

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Zn-25Al ESASLI ALAŞIMLARIN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Reza ANVARI MALEKİ

**HAZİRAN 2013
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Zn-25Al ESASLI ALAŞIMLARIN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Makine Mühendisi Reza ANVARI MALEKİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
" MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ "
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.05.2013
Tezin Savunma Tarihi : 14.06.2013

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Reza ANVARI MALEKİ tarafından hazırlanan

Zn-25Al ESASLI ALAŞIMLARIN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28 / 05 / 2013 gün ve 1507 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN

Üye : Prof Dr. Ümit UZMAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kaymalı yatak yapımında yaygın olarak kullanılan bronz, pirinç ve dökme demir gibi malzemelerin pahalı olması ve tribolojik özelliklerinin çoğu uygulamalar için yetersiz kalması nedeniyle bunların yerine çinko esaslı alaşımlar geliştirilmiştir. Ancak, söz konusu alaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar günümüzde de sürdürülmektedir. Zn-25Al- esaslı alaşımlar ilk kez 1980'li yıllarda üretilerek incelenmiş ve bu alaşımların mukavemet ve aşınma direnci bakımlarından çinko esaslı ticari alaşımlara eşdeğer, bronzlardan ise üstün oldukları belirlenmiştir. Ancak, bu çalışmalar sınırlı sayıdaki alaşımlarla gerçekleştirilmiş ve bakır ve silisyumun söz konusu alaşımların özelliklerine etkileri tam olarak ortaya konulamamıştır. Sözü edilen çalışmanın devamı niteliğinde olan bu çalışma sonucunda Zn-25Al esaslı üçlü alaşımlar içerisinde Zn-25Al-3Cu alaşımının, dörtlü alaşımlar içerisinde ise Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının en yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip oldukları belirlenmiştir. Ayrıca, söz konusu alaşımlarının SAE 660 bronzuna göre çok daha üstün aşınma davranışı sergiledikleri görülmüştür.

Tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmaların yönlendirilmesindeki katkılarından dolayı hocam sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca, çalışmalarına katkıda bulunan Mak. Yük. Mühendisi Alipaşa HEKİMOĞLU'na, Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ'a, Arş. Gör. Hasan Onur TAN'a, Melike ORAKÇI'ya ve Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Takım Tezgahları Laboratuvarı'nda görevli teknisyenlere teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen sevgili ailem ve Türkiye'de beni yalnız bırakmayan değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Reza ANVARI MALEKİ

Trabzon 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Zn-25Al Esaslı Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/05/2013

Reza ANVARI MALEKİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	VI
TEZ BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
ÖZET	X
SUMMARY	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları.....	3
1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı	3
1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır 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	7
1.3.3. Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri	9
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	13
2.1. Alaşımların Üretimi ve Kimyasal Analizi.....	13
2.2. Alaşımların Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	13
2.3. Isıl İşlemler.....	15
2.4. Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi	15
2.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi	17
3. BULGULAR	21
3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri	21
3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular	22
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular	25
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	29
3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular.....	51

4.	İRDELEME.....	72
5.	SONUÇLAR	78
6.	ÖNERİLER	80
7.	KAYNAKLAR.....	81

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Zn-25Al ESASLI ALAŞIMLARIN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Reza Anvari MALEKİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN
2013, 86 Sayfa

Bu çalışmada üç adet ikili Zn-Al, beş adet üçlü Zn-25Al-Cu, dört adet dördü Zn-25Al-3Cu-Si alaşımı kokil kalıp döküm yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen alaşımlar içerisinde seçilen üçlü ve dördü alaşımların tribolojik özellikleri çubuk-disk esaslı bir aşınma deney düzeneği yardımıyla incelenmiştir. Bu çalışmada baz olarak alınan ikili Zn-25Al alaşımının içyapısının göbekli β dendritleri ile α ve η fazlarından oluştuğu gözlenmiştir. Bu alaşıma %3 ve daha yüksek oranlarda bakır katılması durumunda ϵ fazının oluştuğu belirlenmiştir. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının içyapısı ise üçlü alaşımda gözlenen fazlarla birlikte silisyum parçacıklarından oluştuğu görülmüştür. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımın dendritik yapısının T6 ısıl işlemi sonunda tamamen ortadan kalktığı ve bunun yerini α tanelerinden oluşan bir yapının aldığı görülmüştür. Üçlü ve dördü alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerlerinin artan bakır ve silisyum oranları ile arttıkları, bu oranların belirli değerlerin üzerine çıkması durumunda ise azaldıkları gözlenmiştir. Alaşımların sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan basınç ile sürekli artarken, sürtünme katsayısı değerlerinin genelde azaldığı görülmüştür. Zn-25Al esaslı alaşımların kuru aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin yüzeylerinin altında yapısal değişimlerin meydana geldiği gözlenmiştir. İncelenen alaşımlar içerisinde en yüksek mukavemet ve aşınma direnci değerleri Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımından elde edilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda Zn-25Al esaslı üçlü ve dördü alaşımların SAE 660 bronzundan daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip oldukları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zn-25Al Esaslı Alaşımlar, Yapısal ve Mekanik Özellikler, Isıl İşlem, Sürtünme ve Aşınma

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Zn-25Al- BASED ALLOYS

Reza Anvari MALEKI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN
2013, 86 Pages

In this study, three binary Zn-Al, five ternary Zn-25Al-(1-5)Cu and four quaternary Zn-25Al-3Cu-(1-4)Si alloys were prepared by permanent mould casting. Tribological properties of the alloys were investigated using a pin-on-disc machine after studying their microstructure and mechanical properties. The microstructure of the binary Zn-25Al alloy consisted of large β dendrites surrounded by aluminum-rich α and zinc-rich η phases. Addition of copper more than 3% produced ϵ phase mainly in the interdendritic channels of the alloy. The microstructure of the quaternary Zn-25Al-3Cu-1Si alloy revealed silicon particles, in addition to the phases observed in the ternary alloy. T6 heat treatment removed the dendritic microstructure of Zn-25Al-3Cu-1Si alloy and produced a new microstructure which consists of α grains. The hardness and tensile and compressive strengths of the alloys increased with increasing copper and silicon contents, but when the copper and silicon contents exceeded certain levels the trend reversed. As the pressure increased working temperature and wear volume values of the alloys increased, but their friction coefficient decreased. Microstructural changes were observed underneath the surface of the Zn-25Al based alloys subjected to dry sliding wear tests. Among the alloys studied the highest strength and wear resistance were obtained with Zn-25Al-3Cu-1Si alloy. In addition, the Zn-25Al based ternary and quaternary alloys were found to be much superior to the SAE 660 bronze as far as their mechanical and tribological properties are concerned.

Key Words: Zn-25Al Based Alloys, Microstructural and Mechanical Properties, Heat Treatment, Friction and Wear

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	İkili çinko-alüminyum faz diyagramı.	3
Şekil 2.	Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki	5
Şekil 3.	Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.	6
Şekil 4.	Alaşımın çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin belirlenmesinde kullanılan numunenin teknik resmi	14
Şekil 5.	Alaşımın darbe direncinin belirlenmesinde kullanılan numunenin teknik resmi	14
Şekil 6.	Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (önden görünüm)	17
Şekil 7.	Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (üstten görünüm).....	18
Şekil 8.	Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı.....	18
Şekil 9.	Aşınma deney düzeneğindeki disk, numune ve numune tutucusunun yakından görünümü	19
Şekil 10.	Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan yük hücresine (S50) ait kalibrasyon doğrusu.....	19
Şekil 11.	Alaşımın sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan numunelerin teknik resmi	20
Şekil 12.	Zn-25Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	22
Şekil 13.	Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı	23
Şekil 14.	Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı.....	23
Şekil 15.	Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıtma işlemi görmüş durumdaki içyapısı	24
Şekil 16.	Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş durumdaki içyapısı	24
Şekil 17.	SAE 660 bronzunun içyapısı	25
Şekil 18.	Zn-25Al-(0-5)Cu alaşımının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, kopma uzaması, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler	27
Şekil 19.	Zn-25Al-3Cu-(0-4)Si alaşımının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, kopma uzaması, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler	28

Şekil 20.	Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri.....	29
Şekil 21.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler	31
Şekil 22.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler	32
Şekil 23.	Yağsız durumda deneye tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler	33
Şekil 24.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler	35
Şekil 25.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıklarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler	35
Şekil 26.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler	36
Şekil 27.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler	38
Şekil 28.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların çalışma sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	38
Şekil 29.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerini kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler	39
Şekil 30.	6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm ³ /saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	41
Şekil 31.	6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm ³ /saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	41

Şekil 32.	6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm ³ /saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al alaşımları ile SAE 660 bronzunda meydana gelen hacim kayıplarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	42
Şekil 33.	Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun yağlı durumdaki sürtünme katsayılarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	44
Şekil 34.	Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun yağlı durumdaki çalışma sıcaklıklarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler	45
Şekil 35.	Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunda yağlı durumda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler	45
Şekil 36.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler	47
Şekil 37.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların çalışma sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	47
Şekil 38.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda 20 km'lik kayma yolu sonunda meydana gelen hacim kayıplarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler	48
Şekil 39.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler	49
Şekil 40.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sıcaklık değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler	50
Şekil 41.	Yağlı durumda 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler	50
Şekil 42.	Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü	52
Şekil 43.	Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü	52
Şekil 44.	Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü.....	53
Şekil 45.	SAE 660 bronzuna ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü.....	53
Şekil 46.	Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	54

Şekil 47.	Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	54
Şekil 48.	Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıtıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	55
Şekil 49.	Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	55
Şekil 50.	Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	56
Şekil 51.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	56
Şekil 52.	Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	57
Şekil 53.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	57
Şekil 54.	Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıtıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	58
Şekil 55.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıtıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	58
Şekil 56.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	59

Şekil 57.	Yağlı durumda 6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	59
Şekil 58.	6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	60
Şekil 59.	6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıtma işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	60
Şekil 60.	Yağlı durumda 6 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	61
Şekil 61.	Yağlı durumda 1 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	61
Şekil 62.	Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	62
Şekil 63.	Yağlı durumda 1 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	62
Şekil 64.	Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	63
Şekil 65.	Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıtma işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	63
Şekil 66.	Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	64

Şekil 67.	1 cm ³ /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	64
Şekil 68.	1 cm ³ /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	65
Şekil 69.	1 cm ³ /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	65
Şekil 70.	1 cm ³ /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü	66
Şekil 71.	Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü	67
Şekil 72.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü	67
Şekil 73.	Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü	68
Şekil 74.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü	68
Şekil 75.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü	69
Şekil 76.	Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü	69

- Şekil 77. 2 MPa basınç ve 1 m/s kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlara ait numunelerin mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler 70
- Şekil 78. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının farklı basınçlarda deneye tabi tutulan aşınma numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin yüzeyden itibaren artan derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler 71

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Çinko esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri	2
Tablo 2. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri	4
Tablo 3. Zn-Al-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri	4
Tablo 4. Çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri	7
Tablo 5. Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri.....	10
Tablo 6. Zn-Al esaslı alaşımların kimyasal bileşimleri.....	21
Tablo 7. SAE 660 bronzunun kimyasal bileşimi.....	21
Tablo 8. İkili Zn-(20-30)Al, üçlü Zn-25Al-(1-5)Cu ve dördü Zn-25Al-3Cu-(1-4)Si alaşımları ile SAE 660 bronzunun sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri.....	26
Tablo 9. Yağsız durumda 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri	30
Tablo 10. Yağsız durumda farklı kayma yolları alınincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda meydana gelen hacim kaybı değerleri.....	31
Tablo 11. Yağsız durumda ve farklı basınçlar altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzundan elde edilen sürtünme katsayısı değerleri	32
Tablo 12. Yağsız durumda ve farklı basınçlar altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıkları	34
Tablo 13. Yağsız durumda ve farklı basınçlar altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının değerleri	34
Tablo 14. Yağsız durumda ve farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayıları	37
Tablo 15. Yağsız durumda ve farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların çalışma sıcaklıkları	37

Tablo 16. Yağsız durumda ve farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının değerleri	37
Tablo 17. Yağlı durumda 80 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri	40
Tablo 18. 6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm ³ /saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun hacim kaybı değerleri	40
Tablo 19. Farklı basınçlarda yağlı aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların kararlı durumdaki sürtünme katsayıları.....	43
Tablo 20. Farklı basınçlarda yağlı aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumdaki çalışma sıcaklıkları	43
Tablo 21. Farklı basınçlarda yağlı aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda meydana gelen hacim kayıpları.....	44
Tablo 22. 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve farklı kayma hızlarında 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayıları	46
Tablo 23. 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve farklı kayma hızlarında 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürekli rejim durumdaki sıcaklık değerleri	46
Tablo 24. 1 cm ³ /saat'lik yağ debisi ve farklı kayma hızlarında 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların hacim kaybı değerleri	46
Tablo 25. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürekli rejim durumdaki sürtünme katsayıları.....	48
Tablo 26. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürekli rejim durumdaki sıcaklık değerleri.....	49
Tablo 27. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların hacim kaybı değerleri	49

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İlk çinko esaslı alaşımlar 1920'li yıllarda geliştirilmiş ve bunlar Zamak alaşımları olarak adlandırılmıştır [1, 2]. İkinci Dünya Savaşı sırasında Almanya'da bakır ve kalay temininde karşılaşılan zorluklar nedeniyle bronz ve beyaz metal yerine çinko esaslı yatak alaşımları geliştirilmeye çalışılmıştır [1-6]. Bu çalışmalar sonucunda ALZEN 501 ve ALZEN 305 alaşımları geliştirilmiştir [6-7]. Savaşın sonundan günümüze kadar geçen süre içerisinde yapılan araştırmalar sonucunda ise ZA-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27, Zn-40Al-2Cu-2Si, Al-40Zn-3Cu-2Si, Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-2Si alaşımları geliştirilmiştir [8-16]. Ticari ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan çinko esaslı alaşımlardan bazılarının kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir [17]. Geliştirilen bu alaşımlar beyaz metal (Babbitt), bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaktadır [1-4]. Yapılan çalışmalar alüminyum, bakır ve/veya silisyum içeren çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak alaşımlarına göre üstün özelliklere sahip olduklarını göstermiştir. Bu üstünlüklerin başında özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk) ve aşınma dirençlerinin yüksek olması; üretimlerinin kolay ve ekonomik olması; sert parçacıkları yutma özelliğine sahip olmaları; titreşim sönümlenme kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle sessiz çalışmaya imkân sağlamaları ve aşırı yüklenme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile üstün tribolojik davranış sergilemeleri gelmektedir [1, 10, 18-19, 33]. Ancak, bütün bu üstünlüklerin yanı sıra bakır içeren çinko esaslı üçlü ve dörtlü alaşımlarda biri boyutsal kararsızlık, diğeri düşük süneklik olmak üzere iki önemli sorun ile karşılaşılmaktadır [20-22]. Boyutsal kararsızlık döküm sırasında oluşan metastabil ϵ (CuZn_4) fazının kullanım sırasında dörtlü faz reaksiyonu ($\epsilon + \alpha \rightleftharpoons \text{T}' + \eta$) ile T' fazına dönüşmesinden, yetersiz süneklik ise çinko ve bakırca zengin fazların gevrek davranış sergilemelerinden kaynaklanmaktadır [20-23]. Bu sorunlar alaşımlara ısıl işlem uygulayarak veya uygun alaşım elementi katarak giderilmeye çalışılmıştır [1, 24-26]. Boyutsal kararsızlığı ortadan kaldırmak için bu alaşımlara T5 ve T7 ısıl işlemleri uygulanmaktadır [12, 27-30]. Ancak, uygulanan bu işlemler alaşımların boyutsal kararsızlıklarını ortadan kaldırırken, akma ve çekme dayanımı değerlerini önemli ölçüde

azaltmaktadır [16]. Bu nedenle, boyut kararlılığı ve süreklilik gerektiren uygulamalar için T5 ve T6 işlemleri uygulanırken, yüksek sertlik ve mukavemet gerektiren uygulamalar için T6 ısıl işlemi tercih edilmelidir [12].

Çinko esaslı alaşımlardan üretilen yataklar, daha düşük hız ve aşırı yüklemenin söz konusu olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Niketim kablolu kren ve taş kırma makinası gibi pek çok iş makinasında, maden işletme araçlarında, vites kutusu ve torna tezgahı gibi yerlerde bu alaşımlardan üretilen yataklar kullanılmaktadır. Bu alaşımlardan tek tabakalı kaymalı yataklar imal edilebildiği gibi, yatak burçları da üretilmektedir [31-33]. Söz konusu alaşımlar kaymalı yatak üretiminin yanı sıra mühendislik uygulamalarında kullanılan farklı parçaların üretiminde de kullanılmaktadır. Özellikle otomobillerde kullanılan karbüratör parçaları, silindir kapağı, dişli kutusu kapakları, biyel kolu ve jant gibi parçalar bu alaşımlardan üretilmektedir [13, 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 [24, 27, 29, 34, 35].

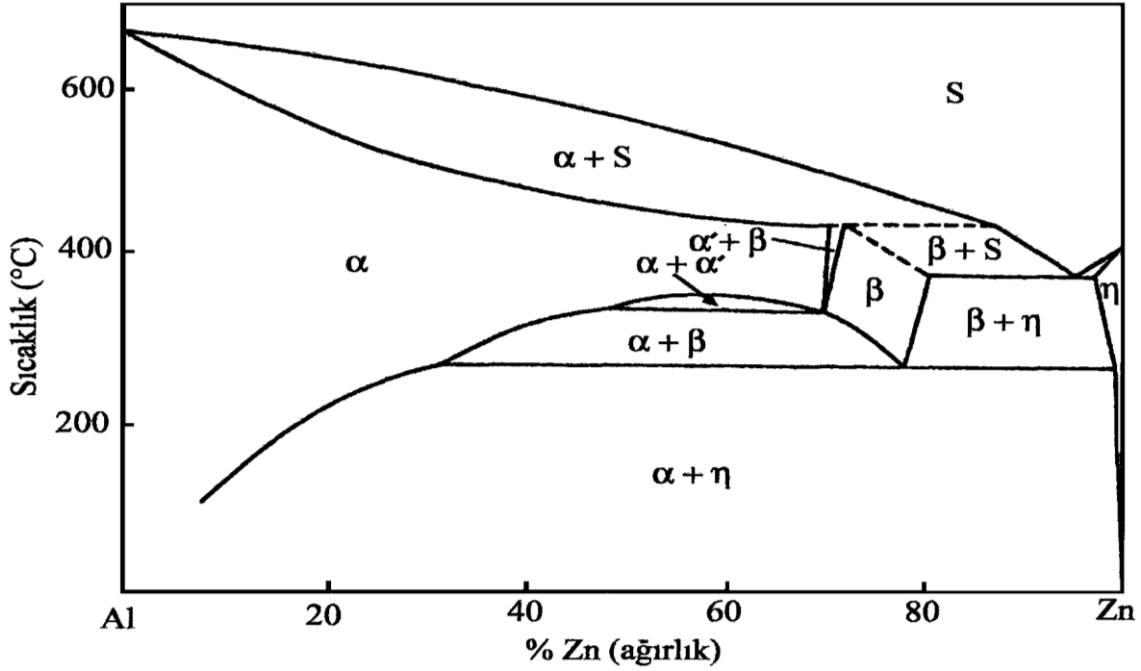
Tablo 1. Çinko esaslı bazı alaşımların kimyasal bileşimleri [17].

Alaşım	Kimyasal bileşim oranı (% ağırlık)						
	Al	Cu	Mg	Fe	Pb	Ni	Zn
Zamak 2	3,5-4,3	2,6-2,9	0,025-0,05	0,1	0,004	-	Kalan
Zamak 3	3,5-4,3	0,25	0,02-0,05	0,1	0,005	-	Kalan
Zamak 5	3,5-4,3	0,75-1,25	0,03-0,08	0,07	0,005	-	Kalan
Zamak 7	3,5-4,3	0,25	0,005-0,02	0,1	0,003	0,005-0,02	Kalan
ZA-8	8,0-8,8	0,08-1,3	0,015-0,03	0,07	0,004	-	Kalan
ZA-12	10,5-11,5	0,5-1,25	0,015-0,03	0,1	0,004	-	Kalan
ZA-27	25,0-28,0	2,0-2,5	0,01-0,02	-	0,004	-	Kalan

1.2. Çinko Esaslı Alaşımların 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, η ise çinkoca zengin faz bölgelerini göstermektedir [36]. Bu diyagramda görüldüğü gibi çinkonun alüminyum içerisindeki katı çözünürlüğü %83 Zn oranına kadar uzanarak α , α' ve β olarak adlandırılan farklı faz bölgeleri oluşturmaktadır. Sözü edilen fazların kafes parametrelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle bu fazlar arasındaki sınırlar tam olarak belirlenememiştir. Yavaş soğutma sonucunda bu fazlar kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşmektedir [21, 36].



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [37].

Zn-Al faz diyagramı 382°C sıcaklık ve %95 Zn oranında bir ötektik dönüşüm sergilemektedir. Ötektik dönüşüm sonucunda yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı β ile sıkı düzenli hegzagonal yapıya sahip η fazlarını içeren bir içyapı oluşmaktadır. Ayrıca, alüminyumun η fazı içindeki katı çözünürlüğü azalan sıcaklıkla azalmakta ve 20°C sıcaklıkta %0,05 Al oranına kadar düşmektedir. Bu diyagramda yer alan β fazı ise, 276°C sıcaklıkta %22 Al oranında meydana gelen ötektoid reaksiyon sonucunda α ve η fazlarına dönüşmektedir [20, 37-38]. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde ortaya çıkan faz

dönüşümleri ile bu dönüşümlere ait kimyasal bileşim oranı ve sıcaklık değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [36].

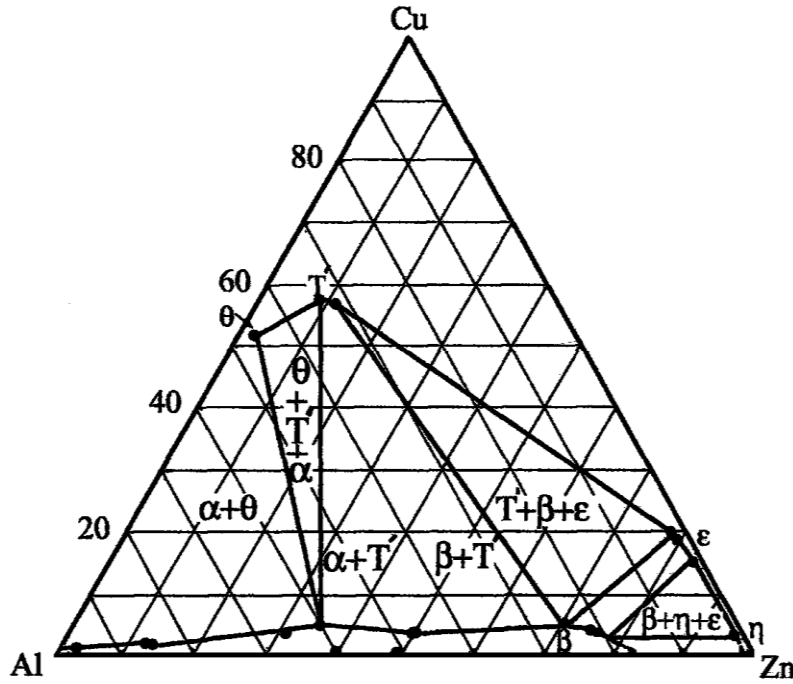
Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Alüminyum oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \rightleftharpoons \beta + \eta$	5	382
Ötektoid	$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	22	276
Peritektik	$\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	28	443
Monotektoid	$\alpha/\alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	40	340

1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı

Üçlü Zn-Al-Cu faz diyagramı henüz tam olarak belirlenememiştir. Ancak, bu diyagramın bakır oranı düşük olan kısmı Murphy [21] tarafından ayrıntılı biçimde incelenerek bu sistemde meydana gelen faz dönüşümleri belirlenmiştir. Zn-Al-Cu faz diyagramının 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti Şekil 2’de, bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri ise Tablo 3’de verilmiştir. Bu tabloda yer alan α alüminyumca zengin ve η çinkoca zengin fazları; ε (CuZn_4), θ (CuAl_2) ve T' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) sembolleri de bu alaşımlarda oluşan metaller arası bileşikler göstermektedir [1, 21]. Yapılan incelemeler sonucunda ε fazının yarı kararlı (metastabil), θ ve T' fazlarının ise kararlı yapıya sahip oldukları belirlenmiştir [21, 36].

Tablo 3. Zn-Al-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [31].

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



Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti [1, 21].

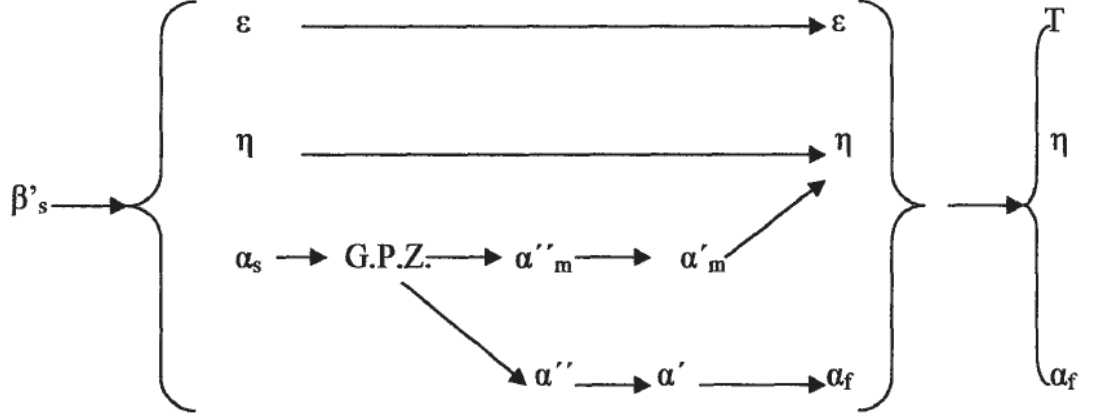
1.2.3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si Faz diyagramı

Dörtlü Zn-Al-Cu-Si faz diyagramı da tam olarak belirlenmemiş, ancak bu sistemdeki bazı faz dönüşümleri birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir [22-23, 39]. Silisyum, çinko-alüminyum matrisi içerisinde çok az veya hiç çözünmemektedir. Bu nedenle, söz konusu element Zn-Al-Cu-Si alaşımlarda meydana gelen faz dönüşümlerini belirgin bir şekilde etkilememektedir [39]. Çözündürme ve su işlemlerinden sonra yaşlandırılan Zn-20Al-3Cu-2Si alaşımında meydana gelen faz dönüşümleri aşağıda verilmiştir [40].

Bu dönüşümler sırasında ilk önce G.P (Guiner-Preston) bölgeleri oluşmaktadır. Su verme işlemi sonunda edilen α_s fazı yaşlandırma işlemi sırasında Şekil 3’de görüldüğü gibi α'_m , α''_m , α'' ve α' geçiş fazlarını oluşturmakta ve fazlar da en son çinkoca zengin η ve alüminyumca zengin α_f fazlarına dönüşmektedir [22-40].

Silisyum parçacıklarının büyüklüğü ve yapısı içerisindeki dağılımları silisyum oranına göre değişmektedir [11, 41-43]. Yapılan araştırmalar silisyum parçacıklarının %2’den daha düşük oranlarda silisyum içeren çinko esaslı alaşımların içyapılarında homojen bir dağılım sergilediklerini, silisyum oranının %2’nin üzerine çıkması durumunda ise hem

büyüdüklerini hem de yapı içerisinde farklı bölgelerde toplanarak kümeleştiklerini göstermiştir [11, 12, 41-43].



Şekil 3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [39].

1.3. Çinko Esaslı Alaşımların Özellikleri

1.3.1. Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri

Çinko esaslı alaşımların fiziksel özellikleri içerdikleri alaşım elementleri ve bunların oranlarına göre değişmektedir [44, 45]. Şöyle ki, alaşımların yoğunluğu artan alüminyum ve silisyum oranları ile azalmakta, bakır oranının artması durumunda ise artmaktadır [44, 45]. Ayrıca, alüminyum oranı arttıkça söz konusu alaşımların ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve ısıl genleşme katsayıları artmaktadır [44, 45].

Çinko esaslı üçlü ve dörtlü alaşımların yoğunlukları geleneksel yatak alaşımlarının söz konusu değerlerinden daha düşüktür [45]. Bu nedenle söz konusu alaşımlar geleneksel yatak alaşımlarına göre daha yüksek özgül mukavemet değerleri sergilerler [33]. Diğer taraftan alüminyum oranı arttıkça bu alaşımların yoğunluğu düşmekte ve dolayısıyla birim maliyeti azalmaktadır [10, 46]. Tablo 4'de çinko esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. Çinko esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri [47,48].

Alaşım	Fiziksel özellikler				
	Yoğunluk (kg/m ³)	Katılma aralığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (µm/m°C)	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m°C)	Elektriksel iletkenlik katsayısı (%IACS)
Zamak 2	6800	379-390	27,8	105	-
Zamak 3	6660	387-381	27,4	113	27
Zamak 5	6700	386-380	27,4	109	26
Zamak 7	6600	387-381	27,4	113	27
ZA-8	6300	404-375	23,3	115	28
ZA-12	6000	432-377	24,2	116	28
ZA-27	5000	484-376	26	126	30
SAE-40 pirinci	8500	1010-855	18	72	15
SAE 660 bronz	8910	975-855	18	59	12
Kır dökme demir	7300	1260-1090	11,9	45	6

1.3.2. Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

İkili çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin alüminyum oranına göre değiştiği bilinmektedir [48-50]. Çinko esaslı alaşımlar demir dışı alaşımların pek çoğundan daha yüksek mukavemet değerine sahiptir [33]. Yapılan araştırmalar sonucunda monotektoid bileşime sahip ikili Zn-40Al alaşımının gerek ötektik (Zn-5Al), gerekse ötektoid (Zn-22Al) bileşime sahip alaşımlardan çok daha yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olduğu görülmüştür [11, 12, 36, 48-54]. Bu durumun monotektoid alaşımda gerek katılma, gerekse yaşlandırma sırasında meydana gelen spinodial

dönüşüm sonucunda oluşan metastabil geçiş fazlarının α matrisinin kafes yapısını çarpıtmasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [55, 56].

Alaşım elementi olarak katılan alüminyum bu alaşımların döküm özelliklerini iyileştirip ve mukavemet değerlerini arttırmaktadır [1, 33, 57]. İkili çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik, mukavemet, korozyon ve aşınma direnci değerlerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir. Bu yetersizliği gidermek için bu alaşımlara bakır, silisyum, nikel, magnezyum ve mangan gibi elementler katılmaktadır [1, 11, 12, 41-43, 51, 52]. Yapılan araştırmalar sonucunda bakırın, söz konusu alaşımların mukavemet değerleri ve korozyon direncini arttırmada en etkin alaşım elementi olduğu görülmüştür [11, 12, 41-43, 58, 59]. Tablo 5’de dökülmüş durumdaki çinko esaslı alaşımlar ile bazı geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Çinko esaslı alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan diğer bir yöntem de ısıtılma işlemidir. Kararlı içyapılar elde etmek amacıyla uygulanan T5 ısıtılma işlemi bu alaşımların dendritik yapılarını etkilememekte, ancak sertlik ve mukavemet değerlerini düşürmektedir [16, 44]. Bu alaşımların dendritik yapılarını ortadan kaldırmanın yanı sıra sertlik ve mukavemet değerlerini arttırmak amacıyla T6, yapısal ve boyutsal kararlılık elde etmek amacıyla da T7 ısıtılma işlemleri uygulanmaktadır [27,28]. Söz konusu ısıtılma işlemler çözündürme, su verme ve yapay yaşlandırma aşamalarını içermektedir [27,28]. T5 ısıtılma işlemi sırasında alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen azalma dökümden kaynaklanan artık veya kalıntı gerilmelerin giderilmesine ve katılaşma sonucunda oluşan metastabil fazların kararlı fazlara dönüşmesine, T6 ısıtılma işlemi sırasında söz konusu değerlerde meydana gelen artış çökelme sertleşmesi, T7 ısıtılma işlemi sonunda bu değerlerde meydana gelen azalma ise aşırı yaşlanma mekanizmalarına dayandırılarak açıklanmaktadır [12, 27-28].

Çinko esaslı alaşımların ergime sıcaklıkları pek çok mühendislik alaşımının söz konusu değerlerinden düşük olduğundan kullanım sıcaklıkları da düşüktür. Sıcaklık arttıkça bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri düşmekte, süneklik değerleri ise artmaktadır [33, 45, 53]. Bu nedenle ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarının 90°C, ZA-27 alaşımının ise 120°C’nin altındaki sıcaklıklarda kullanılmaları tavsiye edilmektedir [44].

Bakır katkısının ikili Zn-27Al ve Zn-40Al alaşımlarının mekanik özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar [58, 59] sonucunda söz konusu alaşımların sertliklerinin artan bakır oranıyla sürekli arttığı, çekme dayanımlarının ise %2

oranına kadar artan bakır oranıyla arttığı ve bu oranın üzerine çıkılması durumunda azaldığı görülmüştür.

Çinko esaslı alaşımlar mühendislik uygulamalarında kullanılan diğer demir dışı malzemelere kıyasla daha düşük kırılma tokluğuna sahiptirler, ancak bu alaşımların kırılma tokluğu artan alüminyum oranı ile artmaktadır [33, 44]. Çinko esaslı alaşımların yorulma ömrü ve yorulma dayanımlarının artan alüminyum ve bakır oranlarıyla arttığı, ancak bakır oranının %2'nin üzerine çıkması durumunda söz konusu değerlerin azaldığı belirlenmiştir [57]. Ayrıca, söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerleri arttıkça yorulma dayanımlarının arttığı gözlenmiştir [57].

1.3.3. Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Yapılan araştırmalar alüminyum, bakır, silisyum ve magnezyum içeren çinko esaslı alaşımlarının geleneksel yatak malzemelerine göre daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [2, 3, 9, 10, 15, 51-52]. Söz konusu alaşımların üstün tribolojik özellikler sergilemesi bu alaşımların çok fazlı yapıya sahip olmalarının yanı sıra aşınma yüzeylerinde oluşan çinko oksit ve alüminyum oksit tabakalarına dayandırılmaktadır [56, 60]. Şöyle ki, bu alaşımların içyapısında bulunan alüminyumca zengin α fazı ile bakır ve silisyumca zengin fazlar yük taşıma görevi yaparken, çinkoca zengin η fazı kaymayı kolaylaştırmaktadır [9, 61]. Yapılan çalışmalar bakır ve/veya silisyum içeren Zn-25Al, Zn-27Al ve Zn-40Al esaslı alaşımların SAE 660 bronzundan çok daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [2, 9, 11, 12, 14, 41, 58, 59, 62].

Yapılan araştırmalar sonucunda matris yapıları aynı olduğu halde Zn-Al-Si alaşımlarının Zn-Al-Cu alaşımlarından daha üstün tribolojik davranış sergiledikleri görülmüştür [2, 10]. Bu durum yapı içerisinde bulunan sert silisyum parçacıklarının aşınma direncini arttırmada T' fazından daha etkili olduklarını göstermektedir [20, 14]. Çinko esaslı alaşımların sertlik ve mukavemetini arttırmada bakırın silisyumdan, aşınma direncini arttırmada ise silisyumun bakırdan daha etkili olduğu belirlenmiştir [1, 2, 10, 14]. Son zamanlarda geliştirilen Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının çinko esaslı alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir [12].

Tablo 5. Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri [7,47].

Alaşım	Döküm yöntemi	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Brinell sertlik değeri (BSD)	Darbe dayanımı (J)
ZA8	Kum	248-276	193-200	87,6	1-2	82-89	17-24
	Kokil	221-255	200-214	85,5	1-2	85-90	----
	Basıncılı	365-386	283-296	----	6-10	95-110	32-48
ZA12	Kum	275-317	207-214	82,1	1-2	92-96	23-30
	Kokil	310-345	250-275	83	1,5-2,5	85-95	----
	Basıncılı	393-414	310-331	----	4-7	95-115	20-37
ZA27	Kum	400-441	365-372	77,9	3-6	110-120	34-54
	Kokil	428-455	358-393	----	2-3	110-117	----
	Basıncılı	407-441	359-379	----	2,5	105-125	9-16
SAE 40 pirinci	Kum	255	117	83	30	60	15
SAE 65 bronzu	Kum	290	172	110	10	105	6
SAE 660 bronzu	Kum	240	124	100	20	65	8
Kır dökme demir	Kum	345	221	172	10	119-156	54-88

1980'li yıllarda yapılan başka bir çalışma sonucunda silisyum içeren Zn-25Al esaslı alaşımların aşınma dirençlerinin artan silisyum oranı ile arttığı belirlenmiştir [2]. Ayrıca, bakır veya silisyum içeren Zn-25Al esaslı üçlü alaşımların aşınma direnci bakımından ötektoid ve monotektoid bileşimlere sahip çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımlara hemen hemen eşdeğer oldukları görülmüştür [2]. Ancak, Zn-25Al esaslı dördü alaşımların tribolojik özellikleri hakkında herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu durum bu alanda bir eksiklik olarak göze çarpmaktadır.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Çinko esaslı alaşımlar (Zamak, ALZEN 305, ZA-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27 ve Zn-40Al-2Cu-2Si) sahip oldukları üstünlükler sayesinde pek çok mühendislik uygulamasında beyaz metal (Babbitt), bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerinin yerini almaktadır. Yatak malzemelerinin sertlik ve mukavemet değerlerinin yeterli, sürtünme katsayısının düşük ve aşınma direncinin yüksek olması istenir. Ancak, ikili çinko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin pek çok uygulama için yetersiz olduğu bilinmektedir. Bu nedenle söz konusu alaşımlara bakır, silisyum ve magnezyum gibi alaşım elementleri katılarak bunların hem mekanik hem de tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi yoluna gidilmektedir. Yapılan çalışmalarda çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımların bronz ve dökme demir gibi geleneksel yatak alaşımlarına kıyasla daha yüksek aşınma direnci sergiledikleri gözlenmiştir. Bu alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik mukavemet ve aşınma direnci monotektoid bileşime sahip alaşımlardan (Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Si ve Zn-40Al-2Cu-2Si) elde edilmiştir. Ancak, bütün bu üstünlüklerin yanı sıra bakır içeren çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımlarda biri boyutsal kararsızlık, diğeri de düşük süneklik olmak üzere iki önemli sorunla karşılaşmıştır. Boyutsal kararsızlık problemi büyük ölçüde döküm sırasında oluşan metastabil ϵ (CuZn_4) fazının kullanım sırasında dördü faz reaksiyonu ($\epsilon + \alpha \rightleftharpoons T' + \eta$) ile T' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$) fazına dönüşmesinden, yetersiz süneklik ise çinko ve bakırca zengin fazların gevrek davranış sergilemelerinden kaynaklanmaktadır. Bu sorunları gidermek veya en aza indirmek amacıyla çeşitli element katkılarının yanı sıra farklı ısıl işlemlerin uygulanması yoluna gidilmektedir. Ayrıca, çinko-esaslı alaşımların esasını oluşturan ikili Zn-Al alaşımları içerisinde mekanik özellikler açısından en uygun kimyasal bileşimi belirleme çalışmaları da sürdürülmektedir. Zn-25Al-esaslı alaşımlar ilk kez 1980'li yıllarda üretilerek incelenmiş ve bu alaşımların

mukavemet ve aşınma direnci bakımlarından çinko esaslı ticari alaşımlara eşdeğer, bronzlardan ise üstün oldukları belirlenmiştir. Ancak, bu çalışmalar sınırlı sayıdaki alaşımlarla gerçekleştirilmiş ve bakır ve silisyumun söz konusu alaşımların özelliklerine etkileri tam olarak ortaya konulamamıştır. Sözü edilen çalışmanın devamı niteliğinde olan bu çalışmada ise bakır ve/veya silisyum katkılarıyla T6 ısıtılmasının Zn-25Al esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin incelenerek mühendislik uygulamaları için en uygun kimyasal bileşim ve çalışma koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Alaşımın Üretimi ve Kimyasal Analizi

Bu çalışmada üç adet ikili çinko-alüminyum (Zn-Al), beş adet üçlü çinko-alüminyum-bakır (Zn-25Al-Cu), dört adet dördü çinko-alüminyum-bakır-silisyum (Zn-25Al-3Cu-Si) alaşımı kokil kalıp döküm yöntemiyle üretilmiştir. Alaşımın üretiminde yüksek saflıkta (%99,9) çinko, ticari saflıkta (%99,70) alüminyum ve elektrolitik bakır kullanılmıştır. Bakır içeren alaşımların üretiminde alüminyum-bakır (Al-50Cu) alaşımı, Si içeren alaşımların üretiminde ise Al-12Si (Etial-140) ve Al-20Si (Etial-190) alaşımları kullanılmıştır. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirilmiştir. Ergitilen alaşımlar 700°C dolayındaki bir sıcaklıkta çelikten yapılmış ve oda sıcaklığında tutulan 45 x 60 x 190 mm boyutlarındaki bir kalıba dökülerek katılaştırılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada karşılaştırma yapmak amacıyla SAE 660 bronz kullanılmıştır. Piyasadan temin edilen bu bronz savurmalı döküm yöntemiyle üretilmiştir. Alaşımın kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon spektrometresi (AAS) yöntemiyle belirlenmiştir.

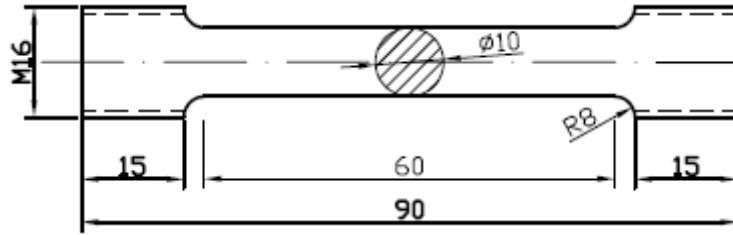
2.2. Alaşımın Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

İkili Zn-25Al ve Zn-25Al esaslı üçlü ve dördü alaşımlarından alınan numuneler standart metalografi yöntemiyle hazırlandıktan sonra %6 nital çözeltisi (6ml HNO₃ + 60ml C₂H₆O) içerisinde dağlanmıştır. SAE 660 bronzunun dağlanmasında ise su ve demir klorür içeren hidroklorür çözeltisi (5 g FeCl₃ + 10 ml HCl + 50 ml H₂O) kullanılmıştır. Hazırlanan metalografi numuneleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak incelenmiş ve içyapılarını gösteren fotoğraflar çekilmiştir. Söz konusu içyapıları oluşturan fazlar enerji dispersif spektroskopisi (EDS) yöntemiyle analiz edilerek tanımlanmıştır.

Alaşımın sertliği Rockwell-B sertlik ölçme yöntemiyle 100 kg yük altında 1,6 mm çapında bir çelik bilya uç kullanılarak belirlenmiştir. Alaşımın mikrosertliği ise Vickers sertlik ölçme yöntemiyle 10 g'lık yük altında ölçülmüştür. Her bir sertlik numunesi üzerinde en az beş ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

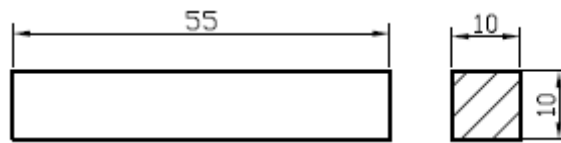
Alaşımın yoğunluğunu belirlemek amacıyla talaşlı işleme hazırlanan numunelerin boyutları $\pm 0,001$ mm hassasiyetine sahip bir mikrometre ile ölçülerek hacimleri hesaplanmıştır. Kütle ölçümlerinde ise $\pm 0,01$ mg hassasiyetine sahip bir terazi kullanılmıştır. Ölçülen kütle değerleri hacim değerlerine bölünerek numunelerin yoğunlukları belirlenmiştir.

Alaşımın çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri TS 138 B standardına göre hazırlanan numunelerin $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında çekme deneyine tabi tutulmaları sonucunda belirlenmiştir. Basma deneyleri ise 10×10 mm boyutlarındaki numuneler ile $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşım için en az 3 numune kullanılmış ve yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak alaşımın çekme ve basma dayanımları ile kopma uzaması değerleri belirlenmiştir. Kullanılan çekme numunenin teknik resmi Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Alaşımın çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin belirlenmesinde kullanılan numunenin teknik resmi

Alaşımın darbe direncinin ölçülmesi amacıyla talaşlı işleme $10 \times 10 \times 55$ mm boyutlarına sahip çentiksiz numuneler hazırlanmış ve deneyler 30 kpm (295 J) kapasiteye sahip bir Charpy deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçüm için üç numune kullanılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak alaşımın darbe dirençleri belirlenmiştir. Kullanılan tipik bir darbe numunesinin teknik resmi Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Alaşımın darbe direncinin belirlenmesinde kullanılan numunenin teknik resmi

2.3. Isıl İşlemler

Üretilen alaşımlar içerisinde en yüksek çekme ve basma dayanımına sahip olan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımına, mukavemet değerlerini daha da yükseltmek ve dolayısıyla tribolojik özelliklerini iyileştirmek için T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, 350°C sıcaklıkta 36 saat süreyle çözündürme işlemine tabi tutulan alaşımın suda soğutulduktan sonra 150°C sıcaklıkta 1,5 dakikalık bir süre yaşlandırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu işlem için en uygun yaşlandırma süresinin belirlenmesi amacıyla çözündürme ve su verme sonrası 150°C sıcaklıkta yaşlandırılan alaşımın sertliği 50 saatlik bir süre boyunca belirli aralıklarla ölçülerek sertliğin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri elde edilmiştir. Bu eğriye göre alaşımın sertliği belirtilen yaşlandırma sıcaklığında 1,5 dakika sonunda en yüksek değerine ulaşmaktadır. Başka bir deyişle 1,5 dakika sonunda yaşlanma aşaması tamamlanıp, aşırı yaşlanma aşaması başlamaktadır. Bu nedenle uygulanan T6 ısıl işlemi için yaşlandırma süresi 1,5 dakika olarak alınmıştır.

2.4. Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Üretilen alaşımlar ve SAE 660 bronzunun sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesi için çubuk-disk (pin-on-disk) esaslı bir deney düzeneği kullanılmıştır. Bu deney düzeneğinin önden ve üstten görünümünü sergileyen teknik resimler sırasıyla Şekil 6 ve 7'de, genel ve ayrıntılı yapısını gösteren fotoğraflar ise Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Söz konusu düzeneğe 3 kW gücünde bir elektrik motoru, bir disk, bir numune tutucusu ve bir yükleme kolundan oluşmaktadır. Motorun dönme hızı elektrik devresine yerleştirilen bir hız kontrol ünitesi ile ayarlanmaktadır. Çapı 200 mm olan disk SAE 1045 (Fe- 0,46 %C- 0,6 %Mn, 0,035 %P- 0,03%S) çeliğinden imal edilmiş olup, ısıl işlemle 50 RSD-C değerine kadar sertleştirilmiştir. Sertleştirme işleminden sonra söz konusu disk $\pm 3 \mu\text{m}$ 'lik bir hassasiyetle taşlanmıştır. Ayrıca, bu düzeneğe bir yağlama sistemi ve bir sürtünme kuvveti ölçüm devresi bulunmaktadır.

Bu çalışmada yükleme, yükleme kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle; yağlama ise yüksek bir yere yerleştirilen depodan ince bir hortum yardımıyla alınan yağın bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra disk üzerine damlatılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yağlı deneylerde kuru sürtünmenin meydana gelmemesi için deneye başlamadan önce kayma

yolu üzerine bir damla yağ damlatılmıştır. Deneylerde SAE 20W/50 normuna uygun motor yağı kullanılmıştır.

Numunelerin sıcaklıkları bakır-nikel termoeleman çifti kullanılarak ölçülmüştür. Bunun için söz konusu termoeleman çifti aşınma numunesinin temas yüzeyinden 2 mm yukarıya açılan bir deliğe yerleştirilmiştir. Bu termoeleman çiftinden alınan gerilim deney süresince bir veri toplama kartı yardımıyla bilgisayara aktararak numunelerin çalışma sıcaklıkları belirlenmiştir.

Sürtünme kuvvetini ölçmek için numune tutucusu ile düzenekteki sabit bir mesnet arasına kapasitesi 50 kg olan S-50 tipi bir yük hücresi yerleştirilmiştir. Ancak, deneylere başlamadan önce söz konusu yük hücresinin gerilim-kuvvet ilişkisini gösteren bir kalibrasyon doğrusu belirlenmiştir, Şekil 10. Bunun için yük hücresinin bir ucuna belirli yükler asarak meydana gelen gerilim değerleri ölçülmüştür. Bu kalibrasyon doğrusu çalışma sırasında yük hücresinden alınan gerilim değerlerine karşı gelen sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılmıştır.

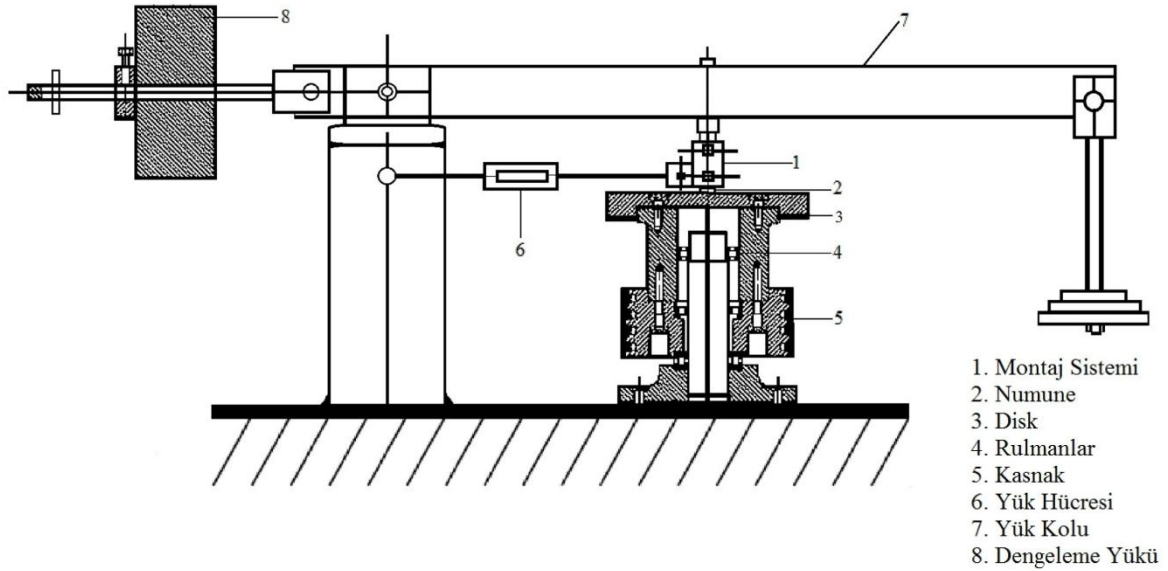
Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzundan talaşlı işlem ile 10 x 15 x 26,6 mm boyutlarında aşınma numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelerin teknik resmi Şekil 11'da verilmiştir. Aşınma numuneleri deneylere başlamadan önce bir ultrasonik temizleme cihazında sırasıyla trikloretilen (C_2HCl_3) ve alkol-aseton karışımı içerisinde temizlenerek kurulanılmıştır. Temizlenen numunelerin kütleleri 0,01 mg'lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçülmüştür. Aşınma deneyleri sonunda numuneler sözü edilen ultrasonik temizleme yöntemiyle temizlenerek tartılmış ve böylece aşınma ile meydana gelen kütle kayıpları belirlenmiştir. Belirlenen kütle kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek hacim kaybı değerleri elde edilmiştir.

Üretilen Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme ve aşınma davranışları kuru (yağsız) ve yağlı durumlarda incelenmiştir. Yağsız durumda yapılan deneyler 1-4 MPa basınç ve 0,5-2,5 m/s kayma hızı aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri 2000 m'lik kayma yolu boyunca sürekli kaydedilmiş, aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerleri ise deney sonunda yapılan kütle ölçümleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, bu alaşımlar yağsız durumda sabit bir basınç (2 MPa) ve sabit bir kayma hızında (1 m/s) 2000 m'lik kayma yolu alınmaya kadar deneylere tabi tutularak sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybının alınan yola göre değişimleri incelenmiştir.

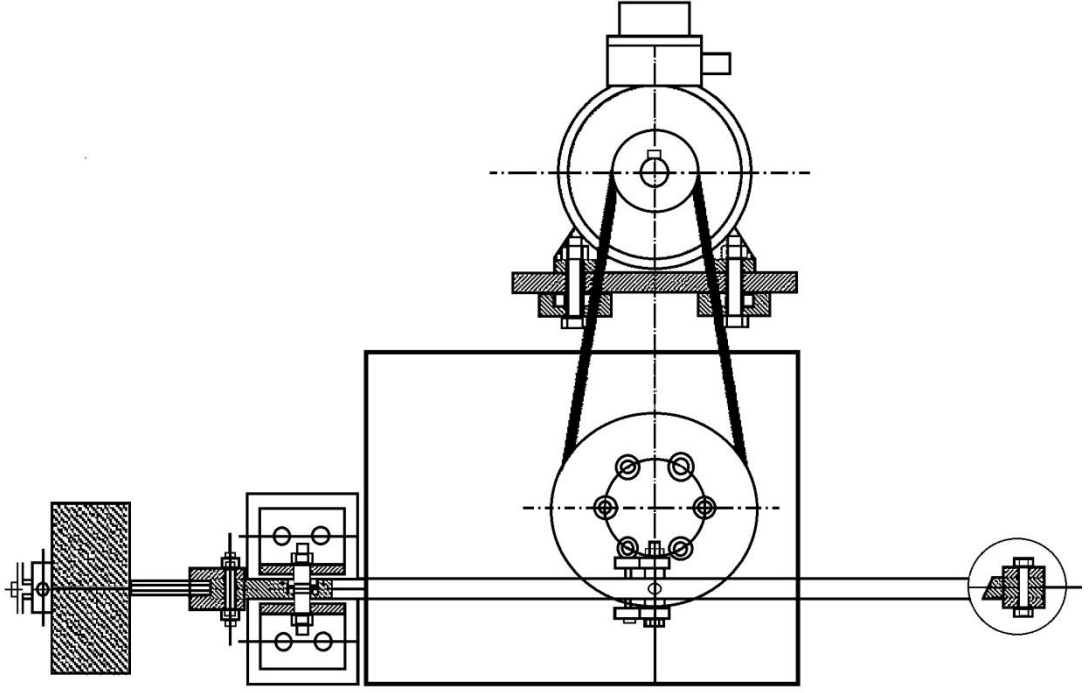
Basınç, kayma hızı ve yağ debisinin söz konusu alaşımların sürtünme ve aşınma davranışlarına etkilerini belirlemek için hazırlanan aşınma numuneleri 1-8 MPa arasında yer alan farklı basınçlarda, 1-3 m/s aralığında değişen farklı kayma hızlarında ve 0,5-2,5 cm³/saat arasındaki farklı yağ debilerinde 20 km'lık kayma yolu tamamlanuncaya kadar deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca, bu alaşımların söz konusu davranışlarının alınan yola göre değişimlerini incelemek amacıyla daha uzun mesafeli (80 km) deneyler yapılmıştır. Bu deneyler 6 MPa'lık basınç, 2 m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saat'lik yağ debisinde gerçekleştirilmiştir. Uzun mesafeli deneyler sırasında 5 ölçüm yapılmış ve her bir ölçüm için farklı bir numune kullanılmıştır.

2.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Üretilen numunelerinin aşınma davranışlarını izlemek için aşınma numunelerinin yüzeyleri gerek deneylere başlamadan önce, gerekse deneylerden sonra SEM'de ikincil elektron görüntü yöntemiyle incelenerek tipik görüntüler elde edilmiştir. Bu numunelerin yüzeylerinin altında meydana gelen yapısal değişimler ise, SEM metalografisinin yanı sıra mikrosertlik ölçümleriyle incelenmiştir.



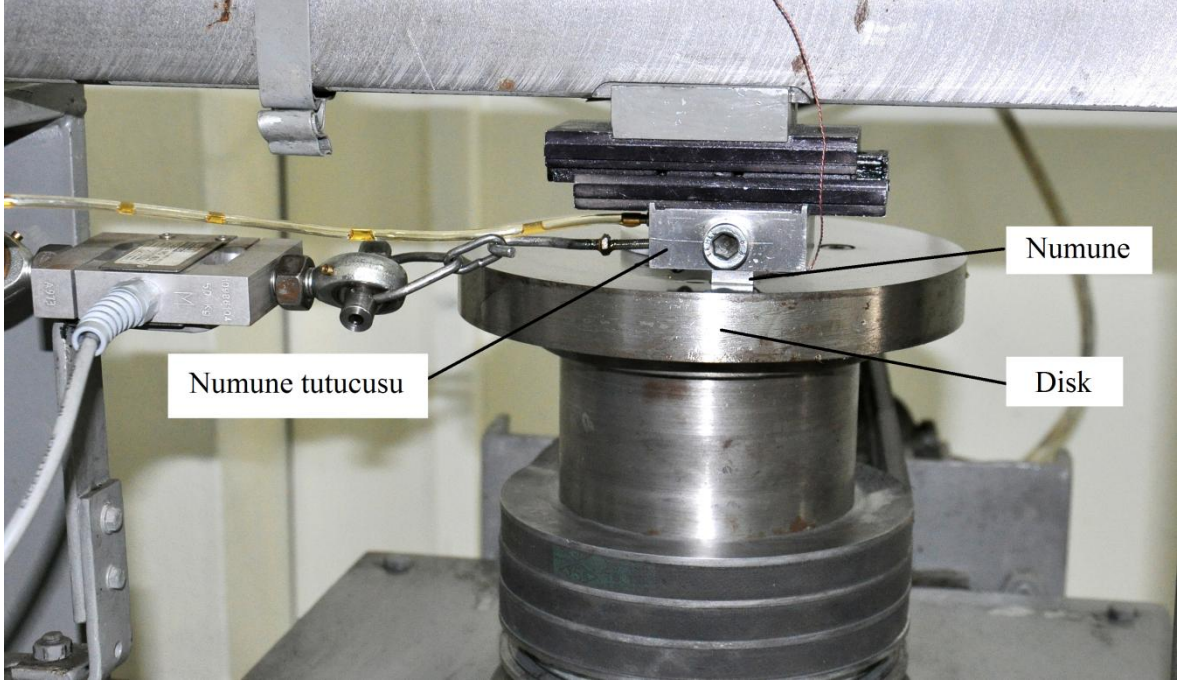
Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (önden görünüm)



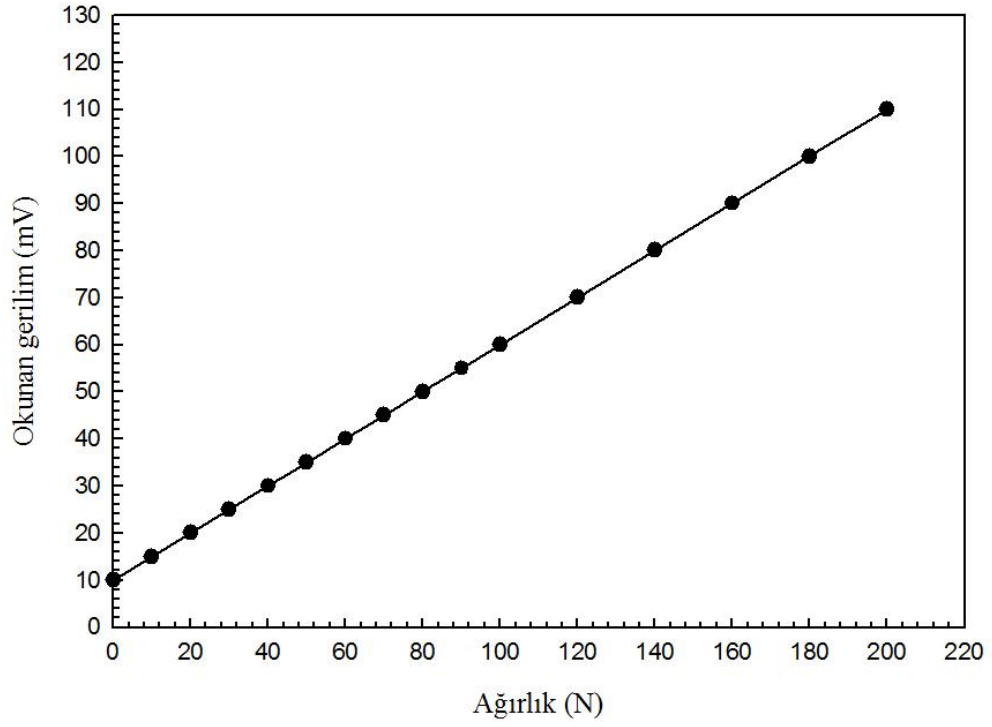
Şekil 7. Aşınma deney düzeneğinin kesit resmi (üstten görünüm)



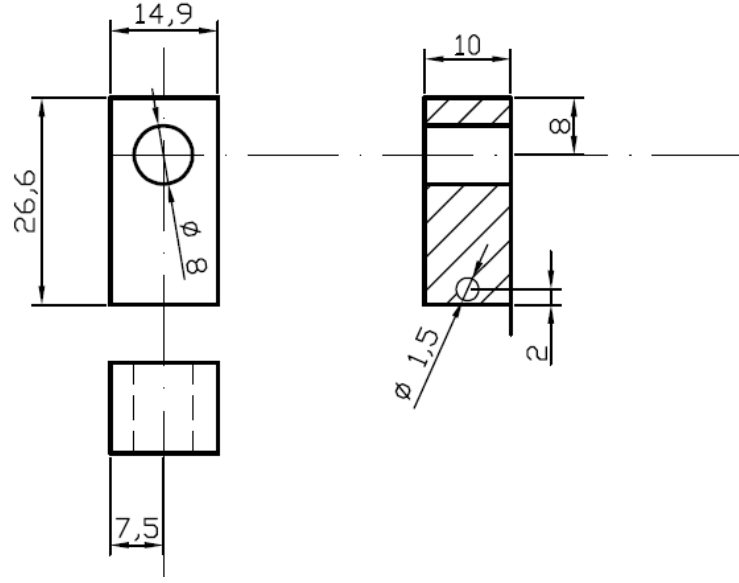
Şekil 8. Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 9. Aşınma deney düzeneğindeki disk, numune ve numune tutucusunun yakından görünümü



Şekil 10. Sürtünme kuvvetinin ölçümünde kullanılan yük hücresine (S50) ait kalibrasyon doğrusu



Şekil 11. Alaşımların sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan numunelerin teknik resmi

3. BULGULAR

3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

Üretilen çinko esaslı ikili, üçlü ve dörtdü alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 6’da; SAE 660 bronzunun kimyasal bileşimi ise Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 6. Zn-Al esaslı alaşımların kimyasal bileşimleri

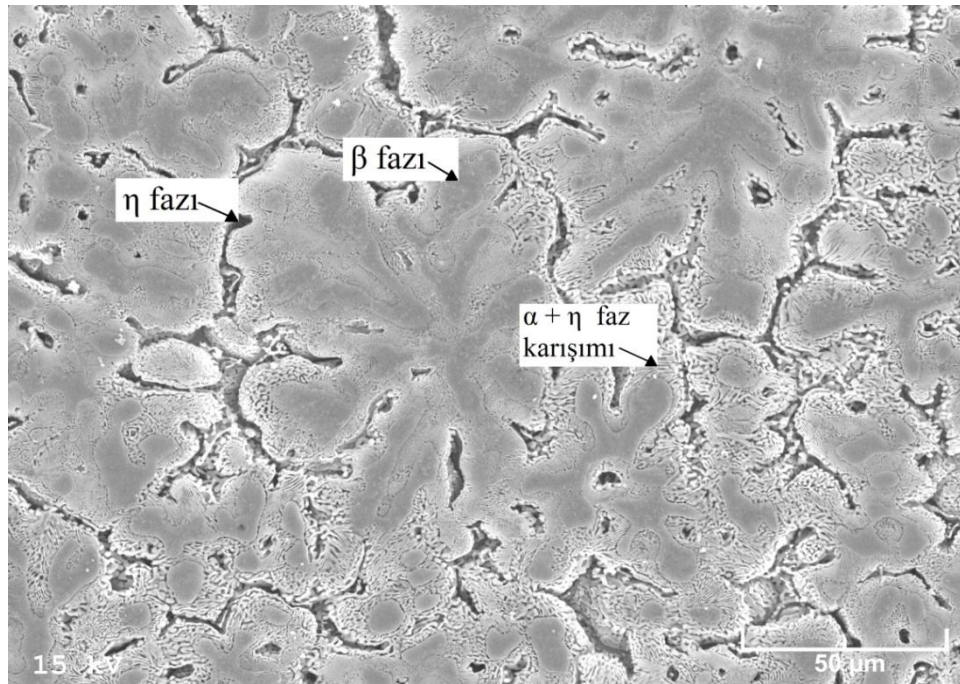
Alaşım	Kimyasal bileşim oranı (%)			
	Zn	Al	Cu	Si
Zn-20Al	78,8	21,2	-	-
Zn-25Al	75,9	24,1	-	-
Zn-30Al	69,5	30,5	-	-
Zn-25Al-1Cu	73,5	25,5	1	-
Zn-25Al-2Cu	72,8	25,1	2,1	-
Zn-25Al-3Cu	71,8	25,1	3,1	-
Zn-25Al-4Cu	70,8	25,3	3,9	-
Zn-25Al-5Cu	69,8	25,4	4,8	-
Zn-25Al-3Cu-1Si	70,8	25,1	3	1,1
Zn-25Al-3Cu-2Si	69,8	24,9	3,1	2,1
Zn-25Al-3Cu-3Si	69	24,9	3	3,1
Zn-25Al-3Cu-4Si	67,9	25,1	2,9	4,1

Tablo 7. SAE 660 bronzunun kimyasal bileşimi

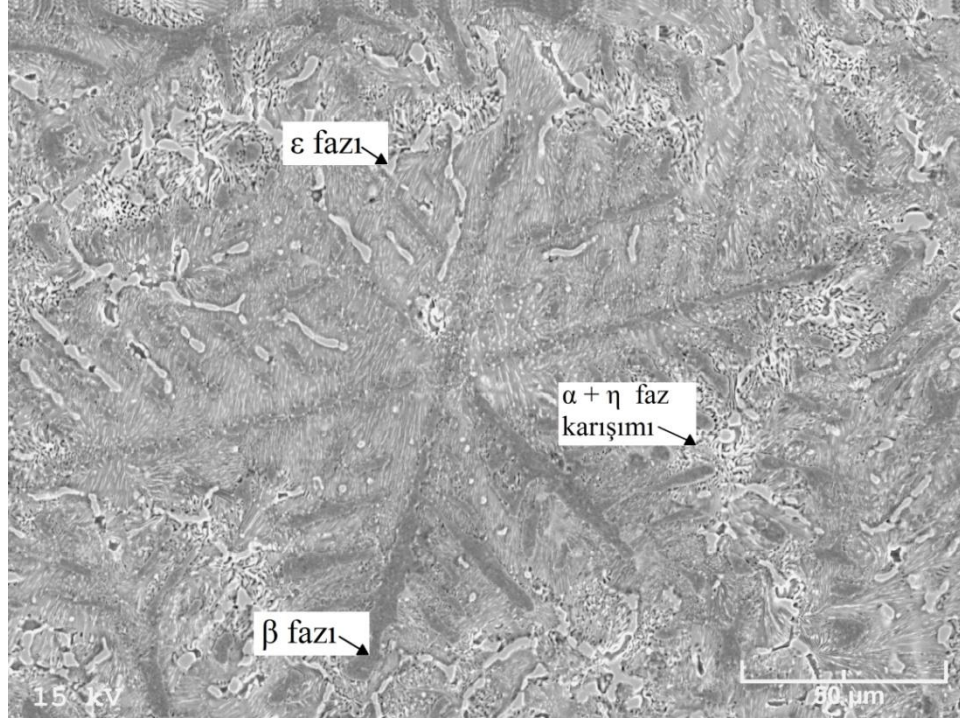
Kimyasal bileşim oranı (%)			
Cu	Sn	Pb	Zn
82,7	6,9	5,9	4,5

3.2. Yapısal İncelemelerden Elde Edilen Bulgular

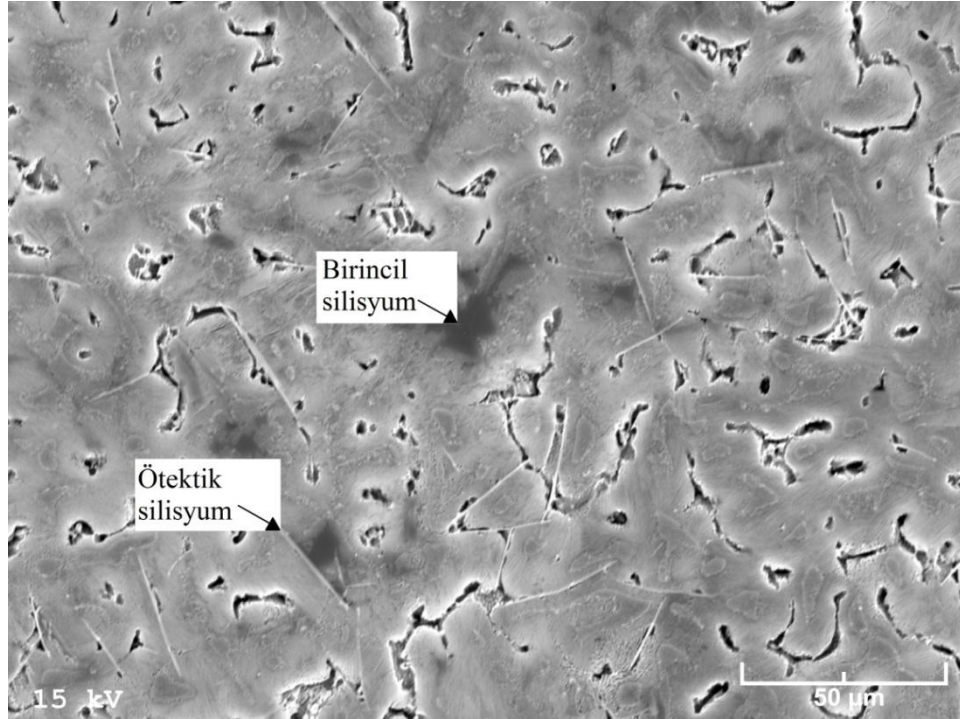
İkili alaşımlar içerisinde uygun mukavemet ve süneklik değerlerine sahip olan Zn-25Al alaşımı baz olarak alınmıştır. Bu alaşımın dökülmüş durumdaki içyapısının göbekli β dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin η ve alüminyum ve çinkoca zengin $\alpha + \eta$ fazlarından oluştuğu görülmüştür. Bu yapının SEM görüntüsü Şekil 12’de verilmiştir. Bu alaşıma düşük oranlarda bakır katıldığında içyapıda önemli değişim meydana gelmediği, ancak bakır oranının %3 seviyesine çıkarılması durumunda dendritler arası bölgelerde bakırca zengin ε (CuZn_4) fazının oluştuğu gözlemlenmiştir. Zn-25Al-3Cu alaşımının içyapısının SEM görüntüsü Şekil 13’de verilmiştir. %1 oranında silisyum içeren dördü Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımın dökülmüş durumda içyapısında ise β , α , η ve ε fazlarının yanı sıra silisyum parçacıklarının da bulunduğu gözlemlenmiştir, Şekil 14. T6 ısıtma işlemi sonunda bu alaşımın dendritik yapısı tamamen ortadan kalkıp, bunun yerini irili ufaklı α taneleri alırken; Si ve ε (CuZn_4) parçacıklarında herhangi bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür, Şekil 15. T7 olarak adlandırılan uzun süreli (50 saat) yaşlandırma sonrasında ise T6 ısıtma işlemi görmüş yapıdaki fazların yanı sıra çinkoca zengin çökeltilerin oluştuğu gözlemlenmiştir, Şekil 16. SEA 660 bronzunun içyapısının bakırca zengin α dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid $\alpha + \delta$ ve kurşunca zengin fazlardan oluştuğu belirlenmiştir. Bu yapının SEM görüntüsü Şekil 17’de verilmiştir.



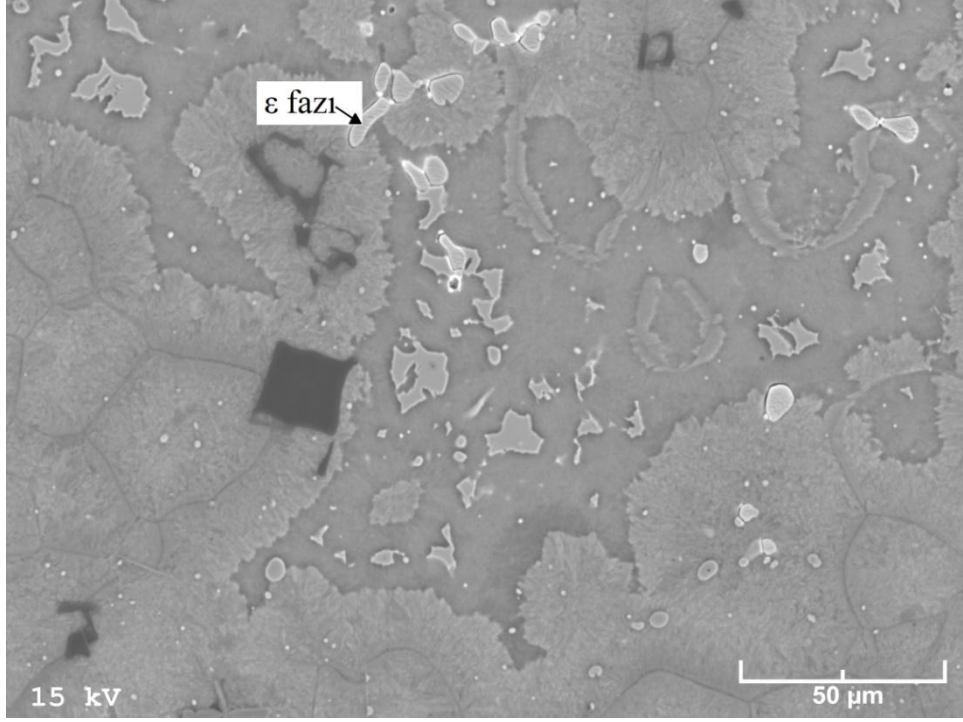
Şekil 12. Zn-25Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



Şekil 13. Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



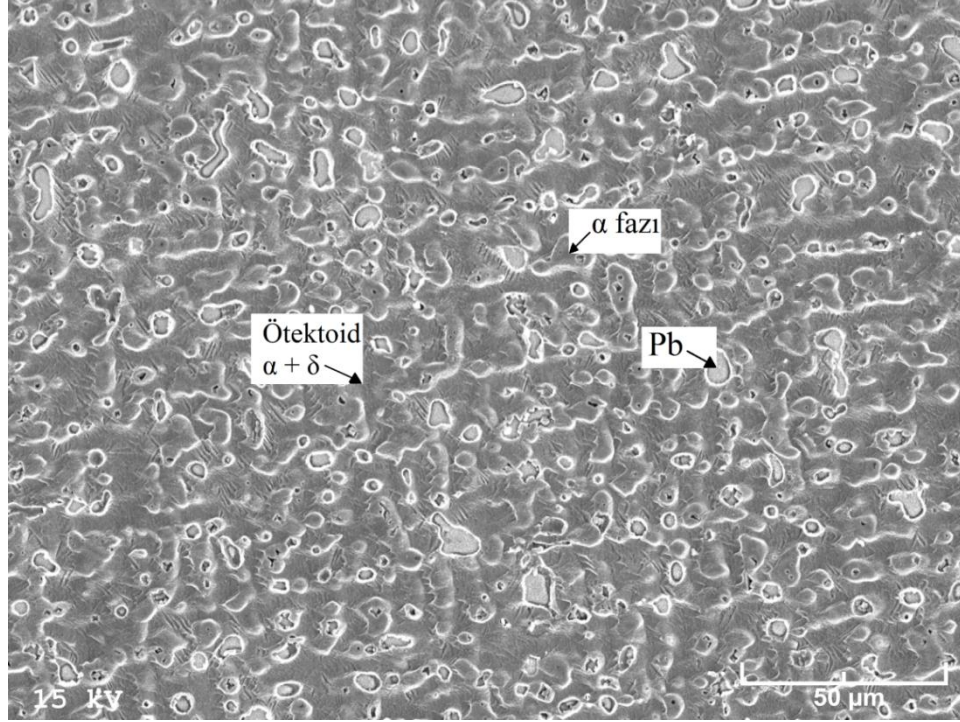
Şekil 14. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı



Şekil 15. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıt işleme görmüş durumdaki içyapısı



Şekil 16. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıt işleme görmüş durumdaki içyapısı



Şekil 17. SAE 660 bronzunun içyapısı

3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

İkili Zn-(20-30)Al, üçlü Zn-25Al-(1-5)Cu ve dördü Zn-25Al-3Cu-(1-4)Si alaşımları ile SAE 660 bronzunun sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri Tablo 8’de, üçlü alaşımların söz konusu değerlerin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 18’de verilmiştir. Bu alaşımların sertlik, çekme ve basma dayanımı değerleri artan bakır oranı ile sürekli artmakta, basma dayanımları ise %3 Cu oranının üzerindeki değerlerde hemen hemen sabit kalmaktadır. Söz konusu alaşımların yoğunluğu artan bakır oranı ile artarken, darbe direnci ve kopma uzaması azalmaktadır. Ancak, artan bakır oranı ile azalan kopma uzamasının %2-3 Cu oranı aralığında sabit kaldıktan sonra azalmaya devam ettiği gözlenmiştir.

Silisyum katkısının, üçlü alaşımlar içerisinde en uygun (optimum) sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerine sahip olan Zn-25Al-3Cu alaşımının fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerini gösteren eğriler Şekil 19’da verilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında alaşımların sertlik, çekme ve basma dayanımlarının artan silisyum oranı ile arttığı; ancak çekme dayanımının %1 Si, sertlik ve basma dayanımının ise %3 Si oranlarının üzerine çıkılması durumunda azaldıkları görülmektedir. Ayrıca, bu eğriler söz

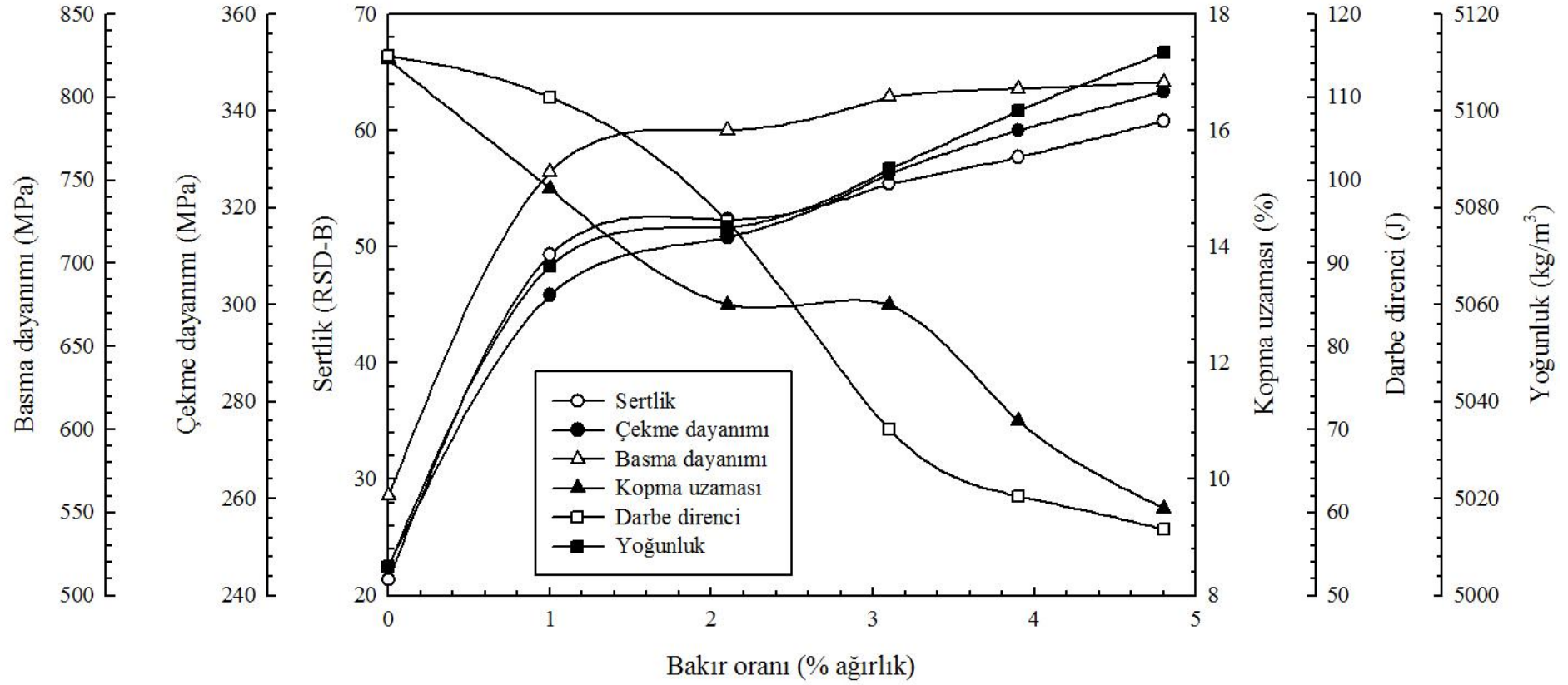
konusu alaşımların yoğunluk, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin artan silisyum oranı ile azaldığını göstermektedir.

Çözündürme ve su verme işlemleri sonrasında yapay yaşlandırılan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri Şekil 20’de verilmiştir. Bu eğri söz konusu alaşımının sertliğinin yaşlandırma sırasında artarak 1,5 dakikalık bir süre sonunda en yüksek (tepe noktası) değerine ulaştığını ve daha sonra artan yaşlandırma süresi ile azaldığını göstermektedir. Bu eğriye göre uygulama süresi belirlenen T6 ısıl işleminin Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının sertlik, çekme ve basma dayanımlarını arttırdığı; darbe ve kopma uzaması değerlerini ise azalttığı görülmüştür, Tablo 8.

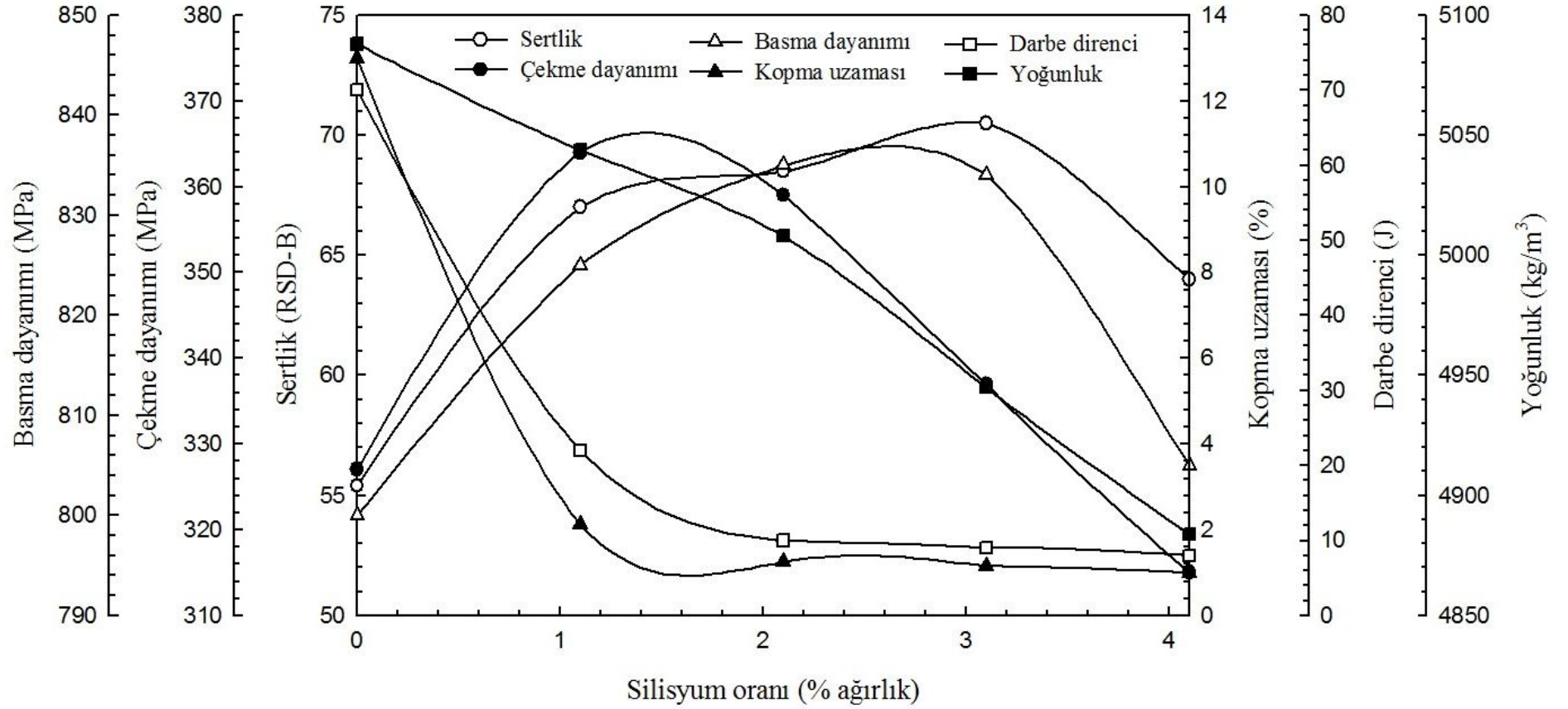
Tablo 8. İkili Zn-(20-30)Al, üçlü Zn-25Al-(1-5)Cu ve dördü Zn-25Al-3Cu-(1-4)Si alaşımları ile SAE 660 bronzunun sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri

Alaşım	Sertlik (RSD-B)	Çekme Dayanımı (MPa)	Basma Dayanımı (MPa)	Darbe Direnci (J)	Kopma Uzaması (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
Zn-20Al	18,25	235	550	79	10,55	5371
Zn-25Al	21,36	246	560	115	17,21	5006
Zn-30Al	31,7	263	580	117	20,6	4708
Zn-25Al-1Cu	49,3	302	755	110	15	5068
Zn-25Al-2Cu	52,3	314	780	95	13	5076
Zn-25Al-3Cu	55,4	327	800	70	13	5088
Zn-25Al-4Cu	57,7	336	805	62	11	5100
Zn-25Al-5Cu	60,8	344	809	58	9,5	5112
Zn-25Al-3Cu-1Si	67	364	825	22	2,13	5044
Zn-25Al-3Cu-1Si*	84,5	490	1000	11	1,3	5044
Zn-25Al-3Cu-2Si	68,5	359	835	10	1,25	5008
Zn-25Al-3Cu-3Si	70,5	337	834	9	1,15	4945
Zn-25Al-3Cu-4Si	64	315	805	8	1	4884
SAE 660 bronz	34,6	273	800	150	13	8967

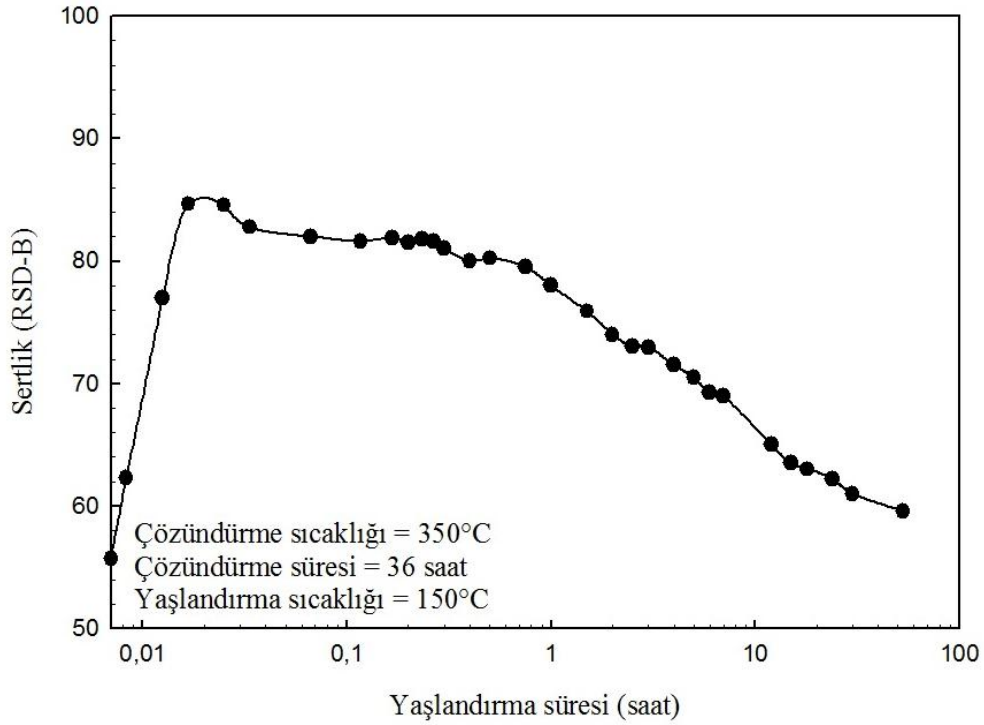
* T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş



Şekil 18. Zn-25Al-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, kopma uzaması, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 19. Zn-25Al-3Cu-(0-4)Si alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, kopma uzaması, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 20. Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının sertliğinin yaşlandırma süresine göre değişimini gösteren eğri

3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Yağsız durumda 2 MPa basınç ve 1 m/s kayma hızında 2000 m'lik yol alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımları ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri Tablo 9'de, hacim kaybı değerleri ise Tablo 10'da verilmiştir. Bu değerlerin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 21-23'de verilmiştir. Bu eğriler, alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde artıp, bir tepe noktasından geçtikten sonra bir miktar azalarak kararlı durumu yansıtan sabit değerlere ulaştıklarını göstermektedir. Yağsız durumda deneye tabi tutulan alaşımlar içerisinde en düşük sürtünme katsayısı SAE 660 bronzundan, en yüksek sürtünme katsayısı ise Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımından elde edilmiştir. Alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının ise alınan yol ile hemen hemen doğrusal bir değişim sergilediği gözlenmiştir. Belirtilen koşullarda yapılan aşınma deneylerinde en düşük hacim kaybının dökülmüş durumdaki Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımında, en büyük hacim kaybının ise SAE 660 bronzunda meydana geldiği

görülmüştür. Başka bir deyişle en yüksek aşınma direnci dökülmüş durumdaki Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımından, en düşük aşınma direnci ise SAE 660 bronzundan elde edilmiştir.

Yağsız durumda farklı basınçlar altında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımları ile SAE 660 bronzundan elde edilen sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri Tablo 11-13'de; bu değerlerin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 24-26'de verilmiştir. Bu eğriler basınç arttıkça söz konusu alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarında önemli bir değişimin meydana gelmediğini, ancak çalışma sıcaklıkları ve hacim kaybı değerlerinin arttığını göstermektedir.

Yağsız durumda farklı kayma hızlarında 2000 m'lik yol alınincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımlarından elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerleri Tablo 14-16'de; bu değerlerin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 27-29'de verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan kayma hızı ile arttığını göstermektedir. Ancak en büyük artış oranının (% 130) sıcaklıkta, en düşük artış oranının (% 27) hacim kaybında meydana geldiği görülmüştür.

Tablo 9. Yağsız durumda 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri

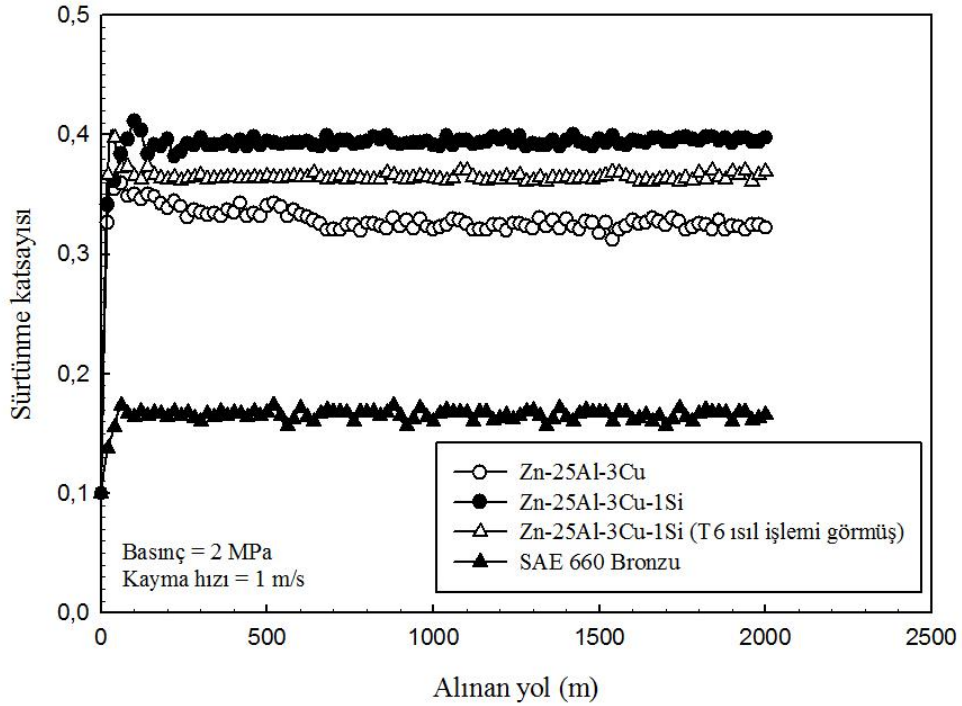
Alaşım	Basınç = 2 MPa, Kayma hızı = 1 m/s Alınan yol = 2000 m	
	Sürtünme katsayısı	Sıcaklık (°C)
Zn-25Al-3Cu	0,33	52
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,39	61
Zn-25Al-3Cu-1Si*	0,37	74
SAE 660	0,16	68

*T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş

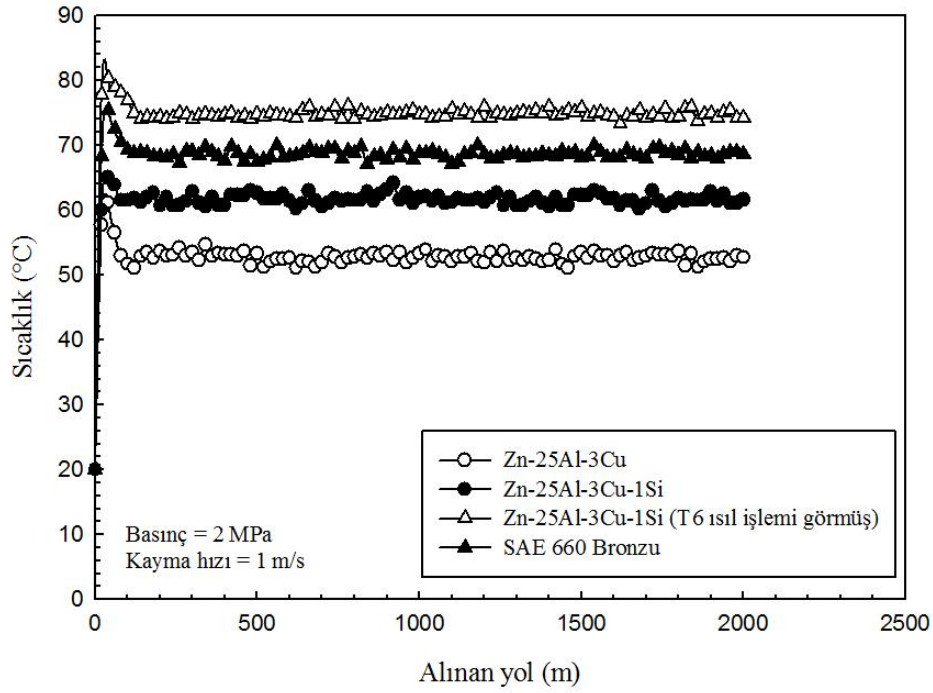
Tablo 10. Yağsız durumda farklı kayma yolları alınıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda meydana gelen hacim kaybı değerleri

Alaşım	Basınç = 2 MPa, Kayma hızı = 1 m/s			
	Alınan yol (m)			
	500	1000	1500	2000
	Hacim kaybı (mm ³)			
Zn-25Al-3Cu	1,6	4,6	9	13
Zn-25Al-3Cu-1Si	1	3	6,5	9
Zn-25Al-3Cu-1Si*	1,54	7,3	10	12
SAE 660	21	72	119	180

*T6 ısıtılmasına tabi tutulmuş



Şekil 21. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

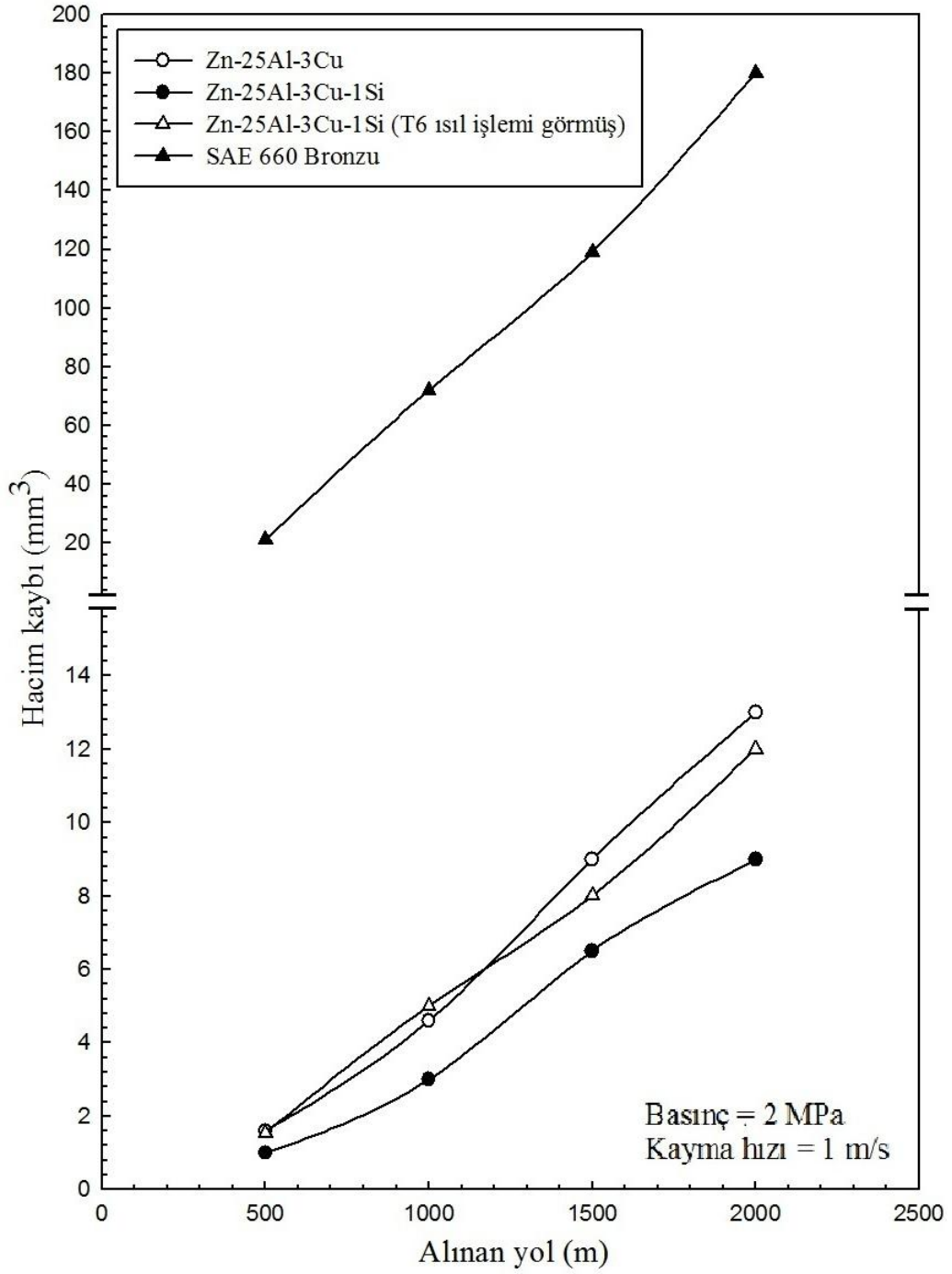


Şekil 22. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

Tablo 11. Yağsız durumda ve farklı basınçlar altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzundan elde edilen sürtünme katsayıları değerleri

Alaşım	Basınç (MPa)			
	1	2	3	4
	Sürtünme katsayısı			
Zn-25Al-3Cu	0,34	0,33	0,36	0,37
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,38	0,39	0,41	0,40
Zn-25Al-3Cu-1Si*	0,36	0,37	0,36	0,37
SAE 660	0,16	0,16	0,16	0,14

* T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş



Şekil 23. Yağsız durumda deneye tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

Tablo 12. Yağsız durumda ve farklı basınçlar altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıkları

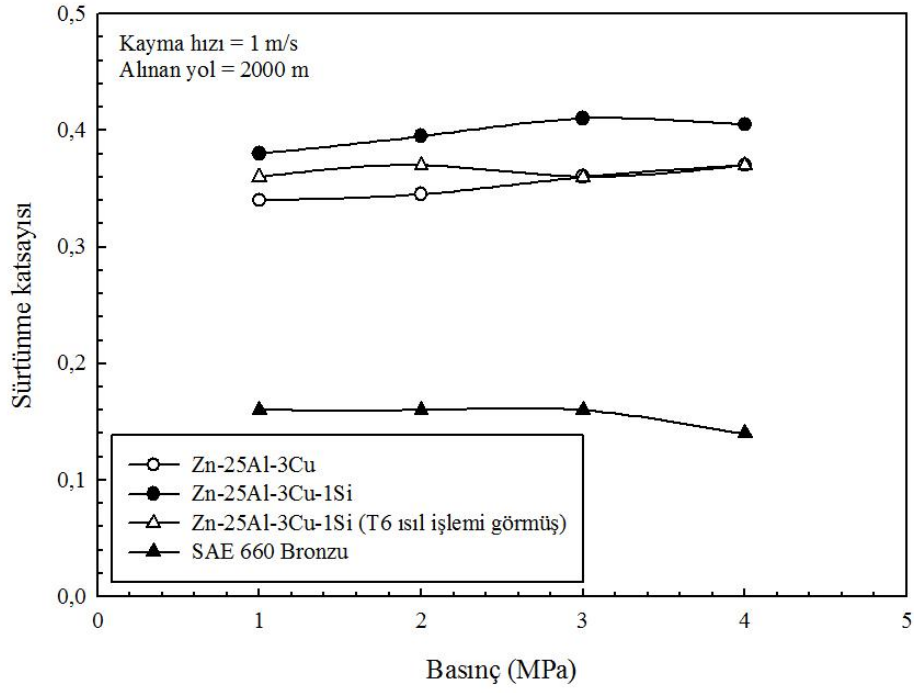
Alaşım	Basınç (MPa)			
	1	2	3	4
	Sıcaklık (°C)			
Zn-25Al-3Cu	38	52	66	78
Zn-25Al-3Cu-1Si	41	61	75	95
Zn-25Al-3Cu-1Si*	47	74	91	115
SAE 660	46	68	81	99

* T6 ısıtıl işlemine tabi tutulmuş

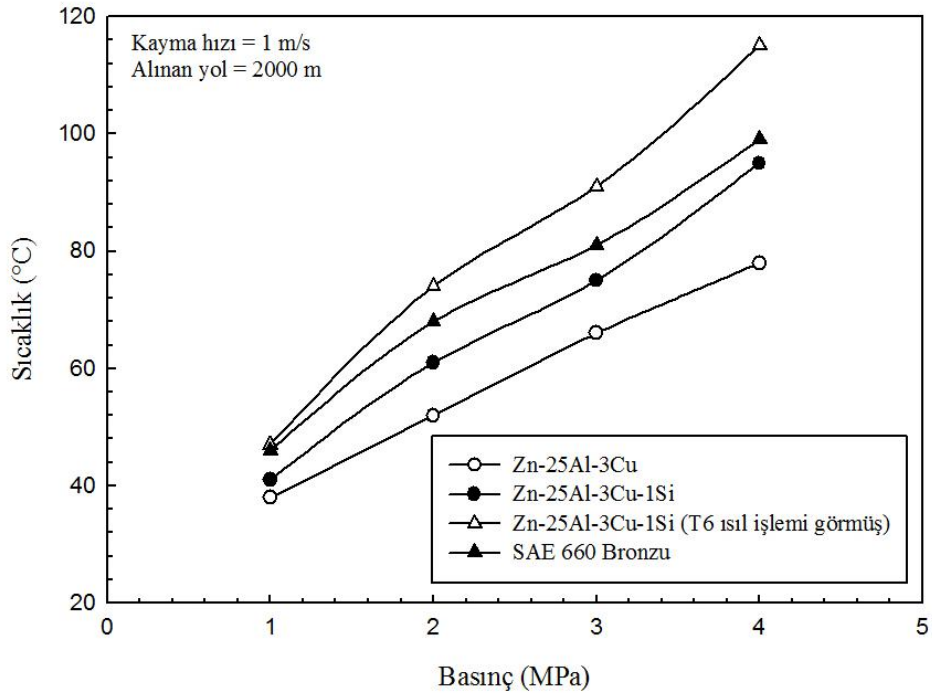
Tablo 13. Yağsız durumda ve farklı basınçlar altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının değerleri

Alaşım	Basınç (MPa)			
	1	2	3	4
	Hacim kaybı (mm ³)			
Zn-25Al-3Cu	11	13	14	15
Zn-25Al-3Cu-1Si	8	9	10	11
Zn-25Al-3Cu-1Si*	10	12	13	14
SAE 660	79	180	240	300

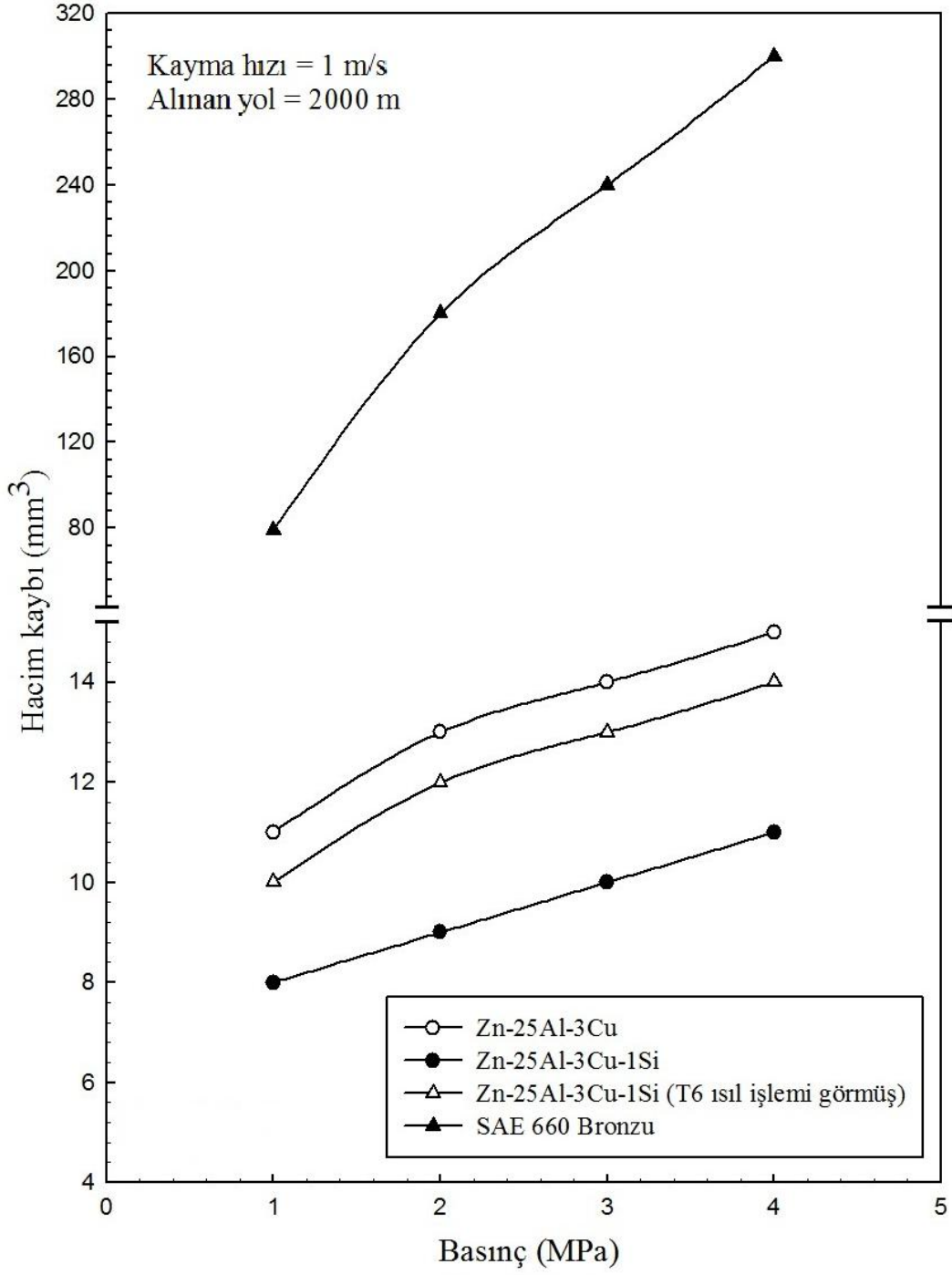
* T6 ısıtıl işlemine tabi tutulmuş



Şekil 24. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 25. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıklarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 26. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler

Tablo 14. Yağsız durumda ve farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayıları

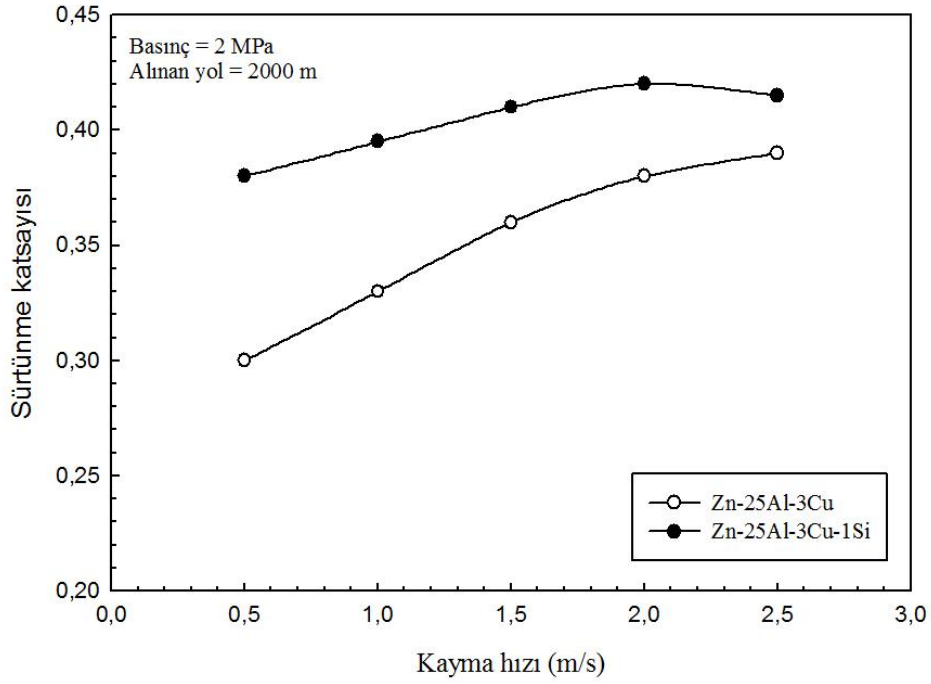
Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Sürtünme katsayısı				
Zn-25Al-3Cu	0,30	0,33	0,36	0,38	0,39
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,38	0,39	0,41	0,42	0,42

Tablo 15. Yağsız durumda ve farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların çalışma sıcaklıkları

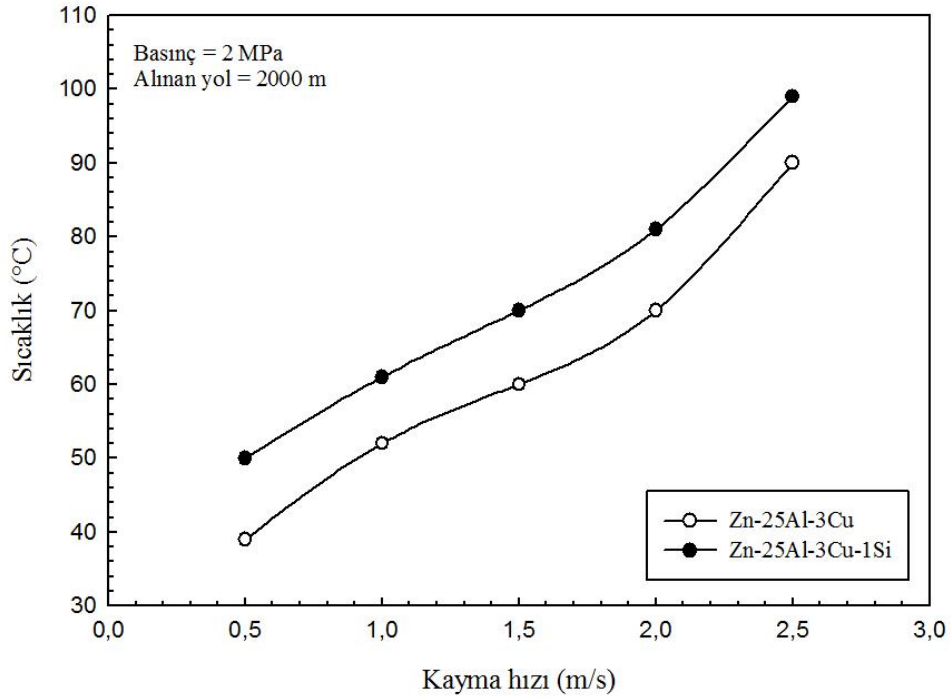
Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Sıcaklık (°C)				
Zn-25Al-3Cu	39	52	60	70	90
Zn-25Al-3Cu-1Si	50	61	70	81	99

Tablo 16. Yağsız durumda ve farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının değerleri

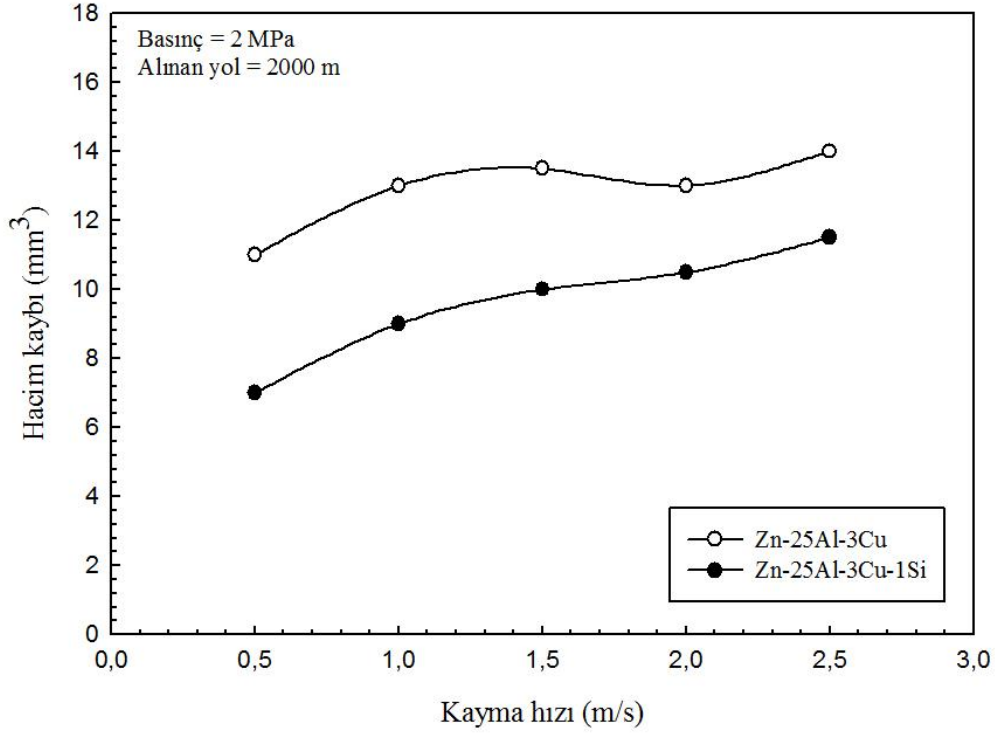
Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Hacim kaybı (mm ³)				
Zn-25Al-3Cu	11	13	13,5	13	14
Zn-25Al-3Cu-1Si	7	9	10	10,5	11,5



Şekil 27. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 28. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların çalışma sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 29. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerini kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler

Yağlı durumda 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik yol tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımları ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri tablo 17'de, aşınma kaybı değerleri ise Tablo 18'de verilmiştir. Bu değerlerin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 30-32'de verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarının deney başlar başlamaz ani bir artış sergiledikten sonra azalarak yaklaşık 20 km'lik bir kayma yolu sonunda sabit kaldıklarını, çalışma sıcaklıklarının başlangıç aşamasındaki hızlı bir artıştan sonra hemen hemen sabit değerlere ulaştıklarını, aşınma kayıplarının ise artan yol ile sürekli arttıklarını göstermektedir. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlar içerisinde en düşük aşınma kaybının T6 ısıl işlem görmüş Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımında, en yüksek aşınma kaybının ise SAE 660 bronzunda meydana geldiği görülmüştür.

Tablo 17. Yağlı durumda 80 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri

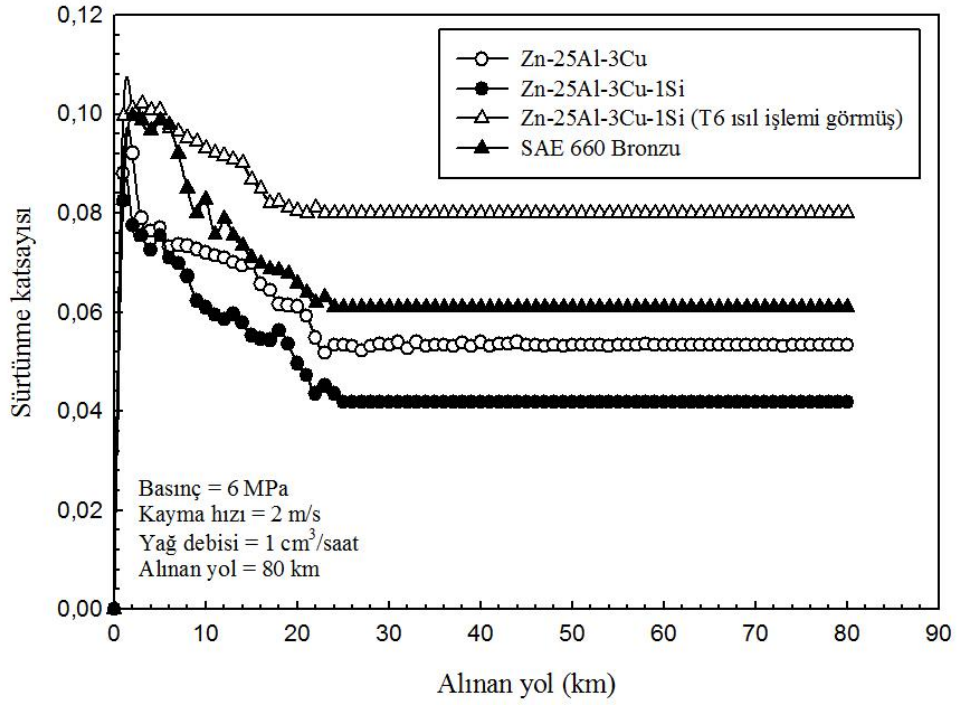
Alaşım	Basınç = 6 MPa, Kayma hızı = 2 m/s Alınan yol = 80 km, Yağ debisi = 1cm ³ /saat	
	Sürtünme katsayısı	Sıcaklık (°C)
Zn-25Al-3Cu	0,054	37
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,042	50
Zn-25Al-3Cu-1Si*	0,080	63
SAE 660	0,061	53

*T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş

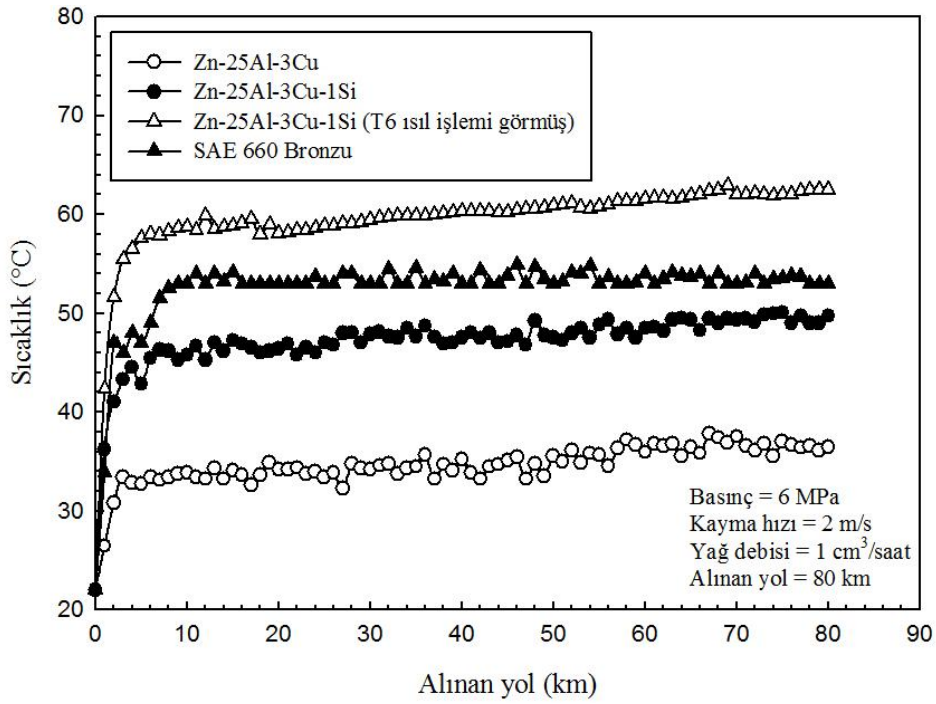
Tablo 18. 6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun hacim kaybı değerleri

Alaşım	Basınç = 6 MPa, Yağ debisi = 1 cm ³ /saat, Kayma hızı = 2 m/s				
	Alınan yol (km)				
	10	20	40	60	80
	Hacim kaybı (mm ³)				
Zn-25Al-3Cu	0,24	0,34	0,37	0,51	0,76
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,08	0,26	0,30	0,41	0,61
Zn-25Al-3Cu-1Si*	0,07	0,09	0,11	0,16	0,29
SAE 660	0,35	0,55	0,73	1,00	1,24

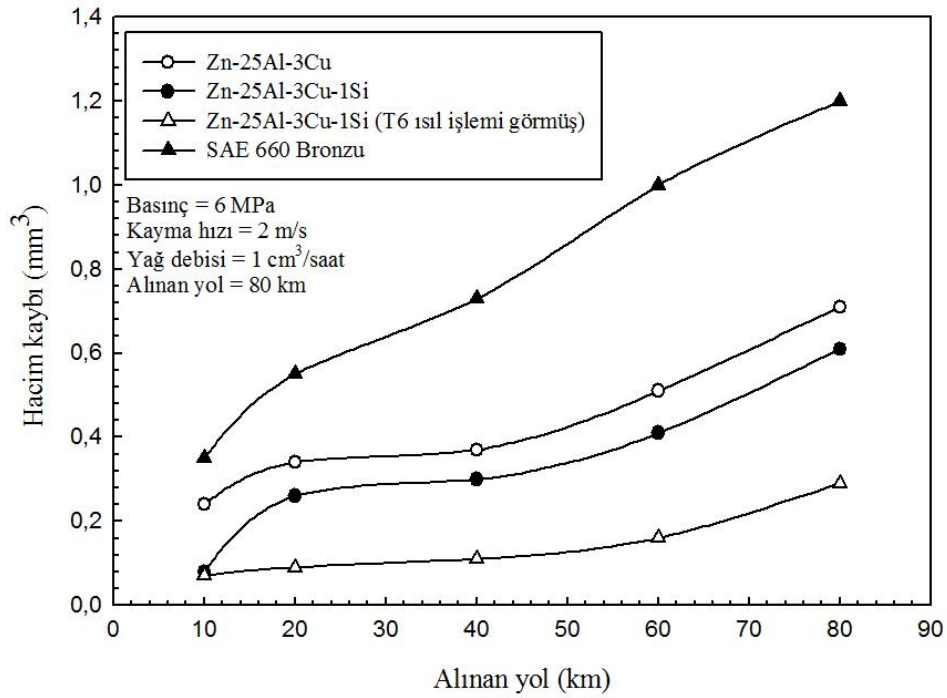
*T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş



Şekil 30. 6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 31. 6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 32. 6 MPa'lık basınç, 2m/s'lik kayma hızı ve 1 cm³/saatlik yağ debisinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al alaşımları ile SAE 660 bronzunda meydana gelen hacim kayıplarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

Yağlı durumda ve farklı basınçlarda 20 km'lik yol tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 19, 20 ve 21'de; bu değerlerin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 33, 34 ve 35'de verilmiştir. Bu eğriler, basınç arttıkça alaşımların sürtünme katsayılarının azalıp, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin arttığını göstermektedir.

Yağlı durumda ve farklı kayma hızlarında 20 km'lik yol tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 22, 23 ve 24'de; bu değerlerin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 36, 37 ve 38'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızından fazla etkilenmediklerini, ancak çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin artan kayma hızı ile sürekli arttıklarını göstermektedir. Bu alaşımların farklı yağ debilerinde 6 MPa'lık basınç ve 2 m.s⁻¹'lik kayma hızında 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulmaları durumunda elde edilen sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri sırasıyla Tablo 25, 26 ve 27'de; bu

değerlerin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 39, 40 ve 41’de verilmiştir. Bu tablo ve Şekiller söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan yağ debisi ile azaldıklarını, 1,5 cm³/saat’lik yağ debisinden sonra ise hemen hemen sabit kaldıklarını göstermektedir.

Tablo 19. Farklı basınçlarda yağlı aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların kararlı durumdaki sürtünme katsayıları

Alaşım	Basınç (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Sürtünme katsayısı							
Zn-25Al-3Cu	0,079	0,069	0,052	0,047	0,047	0,045	0,043	0,038
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,11	0,103	0,09	0,08	0,073	0,065	0,059	0,055
Zn-25Al-3Cu-1Si*	0,12	0,11	0,105	0,10	0,085	0,075	0,069	0,064
SAE 660	0,095	0,09	0,087	0,082	0,071	0,061	0,051	0,041

*T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş

Tablo 20. Farklı basınçlarda yağlı aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürekli rejim durumdaki çalışma sıcaklıkları

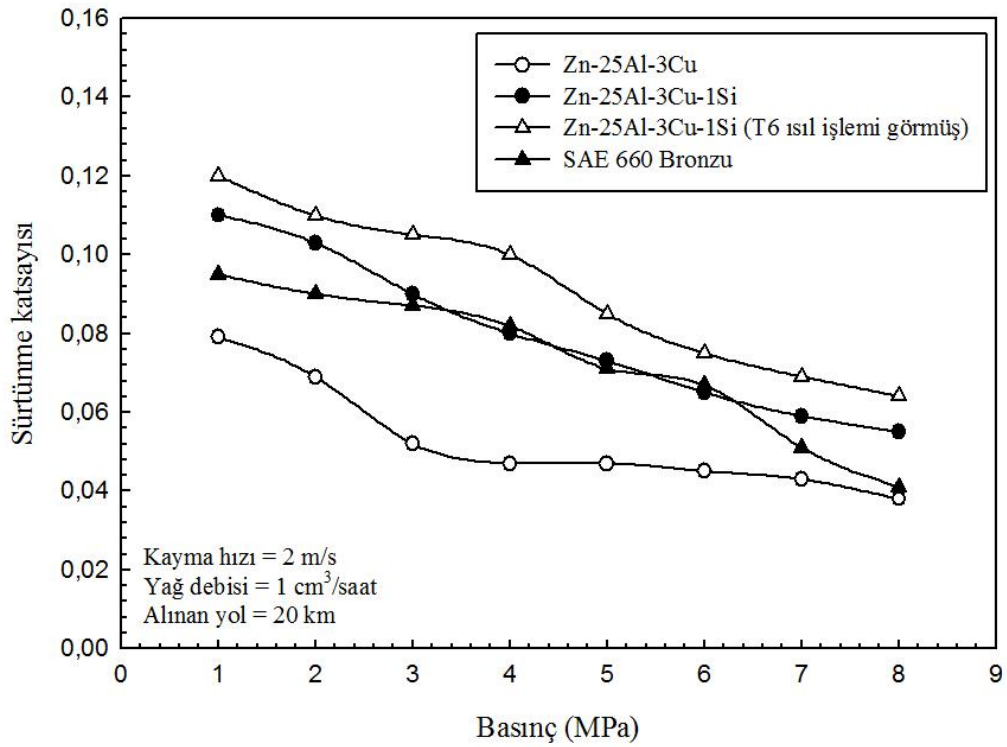
Alaşım	Basınç (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Sıcaklık (°C)							
Zn-25Al-3Cu	36	38	40	42	45	45	49	52
Zn-25Al-3Cu-1Si	48	51	55	65	69	74	80	92
Zn-25Al-3Cu-1Si*	41	56	66	71	80	95	97	99
SAE 660	43	48	52	60	68	72	76	78

*T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş

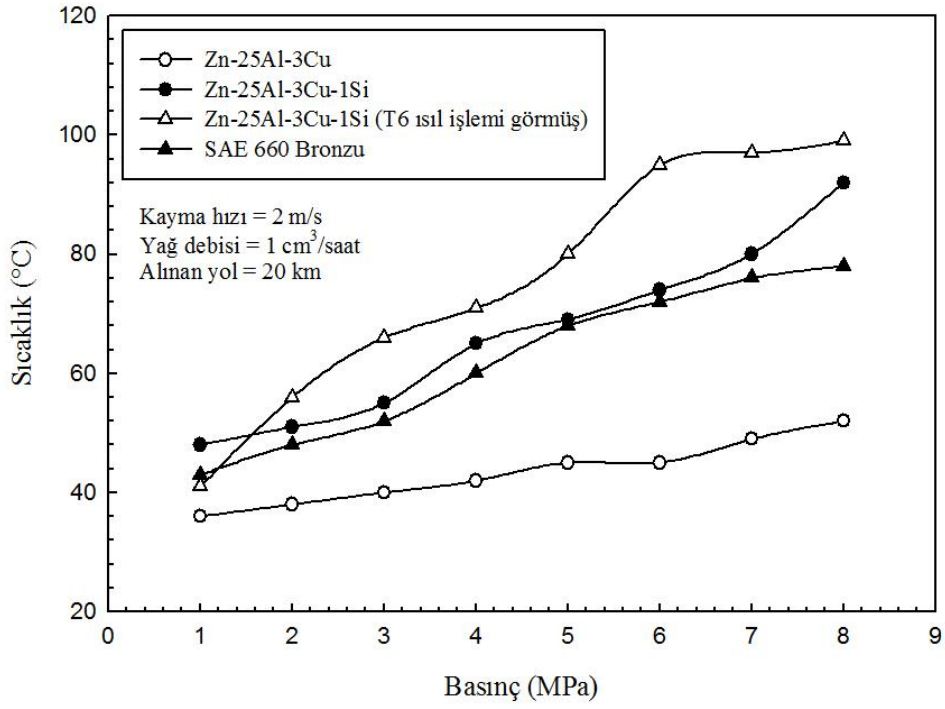
Tablo 21. Farklı basınçlarda yağlı aşınma deneyine tabi tutulan alaşımlarda meydana gelen hacim kayıpları

Alaşım	Basınç (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Hacim kaybı (mm ³)							
Zn-25Al-3Cu	0,09	0,19	0,22	0,25	0,028	0,34	0,57	1,08
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,06	0,09	0,12	0,17	0,19	0,26	0,39	0,61
Zn-25Al-3Cu-1Si*	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,15
SAE 660	0,15	0,22	0,27	0,3	0,41	0,55	0,76	1,15

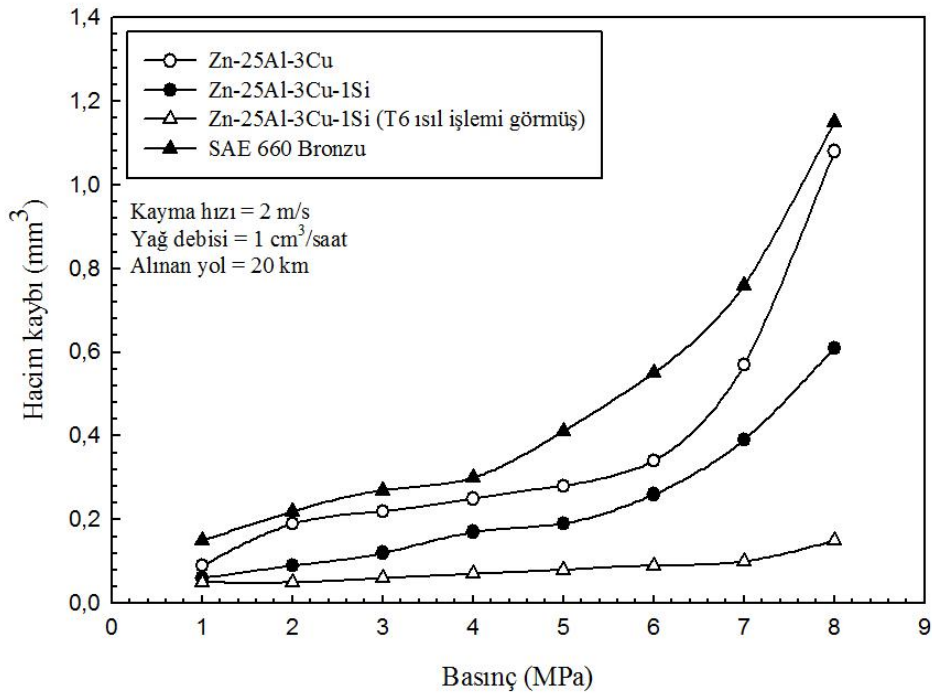
*T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş



Şekil 33. Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun yağlı durumdaki sürtünme katsayılarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 34. Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunun yağlı durumdaki çalışma sıcaklıklarının uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 35. Zn-25Al esaslı alaşımlar ve SAE 660 bronzunda yağlı durumda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin uygulanan basınca göre değişimlerini gösteren eğriler

Tablo 22. 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve farklı kayma hızlarında 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayıları

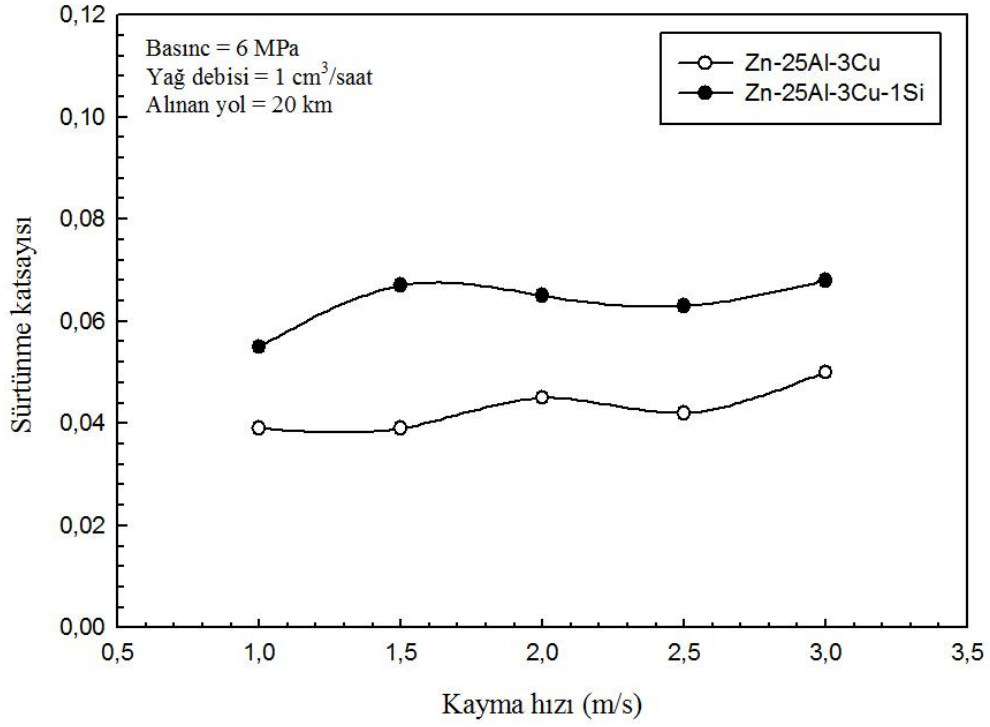
Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	1	1,5	2	2,5	3
	Sürtünme katsayısı				
Zn-25Al-3Cu	0,039	0,039	0,045	0,042	0,051
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,055	0,067	0,065	0,063	0,068

Tablo 23. 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve farklı kayma hızlarında 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürekli rejim durumundaki sıcaklık değerleri

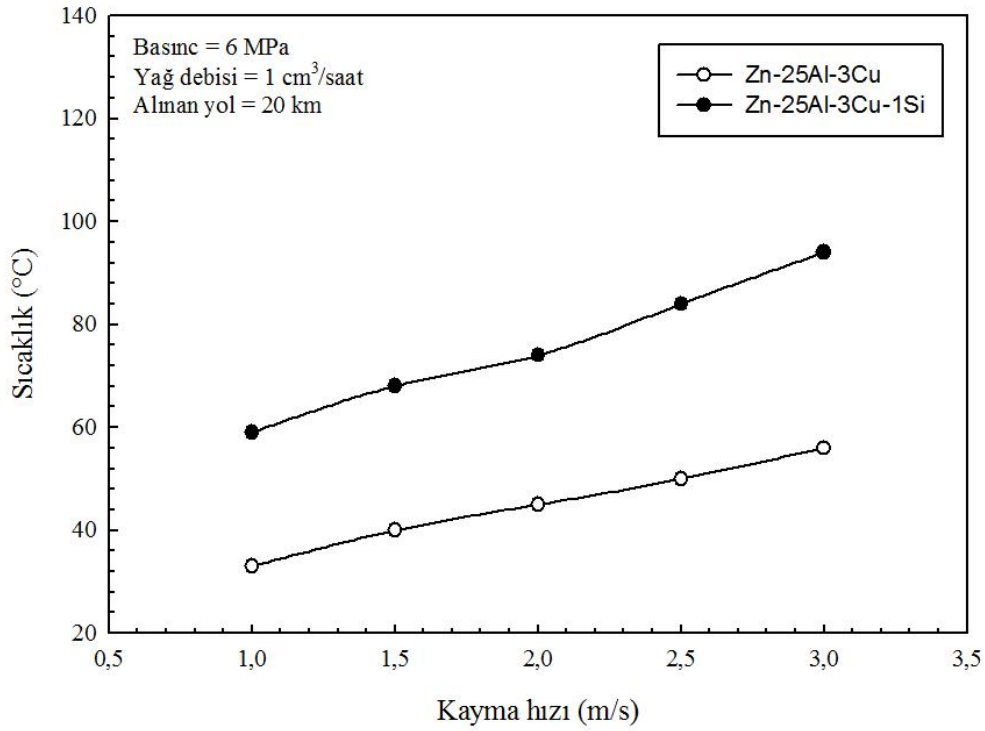
Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	1	1,5	2	2,5	3
	Sıcaklık (°C)				
Zn-25Al-3Cu	33	40	45	50	56
Zn-25Al-3Cu-1Si	59	68	74	84	94

Tablo 24. 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve farklı kayma hızlarında 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların hacim kaybı değerleri

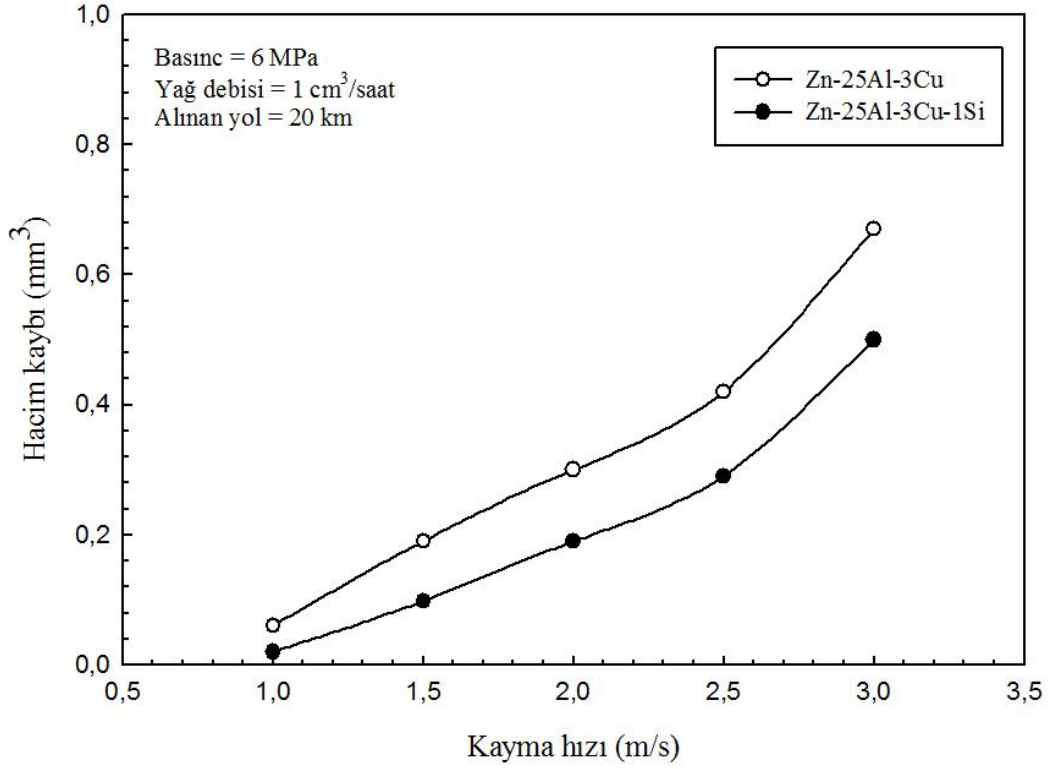
Alaşım	Kayma hızı (m/s)				
	1	1,5	2	2,5	3
	Hacim kaybı (mm ³)				
Zn-25Al-3Cu	0,06	0,19	0,34	0,42	0,67
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,02	0,09	0,26	0,29	0,51



Şekil 36. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 37. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların çalışma sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 38. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda 20 km'lik kayma yolu sununda meydana gelen hacim kayıplarının kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler

Tablo 25. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürekli rejim durumdaki sürtünme katsayıları

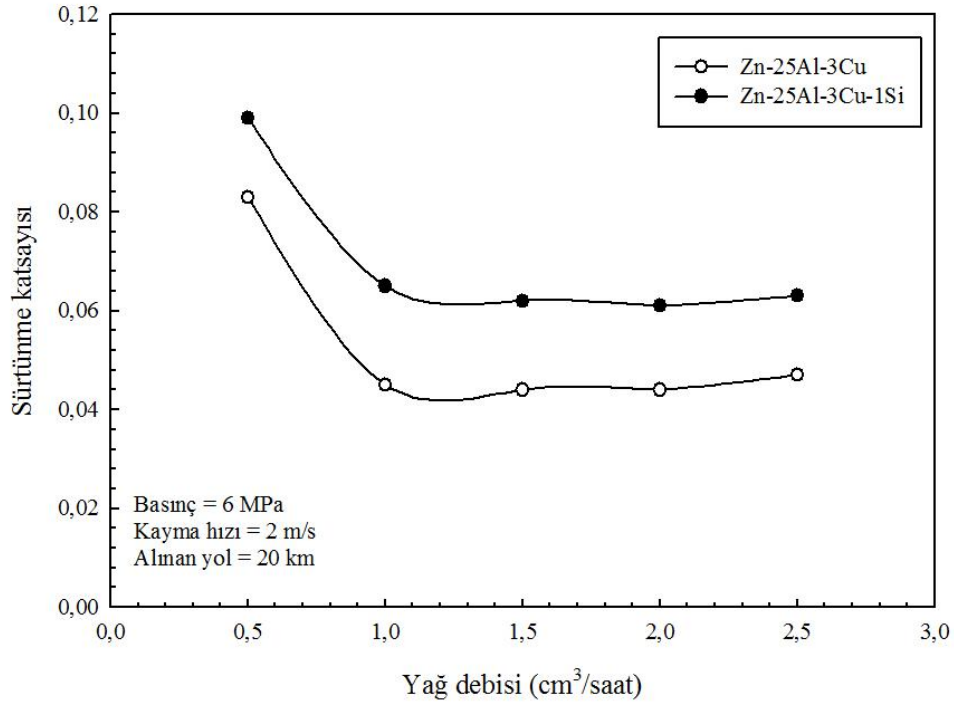
Alaşım	Yağ debisi (cm ³ /saat)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Sürtünme katsayısı				
Zn-25Al-3Cu	0,083	0,045	0,044	0,044	0,047
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,099	0,065	0,062	0,061	0,063

Tablo 26. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların sürekli rejim durumundaki sıcaklık değerleri

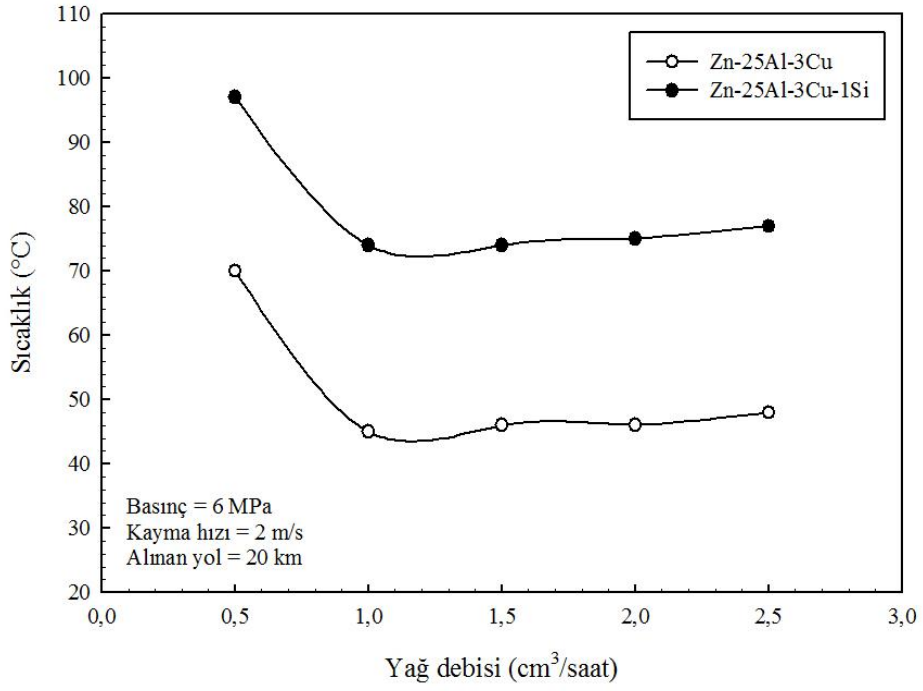
Alaşım	Yağ debisi (cm ³ /saat)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Sıcaklık (°C)				
Zn-25Al-3Cu	70	45	46	46	48
Zn-25Al-3Cu-1Si	97	74	74	75	77

Tablo 27. Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş durumdaki Zn-25Al esaslı alaşımların hacim kaybı değerleri

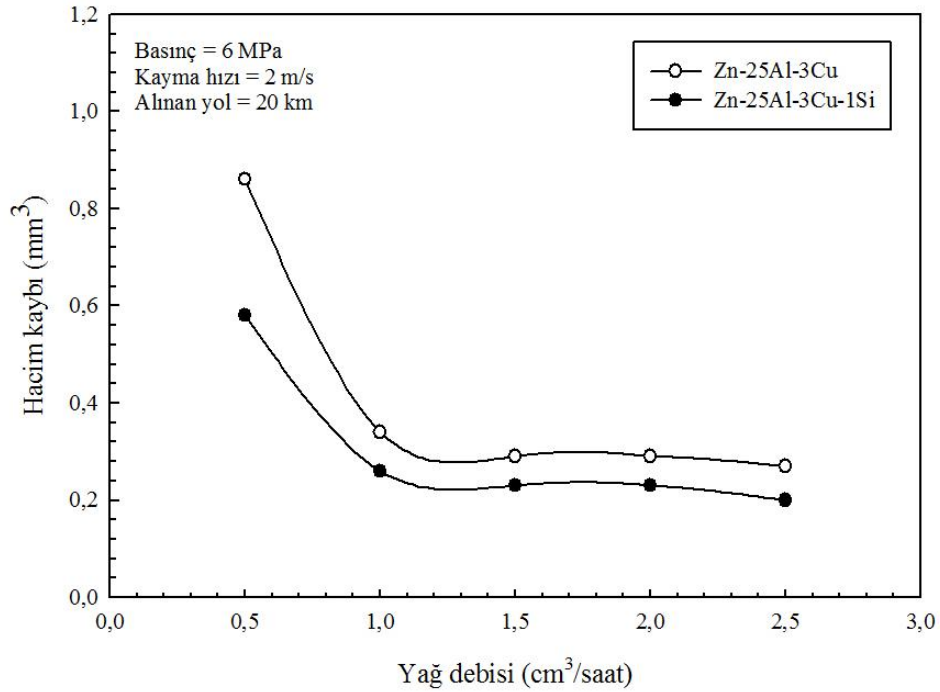
Alaşım	Yağ debisi (cm ³ /saat)				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Hacim kaybı (mm ³)				
Zn-25Al-3Cu	0,86	0,34	0,29	0,29	0,27
Zn-25Al-3Cu-1Si	0,58	0,26	0,23	0,23	0,20



Şekil 39. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 40. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sıcaklık değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 41. Yağlı durumda 20 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler

3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

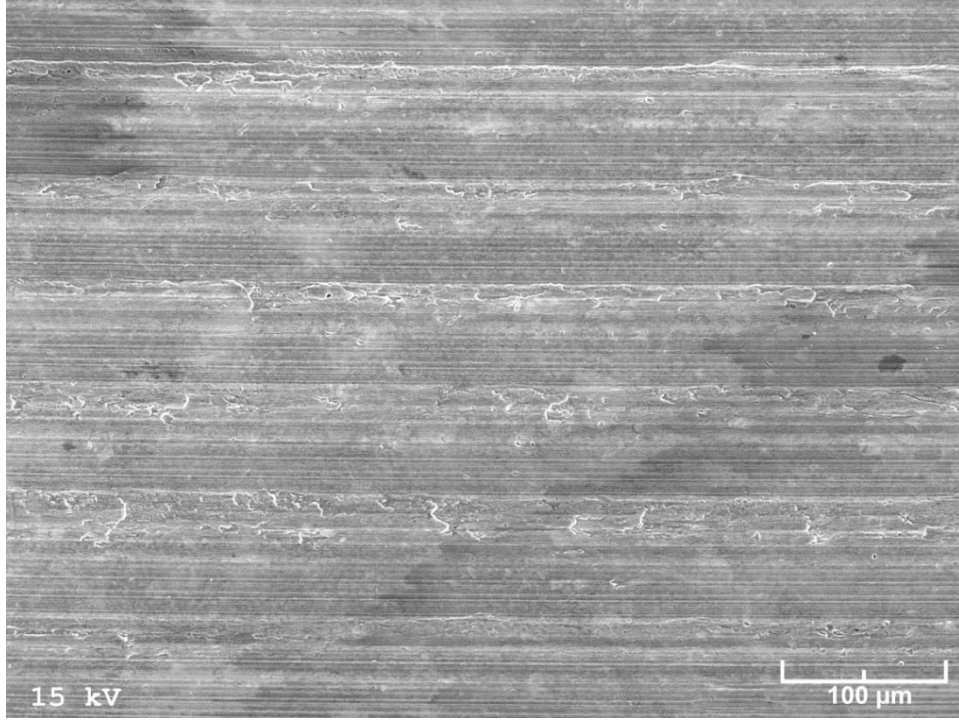
Zn-25Al esaslı alaşımları ile SAE 660 bronzunun talaşlı işleme hazırlanan aşınma numunelerinin yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 42-45'de verilmiştir. Bu görüntüler numunelerin yüzeylerinde tornalama ve frezeleme işlemleri sırasında oluşan çizik şeklindeki kalem izlerini göstermektedir.

Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımları ile SAE 660 bronzunun aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 46-49'da verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde söz konusu alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvanmış bölgelerin yanı sıra çiziklerin yer aldığı, ancak sıvanmanın daha belirgin olduğu görülmektedir.

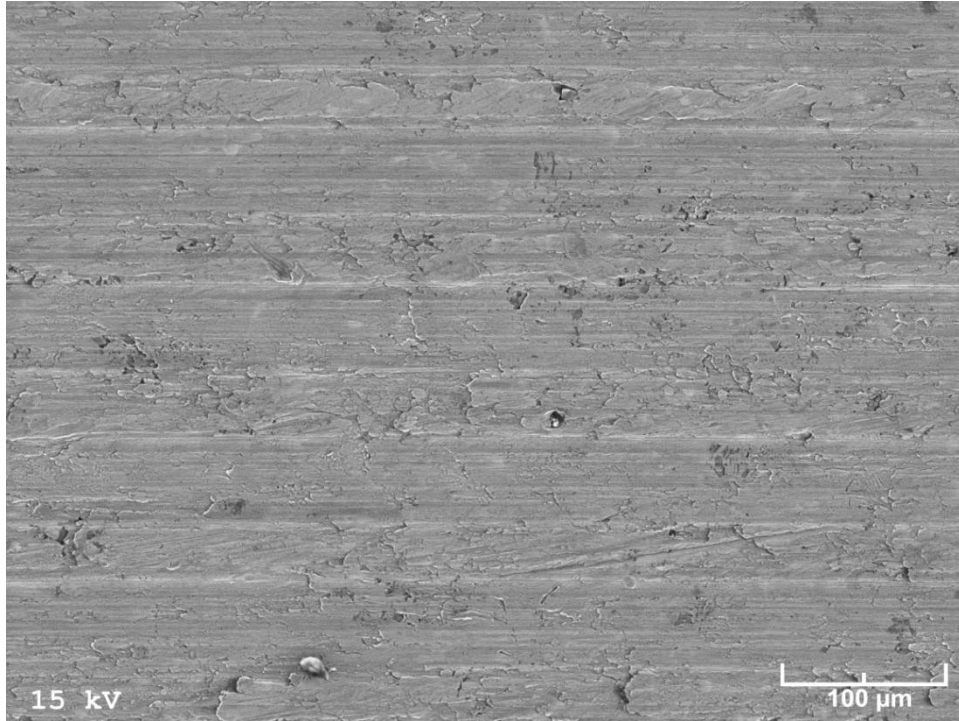
Yağsız veya kuru durumda farklı basınçlarda ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri ise Şekil 50-56 verilmiştir. Bu görüntüler basınç arttıkça söz konusu alaşımlara ait numunelerin yüzeylerindeki aşınma belirtilerinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

Yağlı durumda Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımları ile SAE 660 bronzunun 6 MPa'lık basınç, 1cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında, 80 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan aşınma numunelerinin yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 57-60'de verilmiştir. Bu görüntüler alaşımlara ait numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvanma tabakaları ve çiziklerin yer aldığını göstermektedir. En geniş sıvanma bölgesinin Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinde, en fazla sayıdaki çizik ise SAE 660 bronzunun aşınma numunesinin yüzeyinde yer aldığı görülmüştür. Farklı basınçlarda ve 20 km mesafeli yağlı aşınma deneylerine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 61-66'de verilmiştir. Bu görüntüler, basınç arttıkça alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvanma bölgelerinin genişlediğini ve çiziklerin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

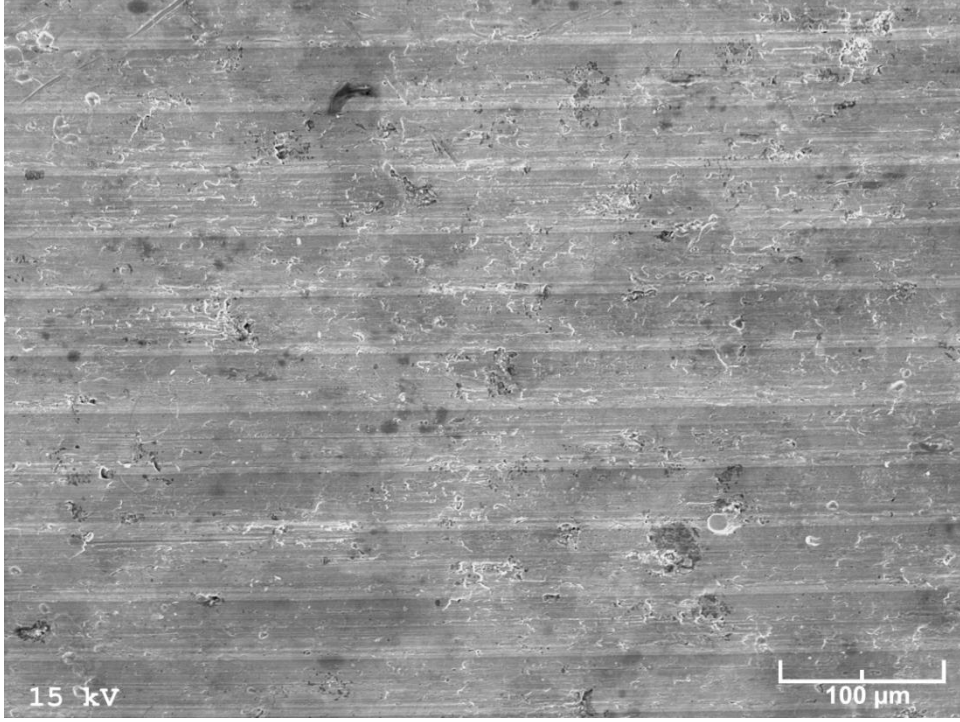
Yağlı durumda 6 MPa basınç ve farklı hızlarda 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımlarının dökülmüş durumdaki numunelerinin aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri ise Şekil 67-70'de verilmiştir. Bu görüntüler de kayma hızı arttıkça alaşımların aşınma yüzeylerindeki sıvanma tabakalarının genişlediklerini göstermektedir.



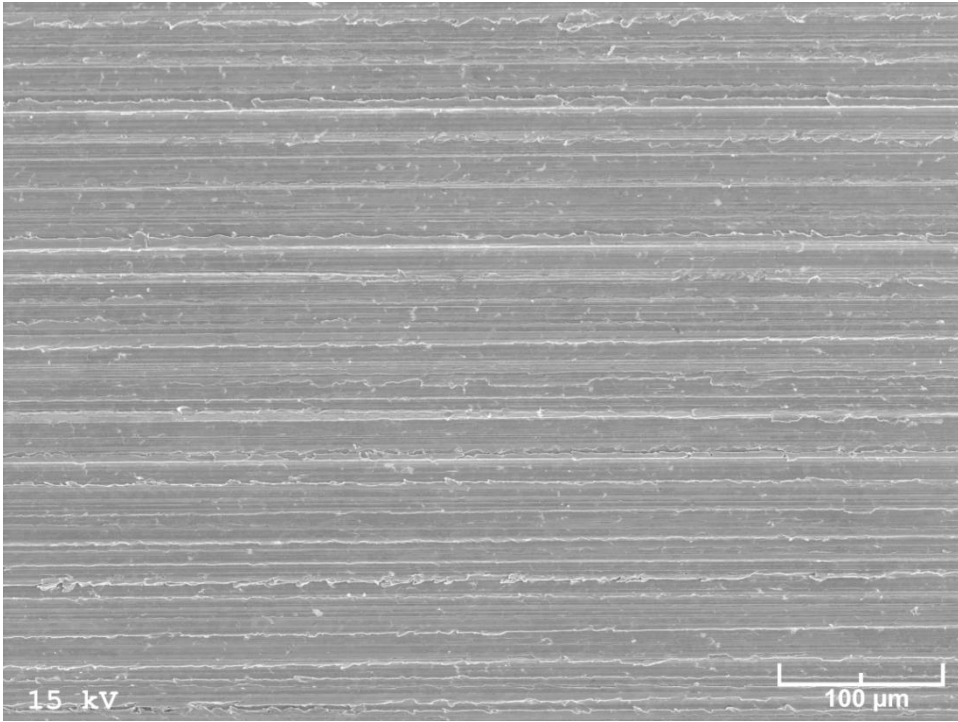
Şekil 42. Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



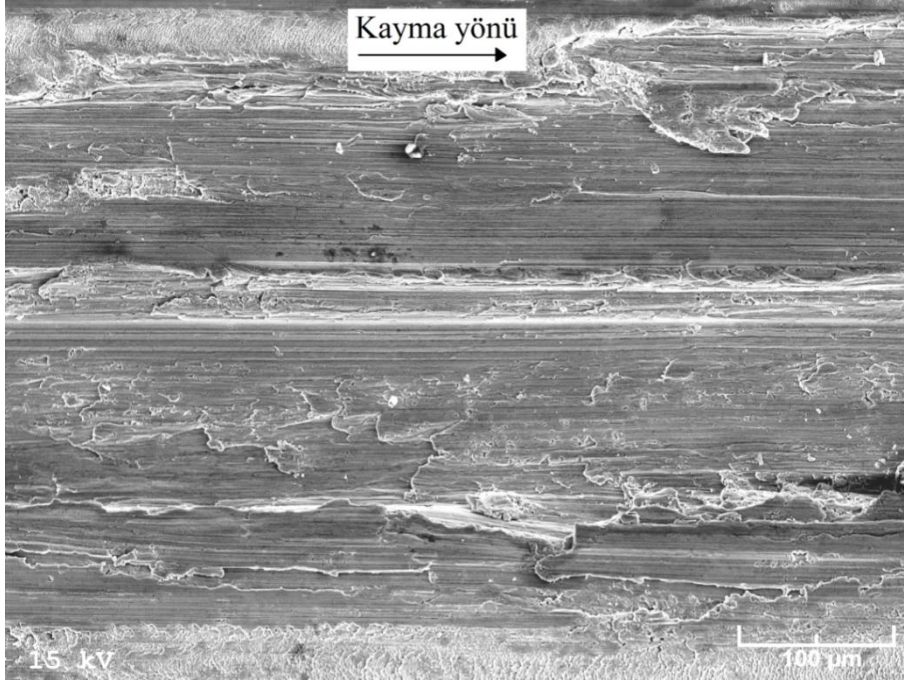
Şekil 43. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



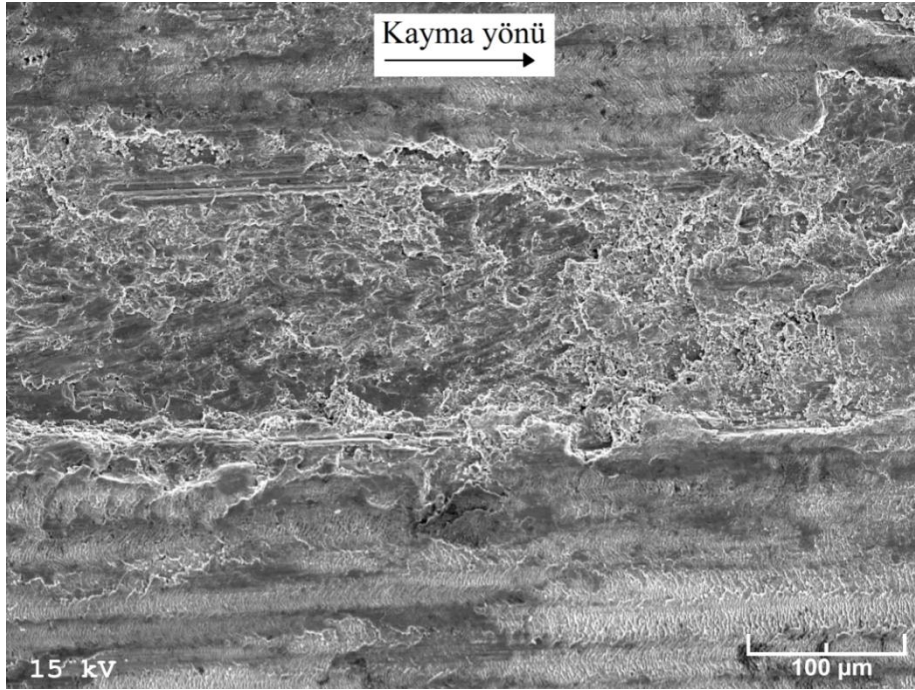
Şekil 44. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımlının T6 ısıt işleme görmüş durumdaki aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



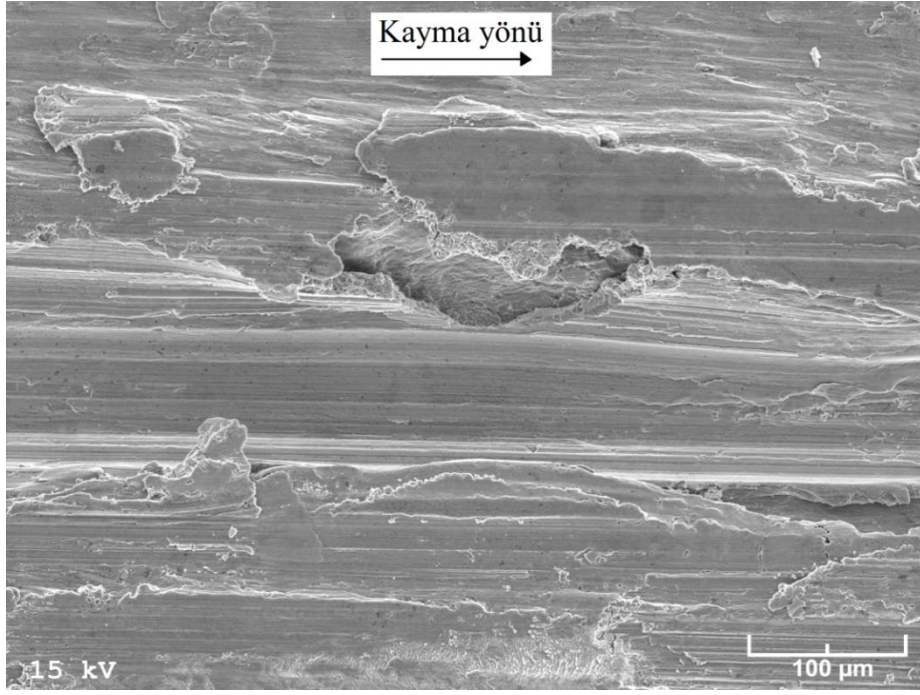
Şekil 45. SAE 660 bronzuna ait bir aşınma numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



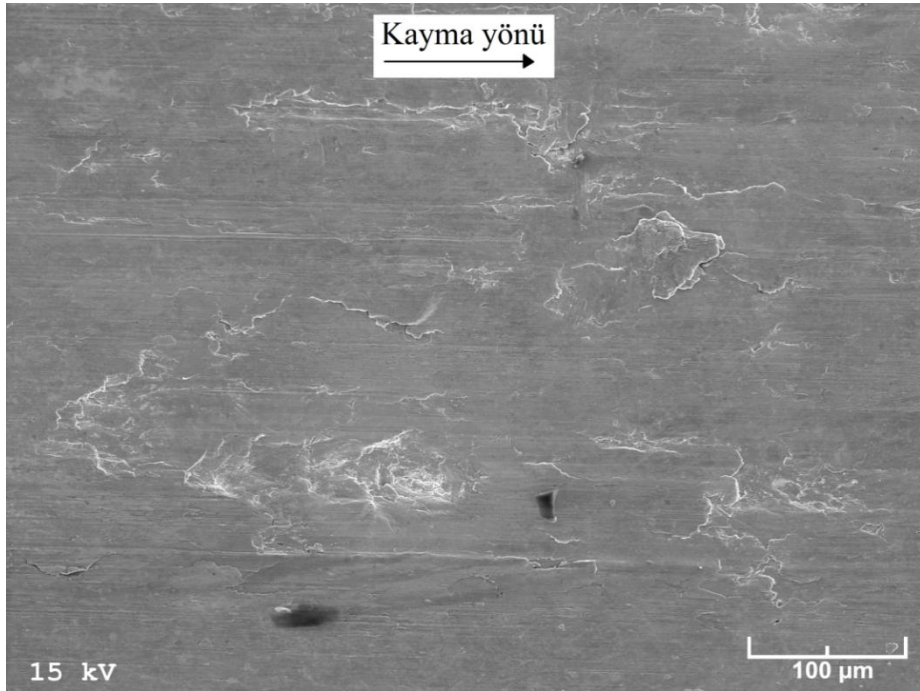
Şekil 46. Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



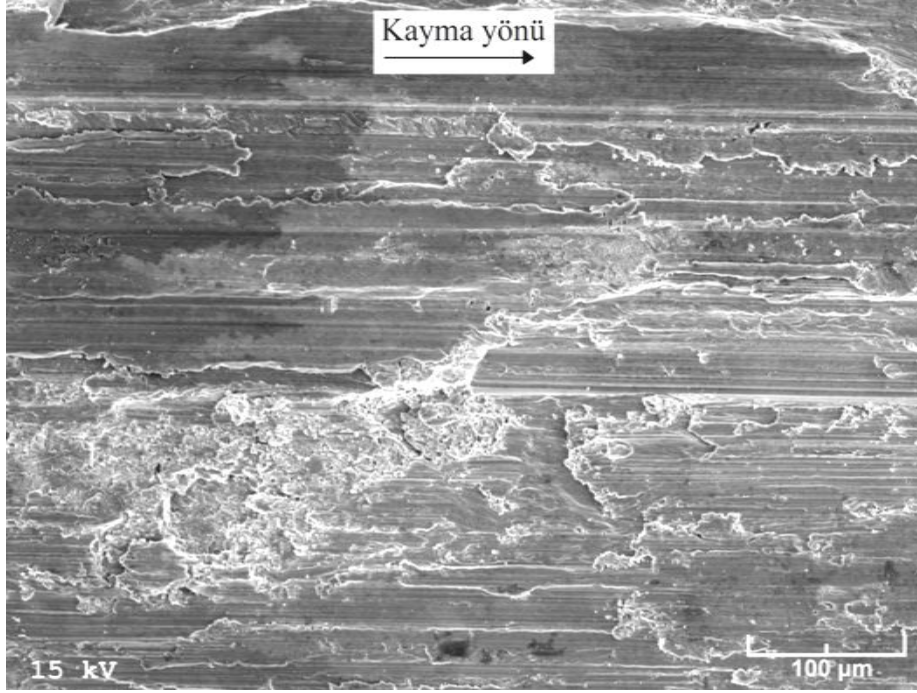
Şekil 47. Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



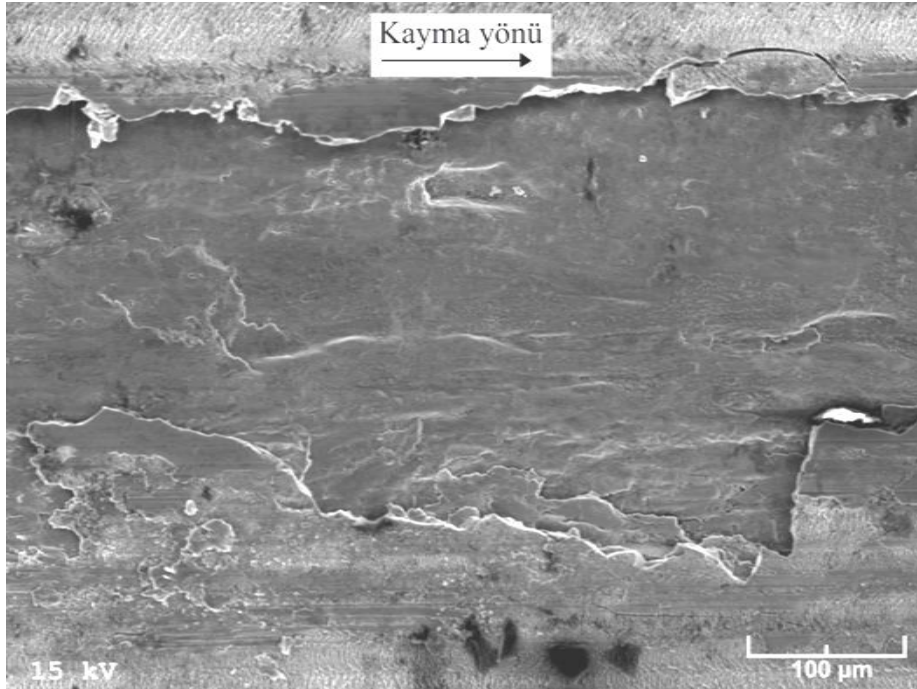
Şekil 48. Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



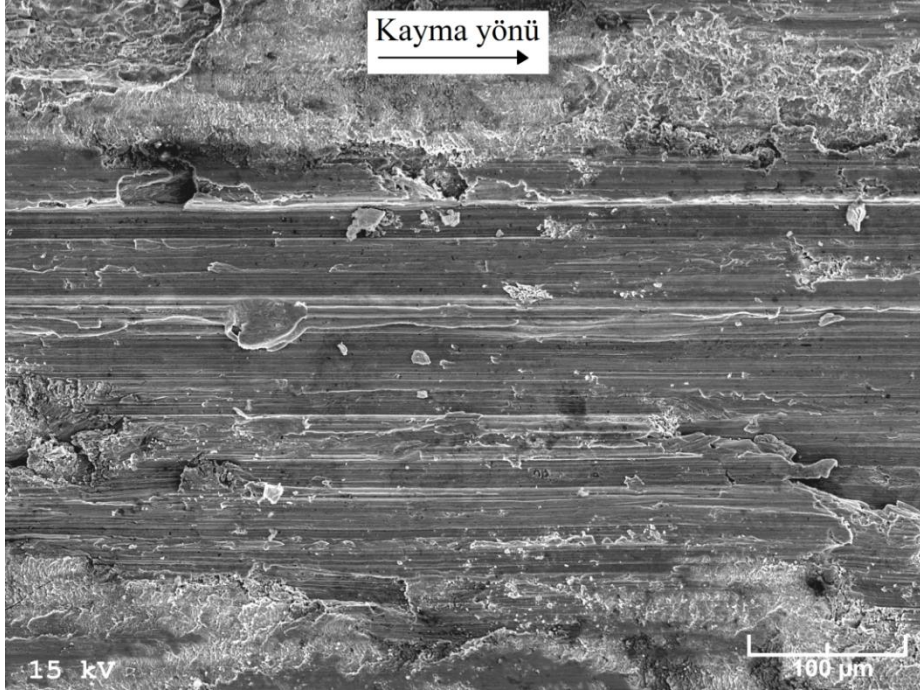
Şekil 49. Yağsız durumda 2 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



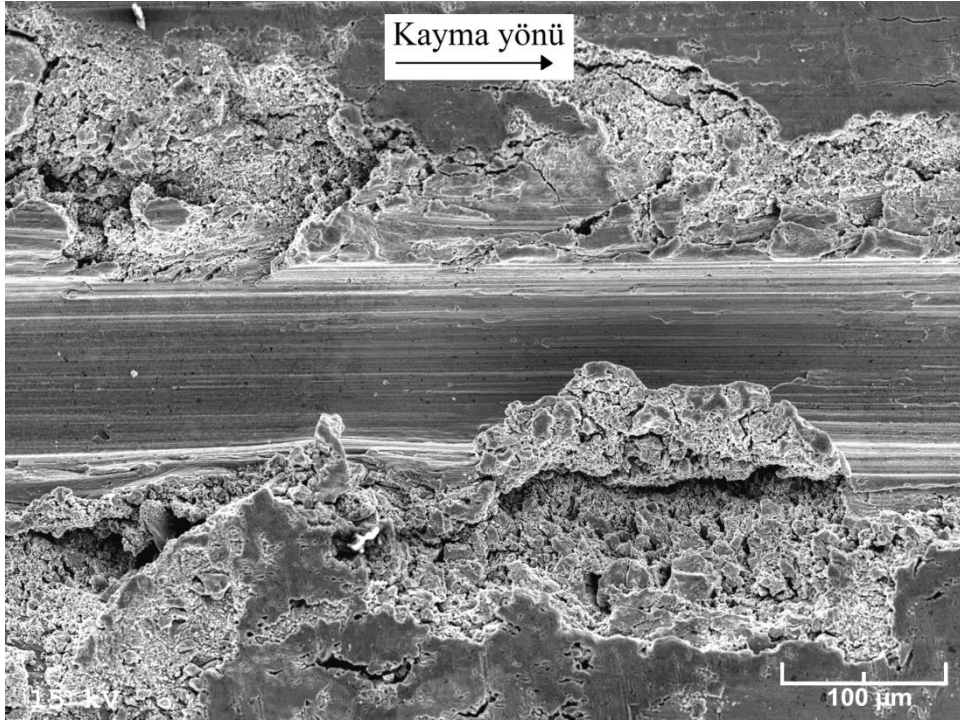
Şekil 50. Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



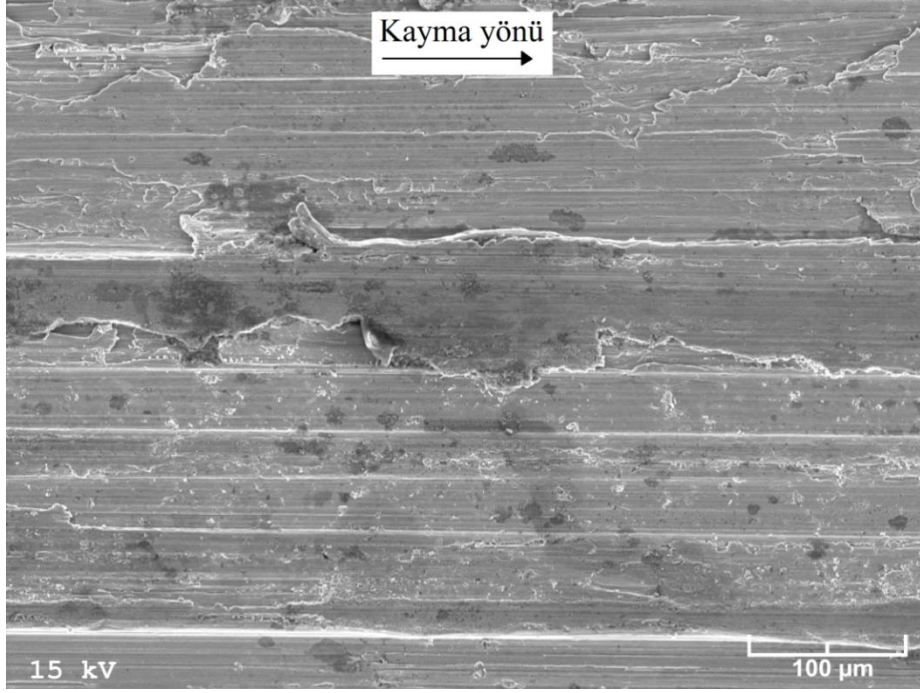
Şekil 51. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



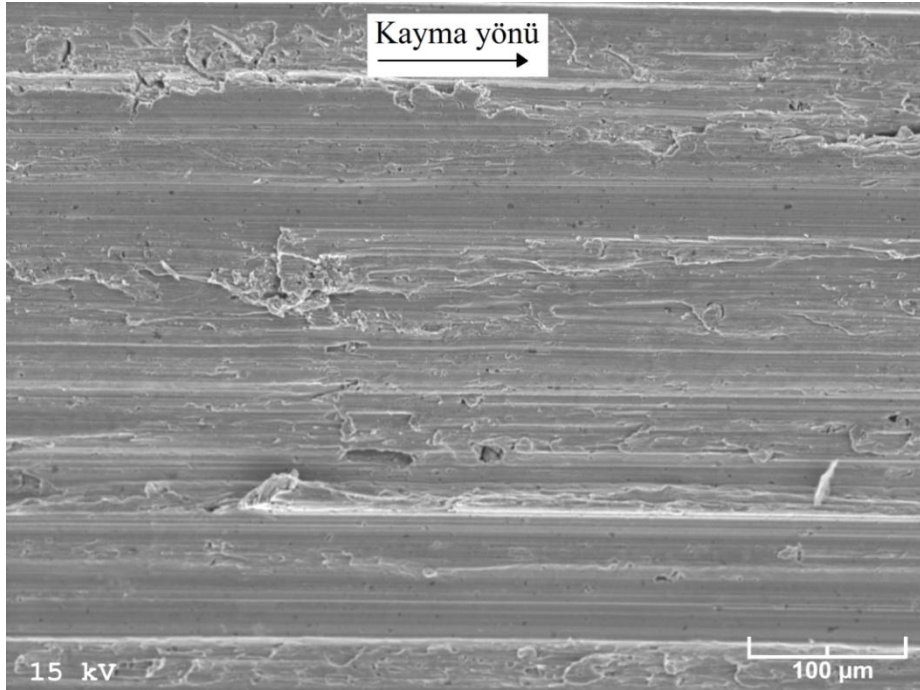
Şekil 52. Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



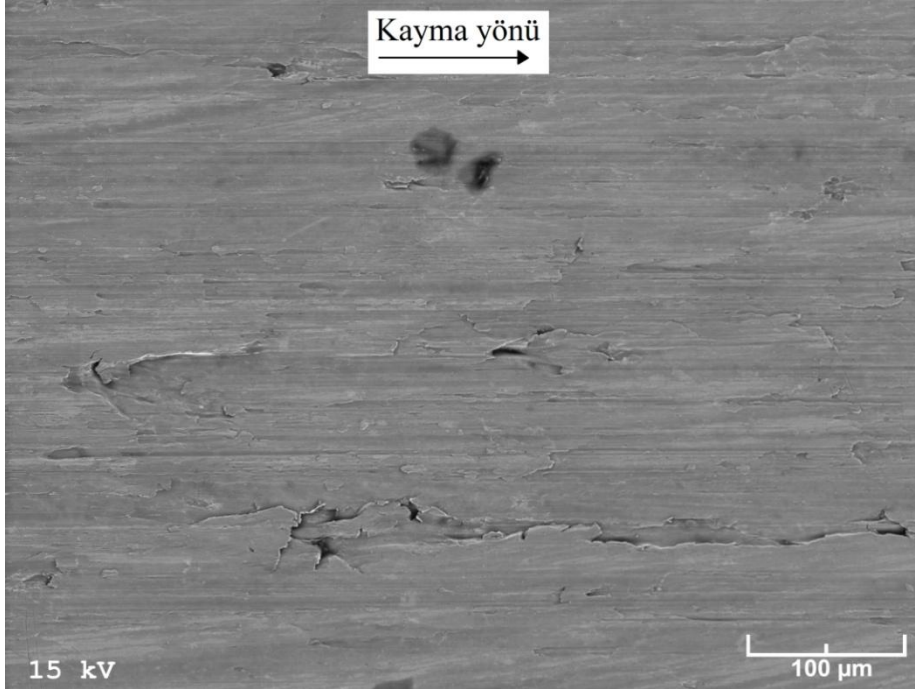
Şekil 53. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



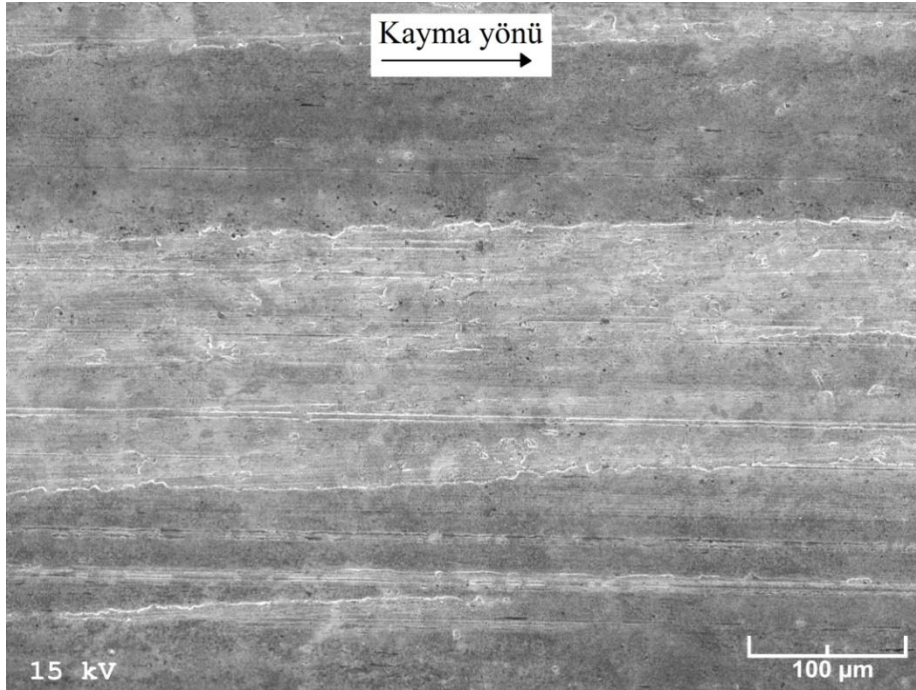
Şekil 54. Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



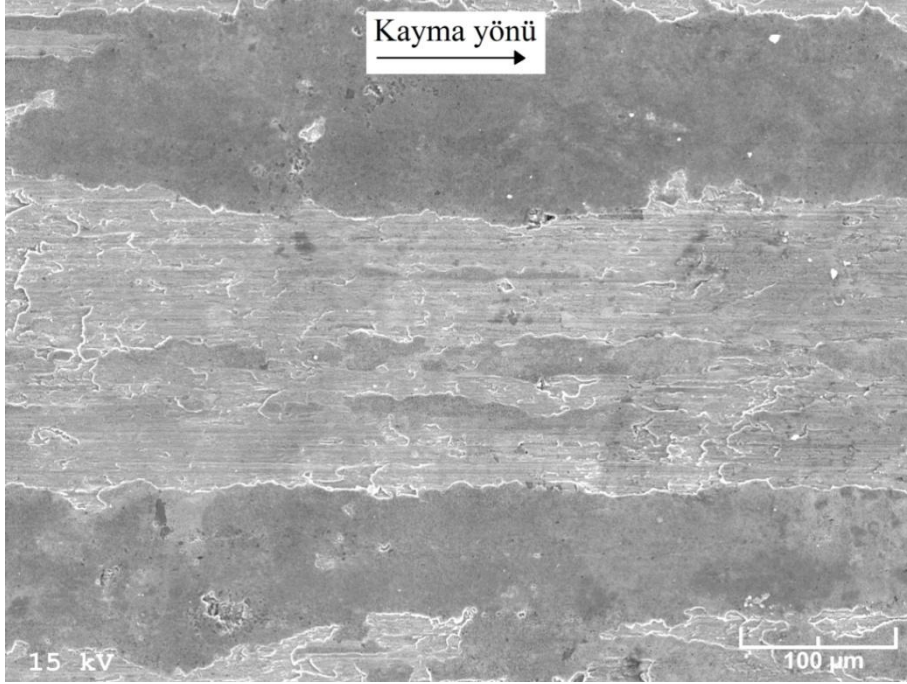
Şekil 55. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



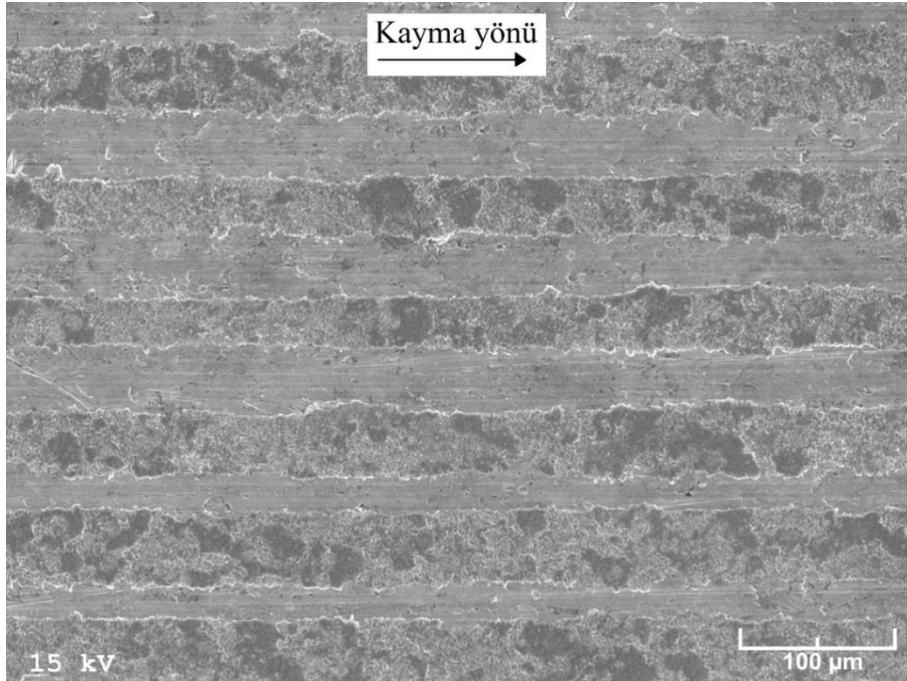
Şekil 56. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



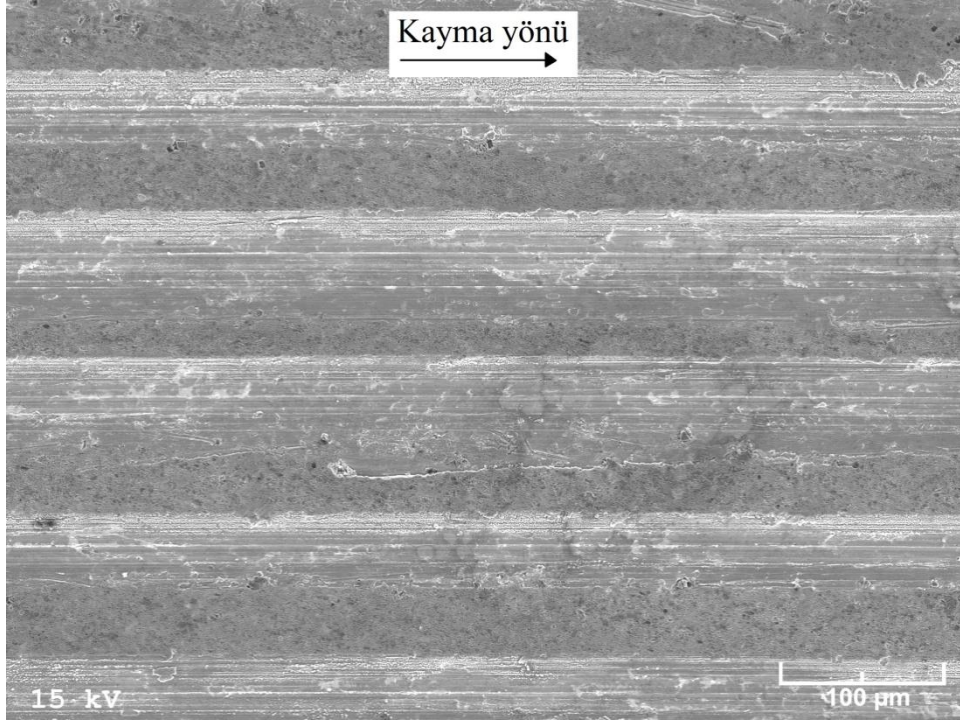
Şekil 57. Yağlı durumda 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



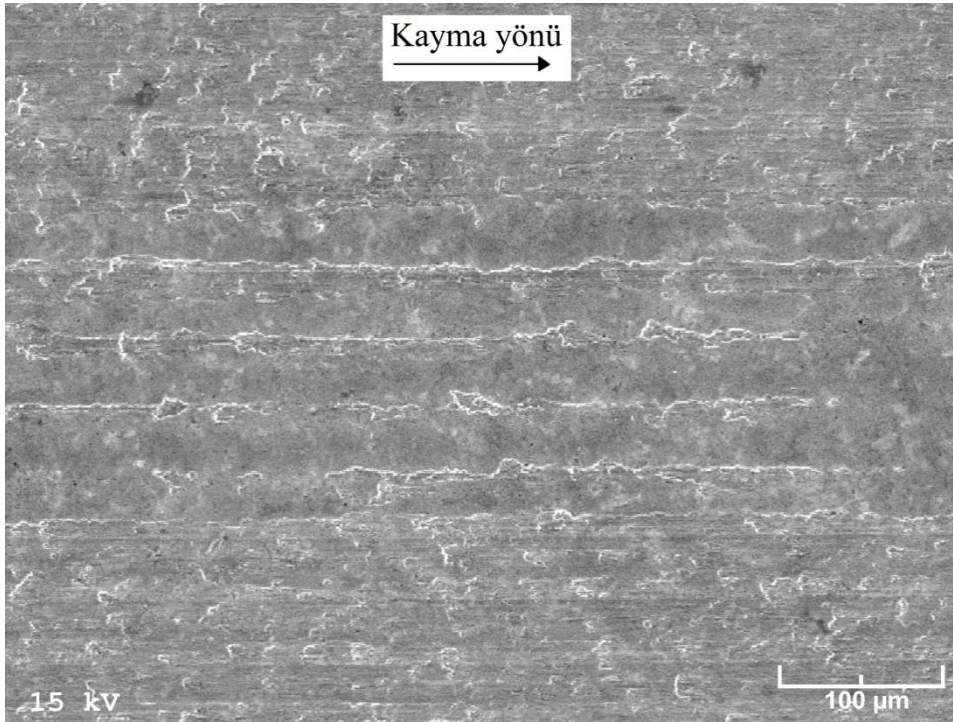
Şekil 58. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



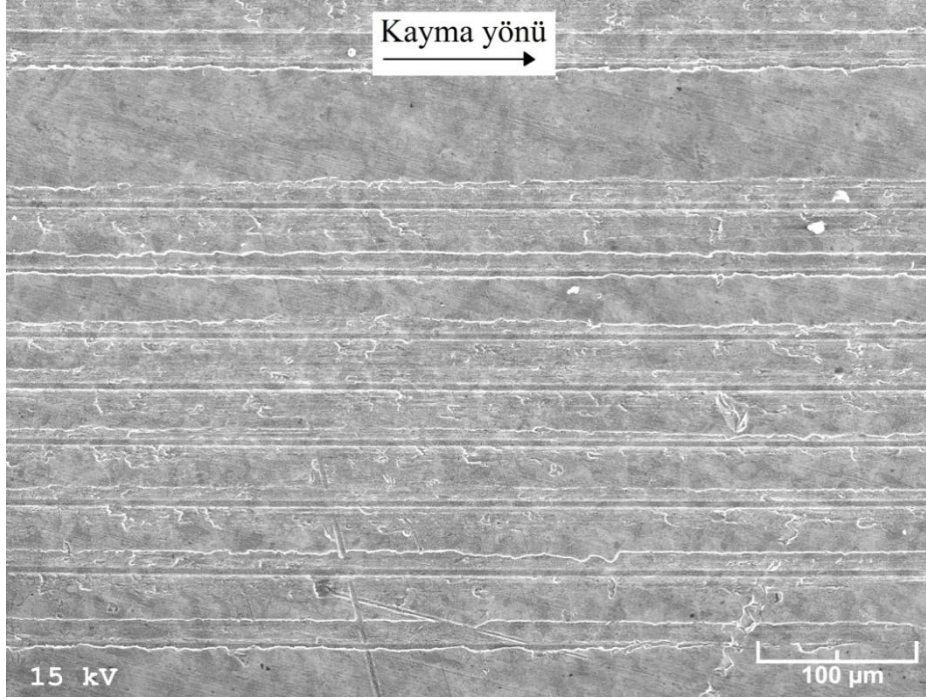
Şekil 59. 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



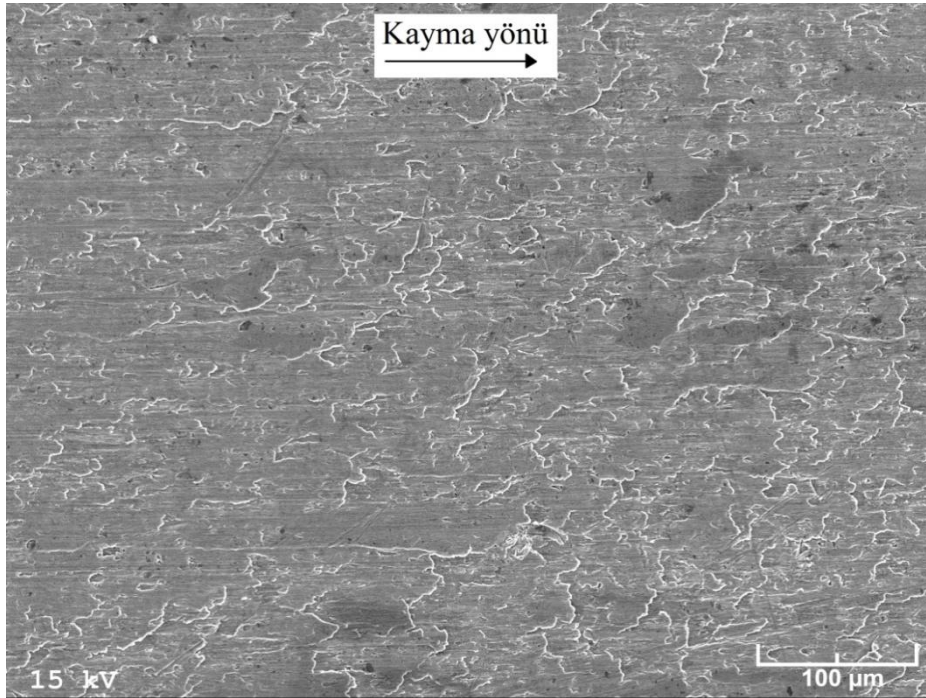
Şekil 60. Yağlı durumda 6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



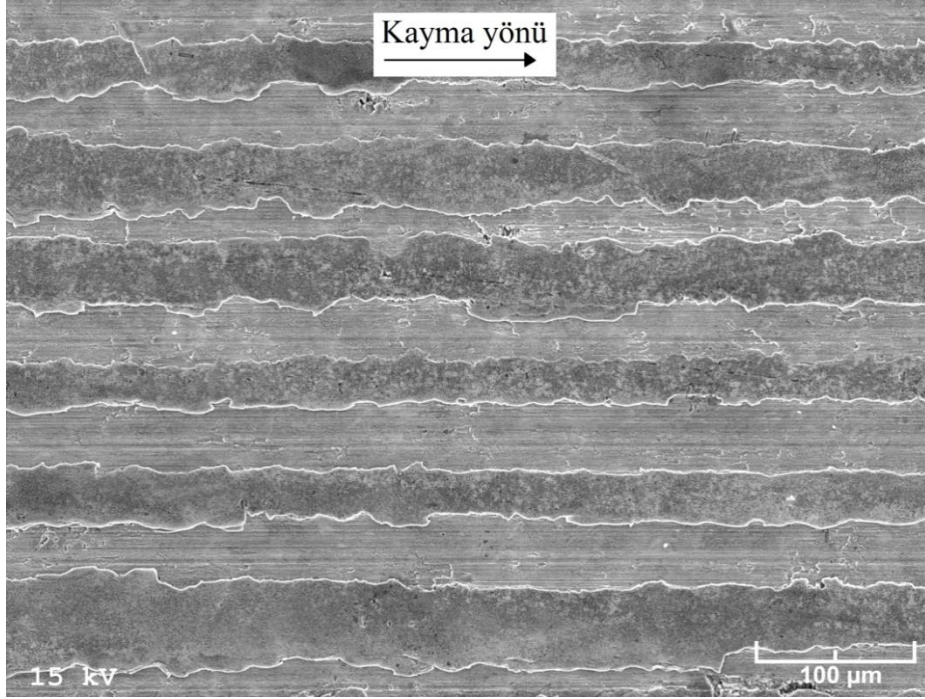
Şekil 61. Yağlı durumda 1 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



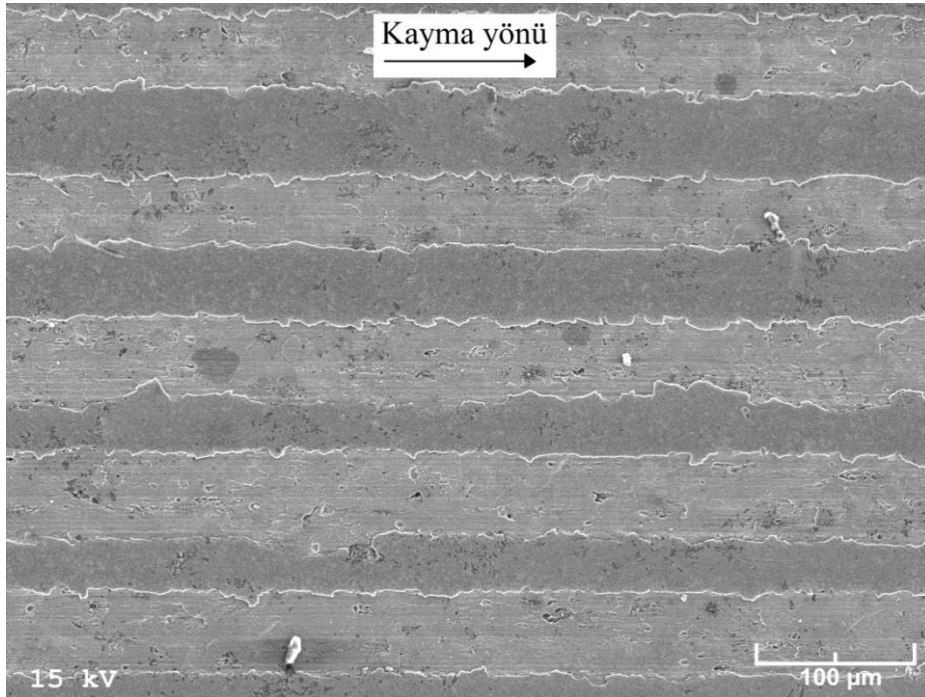
Şekil 62. Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



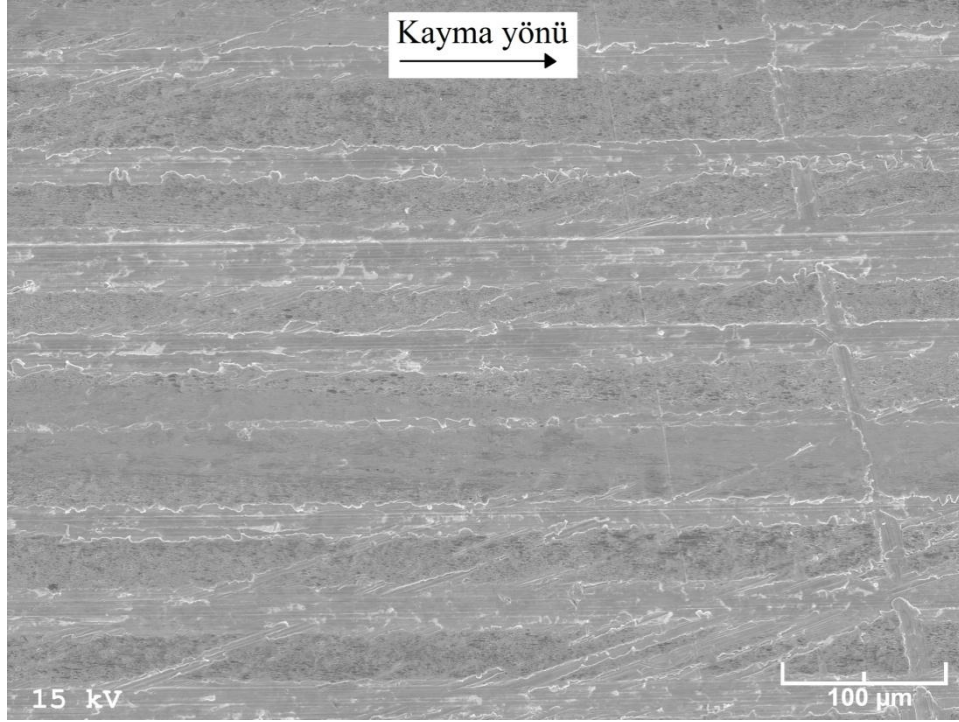
Şekil 63. Yağlı durumda 1 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu alınincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



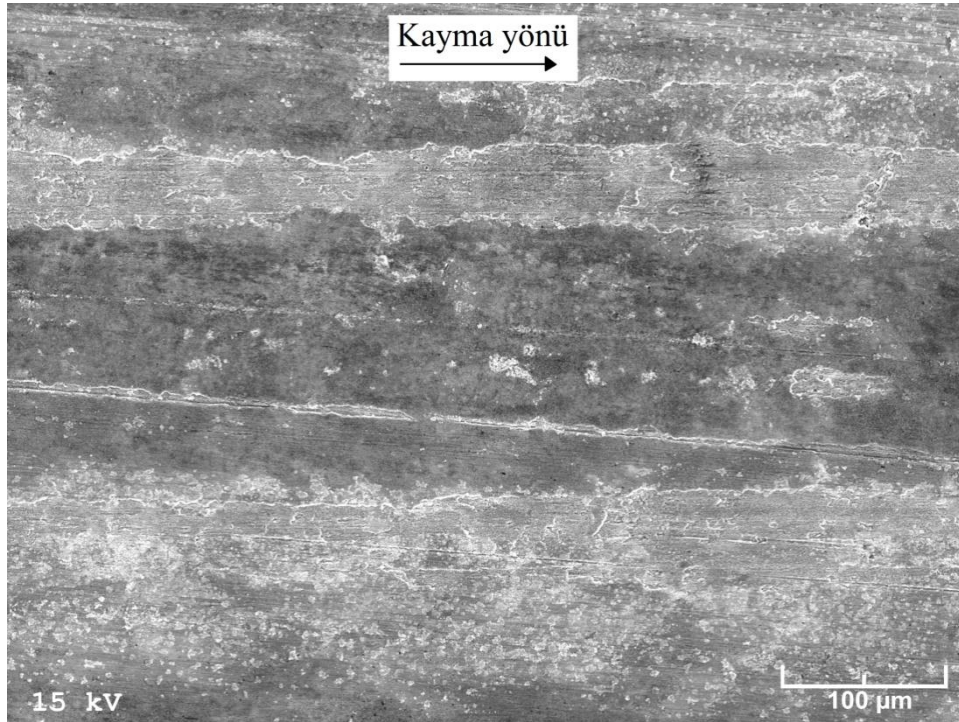
Şekil 64. Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik kayma yolu alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



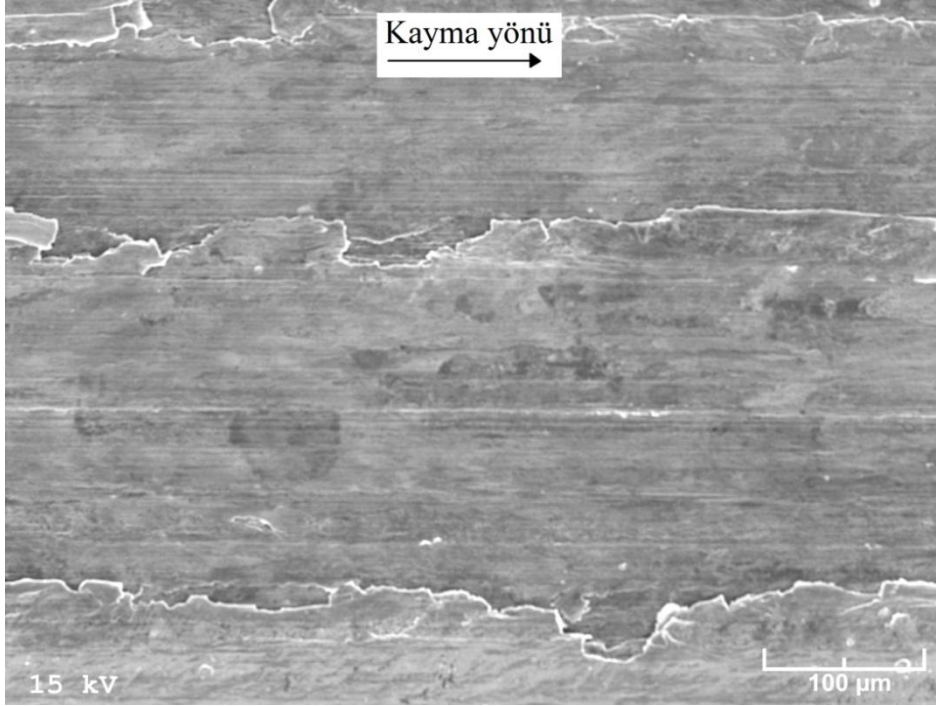
Şekil 65. Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu alınıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlem görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



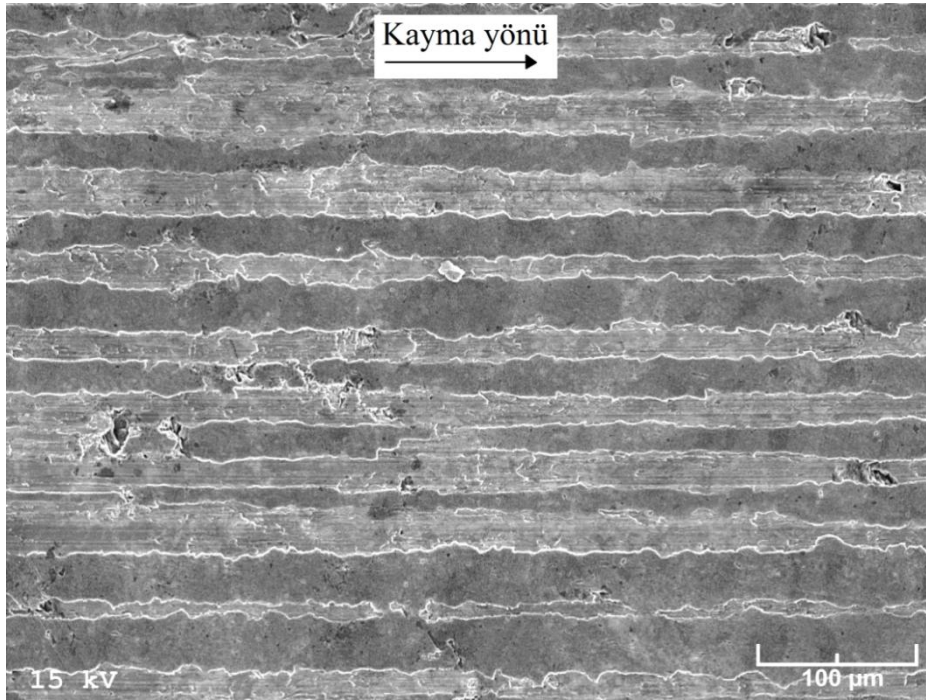
Şekil 66. Yağlı durumda 8 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



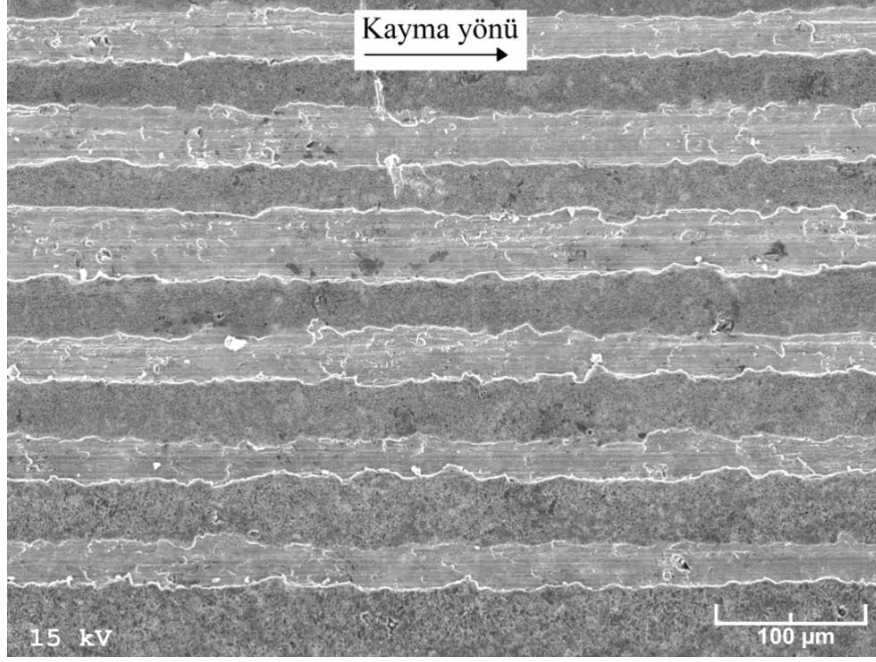
Şekil 67. 1 cm³/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 68. 1 cm³/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

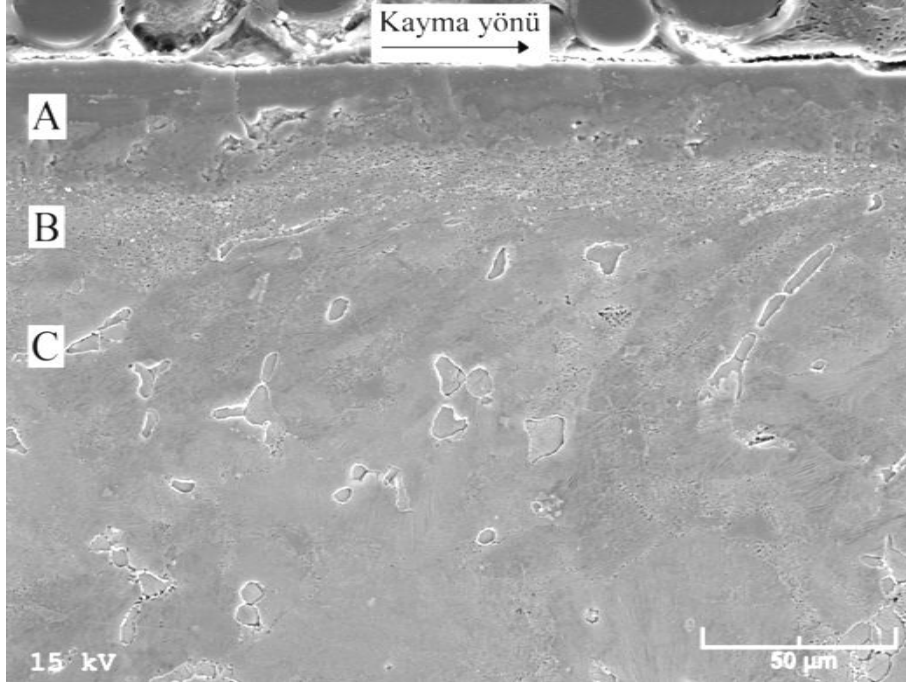


Şekil 69. 1 cm³/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

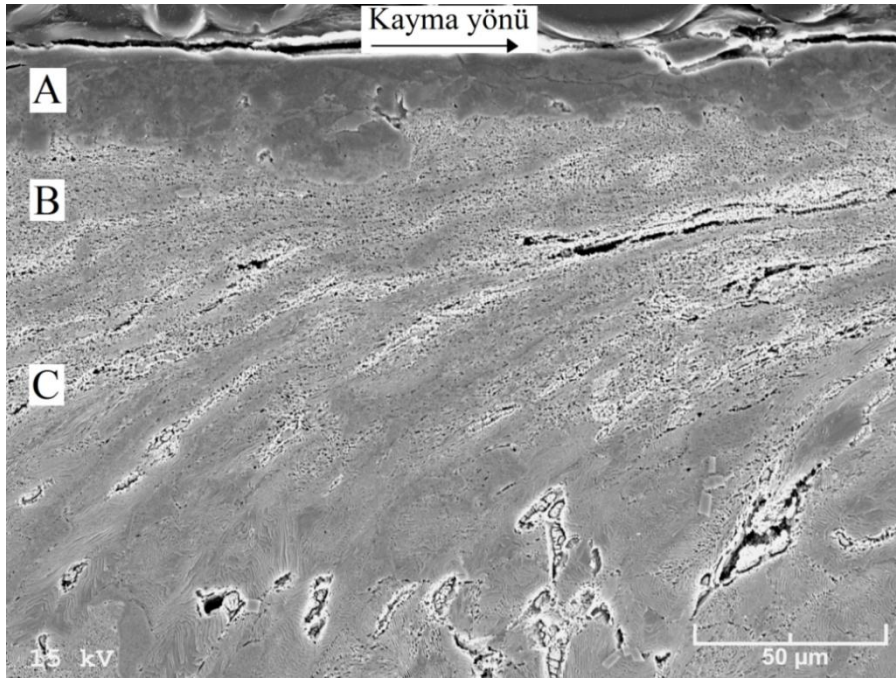


Şekil 70. 1 cm³/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik kayma hızında 20 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü

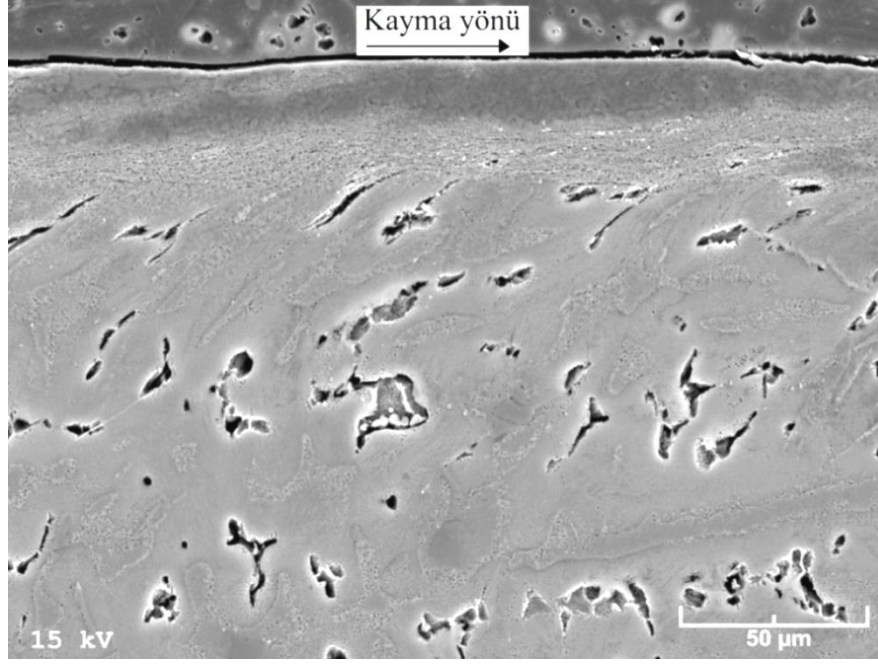
Yağsız durumda deneye tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımları ile SAE 660 bronzuna ait aşınma numunelerin yüzeylerinin altında meydana gelen yapısal değişimleri gösteren SEM görüntüleri Şekil 71-76'de verilmiştir. Bu görüntüler, söz konusu alaşımlara ait aşınma numunelerinin yüzeylerinin hemen altında yapısal dönüşümler sonucunda oluşan üç farklı tabakanın yer aldığını göstermektedir. Metalografik yapıları farklı olan bu tabakalar yüzeyden itibaren A, B ve C harfleriyle gösterilmiştir. A tabakasının nispeten düzgün ve pürüzsüz bir görünüme sahip olduğu, B tabakasının ince taneli bir yapıya sahip olduğu, C tabakasının ise kayma yönüne paralel şekilde yönlenmiş akma çizgileri içerdiği görülmüştür. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında ise yalnız A ve B tabakalarının olduğu gözlenmiştir, Şekil 75. Başka bir deyişle bu numunede belirgin akma çizgilerine rastlanmamıştır. Diğer taraftan SAE 660 bronzunun aşınma numunesinin yüzeyinin altında yalnız yönlenme belirtilerine rastlandı. Bu durum da aşınma deneyi sırasında söz konusu bronzda sıvanmış bölge ile ince taneli tabakanın oluşmadığı anlamına gelmektedir. Ancak, yağlı durumda deneye tabi tutulan numunelerin aşınma yüzeylerinin altında belirgin bir yapısal değişime rastlanmamıştır. Bu nedenle söz konusu numunelerin yüzey altı yapılarının görünümünün verilmesine gerek duyulmamıştır.



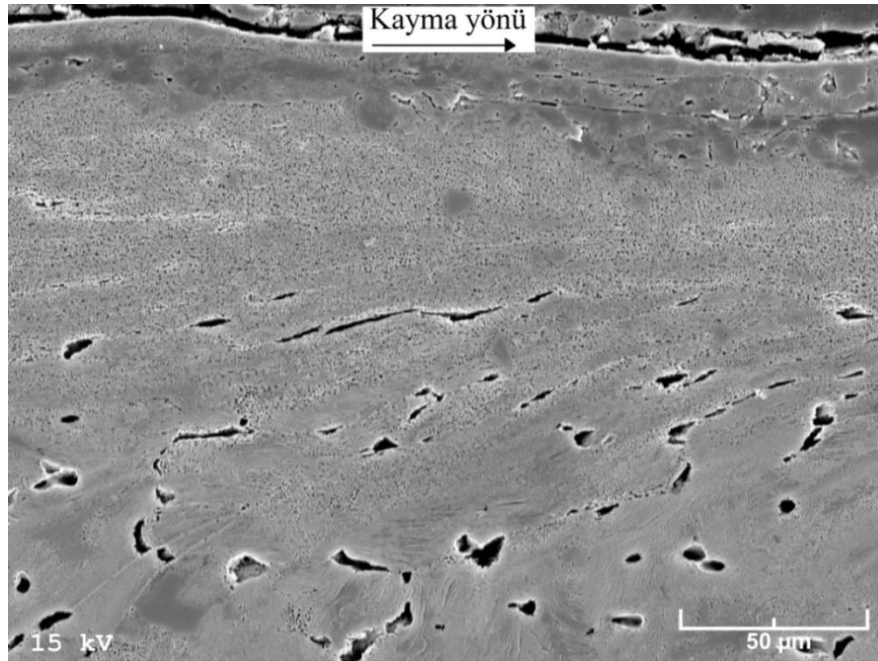
Şekil 71. Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü



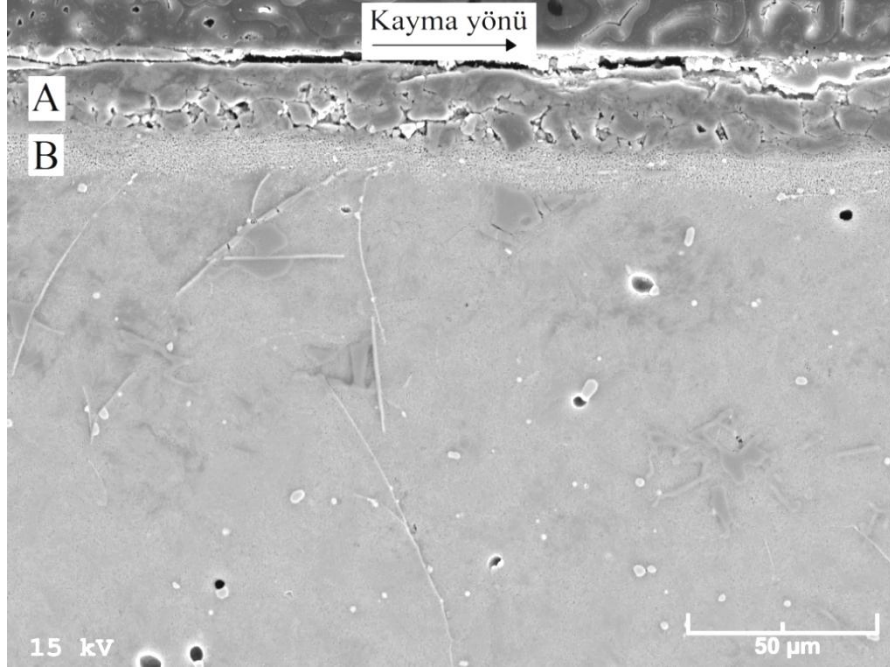
Şekil 72. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü



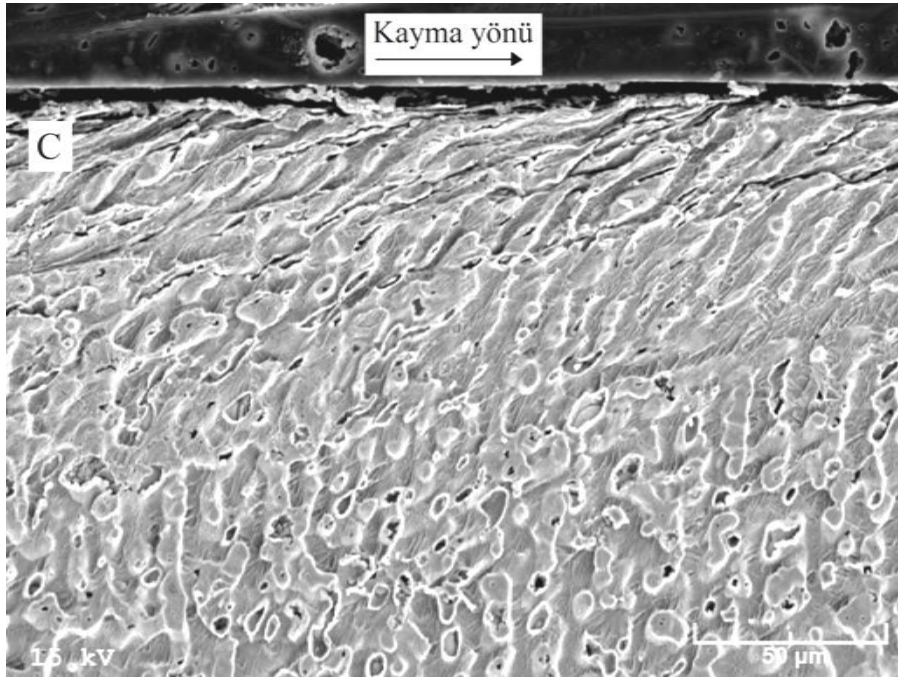
Şekil 73. Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü



Şekil 74. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü

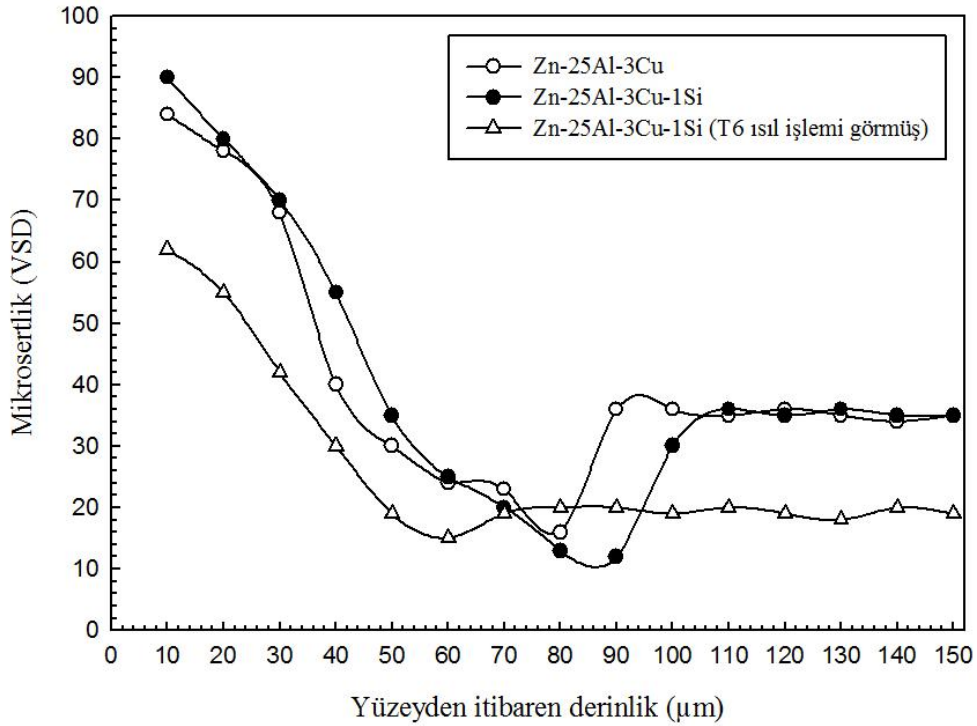


Şekil 75. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü

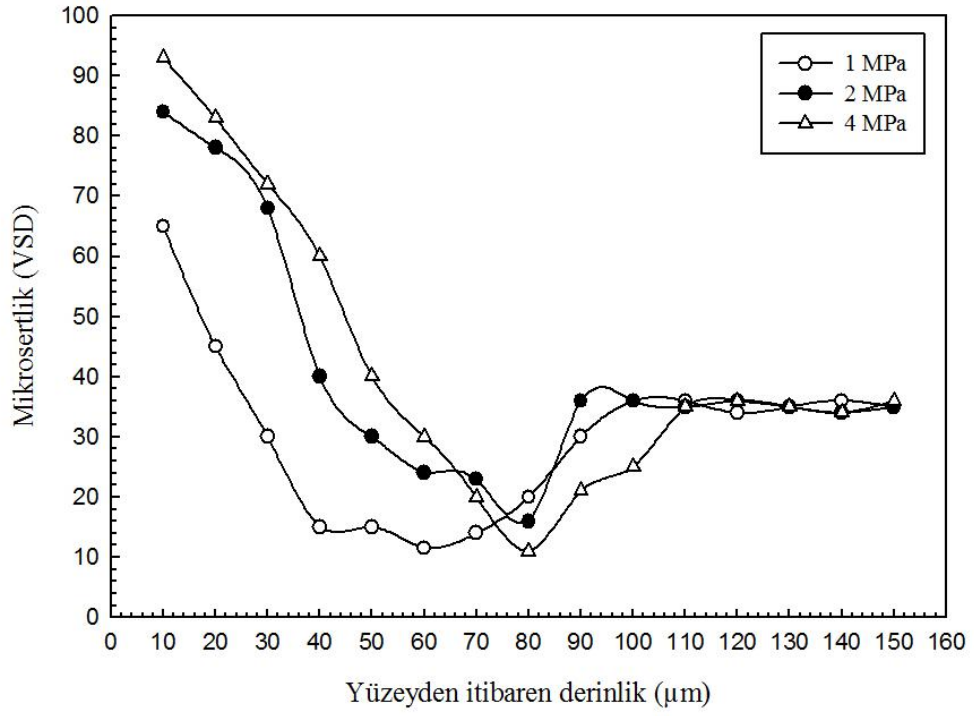


Şekil 76. Yağsız durumda 4 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik kayma hızında 2000 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan SAE 660 bronzunun aşınma yüzeyinin altında meydana gelen yapısal değişimlerinin SEM görüntüsü

Zn-25Al esaslı alaşımların yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinin mikrosertlik değerlerinin yüzeyden itibaren artan derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 77’de verilmiştir. Bu eğriler, söz konusu numunelerin mikrosertlik değerlerinin A tabakasından başlamak üzere artan derinlikle azaldığını, C tabakasında bir minimumdan geçtikten sonra artarak orijinal mikrosertlik değerlerine ulaştıklarını göstermektedir. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının farklı basınçlarda kuru aşınma deneyine tabi tutulan numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 78’de verilmiştir. Bu eğriler, basınç arttıkça A ve B tabakalarının mikrosertlik değerlerinin arttığını, C tabakasının mikrosertlik değerinin ise azaldığını göstermektedir.



Şekil 77. 2 MPa basınç ve 1 m/s kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlara ait numunelerin mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 78. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının farklı basınçlarda deneye tabi tutulan aşınma numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin yüzeyden itibaren artan derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler

4. İRDELEME

Dökülmüş durumdaki ikili Zn-25Al alaşımının içyapısının göbekli β dendritleri ile bunları çevreleyen alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin η fazlarından oluştuğu görülmüştür, Şekil 12. Bu alaşıma düşük oranlarda bakır katıldığında içyapıda önemli bir değişimin meydana gelmediği, ancak bakır oranının %3 seviyesine çıkarılması durumunda dendritler arası bölgelerde bakırca zengin ε (CuZn_4) fazının oluştuğu gözlemlenmiştir, Şekil 13. Bu durum Zn-25Al esaslı üçlü alaşımların metalografik yapıları üzerinde yapılan bir çalışmada da ortaya konulmuştur [63]. Dörtlü Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumda içyapısında ise β , α ve η fazlarının yanı sıra silisyum parçacıklarının da yer aldığı görülmüştür, Şekil 14. T6 ısıtma işlemi sonunda bu alaşımın dendritik yapısı tamamen ortadan kalkıp, bunun yerini irili ufaklı α taneleri alırken; Si ve ε parçacıklarında herhangi bir değişimin meydana gelmediği gözlenmiştir, Şekil 15. Metalografik incelemeler sonucunda söz konusu alaşımın içyapısında bulunan Si parçacıklarının homojen bir dağılım sergiledikleri ve bunlardan ince olanların ötektik dönüşüm ürünü, iri olanların ise birincil (primer) silisyum parçacıkları oldukları belirlenmiştir. Çinko esaslı alaşımların içyapılarını inceleyen araştırmacılar tarafından da gözlenen bu durum silisyum içeren alaşımların katılma davranışına dayandırılarak açıklanmıştır [9, 11, 12, 41-43, 51, 54, 64].

Uygulanan T6 ısıtma işlemi sonunda dörtlü Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımın sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerlerini arttığı görülmüştür, Tablo 8. Bu durum yaşlandırma sırasında meydana gelen çökelme sertleşmesinden kaynaklanmaktadır [64, 65]. Şöyle ki, yaşlandırma sırasında meydana gelen çökelme nedeniyle oluşan bağdaşıklık veya uyumluluk gerilmeleri kafes yapısını çarpıtarak dislokasyon hareketini zorlaştırmakta ve böylece alaşımın sertliğinin artmasına neden olmaktadır [66, 65]. Ancak, yaşlandırma aşamasından sonraki devrede alaşımın sertliğinin zamanla azaldığı görülmüştür, Şekil 20. Bu durum yaşlandırma devresini izleyen aşırı yaşlandırma devresinde bağdaşıklık gerilmelerinin zamanla azalmasından kaynaklanmaktadır [21, 37].

Zn-25Al-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerleri artan bakır oranı ile sürekli artmakta, ancak bakır oranının %3'ü aşması durumunda basma dayanımı hemen hemen sabit kalmaktadır, Şekil 18. Söz konusu alaşımların yoğunluğu artan bakır oranı ile artarken, darbe direnci ve kopma uzaması değerleri azalmaktadır. Ancak, artan bakır oranı ile azalan kopma uzamasının %2-3 Cu oranı aralığında sabit

kaldıktan sonra azalmaya devam ettiği gözlenmiştir, Şekil 18. Bu gözlem ve bulgular alaşımların içyapılarına dayandırarak açıklanabilir. Bu alaşımlara katılan bakır etkisini iki farklı şekilde göstermektedir. Bunlardan biri α fazı içerisinde çözünerek katı çözelti sertleşmesine neden olması, diğeri de çinko ile tepkimeye girerek ϵ fazı olarak adlandırılan CuZn_4 bileşiğini oluşturmasıdır [59]. Sözü edilen katı çözelti sertleşmesi nedeniyle bu alaşımların sertlik ve mukavemeti artan bakır oranı ile artmaktadır. Darbe direnci ve kopma uzamasındaki azalma ise ϵ fazının içyapı içerisindeki dağılımına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, metalografik gözlemler intermetalik ϵ fazının genelde dendritler arası bölgelerde yer aldığını göstermiştir. Sert ve gevrek olan bu fazın çentik etkisi yaparak veya dendritler arasındaki bağı zayıflatarak gevrek kırılmaya yol açtığı bilinmektedir [41, 58, 59]. Bu durum, sözü edilen ϵ fazının alaşımların darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin azalmasına neden olduğunu göstermektedir.

$\text{Zn-25Al-3Cu-(1-4)Si}$ alaşımların sertlik, çekme ve basma dayanımlarının artan silisyum oranı ile arttığı; ancak çekme dayanımının %1 Si, sertlik ve basma dayanımının ise %3 Si değerlerinin üzerindeki oranlarda azaldığı görülmüştür, Şekil 19. Ayrıca, bu şekilde yer alan eğriler söz konusu alaşımların yoğunluk, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin artan silisyum oranı ile azaldığını göstermektedir. Bu gözlem ve bulgular silisyum parçacıklarının büyüklük ve içyapı içerisindeki dağılımlarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki; düşük oranda silisyum içeren alaşımların içyapılarında bulunan ötektik silisyum parçacıkları dispersiyon sertleşmesi mekanizmasıyla bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin artmasına yol açtığı söylenebilir. Nitekim benzer gözlem ve sonuçlar önceki araştırmalar tarafından da elde edilmiştir [9, 11, 12, 51, 54, 41-43]. Silisyum oranının artması durumunda söz konusu alaşımların içyapılarında bulunan birincil (primer) silisyum parçacıklarının homojen bir dağılım sergilememesi ve aralarındaki ortalama mesafenin ötektik dönüşüm ile oluşan ince parçacıklar arasındaki ortalama mesafeye göre çok daha uzun olması nedenleriyle dispersiyon sertleşmesi etkisi azalmaktadır. Bu durum da söz konusu alaşımların mukavemetinin düşmesine yol açmaktadır. Alaşımların darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin azalması ise sert ve gevrek silisyum parçacıklarının çentik etkisi yapması ve dendritler arasında yer alan bölgeleri zayıflatmasından kaynaklanmaktadır [41-43].

Yağsız durumda sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde arttığı, bir tepe noktasından geçtikten sonra bir miktar azalarak

kararlı durumu yansıtan sabit değerlere ulaştıkları görülmüştür, Şekil 21-23. Bu aşımaların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin alıştırma devresi olarak bilinen başlangıç aşamasında aniden artması yüzey pürüzlerinin temas etmesinden veya etkileşiminden, söz konusu değerlerin belirli bir kayma mesafesinden sonra sabit kalması ise pürüzlerin zamanla azalarak yüzeylerin düzgünleşmesinden kaynaklanmış olabilir. Buna benzer gözlem ve açıklamalar ilgili literatürde yer almaktadır [67-72].

Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sürtünme katsayılarının basınç ve hızdan fazla etkilenmediği, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin ise artan basınç ve kayma hızı ile arttığı görülmüştür, Şekil 24 ve 27. SAE bronzunun söz konusu değerlerinin de basınçla benzer değişimler sergiledikleri gözlenmiştir, Şekil 24. Bu gözlemler söz konusu alaşımların metalografik yapılarına ve aşınma numunelerinin yüzeylerinde oluşan oksit tabakalarına dayandırılarak açıklanmaktadır [8-15]. Alaşımların sıcaklıklarının artan basınç ve hız ile artması sürtünme nedeniyle oluşan ısının birikimli olarak artmasından kaynaklanmaktadır. Bu aşımalarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının artan basınç ile artması ise adhesif aşınma teorisine dayandırılarak açıklanabilir [67-72]. Bu teoriye göre, malzemelerde meydana gelen hacim kaybı uygulanan basınç veya yükü doğru orantılı olarak değişmektedir. Başka bir deyişle, basınç arttıkça bu aşımalarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı da artmaktadır. Kayma hızının hacim kaybına etkisi ise, yüzeylerden kopan aşınma parçacıklarına etkiyen merkezkaç kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, kayma hızı arttıkça bu parçacıklara etki eden merkezkaç kuvveti de artar. Merkezkaç kuvvetinin artmasıyla savrulmuş sistemden uzaklaşan aşınma parçacıklarının miktarı artar ve dolayısıyla numune yüzeyine sıvayan malzeme miktarı azalır. Bu durum hacim kaybının artmasına yol açar.

6 MPa'lık basınç, 1 cm³/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında 80 km'lik yol tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımları ile SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı değerleri deney başlar başlamaz ani bir artış sergiledikten sonra azalarak yaklaşık 20 km'lik yol sonunda sabit kaldıkları, çalışma sıcaklıklarının başlangıç aşamasındaki hızlı bir artıştan sonra hemen hemen sabit değerlere ulaştığı, aşınma kayıplarının ise artan yol ile sürekli arttığı belirlenmiştir, Şekil 30-32. Sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin rodaj dönemi olarak da adlandırılan başlangıç aşamasında yüksek olması, yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşmaması nedeniyle bu yüzeylerin birbirine temas etmesi veya sürtünmesinden

kaynaklanmaktadır [41, 69, 72]. Rodaj dönemi sonrasında hem pürüzlerin azalması hem de yüzeylerin arasında yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşması nedenleriyle sürtünme katsayısı ve sıcaklık azalarak sabit değerlere ulaşmaktadır. Hacim kaybı değerlerinin artan kayma yolu ile sürekli artması ise artan sıcaklığın etkisi ile yağın viskozitesinin azalmasının yanı sıra kısmen buharlaşarak kalınlığının azalmasından kaynaklanmış olabilir. Yağ viskozitesi ve yağ filmi kalınlığının azalması kısmen de olsa metal-metal temasının meydana gelmesine ve dolayısıyla hacim kaybı değerlerinin artmasına yol açabilir [73].

Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının artan basınç ile azaldığı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise sürekli arttığı görülmüştür, Şekil 33-35. Yağlı sistemlerin sürtünme katsayısının yalnız hidrodinamik yağlama devresinde artan basınçla azaldığı bilinmektedir [1, 11, 12, 41-43, 67-72]. Bu durum söz konusu alaşımlarla yapılan aşınma deneyleri sırasında hidrodinamik yağlama koşullarının oluştuğunu göstermektedir. Hidrodinamik yağlama devresinde yüzeyler arasındaki yağ filmi kalınlığının artan basınçla azalması beklenir. Yağ filminin kalınlığının azalması yağ molekülleri arasındaki sürtünmenin azalmasına ve dolayısıyla sürtünme katsayısının düşmesine neden olmaktadır. Sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin sürekli artması ise özellikle rodaj döneminde yüzeyler arasında meydana gelen metal-metal teması ve sürtünmenin artan basınçla artmasından kaynaklanmış olabilir. Sürtünmenin artması kesme kuvvetinin ve sürtünme ısısının artmasına, bu büyüklüklerin artması da numune sıcaklığı ve aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin artmasına yol açar.

Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımların sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan kayma hızıyla artarken, sürtünme katsayısı değerlerinin fazla değişmediği gözlenmiştir, Şekil 36-38. Sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artması, yağa etkiyen merkezkaç kuvvetinin artan hız ile artması nedeniyle yağ filmi kalınlığının azalması ve bunun sonucunda meydana gelen metal-metal temasının artmasından kaynaklanmaktadır [41-43, 67-72]. Sürtünme katsayısının belirgin bir değişim göstermemesi yağ viskozitesinin artan sıcaklıkla azalması nedeniyle kayma hızının yağdaki iç sürtünme ve çalkalanmaya etkilerinin dengelenmesinden kaynaklanmış olabilir.

SEM ile yapılan incelemeler Zn-25Al esaslı alaşımları ile SAE 660 bronzunun kuru durumda deneye tabi tutulan numunelerinin aşınma yüzeylerinde sıvanma belirtilerinin yanı sıra çiziklerin yer aldığını göstermektedir, Şekil 46-49. Sıvanma durumu söz konusu alaşımlara ait numunelerin aşınma yüzeylerinden kopan parçacıkların disk yüzeyine

yapıştıktan sonra geri gelerek numune yüzeyine yapışmasından, çizik oluşumu ise numuneden ayrılan sert ϵ ve Si parçacıklarının yüzeyler arasına girerek numune yüzeyini çizmelerinden kaynaklanmış olabilir.

Yağlı durumda deneye tabi tutulan Zn-25Al esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzuna ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde de sıvanma bölgeleri ile çiziklerin yer aldığı görülmüştür, Şekil 57-70. Ancak, sıvanmanın bu alaşımların aşınmasında çiziklerden çok daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Kuru durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait numunelerin yüzeylerinin hemen altında yapısal dönüşümler sonucunda oluşan üç farklı tabakanın yer aldığı gözlenmiştir, Şekil 71-76. Bu tabakalar, yüzeyden itibaren A, B ve C harfleriyle gösterildi. A tabakasının yüzeye sıvanmış aşınma parçacıklarından oluştuğu, B tabakasının ince tanelerden oluştuğu, C tabakasının ise kayma yönüne paralel şekilde yönlenmiş akma çizgileri içerdiği görülmüştür. Aşınma numunelerinin kayma yönüne paralel kesitlerinden alınan mikrosertlik ölçümleri A ve B tabakalarının alaşımların orijinal yapılarından daha sert, C tabakasının ise daha yumuşak olduğunu göstermiştir, Şekil 77. Bu tabakaların oluşumu çalışma sırasında sıcaklık ve basınç etkisiyle yüzey malzemesinde meydana gelen yapısal değişimler ile aşınma parçacıklarının etkileşimine dayandırılarak açıklanabilir. A ve B tabakalarının sertlik değerlerinin çok yüksek olması aşınma parçacıklarının oksitlenmesi ve aşırı basınç altında preslenmesinden kaynaklanmaktadır [74, 79]. C tabakasının sertliğinin düşük olması ise, aşırı plastik deformasyona maruz kalan yüzey malzemesinin sıcaklığın etkisiyle yeniden kristalleşmesinden kaynaklanmış olabilir [74-79]. Bu tabakadaki yönlenme ise, dönen diskin numune yüzeyine uyguladığı teğetsel kuvvet nedeniyle numune yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin etkisi sonucunda meydana gelmiş olabilir. Metalografik gözlemler ve mikrosertlik değerleri dikkate alındığında A tabakasının deney sırasında kopan aşınma parçacıklarının geri dönerek yüzeye sıvanması, ince taneli B tabakasının aşınma parçacıklarının basınç etkisiyle öğütülüp yüzeye sıvanmaları ve C tabakasının ise yüzey malzemesinin aşırı plastik deformasyona uğrayarak kayma yönüne paralel olarak yönlenmesi sonucunda oluştukları söylenebilir. Benzer açıklamalar çinko esaslı alaşımların aşınma davranışı üzerinde çalışan önceki araştırmacılar tarafından da yapılmıştır [71-79].

Yağsız durumda deneye tabi tutulan alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci dökülmüş durumdaki Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımından, en düşük aşınma direnci ise SAE 660 bronzundan elde edilmiştir. Bu durum incelenen alaşımların mekanik özelliklerine ve

aşınma davranışlarına dayandırılarak açıklanabilir. Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımın dökülmüş durumda en yüksek aşınma direncini sergilemesi bu alaşımın çekme ve basma dayanımlarının üçlü Zn-25Al-3Cu alaşımı ile SAE 660 bronzunun söz konusu değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalar çinko esaslı alaşımların aşınma direncinin sertlikten çok çekme ve basma dayanımlarına bağlı olduğunu ve mukavemet değerleri arttıkça aşınma direncinin arttığını göstermiştir [1, 11, 12, 14, 41, 51, 53, 58, 59]. Ancak, Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımı T6 ısıl işleme görmüş durumda en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen, dökülmüş durumdaki numunelerine göre daha düşük aşınma direnci sergilediği görülmüştür. Bu durum söz konusu alaşımın T6 ısıl işleme görmüş numunelerinin aşınma deneyi sırasında meydana gelen ısınma nedeniyle aşırı yaşlanmalarından yani sertlik ve mukavemet değerlerinin azalmasından kaynaklanmış olabilir.

5. SONUÇLAR

1. Zn-25Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısı göbekli β dendritleri ile bunları çevreleyen alüminyumca zengin α ve çinkoca zengin η fazlarından oluşmaktadır. Bu alaşıma düşük oranlarda bakır katıldığında içyapıda önemli bir değişim meydana gelmemekte, ancak bakır oranının %3 seviyesine çıkarılması durumunda dendritler arası bölgelerde bakırca zengin sert ϵ (CuZn_4) fazı oluşmaktadır.
2. Dörtlü Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımın dökülmüş durumdaki içyapısında β , α , η ve ϵ fazlarının yanı sıra silisyum parçacıkları yer almaktadır.
3. T6 ısıtma işlemi sonunda Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının dendritik yapısı tamamen ortadan kalkıp, bunun yerini irili ufaklı α taneleri alırken; Si ve ϵ (CuZn_4) parçacıklarında herhangi bir değişim meydana gelmemektedir.
4. Zn-25Al-(1-5)Cu alaşımlarının sertlik, çekme ve basma dayanımları artan bakır oranı ile sürekli artmaktadır. Ancak, bakır oranı %3 değerinin üzerine çıkması durumunda basma dayanımı değerleri hemen hemen sabit kalmaktadır.
5. Dörtlü Zn-25Al-3Cu-(1-4)Si alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerleri artan silisyum oranı ile artmaktadır. Ancak silisyum oranının %1 değerinin üzerine çıkması durumunda çekme dayanımı, %3 değerinin üzerine çıkması durumunda ise çekme dayanımının yanı sıra sertlik ve basma dayanımı değerleri de azalmaktadır.
6. T6 ısıtma işlemi Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının sertliği ile çekme ve basma dayanımlarını artırmakta, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerini ise düşürmektedir.
7. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayıları artan kayma hızı ile azalmakta, ancak uygulanan basınçtan pek fazla etkilenmemektedir. Sıcaklık ve hacim kaybı değerleri ise artan basınç ve kayma hızıyla sürekli artmaktadır. Ayrıca, dökülmüş durumdaki alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı bunların sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerleri ile ters orantılı olarak değişmektedir.
8. Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan yağ debisi ile azalmakta, yağ debisinin belirli bir değer (1 cm^3/saat) üzerine çıkması durumunda ise sabit kalmaktadır.

9. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan bütün alaşımların sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan basınç ile sürekli artmakta, sürtünme katsayısı değerleri ise sürekli azalmaktadır. Ayrıca, kayma hızı arttıkça söz konusu alaşımların sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artmakta, sürtünme katsayısı değerlerinde ise önemli bir değişim meydana gelmemektedir.
10. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-25Al-3Cu ve Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımlarının aşınma yüzeylerinin altında yapısal değişimler meydana gelmekte ve bu değişimler farklı tabakaların oluşmasına yol açmaktadır.
11. Üretilen Zn-25Al esaslı alaşımların hepsi SAE 660 bronzuna göre daha üstün aşınma davranışı sergilemektedir ve dörtlü Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımı incelenen alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncine sahiptir.
12. T6 ısıl işlemi Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının aşınma direncini yağlı çalışma durumunda düşürmekte, yağsız çalışma durumunda ise fazla etkilememektedir.

6. ÖNERİLER

1. Zn-25Al esaslı üçlü ve dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek mukavemet ve aşınma direnci sergileyen Zn-25Al-3Cu-1Si alaşımının yorulma ve korozyon özellikleri incelendikten sonra bu alaşımdan kaymalı yatak imal edilerek bunun statik ve dinamik yük altındaki tribolojik davranışları araştırılabilir.
2. Isıl işlemin Zn-25Al esaslı üçlü ve dörtlü alaşımların deformasyon ve aşınma mekanizmalarına etkileri mikroanaliz, X-ışını ve elektron difraksiyonu yöntemleri ile daha ayrıntılı biçimde incelenebilir.
3. Mg, Mn ve Ni gibi element katkılarının Zn-25Al esaslı alaşımlarının yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri araştırılabilir.
4. Farklı ısıl işlemlerin Zn-25Al esaslı alaşımların yapı ve özelliklerine etkileri incelenerek mühendislik uygulamaları için en uygun ısıl işlem ve çalışma koşulları belirlenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminum Based Bearings Alloys, Ph.D. Thesis, University of Aston Birmingham, 1980.
2. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25 Al Based Alloys, Wear, 116 (1987) 221-224.
3. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al Based Alloys in an Automotive Engine Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
4. Altorfer, K., Zinc Alloys Compete With Bronze in Bearing and Bushings, Metal Progress, 122, 6 (1982) 29-31.
5. Delneville, P., Tribological Behaviour of Zn-Al Alloys (ZA27) Compared with Bronze When Used as a Bearing Material with High Load and very Low Speed, Wear, 105 (1985) 283-292.
6. Wakefield, E.C., Cooper-Aluminum-Zinc Alloy Excels in tough Conditions, Design Engineering, (1973) 1-4.
7. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearings Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
8. Mondal, D. P., Das, S. ve Rajput, V., Effect of Zinc Concentration and Experimental Parameters on High Stress Abrasive Wear Behaviour of Al-Zn Alloys: A Factorial Design Approach, Materials Science and Engineering A, 406 (2005) 24-33.
9. 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.
10. 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.
11. Savaşkan, T. ve Aydın, A., Effect of Silicon Content on the Mechanical and Tribological Properties Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.
12. Savaşkan, T. ve Bican, O., Effects of Silicon Content on the Microstructural Features and Mechanical and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si Alloys, Materials Science and Engineering A, 404 (2005) 259-269.
13. Risdon, T.J., Barnhurst, R.J. ve Mihalchuk, W.M., Comparative Wear Rate Evaluation of Zinc Aluminum (ZA) and Bronze Alloys through Block on Ring Testing and Field Applications, SAE Annual Conference, paper no 860064, (1986) 400-405.
14. Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T. ve Murphy, S., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Wear, 252 (2002) 894-901.

15. Calayag, T.S., The Practicality of Using Zinc-Aluminum Alloys for Friction-Type Bearings, 25th Annual Conference of Metallurgists, Aug. 1986, Toronto, Ontario, 305-313.
16. Bican. O., Bakır ve Silisyum İçeren Al-25Zn Esaslı Alaşımların Dökülmüş ve Isıl İşlem Görmüş Durumdaki Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010.
17. Gross, D.K., Zinc Alloys: Specification and Processing, Society of Automotive Engineers, Paper No 871952, (1988) 1069-1075.
18. 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.
19. Geng, H., ma, J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy, Wear, 169 (1993) 201-207.
20. Murphy, S., The Structure of the T¹ Phase in the System Al-Cu-Zn, Metal Science, 9 (1975) 163-168.
21. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System, Zeitschrift Für Metallkunde, 71 (1980) 96-102.
22. 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.
23. Zhu, Y.H., Murphy, S. ve Yeung, C., Early Stages of Phase Transformation in Quenched Zinc-Aluminum Based Alloys, Journal of Materials Processing Technology, 94 (1999) 78-84.
24. Bican. O., Silisyum Oranının Monotektoid Esaslı Zn-Al-Cu-Si Alaşımlarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.
25. Zhu, Y.H., Yan, B. ve Huang, W., Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35), Materials Science and Technology, 11 (1995) 109-113.
26. 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.
27. Oppenheim, T., Tewfic S., Scheck., Klee. V., Lomeli, S., Dahir, W., Youngren, P., Aizpuru, N., Clark, R., Lee, E.W., Ogren, J. ve Es-Said, O.S., On the Correlation of Mechanical and Physical Properties of 6061-T6 and 7249-T6 Aluminium Alloys, Engineering Failure Analysis 14 (2007) 192-196.
28. Guo, J. ve Yuan, X., The Aging Behaviour of SiC/Gr/6013Al Composite in T4 and T6 Treatments, Materials Science and Engineering A, 499 (2009) 212-214.
29. R. Akhter, L. ve Ivanchev, H.P. Burger, Effect of pre/post T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Laser Welded SSM cast A356 Aluminum Alloy, Material Science and Engineering A, 447 (2007) 192-196.

30. Wang, Z., Li, Z., Ning, J. ve Zhao, L., Effect of Heat Treatments on the Crushing Behaviour and Energy Absorbing Performance of Aluminum Alloy Foams, Material and Design, 30 (2009) 977-982.
31. Calayag, T., Zinc Alloys Replace Bronze in Mining Equipment Bushings and Bearings, Mining Engineering, (1983)727-728.
32. Pürçek, G., Küçükömeroğlu, T. ve Savaşkan, T., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Mühendis ve Makina, 37 (1996) 35-41.
33. Goodwin, F.E. ve Ponikvar., A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, Third Edition, International Lead Zinc Research Org. Inc., 1989.
34. Barnhust, R.J., Zinc-Aluminum Alloys Design Manuel for Continious Rotation Bearings, Noranda Sales Corporation Ltd, Toronto, January, 1988.
35. Apelian, D., Palivan, M. ve Herrschaft, D.C., Casting with Zinc Alloys, Journal of Metals, 33, 11 (1991) 12-19.
36. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Decomposition of Zn-Al-Alloys on Quench-Aging, Materials Science and Technology, 6 (1990) 695-700.
37. Savaşkan, T. ve Murphy S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri, 4. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Ekim 1986, Bildiriler Kitabı, II: 532-555.
38. Barnhust, R.J., Guidelines for Designing Zinc Alloy Bearing a Technical Manual, Society of Automotive Engineers, Paper No 880289, (1988) 2164-2170.
39. Zhu, Y.H. ve Goodwin, F.E., Microstructures of Thermomechanically Treated Eutectoid Zn-Al Alloy, J. Material. Sci. Technol., 10 (1994).
40. 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.
41. Alemdağ, Y. ve Savaşkan, T., Mechanical and Tribological Properties of Al-40Zn-Cu Alloys, Tribology International, 41 (2009) 176-182.
42. Savaşkan, T. ve Alemdağ Y., Effects of Pressure and sliding Speed on the Friction and Wear Properties of Al-40Zn-3Cu-2Si alloy: A Comparative Study with SAE 65 Bronze, Materials Science and Engineering A, 496 (2008) 517-523.
43. Alemdağ Y. ve Savaşkan, T., Effect of Silicon Content on the Mechanical Properties and Lubricated Wear Behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys, Tribology Letters, 29 (2008) 221-227.
44. Alemdağ Y. ve Savaşkan, T., Effect of Silicon Content on the Mechanical Properties and Lubricated Wear Behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys, Tribology Letters, 29 (2008) 221-227.
45. Lyon, R., New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications, the Institute of British Foundry man, 83rd Annual Conference, Buxton, (1986) 87-97.

46. Pürçek, G., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarından Üretilen Kaymalı Yatakların Statik ve Dinamik Yük Altındaki Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
47. Gervais, E., Barnhurst, R.J. ve Loong, C.A., An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys, Journal of Metals, 37, 11 (1985) 43-47.
48. Lyon, R., The Properties and Applications of ZA Alloys, The British Foundry-man, (1986) 344-349.
49. Lyon, R., Engineering Applications of ZA Alloys, Proc. Second Conference on Material Engineering, London, (1985) 221-227.
50. Skanazi, A.F., Pelerin, J., Coutouradis, D., Magnus, B ve Meeus, M., Some Recent Developments in the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys, Metallwissenschaft und Technik, 37, 9 (1983) 898-902.
51. Azaklı Z. ve Savaşkan. T., An Examination of Frictional and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Case of Oil Cut Off, Tribology International, 41 (2008) 9-16.
52. Savaşkan, T. ve Azaklı, Z., An Investigation of Lubricated Friction and Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Comparison with SAE 65 Bearing Bronze, Wear 264 (2008) 920-928.
53. Prasad, B.K., Microstructural Alterations Through Heat Treatment and Its Influence on Wear Response of a Silicon Containing Zinc Based Alloy under Different Test Conditions, Materials Science and Technology, 19 (2003) 327-335.
54. Prasad, B.K., Microstructure, Mechanical Properties and Sliding Wear Characteristics of Zn-Based Alloys: Effects of Partially Substituting Cu by Si, Zeitschrift Für Metallkunde, 88 (1997) 929-933.
55. Douglass, D. L. ve Barbee, W., Spinodal Decomposition in Al/Zn Alloys, Journal of Materials Science, 4 (1969) 138-151.
56. Carpenter, G. J.C. ve Garwood, R. D., The Ageing of a Quenched Aluminium-22,5% Zinc Alloy, Metal Science Journal, 1 (1967) 202-211.
57. Aydın, M., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Değişik Ortamlardaki Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon, 2001.
58. 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.
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 International, 37 (2004) 45-50.

60. Anantharaman, 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.
61. Prasad, B.K., Effects of Silicon Addition and Test Parameters on Sliding Wear Characteristics of Zinc-Based Alloy Containing 37,5% Aluminium, Materials Transactions, JIM., 38, 8 (1997)701-706.
62. Prasad, B.K., The Effect of Heat Treatment on Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy Containing Nickel and Silicon, Tribology Letters, 15, 3 (2003) 333-341.
63. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Metallography of Zinc-25 % Based Alloys in the As-Cast and Aged Conditions, Practical Metallography, 24 (1987) 203-221.
64. Hekimoğlu, A.P., Bakır Katkısı ve Isıl İşlemin Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon, 2002.
65. Savaşkan, T., Malzeme Bilgisi ve Muayinesi, Derya Kitabevi, Trabzon, 2000.
66. Turhal. M. Ş., Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarında Mukavemet Artırma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon, 1994.
67. Avner, S. H., Introduction to Physical Metallurgy, International Edition, Mc Graw-Hill Book Company, USA, 1974.
68. Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1976.
69. Bowdwen, F. P. ve Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 2001.
70. Halling, J., Principles of Tribology, Macmillan Education Ltd., Great Britain, 1989.
71. Hutchings, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold Publishers Ltd., Great Britain, 1992.
72. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, Jhon Willey and Sons. Inc., New York, 1995.
73. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Srtünme (Creep) Davranışlarının İncelenmesi, Metallurji Dergisi, 53 (1987) 15-23.
74. Prasad, B.K., Patwardhan, A. K. ve Yegneswaran, A. H., Wear Characteristics of a Zinc-Based Alloy Compared with a Conventional Bearing Bronze under Mixed Lubrication Conditions: Effects of Material and Test Parameters, Canadian Metallurgical Quaterly, 40 (2001) 193-210.
75. Jain, L., Laufer, E. E. ve Masounave, J., Wear in Zn-Al-Si Alloys, Wear, 165 (1993) 51-56.
76. Gang, H. ve Ma, J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy, Wear, 169 (1993) 201-207.

77. Şahin, Y. ve Murphy, S., The Effect of Sliding Speed and Microstructure on the Dry Wear Properties of Metal-Matrix Composites, Wear, 214 (1998) 98-106.
78. Prasad, B.K., Investigation into Sliding Wear Performance of Zinc-Based Alloy Reinforced with SiC Particles in Dry and Lubricated Conditions, Wear, 262 (2007) 262-273.
79. Rodriguez, J., Poza, P., Garrido, M. A. ve Rico, A., Dry Sliding Wear Behaviour of Aluminium-Lithium Alloys Reinforced with SiC Particles, Wear, 262 (2007) 292-300.

ÖZGEÇMİŞ

Reza Anvari MALEKİ 1987 yılında İıan-Melekan'da doğdu. 2004 yılında Valiasr Lisesi'ni bitirdi. 2010 yılında Takestan Azad Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden Makine Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı Yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başlayan Reza Anvari MALEKİ iyi derecede Azerice, Farsça ve İngilizce bilmektedir.