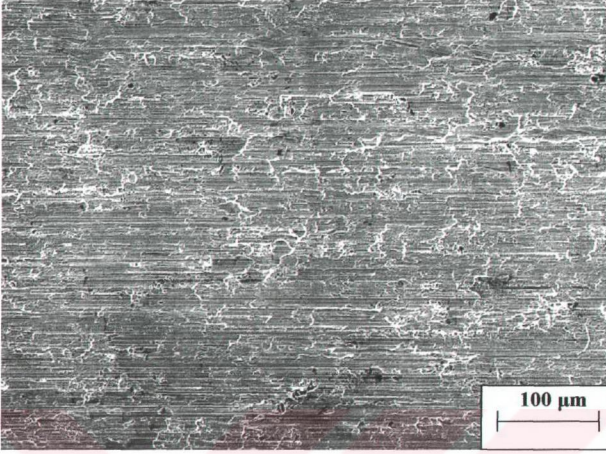
Şekil 50. 6 MPa'lık basınç, 250 d/dk'lık dönme hızı ve yetersiz yağlama durumunda çalışan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılmış ve ısıtılmamış durumundaki örneklerinin aşınma yüzeyinin görünümü



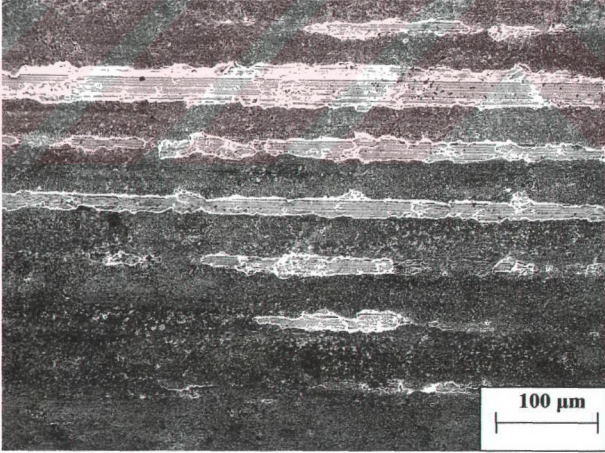
Şekil 51. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 2 MPa basınç altında $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



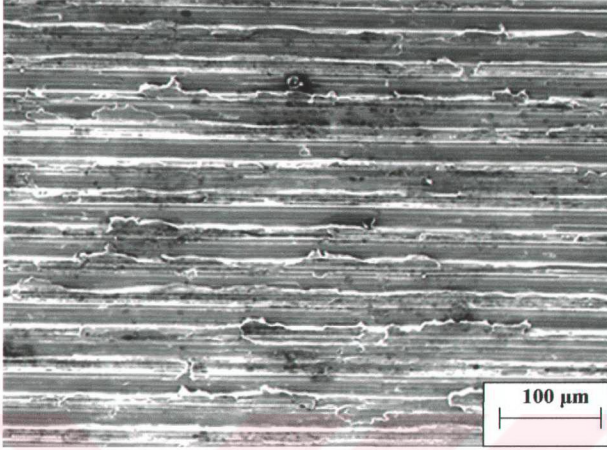
Şekil 52. Dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 6 MPa basınç altında $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



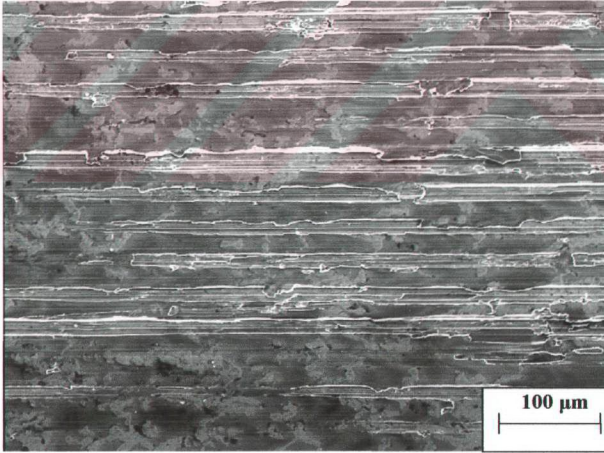
Şekil 53. Isıl işlem görmüş Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 2 MPa basınç altında 1 cm³/saat yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



Şekil 54. Isıl işlem görmüş Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 6 MPa basınç altında 1 cm³/saat yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan örneğinin aşınma yüzeyinin görünümü



Şekil 55. 2 MPa basınç altında $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ 'lik yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait örneğin aşınma yüzeyinin görünümü



Şekil 56. 6 MPa basınç altında $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ 'lik yağ debisi ve 250 d/dk dönme hızında deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait örneğin aşınma yüzeyinin görünümü

4. İRDELEME

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısının alüminyumca zengin α fazı ile bu fazı çevreleyen çinkoca zengin η fazı, bakırca zengin ϵ fazı ve silisyum parçacıklarından oluştuğu görülmüştür. Bu alaşıma uygulanan ısı işlemi sonucunda ise α tanelerinin içerisinde ve sınırlarında bazı fazların çökeldiği, ancak silisyum parçacıklarında herhangi bir değişimin meydana gelmediği görüldü, Şekil 10. Önceki araştırmacılar tarafından da gözlenen bu durum aşırı doymuş α katı çözeltisi içerisinde çinko ve bakırca zengin fazların (η ve T') çökmesinden kaynaklanmaktadır [1,26,31,37,45].

Çözündürme ve su verme işlemi sonrası uygulanan yaşlandırma işleminin söz konusu alaşımın sertlik ve çekme dayanımını artırdığı görüldü. Bu durum yaşlandırma sırasında meydana gelen çökeltme sertleşmesi mekanizmasından kaynaklanmaktadır [62,68]. Şöyle ki, yaşlandırma sırasında aşırı doymuş katı çözelti içerisinde oluşan çökeltiler kafes yapısını çarpıtarak dislokasyon hareketini zorlaştırmakta ve böylece alaşımın sertliğinin artmasına neden olmaktadır [63,68]. Sertlik belirli bir yaşlandırma işlemi sonunda bir maksimum değere ulaşmakta ve daha sonra zamanla azalmaktadır. Sertlikteki azalma çökeltilerin büyümesinden kaynaklanmaktadır [25,26].

Söz konusu alaşımın sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri yetersiz yağlama durumunda yapılan deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde artmakta, belirli süreler sonunda ise yavaşlayarak bazı durumlarda sabit değerlere ulaşmaktadır, Şekil 13-20. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından dökülmüş durumda elde edilen sürtünme katsayısı artan basınç ile azalmakta, ancak 3 MPa basınç'tan sonra artmaktadır. Bu basınç değerinden sonra sürtünme katsayısında zamanla artma ve azalma meydana gelmektedir. Bu durum alaşımın aşınma yüzeyinde oluşan yağ filminin söz konusu basınca kadar metal-metal temasını engellemesinden kaynaklanmış olabilir. Bu basınç değerinden sonra ise yüzeyler arasındaki metal-metal teması arttığından alaşımın sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir [69].

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait aşınma örneklerinin sıcaklığının ise artan basınç ile hemen hemen doğru orantılı olarak arttığı gözlemlendi. Bu durum sürtünme ısısının artan sürtünme katsayısı ile artmasından kaynaklanmaktadır [57,62,70]. Ancak belirli hız

ve basınç değerinden sonra bu alaşımın gerek dökülmüş gerekse ısıtılma işlem görmüş örneklerinin sürtünme katsayıları ve sıcaklıkları belirgin şekilde arttığı görülmüştür, Şekil 13-20. Bu durum belirli çalışma süreleri sonunda yüzeydeki yağ filminin ortadan kalkarak kuru sürtünme durumuna geçilmesinden kaynaklanmış olabilir. [71]. Sözü edilen husus, dökülmüş durumdaki örnekte 3 MPa basınç ve 200 d/dk dönme hızında, ısıtılma işlem görmüş örnekte ise 4 MPa basınç ve 200 d/dk dönme hızından sonra belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır, Şekil 21-28.

Yetersiz yağlama durumunda, alaşımın dökülmüş durumdaki örneklerinde ısıtılma işlem görmüş durumdaki örneklerine göre daha fazla aşınma kayıplarının meydana geldiği gözlemlendi. Başka bir deyişle söz konusu alaşımın aşınma direncinin ısıtılma işlem sonrası arttığı belirlendi. Önceki çalışmalarda da gözlenen bu durum aşınma ile meydana gelen hacim kaybının malzemelerin sertlik ve mukavemeti ile ters orantılı olarak değişmesinden kaynaklandığı görüşünü doğrulamaktadır [70].

Ayrıca alaşımın dökülmüş ve ısıtılma işlem görmüş örneklerinde aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının basınç ile exponansiyel, hız ile 4 MPa basınca kadar lineer, bu basınçtan sonra ise exponansiyel olarak arttığı gözlemlendi (Şekil 29-32). Bu durum düşük hız ve basınçlarda kısmen etkili olan yağ filminin basınç ve hızın artmasıyla ortadan kalkarak kuru sürtünme durumuna geçilmesinden kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki, alaşıma ait örneklerin sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklıkları artan deney süresi ile artarak yüzeydeki yağ filminin bozulmasına veya ortadan kalkmasına yol açmaktadır. Yağ filminin ortadan kalkması kuru sürtünmeye yani metal-metal temasına neden olmakta, bunun sonucunda da aşınma kaybı artmaktadır [69].

1 cm³/saat'lik yağ debisinde gerçekleştirilen sürekli yağlama durumunda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayıları çalışmanın başlangıcında aniden artarak maksimum değerlere eriştiği, daha sonra ise azalarak sabit değerlere vardığı gözlemlendi. Bu alaşımların sıcaklıkları ise deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir artış sergiledikten sonra artış hızı gittikçe azalarak denge sıcaklığına ulaştığı görüldü. Deneyin başlangıç aşamasında sürtünme katsayısında meydana gelen bu ani artış, yüzeylerde yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşmaması nedeniyle ortaya çıkan metal-metal temasından kaynaklanmaktadır [37,57,70]. Alıştırma devresi olarak adlandırılan bu aşamada hem yüzeylerin birbirine alışması (yüzey pürüzlerinin sürtünme etkisiyle koparak yatak numunesine sıvanması veya yüzeyden uzaklaşması) hem de yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşması nedeniyle sürtünme katsayısı azalmaktadır [57,69].

Sıcaklıklardaki artış ise, deneylerin başlangıç aşamasında metal-metal teması nedeniyle yüzeylerde ortaya çıkan sürtünme ısısından kaynaklanmaktadır [70]. Eş çalışan elemanlar zamanla birbirilerine alıştıkça ve yüzeyler arasındaki yağ filminin kalınlığı artıkça sıcaklıktaki artış hızı azalmaktadır.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayıları artan basınç ve hız ile genelde düştüğü gözlemlendi. Bu durum basınç ve hızın artması ile yüzeyler arasındaki yağ filminin incelmeye ve buna bağlı olarak da yağın iç sürtünmesinin azalmasından kaynaklanmış olabilir [72,73]. Çalışma sıcaklıklarının ise artan basınç ve hız ile genelde arttığı görüldü. Çalışma sıcaklıklarında artan basınç ile meydana gelen artış metal-metal temasının ve sürtünme kuvvetinin artmasından, artan hız ile meydana gelen artış ise yağ molekülleri arasındaki iç sürtünmenin artmasından ileri gelmiş olabilir [40].

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısının SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısından daha yüksek olduğu görüldü. Ancak, bu alaşım ısıtılma işlemi görmüş durumda dökülmüş duruma göre daha yüksek sürtünme katsayısı sergilediği gözlemlendi. Bu durum, malzemelerin iç yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, alaşımların sertlik ve mukavemetinin yüksek olması bunların yüzeyinde bulunan pürüzlerin aşınmasını ve sıvanmasını zorlaştırmaktadır [62]. Önceki araştırmalarda da belirtildiği gibi çinko-alüminyum esaslı alaşımların aşınma yüzeylerinde basınç etkisi ile meydana gelen plastik deformasyon ve sürtünme ısısı sonucunda sürtünme tabakaları oluşmaktadır [37,61,64]. Numune yüzeyinden aşınma sonucunda kopan parçacıklar önce disk yüzeyine yapışmakta ve çalışmanın daha sonraki aşamalarında disk yüzeyinden de tekrar aşınma yüzeyine sıvanmaktadırlar [57,64]. Sürtünme katsayısı Kaynak 70'de verilen formüle ($\mu = \tau / \sigma_a$) göre malzemelerin sertlik ve mukavemetinin artması durumunda artmaktadır. Burada μ sürtünme katsayısını, τ malzemenin kayma mukavemetini ve σ_a ' da malzemenin akma mukavemetini göstermektedir. Nitekim Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ısıtılma işlemi görmüş durumdaki sertlik ve mukavemeti, dökülmüş durumda elde edilen sertlik ve mukavemetinden ve SAE 660 bronzunun söz konusu değerlerinden daha yüksektir.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunda meydana gelen aşınma kayıplarının artan basınç ve hız ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlendi, Şekil 43-44. Söz konusu durum, artan basınç ile yağ filmi kalınlığının azalarak metal-metal temasının artmasından ve artan hız ile de alınan yolun artmasından meydana gelmektedir [72]. Ayrıca, 3 MPa'dan daha yüksek basınçlarda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının gerek dökülmüş ve gerek ısıtılma işlemi görmüş durumlarda SAE 660 bronzundan daha üstün aşınma davranışı

sergilediği görüldü. Bu durum bu alaşımda ortaya çıkan aşınma mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir. Bronzun aşınmasında hem abrazyonun hem de adhezyonun etkin olduğu bilinmektedir. [37,40,61]. Ancak, basınç arttıkça yağ filmi incelmekte ve belirli değerden (3 MPa) sonra da abrazyon mekanizması etkin hale gelmektedir. Bunun sonucunda aşınma kaybı basınç ile hızlı bir şekilde artmaktadır. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı hem dökülmüş hem de ısıtılmış durumda SAE 660 bronzundan daha üstün aşınma direnci sergilemiştir. Bu durum bu alaşımın iç yapı ve mekanik özelliklerinden başka yüzeylerinde oluşan yağ filmi ile oksit tabakalarına da bağlı olarak açıklanabilir [37]. Şöyle ki, Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının biri sert diğeri yumuşak iki faza sahiptir. Sert alüminyum oksit tabakası ile silisyum parçacıkları yük taşıma görevi yaparken, yumuşak çinko oksit tabakası ise kaymayı kolaylaştırmakta ve kopan parçacıkların kendi bünyesine gömülmesini sağlayarak hacim kaybını önlemektedir [36,60,67]. Ancak bu alaşımın aşınma direnci ısıtılmış sonrası daha da arttığı gözlenmiştir. Bu durum da uygulanan ısıtılmanın alaşımın iç yapısını değiştirerek sertlik ve mukavemetlerini artırmasından ileri gelmektedir [62].

Yetersiz yağlama durumunda düşük devir sayısı ve basınçlarda yapılan deneylerde Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait örneklerin yüzeylerinde ince aşınma çiziklerinin yüksek devir sayısı ve basınçlarda yapılan deneylerde ise sıvanma tabakalarının ve çukurların olduğu gözlemlendi, Şekil 45-50. Bu durumlar düşük devir sayısı ve basınçlarda yağ filminin metal-metal temasını engelleyerek etkin koruma yapmasından kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki sürtünme katsayıları, çalışma sıcaklıkları ile hacim kayıplarının 4 MPa'dan sonra artması bu görüşü desteklemektedir. Ayrıca devir sayısı ve basınç arttıkça yüzeydeki yağ filmi incelmekte ve bu durum metal-metal temasına yol açmaktadır. Metal-metal teması sonucunda da alaşımın içerdiği sert silisyum parçacıkları ile bakırca zengin fazlar, aşınma ile örnek yüzeyinden koparak yüzeylerde kesme etkisi yapmaktadır [36,37,61,62].

Sürekli yağlama durumundaki çalışma sırasında ise Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneğinin aşınma yüzeyinde belirgin sıvanma tabakalarının olduğu gözlemlendi. Isıtılmış örneklerin aşınma yüzeyinde ise sıvanma tabakalarının yanı sıra aşınma çiziklerinin olduğu görüldü. Bu çizikler, uygulanan ısıtılmış sonucunda oluşan sert ve ince çökeltilerinin aşınma ile yüzeyden ayrılırken yüzeyi çizmesinden meydana gelmiş olabilir [62]. Bu bulgular bu alaşımın dökülmüş durumdaki örneklerinde adhezif aşınmanın etkin olduğunu, ısıtılmış örneklerinde ise adhezif aşınmanın yanında abrasif aşınmanın da meydana geldiğini göstermektedir [62]. SAE 660 bronzunun aşınma

yüzeyinde gözlenen çizikler ve sıvanma tabakaları ise bu aşımın aşınmasında hem adhezyonun hem de abrazyonun etkin olduğunu göstermektedir [37].



5. SONUÇLAR

1. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının iç yapısı alüminyumca zengin göbekli α fazı ile bu fazı çevreleyen çinkoca zengin η fazı, bakırca zengin ϵ fazı ve silisyum parçacıklarından oluşmaktadır.
2. Uygulanan çözündürme, su verme ve 150° C sıcaklıkta 2 saatlik yaşlandırma aşamalarını içeren T6 ısıl işlemi sonucunda alaşımın dendritik yapısı tamamen ortadan kalkmakta, bunun yerine ince çökelti içeren bir yapı oluşmakta, ancak silisyum parçacıklarında herhangi bir değişim meydana gelmemektedir. Sözü edilen ısıl işlem alaşımının sertlik, çekme dayanımı, sürtünme katsayısı ve aşınma direncini artırmaktadır.
3. Yetersiz yağlama şartlarında incelenen alaşımın dökülmüş durumdaki örneklerinden 30 dakikalık deney süresi sonunda elde edilen sürtünme katsayıları 3 MPa'a kadar artan basınç ile azalmakta ve bu değerden sonra da artmakta; ısıl işlem görmüş örneklerinin sürtünme katsayıları ise 4 MPa basınca kadar dalgalanma göstermekte ve bu değerden sonra da artmaktadır. Bu alaşıma ait bütün örneklerin sürtünme katsayıları hız ile düzensiz bir değişim sergilemekte, çalışma sıcaklıkları ise artan basınç ve hız ile artmaktadır.
4. Yetersiz yağlama durumunda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybı basınç ile exponansiyel, hız ile 4 MPa'lık basınca kadar lineer bu değerden sonra da exponansiyel olarak artmaktadır.
5. Sürekli yağlama durumunda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayıları artan basınç ve hız ile azalmakta, çalışma sıcaklıkları ise bu parametreler ile artmaktadır.
6. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının gerek dökülmüş, gerekse ısıl işlem görmüş durumlardaki aşınma kayıpları artan basınç ve hız ile lineer olarak artmaktadır. Ancak SAE 660 bronzunun aşınma kaybında 3 MPa'lık basınçtan sonra ani bir artış meydana gelmektedir.
7. 1 cm³/saat'lik akış hızında (debi) gerçekleştirilen sürekli yağlama durumunda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı 3 MPa'dan daha yüksek basınçlarda SAE 660 bronzundan çok daha üstün aşınma direnci sergilemektedir.

8. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki örneklerinin aşınmasında sıvanma ve adhezyon, ısıl işlem görmüş durumdaki örneklerinin aşınmasında sıvanma ve adhezyonun yanı sıra abrazyon, SAE 660 bronzuna ait örneklerin aşınmasında ise hem abrazyon hem de adhezyon etkili olmaktadır.



6. ÖNERİLER

1. Bu alaşımların farklı yağlama durumu, farklı basınç ve farklı hız koşullarındaki aşınma davranışları incelenerek bu alaşımlardan yapılan yataklardaki aşınma mekanizmaları ortaya konulabilir.
2. Yüzey pürüzlülüğünün bu alaşımların sürtünme ve aşınma davranışlarına etkileri araştırılarak bu alaşımlardan üretilen yatakların işlenme yöntemi ve şekli hakkında bilgiler elde edilebilir.



7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminum Based Bearings Alloys, Ph.D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1980.
2. Goodwin, F.E. ve Ponikvar, A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, International Lead Zinc Research Organization, Third Edition, USA, January 1989.
3. Calayag, T. ve Ferres, D., High Performance High Aluminum Zinc Alloys for Low Speed Bearings and Bushings, SAE Annual Conference, Paper No: 820643, (1983) 2241-2251.
4. Gervais, E. ve Levert, H.M., The Development of A Family of Zinc Based Foundry Alloys, American Foundrymen's Society Transaction, 88 (1980) 183-194.
5. Geng, H., Ma, J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy, Wear 169 (1993) 201-207.
6. Calayag, T., Zinc Alloys Replace Bronze in Mining Equipment Bushings and Bearings, Mining Engineering, (1983)727-728.
7. Zhu, Y., Yan B. ve Huan, W., Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35), Materials Science and Technology, 11, (1995) 109-113.
8. Durman, M. ve Murphy, S., Precipitation of Metastabil ϵ -Phase in a Hypereutectic Zinc-Aluminum Alloys Containing Copper, Acta Metal. Mater., 39, 10 (1991) 2235-2242.
9. Ma, T., Chen, D.Q., Li, S.C. ve Wang, H.M., Effect of Mn on Lubricated Friction and Wear Properties of Zn-Al Alloys, Louyang Institute of Technology, Louyang, People's Republic of China, 1990.
10. Engineering Properties of Zinc Alloys, ILZRO, New York, April 1981.
11. Altorfer, K.J., Zinc Alloys Compete with Bronze in Bearings and Bushings, Metal Progress, 122, 6 (1982) 29-31.
12. Marczak, R.J. ve Ciach, R., Tribological Properties of Concentrated Al-Zn Alloys, Proc. 1st Europe Tribology Congress, 1973, London, 223-227.
13. Lyon, R., The Properties and Application of ZA Alloys, The British Foundryman, August 1986, 344-349.
14. Gervais, E., Loong, C.A., New ZA Alloys in Die Casting, 11th International Pressure Die Casting Conference, June 1984, Lyon, France, 1-25

15. Lyon, R., Engineering Applications of ZA Alloys, Proc. Second Conference On Material Engineering, London, 1985, 221-227.
16. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearings Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
17. Wakefield, E.C., Copper-Aluminium-Zinc Alloy Excels in Tough Conditions, Design Engineering, (1973) 1-4.
18. Barnhurst, R.J., Zinc-Aluminum Alloy Design Manuel for Continious Rotation Bearings, Noranda Sales Corporation Ltd, Toronto, January, 1988.
19. Givertz, A.C., Zinc Casting Alloys-A Comparative Properties Analysis, Society of Automotive Engineers, Paper no 871953, (1988) 104-1067.
20. Apelian, D., Palival, M. ve Herrschaft, D.C., Casting with Zinc Alloys, Journal of Metals, 33, 11 (1991) 12-19.
21. Pürçek, G., Küçükömeroğlu, T. ve Savaşkan, T., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendis ve Makina, 37 (1996) 35-41.
22. Riston, T.J., Barnhurst, R.J. ve Mihaichuk, W., Comparative Wear Rate Evaluation of Zinc-Aluminium (ZA) and Bronze Alloys Through Block-on-Ring Testing and Field Applications, Paper No 860064, SAE Annual Conference, Detroit, USA, 1986.
23. Gross, D.K., Zinc Alloys: Specification and Processing, Society of Automotive Engineers, Paper No 871952, (1988) 1069-1075.
24. Savaşkan, T. ve Murphy S., Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging, Material Science and Technology, 35, 6 (1990) 695-700.
25. Murphy, S., Solid State Reactions in the Low Copper Part of The Al-Cu-Zn System, Zeitschriftmetalkunde, 71 (1980) 96-102.
26. Savaşkan, T. ve Murphy S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri, 4. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Ekim 1986, Bildiriler Kitabı, Cilt II, 532-555.
27. Barnhurst, R.J., Guidelines for Designing Zinc Alloy Bearing a Technical Manuel, Society of Automotive Engineers, Paper No 880289, (1988) 2164-2170.
28. Murphy S., The Structure of the T' Phase in The System Al-Cu-Zn, Metal Science, 9 (1975) 163-168.
29. Savaşkan, T. ve Murphy S., Metallography of Zn-25%Al Based Alloys in the As-Cast and Aged Conditions, Practical Metallography, 24 (1987) 15-23.

30. Zhu, Y.H. ve Murphy S., A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys, Chinese Journal of Metal Science and Technology, 2 (1986) 103-115.
31. Zhu, Y.H., Phase Equilibria in Zn-Al-Cu-Si Alloys, Chinese Journal of Metal Science and Technology, 5 (1989) 113-118.
32. Zhu, Y.H. ve Goodwin F., Microstructures of Thermomechanically Treated Eutectoid Zn-Al Alloy, Journal of Material Science and Technology, 10 (1994) 121-126.
33. Zhu, Y.H. ve Lee W.B., Tensile Deformation and Phase Transformation of Furnace Cooled Zn-Al Based Alloy, Material Science and Engineering A, 293 (2000) 95-101.
34. 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.
35. Aydın, A., Silisyum Katkısının Monotektoid Esaslı Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
36. Savaksan, T. ve Aydın, A., Effect of Silicon Content on The Mechanical Properties of Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.
37. Bican, O., Silisyum Oranının Monotektoid Esaslı Zn-Al-Cu-Si alaşımlarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri
38. Barnhus, R.J., Zinc and Zinc Alloys Metal Handbook, 10th Edition, Vol.2, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1991.
39. Lyon, R., New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications, The Institute of British Foundryman, 83rd Annual Conference, Buxton, (1986) 87-97.
40. Pürçek, G., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Statik ve Dinamik Yük Altındaki Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
41. Zhu, Y., Goodwin, F., Influence of Rare Earth Element Addition on Phase Transformations in the Zn-%27Al Alloy, Journal of Materials Research Society, 8 (1993) 3043-3049.
42. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
43. Panday, J.P. ve Prasad, B.K., Dry Sliding Wear Behaviour of a Zinc Based Alloy Against Different Counterface Materials, Metallkunde, 88 (1997) 739-743.

44. Marczak, R.J. ve Ciach, R., Tribological Properties of Concentrated Al-Zn Alloys, Proc.1st Europe Tribology Congress, 1973, London, 223-227.
45. 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.
46. Torabian, H., Pathak, J.P. ve Tiwari, S.N., Wear Characteristics of Al-Si Alloys, Wear, 172 (1994) 49-58.
47. Savaşkan, T. ve Ayar, H. H., Çinko-Alüminyum Alaşımlarının %2 HCl Sulu Çözelti Ortamındaki Korozyon Davranışının İncelenmesi, Korozyon, 8 (1996) 3-9.
48. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25Al-Based Alloys, Wear, 116 (1987) 211-224.
49. Savaşkan, T., Torul, O. ve Çuvalcı H., Çinko-Alüminyum Alaşımlarının İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Kasım 1988, Bildiriler Kitabı, Cilt II, 794-798.
50. Kubel, E. J., Expanding Horizons for ZA Alloys, Metal Progress, 7 (1987) 51-57.
51. Prasad, B. K., Microstructure, Mechanical Properties and Sliding Wear Characteristic of Zinc-Based Alloys: Effect of Partially Substituting Cu by Si, Zeitschrift Metalkunde 88 (1997) 929-933.
52. Turhal, M. Ş., Soğuma Hızının Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Yapı ve Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
53. Savaşkan, T., Turhal, M. Ş. ve Murphy, S., Effect of Cooling Rate on Structure and Mechanical Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys, Material Science and Technology, (2003)19-67.
54. Skenazi, A. F., Pelerin, J., Coutouradis, D., Magnus, B. Ve Meeus, M., Some Recent Developments in the Improvement of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys, Metall, 37, 9 (1983) 898-902.
55. Savaşkan, T., ve Murphy, S., Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys, Zeitschrift Metalkunde, 74 (1983) 76-82.
56. Pürçek, G., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
57. Savaşkan, T. ve Pürçek, G., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Aşınma Özellikleri, Türk Mühendis ve Çevre Bilimleri Dergisi (Tr. J. Env. Sci.), 24 (2000) 25-34.

58. Prasad, B. K., Effect of Silicon Addition and Test Parameters on Sliding Wear Characteristic of Zinc-Based Alloys Containing 37.5% Aluminium, Materials Transactions, JIM, 38, 8 (1997) 701-706.
59. Savaşkan, T., Hekimoğlu, A. P. ve Pürçek, G., Effect of Copper Content on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Copper Alloys, Tribology, 2003.
60. 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
61. Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T. ve Murphy, S., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Wear, 252 (2002) 894-901.
62. Hekimoğlu, A.P., Bakır Katkısı ve Isıl İşlemin Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002
63. Turhal, M. Ş., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarında Mukavemet Artırma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
64. Bektaşoğlu, A., Zn-Al-Cu Alaşımlarının Kuru Sürtünme Durumundaki Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004
65. Prasad, B.K., Venkateswarlu, K. ve Modi, O.P., Sliding Wear Behaviour of Some Al-Si Alloys: Role of Shape and Size of Si Particles and Test Conditions, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 29A, (1997) 2747-2752.
66. Jian, L., Laufer, E.E. Ve Masounave, J., Wear in Zn-Al-Si Alloys, Wear, 165 (1993) 51-56.
67. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al-Based Alloys in an Automotive Engineer Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
68. Savaşkan, T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya Kitabevi, Trabzon, 2000.
69. Akkurt, M., Makine Elemanları, Cilt I-II, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
70. Halling, J., Principles of Tribology, Macmillan Education Ltd, London, 1989.
71. Prasad, B.K., Effects of Heat Treatment on The Partially Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc Based Alloy, Mater. Trans., 7 (1999) 578-585.
72. Fuller D. D., Theory and Practice of Lubrication for Engineers, John Wiley and Sons Inc., U.S.A., 1956.

73. Okday, Ş., Makine Elemanları II. Cild, Rulmanlı Yataklar, Kaymalı Yataklar ve Yağlama, Birsen Kitabevi, İstanbul, 1997.
74. Boyer, H. E. and Gall, T. L., Metals Handbook Desk Edition, American Society for Metals, Ohio, 1985



ÖZGEÇMİŞ

Zeki AZAKLI 1979 yılında Trabzon'da doğdu. 1996 yılında Trabzon İmam Hatip Lisesi'ni bitirdi. 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Makina Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 2001 yılında girdiği K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.

