

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Zn-40Al ESASLI ALAŞIMLARIN YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak.Yük.Müh. Zeki AZAKLI**

**HAZİRAN 2016  
TRABZON**



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



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Zeki AZAKLI tarafından hazırlanan**

**Zn-40Al ESASLI ALAŞIMLARIN YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 31 /05/2016 gün ve 1655 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN**

**Üye : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL**

**Üye : Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**

**Üye : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN**

**Üye : Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ**

*Savaşkan*

*ERDÖL*

*ÇİMENÖĞLU*

*ARSLAN*

*Alemdağ*

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Çinko esaslı alaşımlar üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile ideal tribolojik davranış sergilemeleri nedeni ile birçok geleneksel yatak alaşımının yerine başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Çinko esaslı alaşımlar üzerinde yapılan uzun süreli araştırmalar sonucunda üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip yeni alaşımlar geliştirilmiştir. Bu alaşımlar içerisinde sertlik, mukavemet ve aşınma direnci bakımlarından Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ön plana çıkmaktadır. Ancak bu alaşımların mekanik özelliklerinin sıcaklığa duyarlı olması ve özellikle bakır içeren alaşımların boyutsal kararsızlık sergilemesi dikkat edilmesi gereken önemli kısıtlamalar olarak değerlendirilmektedir. Bu kısıtlamaların giderilmesi için bu alaşımlara alaşım elementi katma veya ısıl işlem uygulama yoluna gidilmiştir. Ancak farklı ısıl işlemlerin geliştirilen Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının yapı ve özellikleri üzerindeki etkilerinin yeterince incelenerek ortaya konulamadığı görülmüştür. Ayrıca, nikel katkısının monotektoid alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkilerinin ele alınarak incelenmediği göze çarpmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada nikel katkısının Zn-40Al esaslı alaşımların ve T5, T6, T7 ve izotermal dönüşüm işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının yapı ve özelliklerine etkilerini inceleyerek bu alaşımlar için en uygun ısıl işlem ve nikel oranını belirlemek hedeflenmiştir.

Bu konunun seçiminde ve çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren ve her türlü fedakârlığı ve yardımı gösteren sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmama yardım eden ve katkıda bulunan Doç. Dr. Osman BİCAN, Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ, Yrd. Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU, Arş. Gör. Cemalettin ŞİMŞEK ve Arş. Gör. Hasan Onur TAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışmanın yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Takım Tezgâhları laboratuvarlarında çalışan tüm teknisyenlere teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince maddi ve manevi desteklerini şahsımdan esirgemeyen başta annem, babam ve kardeşlerim olmak üzere, Yrd. Doç. Dr. Cemalettin AYGÜN, Yrd. Doç. Dr. Recep GÜMRÜK ile yakın dost ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Zeki AZAKLI  
Haziran 2016



## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Zn-40Al ESASLI ALAŞIMLARIN YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

27/06/2016

Zeki AZAKLI

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XXII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko Esaslı İkili, Üçlü ve Dörtlü Alaşımların Faz Diyagramları .....	3
1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramları.....	3
1.2.2. Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramı.....	4
1.2.3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si Faz Diyagramı .....	6
1.3. Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel, Mekaniksel ve Tribolojik Özellikleri .....	7
1.3.1. Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri .....	7
1.3.2. Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri .....	7
1.3.3. Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri .....	11
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	12
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	14
2.1. Alaşımların Üretimi, Kimyasal Analiz ve Isıl İşlem.....	14
2.2. Yapısal İnceleme .....	15
2.3. Alaşımların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	15
2.4. Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi .....	16
3. BULGULAR .....	20
3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri .....	20
3.2. Yapısal İnceleme .....	20
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular .....	30
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular .....	37
3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular .....	51
3.6. Yüzeyaltı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular .....	87

4.	İRDELEME.....	95
4.1.	Metalografik İncelemelerden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi.....	95
4.2.	Mekanik Deneylelerden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi.....	96
4.3.	Sürtünme ve Aşınma Deneylelerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi.....	98
4.4.	Tribolojik ve Mekanik Deneylelerden Elde Edilen Bulguların Korelasyonu .....	102
4.5.	Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi.....	111
4.6.	Yüzey Altı İncelemelerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi.....	112
5.	SONUÇLAR .....	113
6.	ÖNERİLER .....	116
7.	KAYNAKLAR.....	117

ÖZGEÇMİŞ



Doktora Tezi

ÖZET

Zn-40Al ESASLI ALAŞIMLARIN YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Zeki AZAKLI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim dalı  
Danışman: Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN  
2016, 123 Sayfa

Bu çalışmada Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımları ile Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı kokil döküm yöntemi ile üretildi. Üretilen Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımları dökülmüş durumda Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ise hem dökülmüş durumda hem de ısıl işlem durumlarda deneye tabi tutuldu. Alaşımların yapısal ve mekanik özellikleri incelendikten sonra tribolojik (sürtünme ve aşınma) davranışı blok-silindir esaslı bir aşınma deney düzeneği yardımıyla araştırıldı.

Ni oranı arttıkça Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni alaşımlarının sertlik, sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı değerlerinin arttığı, mukavemet ve süneklik değerlerinin azaldığı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve hacim kaybı değerlerinin ise farklı değişimler sergilediği görüldü.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin uygulanan T5, T6 ve havada soğutma ısıl işlemleri ile azaldığı, T7 ve fırında soğutma ısıl işlemleri ile arttığı belirlendi. Diğer taraftan sözü edilen değerlerin ortalama yüzey pürüzlülüğü ile ters orantılı olarak değiştiği gözlemlendi. İzotermal dönüşüm sıcaklığı arttıkça bu alaşımın sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin arttığı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ile sertlik ve mukavemet değerlerinin ise azaldığı belirlendi.

Yapılan değerlendirme sonucunda çözündürme sonrası havada soğutma, T6 ve 100 °C sıcaklıktaki izotermal dönüşüm işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik ve mukavemetinin yanı sıra aşınma direncini de artırdığı belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımları; Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı; Homojenleştirme, T5, T6, T7 ve izotermal dönüşüm işlemleri; Mekanik özellikler; Sürtünme ve aşınma davranışları; Mekanik özellik-aşınma davranışı ilişkileri.

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL  
PROPERTIES OF Zn-40Al BASED ALLOYS

Zeki AZAKLI

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN  
2016, 123 Pages

In this study, Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alloys and Zn-40Al-2Cu-2Si alloy were produced by permanent mould casting. The Zn-40Al-2Cu-2Si alloy was tested in both as-cast and heat treated conditions, but the Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alloys were tested only in the as-cast condition. After examining the structural and mechanical properties of the alloys, their tribological properties were investigated using a block-on-cylinder type test machine.

It was observed that the hardness, friction coefficient and working temperature of Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni alloys increase, their strength and ductility decrease, but their average surface roughness and volume loss show different changes with increasing nickel content.

T5, T6 and air cooling heat treatments reduced the friction coefficient, working temperature and volume loss of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy, but furnace cooling and T7 heat treatment increased the values of these parameters. These parameters showed opposite changes with the average surface roughness of the wear samples. As the isothermal transformation temperature increased the friction coefficient, working temperature and volume loss of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy increased, but its average surface roughness decreased.

As a result this work it was concluded that the solutionizing followed by air cooling, T6 heat treatment and isothermal transformation at 100 °C increase hardness, tensile strength and wear resistance of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy.

**Key Words:** Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alloys; Zn-40Al-2Cu-2Si alloy; Homogenization, T5, T6, T7 and isothermal transformation treatments; Mechanical properties; Friction and wear properties; Mechanical property-wear behavior relationship.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	İkili çinko-alüminyum faz diyagramı .....	3
Şekil 2.	Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350 °C sıcaklıktaki izotermal kesiti .....	5
Şekil 3.	% 5 oranında bakır içeren üçlü Zn-Al-Cu alaşımına ait faz diyagramının dikey kesiti.....	5
Şekil 4.	Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri .....	6
Şekil 5.	Aşınma deney düzeneğinin teknik resmi.....	17
Şekil 6.	Aşınma deney düzeneğinin genel görünümü.....	18
Şekil 7.	Aşınma deney düzeneğinde numune, silindir ve yük hücresinin yakından görünümü.....	18
Şekil 8.	Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan numunelerin teknik resmi.....	19
Şekil 9.	Yük hücresi için kalibrasyon doğrusu .....	19
Şekil 10.	Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü .....	22
Şekil 11.	Zn-40Al-2Cu-0,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	22
Şekil 12.	Zn-40Al-2Cu-1Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	23
Şekil 13.	Zn-40Al-2Cu-1,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	23
Şekil 14.	Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	24
Şekil 15.	Zn-40Al-2Cu-2,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	24
Şekil 16.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	25
Şekil 17.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	25
Şekil 18.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	26
Şekil 19.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtma işlemi görmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	26

Şekil 20.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıt işlemleri görmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	27
Şekil 21.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıt işlemleri görmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü.....	27
Şekil 22.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 100 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görünümü .....	28
Şekil 23.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 200 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görünümü .....	28
Şekil 24.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 250 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görünümü .....	29
Şekil 25.	SAE 65 bronzunun içyapısının görünümü.....	29
Şekil 26.	SAE 660 bronzunun içyapısının görünümü.....	30
Şekil 27.	Nikel katkısının Zn-40Al-2Cu alaşımlarının mekanik özelliklerine (sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması) etkisini gösteren eğriler .....	33
Şekil 28.	İzotermal dönüşüm sıcaklığının Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının mekanik özelliklerine (sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması) etkisini gösteren eğriler .....	33
Şekil 29.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve farklı ısıt işlemleri görmüş durumlardaki mekanik özellikleri (sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması) ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının söz konusu özelliklerinin karşılaştırılması olarak gösterimi .....	34
Şekil 30.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertliğinin farklı sıcaklıklardaki izotermal dönüşüm süresine göre değişimini gösteren eğriler.....	35
Şekil 31.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında meydana gelen boyut değişiminin farklı sıcaklıklardaki izotermal dönüşüm süresine göre değişimini gösteren eğriler.....	36
Şekil 32.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertliği ile boyut değişim oranının stabilizasyon süresine göre değişimlerini gösteren eğriler .....	36
Şekil 33.	Çözündürme ve su verme işlemine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertliği ile boyut değişim oranının yaşlandırma süresine göre değişimlerini gösteren eğriler .....	37
Şekil 34.	Yağlı durumda 14 MPa basınç ve 2 m/s kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	38
Şekil 35.	Yağlı durumda 14 MPa basınç ve 2 m/s kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	38

Şekil 36.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarında aşınma sonucu meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	39
Şekil 37.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarından elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler .....	39
Şekil 38.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin nikel oranına göre değişimini gösteren eğriler .....	40
Şekil 39.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	41
Şekil 40.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	41
Şekil 41.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.....	42
Şekil 42.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarından elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler .....	42
Şekil 43.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlardaki tribolojik özellikleri (sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü) ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının söz konusu özelliklerinin karşılaştırılması olarak gösterimi.....	43
Şekil 44.	İzotermal dönüşüm sıcaklığının Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının tribolojik özelliklerine (sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü) etkisini gösteren eğriler .....	43
Şekil 45.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler .....	45
Şekil 46.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sıcaklık değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler .....	45
Şekil 47.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının hacim değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler .....	46
Şekil 48.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler .....	46



Şekil 49.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler .....	47
Şekil 50.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler .....	47
Şekil 51.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimini gösteren eğriler .....	48
Şekil 52.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin basınca göre değişimini gösteren eğriler .....	48
Şekil 53.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler .....	49
Şekil 54.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler .....	49
Şekil 55.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler .....	50
Şekil 56.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtıl işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.....	50
Şekil 57.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	51
Şekil 58.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-1Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	52
Şekil 59.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	52
Şekil 60.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-	

	2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	53
Şekil 61.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	53
Şekil 62.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	54
Şekil 63.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemleri görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	54
Şekil 64.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemleri görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	55
Şekil 65.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemleri görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	55
Şekil 66.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 100 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	56
Şekil 67.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 200 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	56
Şekil 68.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 250 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	57
Şekil 69.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	57

- Şekil 70. Sabit yağ debisi (1 cm<sup>3</sup>/saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 58
- Şekil 71. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 59
- Şekil 72. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 59
- Şekil 73. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 60
- Şekil 74. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 60
- Şekil 75. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 61
- Şekil 76. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 61
- Şekil 77. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 62
- Şekil 78. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 62
- Şekil 79. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 63
- Şekil 80. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 63
- Şekil 81. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının

	havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	64
Şekil 82.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	64
Şekil 83.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	65
Şekil 84.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	65
Şekil 85.	0,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	66
Şekil 86.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	66
Şekil 87.	2,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	67
Şekil 88.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	67
Şekil 89.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	68
Şekil 90.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	68

Şekil 91.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	69
Şekil 92.	0,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	69
Şekil 93.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	70
Şekil 94.	2,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	70
Şekil 95.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	71
Şekil 96.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	71
Şekil 97.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	72
Şekil 98.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	72
Şekil 99.	0,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	73
Şekil 100.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	73
Şekil 101.	2,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	74
Şekil 102.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtılma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	74

- Şekil 103. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 75
- Şekil 104. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 75
- Şekil 105. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 76
- Şekil 106. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 76
- Şekil 107. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 77
- Şekil 108. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 77
- Şekil 109. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 78
- Şekil 110. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 78
- Şekil 111. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 79
- Şekil 112. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtma işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü..... 79
- Şekil 113. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 80
- Şekil 114. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü ..... 80

Şekil 115.	2,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	81
Şekil 116.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	81
Şekil 117.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	82
Şekil 118.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	82
Şekil 119.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	83
Şekil 120.	0,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	83
Şekil 121.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	84
Şekil 122.	2,5 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	84
Şekil 123.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	85
Şekil 124.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	85
Şekil 125.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	86
Şekil 126.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	86
Şekil 127.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu	

	alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	87
Şekil 128.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	88
Şekil 129.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	88
Şekil 130.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	89
Şekil 131.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	89
Şekil 132.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	90
Şekil 133.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	90
Şekil 134.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	91
Şekil 135.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	91
Şekil 136.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 100 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	92
Şekil 137.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-	



	2Si alaşımının 200 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	92
Şekil 138.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 250 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	93
Şekil 139.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	93
Şekil 140.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	94
Şekil 141.	Sabit yağ debisi (1 cm <sup>3</sup> /saat), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si ve Zn-40Al-2Cu-2,5Ni alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler .....	94
Şekil 142.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	102
Şekil 143.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	103
Şekil 144.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sıcaklık değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	103
Şekil 145.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sıcaklık değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	104
Şekil 146.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının hacim kaybı değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	104
Şekil 147.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının hacim kaybı değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	105
Şekil 148.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	105
Şekil 149.	Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	106
Şekil 150.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	107

Şekil 151. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	107
Şekil 152. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sıcaklık değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	108
Şekil 153. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sıcaklık değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	108
Şekil 154. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının hacim kaybı değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	109
Şekil 155. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının hacim kaybı değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	109
Şekil 156. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik .....	110
Şekil 157. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik .....	110

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.	İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri.....	4
Tablo 2.	Zn-Al-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri .....	6
Tablo 3.	Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri .....	8
Tablo 4.	Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin bazı mekanik özellikleri .....	10
Tablo 5.	Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımlarının kimyasal bileşimleri.....	20
Tablo 6.	SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının kimyasal bileşimleri .....	20
Tablo 7.	Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri .....	31
Tablo 8.	Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve farklı ısı işlem görmüş durumlardaki sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri .....	32

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

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

Çinko-alüminyum alaşımları üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda ikili alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı görülmüştür. [7-11]. Bu alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için bunlara bakır, silisyum, magnezyum ve nikel gibi elementler katılmaktadır [4,11]. Magnezyum katkısının bu alaşımların sertlik, çekme dayanımı ve korozyon direncini artırdığı, bununla beraber oksit oluşturarak sıvı metalin akışkanlığını azalttığı belirlenmiştir [10]. Bakır katkısının ise bu alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirdiği, ancak bakır oranının % 3'ün üzerine çıkması durumunda boyutsal kararsızlığın meydana geldiği saptanmıştır [10,12]. Boyutsal kararsızlık problemi alaşımlara ısıl işlem uygulamak veya uygun alaşım elementi katmak suretiyle giderilmeye çalışılmaktadır [9,12,13]. Bu alaşımlara katılan silisyum da alaşımların mukavemetini bakır kadar arttırmamakta ancak aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirmektedir [14].

Yapılan çalışmalar, bakır ve/veya silisyum içeren monotektoid bileşime sahip çinko esaslı alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerinin, ötektik ve ötektoid bileşime sahip çinko esaslı alaşımların mekanik ve tribolojik özelliklerinden daha üstün olduğunu göstermiştir. [14-27]. Bu durum üçlü Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Si alaşımlarının geliştirilmesine yol açmıştır [22,24]. Zn-40Al-2Si alaşımının mukavemet değerlerinin yetersiz olması nedeni ile dördü Zn-40Al-Cu-Si alaşımları geliştirilmiştir [10,21,22,25-27].

Geliştirilen bu alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından elde edilmiştir [21,25-27].

Diğer taraftan, bu alaşımların ergime sıcaklıklarının düşük olması kullanım alanlarını kısıtlamakta ve 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmaları tavsiye edilmemektedir [20,28,29]. Bu olumsuzluğu giderebilmek için de söz konusu alaşımlara nikel gibi ergime sıcaklığı yüksek olan alaşım elementleri katma yoluna gidilmektedir [30-33]. Yapılan çalışmalar nikel katkısının ZA27 alaşımının sürtünme katsayısını düşürüp, aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını; yüksek oranda alüminyum içeren Al-40Zn-3Cu-(0-3)Ni alaşımlarının ise mukavemetini düşürdüğünü göstermiştir [13,34]. Ancak, nikel katkısının monotektoid bileşime sahip çinko esaslı alaşımların yapısal ve mekaniksel özelliklerine etkileri tam olarak ortaya konulamamıştır. Bu nedenlerle bu alaşımlar için uygun alaşım elementleri ile oranlarını ve bu alaşımlara uygulanması gereken ısıl işlemleri belirleme çalışmaları günümüzde de yoğun olarak devam etmektedir.

Çinko esaslı alaşımlar da meydana gelen boyutsal kararsızlık problemini önlemek için bu alaşımlara stabilizasyon (kararlı hale getirme) işlemi uygulanmaktadır [5,35,36]. Söz konusu ısıl işlem, genellikle alaşımların 100–200 °C arasındaki bir sıcaklıkta uygun bir süre yaşlandırılması ile gerçekleştirilmekte, ancak bu ısıl işlem alaşımların sertlik ve mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir [3,5,36-38].

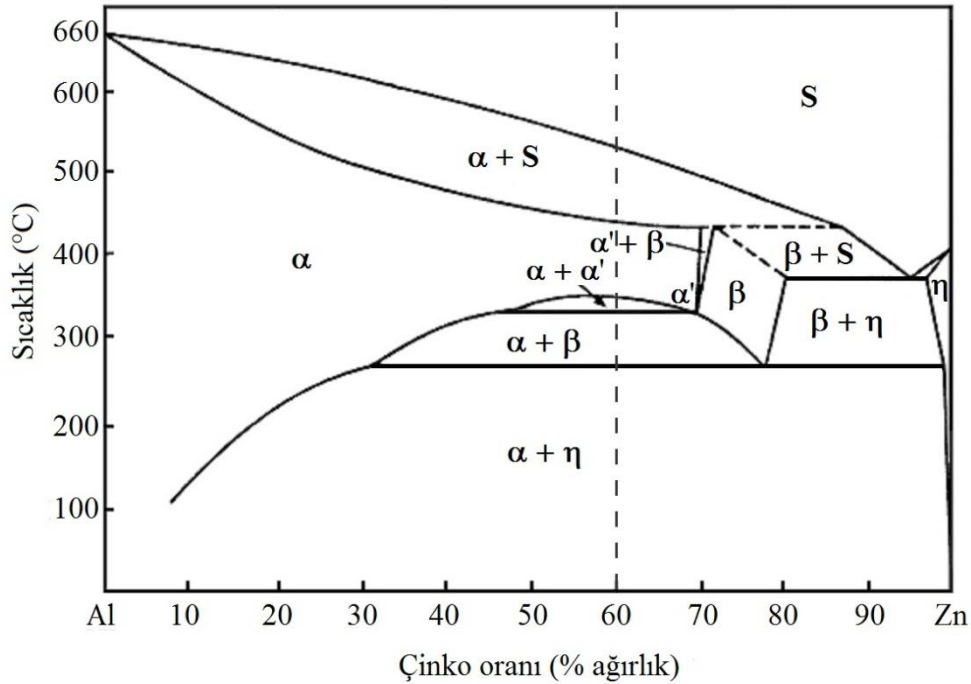
Bu alaşımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı ısıl işlemler uygulanmaktadır [26-28,39-46]. Bunlardan biri de çökeltme sertleşmesi işlemidir [26,38]. Bu ısıl işlem çinko esaslı alaşımların 375 °C dolayındaki bir sıcaklıkta uygun bir süre tavlandıktan sonra suda soğutulup 100–200 °C arasındaki bir sıcaklıkta yapay olarak yaşlandırılmaları ile gerçekleştirilir [27,39-41]. Yapay yaşlandırma işlemi sırasında alaşımın sertlik ve mukavemet değerleri çökeltme sertleşmesi mekanizmasıyla artmakta ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaktadır [14,27]. Bunlardan başka bu alaşımlara havada soğutma, fırında soğutma ve izotermal yaşlandırma işlemleri de uygulanmaktadır [39-46]. Ancak bu ısıl işlemlerin söz konusu alaşımların yapı ve özelliklerine etkileri yeterince incelenmemiştir. Özellikle izotermal yaşlandırma işleminin ötektoid bileşime sahip alaşımlar hariç bu alaşımlar üzerindeki etkilerinin hiç araştırılmadığı gözlenmiştir [22-24]. Ayrıca, yapılan literatür araştırmaları Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 6 MPa'dan daha yüksek basınçlardaki tribolojik özelliklerinin incelenmediğini göstermiştir. Bu nedenle bu tezde farklı alaşım elementi katkıları ve ısıl işlemlerin Zn-40Al esaslı alaşımların yapı ve özelliklerine etkilerinin araştırılmasının yanı sıra bu alaşımların 6 MPa'dan daha yüksek

basınçlardaki tribolojik özellikleri incelenerek en uygun alaşım elementi ve ısıtım işlem koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 1.2. Çinko Esaslı İkili, Üçlü ve Dörtlü Alaşımın Faz Diyagramları

### 1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramları

İkili çinko-alüminyum faz diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu diyagramda yer alan  $\alpha$  alüminyumca zengin faz bölgesini,  $\eta$  ise çinkoca zengin faz bölgesini göstermektedir [14]. Diyagramda da görüldüğü gibi alüminyum içerisindeki çinko katı çözeltisi % 83 Zn oranına kadar uzanır ve  $\alpha$ ,  $\alpha'$  ve  $\beta$  olarak adlandırılan değişik faz bölgeleri oluşturur.  $\alpha$  ve  $\alpha'$  fazlarının kafes parametreleri birbirine çok yakın olduğundan bu fazlar arasındaki sınır tam olarak belirlenememiştir. Yavaş soğutma sonucunda bu fazlar kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşürler [14,15].



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [16].

Zn-Al faz diyagramında 382 °C sıcaklık ve % 95 Zn oranında ötektik dönüşüm meydana gelir. Ötektik dönüşümün meydana gelmesi ile yüzey merkezli kübik (YMK)

yapılı  $\beta$  ile sıkı düzenli hegzagonal yapıya sahip  $\eta$  fazlarını içeren bir içyapı oluşur. Alüminyumun  $\eta$  fazı içindeki katı çözünürlüğü azalan sıcaklıkla azalmakta ve 20 °C sıcaklıkta % 0,05 Al oranına kadar düşmektedir.  $\beta$  fazı ise 275 °C sıcaklıkta % 22 Al oranında meydana gelen ötektoid reaksiyon sonucunda  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarına dönüşür [16,17,47].

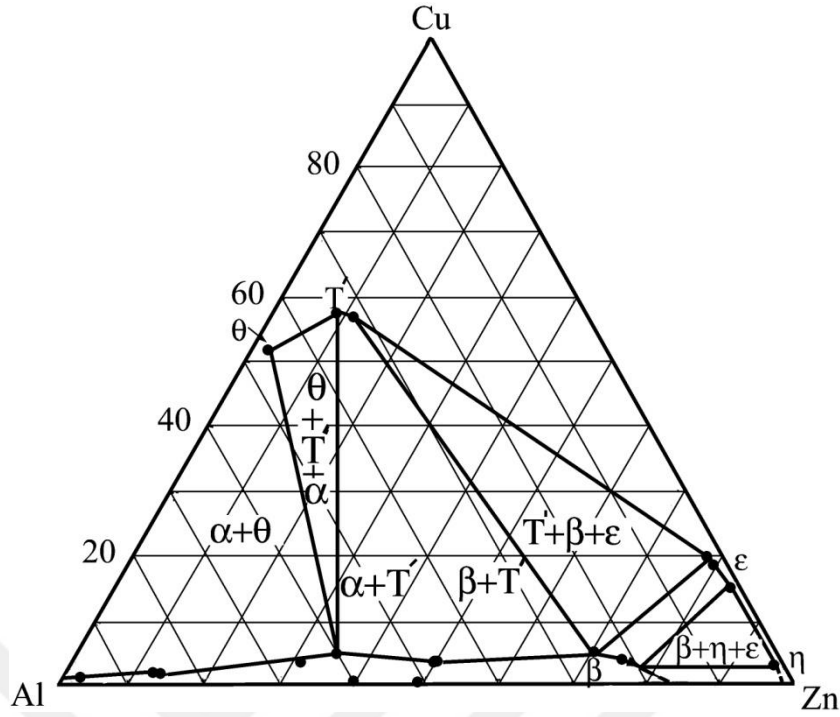
İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri, kimyasal bileşim oranı ve sıcaklık değerleri ile birlikte Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [14].

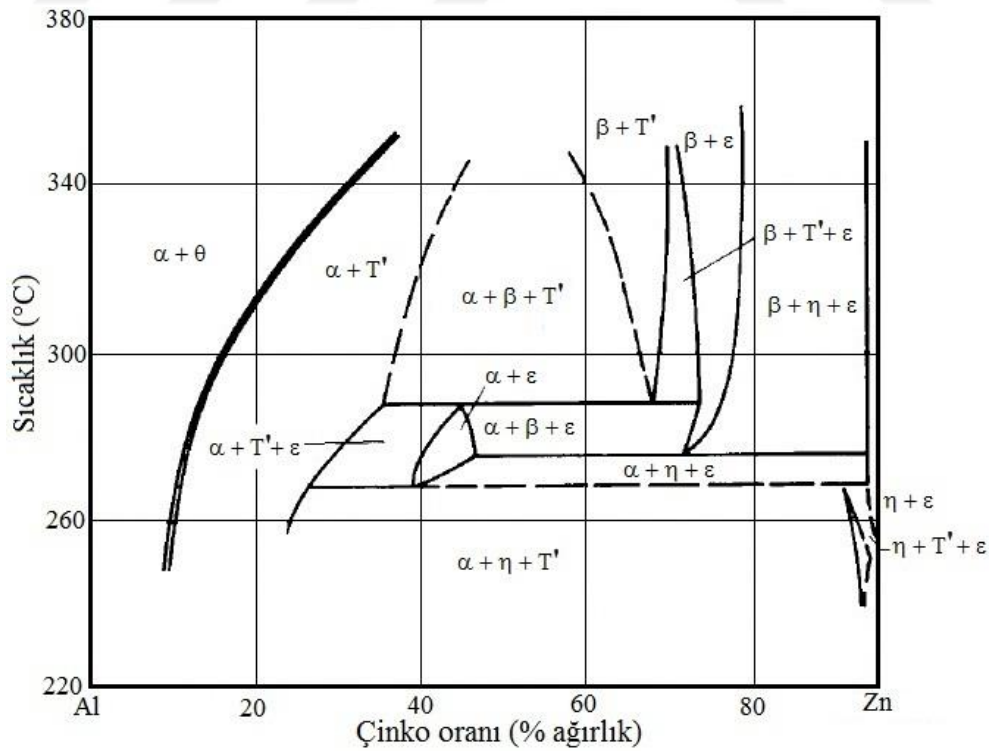
Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Ötektoid (I)	$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	78	275
(II)	$\alpha/\alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	52	340
Peritektik	$\alpha + S \rightleftharpoons \beta$	72	443

### 1.2.2. Üçlü Zn-Al-Cu Faz Diyagramı

Üçlü Zn-Al-Cu faz diyagramı üzerindeki çalışmalar 1940 yılından beri sürdürülmektedir. Ancak, söz konusu faz diyagramı henüz tamamlanamamıştır. Bu diyagramın özellikle bakır oranı düşük olan kısmı Murphy [15] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiş ve çeşitli sıcaklıklardaki izotermal kesitleri belirlenmiştir. Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350 °C sıcaklık için Murphy tarafından belirlenen izotermal kesiti Şekil 2’de, bu sistemde meydana gelen faz dönüşümleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloda yer alan  $\alpha$  alüminyumca zengin,  $\eta$  ise çinkoca zengin fazları;  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) bakırca zengin yarı kararlı (metastabil),  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) de kararlı yapıya sahip metaller arası bileşikleri göstermektedir [9, 48-50]. Söz konusu katı hal dönüşümleri ve bu dönüşümlerin meydana geldiği sıcaklıklardan yararlanılarak belirlenen Al-Zn-Cu alaşım sistemine ait faz diyagramının dikey kesiti ise Şekil 3’de verilmiştir [15]. Bu şekilde görüldüğü gibi sıcaklık azaldıkça çinko ve bakırın alüminyum içerisindeki çözünürlüğü azalmakta ve 276 °C’de  $\beta + \epsilon \rightleftharpoons \alpha + \eta$  dönüşümü meydana gelmektedir. [49].



Şekil 2. Üçlü Zn-Al-Cu alaşım sisteminin 350 °C sıcaklıktaki izotermal kesiti [15].



Şekil 3. % 5 oranında bakır içeren üçlü Zn-Al-Cu alaşımına ait faz diyagramının dikey kesiti [15].

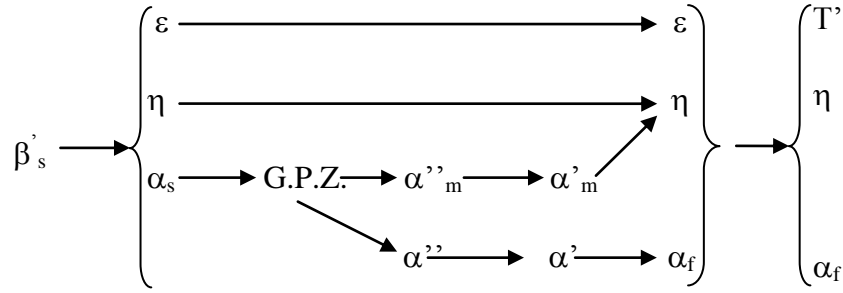


Tablo 2. Zn-Al-Cu alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [14].

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

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

Dörtlü Zn-Al-Cu-Si faz diyagramı tam olarak belirlenememiştir. Ancak bu sistemdeki bazı faz dönüşümleri birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir [10,49-52]. Silisyumun, çinko-alüminyum matrisi içerisindeki çözünürlüğünün çok az olması nedeniyle bu alaşımlarda meydana gelen faz dönüşümlerini belirgin bir şekilde etkilemediği görülmüştür [49,50]. Çözündürme ve su verme işlemlerinden sonra yaşlandırılan Zn-20Al-3Cu-2Si alaşımında meydana gelen faz dönüşümleri aşağıda verilmiştir [50].



Şekil 4. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [49-51].

Bu dönüşümler sırasında ilk önce G.P.Z. (Guiner-Preston zones) bölgeleri oluşmaktadır. Su verme işlemi sonunda elde edilen  $\alpha_s$  fazı yaşlandırma işlemi sırasında Şekil 3'de görüldüğü gibi  $\alpha''_m$ ,  $\alpha'_m$ ,  $\alpha''$ ,  $\alpha'$  geçiş fazlarını oluşturmakta ve bu fazlar da en son çinkoca zengin  $\eta$  ve alüminyumca zengin  $\alpha_f$  fazlarına dönüşmektedir [49-52].

Silisyum parçacıklarının büyüklük ve alaşım içerisindeki dağılımlarının silisyum oranına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir [24,25]. Özellikle yapı içindeki silisyum oranı

% 2'nin altında olması durumunda silisyum parçacıklarının içyapıda homojen olarak dağıldıkları, % 2'nin üzerine çıkması durumunda ise hem büyüdükleri hem de belirli bölgelerde toplanarak kümeleştikleri görülmüştür [24,25]. Bu durum bu alaşımların katılma davranışlarına dayandırılarak açıklanmaktadır [25]. Nitekim son zamanlarda yapılan çalışmalarda dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlarında, % 2,5 silisyum oranına kadar silisyum tanelerinin küçük boyutta olup homojen bir şekilde dağıldığı gözlenmiştir. Silisyum oranının % 2,5'in üzerine çıkması durumunda ise tane büyüklüğünün aşırı bir şekilde büyüdüğü ve belirli bölgelerde kümeleşerek toplandığı görülmüştür [25,54-56].

### **1.3. Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel, Mekaniksel ve Tribolojik Özellikleri**

#### **1.3.1 Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri**

Çinko esaslı alaşımların fiziksel özellikleri çoğunlukla içerdikleri alüminyum oranına göre değişmektedir [28,43,61]. Şöyle ki alüminyum oranı arttıkça alaşımların yoğunlukları düşmekte, buna karşılık ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve ısıl genleşme katsayıları artmaktadır. [2,28,57]. Bu durum alüminyumun yoğunluğunun çinkonun yoğunluğundan daha düşük, ısıl ve elektrik iletkenliğinin ise çinkonun ısıl ve elektrik iletkenliğinden daha yüksek olmasından ileri gelmektedir [53,57-61].

Çinko esaslı alaşımların yoğunluğu geleneksel yatak alaşımlarının yoğunluğundan daha düşüktür [28,62]. Bu nedenle söz konusu alaşımlar geleneksel yatak alaşımlarından daha yüksek özgül mukavemet değerine sahiptirler [2,3,62]. Tablo 3'de çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

#### **1.3.2. Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri**

Çinko esaslı alaşımlar demir dışı alaşımların pek çoğundan daha yüksek mukavemet değerine sahiptir [2]. Ancak bu alaşımların mekanik özellikleri alüminyum oranına göre değişmektedir [28]. Monotektoid bileşime sahip çinko esaslı alaşımlar, ötektik ve ötektoid bileşime sahip çinko esaslı alaşımlardan daha üstün mekanik özelliklere sahiptir [58-60,63-66]. Alaşım elementi olarak katılan alüminyum bu alaşımların hem döküm özelliğini iyileştirmekte hem de mukavemet değerlerini arttırmaktadır [21-23].

Tablo 3. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin bazı fiziksel özellikleri [43,53,57-60].

Alaşım	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Katılaşma aralığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı ( $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ )	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m <sup>2</sup> °C)	Elektriksel iletkenlik katsayısı (%IACS)
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	26,0	126	30
SAE-40 pirinci	8500	1010-855	18	72	15
SAE-65 bronzu	8775	999-831	17	70	9,6
SAE-660 bronzu	8910	975-855	18	59	12
Kır dökme demir	7300	1260-1090	11,9	45	6

Çinko esaslı alaşımların mekanik özellikleri bazı uygulamalar için yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizlikleri gidermek için bu alaşımlara bakır, magnezyum, silisyum, nikel gibi elementler katılmaktadır [12,25,45]. Bakır ve silisyum katkıları bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerleriyle birlikte korozyon ve aşınma dirençlerini arttırmaktadır [21-28,64]. Söz konusu artışlar alaşımların matris yapısında ( $\alpha$  fazı) katı çözültü sertleşmesinin meydana gelmesi ve içyapıda sert ve gevrek metallerarası bileşiklerin oluşumuna dayandırılarak açıklanmaktadır [21-27,54-56]. Ancak, bakır ve silisyum oranlarının belirli oranların (% 2-3) üzerine çıkması durumunda bu alaşımların özellikle çekme dayanımı ve aşınma dirençlerinin azaldığı görülmüştür [22-25]. Bu azalmaların da içyapıda oluşan sert ve gevrek fazların alaşımların sünekliğini azaltmasından, başka bir ifadeyle kırılma hale getirmesinden kaynaklandığı ifade edilmektedir [21-30,44,54-56,66].

Diğer taraftan bakır oranı arttıkça üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarında ortaya çıkan hacimsel büyüme oranının da arttığı gözlenmiştir [9,43-45]. Bu nedenle üçlü alaşımlarda bakır oranının %1-3 değerleri arasında tutulmasının hem boyutsal kararlılık hem de mekanik özellikler açısından uygun olduğu ileri sürülmektedir [16,43-45].

Çinko esaslı alaşımların mukavemetini arttırmanın diğer bir yolu da alaşımlara ısıtım işlemi uygulamaktır [14-17,26-29]. Ancak kararlı bir iç yapı elde etmek için uygulanan T5 (stabilizasyon) işlemi bu alaşımların mukavemet ve sertliğini büyük bir ölçüde düşürürken dendritik yapılarını da ortadan kaldıramamaktadır. [44,45]. Hem daha kararlı içyapı elde etmek hem de sertlik ve mukavemet değerlerinin arttırmak için bu alaşımlar çözündürme ve su verme işlemi sonrası doğal veya yapay olarak yaşlandırılmaktadır [14,26,27]. Alaşımların sertlik ve mukavemetinde, su verme sonrası meydana gelen artış çökeltme sertleşmesi mekanizmasına, stabilizasyon sırasında meydana gelen azalma ise yapı içerisindeki kalıntı gerilmelerin giderilmesine ve katılma sonucunda oluşan metastabil fazların kararlı fazlara dönüşmesine dayandırılarak açıklanmaktadır [12,14-16,26,27,36,44,45,65-69].

Çinko esaslı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmada soğuma hızının artmasıyla bu alaşımların ikincil dendrit kol aralığının azaldığı ve sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve darbe enerjisi değerlerinin arttığı görülmüştür [70,71]. Dökülmüş durumdaki çinko esaslı alaşımlarının mekanik özelliklerinin ikincil dendrit kol aralığına bağlı olduğu gözlenmiştir [70,71]. Nitekim ikincil dendrit kol aralığı azaldıkça bu alaşımların sertlik, çekme dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin arttığı belirlenmiştir [70,71].

Çinko esaslı alaşımların ergime sıcaklıklarının düşük olmasından dolayı kullanım sıcaklıkları da düşüktür. Sıcaklık arttıkça bu alaşımların sertlik ve mukavemeti düşerken sünekliği artmaktadır [2,4,43]. Yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla söz konusu alaşımlara bakır, silisyum ve nikel gibi alaşım elementleri katılmaktadır [13,20,30-33,67,72-75]. Silisyum ve nikel katkıları bu alaşımların mekanik özellikleri üzerinde bakır kadar etkili olmamaktadır [13,21-25,30-33]. Ancak silisyum ve nikel içeren alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda bakır içeren alaşımlardan daha yüksek mukavemet değerleri sergilemektedir [30,67,72-76]. Bu durum söz konusu alaşımların yapılarında bulunan silisyum parçacıkları ve nikel içeren fazların yüksek sıcaklıklarda bile sertliklerini korumasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [30-33,70-80].

Tablo 4. Çinko-alüminyum esaslı alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin bazı mekanik özellikleri [2-4,21-27,39,54-56,58,62,78-80].

Alaşım	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Darbe direnci (J)	Young Modülü (GPa)
Zamak 3	82	283	10	58	12,4
Zamak 5	91	331	7	65	12,4
Zamak 7	80	283	13	58	12,4
ZA-8	80-90	221-255	1-2	20	12,4
ZA-12	90-105	310-345	1-3	25	12,0
ZA-27	110-120	400-440	3-6	47	10,9
Zn-40Al-2Cu	103	340	1,8	-	-
Zn-40Al-2Si	125	300	3,1	-	-
Zn-40Al-2Cu-2Si	125	378	2,1	-	-
Al-40Zn-3Cu	128	390	5,8	-	-
Al-40Zn-3Cu-2Si	135	345	2,3	-	-
Al-25Zn-3Cu	144	352	4,1	12,5	-
Al-25Zn-3Cu-3Si	148	354	3,2	2,7	-
SAE-40 pirinci	60	255	30	15	12,0
SAE-65 bronz	105	286	8	37	11,0
SAE-660 bronz	95	278	11	45	11,5
Kır dökme demir	210	214	10	54	14,5

### 1.3.3. Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Yapılan çalışmalar çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak alaşımlarından daha üstün tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [2-7,21-27,78-83]. Çinko esaslı alaşımlardaki alüminyumca zengin yüzey merkezli kübik yapıya sahip  $\alpha$  fazı yük taşıma görevi yaparken, çinkoca zengin sıkı düzenli hekzagonal yapıya sahip  $\eta$  fazı katı yağlayıcı gibi davranarak kaymayı kolaylaştırmakta ve sıvanmaya neden olmaktadır [5,73]. Bakır içeren çinko esaslı alaşımların yapısında bulunan sert intermetalik bileşiklerin ( $\epsilon$ ,  $T'$  ve  $\theta$ ) yük taşıma görevi üstlendikleri ileri sürülmektedir [20-27,44,82]. Bu alaşımların yapısında bulunan silisyum parçacıklarının ise aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir [21,24,25]. Aynı zamanda aşınma yüzeylerinde oluşan sert alüminyum oksit tabakasının yük taşıma görevi yaparken, çinko oksit tabakasının kaymayı kolaylaştırdığı ve özellikle sınır ve karışık yağlama durumlarında yağlayıcı gibi davrandığı ileri sürülmektedir [12,21,82].

Monotektoid esaslı üçlü Zn-Al-Cu alaşımlarının sertlik, mukavemet ve aşınma dirençlerinin artan bakır oranı ile artarak %2 bakır oranında en yüksek seviyelere ulaştığı belirlenmiştir [22]. Bu seviyenin üzerinde ise bakır oranı arttıkça sertliğin artmaya devam ettiği, çekme dayanımının azaldığı, aşınma direncinin fazla değişmediği belirlenmiştir [22]. Başka bir çalışmada matris yapıları aynı olduğu halde Zn-Al-Si alaşımlarının Zn-Al-Cu alaşımlarından daha üstün tribolojik davranış sergiledikleri görülmüştür [12,24,25,44]. Bu durum yapı içerisinde bulunan sert silisyum parçacıklarının aşınma direncini arttırmada  $T'$  fazından daha etkili olduklarını göstermektedir [12,21,82]. Ancak silisyum oranının % 2'nin üzerine çıkması durumunda yapı içerisinde belirli bölgelerde toplanarak büyüdüğü ve gerek mekanik özellikleri gerekse aşınma direncini düşürdüğü gözlenmiştir [24,25].

Çinko esaslı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar, bu alaşımların sertlik ve mukavemetini arttırmada bakırın silisyumdan, silisyumun ise aşınma direncini arttırmada bakırdan daha etkili olduğunu göstermiştir [12,21-25,82,83]. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalarda ise Zn-40Al-2Cu-2Si bileşimine sahip alaşımın en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir [25-27]. Diğer taraftan Zn-Al-Si alaşımları dökülmüş durumda, Zn-Al-Cu alaşımlarının ise ısıtılma işlem görmüş durumda en üstün aşınma direnci sergiledikleri görülmüştür [12]. Bu durum Zn-Al-Si alaşımlarının ana yapısının ısıtılma sırasında yumuşamasından, Zn-Al-Cu alaşımlarının ise bakırca zengin fazların çökmesi ile sertleşmesinden kaynaklanmaktadır [12,21,24-27].

Nikel katkısı çinko esaslı alaşımlarda  $Al_3Ni$ ,  $AlNi_3$ ,  $Ni_3Zn_{22}$  ve  $Ni_5Zn_{21}$  gibi metaller arası bileşik oluşturarak alaşımların özellikle yüksek sıcaklıklardaki tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir [13,31-34,72]. Bu durumun yapıdaki nikelce zengin fazların metal-metal teması durumunda adezyonu engellemesinden kaynaklandığı ileri sürülmektedir [13,32]. Nikel içeren Al-40Zn-3Cu alaşımların aşınma direnci artan nikel oranı ile arttığı belirlenmiştir [34]. Bu durum alaşımların yapısında oluşan sert  $Al_3Ni$  fazının büyüklüğü, oranı ve dağılım biçimlerine göre açıklanmaktadır. Alaşımlarda oluşan sert  $Al_3Ni$  parçacıkların genelde dendritler arası bölgelerde toplanarak sürtünme sırasında abrasif etki yaptığı belirtilmiştir [13,34].

#### 1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

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

Çinko esaslı monotektoid alaşımların (Zn-40Al-Cu, Zn-40Al-Si ve Zn-40Al-Cu-Si) çinko esaslı ötektik (Zn-5Al-Cu) ve ötektoid (Zn-22Al-Cu ve Zn-27Al-Cu) alaşımlarından daha üstün tribolojik özellik sergiledikleri görülmüştür. Üçlü monotektoid Zn-40Al-Cu ve Zn-40Al-Si alaşımlarının mekanik ve tribolojik özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda dördü Zn-40Al-Cu-Si alaşımları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alaşımlar içerisinde en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından elde edilmiştir. Üstün özellikler sergilemelerine rağmen çinko esaslı alaşımlarda bazı sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu sorunların başında sertlik ve mukavemet değerlerinin artan sıcaklıkla önemli ölçüde düşmesi ve özellikle bakır içeren alaşımlarda görülen boyut değişimi gelmektedir. Bu durumu önlemek için alaşımlara ya uygun ısıtma işlemi uygulanması ya da bakır yerine silisyum ve nikel gibi uygun alaşım elementi katma yoluna gidilmektedir. Ayrıca bu alaşımlara T5 (stabilizasyon) ve su verme sonrası yapay yaşlandırma (çökeltme sertleşmesi) işlemlerinden başka ısıtma işlemlerinin uygulandığına ilişkin herhangi bir bilgi ve belgeye rastlanmamıştır. Diğer taraftan silisyum katkısının bu alaşımların aşınma direncini iyileştirdiği, ancak mukavemet değerlerini bakır kadar artırmadığı görülmüştür. Nikel katkısının ise alaşımların termal kararlılığını artırarak yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve aşınma direncini artırdığı

belirlenmiştir. Ancak nikelin çinko esaslı monotektoid alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri yeterince incelenmemiştir. Ayrıca son zamanlarda geliştirilen dördü Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 6 MPa'dan daha yüksek basınçlardaki tribolojik özelliklerinin belirlenmediği görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada bakır ve silisyum veya nikel içeren Zn-40Al esaslı alaşımların gerek dökülmüş, gerekse ısıtılma işlem görmüş durumlardaki yapı ve mekanik özellikleri ile 14 MPa'a varan basınçlar altındaki tribolojik davranışlarının incelenerek çeşitli uygulamalar için en uygun kimyasal bileşim ve ısıtılma işlem parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.





## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Alaşımın Üretimi, Kimyasal Analiz ve Isıl İşlem

Bu çalışmada bir adet Zn-40Al-2Cu alaşımı, beş adet dördü Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni alaşımı ve altı adet Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde yüksek saflıkta (% 99,99) çinko, ticari saflıkta (% 99,7) alüminyum, yüksek saflığa sahip (% 99,99) elektrolitik bakır ve nikel kullanıldı. Bakır içeren alaşımların üretiminde alüminyum-bakır (Al-50Cu), nikel içeren alaşımların üretiminde alüminyum-nikel (Al-6,5Ni), silisyum içeren alaşımların üretiminde ise Al-12Si (Etial-140) alaşımları ön alaşım olarak kullanıldı. Ergitme işlemi elektrikli bir pota fırını içerisinde gerçekleştirildi. Ergitilen alaşım 630 ve 700 °C sıcaklıklardan oda sıcaklığında bulunan 45 x 60 x 190 mm boyutlarındaki bir çelik kalıba (kokil) dökülerek katılaştırıldı. Ayrıca, bu çalışmada karşılaştırma yapmak amacıyla piyasadan temin edilen SAE 65 ve SAE 660 bronzları kullanıldı. Alaşımın kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon spektrometresi (AAS) kullanılarak belirlendi.

Üretilen bir adet Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ve bir adet Zn-40Al-2Cu alaşımı ile beş adet dördü Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni alaşıma ait külçeler dökülmüş durumda, geri kalan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait beş adet külçe ısıl işlem görmüş durumda incelendi. Söz konusu ısıl işlemler, T5 (stabilizasyon), T6 ve T7 (çözündürme ve su verme sonrası yapay yaşlandırma), homojenleştirme (çözündürme sonrası fırında ve havada soğutma) ve izotermal dönüştürme işlemlerini içermektedir.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına uygulanan homojenleştirme işlemi, numunelerin 375 °C sıcaklıkta 36 saat süreyle çözündürme işlemine tabi tutulduktan sonra fırında ve havada soğutulması ile yapıldı. Bu alaşıma uygulanan T5 işlemi, alaşıma ait numunelere 150 °C sıcaklıkta 100 saat yapay yaşlandırma uygulanmasıyla gerçekleştirildi. T6 ve T7 ısıl işlemleri deney numunelerinin 375 °C sıcaklıkta 36 saat süreyle çözündürme işlemine tabi tutulup su verildikten sonra 180 °C sıcaklıkta sırasıyla 2 dakika ve 8 saat yaşlandırılmaları ile gerçekleştirildi. İzotermal yaşlandırma ise, alaşıma ait numunelerin 375 °C sıcaklıkta 36 saat süreyle çözündürme işlemine tabi tutulduktan sonra farklı dönüşüm sıcaklıklarında tutulan ikinci bir fırına alınıp bu fırında 8 saat süreyle yaşlandırılması ile gerçekleştirildi. Yaşlandırma işlemi sırasında numunelerde meydana gelen sertlik ve boyut değişimleri belirli aralıklarla ölçüldü. Sertlik ve boyut değişimleri için sırasıyla 15 x 10 mm ve 8 x 45

mm boyutlarındaki silindirik numuneler kullanıldı. Boyut değişimleri  $\pm 0,001$  mm hassasiyetine sahip bir mikrometre yardımıyla ölçüldü. Her bir sertlik ve boyut (uzunluk) değişim değeri yapılan beş ölçümün ortalaması alınarak belirlendi.

## 2.2. Yapısal İnceleme

İçyapı incelemeleri için gerek dökülmüş ve gerekse ısıtılmış işlem görmüş alaşımdan alınan numuneler standart metalografi yöntemiyle hazırlandı ve % 20'lik nital (% 20 nitrik asit + % 80 etil alkol) içerisinde dağlandı. SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının dağlanmasında ise 2 g  $FeCl_3$  + 5 ml HCl + 30 ml  $H_2O$  + 60 ml etanol çözeltisi kullanıldı. Metalografik numuneler hem ışık mikroskobun hem de taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelendi ve içyapılarını gösteren fotoğraflar çekildi. Alaşımların içyapılarını oluşturan fazlar enerji dispersif spektroskopisi (EDS) yöntemi ile analiz edildi.

## 2.3. Alaşımların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

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

Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçme yöntemiyle 62,5 kg'lık yük altında 2,5 mm çapında bilya şeklinde uç kullanılarak yapıldı. Alaşımların içyapılarında bulunan  $\alpha$  fazının mikro sertliği ise Vickers sertlik ölçme yöntemi ile 10 g'lık yük uygulanarak ölçüldü. Her bir numune üzerinde 5 ölçüm yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı. Alaşımların darbe dirençlerinin ölçülmesi amacıyla talaşlı işleme 10 x 10 x 55 mm boyutlarına sahip çentiksiz numuneler hazırlandı. Her bir ölçüm için üç numune kullanıldı ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak alaşımların darbe dirençleri belirlendi.

Alaşımlardan talaşlı imalat yöntemiyle 10 x 50 TS 138 A standardına uygun olarak hazırlanan örnekler çekme deneyine tabi tutuldu. Çekme deneyi sonucunda alaşımların çekme dayanımları ve kopma uzaması değerleri belirlendi. Alaşımların basma dayanımlarını belirlemek için talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanan 10 x 10 TS 206 standartlarına uygun numuneler kullanıldı. Çekme ve basma deneyleri  $0,25 \text{ mm.s}^{-1}$ 'lik

sabit çene hızı veya  $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 'lik ortalama deformasyon hızı altında gerçekleştirildi. Her iki deney durumu için 3 çekme numunesi kullanıldı. Elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşımların çekme ve basma dayanımları ile kopma uzaması değerleri belirlendi.

#### 2.4. Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Alaşımların tribolojik özelliklerinin incelenmesinde teknik resmi Şekil 5'de verilen blok-silindir esaslı bir deney düzeneği kullanıldı. Deney düzeneği 3 kW gücünde bir elektrik motoru, 12 kW gücünde bir hız kontrol ünitesi, mil, disk, örnek tutucusu, yükleme kolu, yağlama sistemi ve sürtünme kuvveti ölçüm sisteminden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan silindir kaymalı yatak ünitesinde kullanılan mili, deney numunesi ise yatağı temsil etmektedir. Çapı 148 mm olan silindir, SAE 4140 çeliğinden imal edilmiş ve 55 RSD-C değerine kadar sertleştirilmiştir. Silindir, sertleştirme işleminden sonra  $\pm 3 \mu\text{m}$ 'lik bir hassasiyetle taşlanmıştır. Deney düzeneğinin genel görünümü ve ayrıntılarını gösteren fotoğraflar Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Yükleme işlemi yükleme kolunun ucuna ağırlık asılarak gerçekleştirildi. Milin dönme hızı elektrik devresine monte edilen bir hız kontrol ünitesi ile ayarlandı. Yağlama işlemi ise, yüksek bir yere yerleştirilen bir depodan ince bir hortum yardımıyla alınan yağın bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra silindirin yüzeyine damlatılmasıyla gerçekleştirildi.

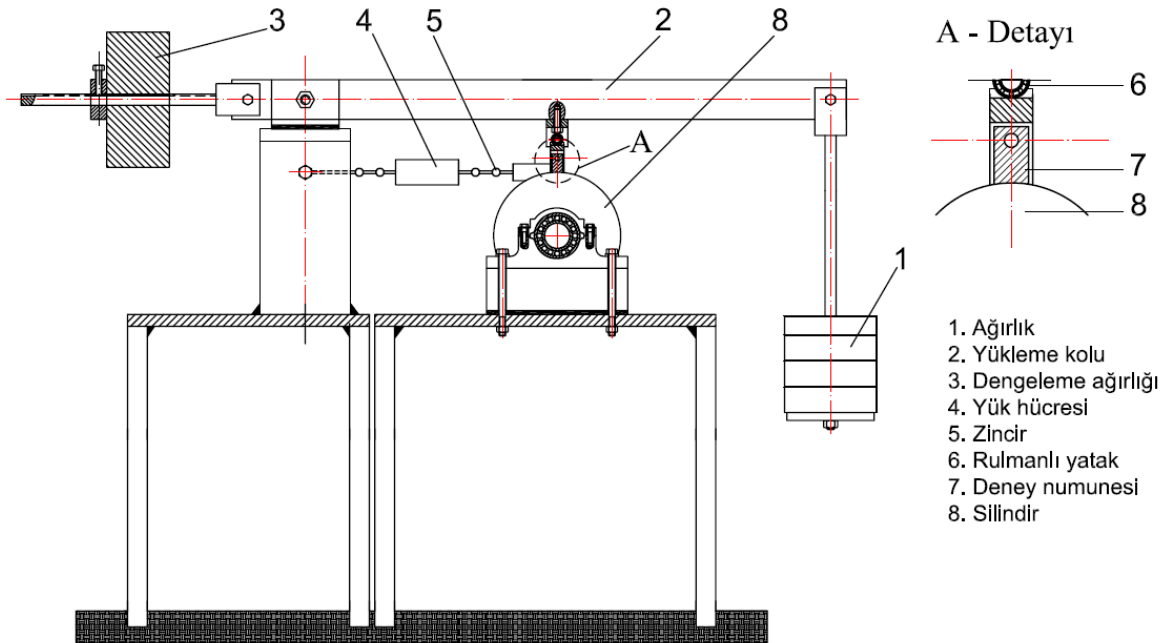
Üretilen alaşımlardan sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılmak üzere talaşlı yöntemle hazırlanan numunelerin uçları, iç çapı  $148 \pm 0,05 \text{ mm}$  olan bir kalıpta işlendi. Deney numunelerinin teknik resmi Şekil 8'de verilmiştir. Bu numuneler sürtünme ve aşınma deneylerine başlamadan önce ve deneyler sonucunda kimyasal çözücüler (triklor etilen ve alkol-aseton) içerisinde ultrasonik temizleyici yardımıyla temizlendi. Numunelerin kütleleri ise 0,01 mg'lık hassasiyete sahip bir terazi yardımıyla ölçüldü ve elde edilen ölçüm değerleri alaşımların ölçülen yoğunluk değerlerine bölünerek aşınma ile meydana gelen hacim kayıpları belirlendi.

Bu çalışmada sürtünme ve aşınma deneyleri sırasında deney numunelerinin temas yüzeylerinin 2,75 mm yukarısına açılan bir deliğe bakır-nikel termoeleman çifti (termokupl) yerleştirilerek sıcaklıkları ölçüldü ve bu elemanlardan alınan gerilim deney süresi boyunca kaydedildi. Sürtünme kuvvetini ölçmek için 50 kg-kuvvet kapasitesine

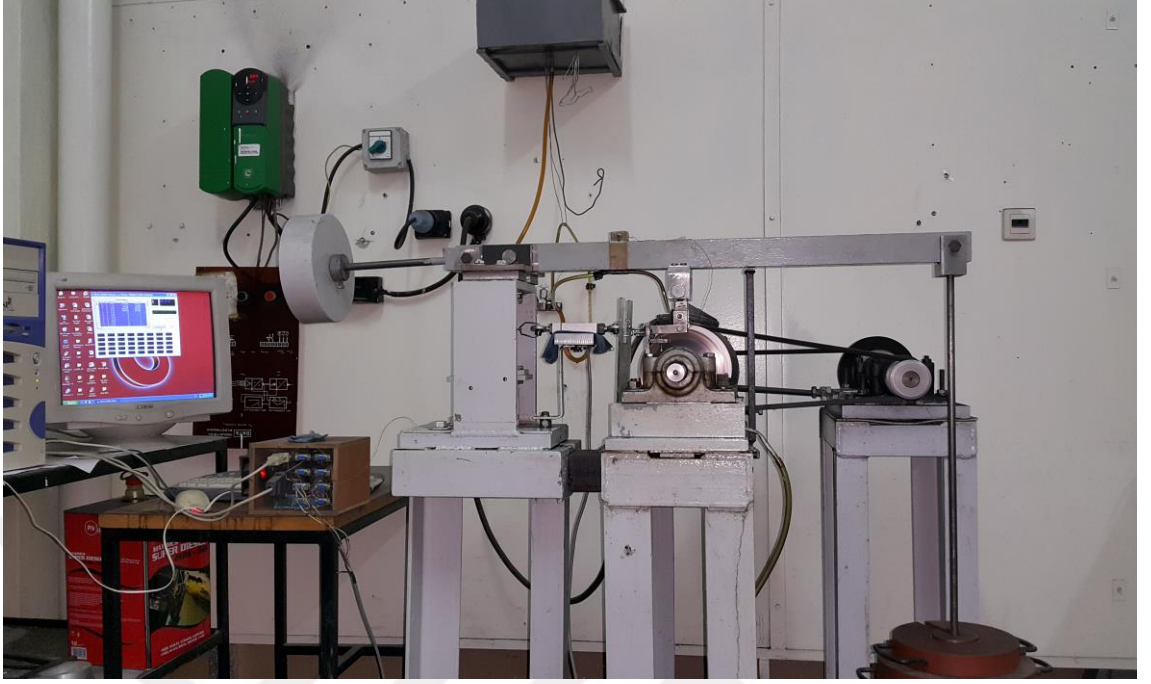
sahip bir yük hücresi, numune tutucusu ile düzenekteki sabit bir mesnet arasında yerleştirildi. Sürtünme kuvvetini ölçmek için kullanılan yük hücresinin ucuna belirli ağırlıklar asılarak gerilim-sürtünme kuvveti grafiği elde edildi. Bu grafik Şekil 9'da verilmiştir. Çalışma sırasında yük hücresinden alınan gerilim bir veri toplama kartı yardımıyla bilgisayara aktarıldı ve ölçülen gerilim değerleri bu sistem yardımıyla sürtünme katsayısına çevrildi.

Üretilen Zn-40Al-2Cu-2Si ve Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numuneler sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve sabit kayma hızı ( $2 \text{ m/s}$ ) değerlerinde  $102 \text{ km}$ 'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutuldu. Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş (havada ve fırında soğutma, T5, T6 ve T7 ısıl işlemleri) Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerin sürtünme ve aşınma özellikleri ise  $0,5-2,5 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ,  $4-14 \text{ MPa}$  ve  $0,5-3 \text{ m/s}$  aralıklarındaki farklı yağ debisi, basınç ve kayma hızlarında  $30 \text{ km}$ 'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar incelendi. Deneylerde yağlayıcı olarak SAE 20W/50 normuna uygun motor yağı kullanıldı.

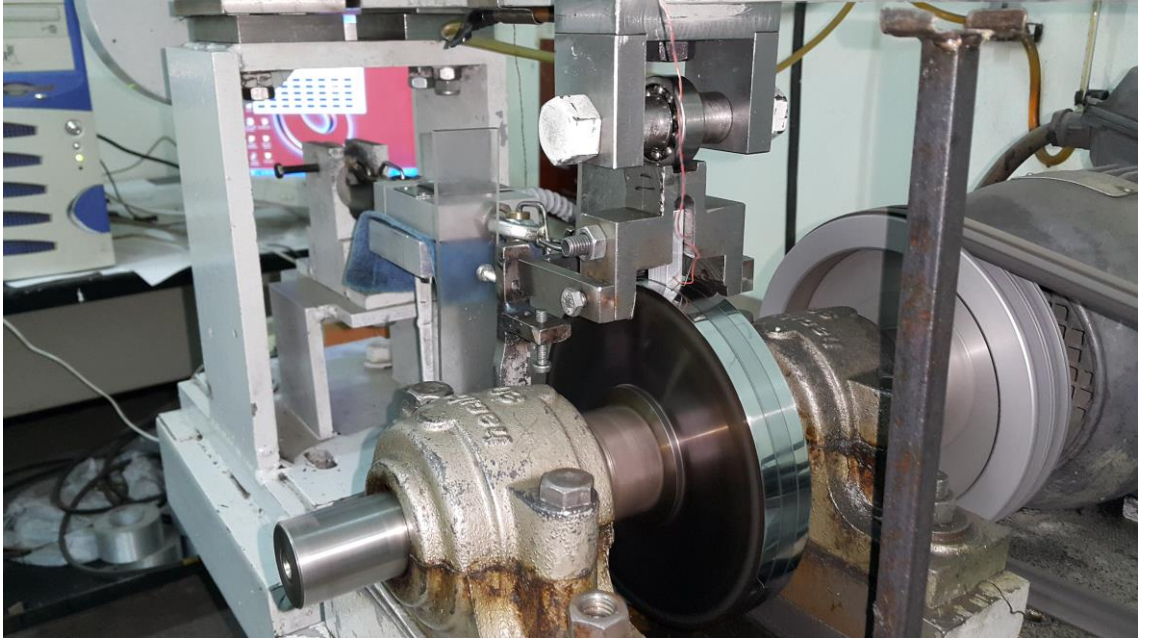
Aşınma numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri MAHR marka MarSurf M 300 model bir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçüldü.



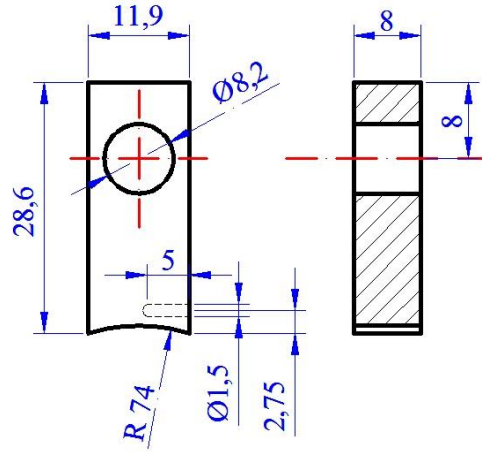
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin teknik resmi



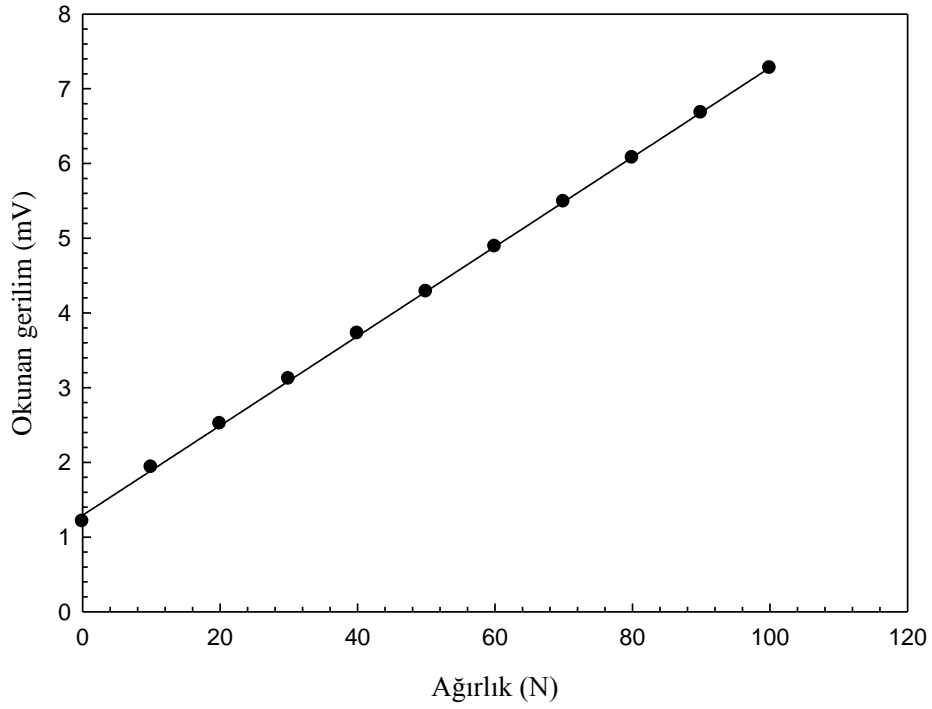
Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinin genel görünümü



Şekil 7. Aşınma deney düzeneğinde numune, silindir ve yük hücresinin yakından görünümü



Şekil 8. Sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan numunelerin teknik resmi



Şekil 9. Yük hücresi için kalibrasyon doğrusu

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Alaşımın Kimyasal Bileşimleri

Üretilen Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının kimyasal bileşimleri sırasıyla Tablo 5 ve 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Zn-40Al-2Cu, Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımlarının kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal Bileşim				
	% Zn	% Al	% Cu	% Ni	% Si
Zn-40Al-2Cu	57,9	40,1	2,0	-	-
Zn-40Al-2Cu -0,5Ni	57,4	40,2	1,9	0,5	-
Zn-40Al-2Cu -1Ni	56,9	40,1	2,0	1,0	-
Zn-40Al-2Cu -1,5Ni	56,6	40,1	1,9	1,4	-
Zn-40Al-2Cu -2Ni	55,9	40,2	2,0	1,9	-
Zn-40Al-2Cu -2,5Ni	55,7	39,9	2,0	2,4	-
Zn-40Al-2Cu-2Si	56,3	39,9	1,9	-	1,9

Tablo 6. SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal Bileşim			
	%Cu	%Sn	%Pb	%Zn
SAE 65	88,3	11,7	-	-
SAE 660	82,8	6,9	5,7	4,6

#### 3.2. Yapısal İnceleme

Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının içyapılarını gösteren fotoğraflar Şekil 10-15'de verilmiştir. Bu fotoğraflara bakıldığında, söz konusu alaşımların içyapılarının  $\alpha$  ve  $\alpha + \eta$  fazları ile dendritiçi ve dendritlerarası bölgelerde yer alan nikelce zengin ( $Al_3Ni$ ) fazlardan oluştuğu görülmektedir. EDS analizleri sonucunda nikelce zengin fazın yaklaşık olarak %

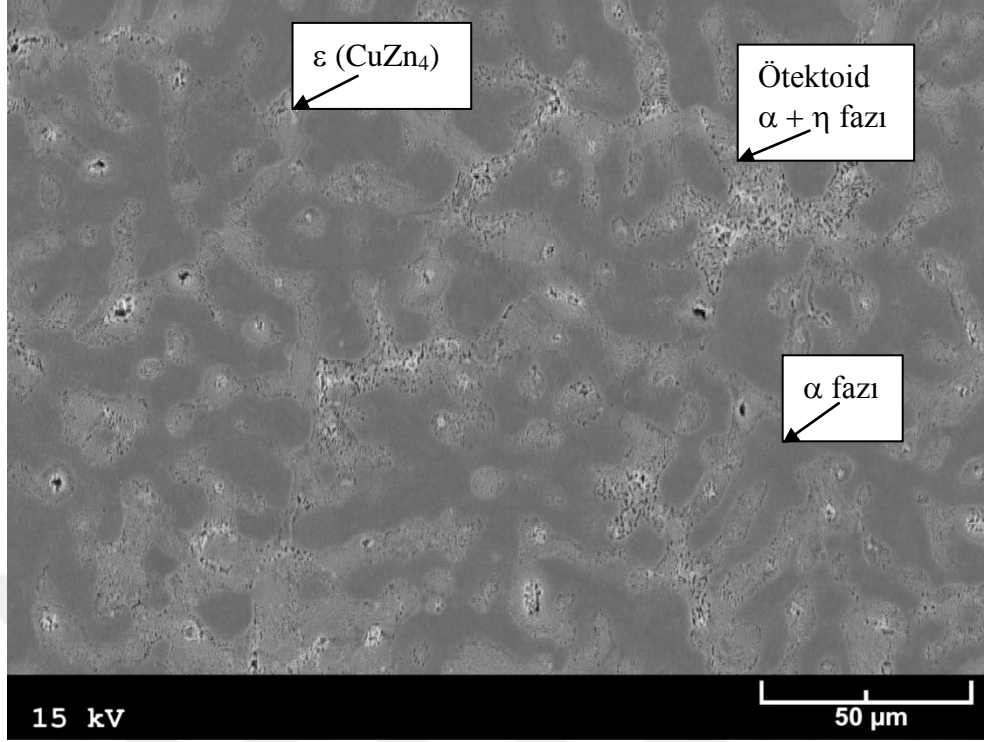
48 oranında alüminyum ve % 52 oranında nikelden oluştuğu belirlendi. Bu bulgular söz konusu fazın  $Al_3Ni$  olduğunu göstermektedir. Nikel oranı arttıkça bu fazların büyüklük ve oranının arttığı gözlemlendi.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılma işlem görmüş durumlardaki içyapılarını gösteren fotoğraflar Şekil 16-24'de sırası ile verilmiştir. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının, alüminyumca zengin göbekli  $\alpha$  fazı ile bu fazı çevreleyen ötektoid  $\alpha+\eta$  fazı, bakırca zengin  $\epsilon$  fazı ve silisyum parçacıklarından oluştuğu gözlemlendi (Şekil 16). Uygulanan homojenleştirme, T6 ve T7 ısıtılma işlemleri sonrasında bu alaşımın içyapısının  $\alpha$  matrisi ile bunun içerisinde yer alan çinkoca zengin ince çökeltiler ve silisyum parçacıklarından oluştuğu görüldü (Şekil 17, 18, 20 ve 21). Bu durum uygulanan ısıtılma işlemleri sonucunda alaşımın dendritik yapısının tamamen ortadan kalktığını ve ince çökeltilerin oluştuğunu göstermektedir. Ancak, T5 ısıtılma işleminin söz konusu alaşımın içyapısında belirgin bir değişime yol açmadığı gözlemlendi (Şekil 19).

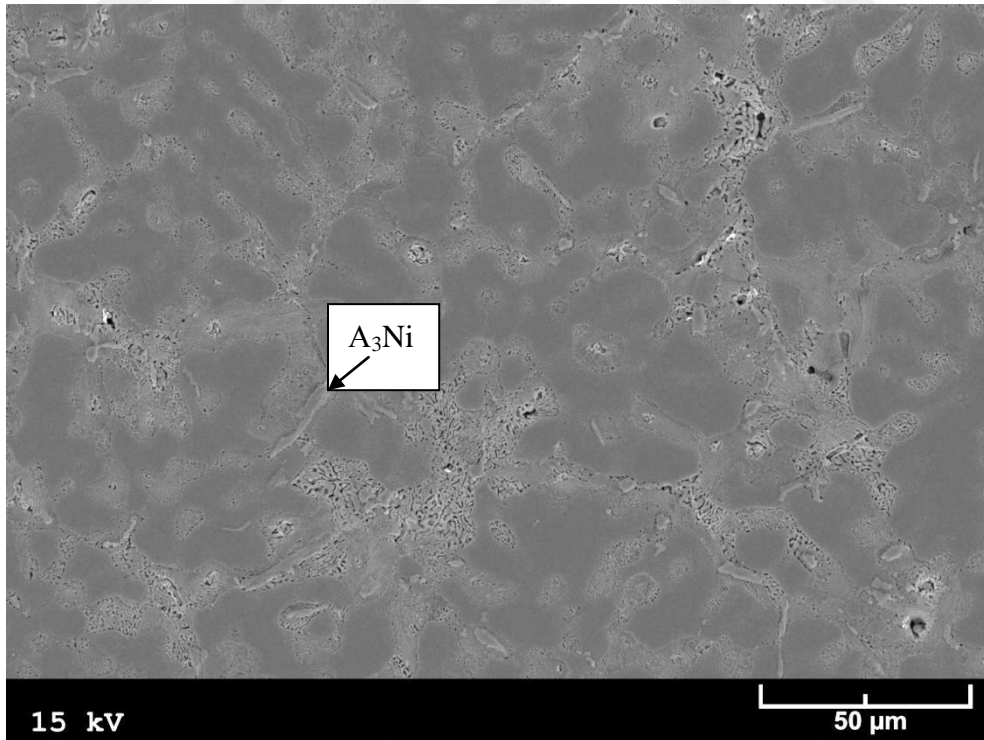
İzotermal dönüşüm işlemi sonunda da bu alaşımın dendritik yapısının ortadan kalkarak bunun yerini ince çökeltiler içeren geniş  $\alpha$  tanelerinin aldığı görüldü (Şekil 22-24). Ancak dönüşüm sıcaklığı arttıkça ince çökeltilerin büyüdüğü ve tane sınırlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlendi.

SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının içyapılarını gösteren fotoğraflar Şekil 25 ve 26'da verilmiştir. SAE 65 bronzunun içyapısının bakırca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid  $\alpha+\delta$  faz karışımından oluştuğu görülmektedir, Şekil 25. SAE 660 bronzunun içyapısında ise SAE 65 bronzunun içyapısında bulunan fazların yanı sıra kurşunca zengin bir fazın yer aldığı belirlendi, Şekil 26.

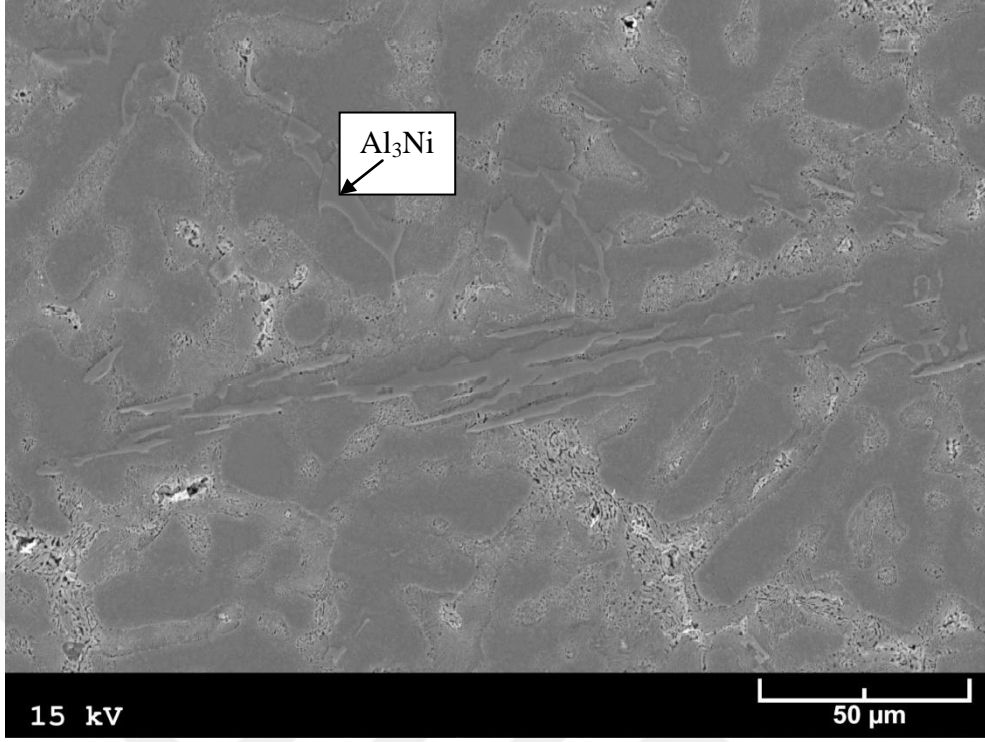




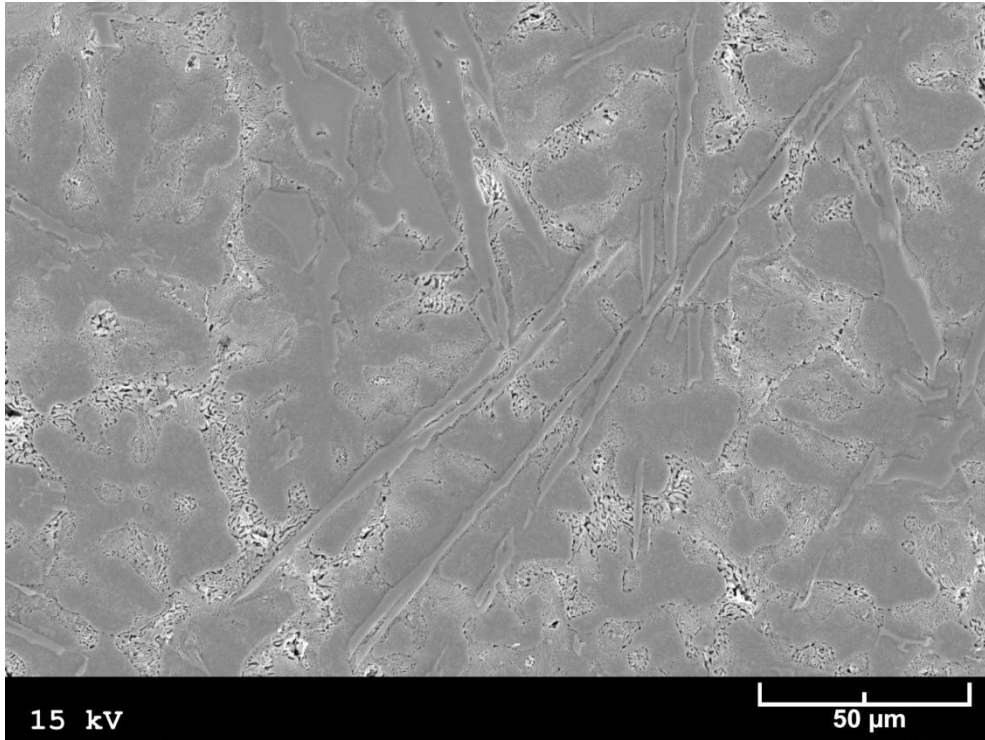
Şekil 10. Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü



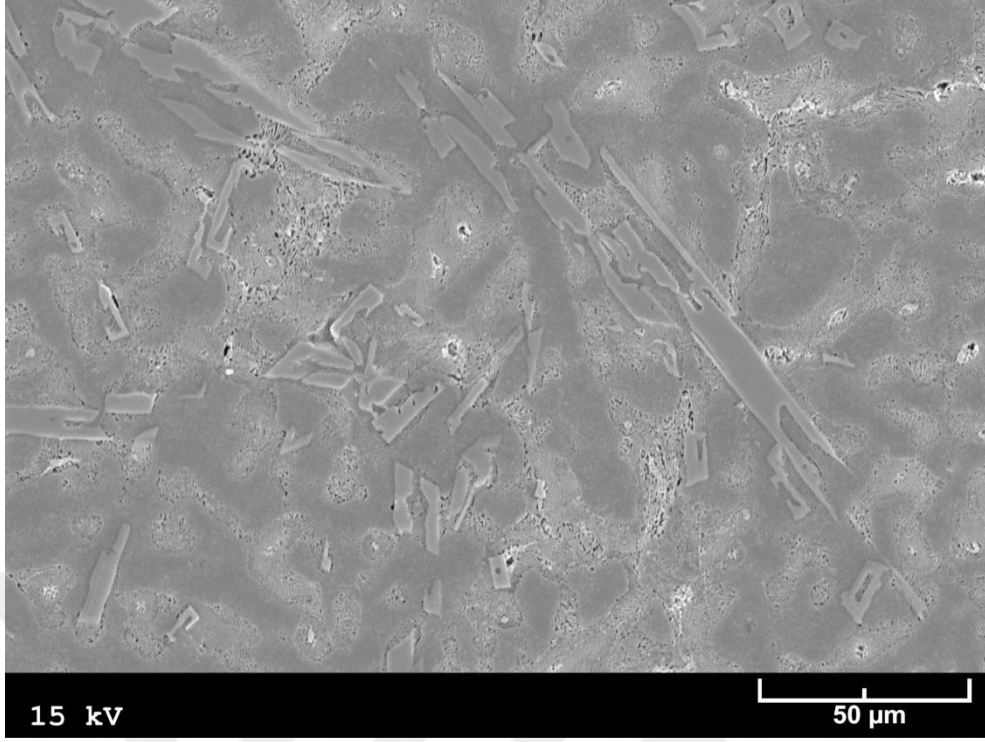
Şekil 11. Zn-40Al-2Cu-0,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü



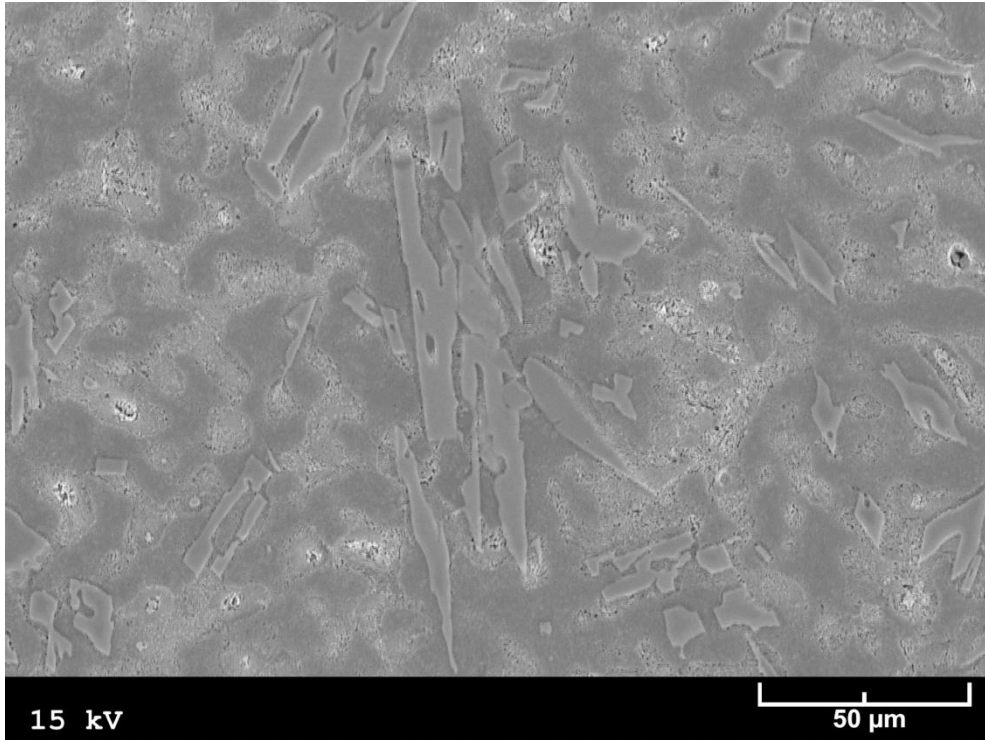
Şekil 12. Zn-40Al-2Cu-1Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü



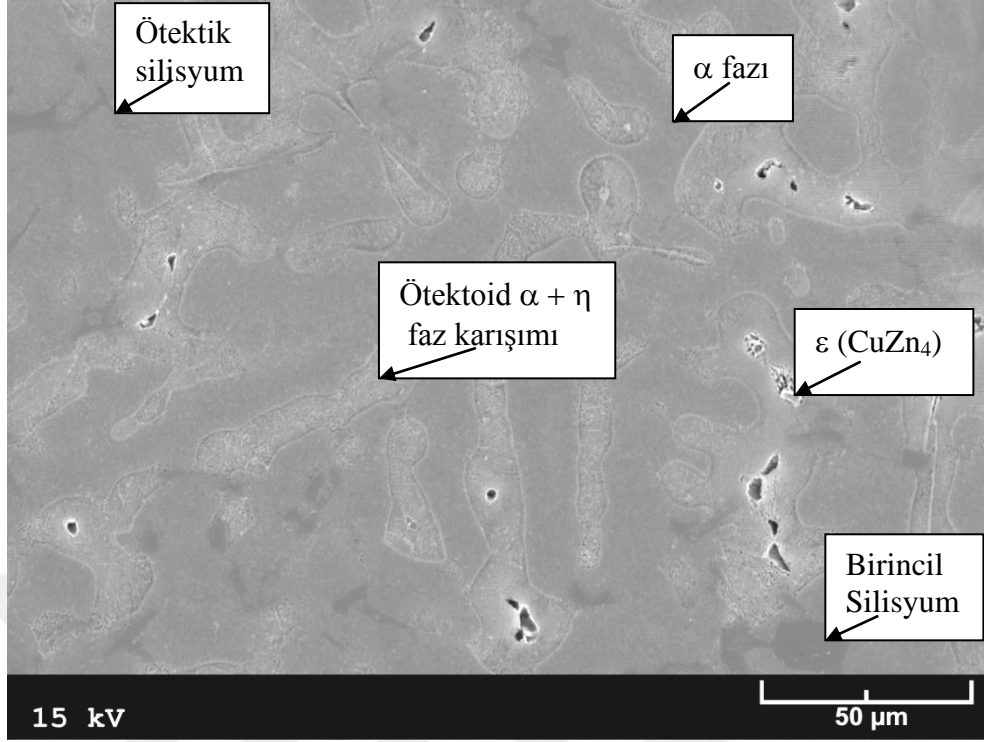
Şekil 13. Zn-40Al-2Cu-1,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü



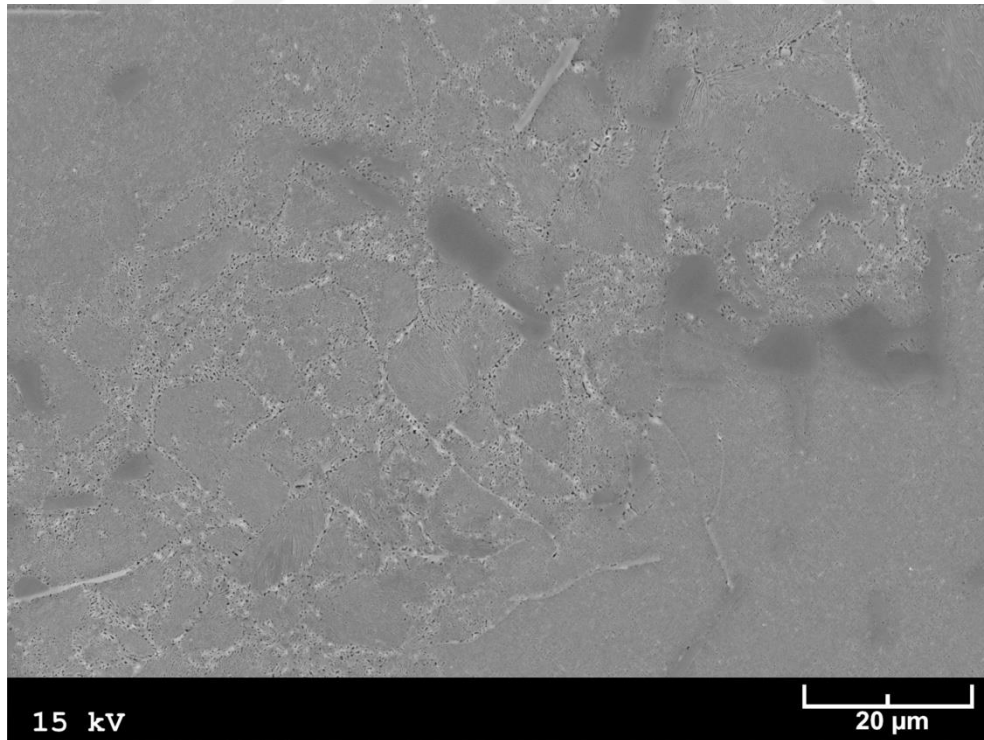
Şekil 14. Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü



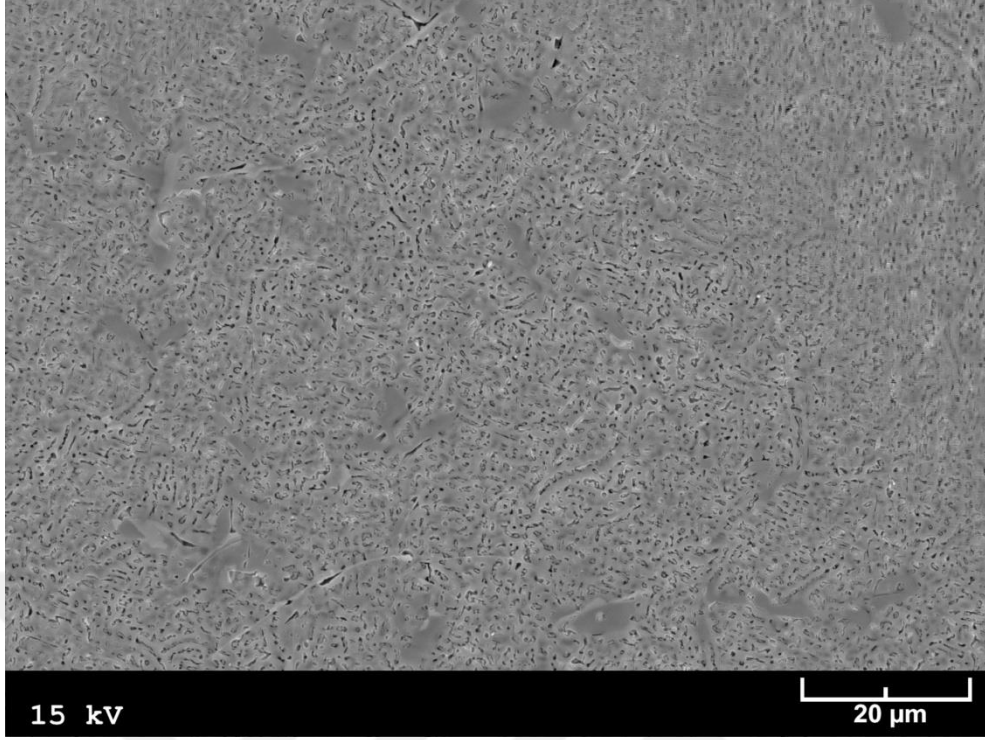
Şekil 15. Zn-40Al-2Cu-2,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü



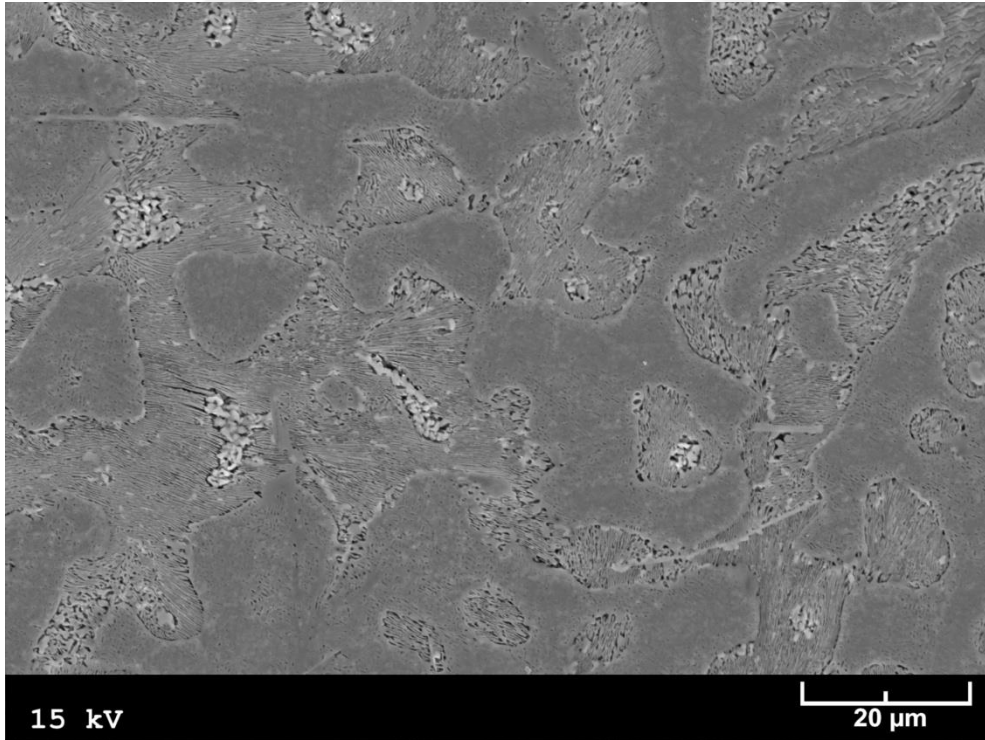
Şekil 16. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü



Şekil 17. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki içyapısının SEM görünümü

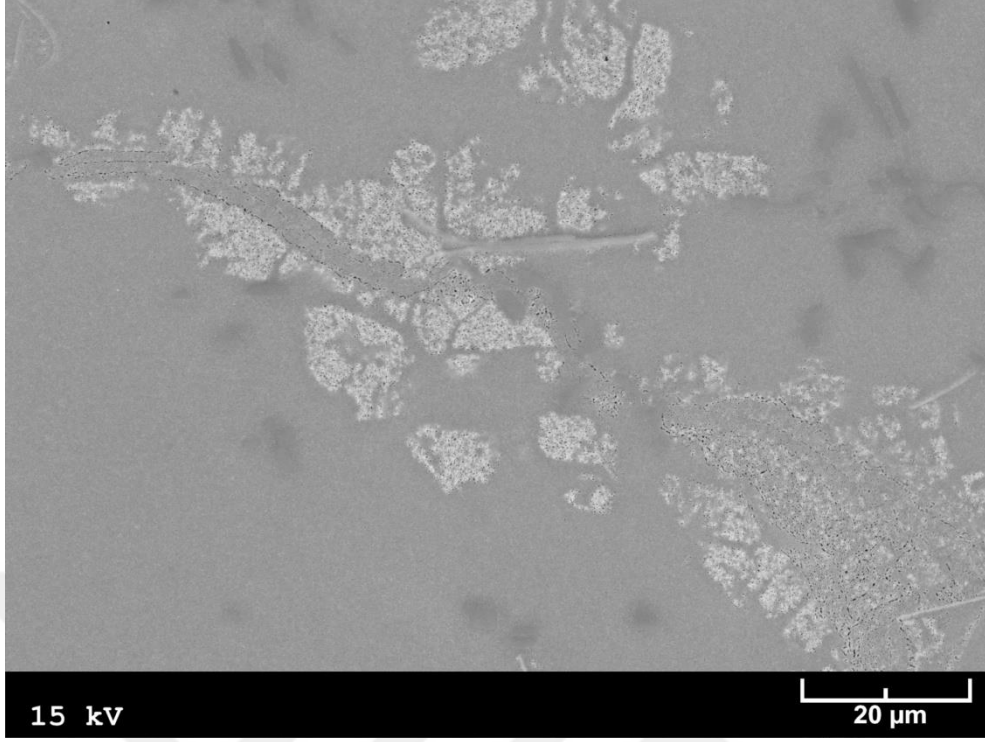


Şekil 18. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki içyapısının SEM görünümü

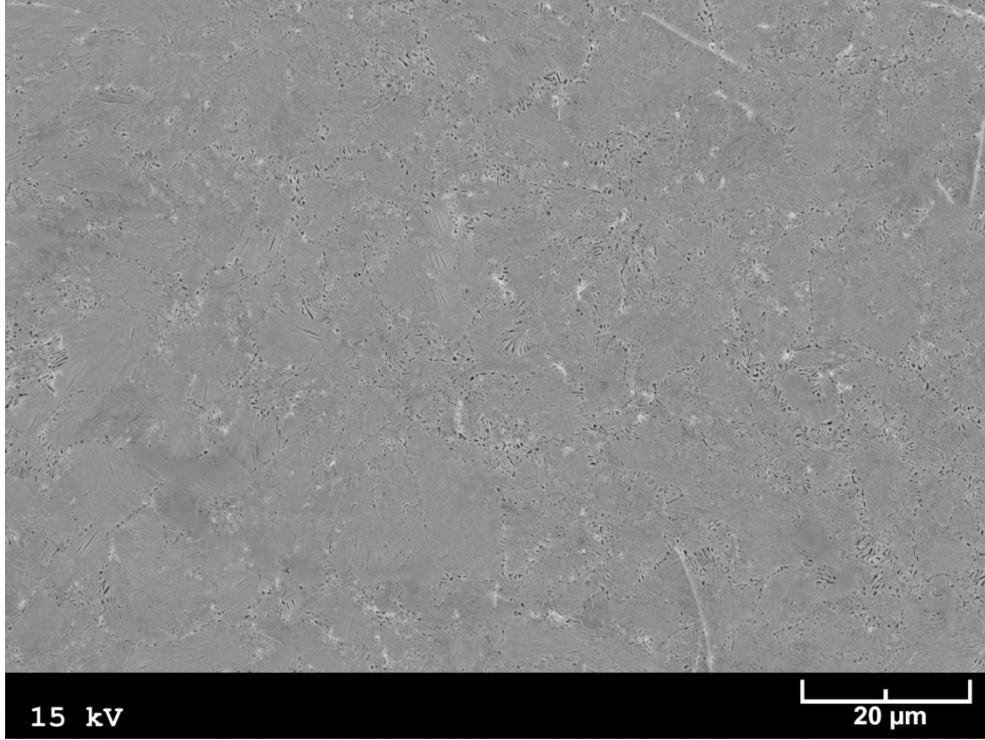


Şekil 19. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş durumdaki içyapısının SEM görünümü

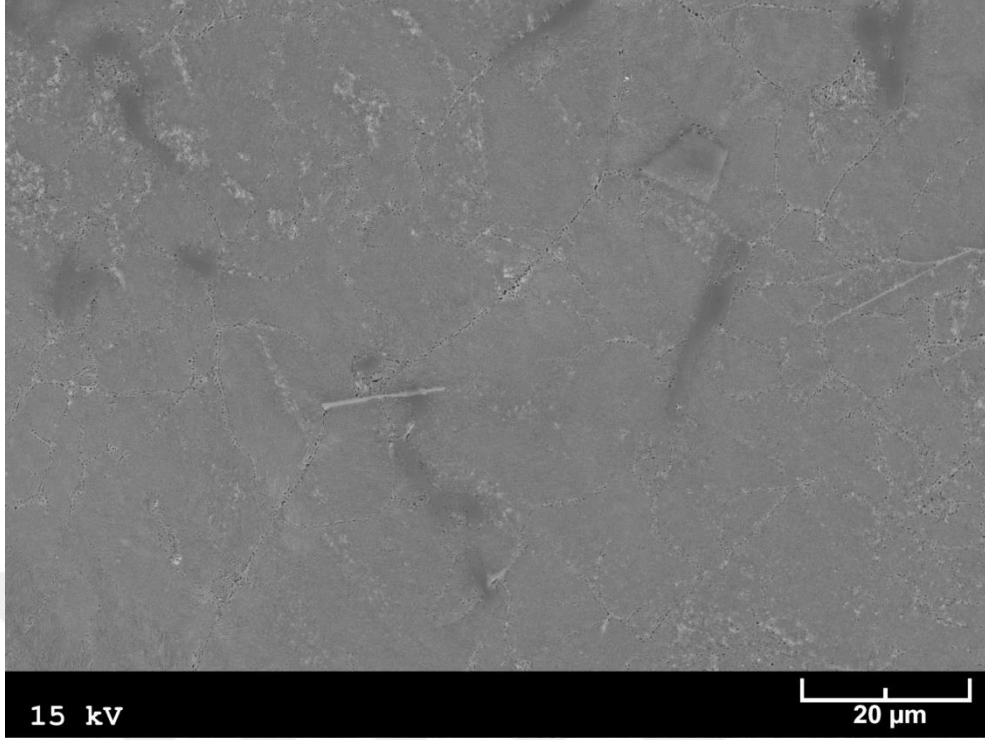




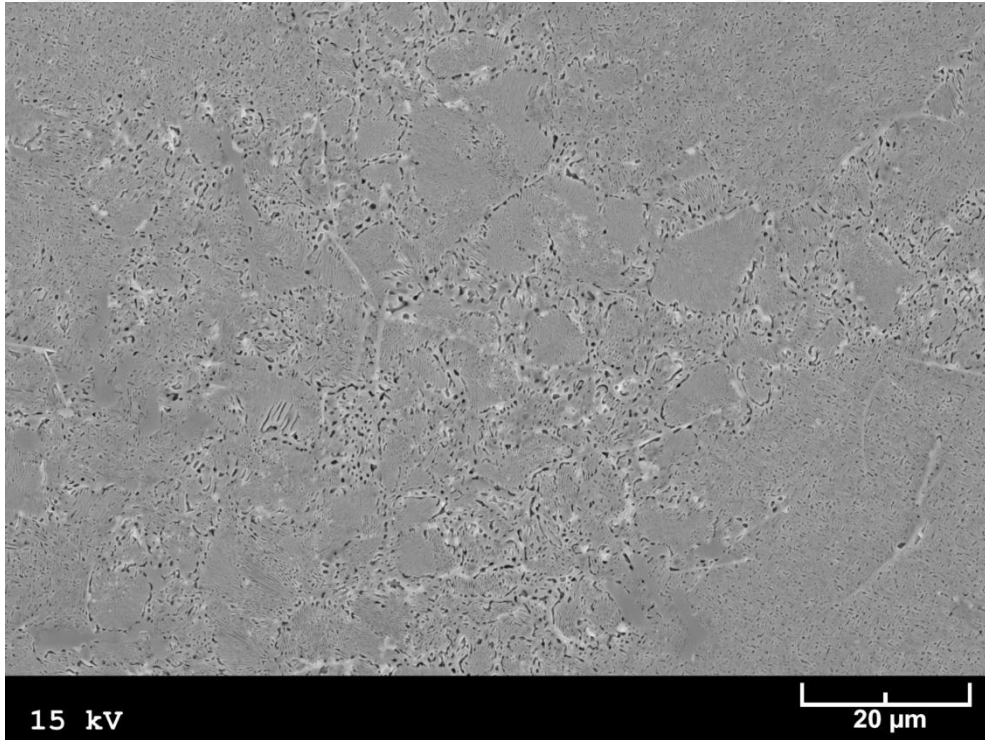
Şekil 20. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıt işlemleri görmüş durumdaki iç yapısının SEM görünümü



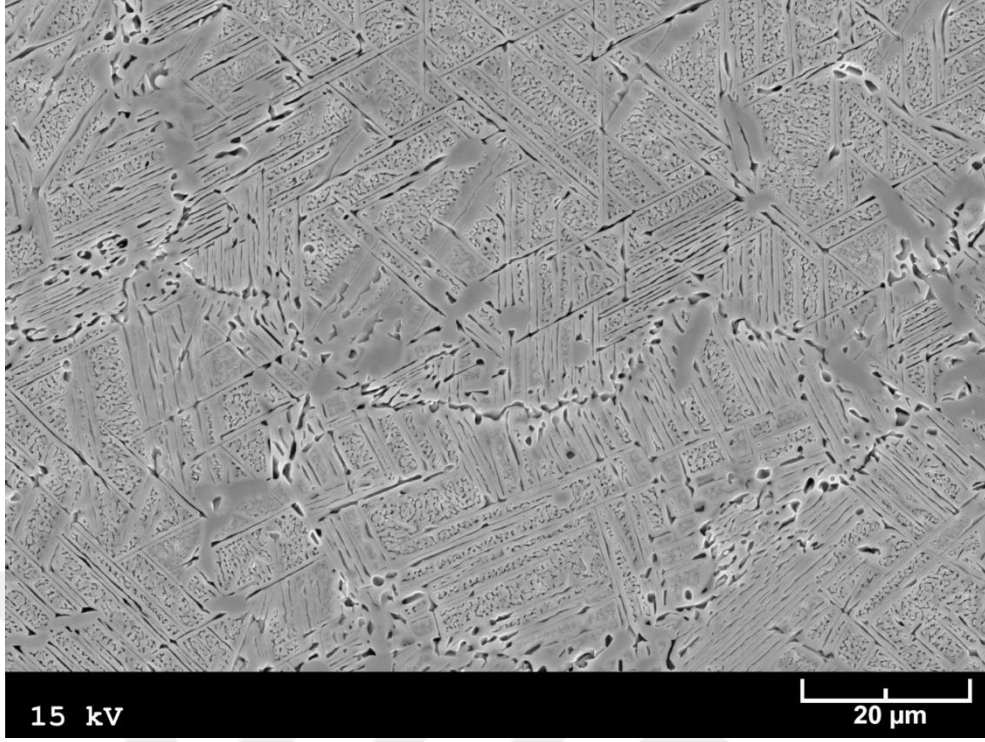
Şekil 21. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıt işlemleri görmüş durumdaki iç yapısının SEM görünümü



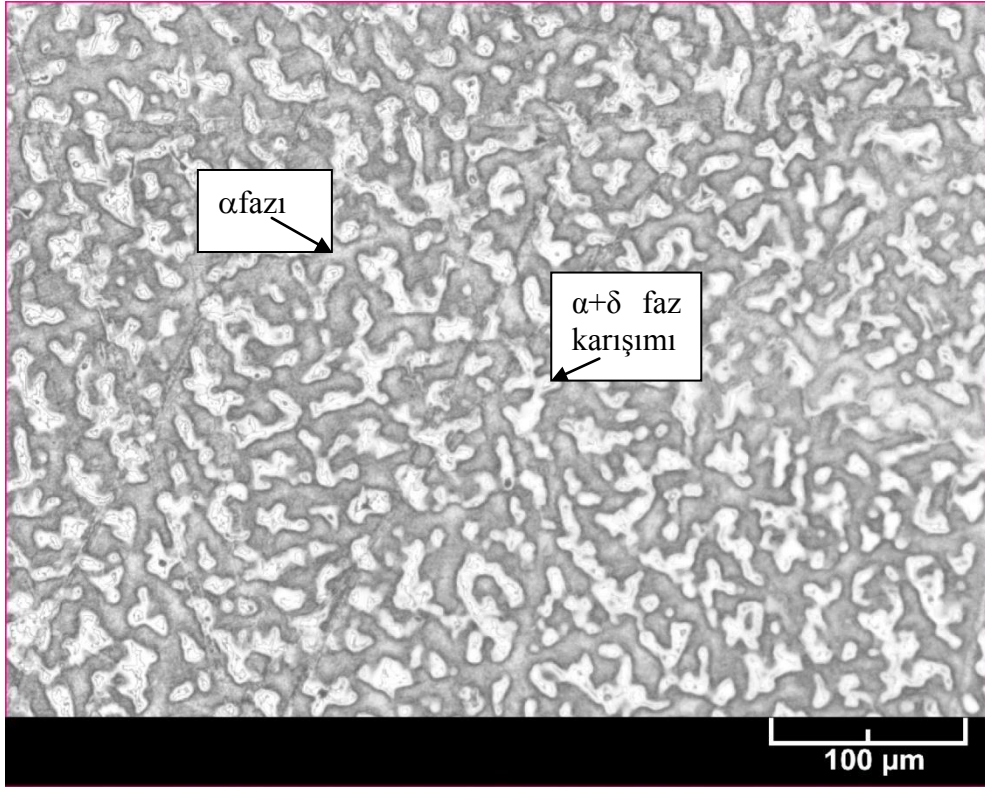
Şekil 22. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 100 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görünümü



Şekil 23. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 200 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görünümü



Şekil 24. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının 250 °C sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görünümü



Şekil 25. SAE 65 bronzunun içyapısının görünümü





Şekil 26. SAE 660 bronzunun içyapısının görünümü

### 3.3.Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımları ile Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış işlem görmüş durumlardaki sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri sırasıyla Tablo 7 ve 8'de verilmiştir. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının söz konusu değerlerinin nikel oranına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 27'de; Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait aynı değerlerin izotermal dönüşüm sıcaklığına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 28'de verilmiştir. Şekil 26'daki eğriler nikel oranı arttıkça Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerinin azaldığını belirli nikel oranlarının üzerine çıkılması durumunda ise genelde artışa geçtiklerini göstermektedir. Ancak en belirgin azalmanın bu alaşımların kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinde, en belirgin artışın ise sertlikte meydana geldiği görülmüştür. Bu durum nikel katkılarının Zn-Al alaşımlarının sertliğini artırırken, mukavemet ve süneklik değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. Şekil 28'de yer alan eğriler ise izotermal dönüşüm sıcaklığı arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik ve mukavemet değerlerinin azalıp darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin az da olsa

arttığını göstermektedir. Ayrıca, 150 °C sıcaklıktaki izotermal dönüşüm sonucunda söz konusu alaşımın kopma uzaması en yüksek değerine ulaşırken basma dayanımı en düşük değerine düşmektedir.

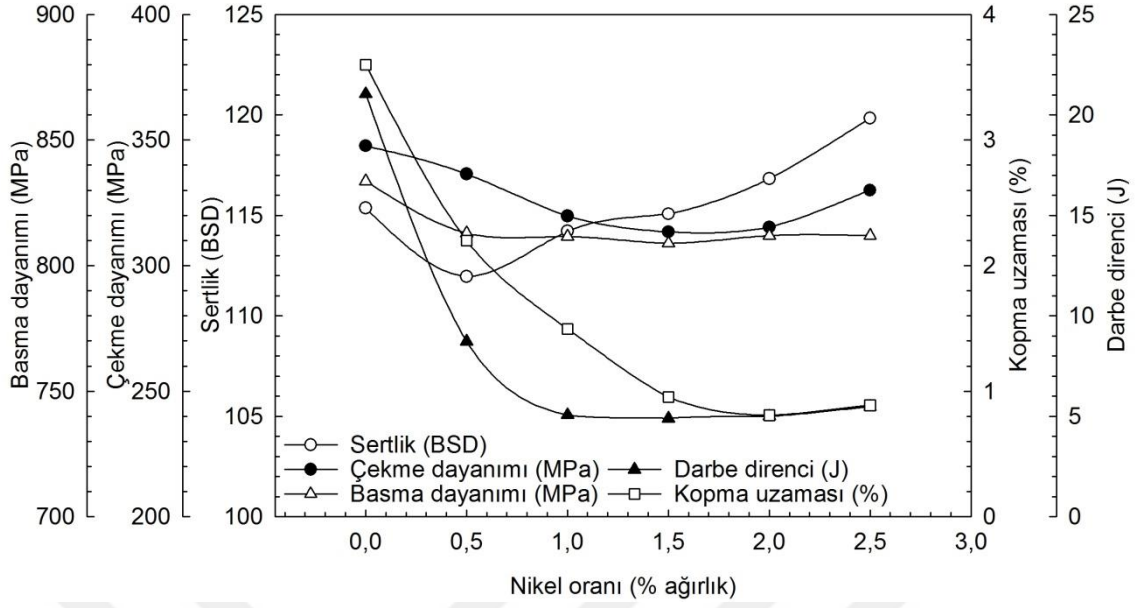
Tablo 7. Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri

Alaşım	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Basma dayanımı (MPa)	Darbe direnci (J)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Zn-40Al-2Cu	115	348	834	21,054	3,6	4316
Zn-40Al-2Cu-0,5Ni	112	336	813	8,731	2,2	4318
Zn-40Al-2Cu-1Ni	114	320	812	5,071	1,5	4319
Zn-40Al-2Cu-1,5Ni	115	313	809	4,903	1,0	4321
Zn-40Al-2Cu-2Ni	117	315	812	4,997	0,8	4324
Zn-40Al-2Cu-2,5Ni	120	330	812	5,487	0,9	4326

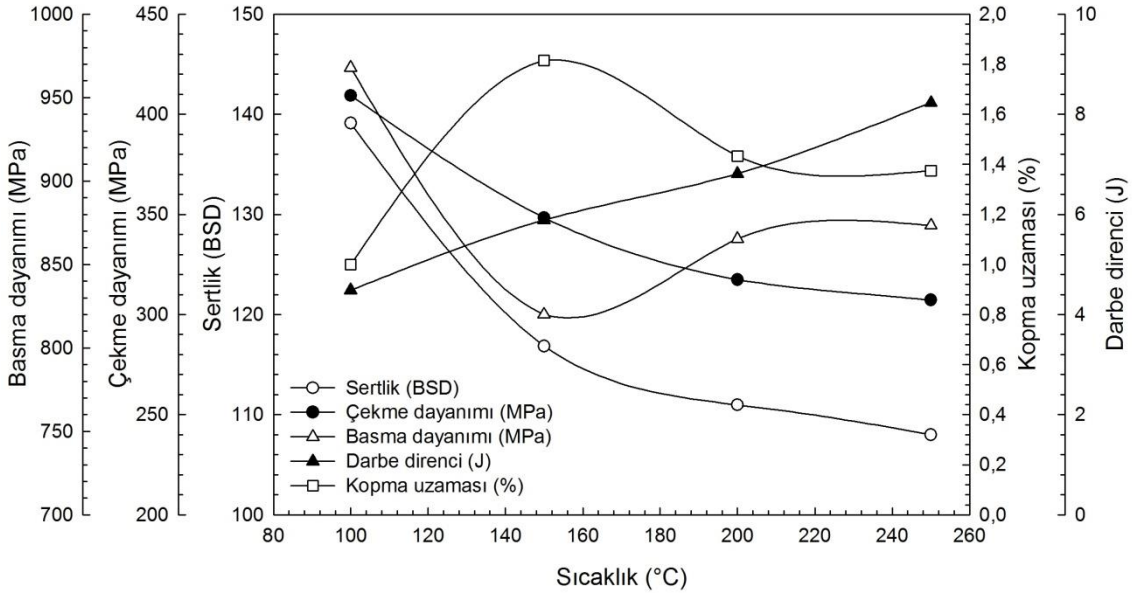
Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda elde edilen sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması değerleri ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından elde edilen değerler karşılaştırılmalı olarak Şekil 29'daki çubuk diyagramında gösterilmiştir. Bu diyagram Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi (stabilizasyon) işlemi hariç, diğer bütün durumlardaki sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin bronzların söz konusu değerlerinden daha yüksek olduğunu, ancak bronzların bu alaşımdan daha yüksek basma dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci sergilediklerini göstermektedir. Bu alaşımdan en yüksek sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerleri ile en düşük kopma uzaması ve darbe direnci değerleri T6 ısıl işleminden sonra elde edilmiştir. Söz konusu alaşım T5 ısıl işleminden sonra en düşük sertlik ve mukavemet değerlerini sergilemiştir. Ayrıca, havada soğutma bu alaşımın sertlik, mukavemet ve sünekliğini artırırken fırında soğutma ve T7 işlemleri sertlik ve mukavemeti düşürüp sünekliği artırmaktadır.

Tablo 8. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve farklı ısıı işlem görmüş durumlardaki sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci, kopma uzaması ve yoğunluk değerleri

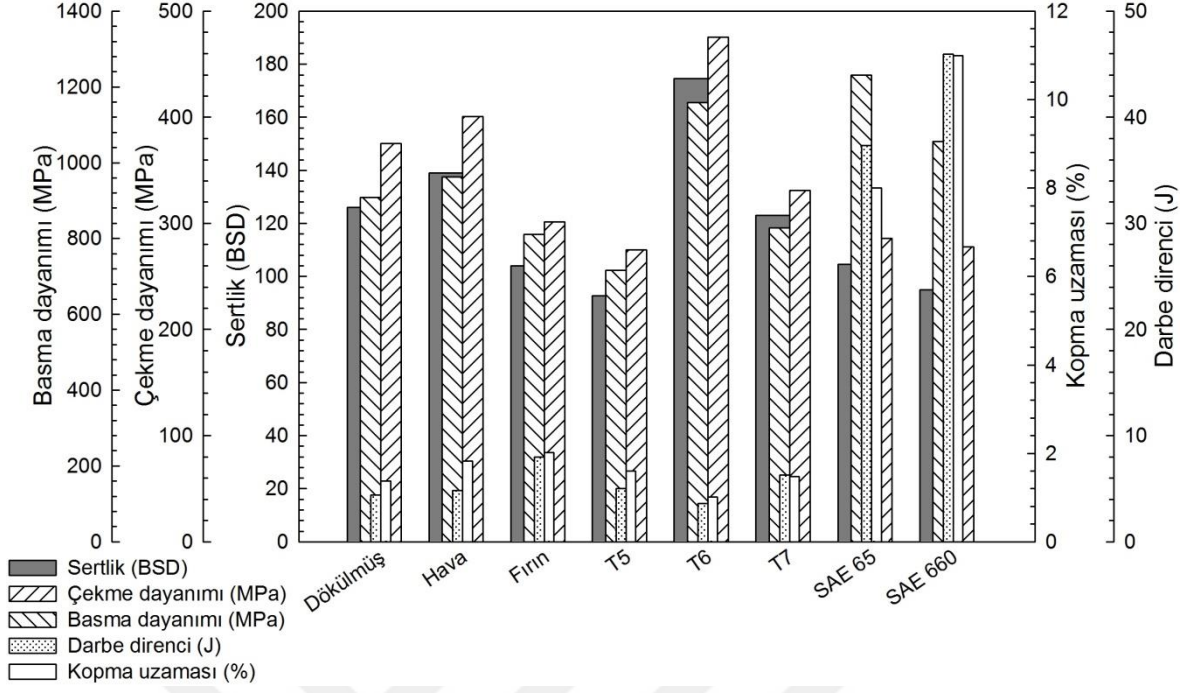
Alaşımın durumu	Sertlik (BSD)	Çekme dayanımı (MPa)	Basma dayanımı (MPa)	Darbe direnci (J)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Dökülmüş	126	375	909	4,423	1,4	4219
Havada soğutulmuş	139	401	962	4,849	1,8	4217
Fırında soğutulmuş	104	301	811	7,971	2,0	4212
T5 ısıı işlemi görmüş	93	275	716	4,999	1,6	4217
T6 ısıı işlemi görmüş	174	475	1159	3,618	1,0	4188
T7 ısıı işlemi görmüş	123	331	828	6,272	1,5	4219
Farklı Sıcaklıklarda İzotermal dönüşüme tabi tutulmuş						
100 °C	139	409	968	4,485	1,0	4210
150 °C	117	348	820	5,887	1,8	4210
200 °C	111	317	865	6,813	1,4	4216
250 °C	108	307	873	8,231	1,4	4217
SAE 65	105	286	1231	37,357	8,0	8770
SAE 660	95	278	1056	45,985	11	8913



Şekil 27. Nikel katkısının Zn-40Al-2Cu alaşımlarının mekanik özelliklerine (sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması) etkisini gösteren eğriler.



Şekil 28. İzotermal dönüşüm sıcaklığının Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının mekanik özelliklerine (sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması) etkisini gösteren eğriler.



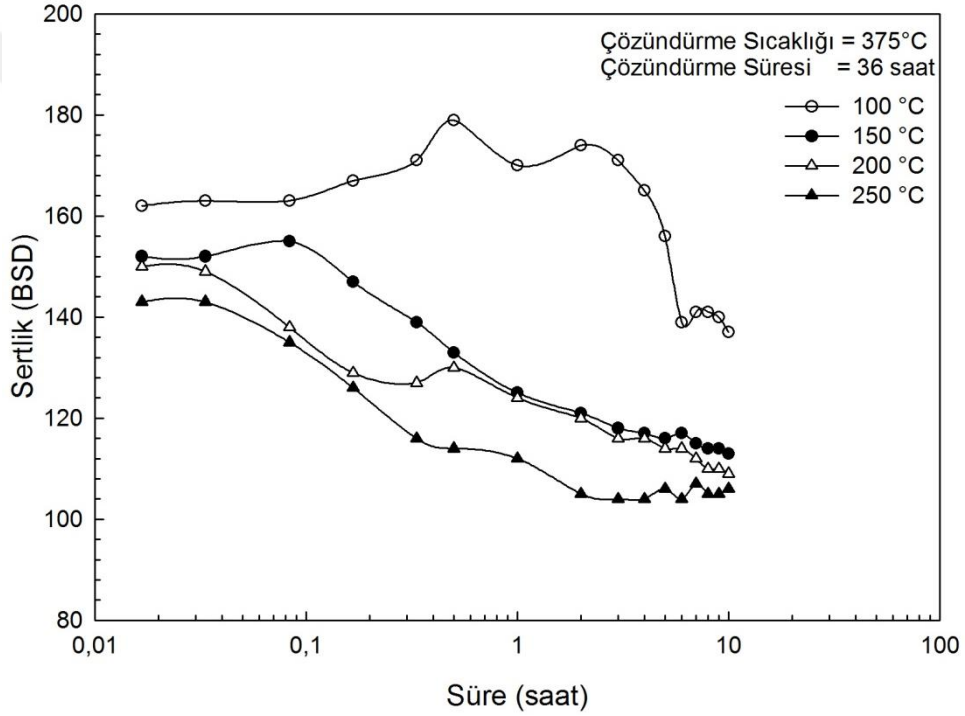
Şekil 29. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlardaki mekanik özellikleri (sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe direnci ve kopma uzaması) ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının söz konusu özelliklerinin karşılaştırılması olarak gösterimi.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının farklı sıcaklıklarda izotermal dönüşüme tabi tutulan numunelerinin sertlik ve boyut değişimlerinin dönüşüm süresine göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 30 ve 31’de verilmiştir. Bu eğriler, farklı sıcaklıklardaki izotermal dönüşüm işlemi sırasında alaşımın sertliğinin önce artıp bir tepe noktasından geçtikten sonra azaldığını ve yaklaşık 6 saatten sonra hemen hemen sabit kaldığını göstermektedir. Şekil 29’daki eğrilere bakıldığında farklı sıcaklıklardaki izotermal dönüşüm sırasında söz konusu alaşımda meydana gelen boyut değişim oranlarının önce hızlı bir şekilde azaldığı ve yaklaşık 2 saatlik dönüşüm süresinden sonra ise fazla değişmedikleri görülmektedir.

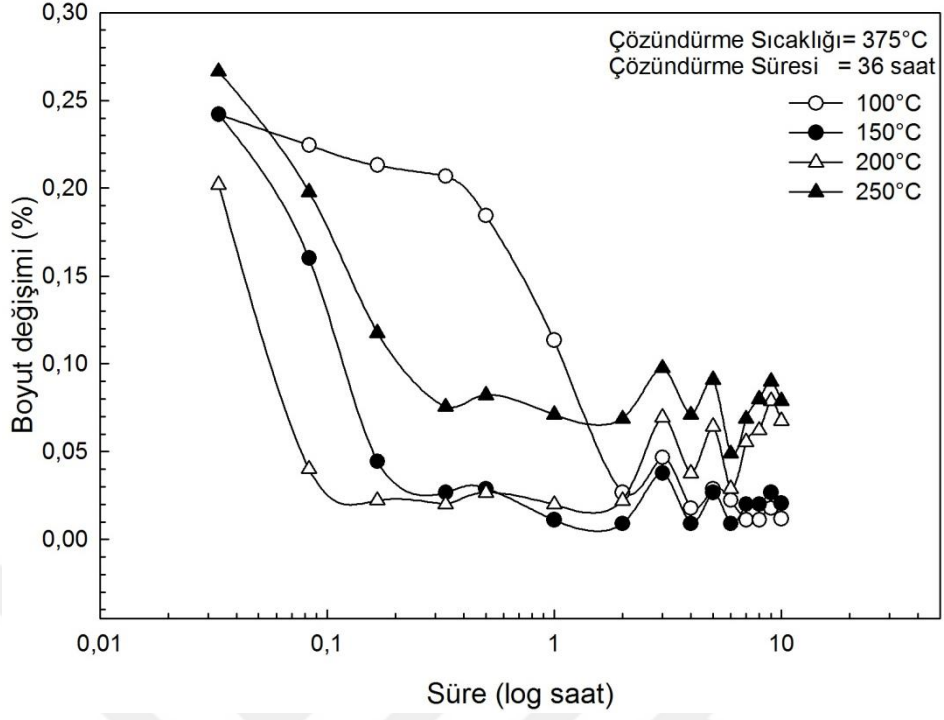
T5 ısıl işlemi sırasında Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik ve boyunda meydana gelen değişimlerin yaşlandırma süresine göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 32’de görülmektedir. Bu eğriler alaşımın sertlik değerinin artan yaşlandırma süresi ile sürekli azaldığını; boyut değişimi değerinin ise 10 saate kadar yavaş daha sonra hızlı arttığını göstermektedir.

T6 ve T7 işlemleri için en uygun yaşlandırma süresinin belirlenmesi amacıyla uygulanan çözündürme-su verme-yapay yaşlandırma işlemi sırasında Zn-40Al-2Cu-2Si

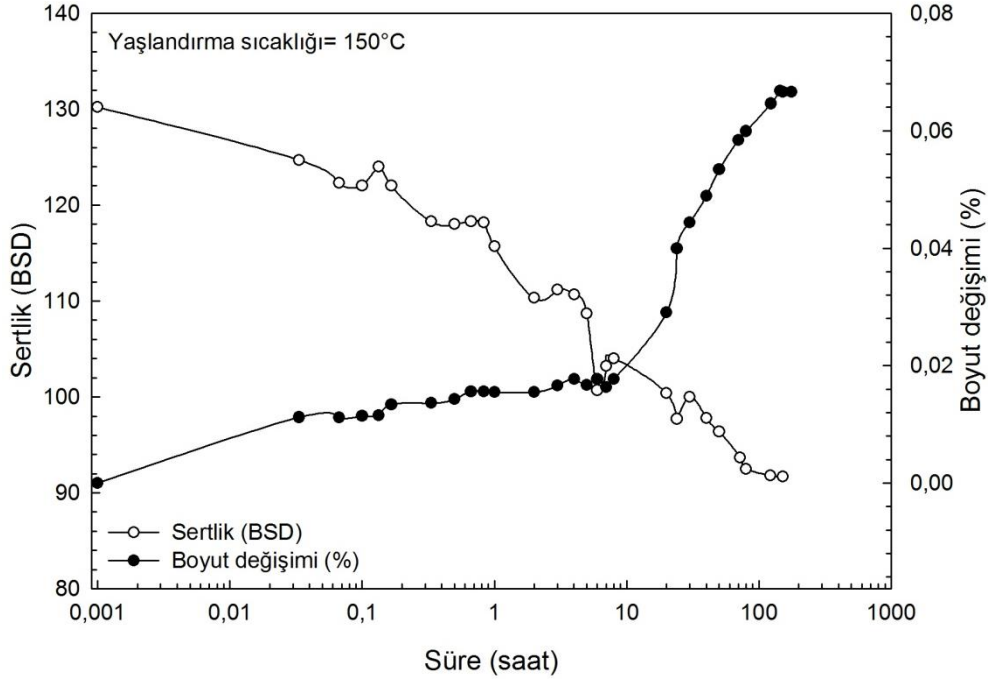
alaşımının sertlik ve boyutunda meydana gelen değişimleri gösteren eğriler Şekil 33'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımın sertliğinin önce artıp 2 dakika gibi kısa bir yaşlandırma süresi sonunda bir tepe noktasından geçtikten sonra azaldığını, boyut değişimi değerinin ise önce hızlı bir şekilde azalıp yaklaşık 8 saat sonunda en düşük değerine ulaştıktan sonra artışa geçtiğini göstermektedir. Bütün bu veri ve eğriler uygulanan T6 ısıl işleminin alaşımının sertlik, çekme ve basma dayanımını değerlerini artırırken darbe direnci ve kopma uzaması değerlerini azalttığını, T7 ısıl işleminin ise bu değerleri ters yönde etkilediğini göstermektedir (Tablo 8 ve Şekil 29) .



Şekil 30. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertliğinin farklı sıcaklıklardaki izotermal dönüşüm süresine göre değişimini gösteren eğriler

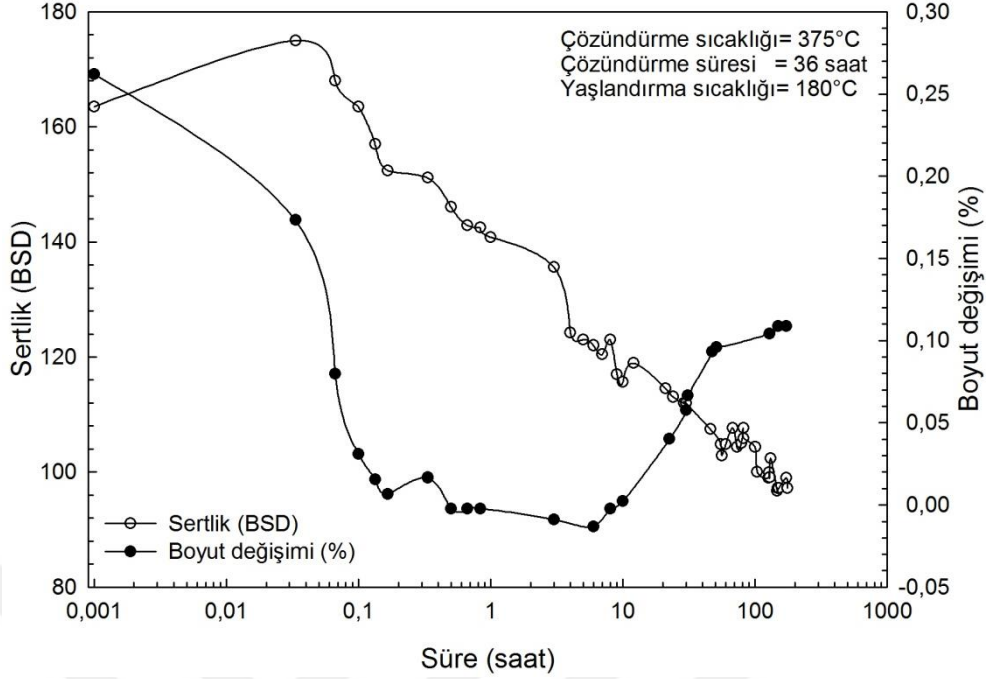


Şekil 31. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında meydana gelen boyut değişiminin farklı sıcaklıklardaki izotermal dönüşüm süresine göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 32. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertliği ile boyut değişim oranının stabilizasyon süresine göre değişimlerini gösteren eğriler





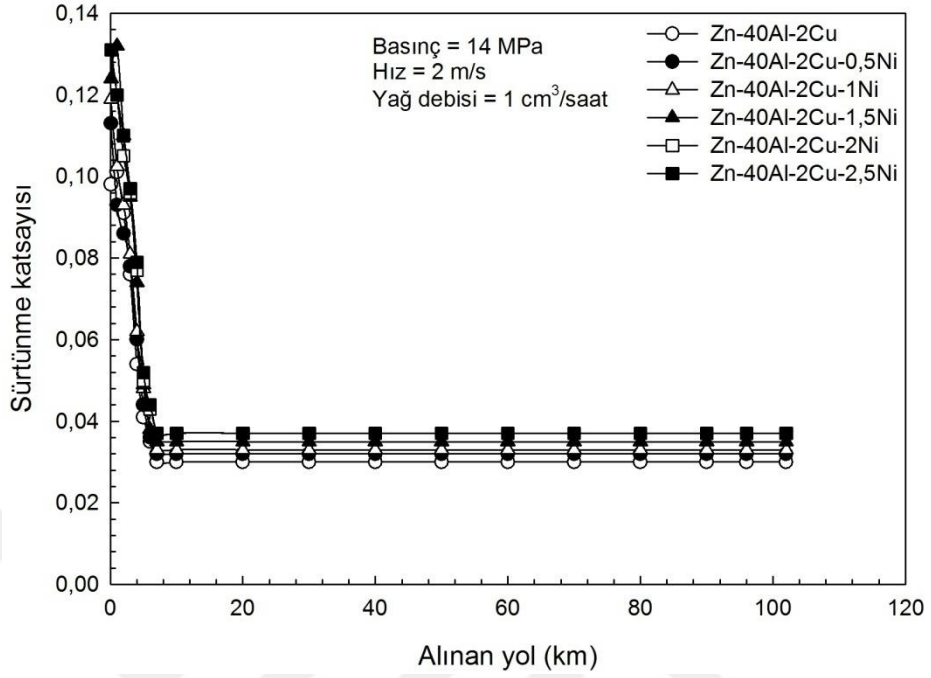
Şekil 33. Çözündürme ve su verme işlemine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertliği ile boyut değişim oranının yaşlandırma süresine göre değişimlerini gösteren eğriler.

### 3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

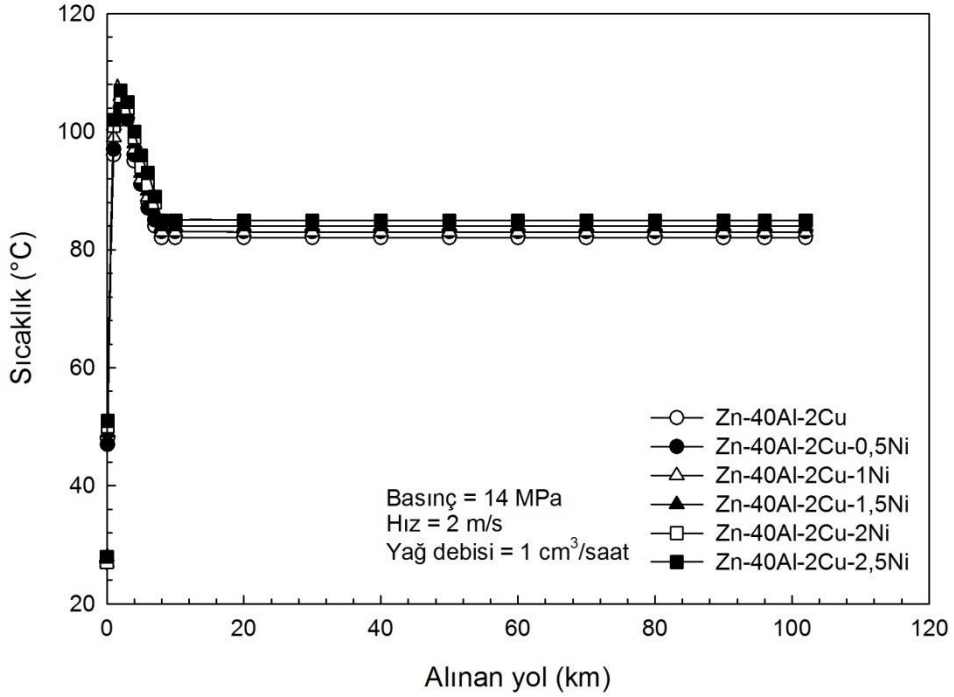
Sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 33-36'da, nikel oranına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 37'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin çalışmanın başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde artarak en yüksek değerlerine ulaştığını ve daha sonra azalarak yaklaşık 8 km'lik kayma yolu sonunda sabit değerlere eriştiğini göstermektedir. Ayrıca, bu eğriler deneylerin başlangıç aşamasında alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının hızlı bir şekilde artmasına karşın, ortalama yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, 40 km gibi oldukça uzun bir kayma yolu sonunda ise her iki büyüklüğün sabit sayılabilecek değerlere ulaştığını ortaya koymaktadır. Söz konusu alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin artan nikel oranı ile sürekli arttığı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ile hacim kaybının ise nikel oranına göre farklı değişimler sergiledikleri gözlemlendi. Şöyle ki, ortalama yüzey pürüzlülüğü artan nikel oranı ile artarken, hacim kaybı azalmakta; % 0,5 Ni oranının üzerine çıkılması durumunda ise



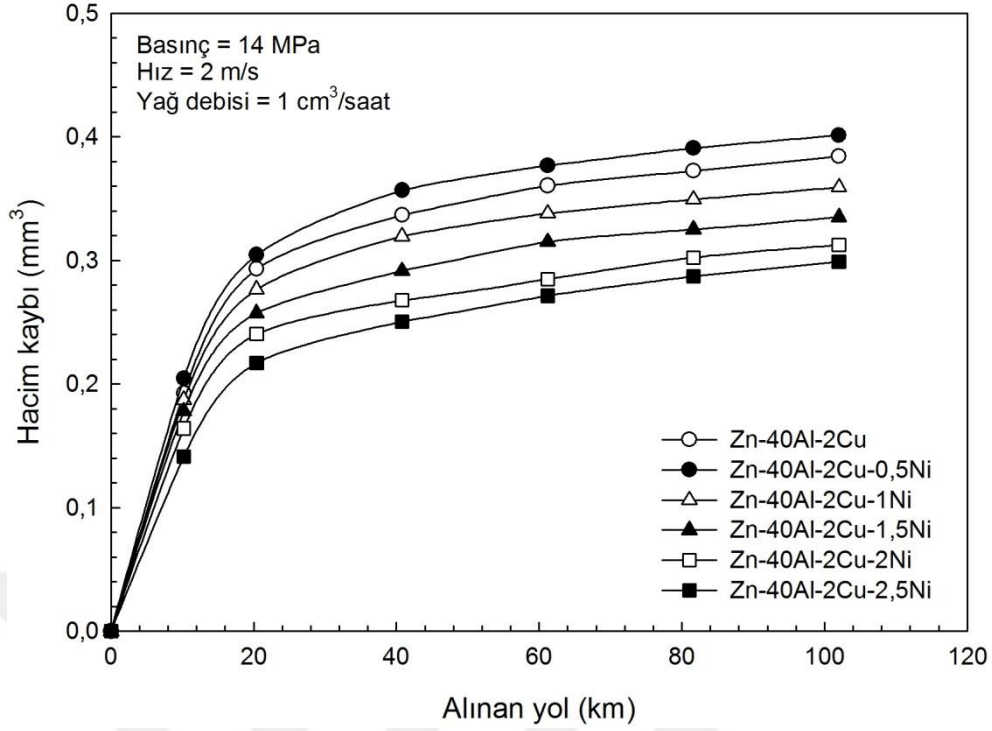
durum tamamen tersine dönmekte yani ortalama yüzey pürüzlülüğü azalırken hacim kaybı artmaktadır.



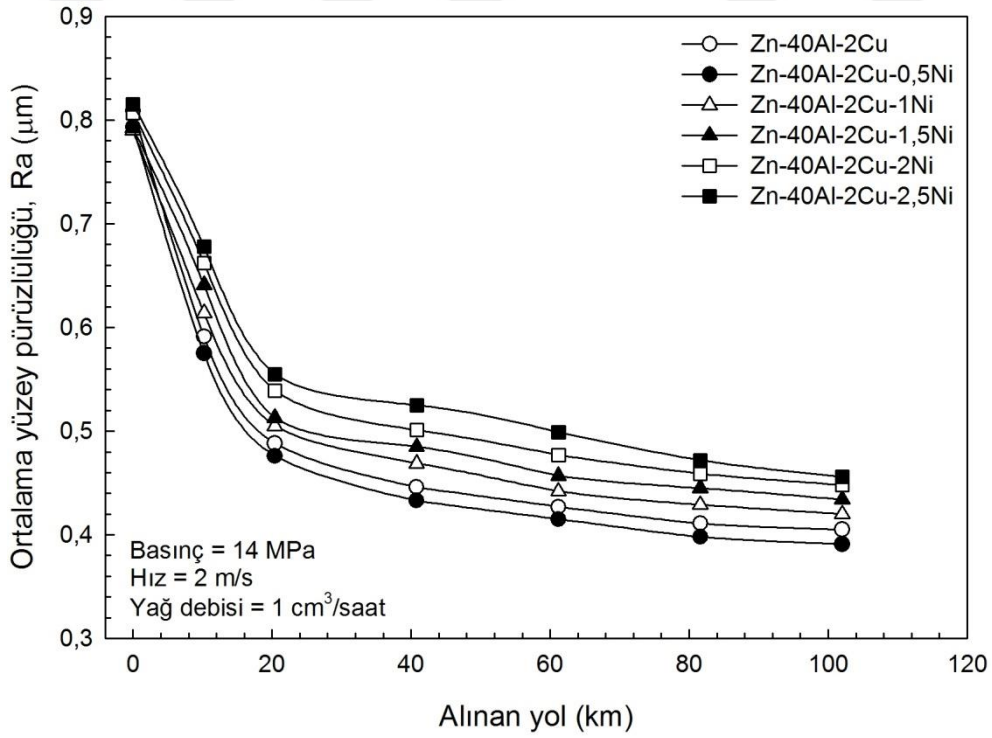
Şekil 34. Yağlı durumda 14 MPa basınç ve 2 m/s kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.



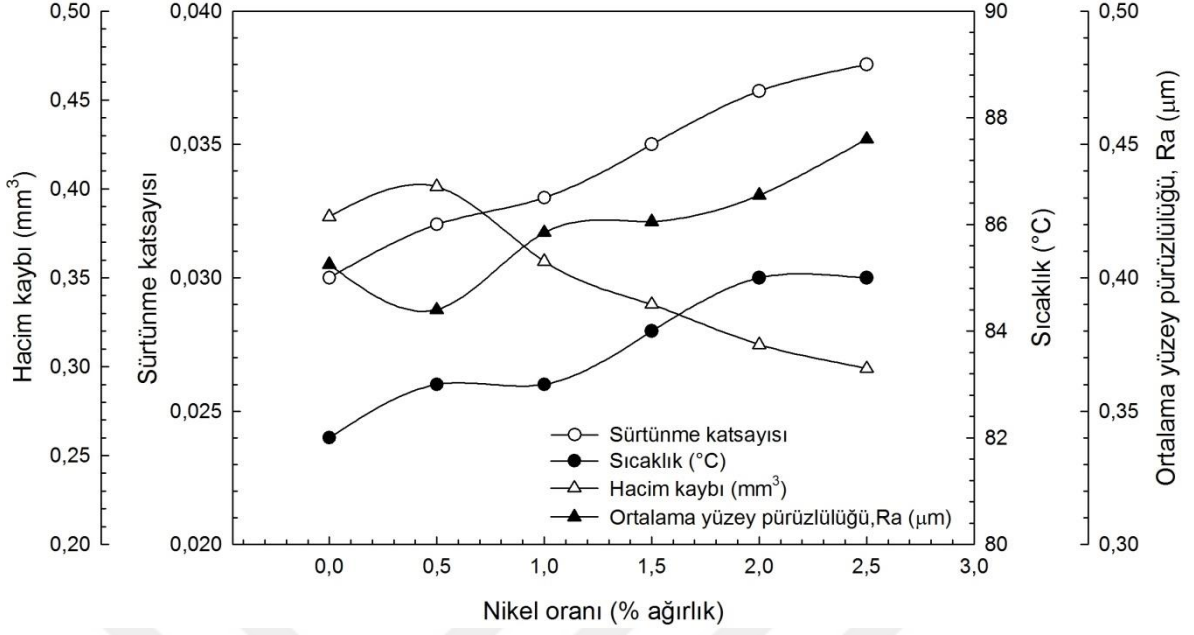
Şekil 35. Yağlı durumda 14 MPa basınç ve 2 m/s kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.



Şekil 36. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarında aşınma sonucu meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 37. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarından elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.

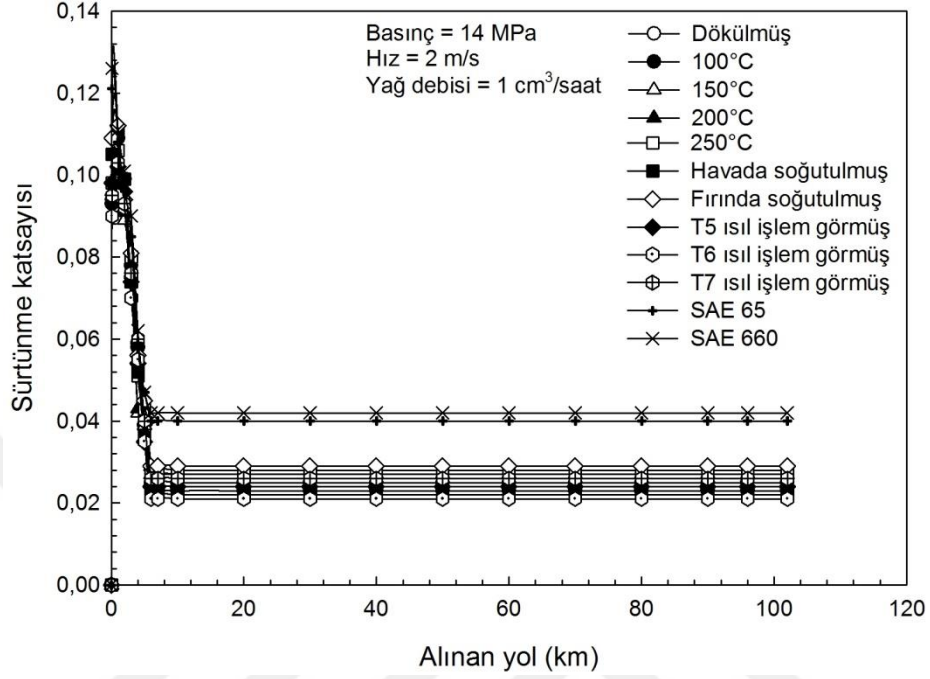


Şekil 38. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin nikel oranına göre değişimini gösteren eğriler.

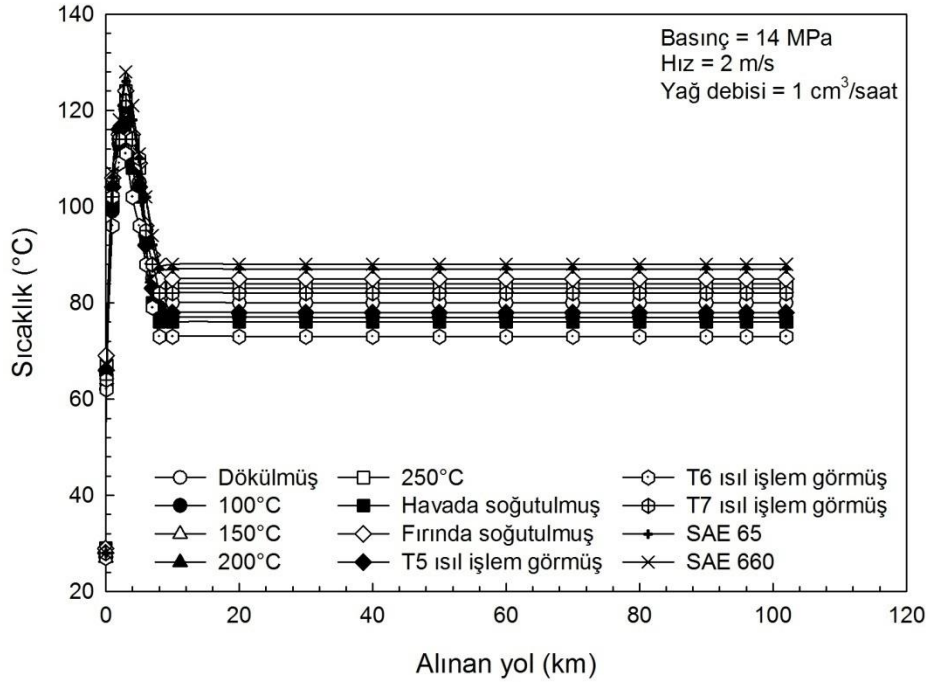
Diğer taraftan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıtılmış ve ısıtılmış görmüş durumdaki numuneleri ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 39-42'de, bu değerlerin karşılaştırmalı olarak gösterimi ise Şekil 43'deki çubuk diyagramında verilmiştir. Bu eğriler, Zn-40Al-2Cu-2Si ve Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımları ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin alınan yola göre benzer değişimler sergilediklerini göstermektedir.

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından dökülmüş ve farklı ısıtılmış görmüş numunelerinden sürekli rejim durumda elde edilen sürtünme katsayısı, sıcaklık ve 102 km'lik yol sonundaki hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından elde edilen değerler karşılaştırılmalı olarak Şekil 44'deki çubuk diyagramında gösterilmiştir. Bu diyagram Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıtılmış işlemi uygulanan numunelerinin en düşük sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerine sahip olduğunu, en yüksek sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerine ise SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca havada soğutma ve T5 ısıtılmış işlemleri sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerini azaltırken, T7 ısıtılmış

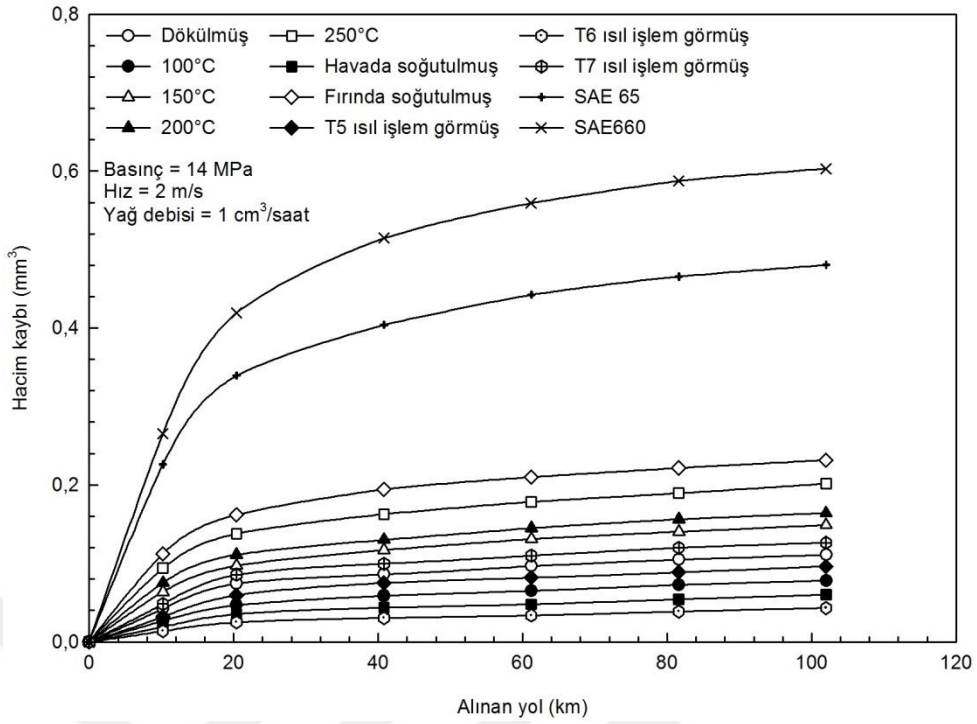
işlemi ve fırında soğutma işlemleri ise bu değerleri artırmaktadır. Alaşımların ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ise bu değerler ile ters orantılı olarak değişmektedir.



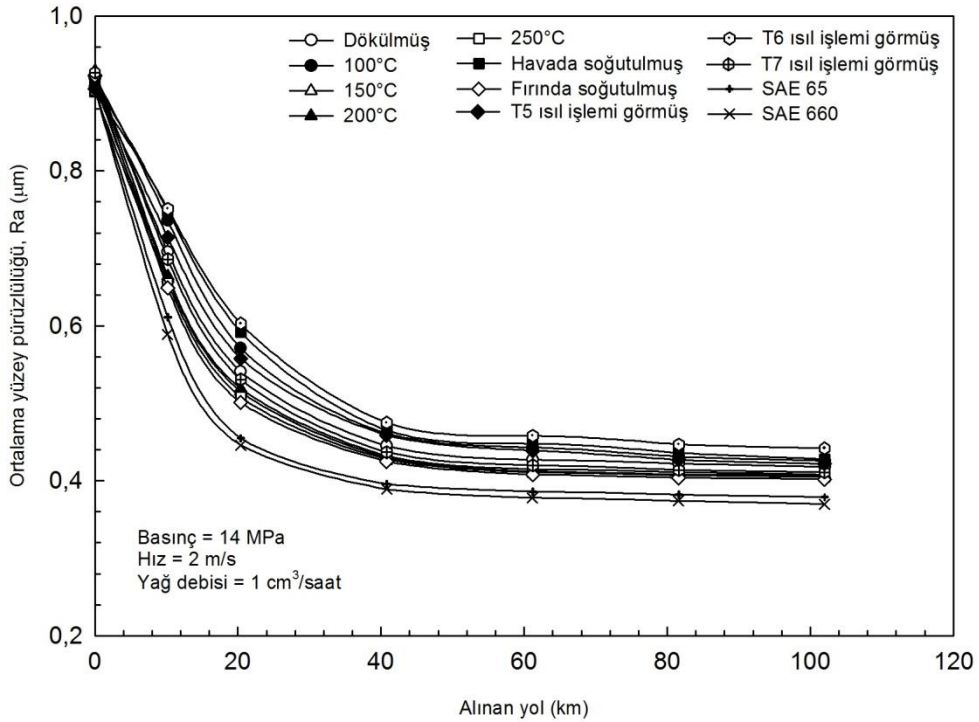
Şekil 39. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.



Şekil 40. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.

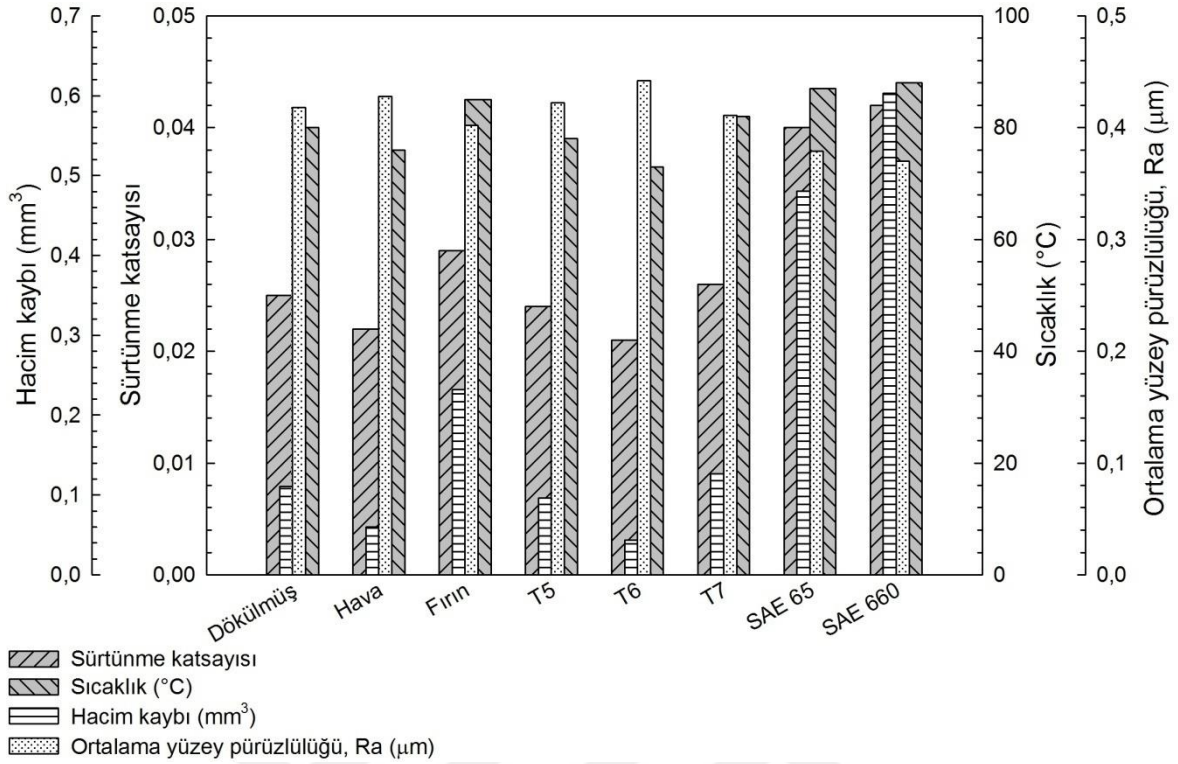


Şekil 41. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımında dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.

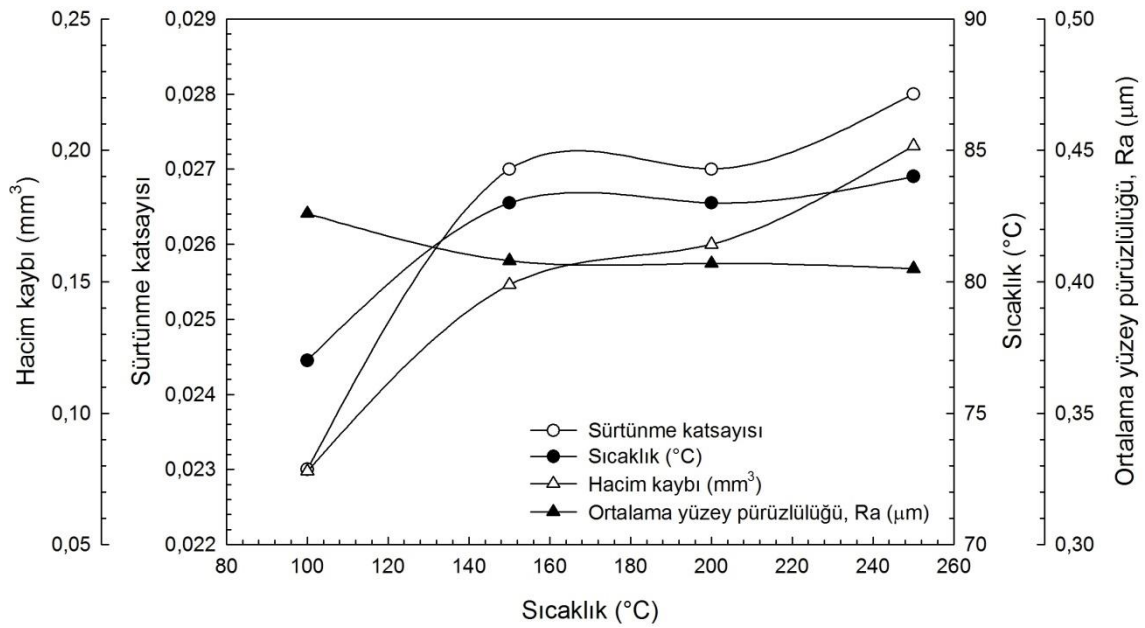


Şekil 42. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımından dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlarda ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarından elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin alınan yola göre değişimini gösteren eğriler.





Şekil 43. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve farklı ısıl işlem görmüş durumlardaki tribolojik özellikleri (sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü) ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının söz konusu özelliklerinin karşılaştırılması olarak gösterimi.



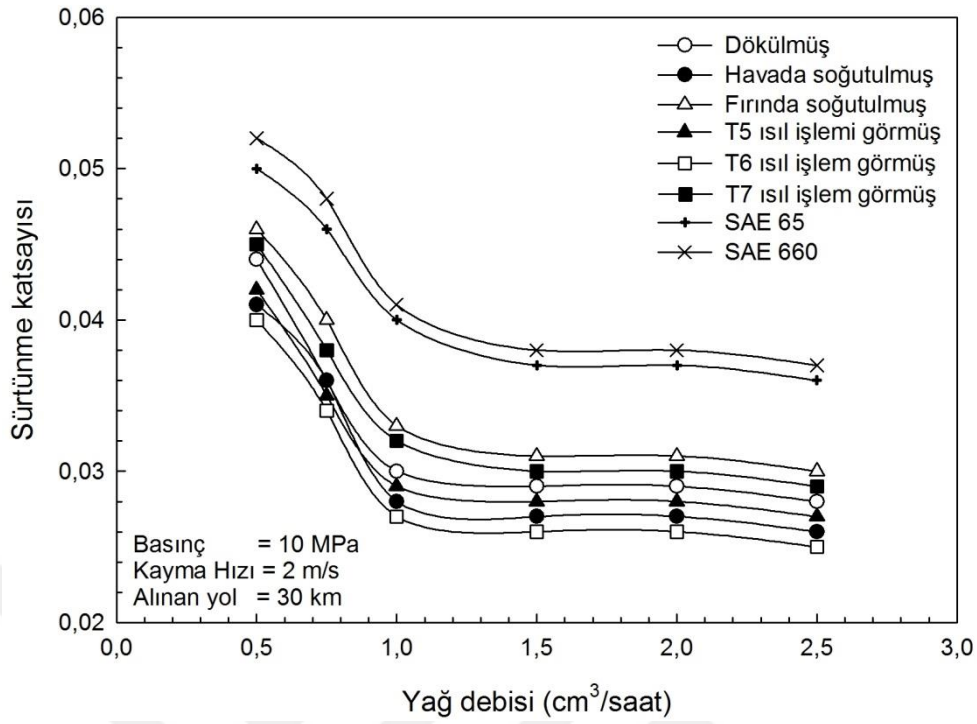
Şekil 44. İzotermal dönüşüm sıcaklığının Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının tribolojik özelliklerine (sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü) etkisini gösteren eğriler.

İzotermal dönüşüm sıcaklığının Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkisini gösteren eğriler Şekil 44'de verilmiştir. Bu eğrilerden izotermal dönüşüm sıcaklığı arttıkça alaşımın sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin arttığı, ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin ise azaldığı görülmektedir.

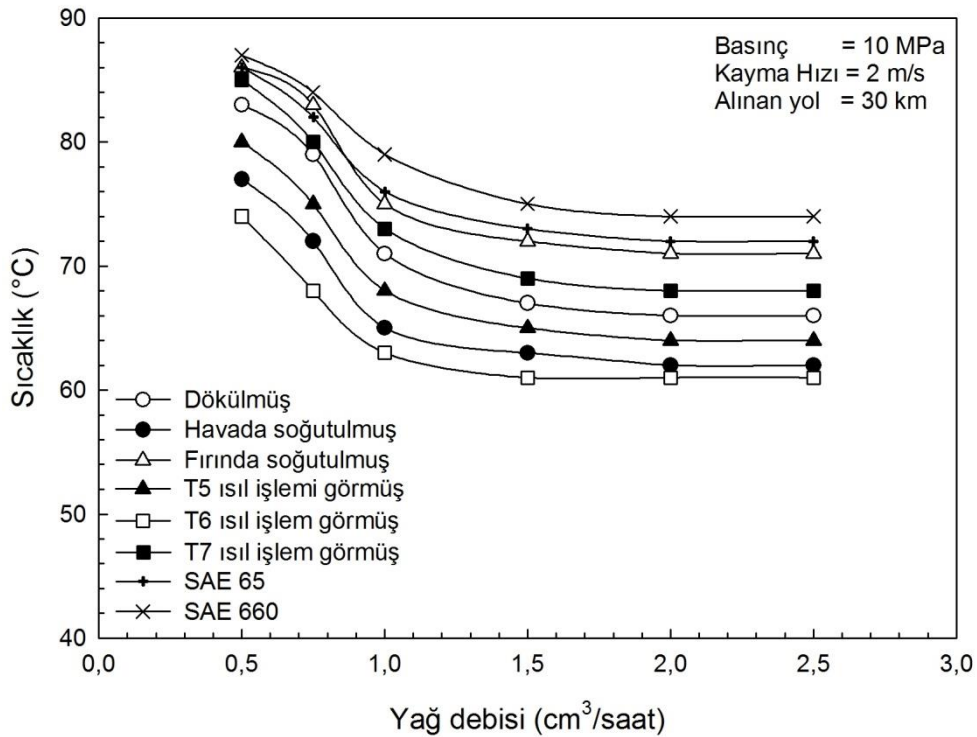
Farklı yağ debilerinde aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıtılmış durumda numuneleri ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 45-48'da verilmiştir. Bu eğrilerden, alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan yağ debisi ile azalırken ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin ise arttığı ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi değerinden sonra ise hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir.

Farklı basınçlarda 30 km'lik aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımları ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin basınca göre değişimini gösteren eğriler Şekil 49-52'de verilmiştir. Bu eğriler, alaşımların sürtünme katsayısı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artan basınç ile azaldığını, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise arttığını göstermektedir.

Farklı kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımları ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler Şekil 53-56'da verilmiştir. Bu eğriler alaşımların sürtünme katsayısının artan kayma hızı ile pek fazla değişmediğini (Şekil 53), çalışma sıcaklığının artan kayma hızı ile sürekli arttığını (Şekil 54), hacim kaybı değerinin ise artan kayma hızı ile azalıp 2 m/s'lik kayma hızında minimum değerden geçtikten sonra arttığını göstermektedir, Şekil 55. Ayrıca, söz konusu alaşımların ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri, hacim kaybı değerlerinin tersine, artan kayma hızı ile önce artıp 2 m/s'lik kayma hızında bir maksimumdan geçtikten sonra azaldığı görülmektedir, Şekil 56.

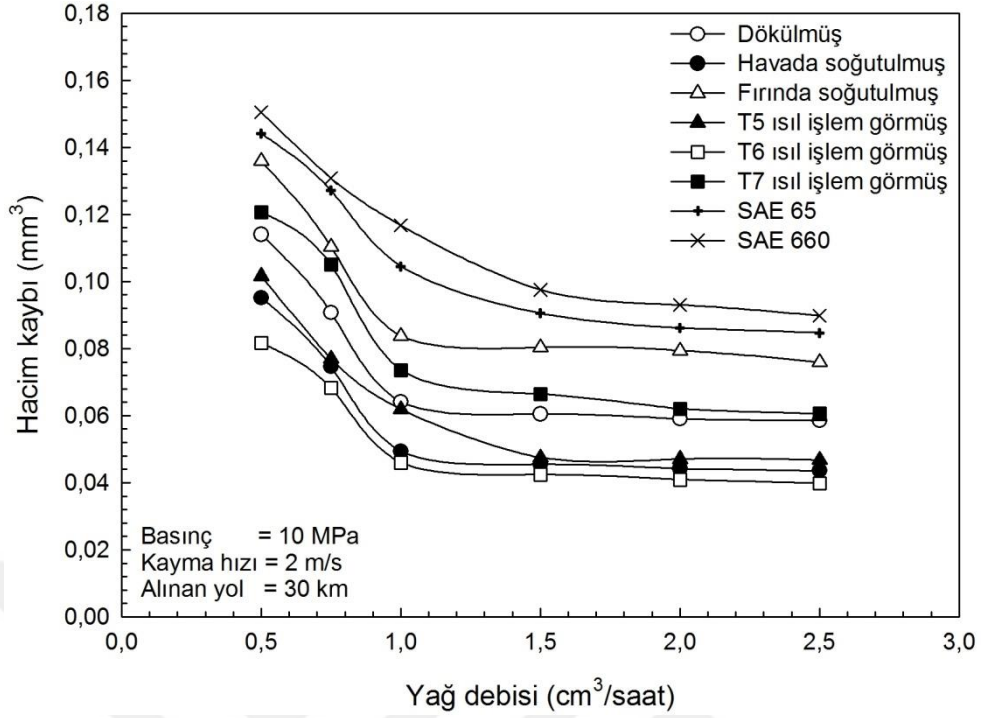


Şekil 45. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtma işlemi görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.

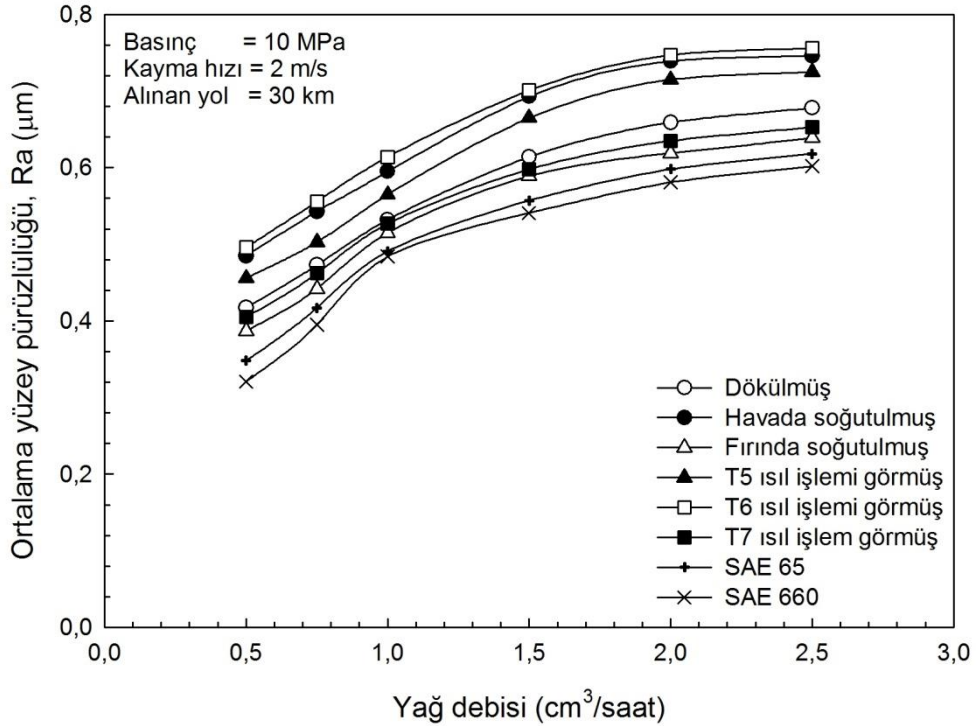


Şekil 46. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtma işlemi görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sıcaklık değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.

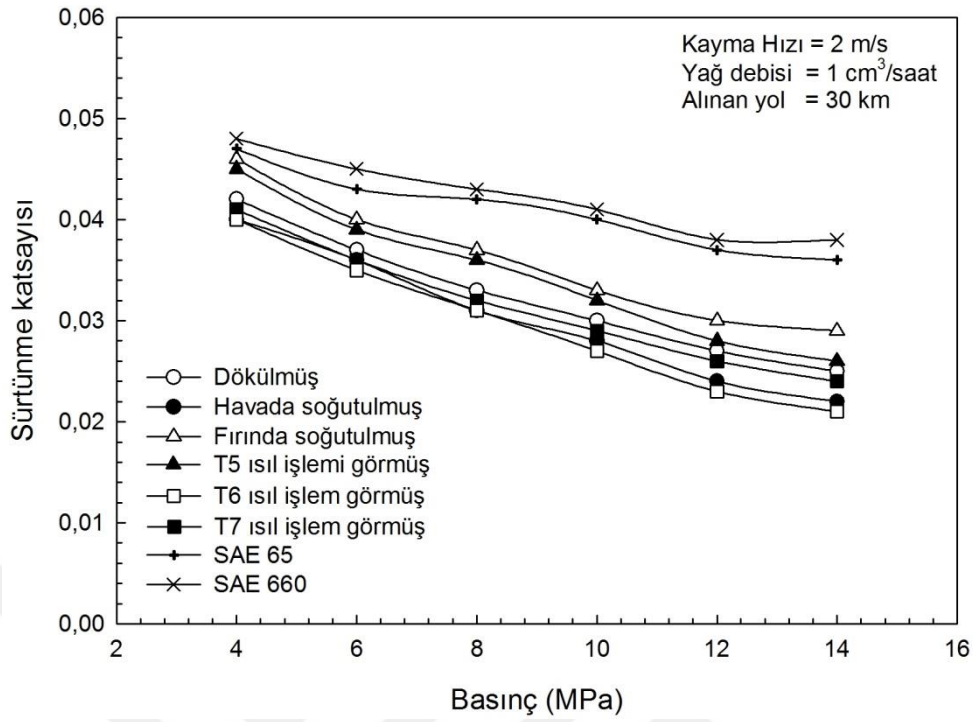




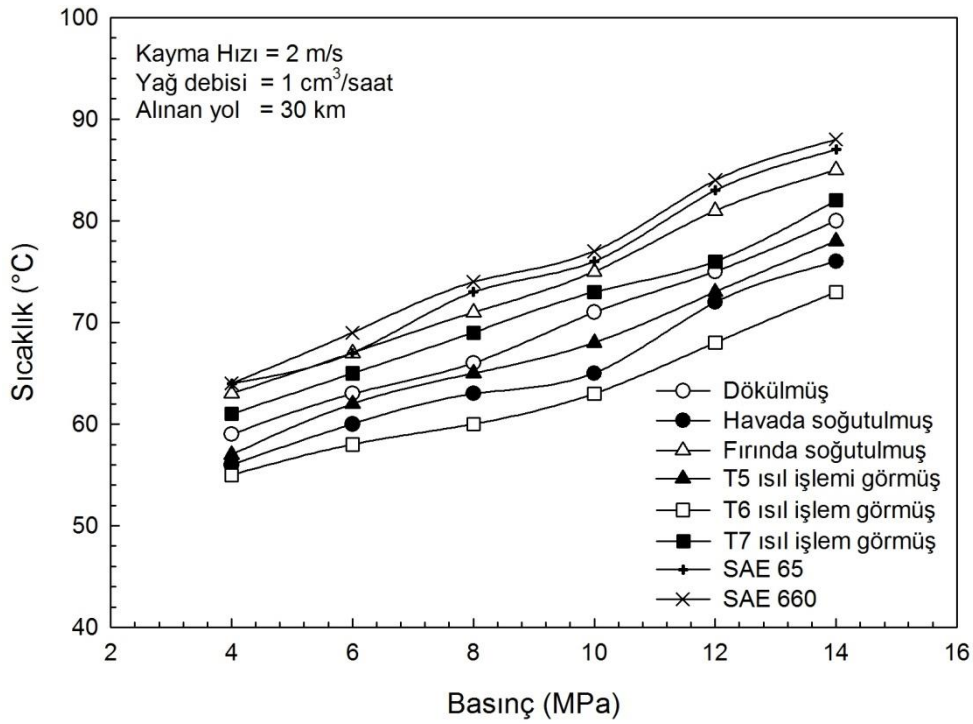
Şekil 47. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıt işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının hacim değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.



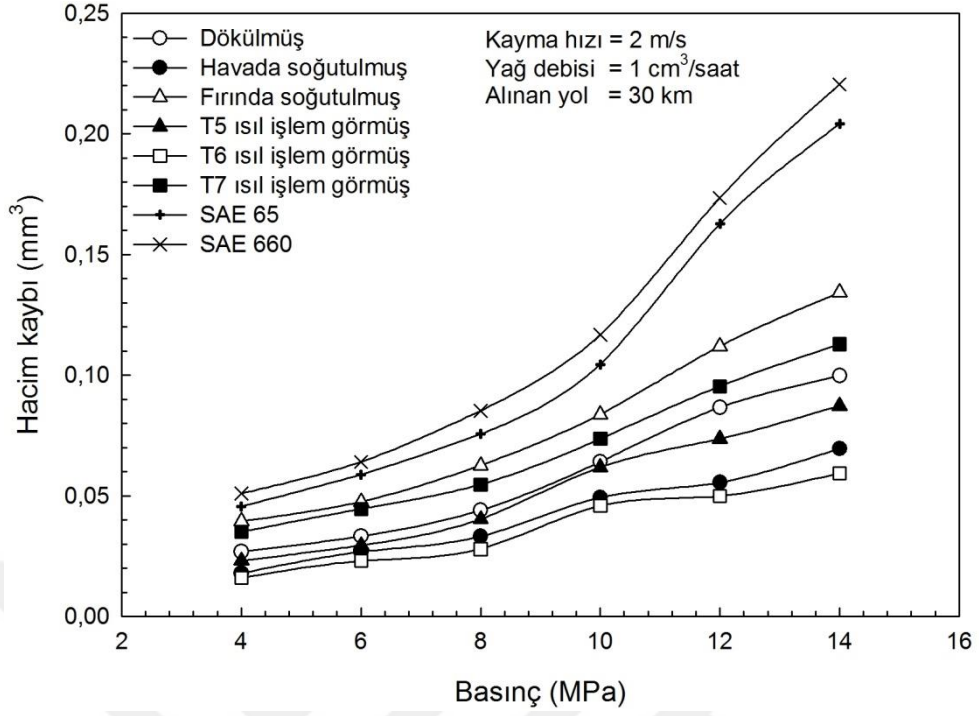
Şekil 48. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıt işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yağ debisine göre değişimini gösteren eğriler.



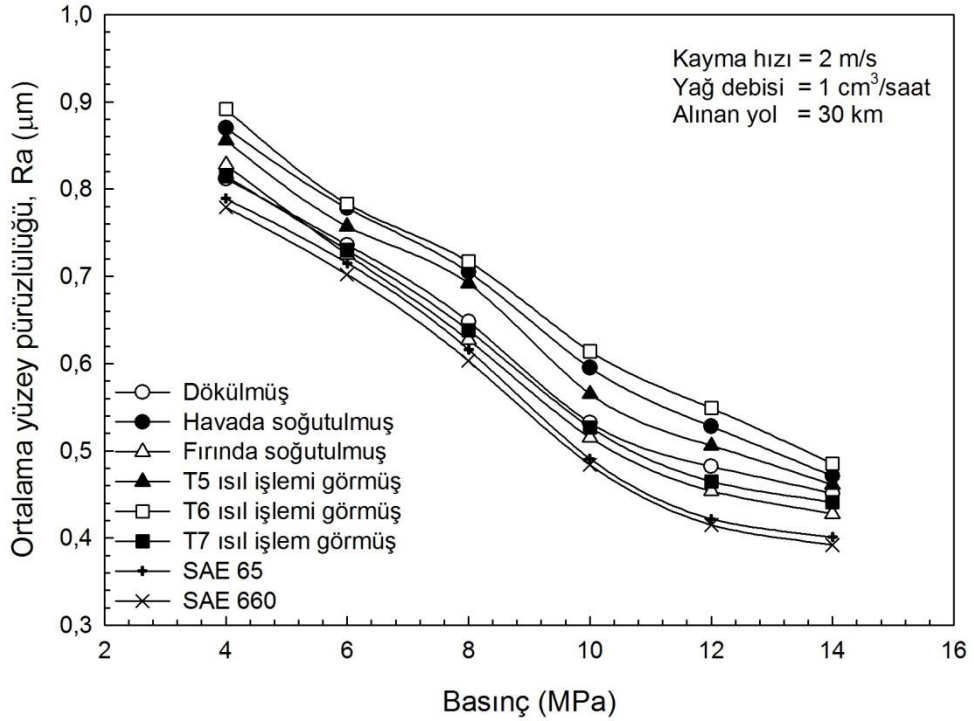
Şekil 49. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılma işlemi görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



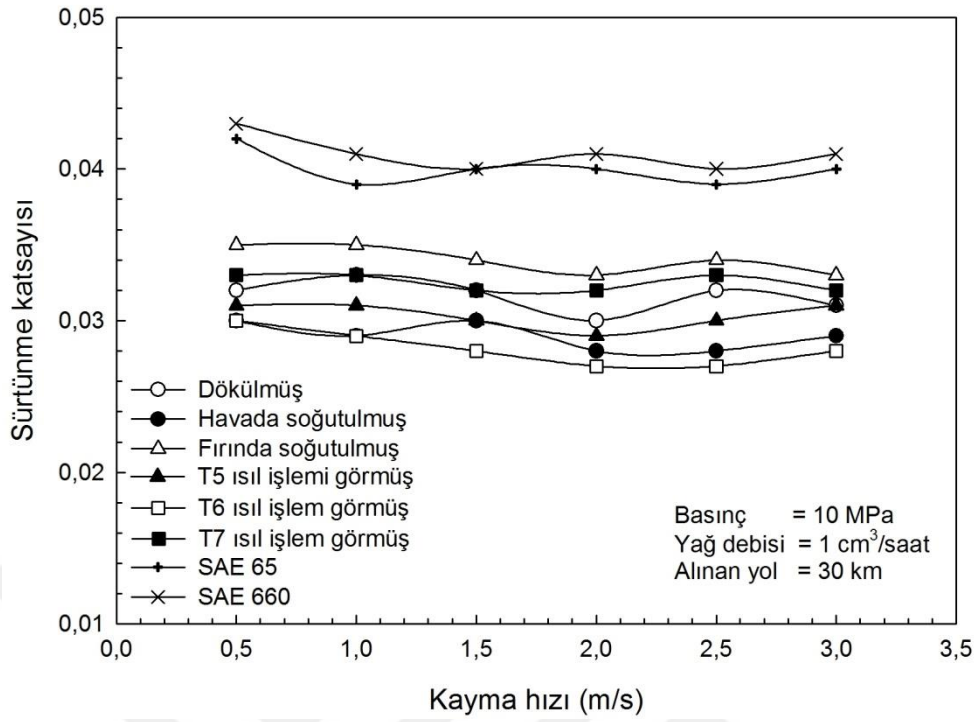
Şekil 50. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılma işlemi görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sıcaklıklarının basınca göre değişimini gösteren eğriler.



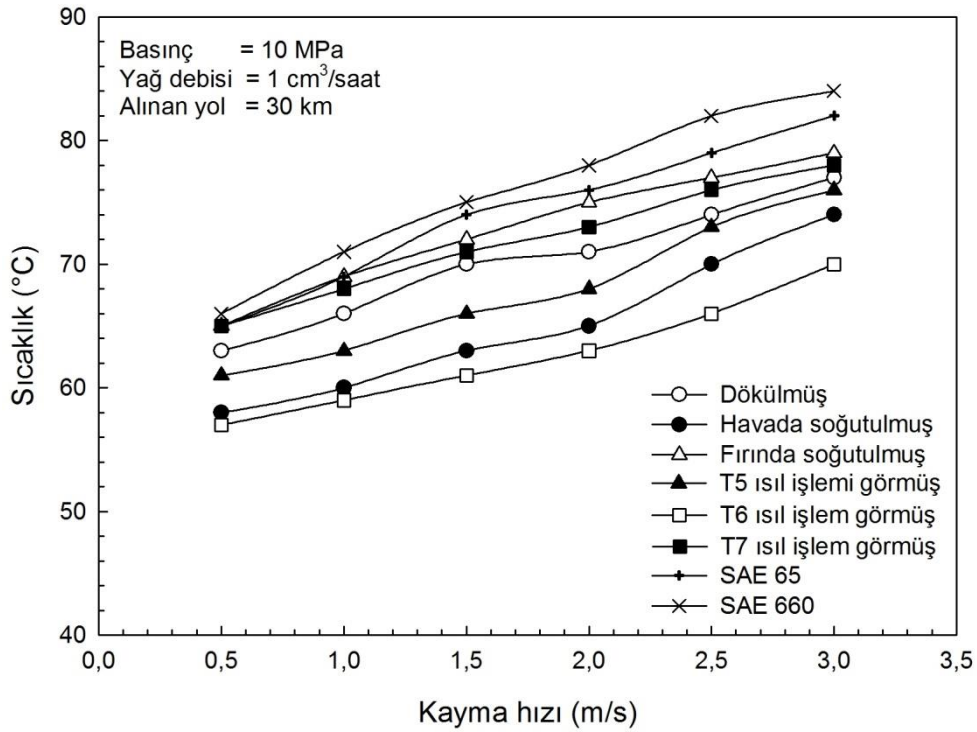
Şekil 51. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıt işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimini gösteren eğriler.



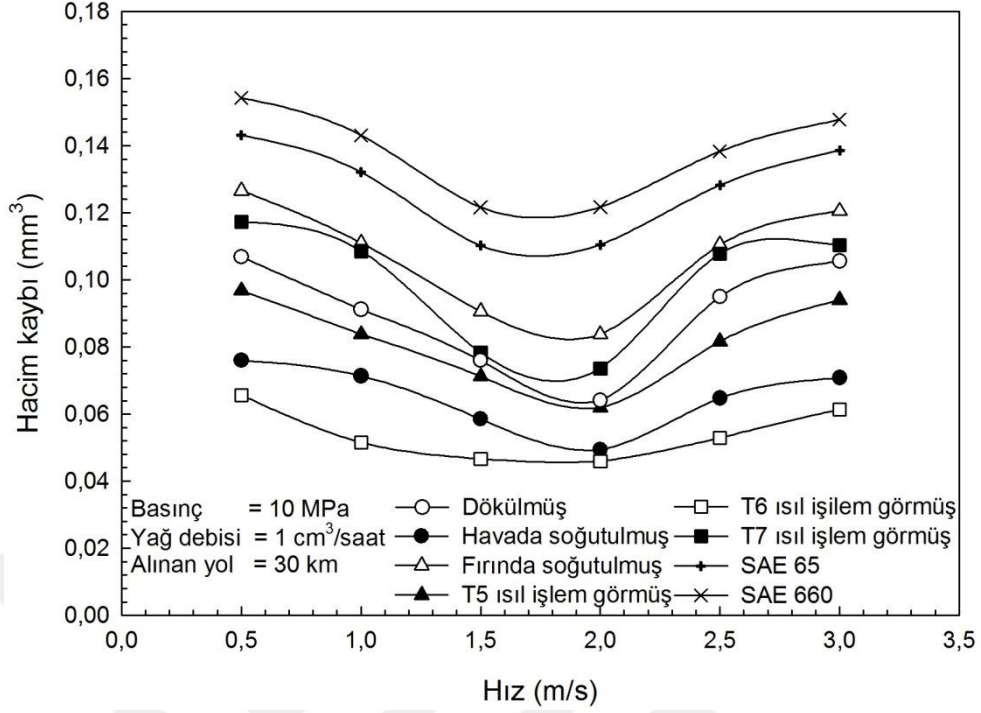
Şekil 52. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıt işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin basınca göre değişimini gösteren eğriler.



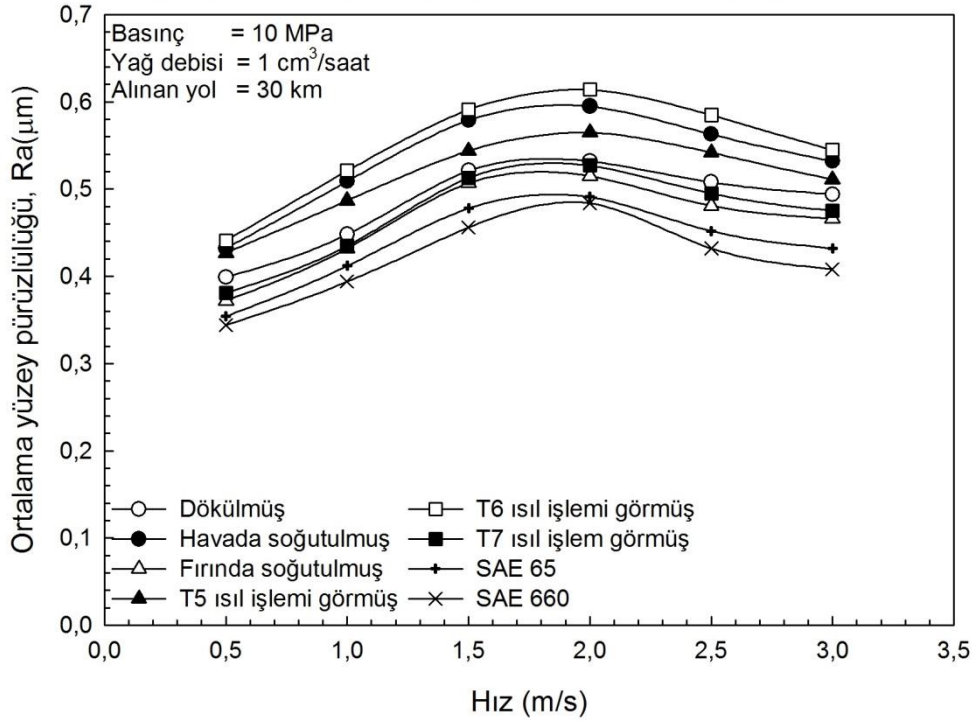
Şekil 53. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış durumlarındaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının sürtünme katsayılarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 54. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış durumlarındaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının çalışma sıcaklıklarının kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.



Şekil 55. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıt işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.

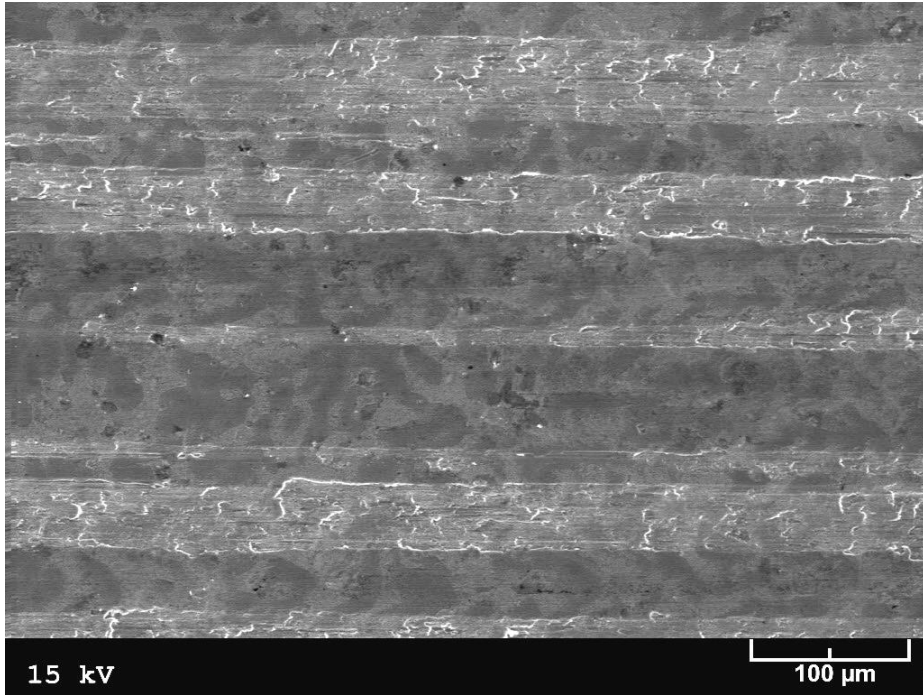


Şekil 56. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıt işlem görmüş durumlardaki ve SAE 65 ile SAE 660 bronzlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler.

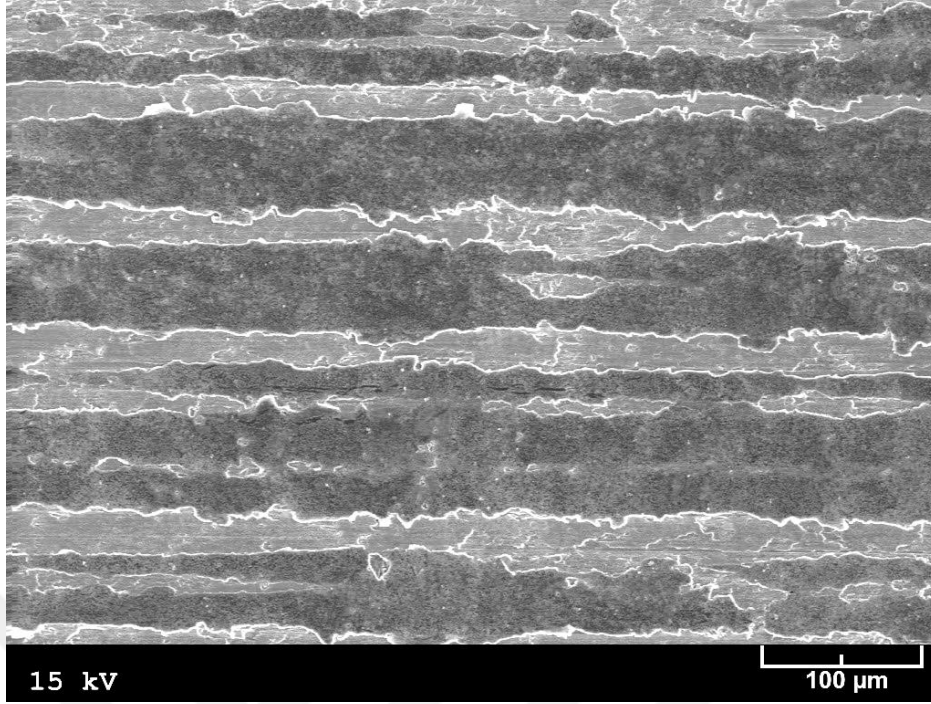


### 3.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

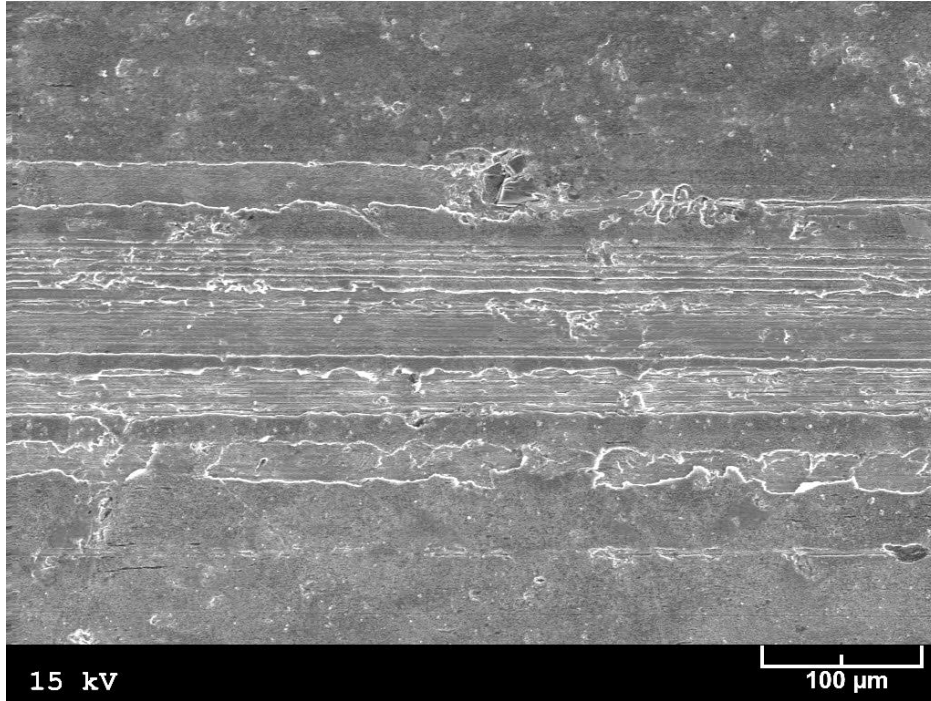
Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit kayma hızında (2 m/s) 102 km uzunluğundaki yol tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki numuneleri ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM resimleri, sırasıyla Şekil 57-70'de verilmiştir. Bu resimler Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının aşınma yüzeylerinde sıvanma tabakaları ve çiziklerin bulunduğunu göstermektedir. Ancak bu tabaka ve çiziklerin kalınlıkları artan nikel oranı ile daha belirgin hale gelmektedir. Zn-40Al-2Cu-Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki numunelerinin aşınma yüzeylerinde de sıvanma tabakaları ve çiziklerin yer aldığı görülmektedir. Ancak, bu çizikler söz konusu alaşımın havada soğutulmuş ve T6 ısıl işlemi görmüş numunelerinin aşınma yüzeylerinde daha belirgin bir görünüm sergilemektedir. SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının aşınma yüzeylerinde de sıvanma belirtileri ile çiziklerin yer aldığı görüldü. Ancak Zn-40Al esaslı alaşımların aşınma yüzeylerine kıyasla bu bronzların aşınma yüzeylerinde daha fazla çizik ve daha düşük oranda sıvanma belirtilerine rastlandı.



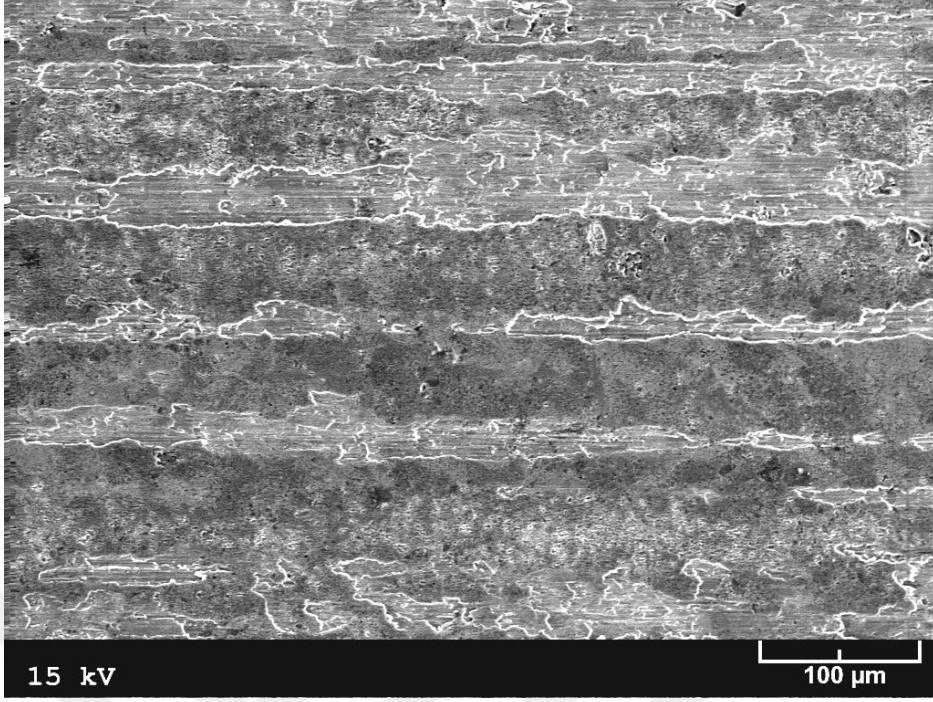
Şekil 57. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



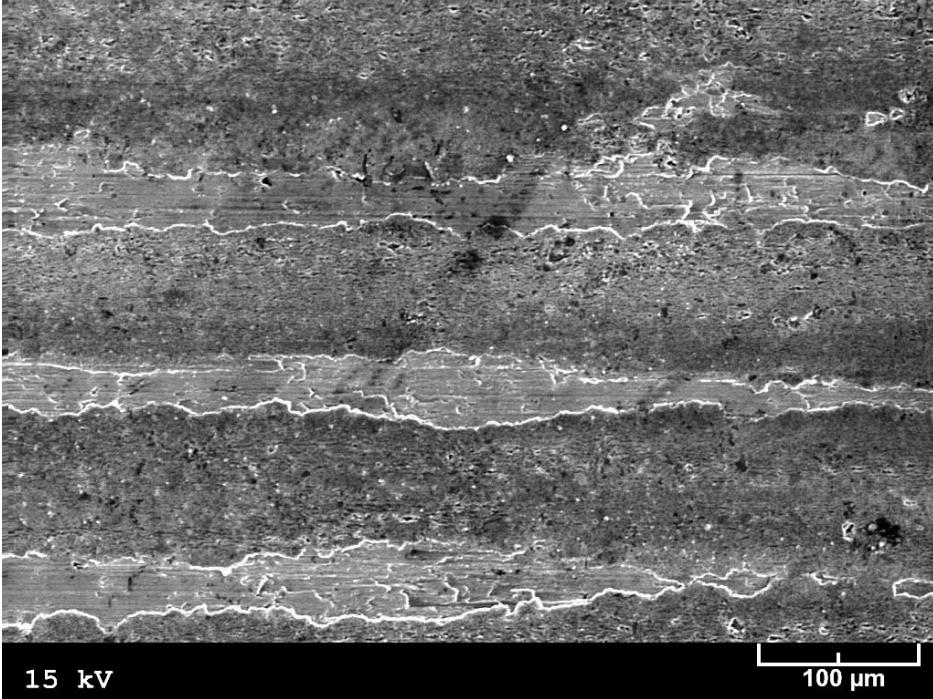
Şekil 58. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-1Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 59. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

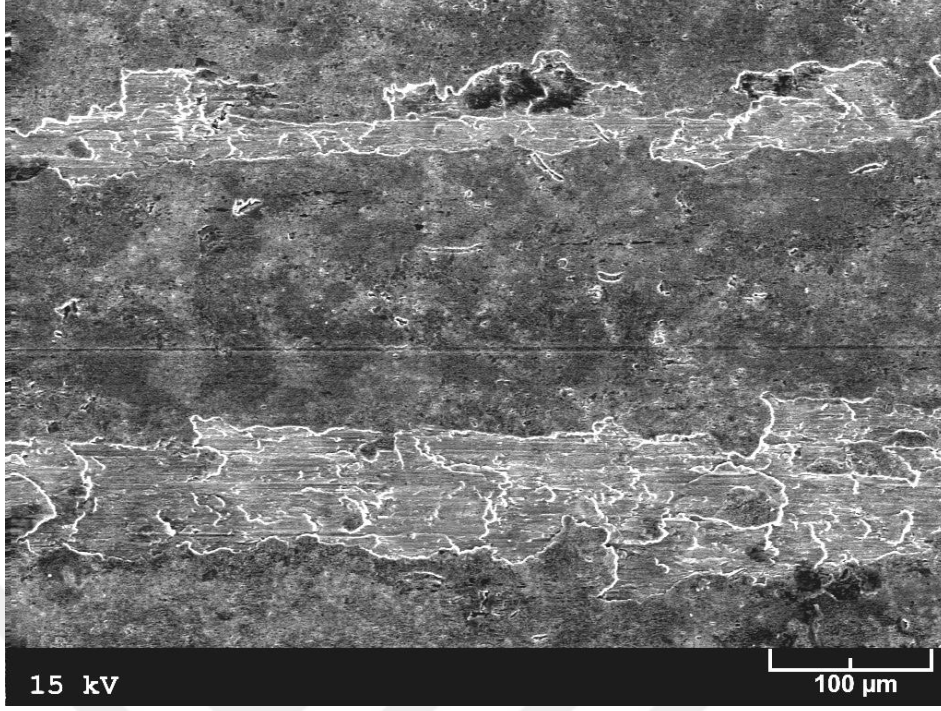


Şekil 60. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

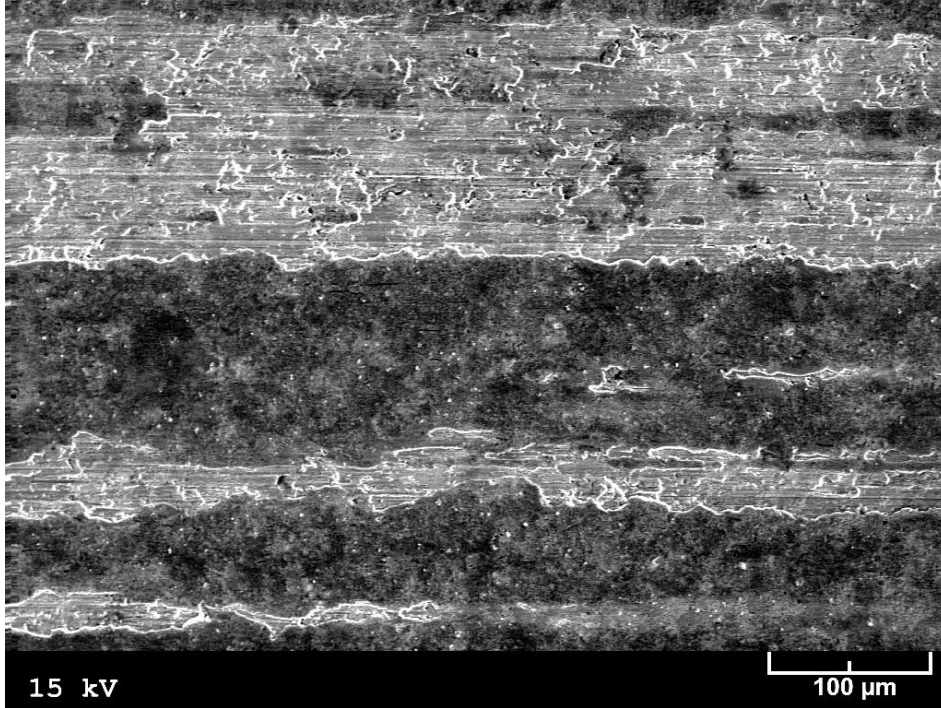


Şekil 61. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

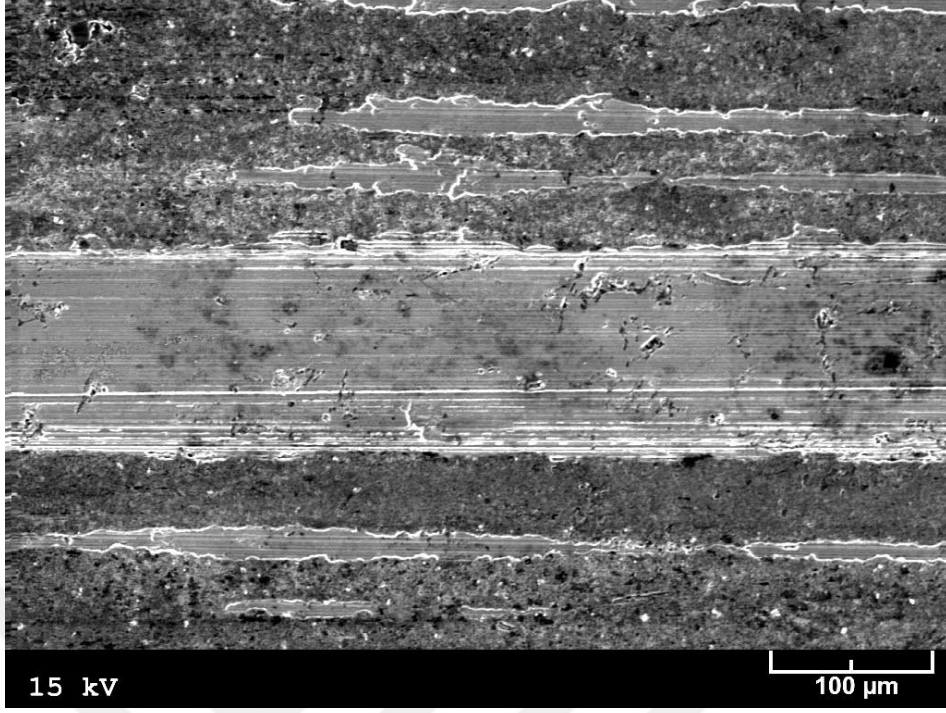




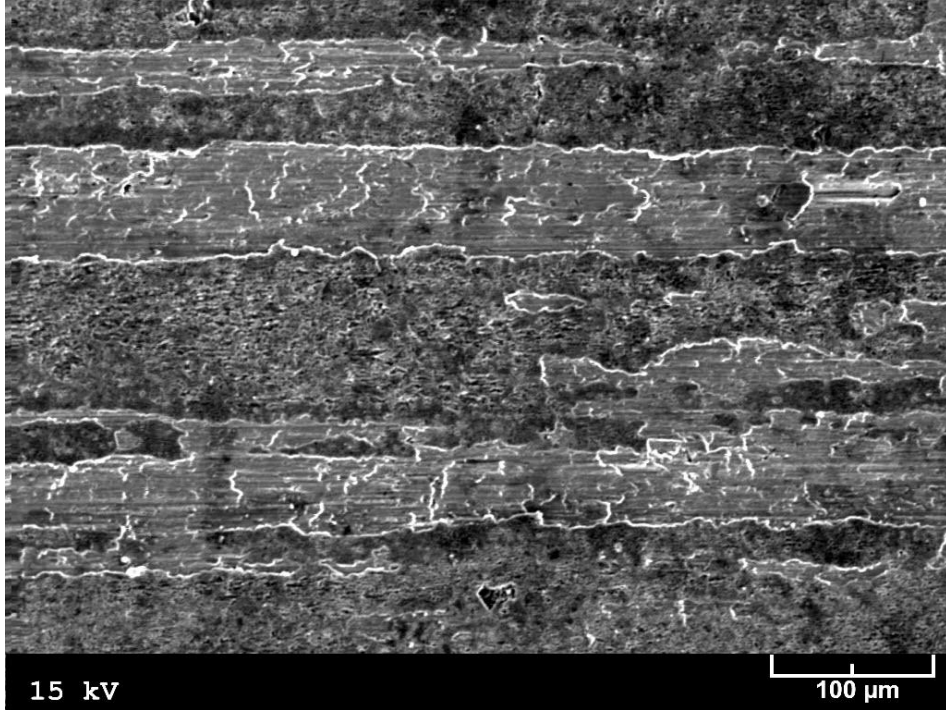
Şekil 62. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



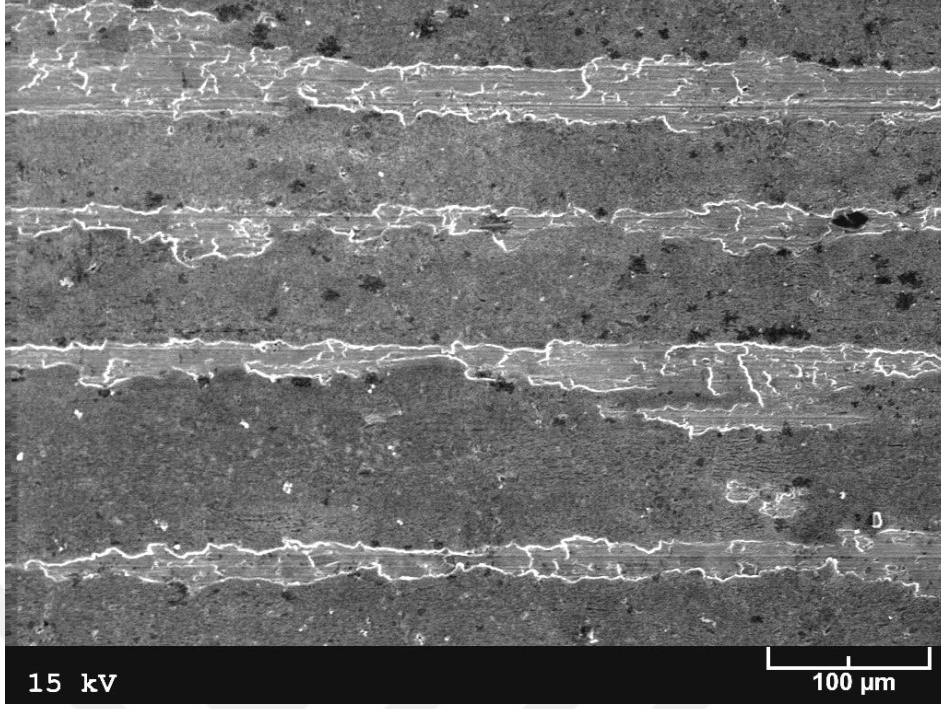
Şekil 63. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısı işleme görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



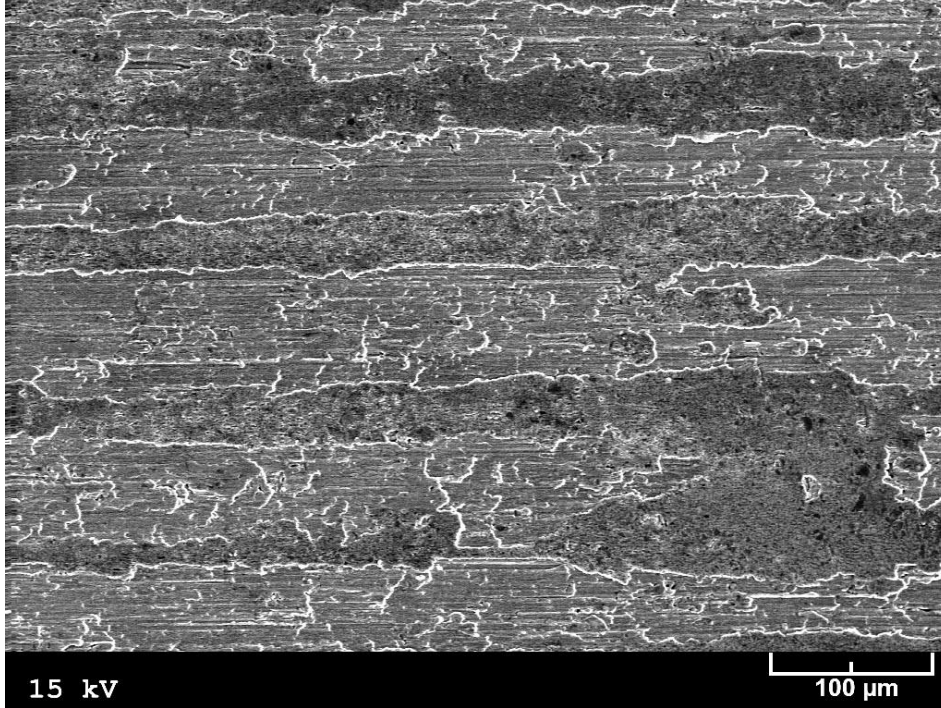
Şekil 64. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



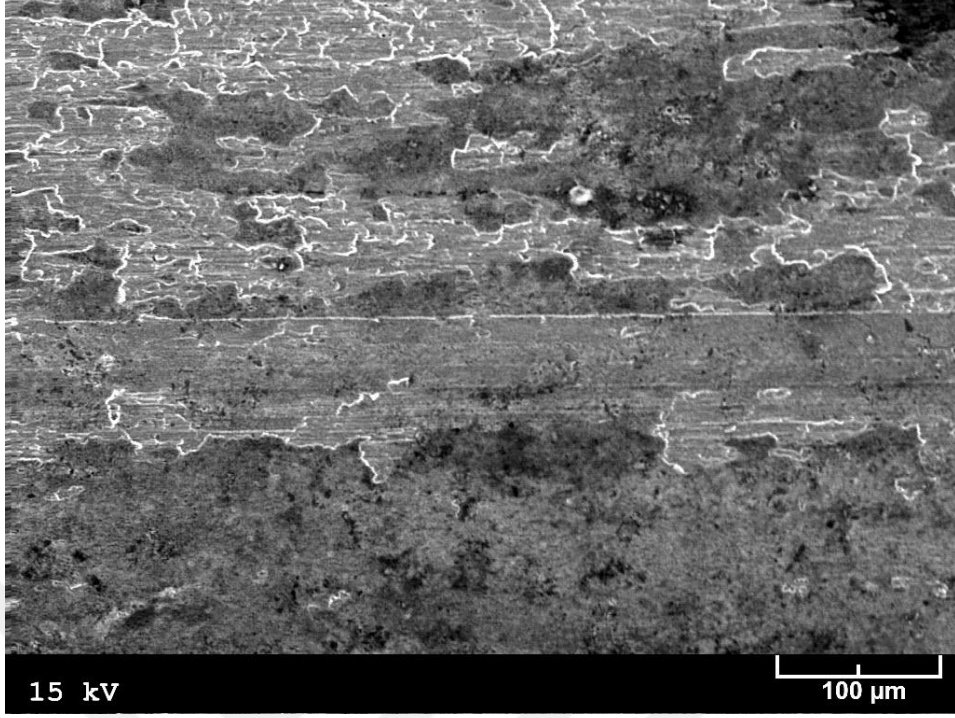
Şekil 65. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



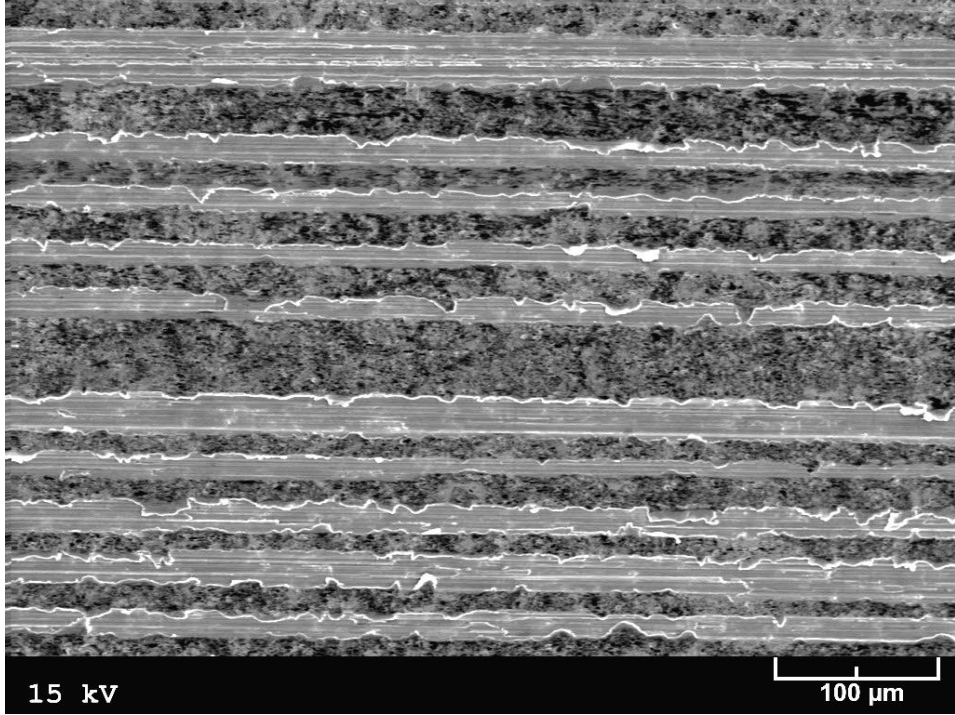
Şekil 66. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 67. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

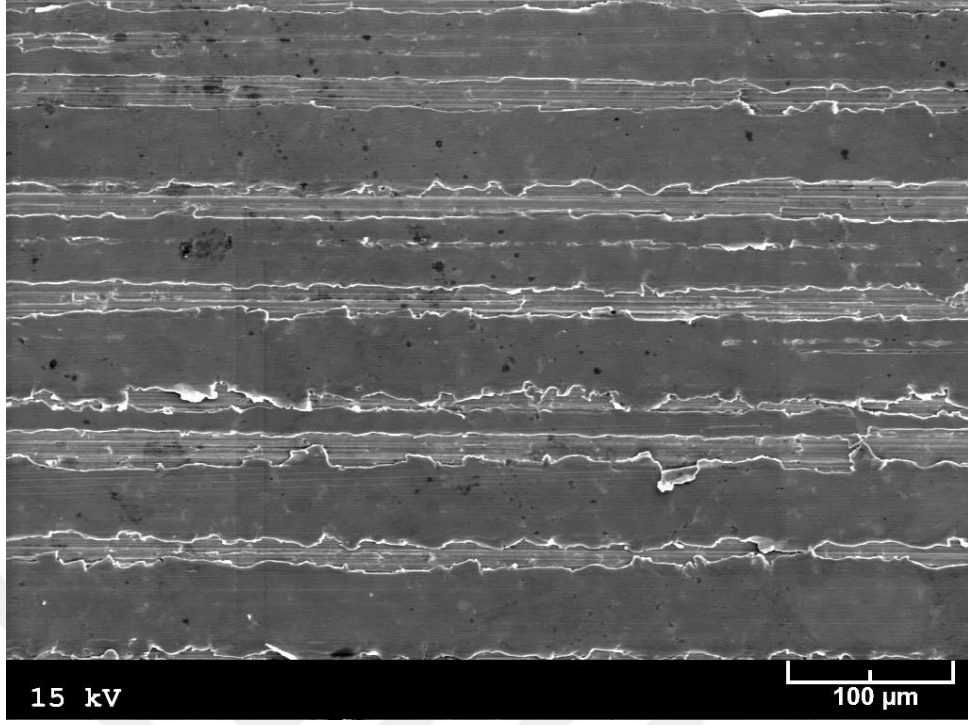


Şekil 68. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



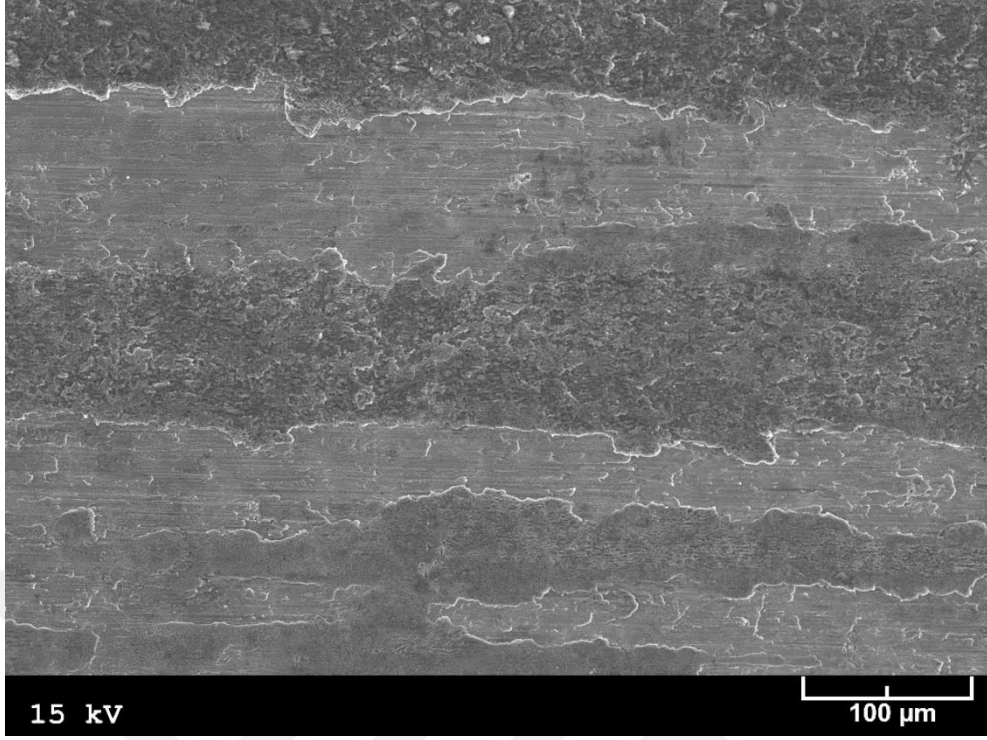
Şekil 69. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



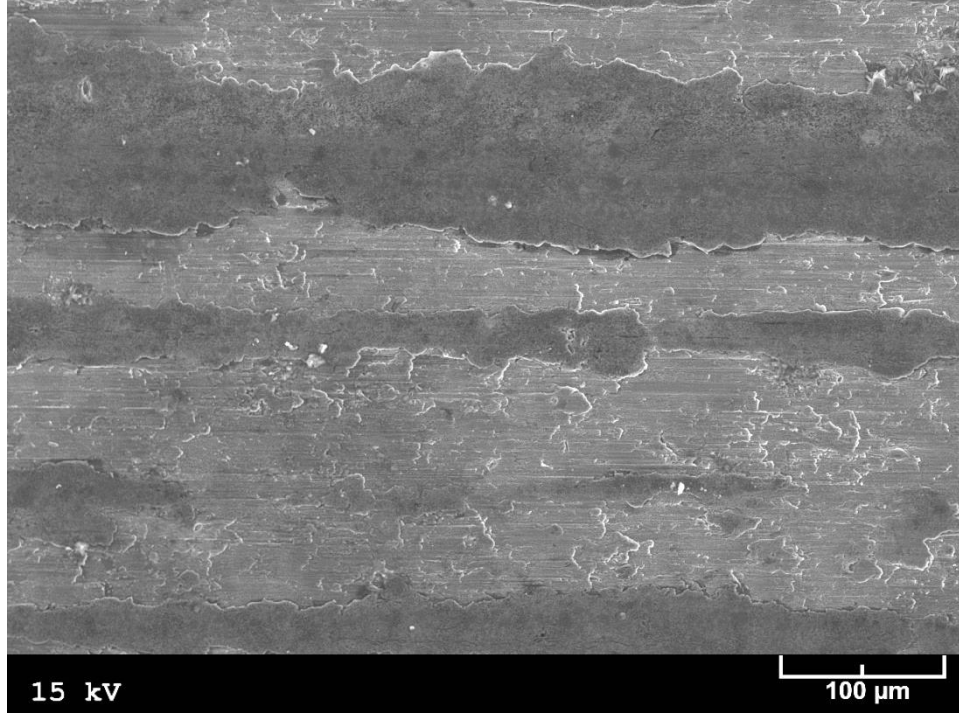


Şekil 70. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s) koşullarında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

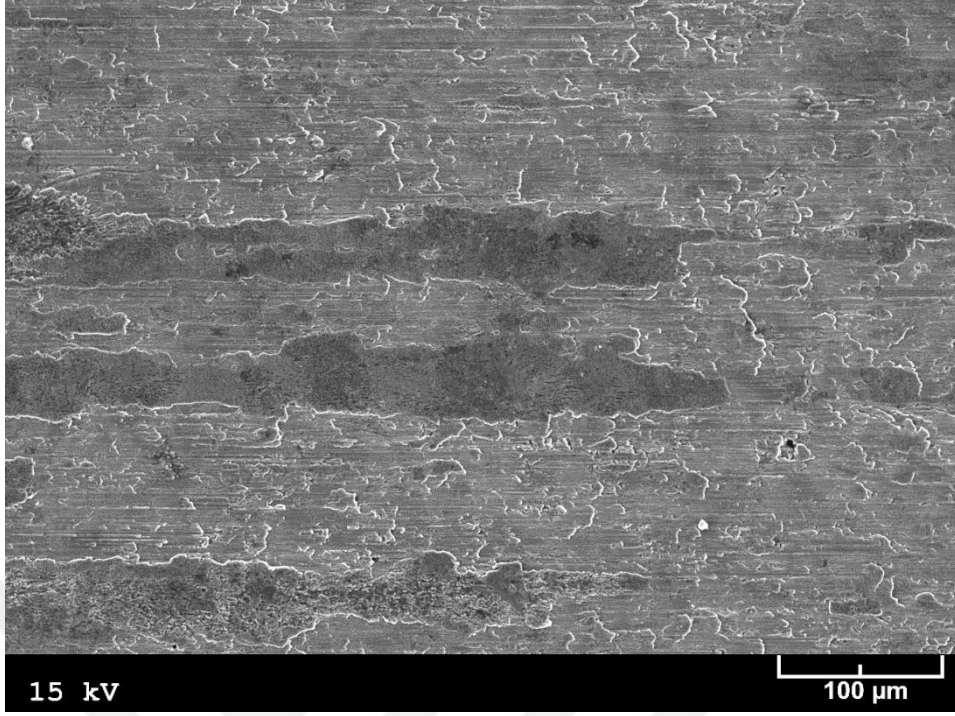
Farklı basınç, kayma hızı ve yağ debisi koşullarında deneye tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-Si alaşımı ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerin aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 71-126'da verilmiştir. Bu resimler, numunelerin aşınma yüzeylerinde oluşan sıvama tabakası alanının artan basınç ile sürekli arttığını, artan yağ debisi ve kayma hızı ile azaldığını, 2 m/s'lik kayma hızının üzerine çıkılması durumunda ise artışa geçtiğini göstermektedir.



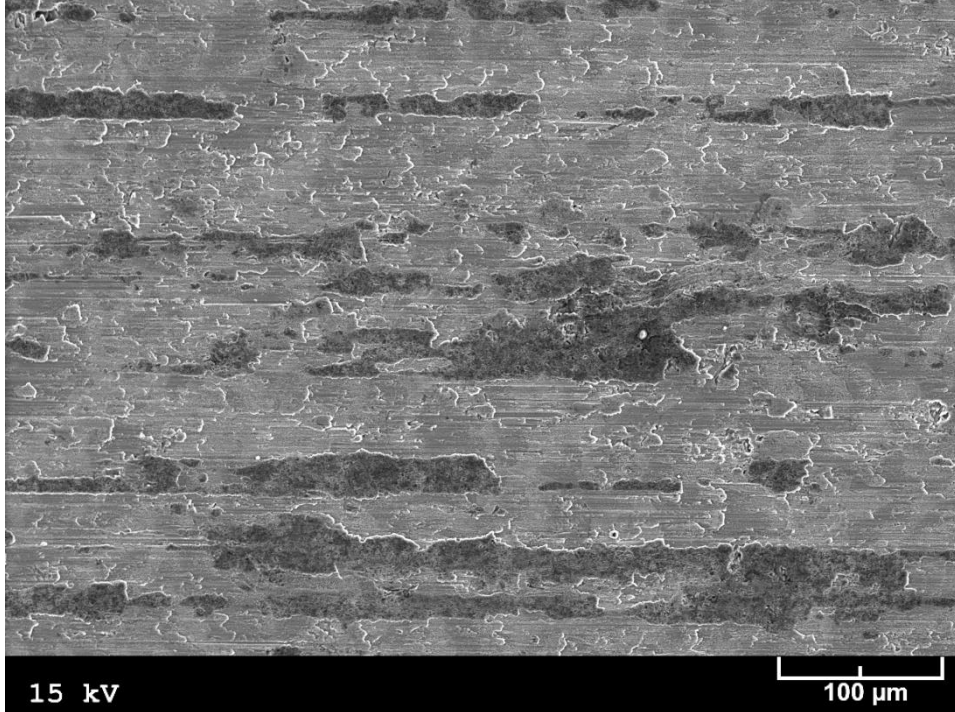
Şekil 71.  $0,5 \text{ cm}^3/\text{saat}$ 'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



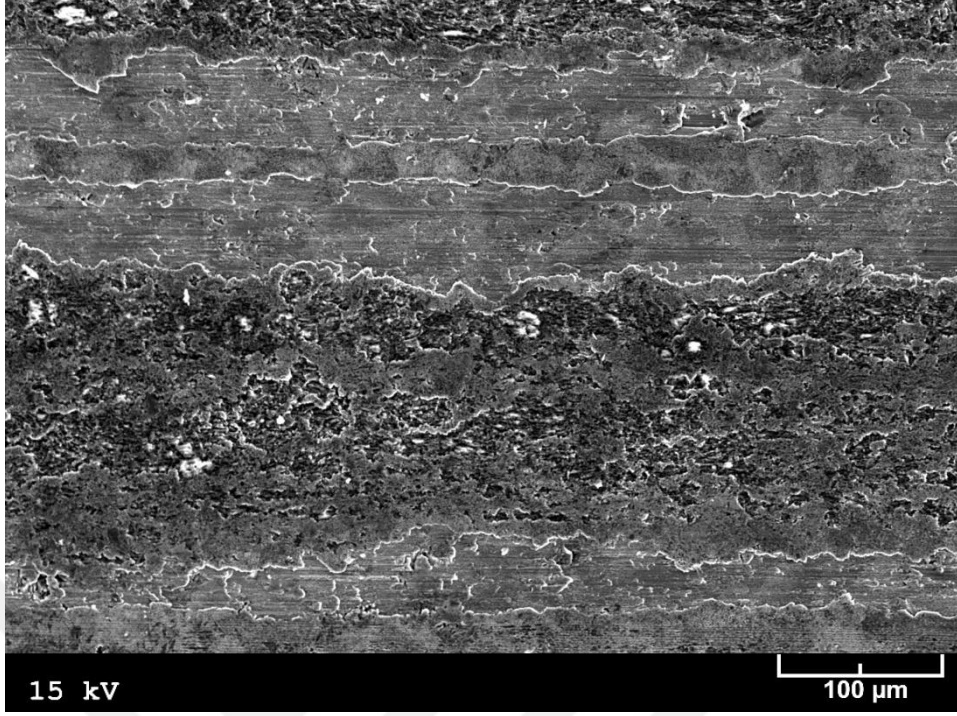
Şekil 72.  $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ 'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



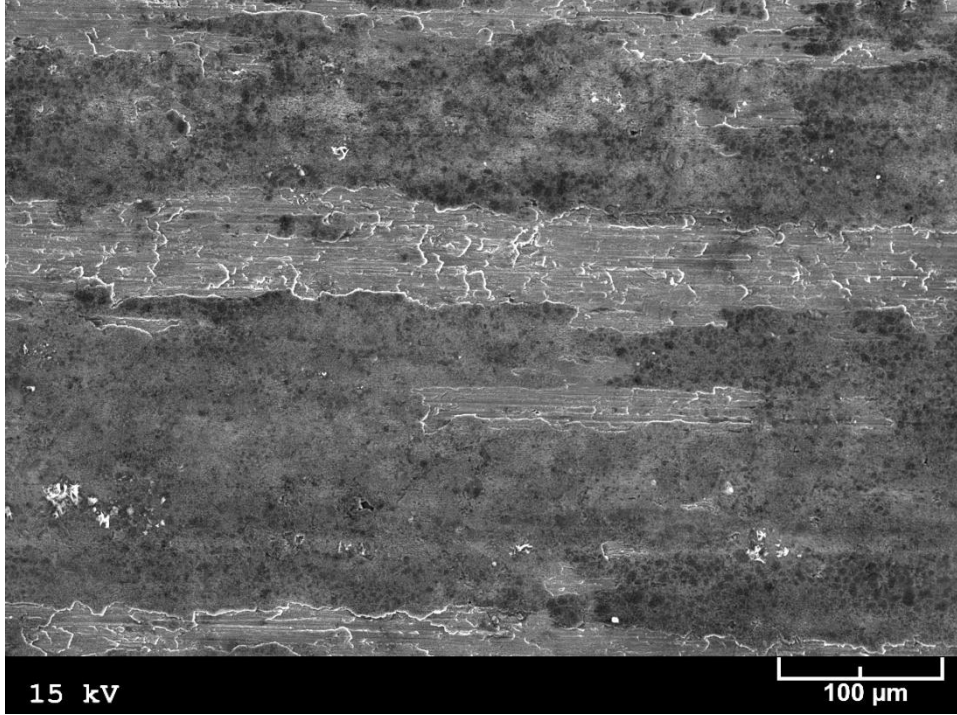
Şekil 73. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 74. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

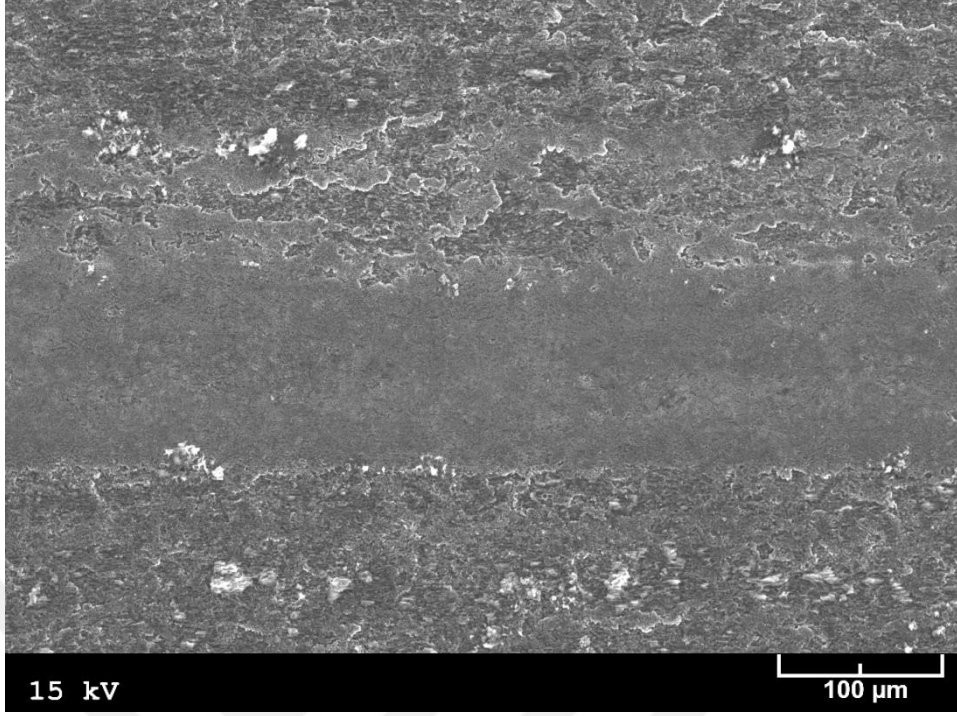


Şekil 75. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

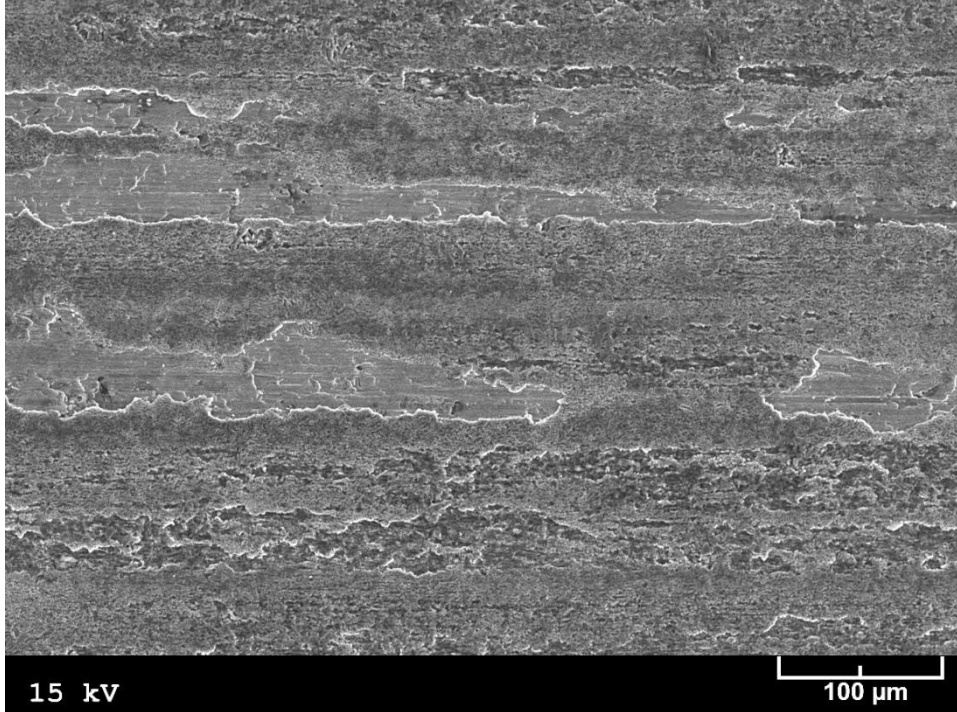


Şekil 76. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

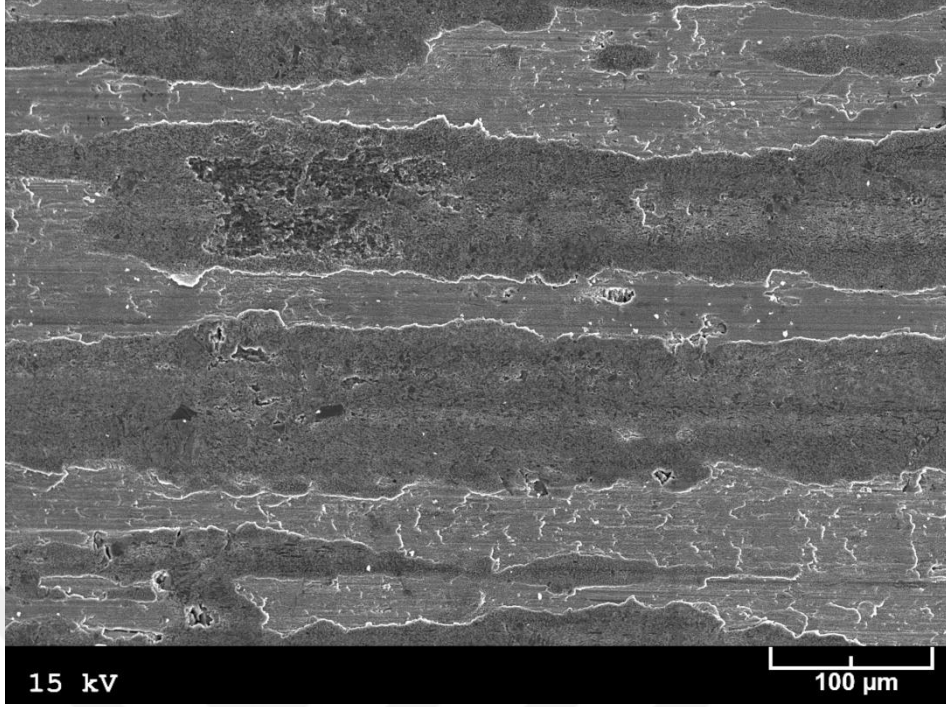




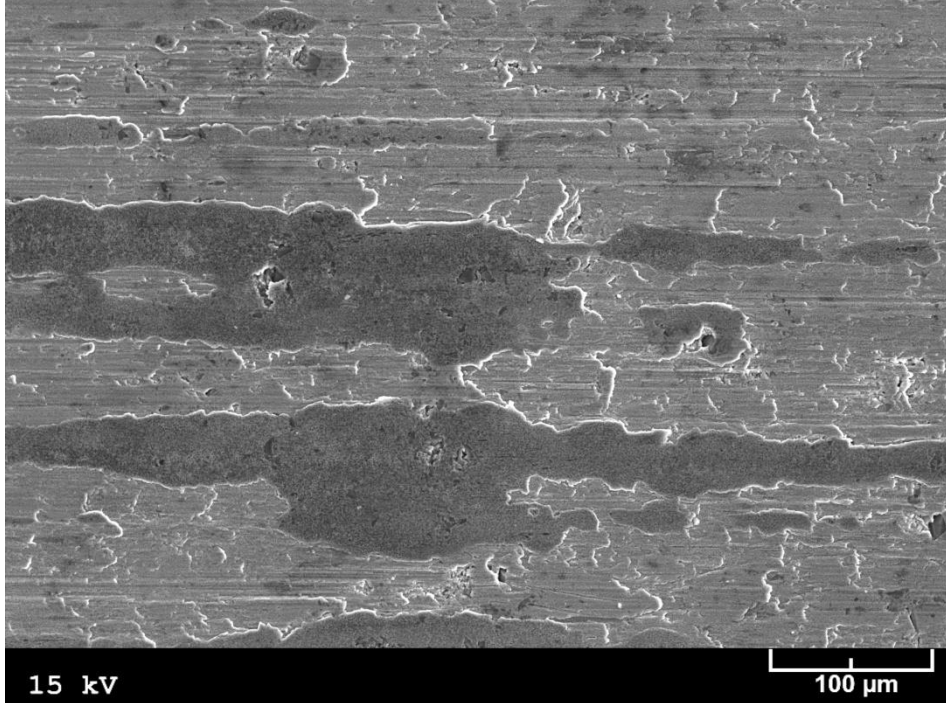
Şekil 77. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



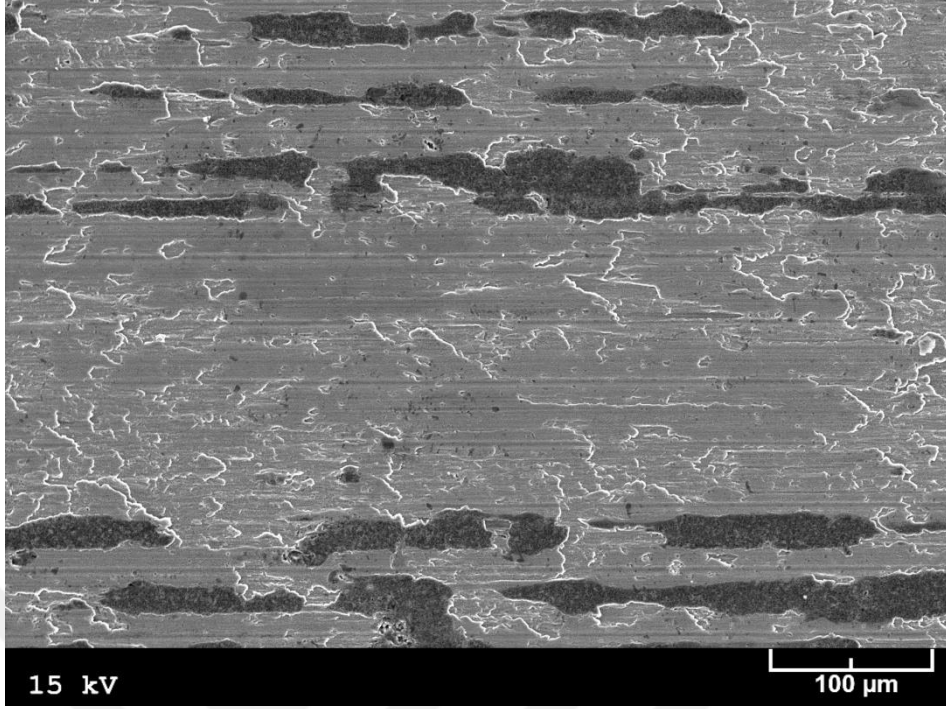
Şekil 78. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



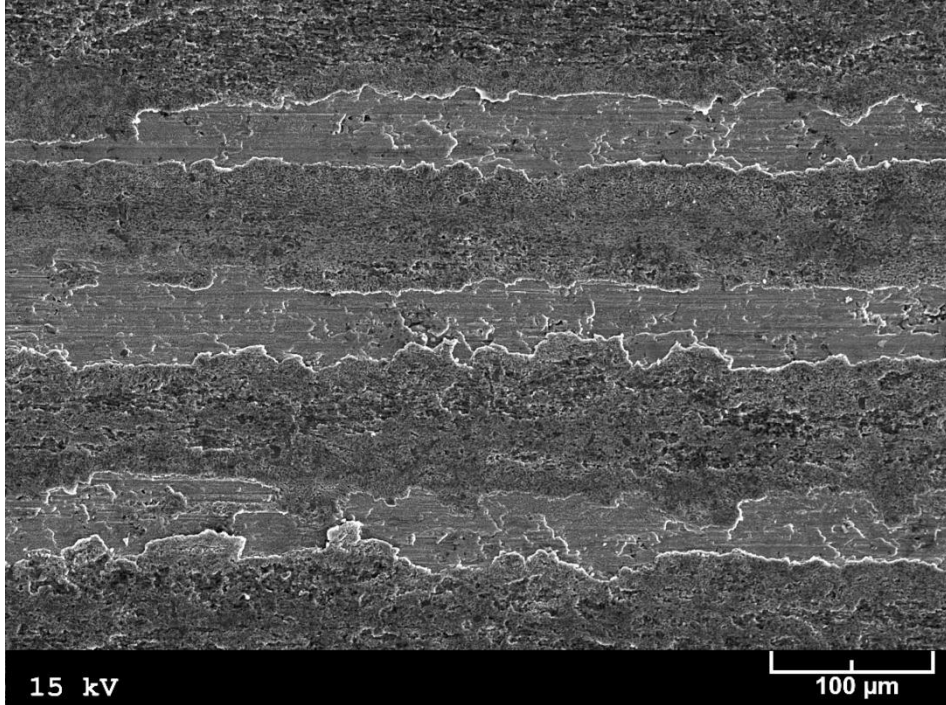
Şekil 79. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



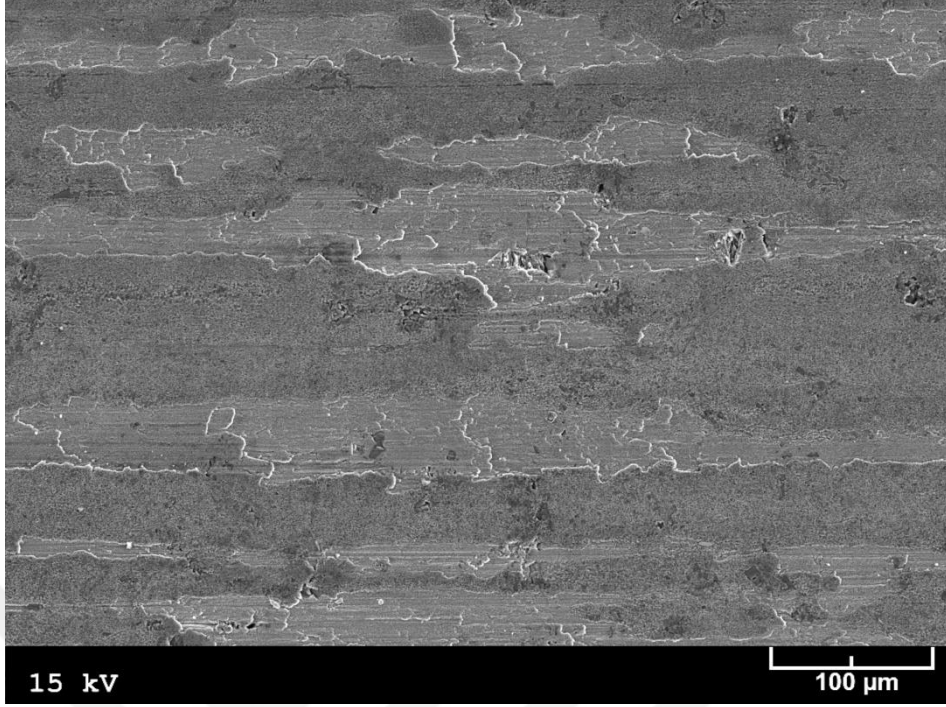
Şekil 80. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



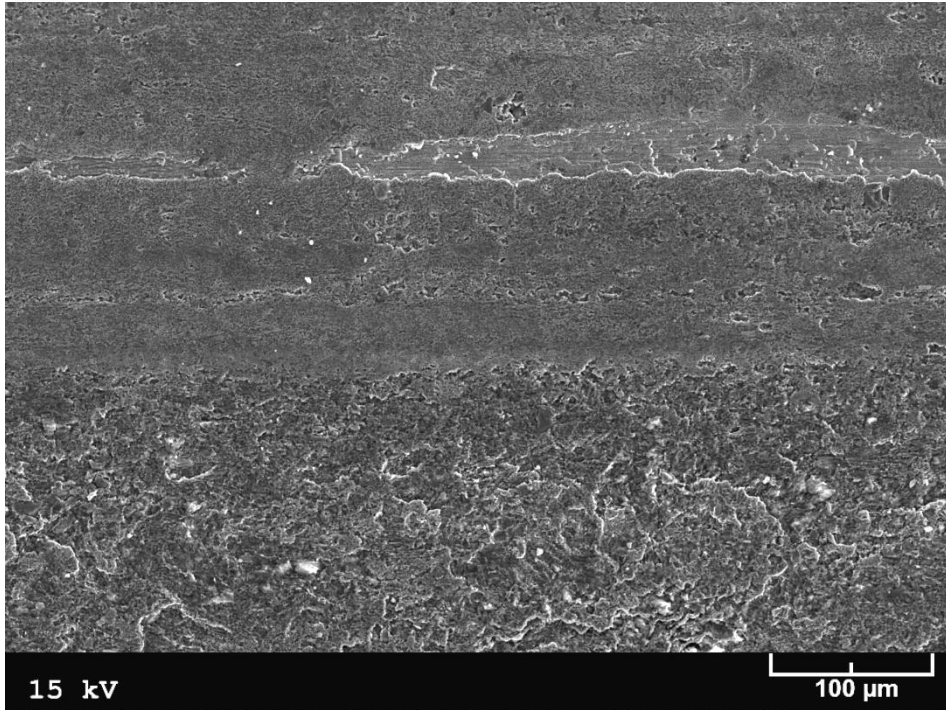
Şekil 81. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 82. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

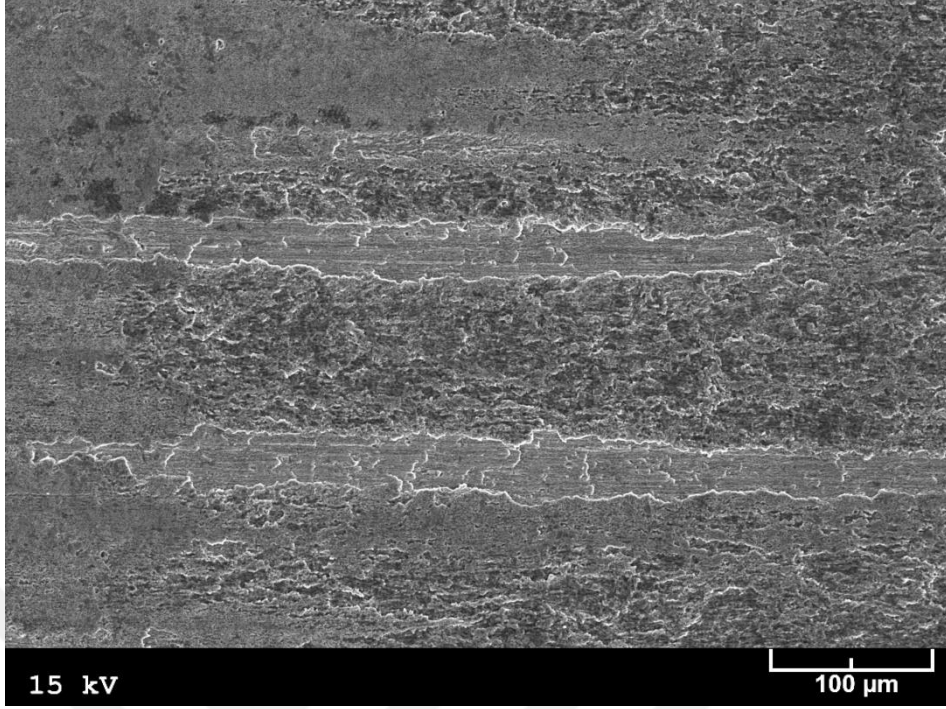


Şekil 83. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

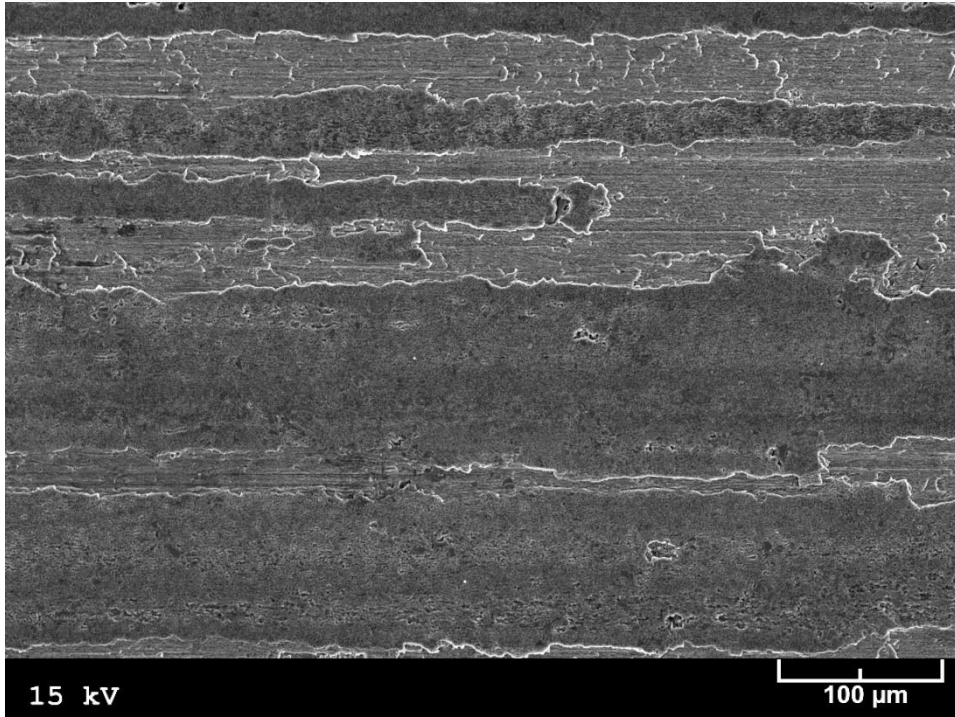


Şekil 84. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

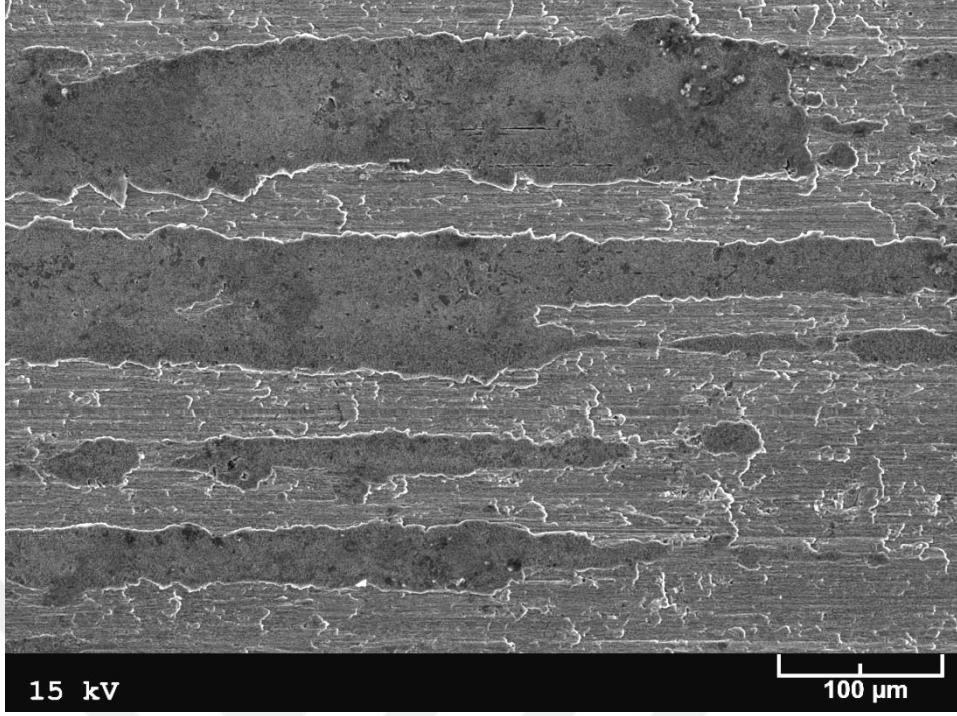




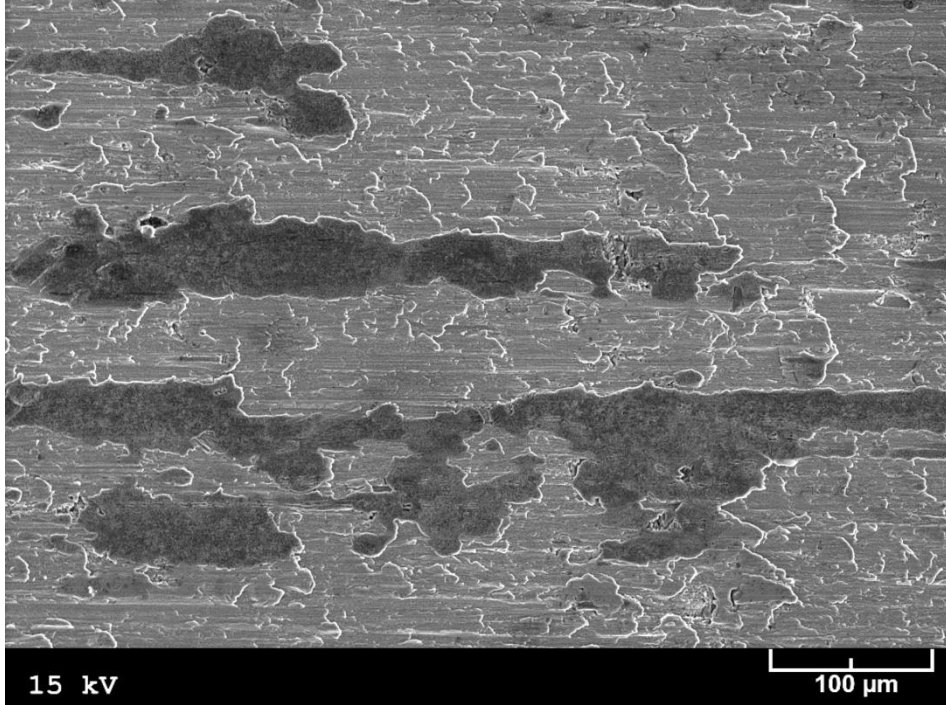
Şekil 85. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



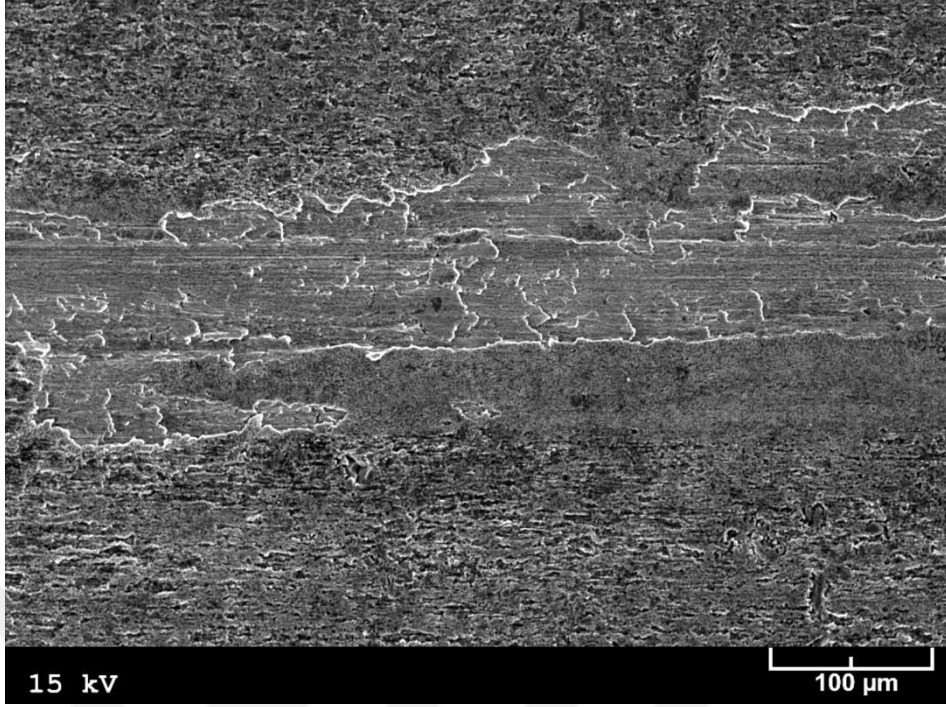
Şekil 86. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



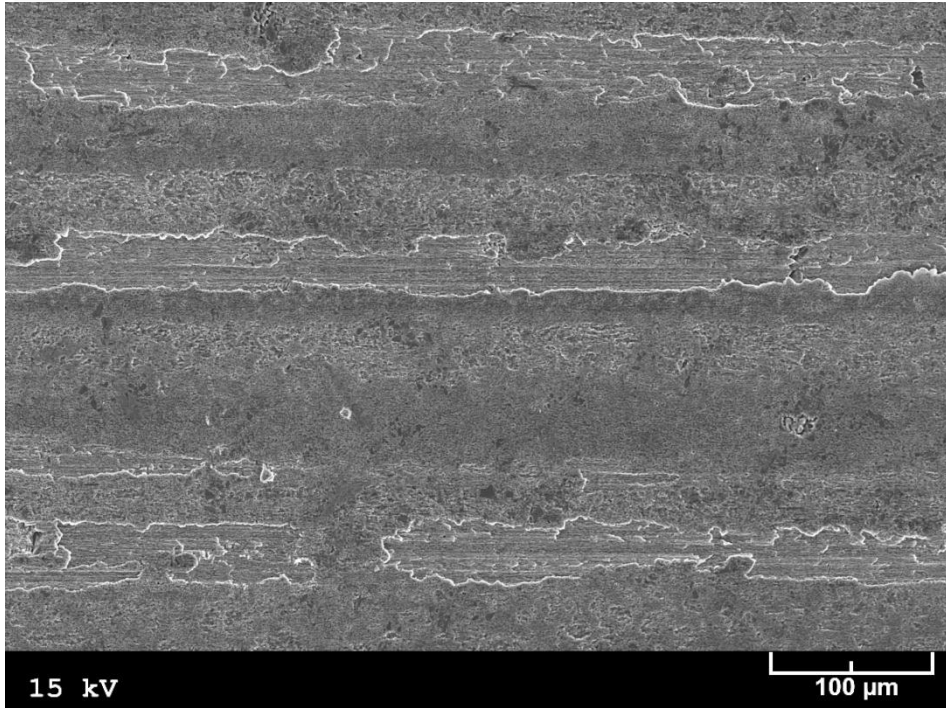
Şekil 87. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



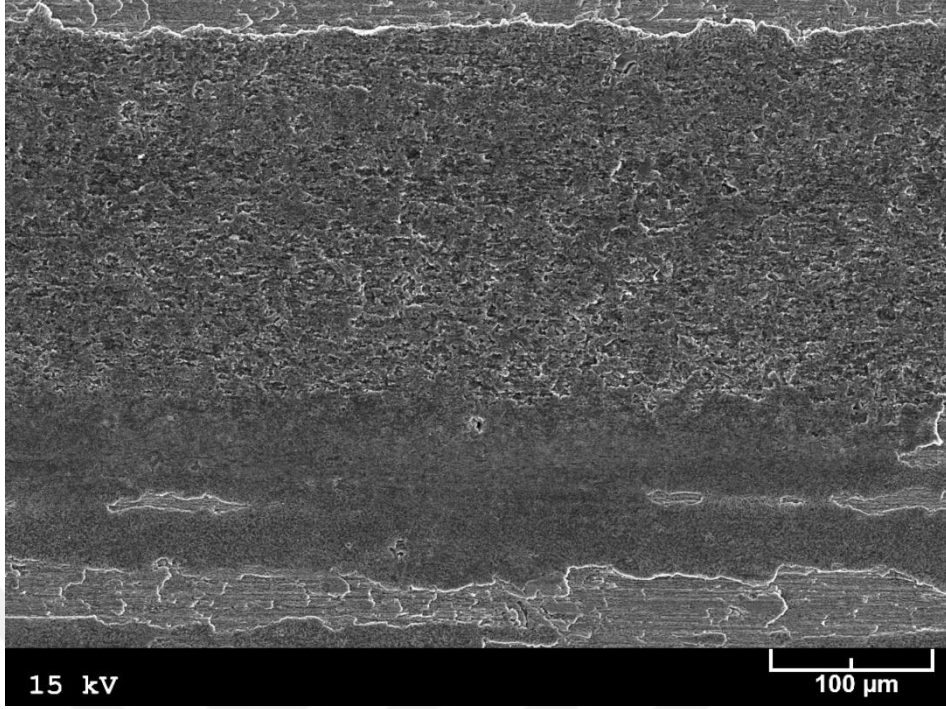
Şekil 88. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



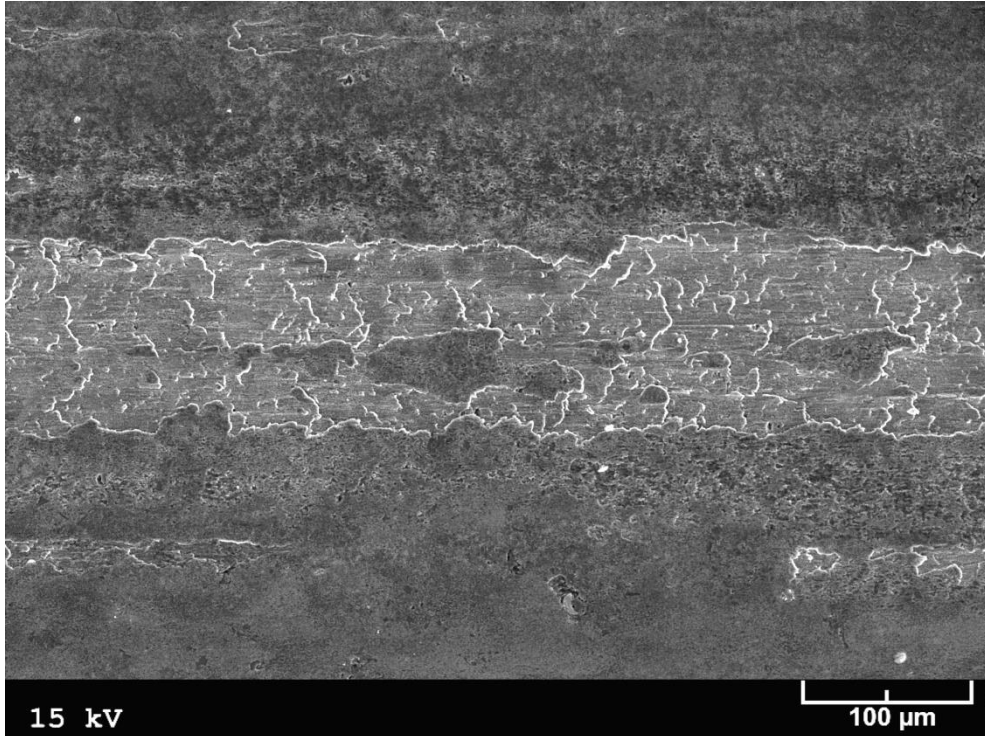
Şekil 89. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 90. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

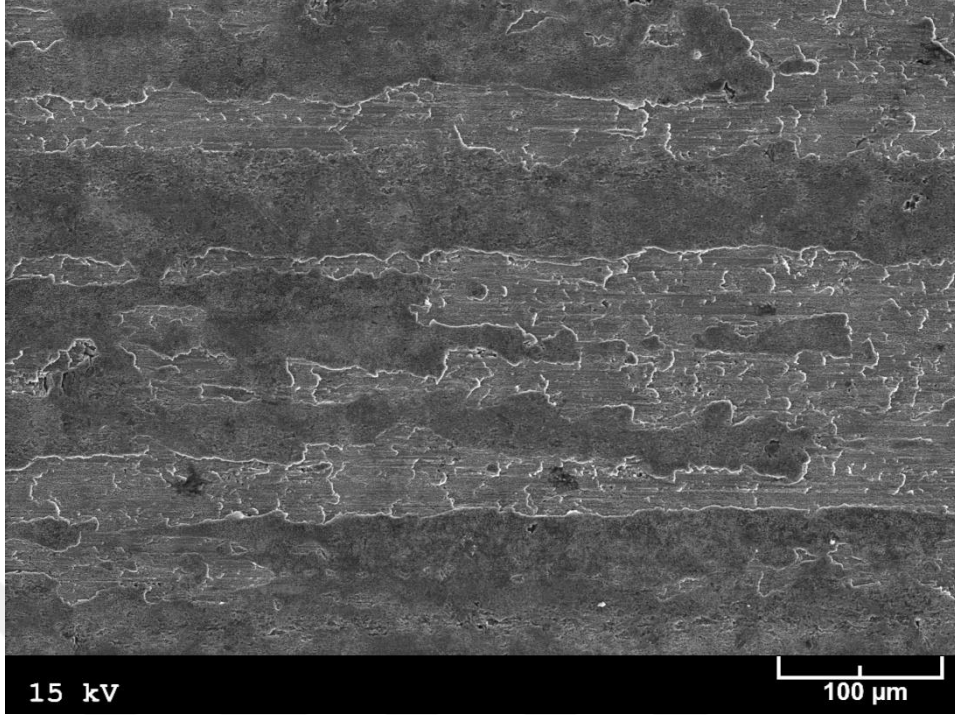


Şekil 91. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

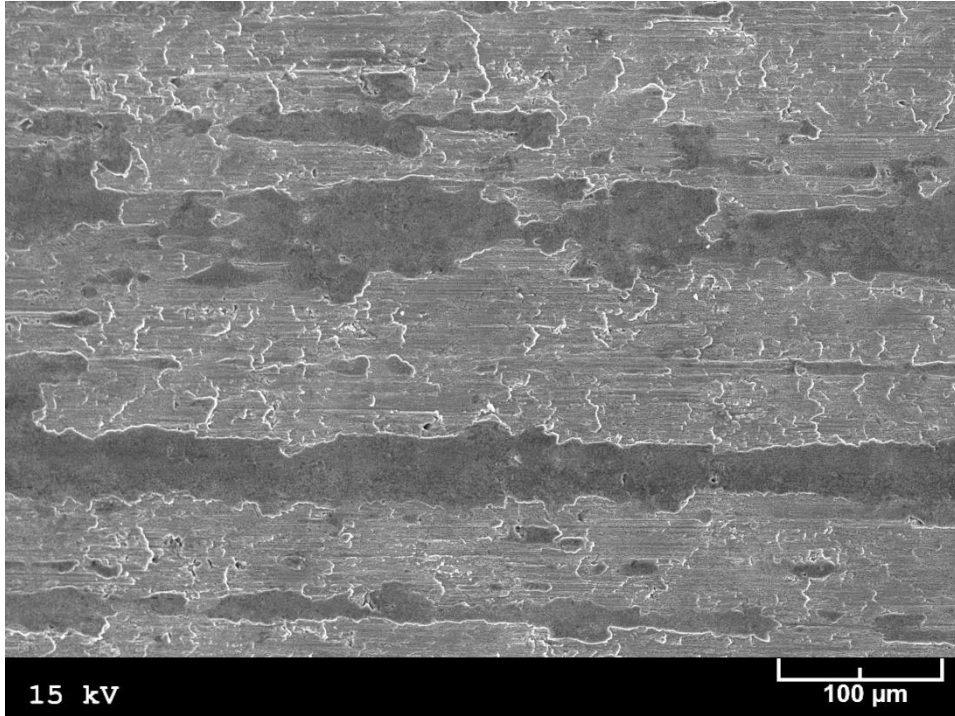


Şekil 92. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

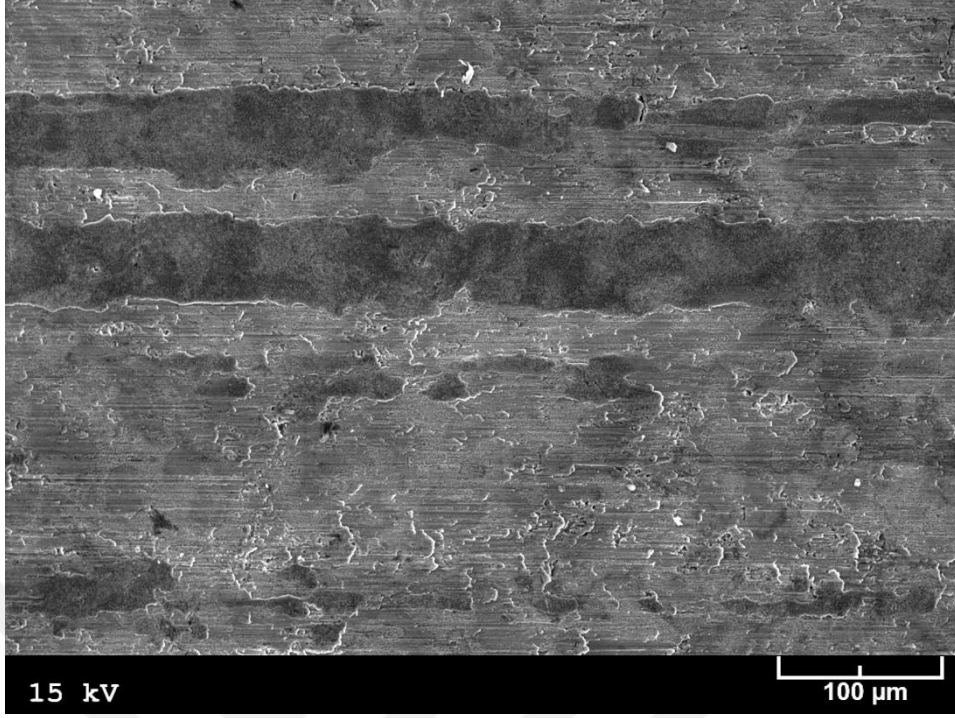




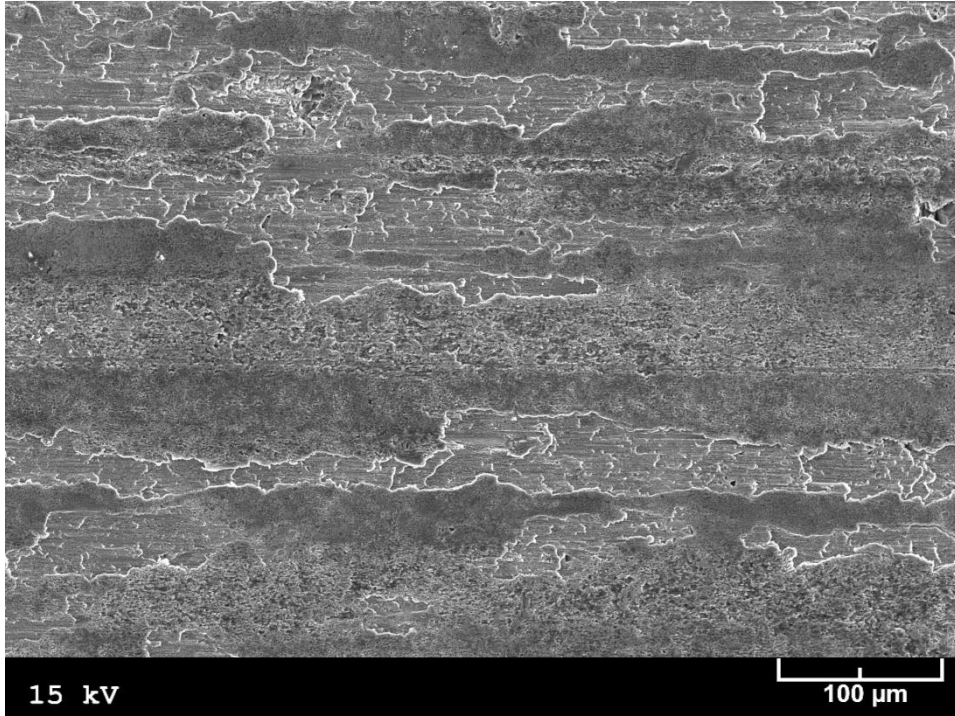
Şekil 93. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



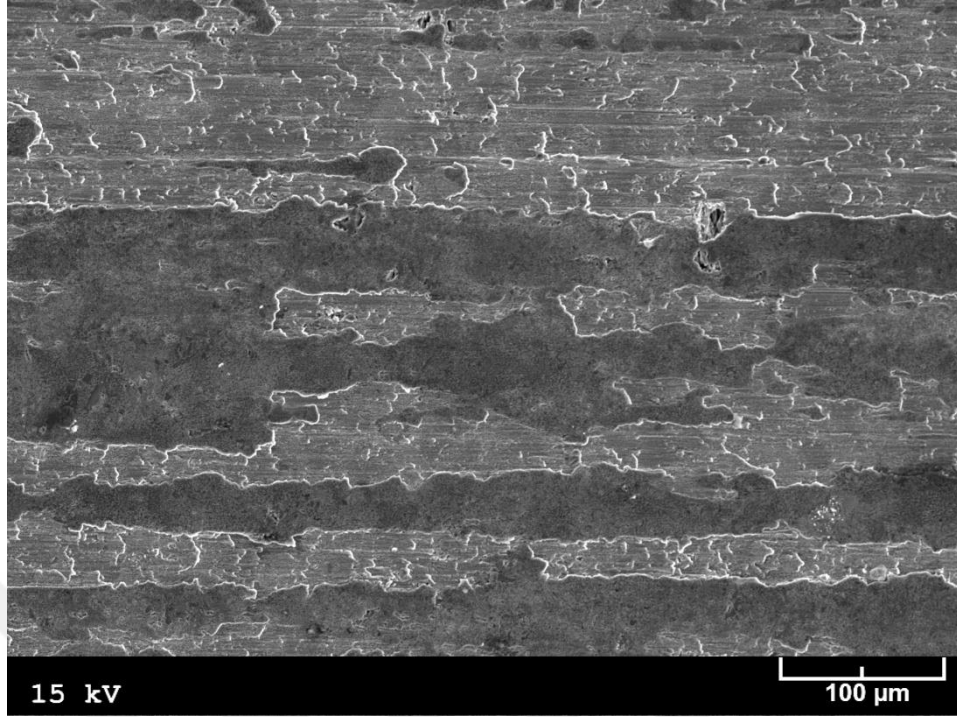
Şekil 94. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



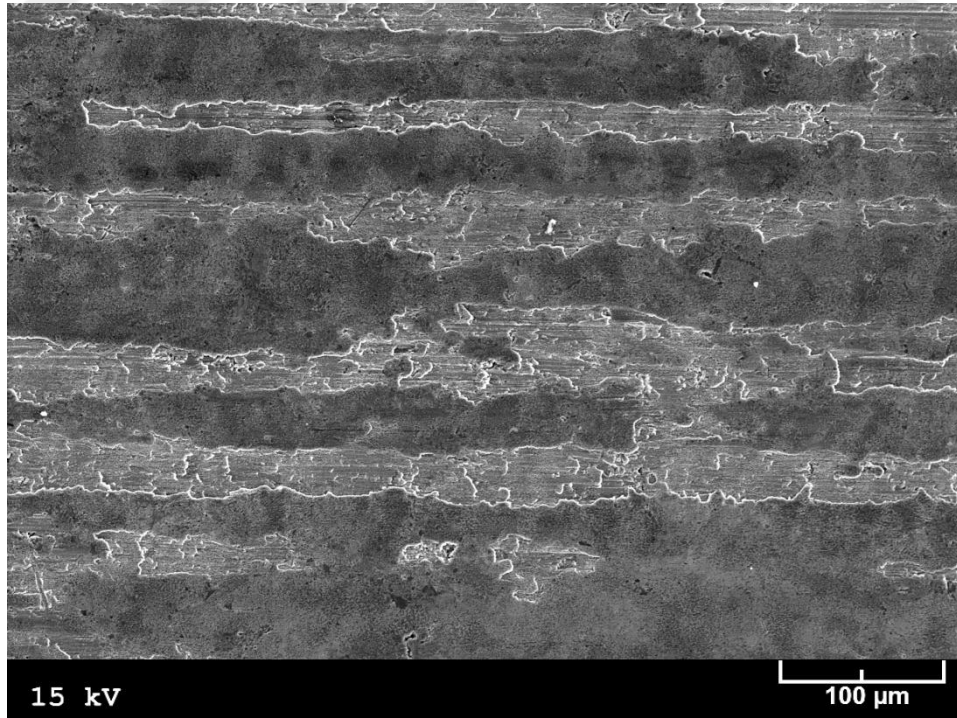
Şekil 95. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



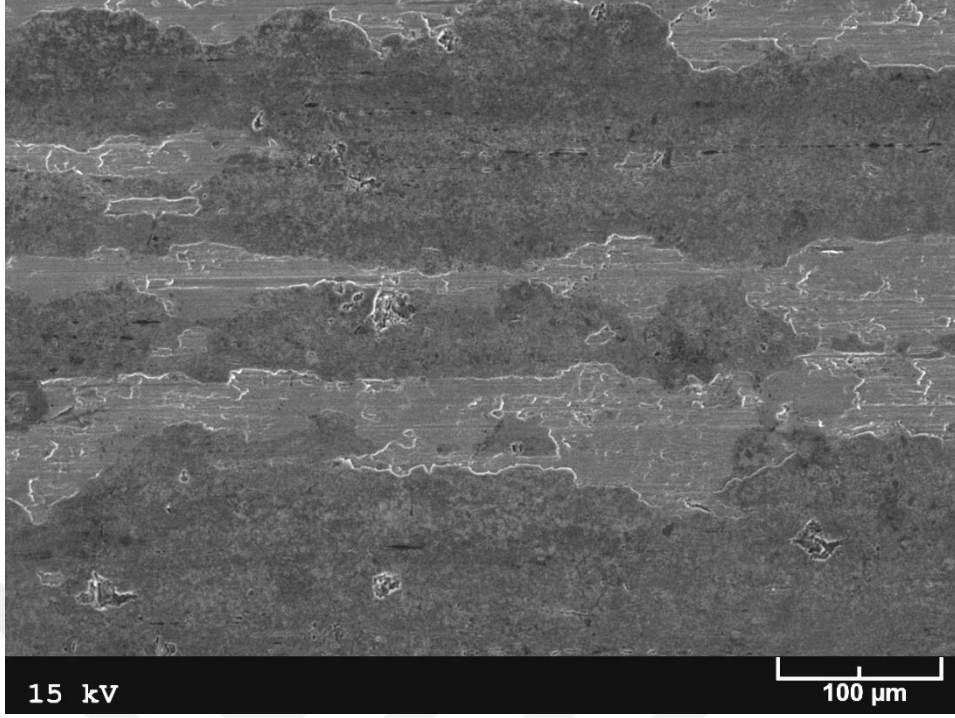
Şekil 96. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



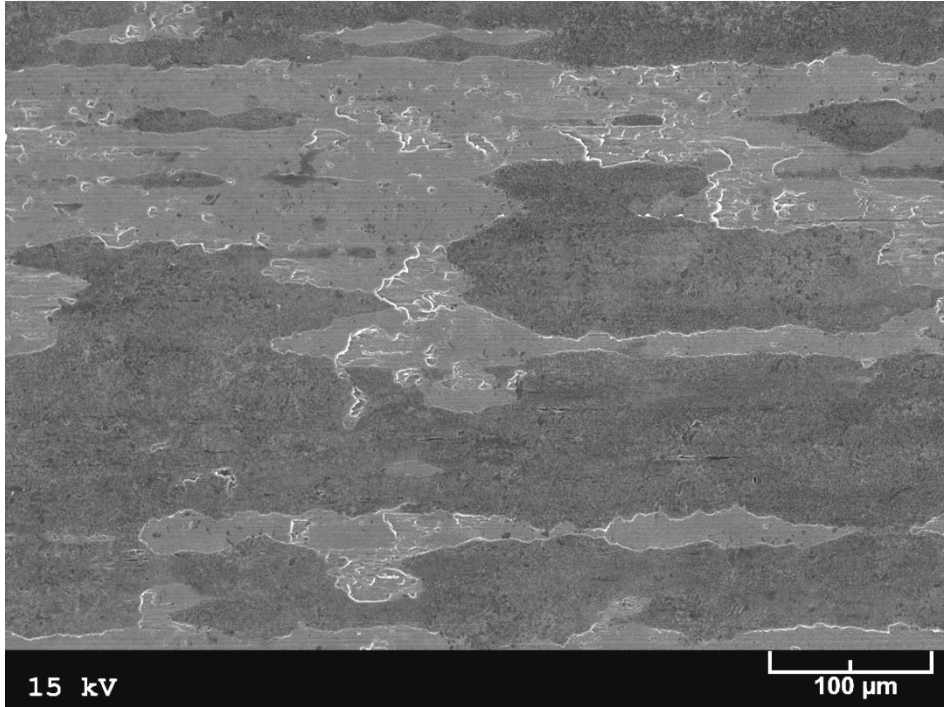
Şekil 97. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 98. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

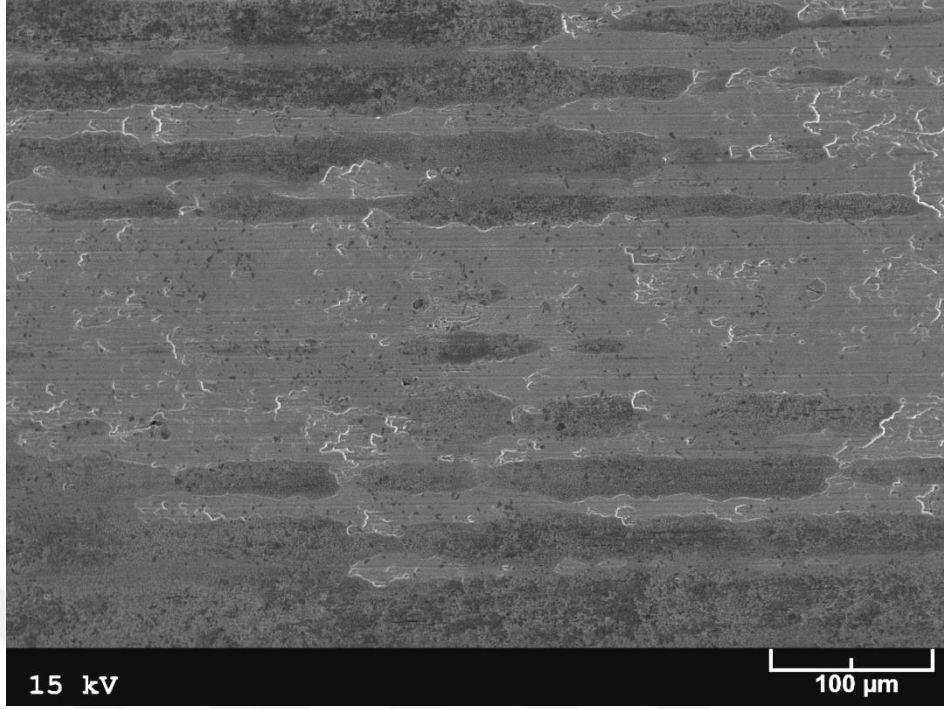


Şekil 99. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

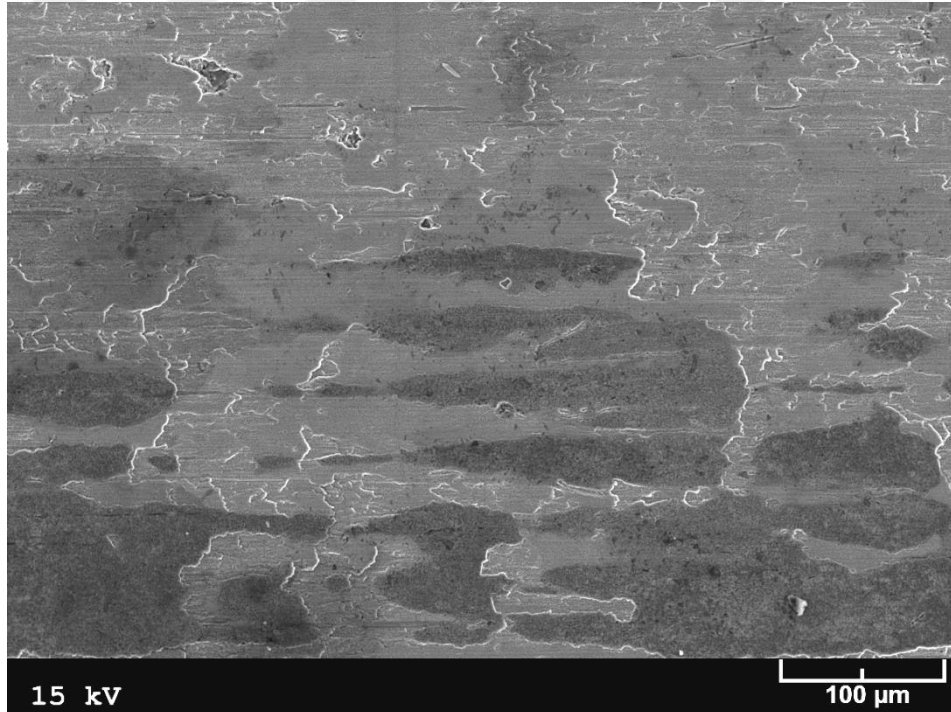


Şekil 100. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

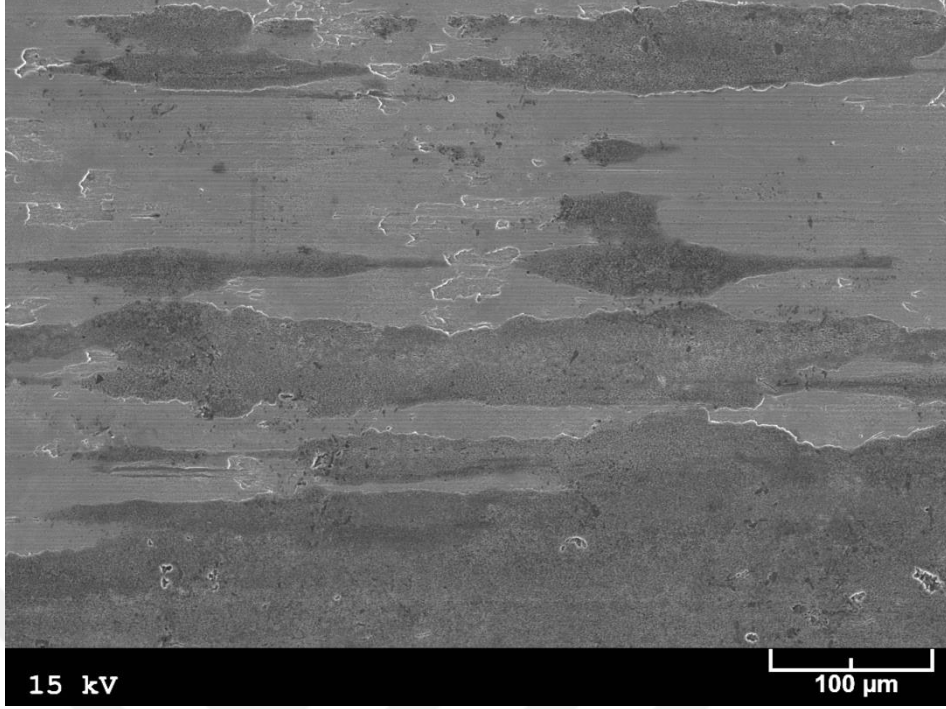




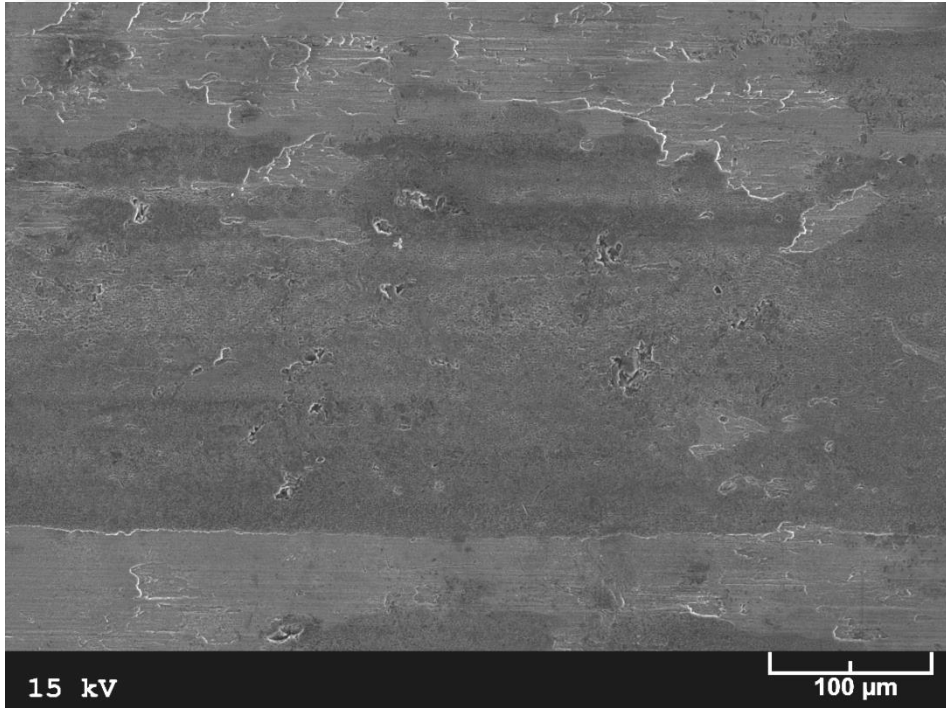
Şekil 101. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıt işleme görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



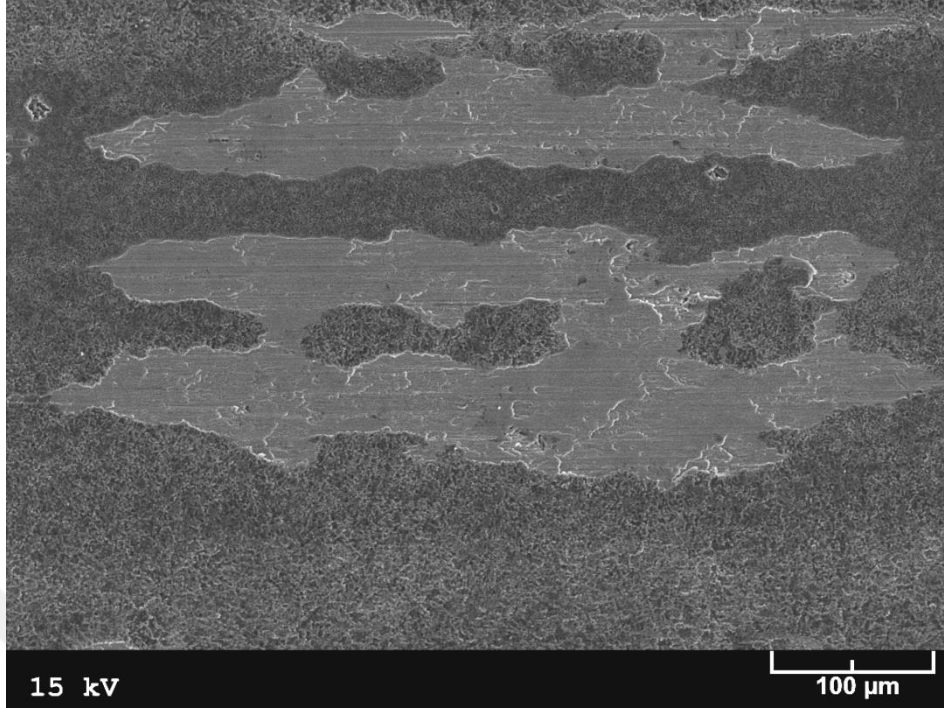
Şekil 102. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıt işleme görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



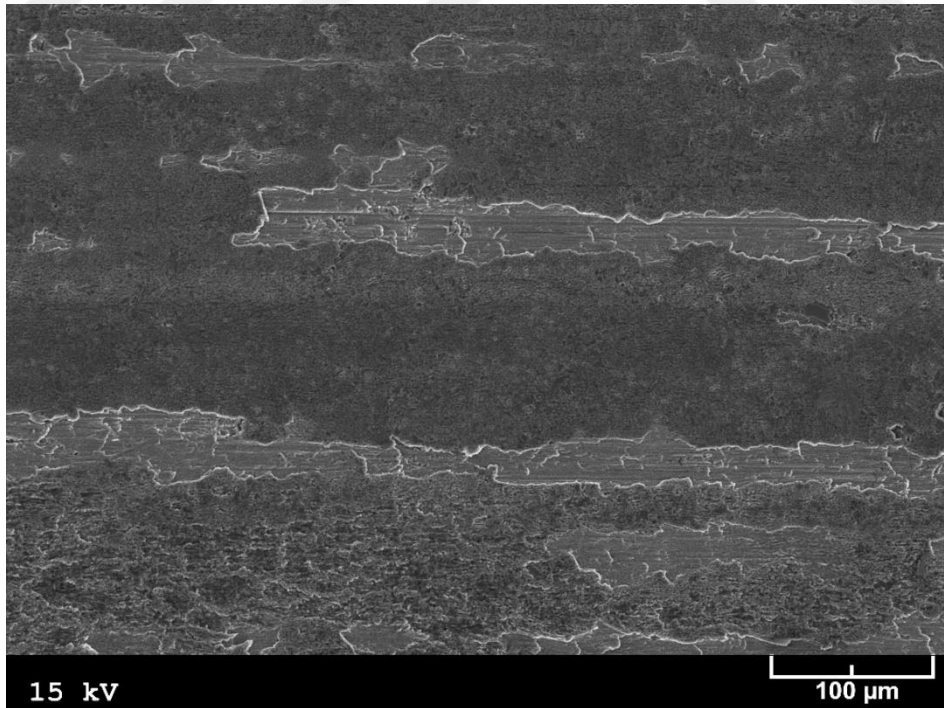
Şekil 103. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



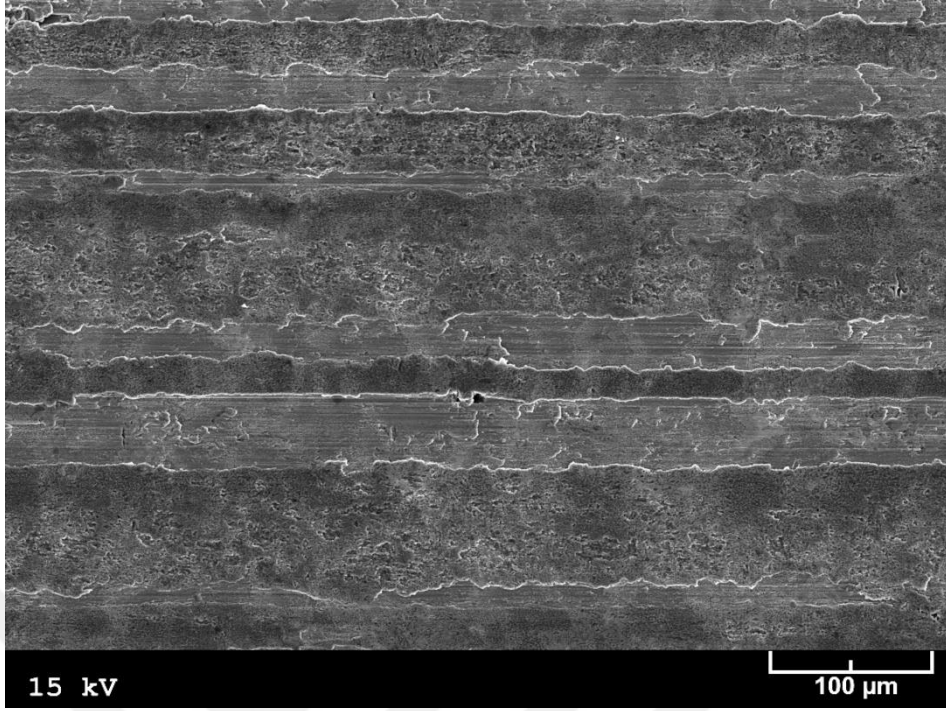
Şekil 104. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



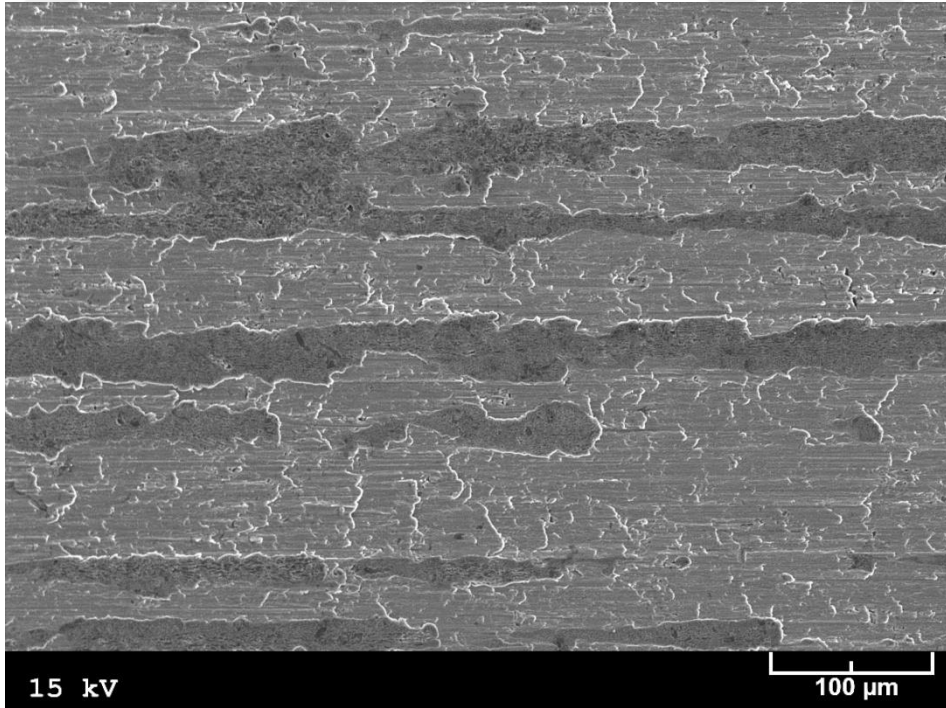
Şekil 105. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıt işlemleri görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 106. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıt işlemleri görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

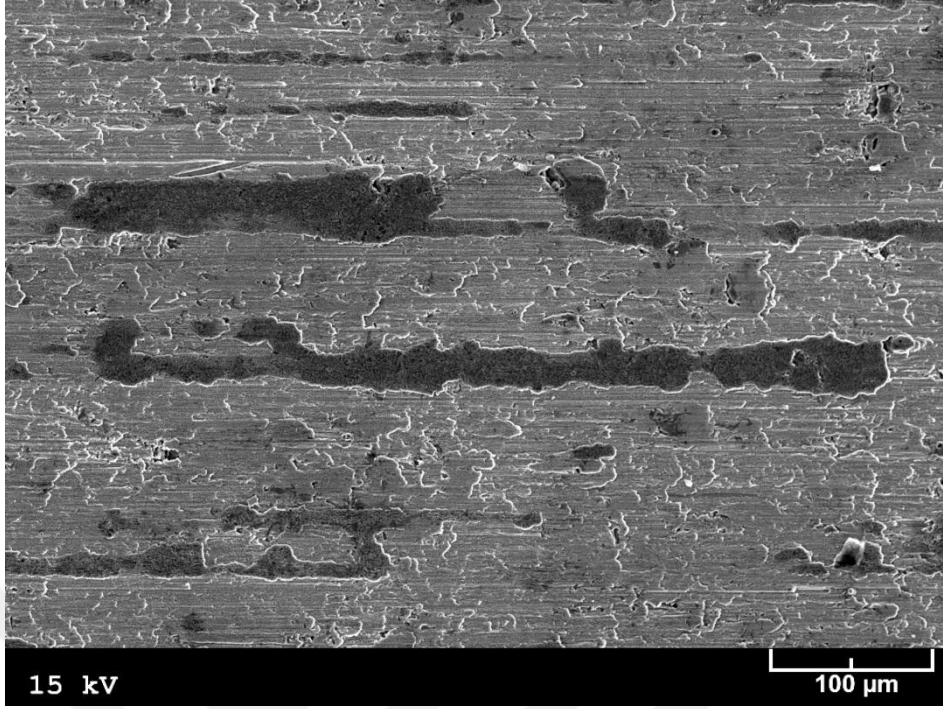


Şekil 107. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

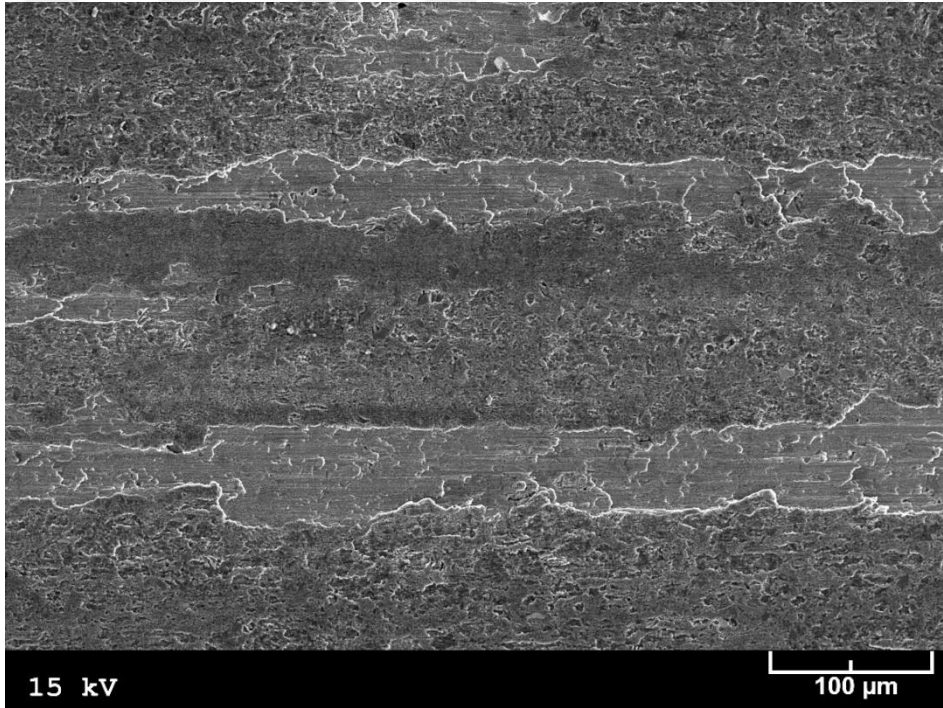


Şekil 108. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıtıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

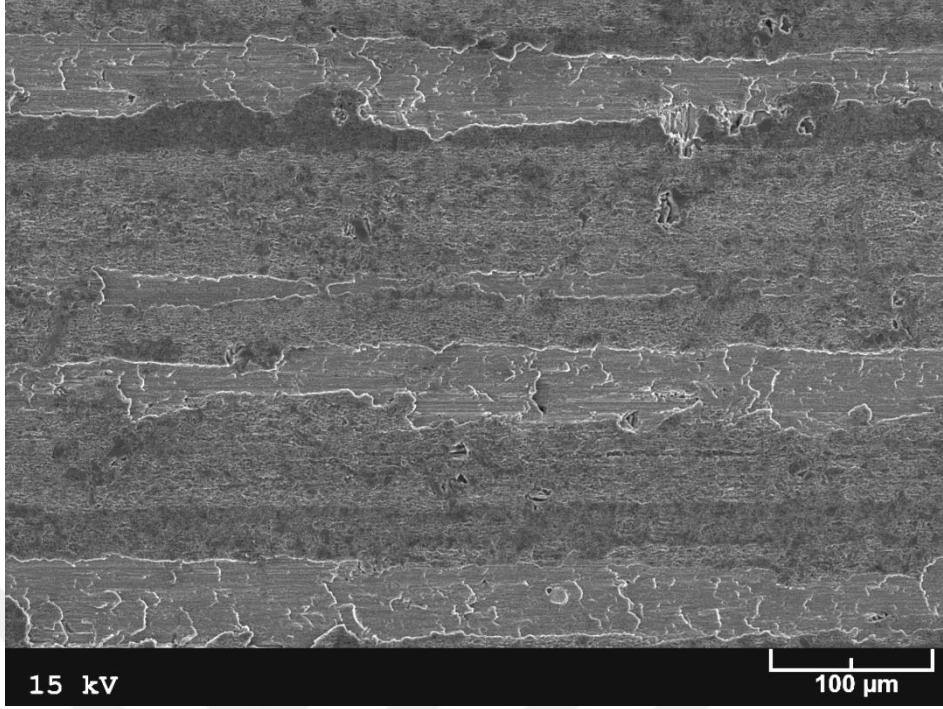




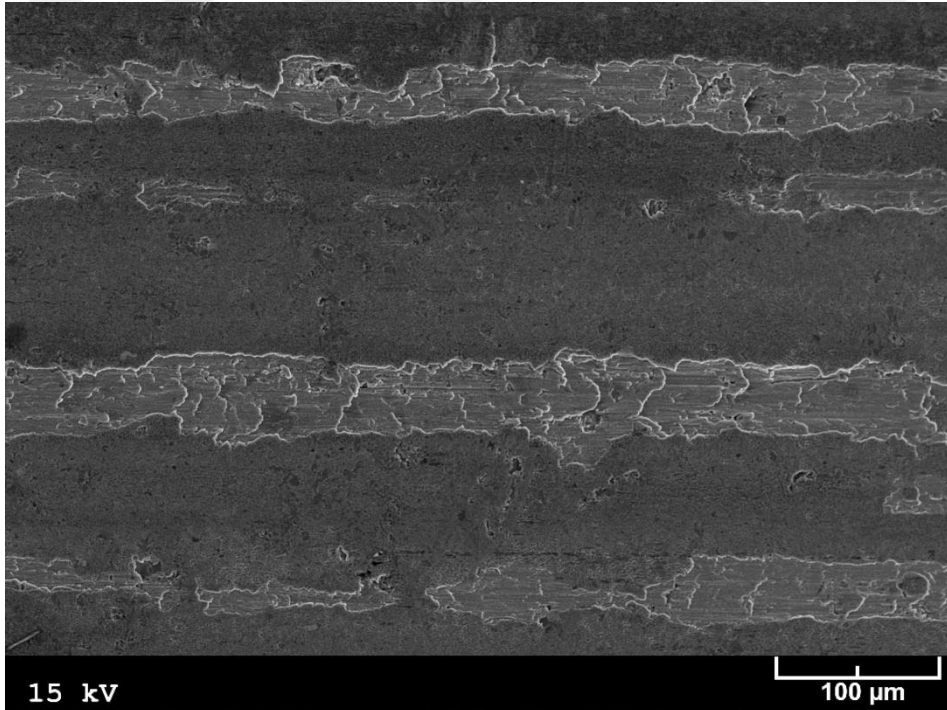
Şekil 109. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



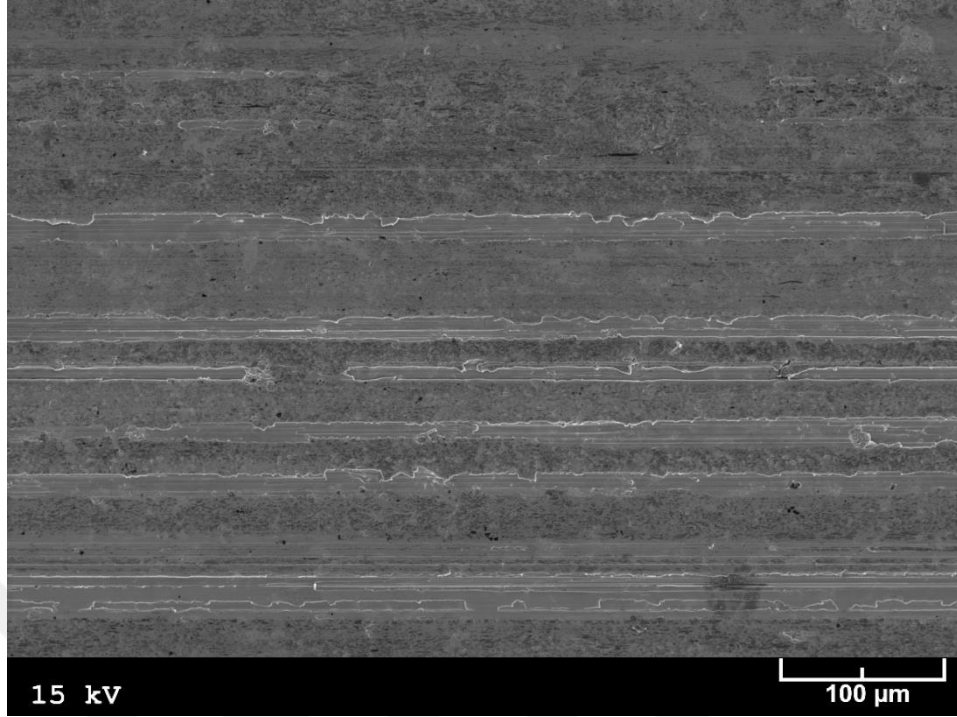
Şekil 110. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



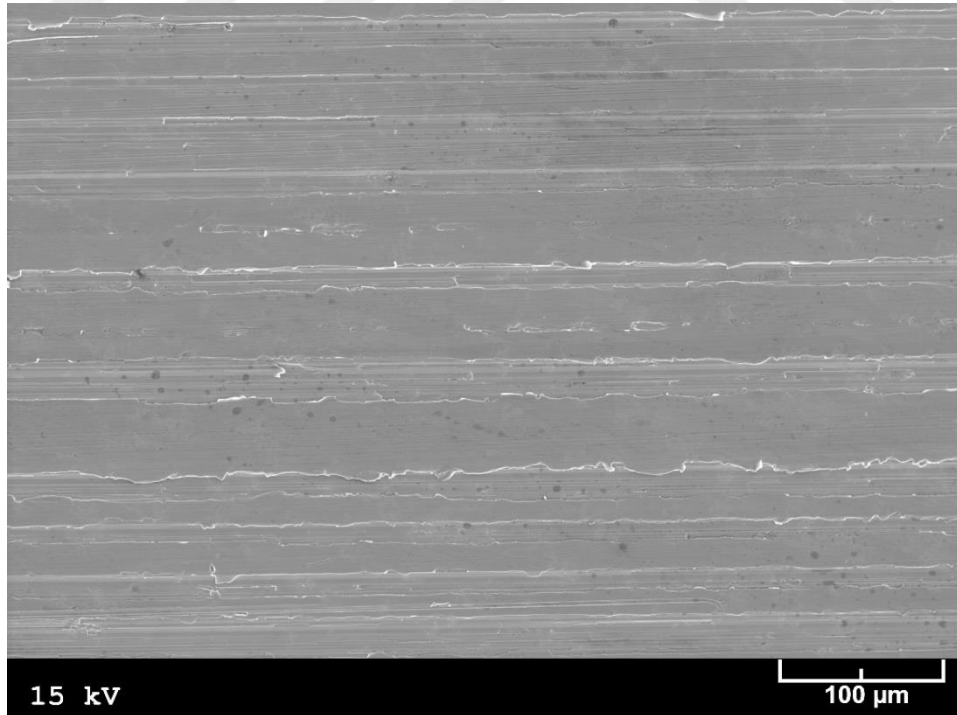
Şekil 111. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



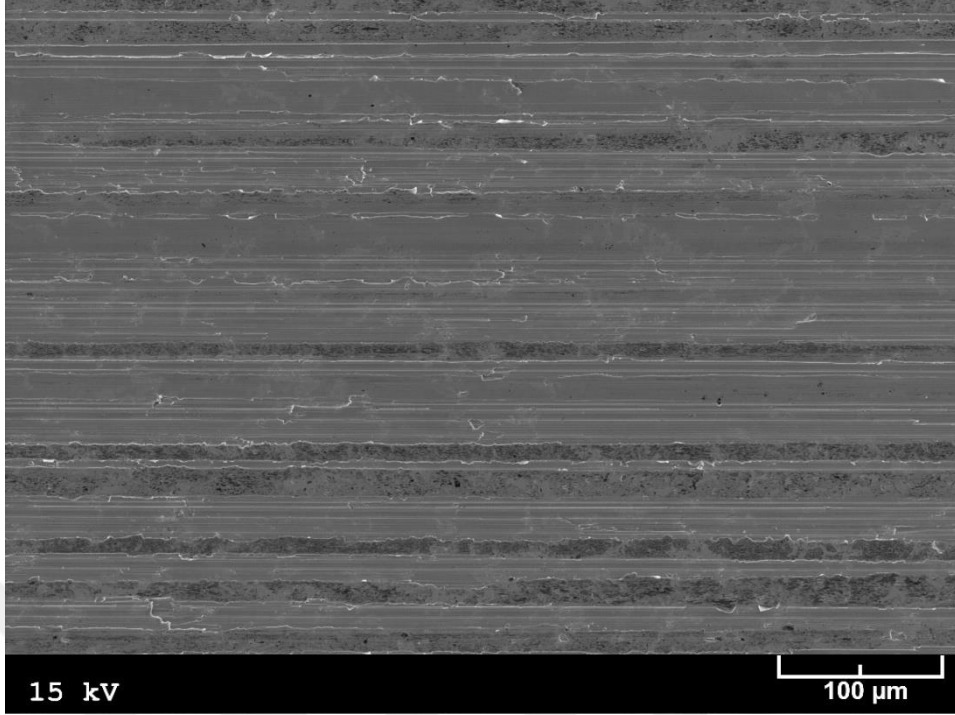
Şekil 112. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



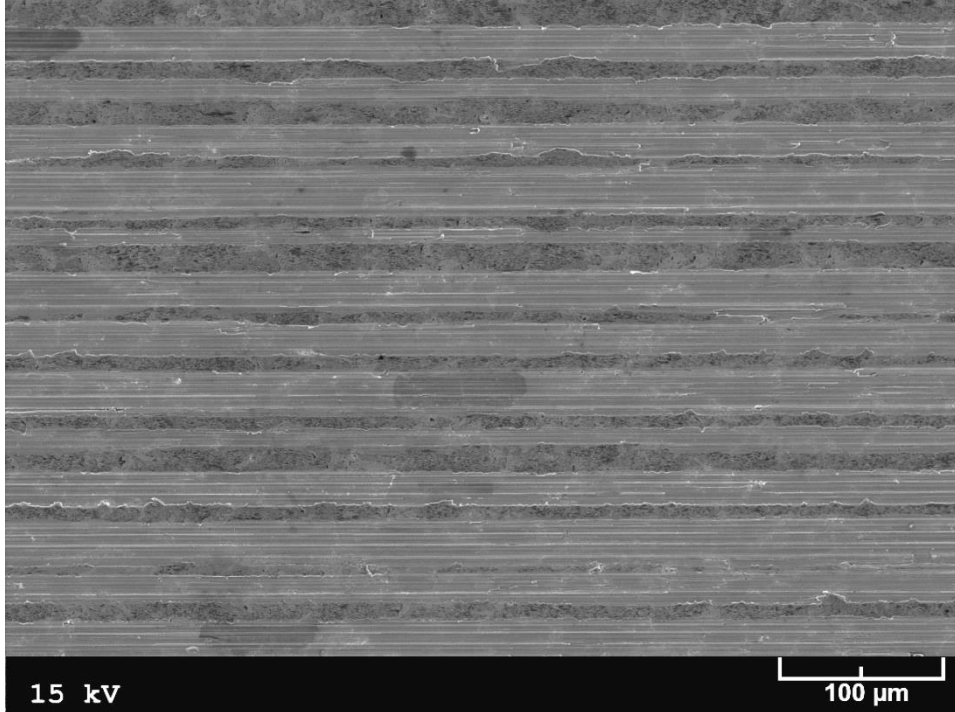
Şekil 113. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



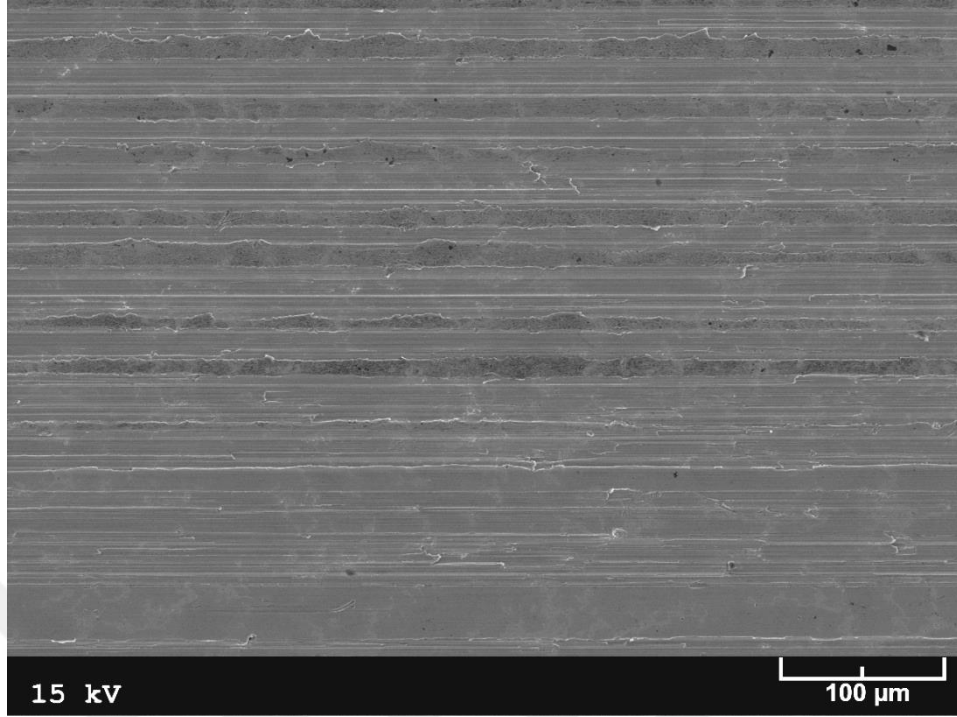
Şekil 114. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



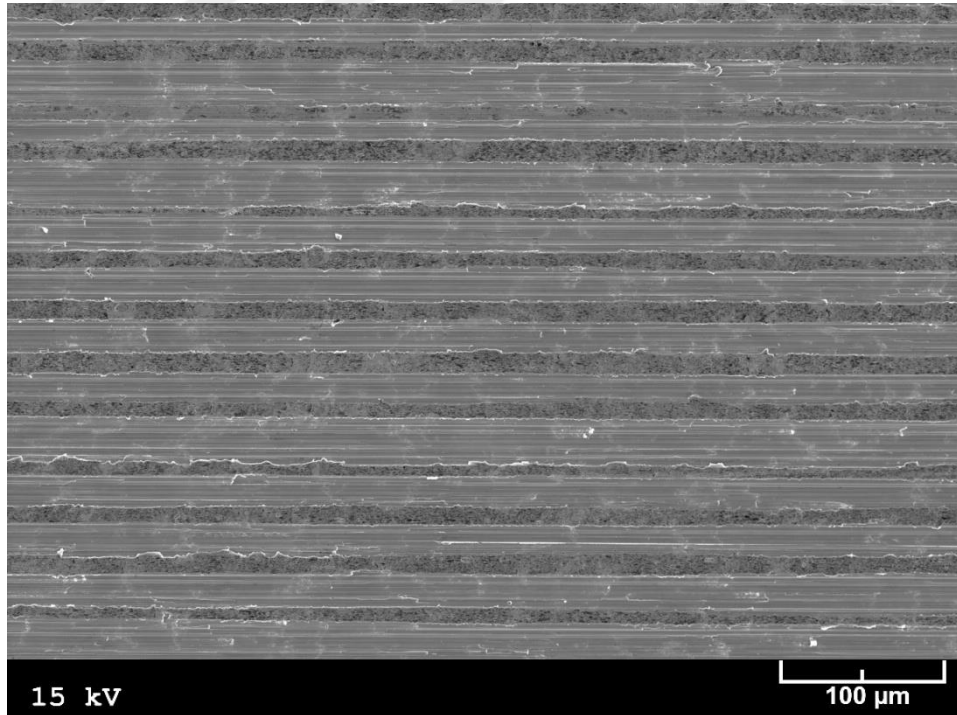
Şekil 115. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 116. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

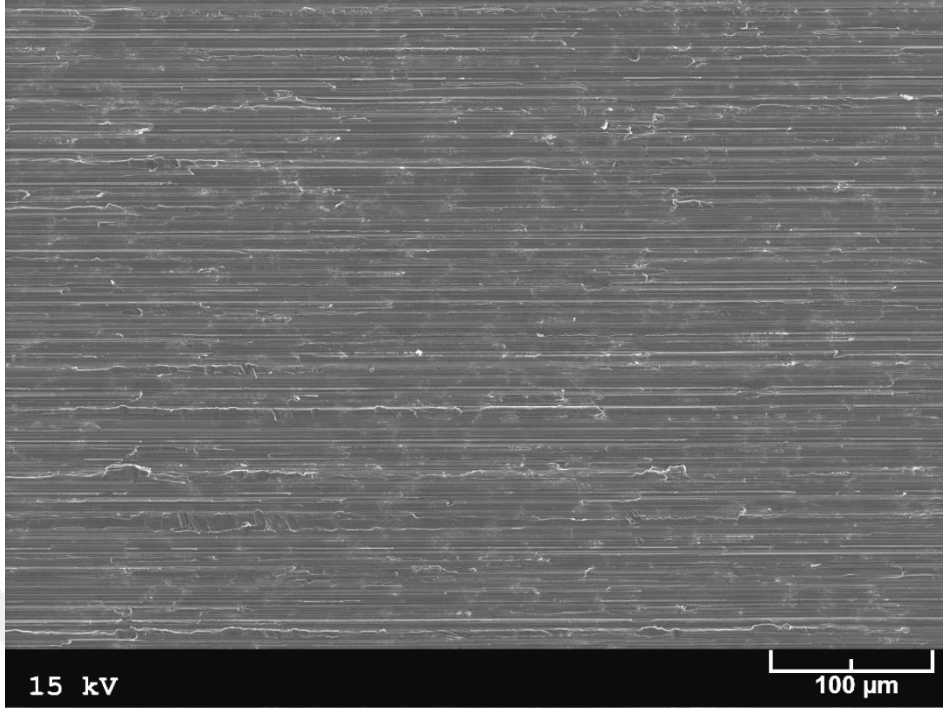


Şekil 117. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

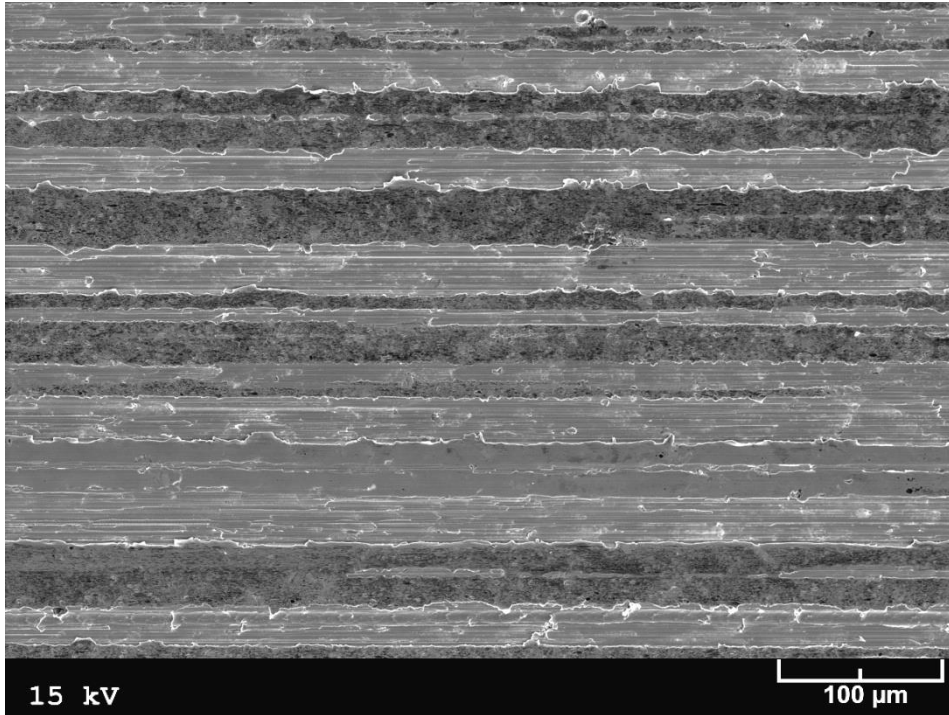


Şekil 118. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

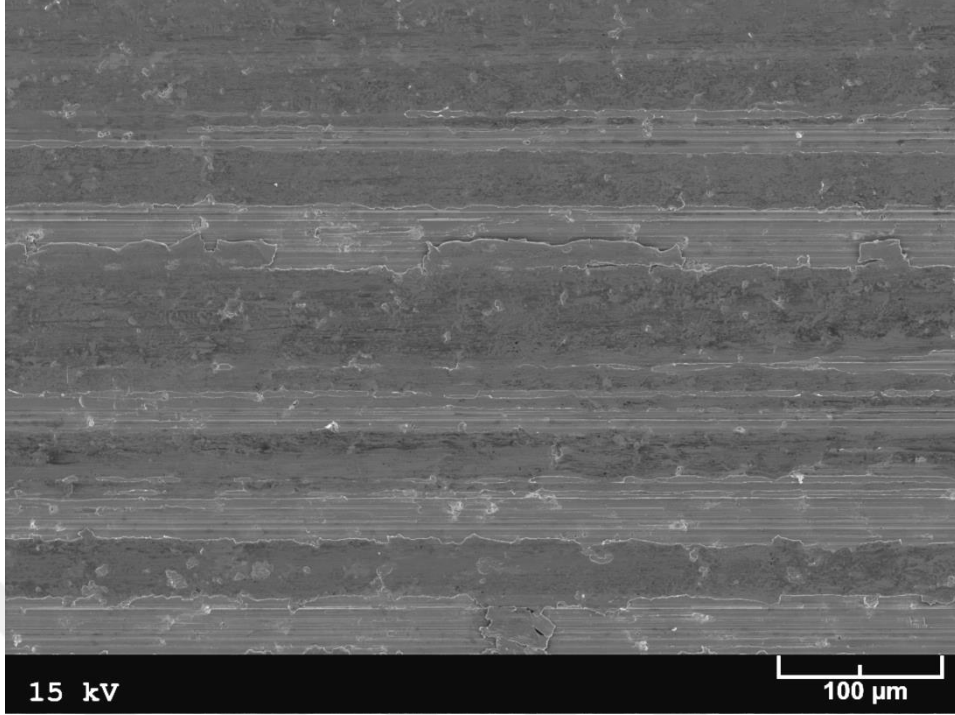




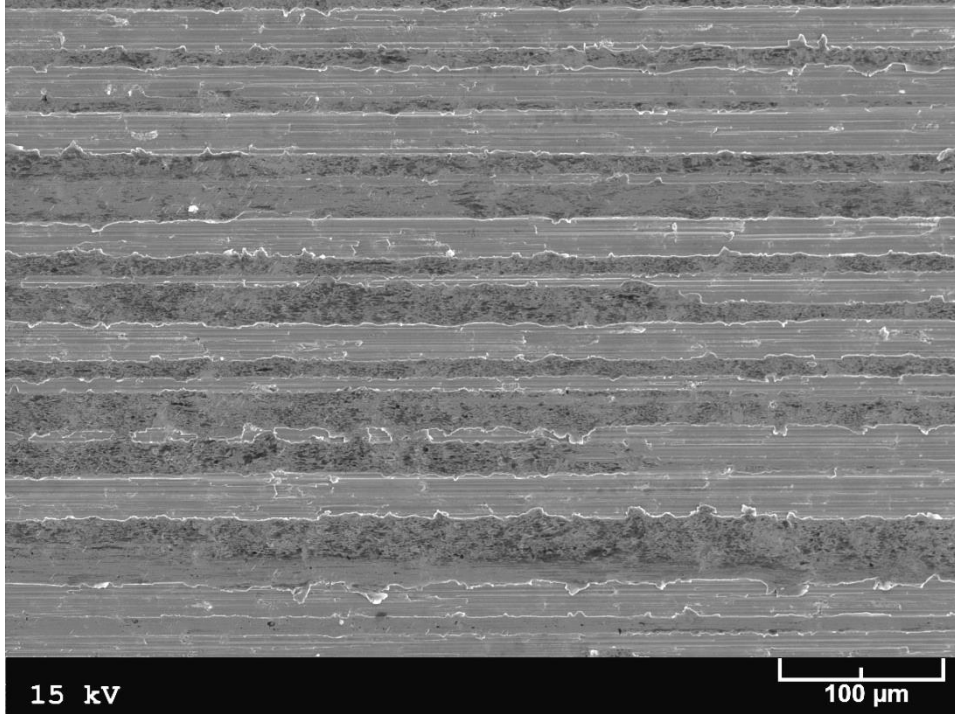
Şekil 119. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 120. 0,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

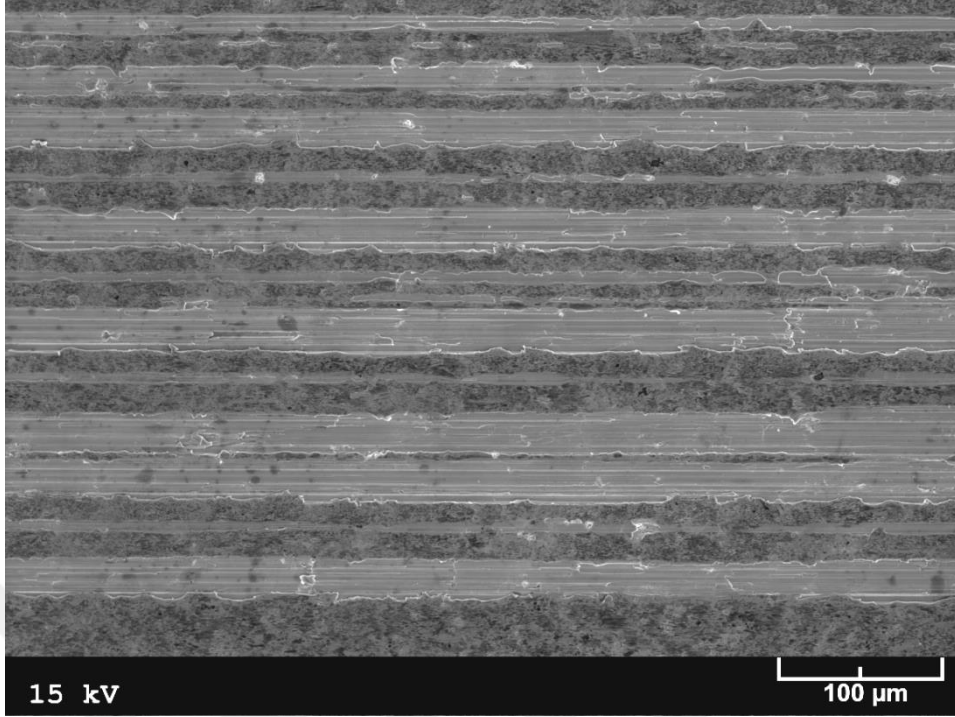


Şekil 121. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

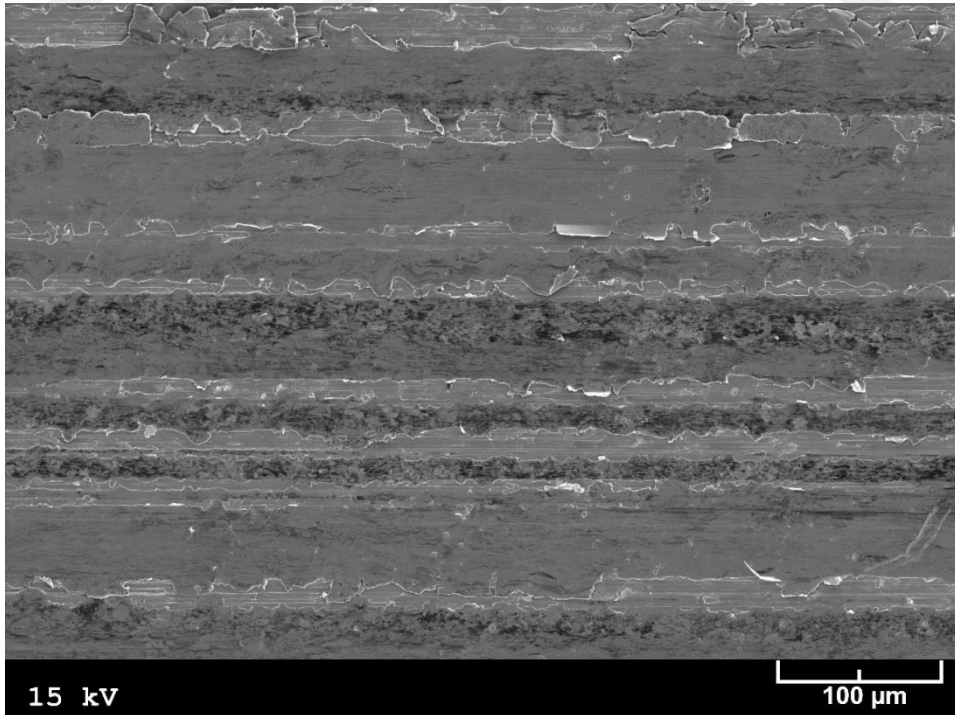


Şekil 122. 2,5 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

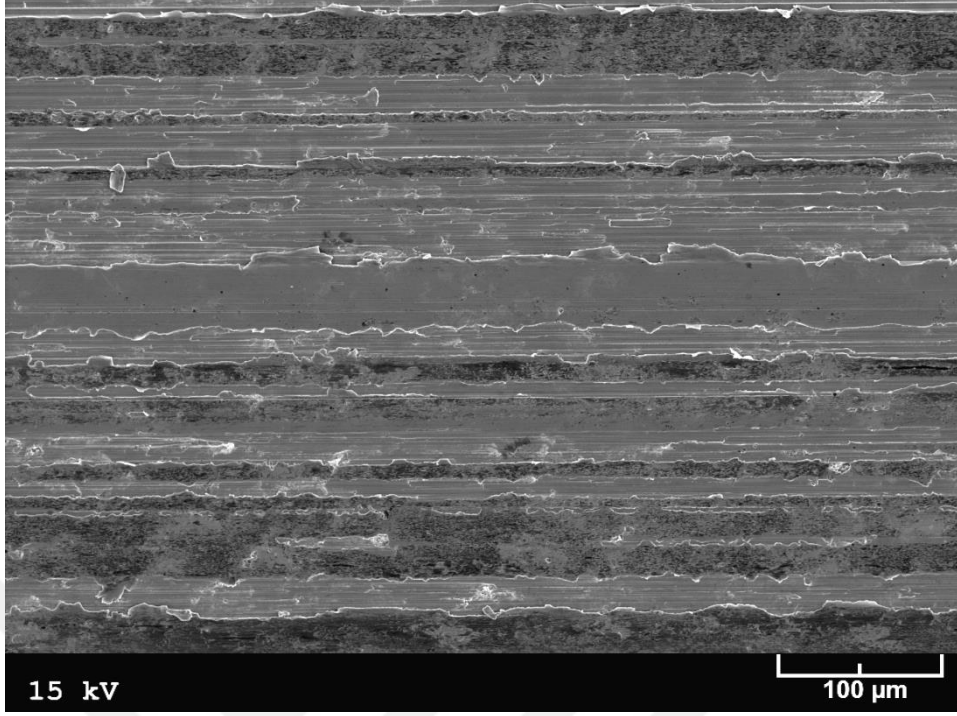




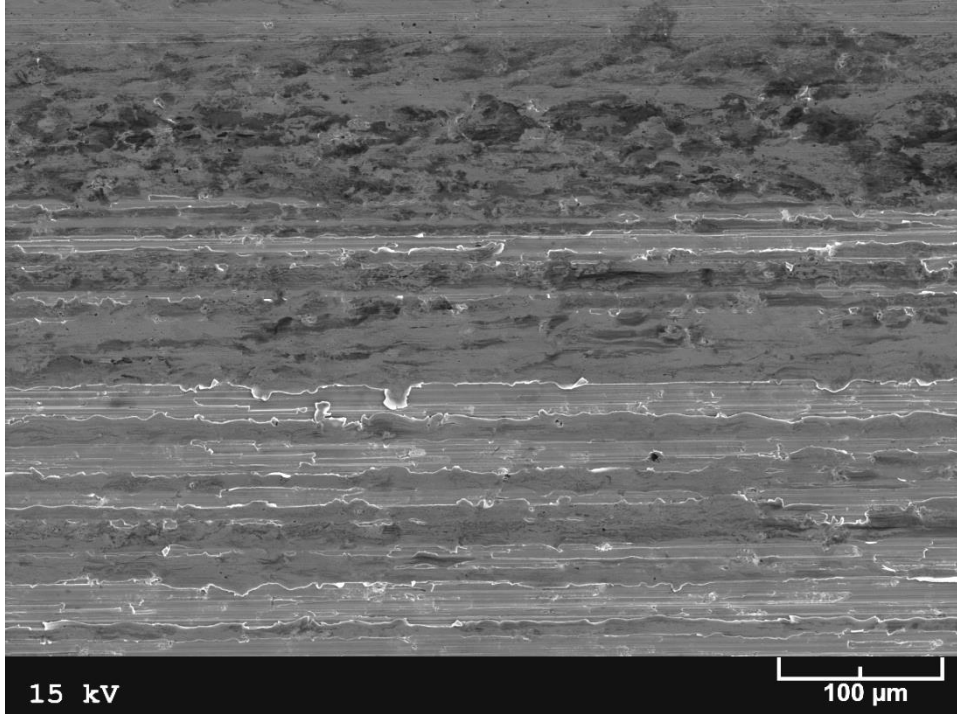
Şekil 123. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 4 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 124. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 14 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



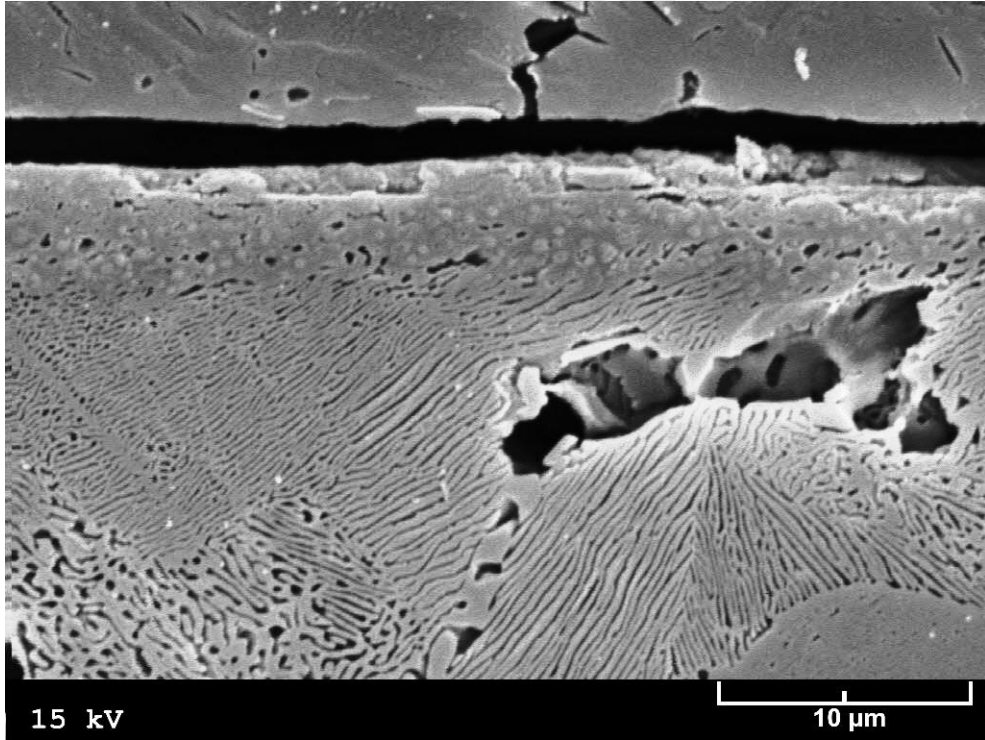
Şekil 125. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 1 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



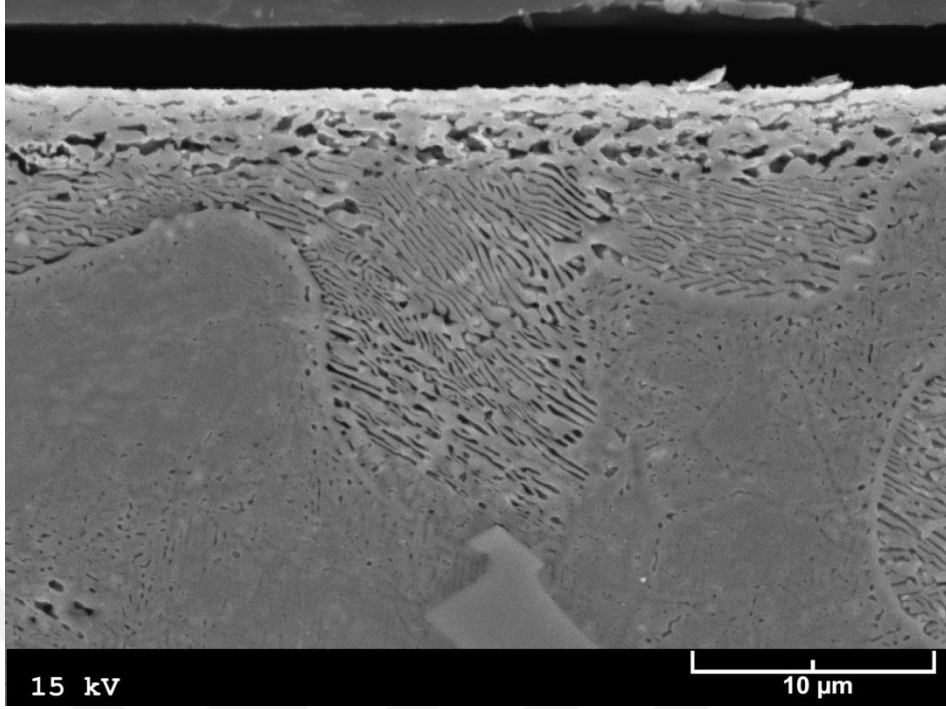
Şekil 126. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 10 MPa'lık basınç ve 3 m/s'lik hız koşullarında 30 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

### 3.6. Yüzey Altı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

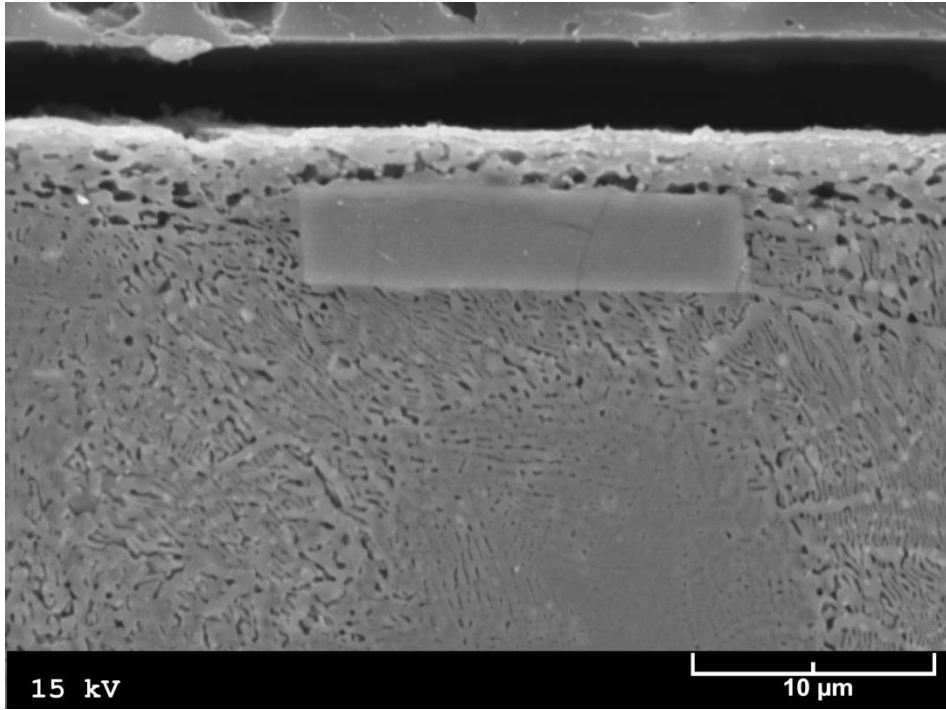
Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve sabit kayma hızında ( $2 \text{ m/s}$ ) sabit uzunlukta bir yol ( $102 \text{ km}$ ) tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-Si alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinin SEM görüntüleri sırası ile Şekil 127-140'da verilmiştir. Bu görüntüler özellikle Zn-40Al-2Cu esaslı alaşımlara ait numunelerin yüzeylerinde kalınlığı  $1-4 \text{ }\mu\text{m}$  arasında değişen bir sıvama tabakasının yer aldığını, ancak yüzeylerinin altında belirgin yapısal değişimlerin meydana gelmediğini göstermektedir. Ayrıca, numune kesitleri üzerinde yapılan mikrosertlik ölçümleri sırasında numune yüzeyi altında belirgin bir sertlik değişimine rastlanmamıştır (Şekil 141). Bu gözlem de söz konusu alaşımların aşınma numunelerinde belirgin yüzey altı yapısal değişimlerin meydana gelmediğini göstermektedir.



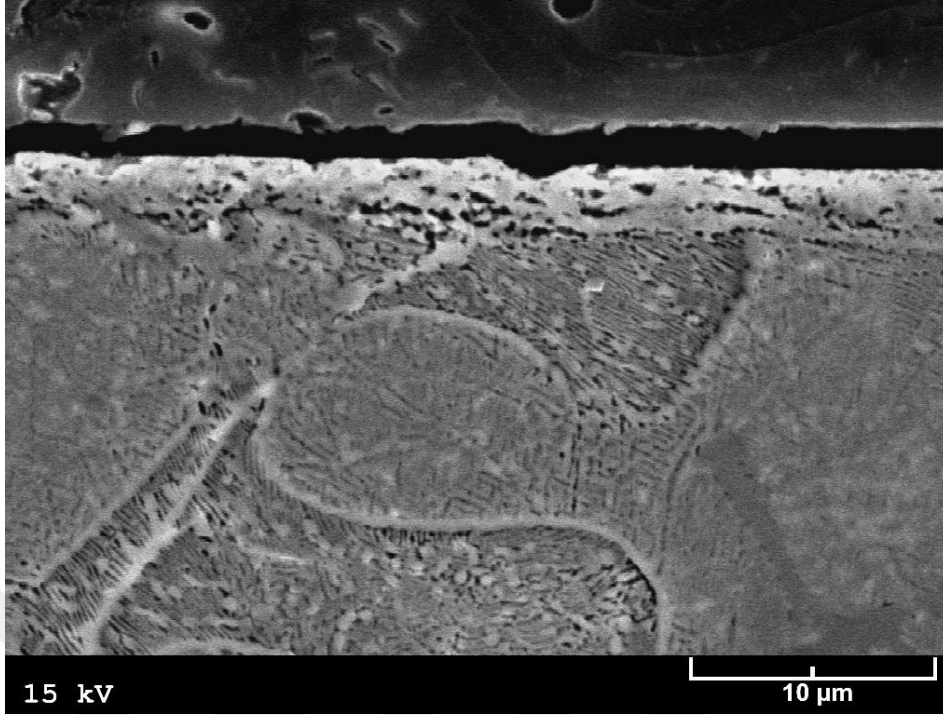
Şekil 127. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve sabit hız ( $2 \text{ m/s}$ ) şartları altında  $102 \text{ km}$  mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



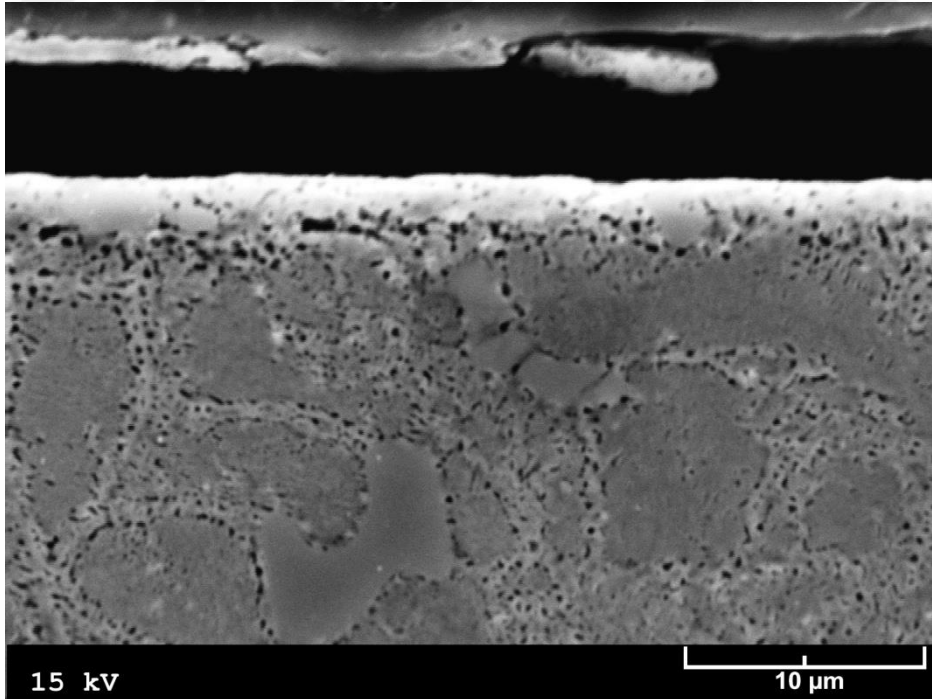
Şekil 128. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



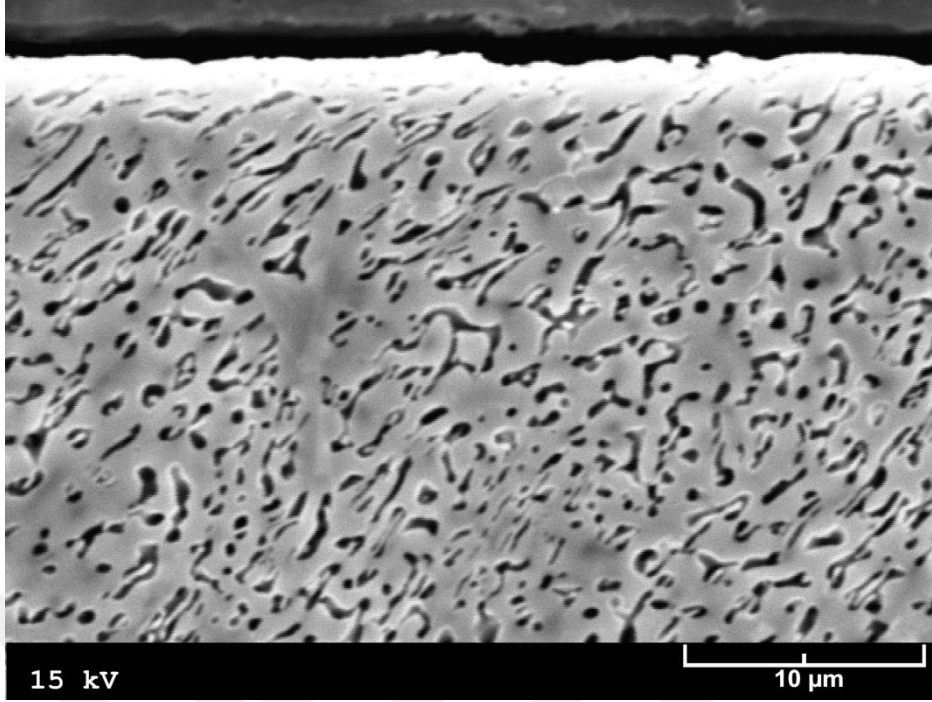
Şekil 129. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2,5Ni alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



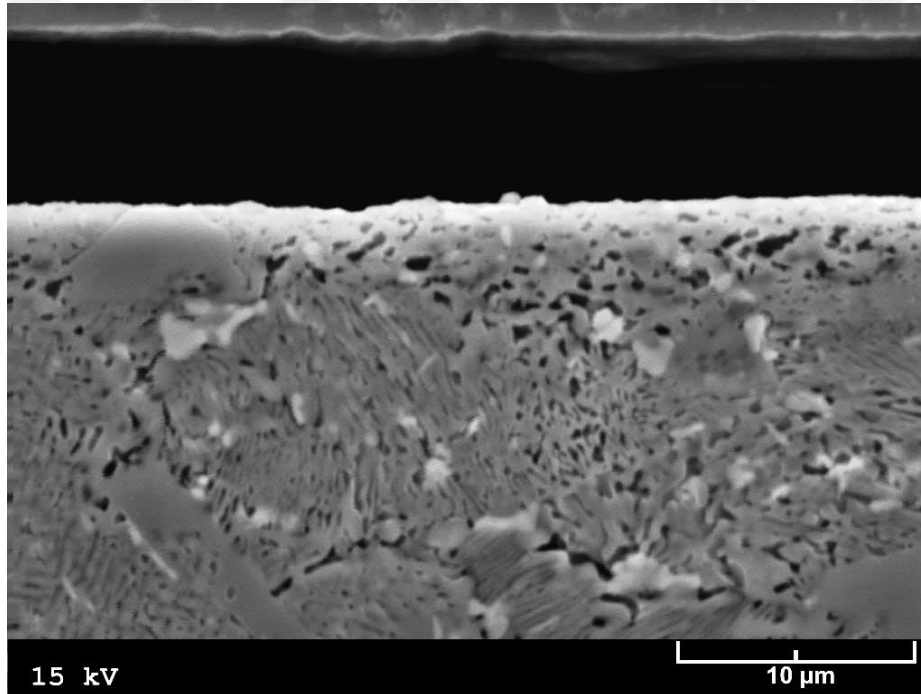
Şekil 130. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve sabit hız ( $2 \text{ m/s}$ ) şartları altında  $102 \text{ km}$  mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 131. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve sabit hız ( $2 \text{ m/s}$ ) şartları altında  $102 \text{ km}$  mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının havada soğutulmuş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

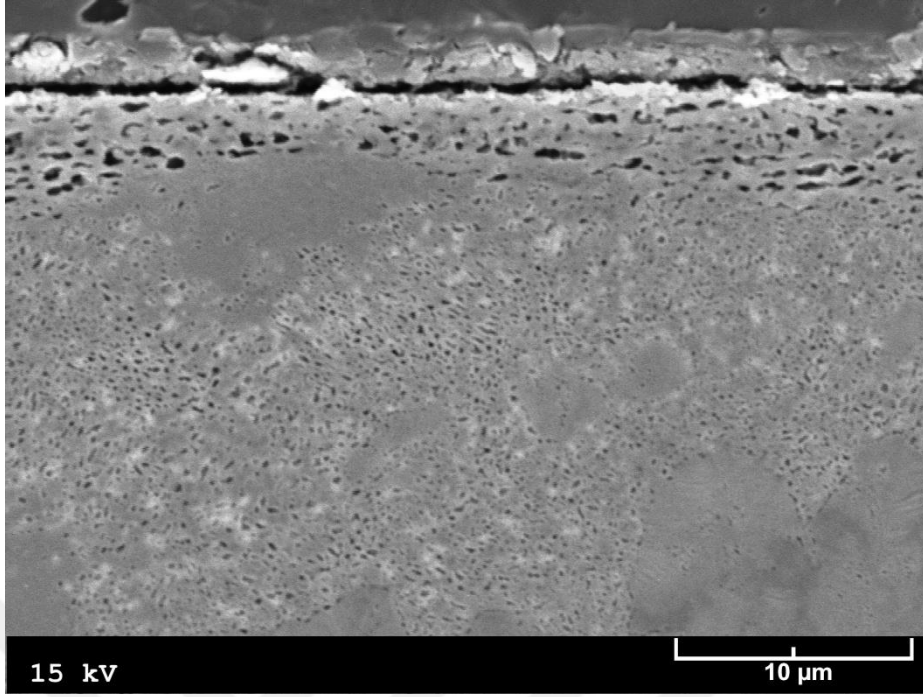


Şekil 132. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının fırında soğutulmuş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

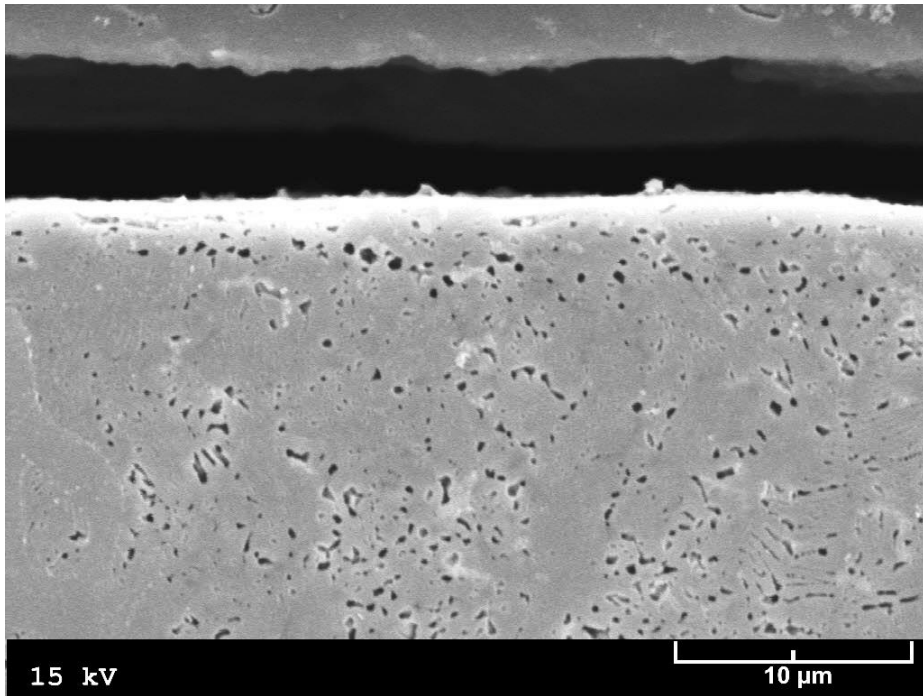


Şekil 133. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T5 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



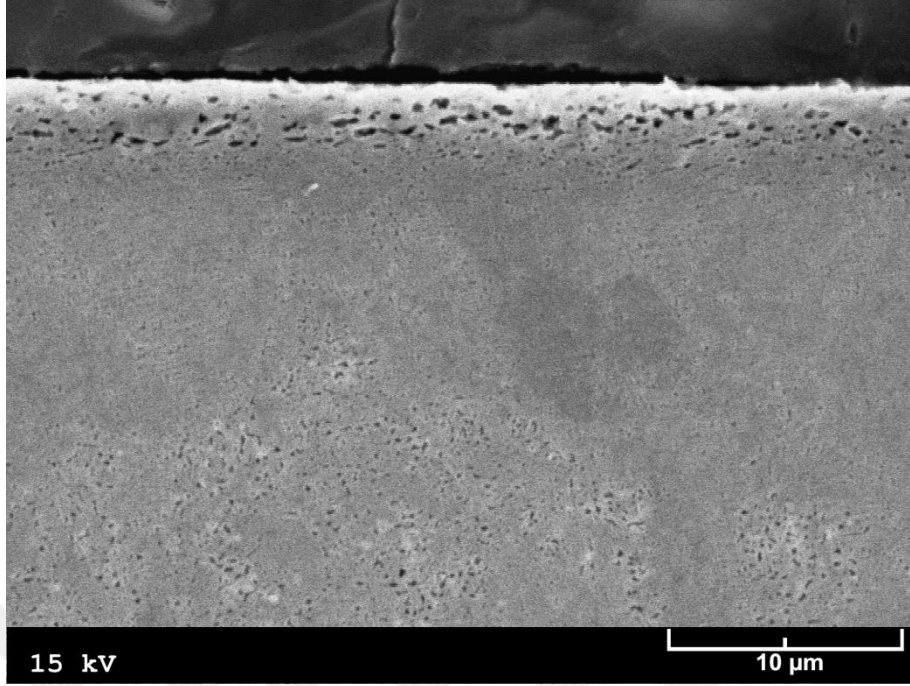


Şekil 134. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

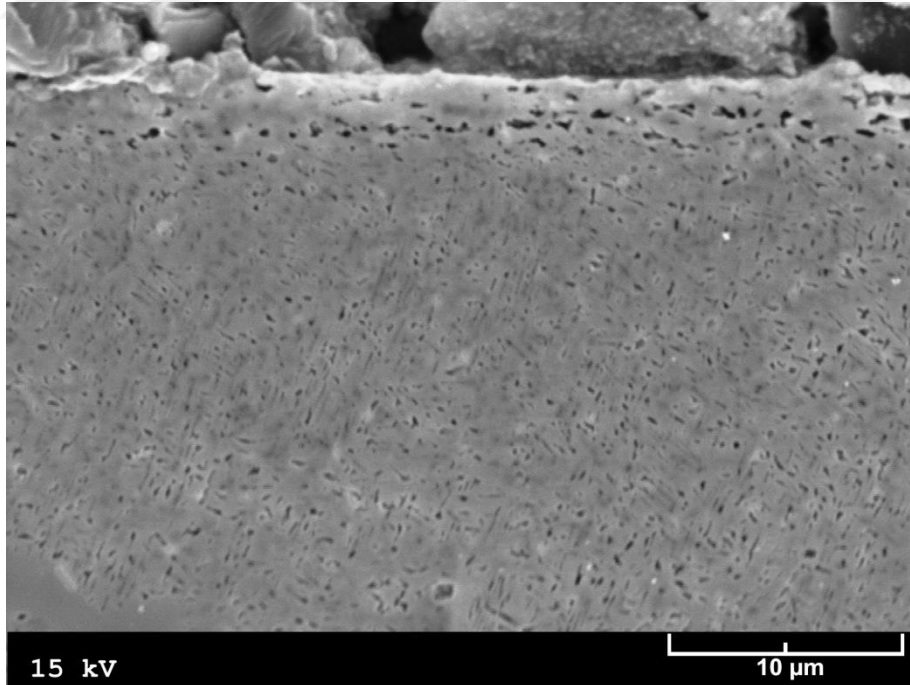


Şekil 135. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

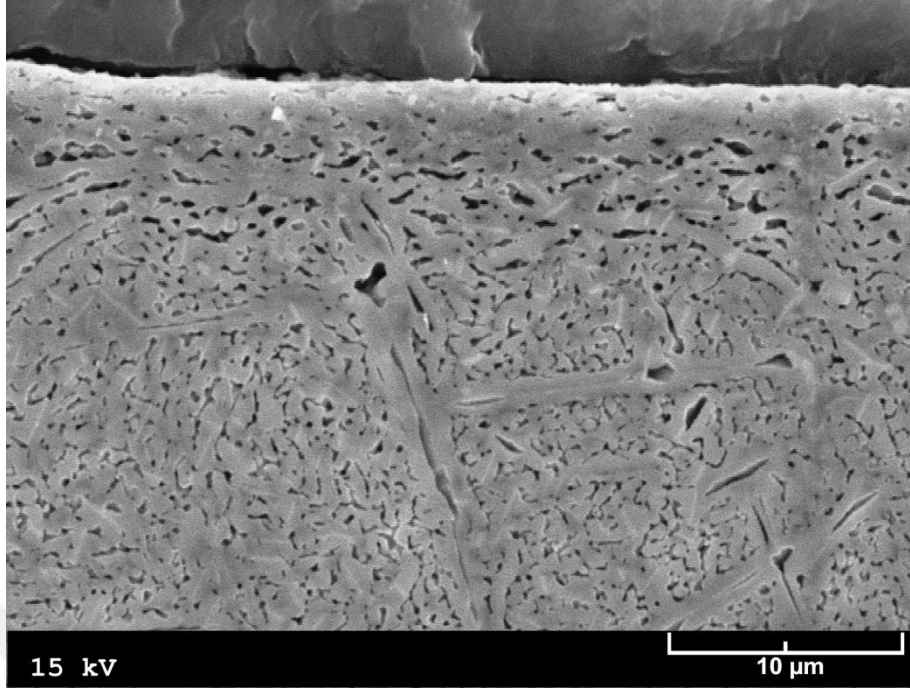




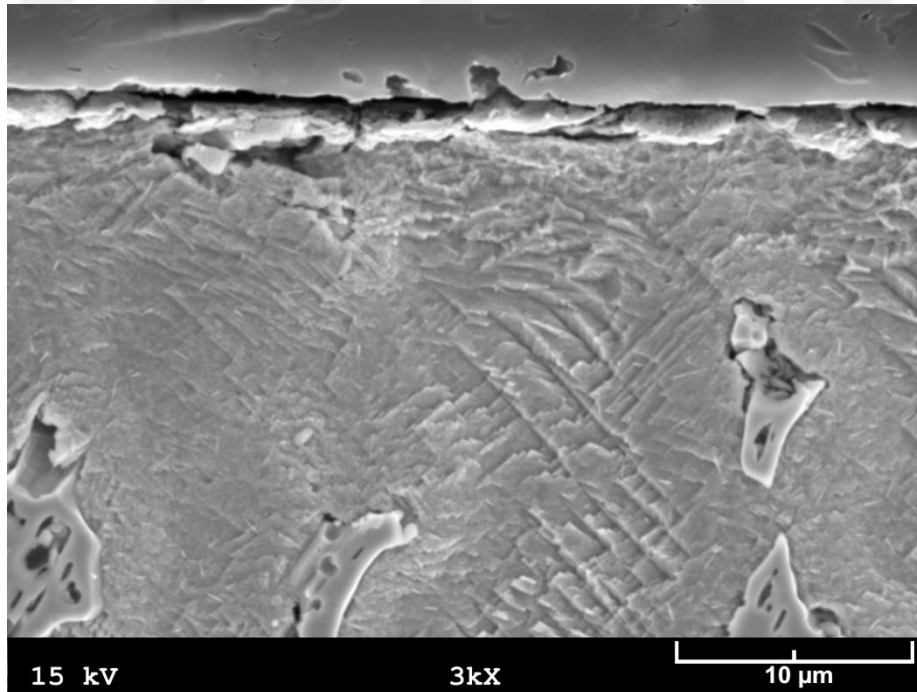
Şekil 136. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



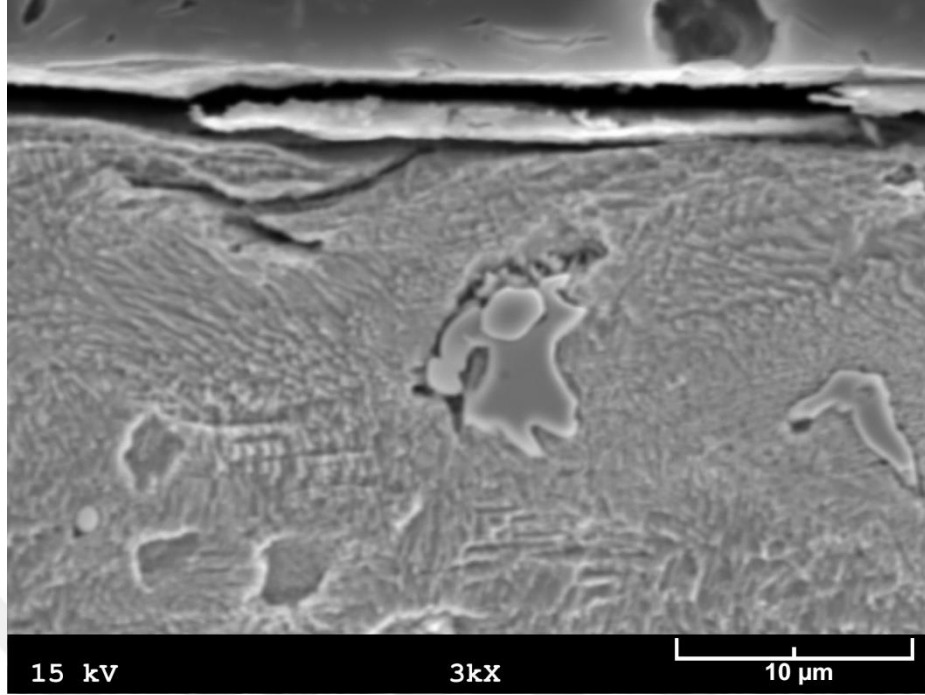
Şekil 137. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



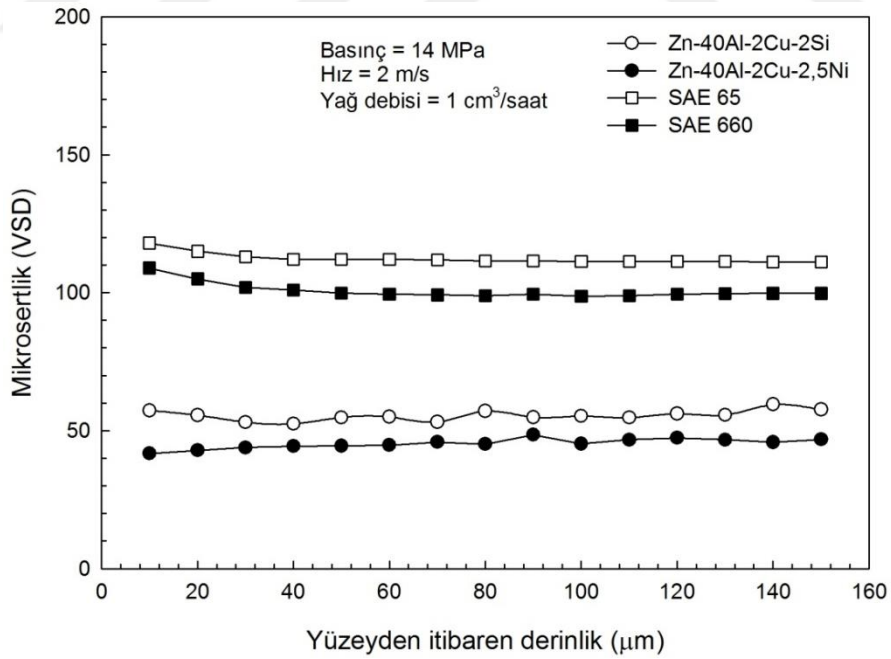
Şekil 138. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta izotermal dönüşüme tabi tutulmuş numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 139. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç (14 MPa) ve sabit hız (2 m/s hız) şartları altında 102 km mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 65 bronzuna ait numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 140. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve sabit hız ( $2 \text{ m/s}$  hız) şartları altında  $102 \text{ km}$  mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 141. Sabit yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), sabit basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve sabit hız ( $2 \text{ m/s}$  hız) şartları altında  $102 \text{ km}$  mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si ve Zn-40Al-2Cu-2,5Ni alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler

## 4. İRDELEME

### 4.1. Metalografik İncelemelerden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının içyapılarının alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile ötektoid  $\alpha + \eta$  ve nikelce zengin ( $Al_3Ni$ ) fazlarından oluştuğu gözlemlendi, Şekil 10-15. Bu şekillerde yer alan içyapı fotoğrafları nikelce zengin ( $Al_3Ni$ ) fazının boyut, oran ve dağılımının nikel oranına göre değiştiğini göstermektedir. Şöyle ki, söz konusu faz %1'den daha düşük oranlarda nikel içeren alaşımlarda dendritlerarası bölgelerde ince parçacıklar halinde görülürken, bu değer üzerinde nikel içeren alaşımlarda hem dendritler içerisinde hem de dendritlerarası bölgelerde daha büyük boyutlu olarak yer aldıkları gözlemlendi. Bu durum, %1'den daha düşük oranlarda nikel içeren alaşımların yapısında bulunan  $Al_3Ni$  intermetalik fazının ötektik dönüşüm ürünü, bu oran üzerinde nikel içeren alaşımların yapısında bulunan  $Al_3Ni$  fazının ise ötektik dışı parçacıklar olmasından kaynaklanmaktadır [30,34]. Nikel içeren Zn-Al esaslı alaşımların içyapıları üzerinde daha önceden yapılan çalışmalarda benzer bulgulara rastlanmıştır [13,30-34].

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen çinkoca zengin  $\eta$  ve bakırca zengin  $\epsilon$  fazları ve silisyum parçacıklarından oluştuğu görülmüştür (Şekil 16). Bu yapının oluşumuna ilişkin açıklama daha önceden yayınlanan makalelerde yer almaktadır [21-27]. Bu alaşıma uygulanan homojenleştirme (havada ve fırında soğutma), T6 ve T7 ısıl işlemleri sonrasında dendritik yapının ortadan kalktığı ve bunun yerini alüminyumca zengin  $\alpha$  taneleri ile çinkoca zengin  $\eta$  çökeltilerinin aldığı görüldü (Şekil 17,18,20,21). Önceki araştırmacılar tarafından da gözlenen bu durum aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltilisinin soğuma veya yaşlandırma sırasında ötektoid reaksiyon ile  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarına dönüşmesinden kaynaklanmaktadır [12,14-16,47]. Uygulanan T5 ısıl işleminin bu alaşımın metalografik yapısında belirgin bir değişime yol açmadığı gözlemlendi, Şekil 19. Bu durum söz konusu işlemin kritik dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirilmesinden kaynaklanmaktadır [36]. Bu işlem sırasında yalnız döküm yapısı içerisindeki metastabil fazların dönüşümü söz konusu olmaktadır. Bu tür fazların hacimsel oranlarının çok düşük olması içyapıda belirgin bir değişime yol açmamaktadır [36].

Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dendritik yapısının izotermal dönüşüm işlemi sonunda da ortadan kalkarak bunun yerini ince çökeltiiler içeren geniş  $\alpha$  tanelerinin aldığı görüldü (Şekil 22-24). Ancak dönüşüm sıcaklığı arttıkça çökeltiilerin büyüyerek daha belirgin hale geldikleri belirlendi, Şekil 22-24. Bu durum çekirdeklenme ve büyüme hızının artan sıcaklıkla artmasından kaynaklanmaktadır [45,46,84].

#### 4.2. Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerinin artan nikel oranı ile azaldıkları, nikel oranının %1'in üzerine çıkması durumunda ise genelde arttıkları görüldü (Şekil 27). Ancak artan nikel oranı ile en belirgin azalmanın bu alaşımların kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinde, en belirgin artışın ise sertlikte meydana geldiği belirlendi, Şekil 27. Bu durum nikel katkılarının Zn-40Al-2Cu alaşımlarının sertliğini artırırken mukavemet ve süneklik değerlerini düşürdüğünü göstermektedir Şekil 27. Metalografik incelemeler, alaşımların içyapılarında bulunan  $Al_3Ni$  intermetalik fazının büyüklük, oran ve dağılım biçiminin nikel oranına göre değiştiğini gösterdi (Şekil 10-15). Alaşımların sertliğinin önce azalıp sonra artması, sözü edilen değişimlerden kaynaklanmış olabilir. Çekme dayanımı ile kopma uzamasının ve darbe direncinin artan nikel oranı ile sürekli azalması ise, oluşan  $Al_3Ni$  bileşiğinin daha çok dendritlerarası bölgelerde yer alarak alaşımları gevrekleştirmesinden kaynaklanmış olabilir [13,30-34].

Uygulanan T5, T7 ve fırında soğutma ısıl işlemlerinin Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik ile çekme ve basma dayanımlarını azalttığı, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerini ise artırdığı gözlendi (Tablo 8 ve Şekil 29). Söz konusu alaşımın mekanik özelliklerinde gözlenen bu değişimler katılaşma sırasındaki denge dışı soğumadan kaynaklanan kalıntı gerilmelerin T5 ve T7 ısıl işlemleri sonrasında azalması ve yarı kararlı (metastabil) fazların kararlı (stabil) hale gelmesinden kaynaklanmış olabilir. T6 ve havada soğutma işlemleri sonunda ise alaşımın sertliği ile çekme ve basma dayanımlarının arttığı, darbe direnci ve kopma uzaması değerlerinin azaldığı belirlendi, (Tablo 8 ve Şekil 29). Uygulanan T6 ve T7 ısıl işlemleri sonucunda söz konusu alaşımın özelliklerinde gözlenen bu değişimler yaşlandırma veya çökeltme sertleşmesi olarak bilinen mukavemet arttırma mekanizmasına dayandırılarak açıklanabilir. Bilindiği gibi T6 ısıl işleminde aşırı doymuş katı çözeltilinin yaşlandırılması, T7 ısıl işleminde ise aşırı yaşlandırılması söz konusudur

[84-89]. Yaşlandırma devresinde yeni fazların çökelmeye başlaması nedeniyle ortaya çıkan uyumluluk veya bağdaşıklık gerilmeleri aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltisinin sertlik ve mukavemetinin artmasına, sünekliğinin ise azalmasına neden olur [12,14,51,84-87]. Şöyle ki, yaşlandırma aşamasında çinkoca zengin fazların çökmesi nedeniyle oluşan bağdaşıklık gerilmeleri  $\alpha$  matrisinin kafes yapısının çarpılmasına veya deformasyona uğramasına yol açabilir [12,85]. Kafes yapısında meydana gelen çarpılma da dislokasyon hareketini zorlaştırarak veya belirli ölçüde engelleyerek alaşımın deformasyon direncinin bir ölçüsü olan sertlik ve mukavemet değerlerini artırır [85-87]. Aşırı yaşlandırma devresinde ise, malzeme özelliklerinde bunların tam tersi değişimler meydana gelir. Bu değişimler bağdaşıklık gerilmelerinin zamanla ortadan kalkması ve tane boyutunun büyümesinden kaynaklanır [88,89]. Nitekim çözündürme ve su verme işlemlerine tabi tutulan alaşımın sertliği yaşlandırma sırasında artarak bir tepe noktasına erişmekte ve daha sonra azalmaktadır, Şekil 33. Bu durum çekirdeklenme ve büyüme mekanizmasına göre açıklanabilir. Şöyle ki, yaşlandırma devresinden sonra hem bağdaşıklık gerilmelerinin azalması hem de çökeltilerin büyümesi nedenleriyle alaşımın özelliklerindeki değişim tersine döner ve sertlik ve mukavemet zamanla azalırken, süneklik az da olsa artar. Kısacası yapay yaşlandırma sırasında birbirine ters iki etki ortaya çıkar. Bunlardan biri kafes yapısındaki çarpılma nedeniyle meydana gelen sertleşme, diğeri de bağdaşıklık gerilmelerin azalmasından ve çökeltilerin büyümesinden kaynaklanan yumuşamadır. Bu iki etkinin birbirini dengelediği durumda en yüksek sertliğe erişilir. Dolayısıyla uygulanan ısı işlem sonrası söz konusu alaşımların mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler aşırı doymuş  $\alpha$  katı çözeltisi içerisinde çinkoca zengin fazların çökmesi ve büyümelerinden kaynaklanmaktadır [12,14,87].

Yapılan incelemeler izotermal dönüşüm sıcaklığının Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik ve mukavemet değerleri üzerinde belirli ölçüde etkili olduğunu gösterdi. Nitekim izotermal dönüşüm sıcaklığı arttıkça söz konusu alaşımın sertlik ve mukavemet değerleri azalıp darbe direnci ve kopma uzaması değerleri az da olsa artış sergiledi (Tablo 8 ve Şekil 28). Bu durum dönüşüm sıcaklığının alaşımın içyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerine göre açıklanabilir. Şöyle ki, dönüşüm sıcaklığı arttıkça alaşımın tane yapısı irileşmekte, sertlik ve mukavemeti azalmakta, süneklik değerleri ise artmaktadır [45,46,84-86].

### 4.3. Sürtünme ve Aşınma DeneYlerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

Sabit bir yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), basınç (14 MPa) ve hızda (2 m/s hız) 102 km uzunluğundaki kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si ve Zn-40Al-2Cu(0-2,5)Ni alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerin sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin deneyin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde artıp en yüksek değerlerine ulaştıktan sonra azalarak yaklaşık 8 km'lik kayma yolu sonunda sabitlendiği görüldü (Şekil 34, 35, 39, 40). Deneyin başlangıç aşamasında sürtünme katsayısında ve sıcaklıkta meydana gelen bu ani artış, yüzeylerde yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşmaması nedeniyle ortaya çıkan metal-metal temasından kaynaklanmaktadır [21-27,44,90-92]. Alıştırma devresi olarak adlandırılan bu aşamada hem yüzeylerin birbirine alışmamış olması hem de yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filmi bulunmaması nedenleriyle yüksek sürtünme katsayısı ve sıcaklık gözlemlenmektedir. Ayrıca, deneylerin başlangıç aşamasında bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının hızlı bir şekilde arttığı, ortalama yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve 40 km gibi oldukça uzun bir kayma yolu sonunda her iki büyüklüğün sabit sayılabilecek değerlere yaklaştığı görüldü (Şekil 36, 37, 41, 42). Başlangıç aşamasında hacim kaybında görülen artış, sürtünen yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filminin oluşmaması nedeniyle meydana gelen metal-metal temasından kaynaklanmaktadır [90-95]. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün azalması ise, yüzey pürüzlerinin taşlama işleminde olduğu gibi sürtünme etkisiyle koparılması ve bunların bir kısmının numune yüzeyine sıvanmasından kaynaklanmış olabilir [95]. Alaşımların hacim kaybının ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün belirli bir çalışma süresi veya alınan yol sonunda sabit bir değere ulaşması ise numune yüzeylerinde sıvama tabakası ve oksit filmi oluşumuna dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, numune yüzeyine sıvanan malzeme yüzey pürüzlerini örterek nispeten düzgün bir yüzey oluşturur ve böylece numune yüzeyi disk yüzeyine daha iyi uyum sağlayabilir. Temas yüzeylerinin birbirine alışması anlamına gelen bu durum, alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklığının düşmesine ve dolayısıyla hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin azalmasına yol açabilir.

Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin artan nikel oranı ile sürekli arttığı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve hacim kaybı değerlerinin ise nikel oranına göre farklı değişimler sergiledikleri gözlemlendi, Şekil 38. Bu durum nikel oranı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğünün artmasına rağmen hacim kaybının azalması,



% 0,5 Ni oranının üzerine çıkılması durumunda ise değişimlerin tamamen tersine dönmesi yani ortalama yüzey pürüzlülüğü azalırken hacim kaybının artması şeklinde meydana gelmiştir. Gözlenen bu değişimler söz konusu alaşımların içyapısında bulunan sert  $Al_3Ni$  fazının büyüklüğü, oranı ve dağılım biçimine göre açıklanabilir. Şöyle ki, nikel oranı arttıkça bu alaşımlarda oluşan  $Al_3Ni$  parçacıklarının hem büyüklüğünün hem de yüzde oranının arttığı gözlemlendi, Şekil 10-15. Alaşımlarda oluşan sert  $Al_3Ni$  parçacıkları abrasiv etkisi yaparak yüzeyler arasındaki yağ filminin yırtılmasına neden olduğu gibi karşı yüzeyin çizilmesine de yol açabilir. Yağ filminin yırtılması metal-metal temasını, karşı yüzeyin çizilmesi ise harekete karşı direnci artırır. Her iki etki de sürtünme kuvveti ve dolayısıyla sürtünme katsayısının artmasına yol açar. Sürtünme kuvvetinin artması sürtünme ısısını artırır. Bunun sonucunda alaşımların çalışma sıcaklıklarında artış meydana gelir. Söz konusu alaşımlarda nikel oranının artması nikelce zengin metallere parçacıkların boyut ve yüzde oranını arttırmaktan başka bu parçacıkların yapı içerisindeki dağılım biçimlerini de etkilemektedir [13,30-34]. Metalografik yapıların irdelenmesi sırasında da belirtildiği gibi %1'den daha düşük oranlarda nikel içeren alaşımlarda oluşan nikelce zengin parçacıklar dendritlerarası bölgelerde toplanarak alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin azalmasına yol açmaktadır [34]. Sertlik ve mukavemetin azalması bu alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artmasına neden olmaktadır. Ancak nikel oranı arttıkça nikelce zengin parçacıkların dağılım biçiminde belirgin bir değişim meydana gelmektedir. Şöyle ki, %1'den daha yüksek oranlarda nikel içeren alaşımlardaki nikelce zengin parçacıkların hem dendritlerarası hem de dendritiçi bölgelerde yer aldıkları gözlemlendi, Şekil 11-15. Nikelce zengin parçacıkların  $\alpha$  dendritleri içerisinde yer alması alaşımların ana yapısının (matris) sertliğini arttırmaktadır. Başka bir deyişle alaşımların çekme dayanımı azalırken sertliği artmaktadır. Matris sertliğinin artması nedeniyle %1'den daha yüksek oranlarda nikel içeren alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı artan nikel oranı ile azalmaktadır. Bu alaşımların ortalama yüzey pürüzlülüğü ile hacim kaybı değerlerinin birbirine göre ters değişim sergilemeleri, bu alaşımların aşınma davranışlarına göre açıklanabilir. Şöyle ki, yüzeyden kopan aşınma parçacıklarının bir kısmının geriye transfer olup numune yüzeyine sıvanarak yüzey pürüzlerini örtmesi sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri düşmektedir. Hacim kaybının azalması ise, alaşımların sertliğindeki artış nedeniyle numune yüzeylerinden kopan aşınma parçacıklarının miktarının azalmasından kaynaklanmış olabilir.

Yağ debisi arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 65 ve 660 bronzlarına ait numunelerin sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin azaldığı, ortalama yüzey pürüzlülüğünün ise arttığı görüldü (Şekil 45-48). Söz konusu alaşım ve bronzların sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin artan yağ debisi ile azalması, yüzeyler arasında oluşan yağ filminin kalınlığına göre açıklanabilir. Bilindiği gibi yağ debisi arttıkça yüzeyler arasında oluşan yağ filminin kalınlığı artar. Yağ filmi kalınlığının artması da sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanının azaltmasına yol açar [5,83,94]. Sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanı azaldıkça hem sürtünme katsayısı hem sıcaklık hem de hacim kaybı değerleri azalır. Hacim kaybının azalması, yüzeye sıvanan aşınma parçacığı miktarının azalması anlamına gelir. Sıvanan malzeme (aşınma parçacığı) miktarının yüzey pürüzlerini örtememesi nedeniyle numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinde artış meydana gelir.

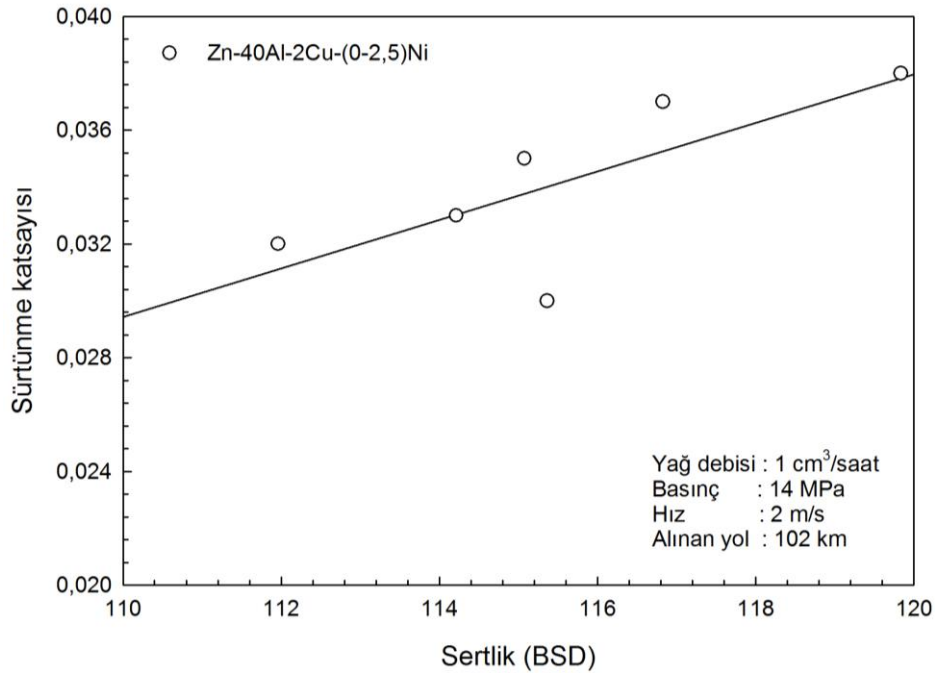
Basınç arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımı ile SAE 65 ve 660 bronzlarının sürtünme katsayısı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sürekli azaldığı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise sürekli arttığı gözlemlendi (Şekil 49-52). Sürtünme katsayısında meydana gelen azalma çalışma sırasında hidrodinamik yağlama koşullarının gerçekleştiğini göstermektedir. Nitekim Stribeck eğrisi yağlı şartlarda çalışan kaymalı yatakların sürtünme katsayısının yalnız hidrodinamik yağlama devresinde artan basınç ile azaldığını göstermektedir [22-27,54,90-95]. Bu durumun yüzeyler arasındaki yağ filminin artan basınçla incelenerek yağ içerisinde meydana gelen sürtünmenin azalmasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir [25-27,54,90-95]. Sıcaklıkta görülen artış, sürtünme kuvvetinin özellikle rodaj döneminde artan basınçla artmasından kaynaklanmış olabilir. Alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının artan basınçla artması ise, deneyin ilk aşamasında metal-metal teması nedeniyle yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, rodaj döneminde sürtünme veya kesme kuvveti artan basınçla artmaktadır. Sürtünme veya kesme kuvvetinin artması da alaşımlarda aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kaybının artmasına yol açmaktadır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin azalması ise yüzey pürüzlerinin, taşlama işleminde olduğu gibi sürtünme etkisiyle koparılması ve bunların bir kısmının numune yüzeyine sıvanarak yüzey pürüzlerini örtmesinden kaynaklanmış olabilir. Basınç arttıkça alaşımların yüzeylerinde oluşan sıvama tabakasının genişlemesi bu görüşü doğrulamaktadır (Şekil 71-126).

Kayma hızının Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımına ait numuneler ile bronzların sürtünme katsayıları üzerinde pek fazla etkili olmadığı, çalışma sıcaklıklarının artan kayma hızı ile sürekli arttığı, hacim kaybı değerlerinin ise artan kayma hızı ile azalıp 2 m/s'lik kayma hızında minimum değerden geçtikten sonra arttığı görüldü (Şekil 53-55). Alaşımın ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ise, hacim kaybı değerlerinin tersine 2 m/s'lik kayma hızına kadar artan kayma hızı ile arttığı ve daha sonra azaldığı gözlemlendi (Şekil 55 ve 56). Kayma hızının söz konusu numunelerin sürtünme katsayıları üzerinde fazla etkili olmaması artan kayma hızı ile yağın sıcaklığının artması sonucunda viskozitesinin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Nitekim çalışma sıcaklığı arttıkça yağın viskozitesinin düştüğü ve iç sürtünmesinin azaldığı bilinmektedir [27,54,90-92]. Yağın iç sürtünmesinin azalması hızın sürtünmeye etkisini dengeleyerek sürtünme katsayısının değişimini engellemiş olabilir. Alaşımın sıcaklığı ile bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybının kayma hızına göre değişimleri çalışma sırasında ortaya çıkan merkezkaç kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, diskin dönme hızı arttıkça disk üzerindeki yağa etki eden merkezkaç kuvveti de artmaktadır. Merkezkaç kuvvetinin artması disk yüzeyinden savrulan yağ miktarının artmasına neden olabilir. Bu durum da numune ile disk yüzeyi arasındaki yağ filmi kalınlığının azalmasına yol açabilir. Yağ filmi kalınlığının yüzeyleri birbirinden ayıracak değerin altına düşmesi durumunda metal-metal teması meydana gelir. Kayma hızı arttıkça yüzeyler arasındaki metal-metal teması artar, bunun sonucunda da numune sıcaklığında sürekli artış meydana gelir. Yağlı sistemlerde aşınma ile meydana gelen hacim kaybının büyük bir bölümünün alıştırma (rodaj) döneminde ortaya çıktığı bilinmektedir [22-27,42,54-56,90-93]. Bu dönemde meydana gelen metal-metal temasının artan kayma hızı ile artması toplam hacim kaybının artmasına yol açar. Bu nedenle kayma hızı arttıkça aşınma numunelerinde meydana gelen hacim kaybı da artar. Hacim kaybı değerlerinin artan kayma hızı ile önce azalıp hızın belirli bir değerin (2 m/s) üzerine çıkması durumunda ise artış göstermesi yüzeyler arasında yağ filmi oluşumu ve yağa etki eden merkezkaç kuvvetine göre açıklanabilir. Şöyle ki, hız arttıkça yüzeyler arasında oluşan yağ filminin kalınlığı artmakta ve metal-metal teması veya sürtünmesi azalmaktadır. Bu durum numunede meydana gelen aşınma miktarının artan hızla azalmasına yol açar. Ancak kayma hızının belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda hacim kaybının artması, oluşan merkezkaç kuvvetinin hem yağ filmine hem de aşınma parçacıklarına etkisinden kaynaklanmış olabilir. Artan kayma hızı ile artan merkezkaç kuvveti hem yağın hem de aşınma parçacıklarının disk yüzeyinden

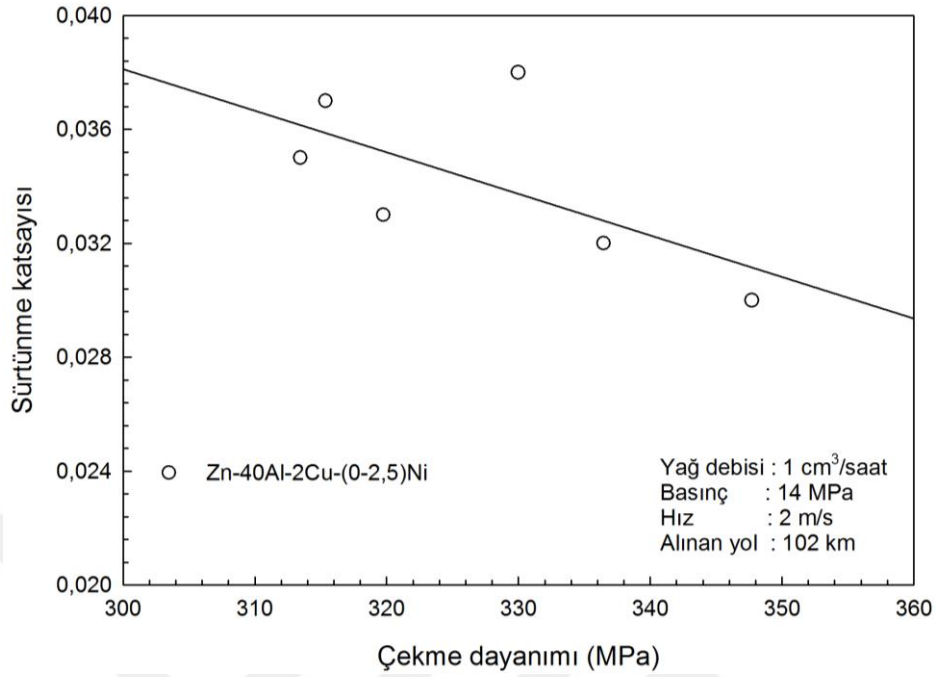
savrulmasına yol açar. Yağ miktarının azalması metal-metal temasına, aşınma parçacıklarının savrulması ise geriye transfer yoluyla numune yüzeyine sıvı malzeme miktarını azalmasına neden olur. Her iki etki de numunede meydana gelen hacim kaybının artmasına yol açar.

#### 4.4. Tribolojik ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulguların Korelasyonu

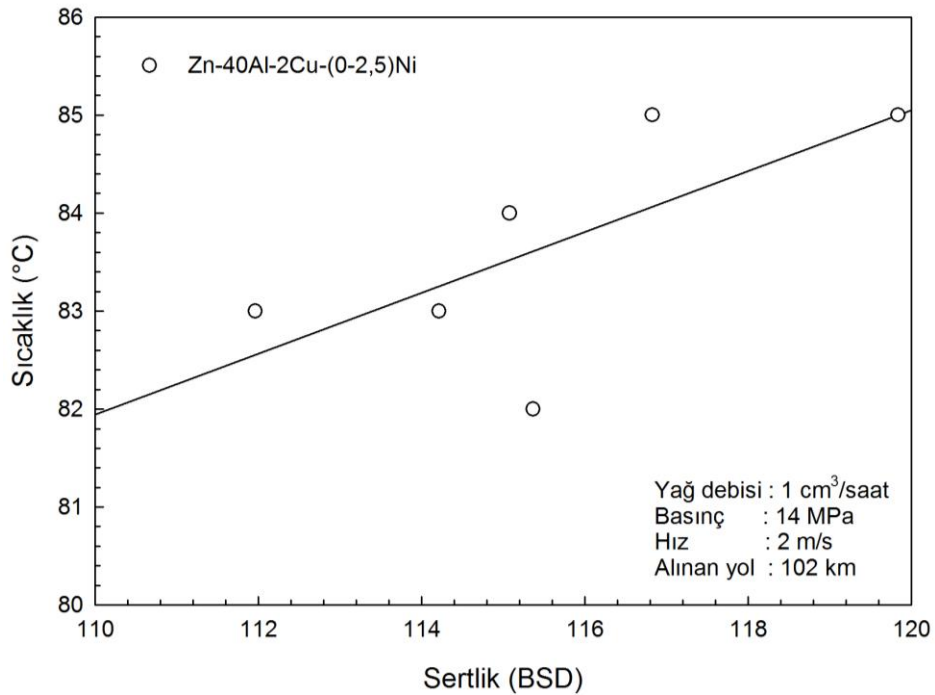
Sabit bir yağ debisi ( $1 \text{ cm}^3/\text{saat}$ ), basınç ( $14 \text{ MPa}$ ) ve hız ( $2 \text{ m/s}$ ) koşullarında  $102 \text{ km}$  uzunluğundaki kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sertlik ve çekme dayanımına göre değişimlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 142-149'da verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artan sertlik ile artıp artan çekme dayanımı ile azaldığını; hacim kaybı değerinin ise artan sertlik ile azalıp artan çekme dayanımı ile arttığını göstermektedir. Önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyumlayan bu durum, yapı içerisinde oluşan sert ve gevrek  $\text{Al}_3\text{Ni}$  fazının söz konusu alaşımların aşınma davranışına etkilerinden kaynaklanmış olabilir.



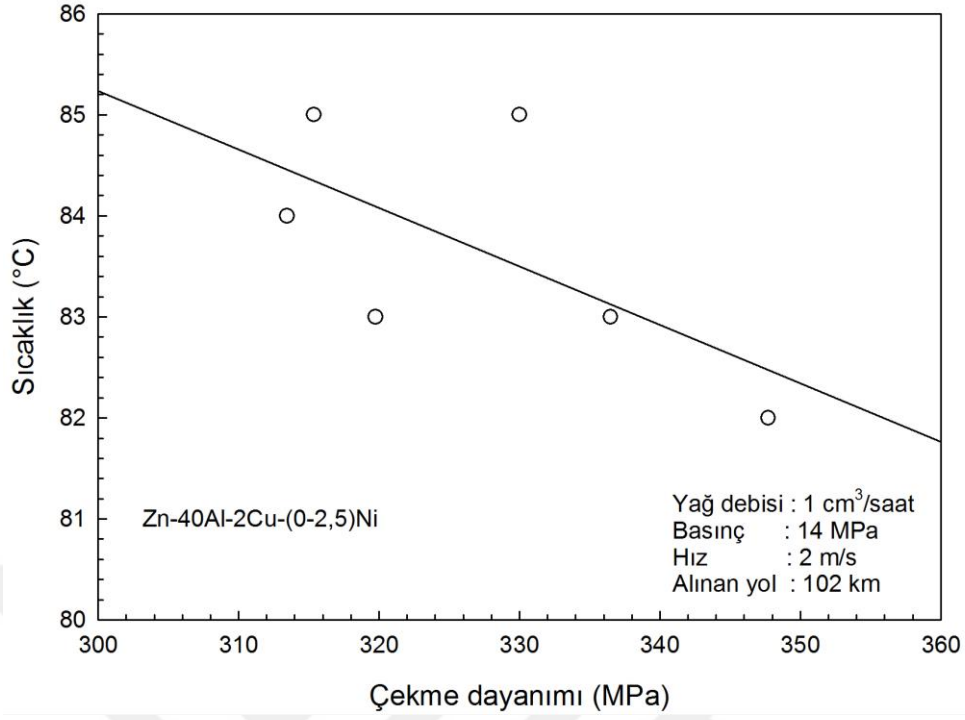
Şekil 142. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik



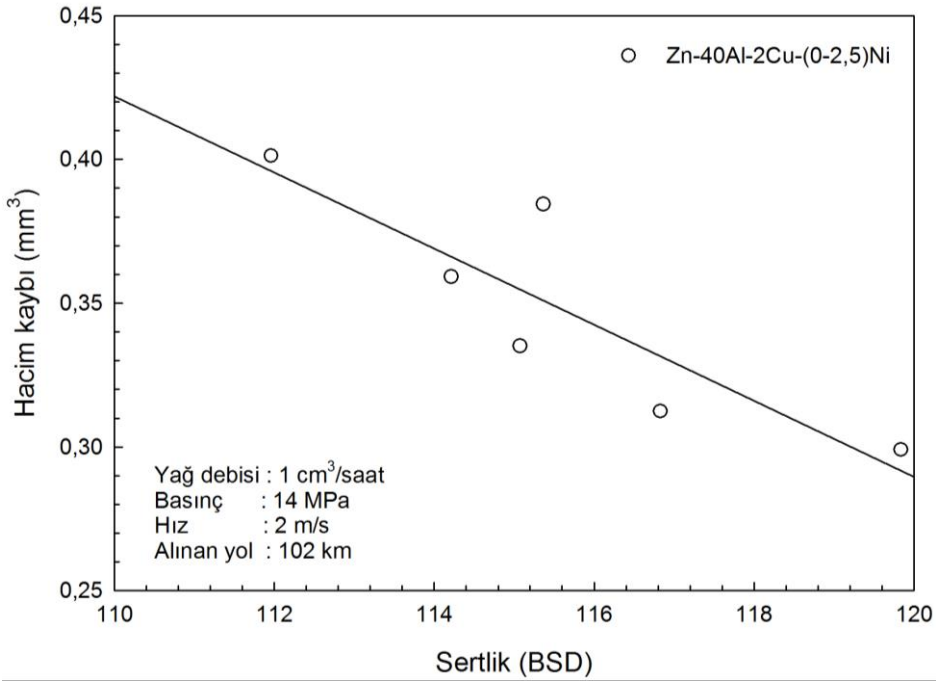
Şekil 143. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik



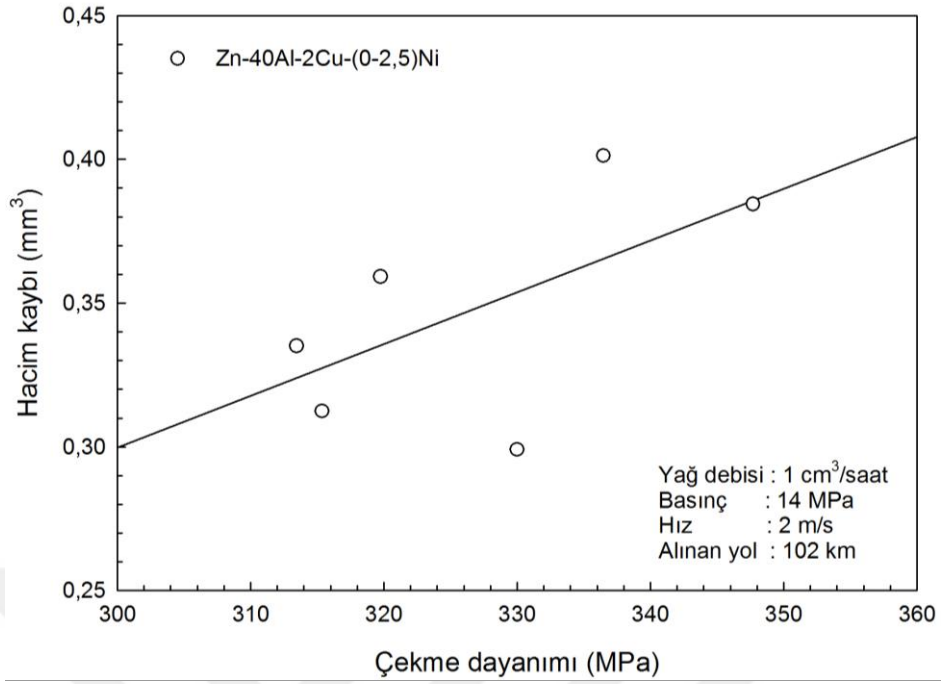
Şekil 144. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sıcaklık değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik



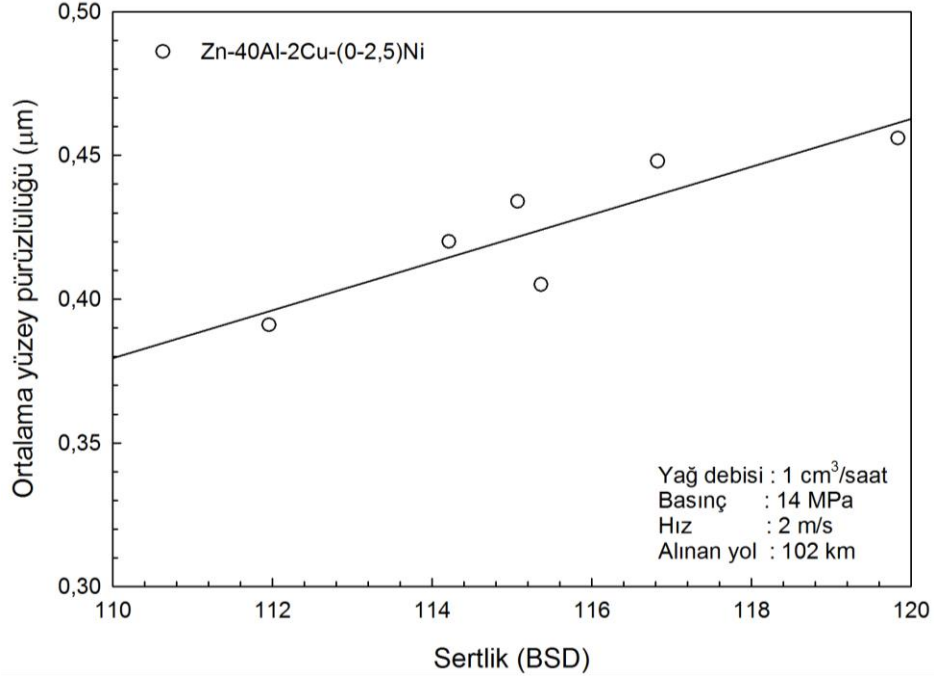
Şekil 145. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sıcaklık değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik



Şekil 146. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının hacim kaybı değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik

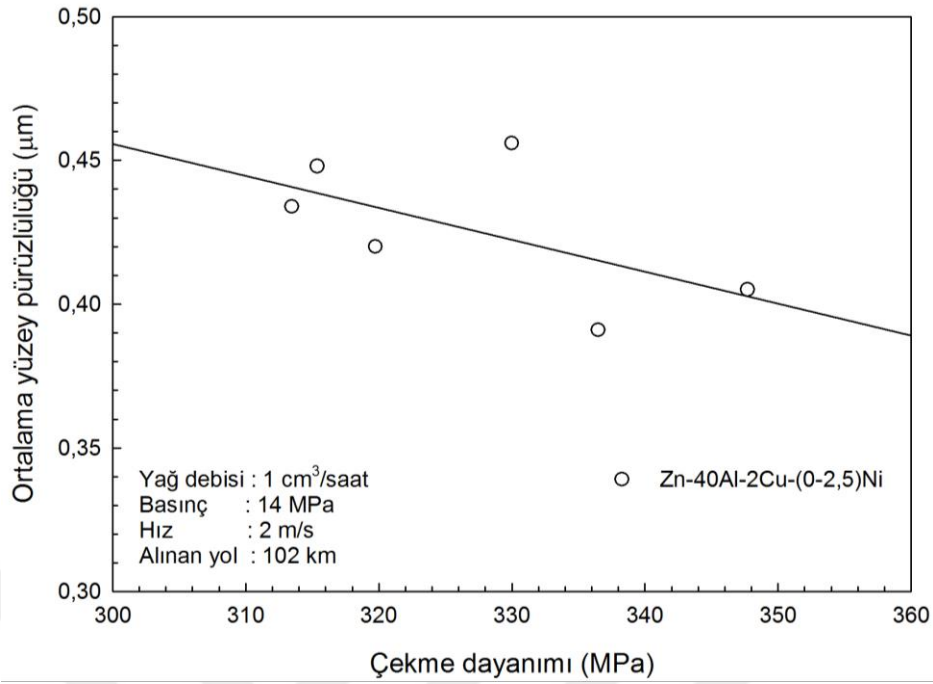


Şekil 147. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının hacim kaybı değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik



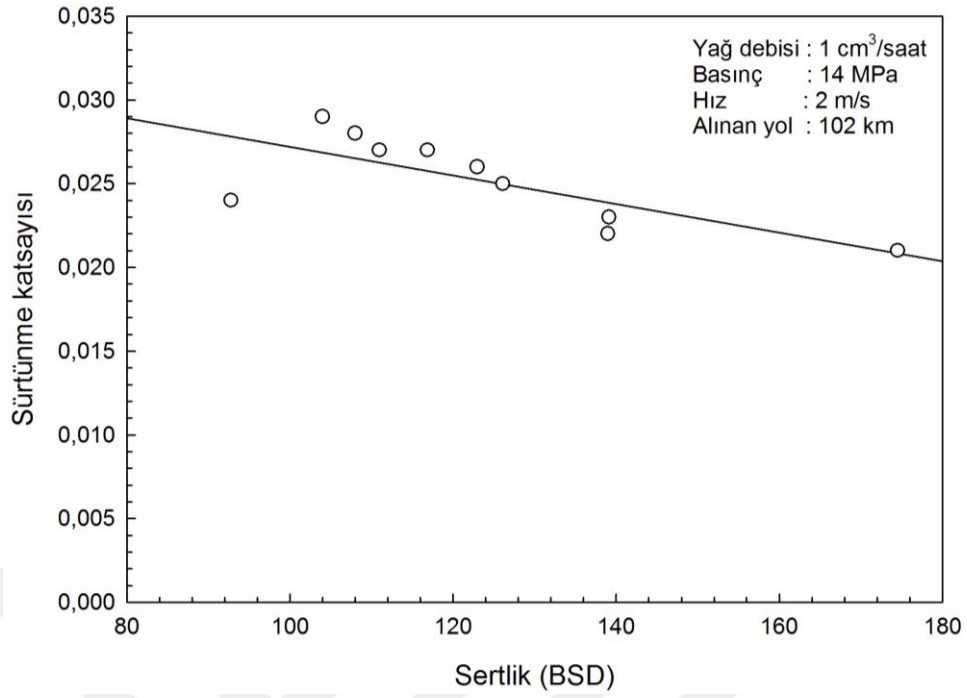
Şekil 148. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik



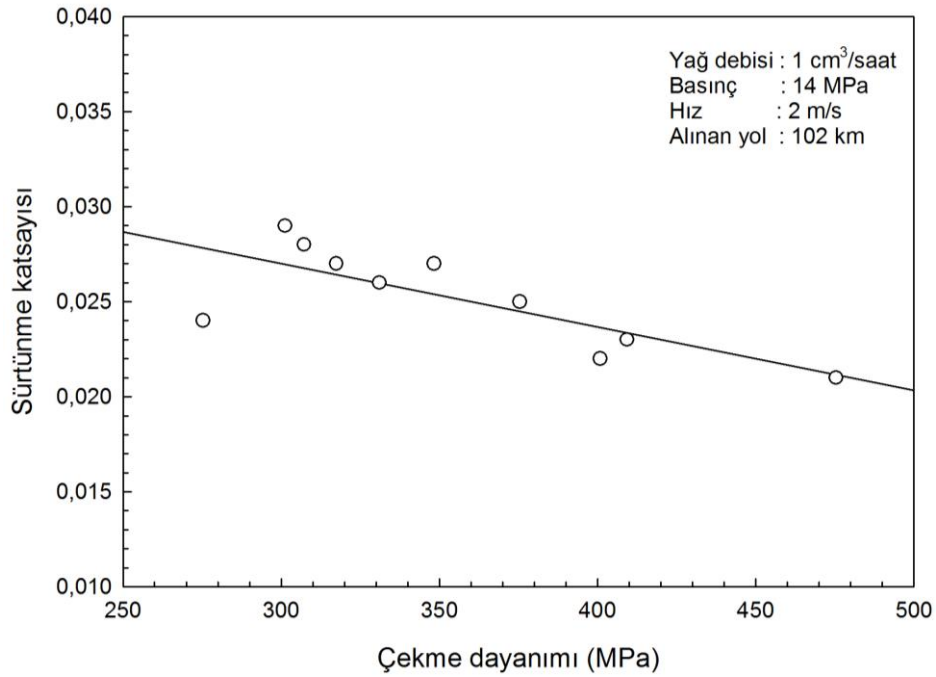


Şekil 149. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik

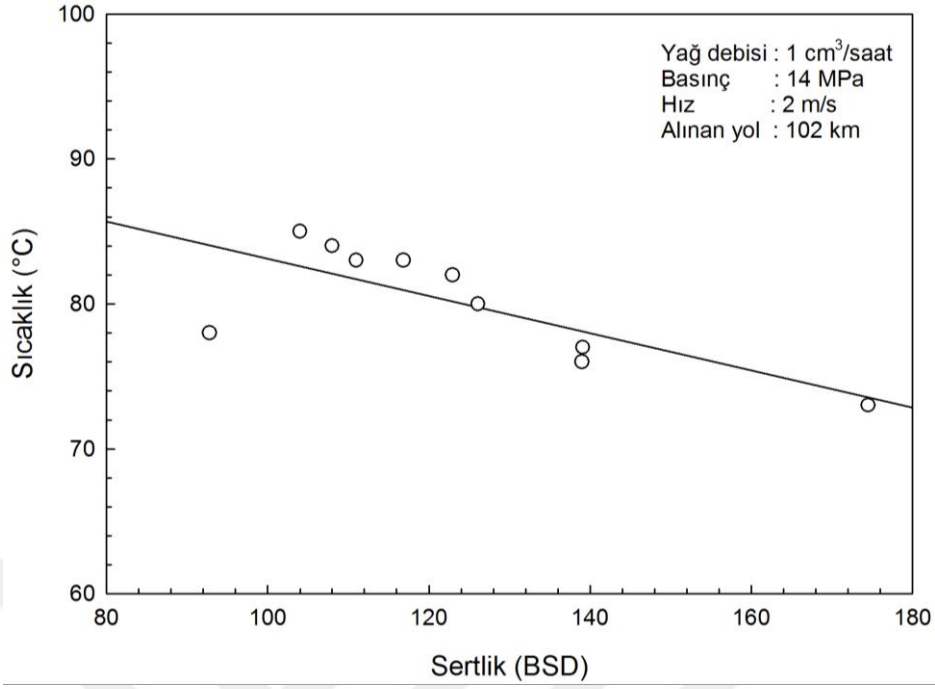
Belirli bir yağ debisi (1 cm<sup>3</sup>/saat), basınç (14 MPa) ve hız (2 m/s hız) koşullarında 102 km uzunluğundaki kayma yolu tamamlanincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı, hacim kaybı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sertlik ve çekme dayanımına göre değişlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 150-157'de verilmiştir. Bu şekiller, söz konusu alaşımın sertlik ve çekme dayanımı arttıkça sürtünme katsayı ve hacim kaybının azaldığını, ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin ise arttığını göstermektedir. Bu durum sürtünmenin adezyon teorisine göre açıklanabilir. Şöyle ki, aşınan malzemenin akma dayanımı arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır. Akma dayanımının artması çekme dayanımının da artmasına yol açar. Bu nedenle incelenen alaşımların çekme dayanımı arttıkça sürtünme katsayısının azalması beklenir. Aşınma ile meydana gelen hacim kaybı yüzeylerin sürtünmesinden kaynaklandığından sürtünme kuvveti veya sürtünme katsayısının azalması hacim kaybının da azalmasına yol açar. Bu nedenle alaşımın sertlik ve çekme dayanımı arttıkça aşınma ile meydana gelen hacim kaybının azalması beklenir.



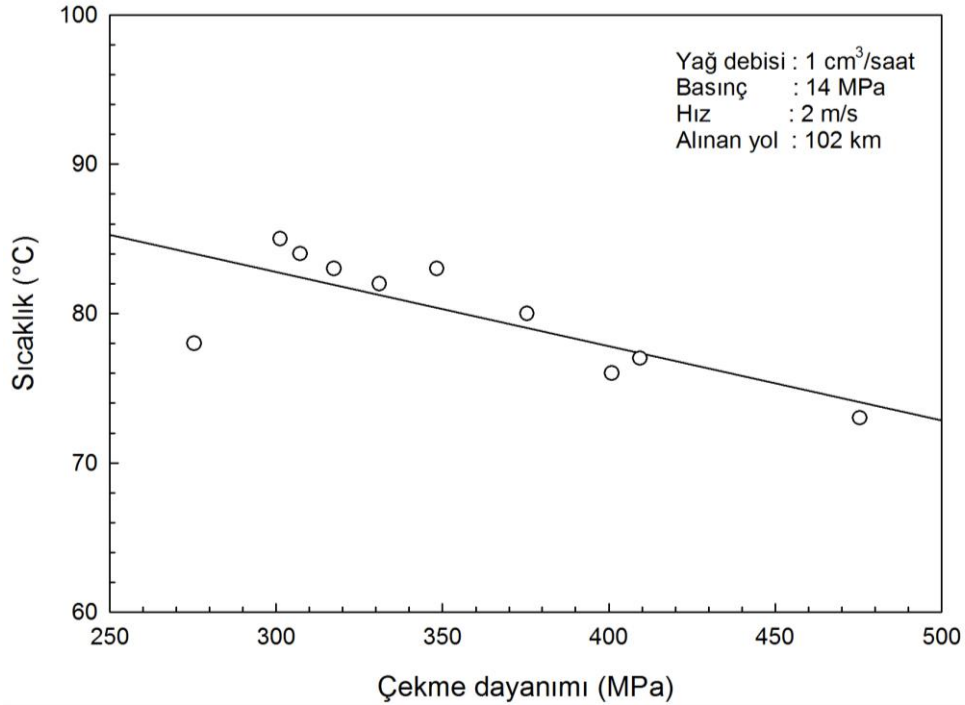
Şekil 150. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik



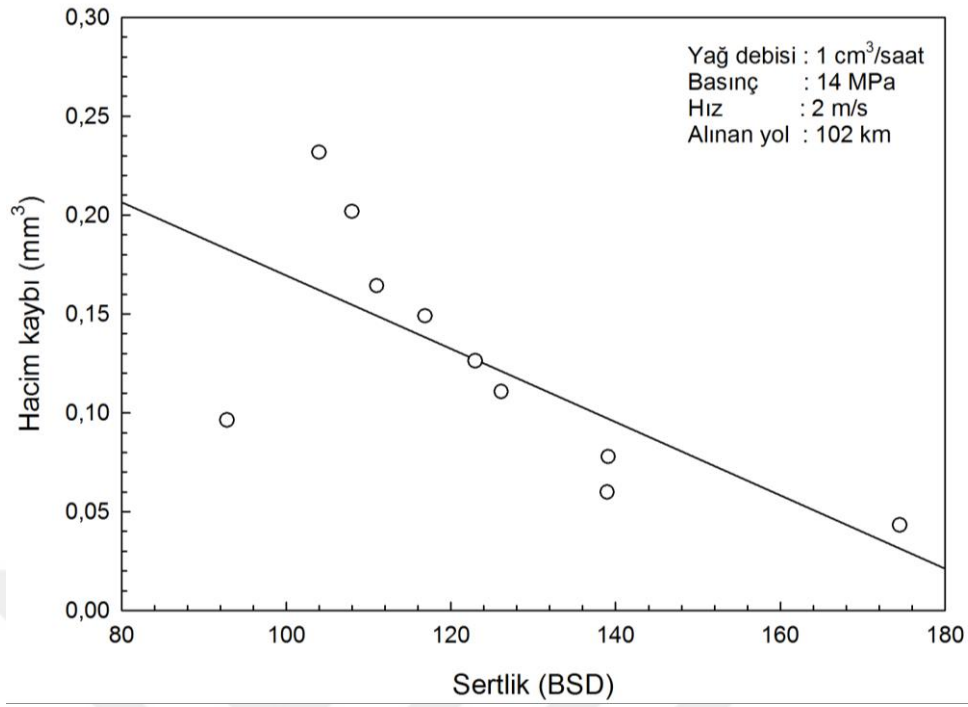
Şekil 151. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik



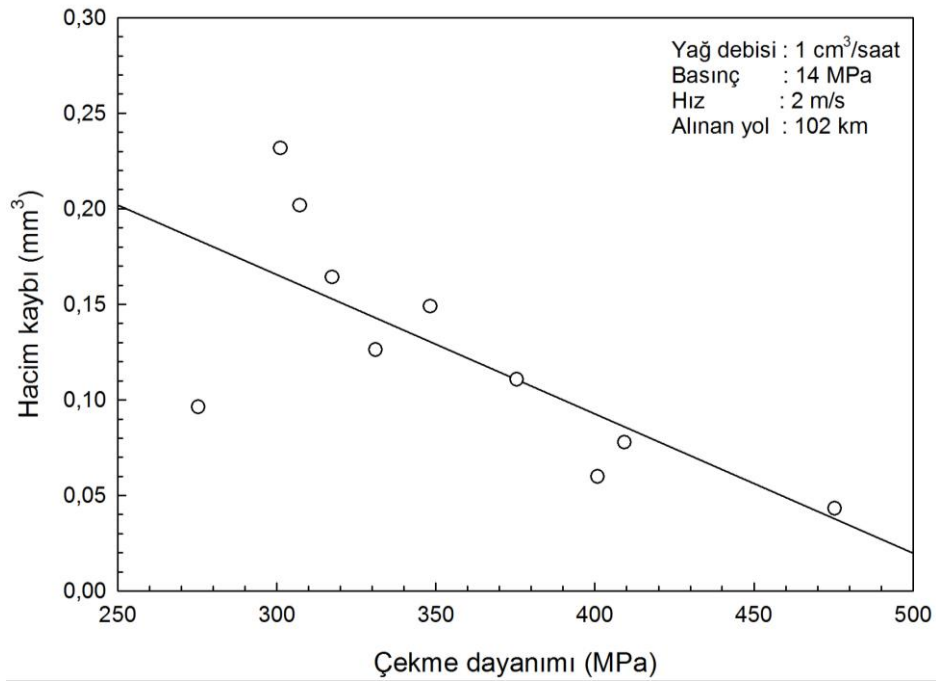
Şekil 152. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sıcaklık değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik



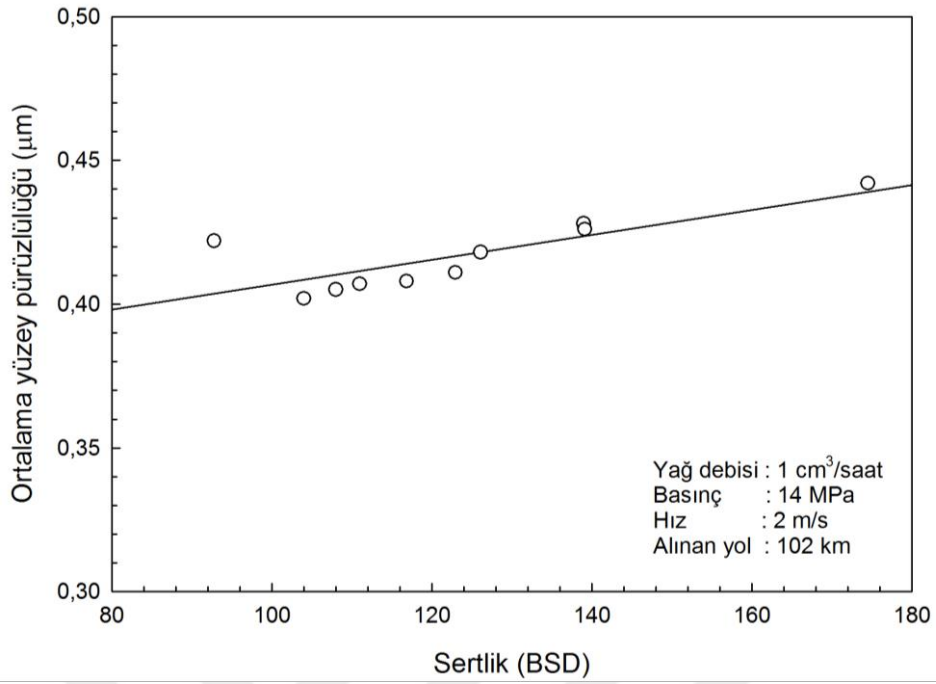
Şekil 153. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sıcaklık değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik



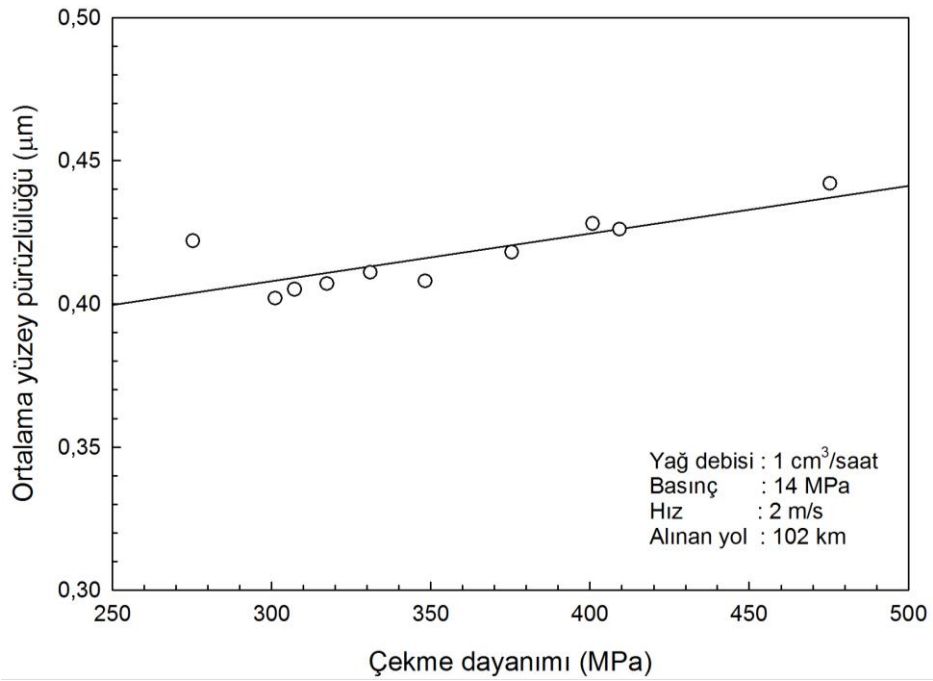
Şekil 154. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının hacim kaybı değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik



Şekil 155. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının hacim kaybı değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik



Şekil 156. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerinin sertliğe göre değişimini gösteren grafik



Şekil 157. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerinin çekme dayanımına göre değişimini gösteren grafik

#### 4.5. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi

SEM ile yapılan incelemeler sonucunda Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-Si alaşımlarına ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde belirgin sıvama tabakalarına rastlanırken SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde derin çizikler ile az miktarda sıvama tabakalarının yer aldığı görüldü (Şekil 57-126). Bu durum söz konusu alaşımlardan aşınma sonucu kopan parçacıkların büyük bir kısmının geri transfer yoluyla yüzeye sıvanmasından, SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından kopan parçacıkların ise yüzeyi çizmesinden ve bunların büyük bir bölümünün yüzeyden uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu bulgular incelenen alaşımlarda adezyonun, bronzlarda ise abrazyonun etkin aşınma mekanizmaları olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunelerinin aşınma yüzeylerinde daha çok sıvanma izlerine rastlanırken ısıtma işlem görmüş durumdaki numunelerinin yüzeylerinde sıvanma belirtilerinin yanı sıra çiziklerin yer aldığı gözlemlendi, Şekil 60-68. Bir başka deyişle dökülmüş durumdaki numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvanma ön plana çıkarken, ısıtma işlem görmüş numunelerin yüzeylerinde sıvanmanın yanı sıra belirgin çizikler oluşmaktadır. Bu gözlem söz konusu alaşımın dökülmüş ve ısıtma işlem görmüş durumlardaki metalografik yapı ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. T5 hariç uygulanan bütün ısıtma işlemlerinin alaşımların dendritik yapılarını kırarak sertlik ve mukavemet değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 17-24 ve Tablo 8). Alaşımların sertliğinin artması aşınan malzeme hacmini azaltırken sert parçacıkların yapıdan kolay ayrılmasına yol açabilir [21-25,30-34]. Yapıdan ayrılan sert parçacıklar gerek ayrılma, gerekse geri transfer veya dönme sırasında numunelerin aşınma yüzeylerinin çizilmesine neden olabilir. Bu gözlemler Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunelerinin aşınmasında adezyonun, ısıtma işlem görmüş durumdaki numunelerinin aşınmasında ise hem adezyon hem de abrazyonun etkin mekanizmalar olduğunu göstermektedir.

Bronzlara ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde ise derin çiziklerle az da olsa sıvama belirtilerine rastlandı, Şekil 69,70. Bu gözlem de söz konusu bronzlar için abrazyonun yanı sıra adezyonun da etkin bir aşınma mekanizması olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan Zn-40Al-2Cu-2Si alaşım ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait aşınma numunelerinin yüzeylerinde oluşan sıvama bölgelerinin artan basınç ve kayma hızı ile genişlediği, çiziklerin ise derinleştiği görüldü (Şekil 113-126). Bu durum

yağ filmi kalınlığının artan basınç ve kayma hızı ile azalması nedeniyle yüzeyler arasında meydana gelen metal-metal temasının artmasından kaynaklanmış olabilir [81-83,90-95].

#### **4.6. Yüzey Altı İncelemelerinden Elde Edilen Bulguların İrdelenmesi**

Aşınma numunelerinin kesitleri üzerinde yapılan SEM incelemeleri özellikle Zn-40Al-2Cu esaslı alaşımlara ait numunelerinin yüzeylerinde kalınlıkları 1-4 µm aralığında değişen tabakalarının oluştuğunu, ancak yüzeylerin altında belirgin yapısal değişimlerin meydana gelmediğini göstermiştir, Şekil 127-140. Ayrıca, numunelerin aşınma yüzeylerinin altında belirgin bir sertlik değişimine rastlanmamıştır (Şekil 141). Bu gözlemler belirtilen test koşullarında aşınma numunelerinde oluşan yüzey basıncı, yüzey altı kayma gerilmesi ve sürtünme ısısı değerlerinin söz konusu alaşımlarda belirgin yapısal dönüşümlere yol açabilecek seviyeye ulaşmadıklarını göstermektedir.



## 5. SONUÇLAR

1. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının içyapıları alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri ile ötektoid  $\alpha + \eta$  ve nikelce zengin  $Al_3Ni$  fazlarından oluşmaktadır.
2. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının içyapısının, alüminyumca zengin göbekli  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid  $\alpha + \eta$  ve bakırca zengin  $\epsilon$  fazları ve silisyum parçacıklarından oluşmaktadır.
3. Homojenleştirme, T6, T7 ve izotermal dönüşüm işlemleri Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dendritik yapısını ortadan kaldırarak bunun yerini geniş  $\alpha$  taneleri ve çinkoca zengin ince çökeltiler ile silisyum parçacıklarından oluşan bir yapının almasını sağlamaktadır. İzotermal dönüşüm sıcaklığı arttıkça çökeltiler büyümekte ve tane sınırları daha belirgin hale gelmektedir. Ancak T5 ısıtma işlemi bu alaşımın içyapısı üzerinde belirgin bir değişime yol açmamaktadır.
4. Ni oranı arttıkça Zn-40Al-2Cu-(0,5-2,5)Ni alaşımlarının sertliği az da olsa artmakta mukavemet, süneklik ve darbe enerjisi değerleri ise önemli ölçüde azalmaktadır.
5. T6 ısıtma işlemi Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerlerini önemli ölçüde arttırmakta, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerini ise azaltmaktadır. T5 (stabilizasyon) ısıtma işlemi ise bu alaşımın sertlik ve mukavemet değerlerini çok daha fazla düşürmektedir. Diğer taraftan havada soğutma işlemi söz konusu alaşımın sertlik, mukavemet ve sünekliğini artırırken fırında soğutma ve T7 ısıtma işlemi sertlik ve mukavemeti azalıp sünekliği artırmaktadır.
6. İzotermal dönüşüm sıcaklığı arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sertlik ve mukavemet değerleri azalmakta, darbe direnci ve kopma uzaması değerleri ise az da olsa artmaktadır.
7. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri artan nikel oranı ile sürekli artmakta, ortalama yüzey pürüzlülüğü ile hacim

kaybı değerleri ise nikel oranına göre farklı değişimler sergilemektedir. Şöyle ki, nikel oranı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü artmakta, hacim kaybı ise azalmaktadır. Nikel oranının % 0,5 seviyesinin üzerine çıkması durumunda ise, sözü edilen değişim tamamen tersine dönmekte yani ortalama yüzey pürüzlülüğü azalırken hacim kaybı artmaktadır.

8. T5 ve T6 ısıtma işlemleri Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerini azaltmakta, T7 ve fırında soğutma ısıtma işlemleri ise bu değerleri artırmaktadır. Ancak T6 ısıtma işlemi bu değerler üzerinde diğer işlemlerden daha etkili olmaktadır. Diğer taraftan sözü edilen değerler ortalama yüzey pürüzlülüğü ile ters orantılı olarak değişmektedir.
9. İzotermal dönüşüm sıcaklığı arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artmakta, ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ise azalmaktadır.
10. Yağ debisi arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri azalmakta, ortalama yüzey pürüzlülüğü ise artmaktadır. Yağ debisinin 1 cm<sup>3</sup>/saat seviyesinin üzerine çıkması durumunda ise sözü edilen bütün değerler hemen hemen sabit kalmaktadır.
11. Basınç arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri azalmakta, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri ise artmaktadır.
12. Kayma hızı arttıkça Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının sürtünme katsayısı pek fazla değişmemekte, çalışma sıcaklığı sürekli artmakta, hacim kaybı değeri ise önce azalıp 2 m/s'lik kayma hızında bir minimumdan geçtikten sonra artmaktadır. Söz konusu alaşımın ortalama yüzey pürüzlülüğü ise hacim kaybının kayma hızına göre gösterdiği değişiminin tersine bir değişim sergilemektedir.
13. Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının dökülmüş ve ısıtma işlemi görmüş durumlardaki bütün numuneleri aynı deney koşullarında SAE 65 ve SAE 660 bronzlarından daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne (R<sub>a</sub>) sahip olmalarına rağmen, daha düşük sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve aşınma kaybı sergilemektedir.

14. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-Si alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarının aşınma yüzeylerinde sıvama tabakaları ve çizikler oluşmaktadır. Nikel içeren alaşımlarda nikel oranı arttıkça bu tabakaların kalınlığı ve çiziklerin derinliği artmaktadır. T6 ısıl işleminin sonrası silisyum içeren alaşımın aşınma yüzeyinde daha belirgin çizik oluşmaktadır. Ancak bronzların aşınma yüzeylerinde, Zn-40Al esaslı alaşımların aşınma yüzeylerine kıyasla daha fazla çizik ve daha düşük oranda sıvanma meydana gelmektedir.
15. Zn-40Al-2Cu-Si alaşımını ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerin aşınma yüzeylerinde oluşan sıvama tabakasının alanı artan basınç ile sürekli artmakta, artan yağ debisi ve kayma hızı ile azalmakta, kayma hızının 2 m/s seviyesinin üzerine çıkması durumunda ise artmaktadır.
16. Seçilen deney koşullarında Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-Si alaşımları ile SAE 65 ve SAE 660 bronzlarına ait numunelerin aşınma yüzeylerinin altında belirgin bir yapısal değişim meydana gelmemektedir. Ancak yüksek basınç altında deneye tabi tutulan aşınma numunelerinin yüzeylerinde sıvama tabakaları oluşmaktadır.
17. Yapılan değerlendirmeler dökülmüş durumdaki Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımlarında sıvanma şeklindeki adezyonun, ısıl işlem görmüş durumdaki alaşımlarda adezyon ve abrazyonun, SAE 65 ve 660 bronzlarında ise abrazyonun baskın aşınma mekanizmaları olduğunu göstermektedir.

## 6. ÖNERİLER

1. Çözündürme ve havada soğutma işlemi sonucunda en yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direnci sergileyen Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımının yorulma ve sürünme davranışları incelenerek tasarım ve malzeme seçimine yönelik önemli bilgiler elde edilebilir.
2. Zn-40Al-2Cu-(0-2,5)Ni alaşımlarından kaymalı yatak yapılarak bunların statik ve dinamik yük altındaki tribolojik davranışları araştırılabilir.



## 7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminum Based Bearings Alloys, Ph.D. Thesis, University of Aston in Birmingham, 1980.
2. Goodwin, F. E. ve Ponikvar, A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, International Lead Zinc Research Organization, Third Edition, USA, January 1989.
3. Calayag, T. ve Ferres, D., High Performance High Aluminum Zinc Alloys for Low Speed Bearings and Bushings, SAE Technical Paper 820643, (1982) 2241-2251.
4. Gervais, E., Levert, H. ve Bess, M., The Development of A Family of Zinc Based Foundry Alloys, American Foundrymen's Society Transaction, 88 (1980) 183-194.
5. Gang, H. and Ma, J., Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy, Wear, 169 (1993) 201-207.
6. Calayag, T., Zinc Alloys Replace Bronze in Mining Equipment Bushings and Bearings, Mining Engineering, (1983)727-728.
7. Riston, T.J., Barnhurst, R.J. ve Mihaichuk, W., Comparative Wear Rate Evaluation of Zinc-Aluminum (ZA) and Bronze Alloys Through Block-on-Ring Testing and Field Applications, Paper No 860064, SAE Annual Conference, Detroit, USA, 1986.
8. Gross, D. K., Zinc Alloys: Specification and Processing, Society of Automotive Engineers, 871952, (1988) 1069-1075
9. Durman, M. ve Murphy, S., Precipitation of Metastabil  $\epsilon$ -Phase in a Hypereutectic Zinc-Aluminum Alloys Containing Copper, Acta Metal. Mater., 39, 10 (1991) 2235-2242.
10. Zhu, Y., Yan, B. ve Huan, W., Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35), Materials Science and Technology, 1, (1995) 109-113.
11. 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.
12. 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.
13. Choudhury, P. ve Das S., Effect of Nickel Aluminides on Tribological Behaviour of Zn-Al Alloy, Material Science and Technology, 19 (2003) 535-537
14. Savaşkan, T. ve Murphy S., Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging, Material Science and Technology, 35, 6 (1990) 695-700.

15. Murphy, S., Solid State Reactions in the Low Copper Part of The Al-Cu-Zn System, Zeitschriftmetalkunde, 71 (1980) 96-102.
16. Savaşkan, T. ve Murphy S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri, 4. Ulusal Metalurji Kongresi, Ankara, Ekim 1986, Bildiriler Kitabı, Cilt II, 532-555.
17. Barnhurst, R. J., Guidelines for Designing Zinc Alloy Bearing a Technical Manuel, Society of Automotive Engineers, 880289, (1988) 2164-2170.
18. Prasad, B. K., Effects of Heat treatment on The Partially Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloys, Materials Transactions JIM, 40, 7 (1999) 578-585.
19. 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.
20. 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.
21. Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T. ve Murphy, S., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Wear, 252 (2002) 894-901.
22. 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.
23. 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.
24. Savaşkan, T. ve Aydiner, A., Effect of Silicon Content on The Mechanical Properties of Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.
25. Savaşkan, T. ve Bican, O., Effects of Silicon Content on the Microstructural Features and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si Alloys, Materials Science and Engineering A, 404 (2005) 259-269.
26. Azaklı Z. and 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.
27. Savaşkan, T. and 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.
28. Barnhurst, R. J., Zinc and Zinc Alloys Metal Handbook, 10<sup>th</sup> Edition, 2, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1991.

29. Lyon, R., New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications, The Institute of British Foundryman, 83rd Annual Conference, Buxton, (1986) 87-97.
30. Prasad, B.K., Microstructure and Tensile Property Characterization of a Nickel-Containing Zinc-Based Alloy: Effect of Heat Treatment and Test Conditions, Materials Science and Engineering A, 277 (2000) 95-101.
31. Prasad, B. K., Effect of Microstructure on the Sliding Wear Performance of a Zn-Al-Ni Alloy, Wear, 240 (2000) 100-112.
32. Choudhury, P., Das, S. ve Datta, B.K., Effect of Ni on the Wear Behavior of a Zinc-Aluminum Alloy, Journal of Material Science, 37 (2002) 2103-2107.
33. 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.
34. Savaşkan, T. and Alemdağ, Y., Effect of Nickel Additions on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Al-40Zn-3Cu Alloy, Wear, 268 (2010) 565-570.
35. Skanazi, A. F., Pelerin, J., Coutsouradis, D., Magnus, B. ve Meeus, M., Some Recent Developments in the Improvement of the Mechanical Properties of Zinc Foundry Alloys, Metall, 37, 9 (1983) 898-902.
36. Savaşkan, T. ve Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, 4. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Eylül 1990, Ankara, Bildiriler Kitabı, 571-584.
37. Lyon, R., The Properties and Application of ZA Alloys, The British Foundryman, 83rd Annual Conference, August 1986, Buxton, 344-349.
38. Delneuville, 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.
39. Zhu, Y. H. and Goodwin, F., Influence of Rare Earth Element Addition on Phase Transformations in the Zn-%27Al Alloy, Journal of Materials Research Society, 8 (1993) 3043-3049.
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. Lyon, R., New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications, The Institute of British Foundryman, 83rd Annual Conference, August 1986, Buxton, 87-97.
42. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25Al-Based Alloys, Wear, 116 (1987) 211-224.



43. Savaşkan, T., Torul, O. ve Çuvalcı H., Çinko-Alüminyum Alaşımlarının İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Ulusal Metalurji Kongresi, Kasım 1988, Ankara, Bildiriler Kitabı II: 794-798.
44. Kubel, E. J., Expanding Horizons for ZA Alloys, Metal Progress, 7 (1987) 51-57.
45. Belk, J. A., Production of Superplastic Zinc-Aluminium Alloys, Metals Technology, 261A (1976) 161-166.
46. Ling, F. W. and Laughlin, D. E., The Kinetics of Transformation in Zn-Al Superplastic Alloys, Metallurgical Transactions A, 10A (1979) 921-928.
47. Murphy S., The Structure of the T' Phase in The System Al-Cu-Zn, Metal Science, 9 (1975) 163-168.
48. Savaşkan, T. ve Murphy S., Metallography of Zn-25%Al Based Alloys in the As-Cast and Aged Conditions, Practical Metallography, 24 (1987) 15-23.
49. Zhu, Y. H. ve Murphy S., A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys, Chinese Journal of Metal Science and Technology, 2 (1986) 103-115.
50. Zhu, Y. H., Phase Equilibria in Zn-Al-Cu-Si Alloys, Chinese Journal of Metal Science and Technology, 5 (1989) 113-118.
51. 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.
52. 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.
53. Zhu, Y. H. ve Goodwin F., Microstructures of Thermomechanically Treated Eutectoid Zn-Al Alloy, Journal of Material Science and Technology, 10 (1994) 121-126.
54. Savaşkan, T. and 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
55. Alemdağ Y. and Savaşkan, T., Effects of Silicon Content on the Mechanical Properties and Lubricated Wear Behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys, Tribology Letters, 29 (2008) 221-227.
56. Alemdağ Y. and Savaşkan, T., Mechanical and Tribological Properties of Al-40Zn-Cu Alloys, Tribology International, 42 (2009) 176-182.

57. Seah, K. W. H., Sharma, S. C. and Giris, B. M., Mechanical Properties of As-cast and Heat-treated ZA27/graphite particulate Composites, Applied Science and Manufacturing, 28 (1997) 251-256.
58. Mihaichuk, W., Zinc-Alloy Bearings Challenge the Bronzes, Machine Design, 53, 28 (1981) 133-137.
59. Funderberger, J. J., Philippe, M. J., Wagner, F. ve Esling, J., Modelling and Prediction of Mechanical Properties for Materials with Hexagonal Symmetry, Acta Materiala, 45 (1997) 4041-4055.
60. Zhu, H. X. ve Liu, S. K., Mechanical Properties of Squeeze-Cast Zinc Alloy Matrix Composites Containing  $\alpha$ -Alumina Fibers, Composites, 24 (1993) 437-442.
61. Presnyakov, A. A., Gorban, Y. A. ve Chrevyakova, V. V., The Aluminium-Zinc Phase Diagram, Russian Journal of Physical Chemistry, 35, 6 (1961) 632-633.
62. Altorfer, K., Zinc Alloys Compete with Bronze in Bearings and Bushings, Metal Progress, 122, 6 (1982) 29-31.
63. Marczak, R.J. ve Ciach, R., Tribological Properties of Concentrated Al-Zn Alloys, Proc.1<sup>st</sup> Europe Tribology Congress, 1973, London, 223-227.
64. Panday, J.P. ve Prasad, B.K., Dry Sliding Wear Behaviour of a Zinc Based Alloy Against Different Counterface Materials, Metallkunde, 88 (1997) 739-743.
65. Torabian, H., Pathak, J.P. ve Tiwari, S.N., Wear Characteristics of Al-Si Alloys, Wear, 172 (1994) 49-58.
66. Savaşkan, T., Bican, O. ve Alemdağ, Y., Developing Aluminium-Zinc Based a New Alloy for Tribological Applications, Journal of Materials Science, 44 (2009) 1969-1976.
67. Prasad, B. K., Patwardhan, A. K. ve Yagneswaran, A. H., Tensile Properties of Some Zn-27.5 wt % Al Alloys as Influenced by Heat Treatment and Test Conditions, Journal of Materials Science Letters, 16 (1997) 1890-1893.
68. Jovanović, M. T., Bobić, I., Djurić, B., Grohovac, N. ve Ilić, N., Microstructural and Sliding Wear Behaviour of a Heat-Treated Zinc-Based Alloy, Tribology Letters, 25 (2007) 173-184.
69. Prasad, B. J., Influence of Heat Treatment Parameters on The Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy, Wear, 257 (2004) 1137-1144.
70. Savaşkan, T., Turhal, M. Ş. ve Murphy, S., Effect of Cooling Rate on Structure and Mechanical Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys, Material Science and Technology, (2003)19-67.

71. Savaşkan, T. ve Turhal, M., Ş., Relationships Between Cooling Rate, Copper Content and Mechanical Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys, Materials Science and Technology, 19 (2003) 67-73.
72. Prasad, B. K., Patwardhan, A.K. ve Yagneswaran, A.H., Microstructural Modifications through Compositional Alterations and Their Influence on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Scripta Materialia, 37, 3 (1997) 323-328.
73. 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.
74. Prasad, B. K., Tensile Properties of Some Zinc-Based Alloys Comprising 27.5% Al: Effects of Alloy Microstructure, Composition and Test Conditions, Materials Science and Engineering A, 245 (1998) 257-266.
75. Prasad, B. K., Effects of Partially Substituting Copper by Silicon on the Physical, Mechanical and Wear Properties of a Zn-37.5%Al-Based Alloy, Materials Characterization, 44 (2000) 301-308.
76. Prasad, B. K., Patwardhan, A. K. ve Yagneswaran, A. H., Influence of Heat Treatment Parameters on the Microstructure and Properties of some Zinc-Based Alloys, Journal of Material Science, 34 (1996) 6317-6324.
77. 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.
78. Bican, O. ve Savaşkan, T., A comparative study of lubricated friction and wear behaviour of Al-25Zn-3Cu-3Si bearing alloy, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228 8 (2014) 896-903.
79. Savaşkan, T. ve Bican, O., Dry sliding friction and wear properties of Al-25Zn-3Cu-3Si alloy, Tribology International, 43 8 (2010) 1346-1352.
80. Savaşkan, T. ve Bican, O., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al-25Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys in the As-Cast and Heat-Treated Conditions, Tribology Letters, 40 3 (2010) 327-336.
81. Calayag, T. S., The Practicality of Using Zinc-Aluminum Alloys for Friction-Type Bearings, 25<sup>th</sup> Annual Conference of Metallurgists, Aug. 1986, Toronto, Ontario, 305-313.
82. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al Based Alloys in an Automotive Engine Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
83. Jian, L., Laufer, E.E. ve Masounave, J., Wear in Zn-Al-Si Alloys, Wear, 165 (1993) 51-56.

84. Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G., Materials Science and Engineering, Çev. Edit. Genel, K., 8. Basımdan çeviri, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti.,Ankara, 2013.
85. Avner, S. H., Introduction to Physical Metallurgy, International Edition, Mc Graw-Hill Book Company, USA, 1974.
86. Dieter, G. E., Mechanical Metallurgy, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1976.
87. Doughlass, D. L. ve Barbee, W., Spinoidal Decomposition in Al/Zn Alloys, Journal of Materials Science, 4 (1969) 138-151.
88. Opphenim, T., Tewfic, S., Scheck, T., Klee, V., Lomeli, S., Dahir, W., Youngren, P., Aizpuru, N., Clarc, R., Lee, E. W., Orgen, J. ve Es-Said, O. S., On the Correlation of Mechanical and physical properties of 6061-T6 and 7249-T76 aluminium alloys, Engineering Failure Analysis, 14 (2007) 218-225.
89. Akhter, R., Ivanchev, L. ve Burger, H. P., Effect of pre/post T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Laser Welded SSM cast A356 Aluminium Alloy, Materials Science and Engineering A, 447 (2007) 192-196.
90. Halling, J. , Principles of Tribology, Macmillan Education Ltd, London, 1989.
91. Hutchings, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold Publisers Ltd.,Great Britain, 1992.
92. Bowden, F. P. ve Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 2001.
93. Barnhurst, R. J. ve Farge, J. C., A Study of the Bearing Characteristics of Zinc-Aluminium (ZA) Alloys, Canadian Metallurgical Quaterly, 27 (1988) 225-233.
94. Bican, O. ve Savaşkan, T., Influence of Test Conditions on the Lubricated Friction and Wear Behaviour of Al-25Zn-3Cu Alloy, Tribology Letters, 37 (2010) 175-182.
95. Azaklı, Z. ve Savaşkan, T., Zn-40Al-2Cu-2Si Alaşımının Sürekli ve Süreksiz Yağlama Durumlarındaki Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”,13<sup>th</sup> International Materials Symposium (IMSP’2010), 13-15<sup>th</sup> October 2010, Pamukkale University, Denizli, TÜRKİYE.

## ÖZGEÇMİŞ

Zeki AZAKLI 1979 yılında Trabzon'un Of ilçesinde doğdu. 1996 yılında Trabzon İmam Hatip Lisesi'ni bitirdi. 2001 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden Makina Mühendisi unvanı ile mezun oldu. 2001 yılında girdiği K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini 2005 yılında tamamladı ve aynı yıl doktora öğrenimine başladı. 2005-2011 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 50/d kadrosunda araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2012 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne Öğretim Görevlisi olarak atandı. Halen bu görevini sürdürmekte olan Zeki AZAKLI'nın yüksek lisans tezinden başka uluslararası hakemli dergilerde yayımlanmış iki adet bilimsel makale ve bir adet de uluslararası bildiri olmak üzere toplam 3 adet bilimsel çalışması bulunmaktadır.