

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

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BAKIR VE/VEYA SİLİSYUM İÇEREN Zn-15Al ESASLI ALAŞIMLARIN**  
**YAPISAL, MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak. Yük. Müh. Ali Paşa HEKİMOĞLU**

**TEMMUZ 2013**  
**TRABZON**

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

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BAKIR VE/VEYA SİLİSYUM İÇEREN Zn-15Al ESASLI ALAŞIMLARIN  
YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mak. Yük. Müh. Ali Paşa HEKİMOĞLU**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22.05.2013**  
**Tezin Savunma Tarihi : 03.07.2013**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN**

**Trabzon 2013**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Ali Paşa HEKİMOĞLU tarafından hazırlanan**

**BAKIR VE/VEYA SİLİSYUM İÇEREN Zn-15Al ESASLI ALAŞIMLARIN  
YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 28/05/2013 gün ve 1507 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
DOKTORA TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN**

  
.....

**Üye : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN**

  
.....

**Üye : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL**

  
.....

**Üye : Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**

  
.....

**Üye : Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK**

  
.....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Çinko esaslı ticari alaşımlar ilk önce 1920'li yılların sonunda Zamak 2, 3, 5 ve 7 adlar altında üretilerek piyasaya sürülmüştür. İkinci Dünya Savaşı sırasında yapılan çalışmalar sonucunda Zamak alaşımlarından daha yüksek oranlarda alüminyum içeren ALZEN 305 (Zn-30Al-5Cu) ve ALZEN 501 (Zn-50Al-1Cu) adlı ticari alaşımlar geliştirilmiştir. Çinko esaslı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar savaş sonrası dönemde de sürdürülmüş ve 1970'li yıllarda ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 adlı ticari alaşımlar geliştirilerek piyasaya sürülmüştür. 1980-2000 yılları arasında yapılan çalışmalar sonucunda ise ötektoid ve monotektoid esaslı Zn-27Al-2Cu, Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımları geliştirilmiştir. 2000 yılından sonra yapılan çalışmalar daha çok Al-Zn esaslı alaşımlar üzerinde yoğunlaşmış ve sonuçta yeni Al-40Zn-3Cu, Al-40Zn-3Cu-2Si, Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımları geliştirilmiştir. Ancak bakır ve silisyumun bileşimi ötektik ve ötektoid noktalar arasında yer alan çinko-alüminyum alaşımlarının yapı ve özelliklerine etkilerinin sistematik ve ayrıntılı biçimde incelenmediği göze çarpmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada bileşimi söz konusu aralıkta yer alan bir ikili Zn-Al alaşımı belirleyip, bakır ve silisyum katkılarının yanı sıra farklı ısıl işlemlerin bu alaşımın yapı ve özelliklerine etkilerini inceleyerek mühendislik uygulamaları için en uygun kimyasal bileşim ve ısıl işlem koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Doktora Tezimde danışmanlığımı üstlenen ve çalışmalarımda çok önemli katkılar yapan hocam sayın Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım katkılarından dolayı Prof. Dr. Servet TİMUR'a, Yrd. Doç. Dr. Osman BİCAN'a, Yrd. Doç. Dr. Yasin Alemdağ'a, Arş. Gör. Zeki AZAKLI'ya, Elk. Müh. Oğuz AKGÜMÜŞ'e ve Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Takım Tezgâhları Laboratuvarında görevli teknisyenlere teşekkür ederim. Bu çalışma KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Kod No: 2008.112.003.2). Bu nedenle ilgili birimin yetkililerine teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma boyunca manevi desteklerini benden esirgemeyen başta sevgili eşim, annem ve babam olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

Ali Paşa HEKİMOĞLU  
Trabzon, 2013

## TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bakır ve/veya Silisyum İçeren Zn-15Al Esaslı Alaşımların Yapısal, Mekanik ve Tribolojik zelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuarlarda 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.  
03/07/2013

Ali Paşa HEKİMOğLU

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XXV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları .....	3
1.2.1. İkili Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı .....	3
1.2.2. Üçlü Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı.....	4
1.2.3. Dörtlü Al-Zn-Cu-Si Faz Diyagramı .....	6
1.3. Çinko Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri ve Özellikleri.....	7
1.3.1. Çinko Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri.....	7
1.3.2. Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri .....	8
1.3.3. Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri .....	8
1.3.4. Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri .....	12
1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı.....	12
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	14
2.1. Alaşımların Üretimi ve Kimyasal Analiz.....	14
2.2. Alaşımların Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	14
2.3. Isıl İşlemler.....	15
2.4. Alaşımların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi .....	16
2.5. Aşınma Yüzeylerinin ve Parçacıklarının İncelenmesi .....	21
3. BULGULAR .....	22
3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri .....	22
3.2. Alaşımlarının Metalografik İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular.....	23
3.3. Fiziksel ve Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulgular .....	34
3.4. Sürtünme ve Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulgular .....	40

3.5.	Yağsız (Kuru) Durumda Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Numunelerin Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular .....	77
3.6.	Yağlı Deneye Tabi Tutulan Aşınma Numunelerinin Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular .....	92
3.7.	Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Numunelerin Yüzey Altı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular .....	113
3.8.	Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular .....	126
4.	İRDELEME.....	134
4.1.	Metalografik İncelemelerinden Elde Edilen Bulguların İrdelemesi.....	134
4.2.	Mekanik Deneylerden Elde Edilen Bulguların İrdelemesi.....	135
4.3.	Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulguların İrdelemesi .....	137
4.4.	Mekanik ve Tribolojik Deneylerden Elde Edilen Bulguların Korelasyonu .....	143
4.5.	Aşınma Yüzeyleri, Yüzey Altı Bölgeleri ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelemesi .....	148
5.	SONUÇLAR .....	153
6.	ÖNERİLER .....	156
7.	KAYNAKLAR.....	157
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

BAKIR VE/VEYA SİLİSYUM İÇEREN ZN-15AL ESASLI ALAŞIMLARIN YAPISAL  
MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ali Paşa HEKİMOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN  
2013, 163 Sayfa

Bu çalışmada beş adet ikili Zn-(5-25)Al, beş adet üçlü Zn-15Al-(1-5Cu) ve altı adet Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Üretilen alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlarda incelendi. Aşınma deneyleri blok-disk esaslı bir aşınma deney düzeneği yardımıyla gerçekleştirildi.

İkili Zn-15Al alaşımının içyapısının  $\beta$  dendritleri ile ötektik ( $\beta + \eta$ ) ve ötektoid ( $\alpha + \eta$ ) karışımlardan, üçlü Zn-15Al-(3-5)Cu alaşımlarının içyapılarının Zn-15Al alaşımının yapısında bulunan fazlar ile  $\varepsilon$  fazından, dördü Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının içyapılarının ise üçlü alaşımların yapılarında yer alan fazlar ile silisyum parçacıklarından oluştuğu görüldü. Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına uygulanan T5 ısıl işleminin bu alaşımların dendritik yapılarında belirgin bir değişime yol açmadığı, ancak  $\varepsilon$  fazının parçalanmasına neden olduğu görüldü. T7 ısıl işleminin ise bu alaşımların dendritik yapılarını tamamen ortadan kaldırdığı ve ayrıca  $\varepsilon$  fazının kısmen dönüşerek T' fazının oluşmasına yol açtığı gözlemlendi. Üçlü alaşımlar içerisinde en yüksek çekme dayanımı ve aşınma direnci Zn-15Al-3Cu alaşımından, dördü alaşımlar içerisinde en yüksek çekme dayanımı ve aşınma direnci ise Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımından elde edildi. Uygulanan T5 ve T7 ısıl işlemlerinin bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin yanı sıra aşınma dirençlerinin de azalmasına yol açtığı gözlemlendi. İncelenen Zn-15Al esaslı alaşımların aşınma dirençlerinin sertlikten çok çekme dayanımına bağlı olduğu belirlendi. Zn-15Al esaslı üçlü ve dördü alaşımların Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzuna göre, özellikle yağsız durumda çok daha üstün aşınma davranışı sergiledikleri gözlemlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Zn-15Al Esaslı Alaşımlar, Zn-15Al-3Cu, Zn-15Al-3Cu-1Si, İçyapı, Mekanik Özellikler, Sürtünme ve Aşınma.



PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL AND  
TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF Zn-15Al BASED ALLOYS CONTAINING  
COPPER AND/OR SILICON

Ali Paşa HEKİMOĞLU

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Temel SAVAŞKAN  
2013, 163 Pages

In this study, five binary Zn-(5-25)Al, five ternary Zn-15Al-(1-5)Cu and six quaternary Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alloys were prepared by permanent mould casting. Their structural, mechanical and tribological properties were investigated in the as-cast and heat treated conditions. Friction and wear tests were carried out using a block-on-disc machine.

The microstructure of the binary Zn-15Al alloy consisted of  $\beta$  dendrites, eutectic ( $\beta + \eta$ ) and eutectoid ( $\alpha + \eta$ ) mixtures. Ternary Zn-15Al-(3-5)Cu alloys contained  $\epsilon$  phase in addition to the phases present in the binary alloy and quaternary Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alloys revealed silicon particles in addition to the phases present in the ternary alloys. T5 heat treatment had no significant effect on the dendritic microstructures of Zn-15Al-3Cu and Zn-15Al-3Cu-1Si alloys. However, the dendritic microstructure of these alloys was completely removed after T7 heat treatment which also caused the formation of T' phase by decomposition of  $\epsilon$  phase. Among Zn-15Al based ternary and quaternary alloys the highest tensile strength and wear resistance were obtained with Zn-15Al-3Cu and Zn-15Al-3Cu-1Si alloys, respectively. T5 and T7 heat treatments reduced the hardness, strength and wear resistance of these alloys. In addition, the wear resistance of the Zn-15Al based alloys was observed to be dependent upon their tensile strength rather than their hardness. The wear resistance of Zn-15Al based ternary and quaternary alloys was found to be much higher than those of Al-12Si alloy and SAE 660 bronze especially in dry sliding condition.

**Key Words:** Zn-15Al Based Alloys, Zn-15Al-3Cu, Zn-15Al-3Cu-1Si, Microstructure, Mechanical Properties, Friction and Wear.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.	İkili çinko-alüminyum faz diyagramı..... 4
Şekil 2.	Üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki kesiti ..... 5
Şekil 3.	Dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri..... 6
Şekil 4.	Aşınma deney düzeneğinin önden görünümü ..... 18
Şekil 5.	Aşınma deney düzeneğinin üstten görünümü ..... 18
Şekil 6.	Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı ..... 19
Şekil 7.	Aşınma deney düzeneğinin diski ile deneylerde kullanılan numune, numune tutucusu ve yük hücresinin yakından görünümü..... 19
Şekil 8.	Sürtünme ve aşınma deney numunesinin teknik resmi ..... 20
Şekil 9.	Zn-15Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü..... 24
Şekil 10.	Zn-15Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü..... 25
Şekil 11.	Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü..... 25
Şekil 12.	Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinden yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü ..... 26
Şekil 13.	Zn-15Al-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü..... 26
Şekil 14.	Zn15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtılmasına tabi tutulmuş numunesinin içyapısı ..... 27
Şekil 15.	Zn15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtılmasına tabi tutulmuş numunesinden yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü ..... 27
Şekil 16.	Zn15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılmasına tabi tutulmuş numunesinin içyapısı ..... 28
Şekil 17.	Zn15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılmasına tabi tutulmuş numunesinden yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü ..... 28
Şekil 18.	Zn15Al-3Cu alaşımında 50 saatlik yapay yaşlandırma süresi sonunda oluşan içyapının görünümü ..... 29
Şekil 19.	Zn15Al-3Cu alaşımında 100 saatlik yaşlandırma süresi sonunda oluşan içyapının görünümü ..... 29
Şekil 20.	Zn15Al-3Cu alaşımında 100 saatlik yaşlandırma süresi sonunda oluşan içyapının yüksek büyütmedeki görünümü ..... 30

Şekil 21.	Zn-15Al-3Cu-0,5Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü.....	30
Şekil 22.	Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü.....	31
Şekil 23.	Zn-15Al-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü.....	31
Şekil 24.	Zn15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görüntüsü .....	32
Şekil 25.	Zn15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görüntüsü .....	32
Şekil 26.	Al-12Si alaşımının içyapısının görünümü.....	33
Şekil 27.	SAE 660 bronzunun içyapısı.....	33
Şekil 28.	İkili Zn-(5-25)Al alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması, basma dayanımı ve yoğunluk değerlerinin alüminyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	34
Şekil 29.	Zn-15Al-(0-5)Cu alaşımlarının çekme ve basma dayanımları ile kopma uzaması değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	36
Şekil 30.	Zn-15Al-(0-5)Cu alaşımlarının setlik, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	36
Şekil 31.	Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarının çekme dayanımı, basma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	37
Şekil 32.	Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarının sertlik, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	37
Şekil 33.	Zn-15Al-(0-5)Cu alaşımlarının içyapılarında bulunan $\beta$ fazı ve ( $\beta+\eta$ ) ötektik karışımının mikrosertlik değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	38
Şekil 34.	Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarının içyapısında bulunan $\beta$ fazı ve ( $\beta+\eta$ ) ötektik karışımının mikrosertlik değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	38
Şekil 35.	Zn-15Al-3Cu alaşımının sertlik ve boy değişimi değerlerinin T5 ısıl işlemi sırasındaki değişimlerini gösteren eğriler.....	39
Şekil 36.	Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında 180°C sıcaklıkta yaşlandırılan Zn-15Al-3Cu alaşımının sertlik ve boyunda meydana gelen değişimlerin yaşlandırma süresine göre değişimlerini gösteren eğriler .....	39
Şekil 37.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	42

Şekil 38.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	42
Şekil 39.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	43
Şekil 40.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	43
Şekil 41.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	44
Şekil 42.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	44
Şekil 43.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	45
Şekil 44.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	45
Şekil 45.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	46
Şekil 46.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	46
Şekil 47.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıtılmış (T5 ve T7) görmüş numunelerinde meydana gelen hacim kaybı değerlerini gösteren çubuk diyagramı.....	47
Şekil 48.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	47
Şekil 49.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	48
Şekil 50.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	48

Şekil 51.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	49
Şekil 52.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	49
Şekil 53.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	50
Şekil 54.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	50
Şekil 55.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	51
Şekil 56.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	51
Şekil 57.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	52
Şekil 58.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	52
Şekil 59.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	53
Şekil 60.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	53
Şekil 61.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	54

Şekil 62.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	54
Şekil 63.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	55
Şekil 64.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarında meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	55
Şekil 65.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarında meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	56
Şekil 66.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	56
Şekil 67.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	57
Şekil 68.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	57
Şekil 69.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	58
Şekil 70.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler .....	58
Şekil 71.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	59
Şekil 72.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinde meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	59
Şekil 73.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılmış numunelerinde meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	60
Şekil 74.	Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	60
Şekil 75.	Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	61

Şekil 76.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler .....	61
Şekil 77.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	62
Şekil 78.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	62
Şekil 79.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	63
Şekil 80.	Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	63
Şekil 81.	Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler .....	64
Şekil 82.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler .....	64
Şekil 83.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	65
Şekil 84.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	65
Şekil 85.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	66
Şekil 86.	Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler.....	66
Şekil 87.	Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler .....	67

Şekil 88.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler .....	67
Şekil 89.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	68
Şekil 90.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	68
Şekil 91.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	69
Şekil 92.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	71
Şekil 93.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler.....	71
Şekil 94.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	72
Şekil 95.	Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	72
Şekil 96.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımının sıcaklık, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	73
Şekil 97.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sıcaklık, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler.....	73
Şekil 98.	Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler .....	74
Şekil 99.	SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler .....	74
Şekil 100.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	75
Şekil 101.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler.....	75



Şekil 102.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	76
Şekil 103.	Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler .....	76
Şekil 104.	Zn-15Al-3Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü .....	78
Şekil 105.	Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımına ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü .....	78
Şekil 106.	Al-12Si alaşımına ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü .....	79
Şekil 107.	SAE 660 bronzuna ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü .....	79
Şekil 108.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız (kuru) aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	80
Şekil 109.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	80
Şekil 110.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	81
Şekil 111.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	81
Şekil 112.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	82
Şekil 113.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	82
Şekil 114.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	83
Şekil 115.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	83

Şekil 116.	1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	84
Şekil 117.	5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	84
Şekil 118.	0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	85
Şekil 119.	2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	85
Şekil 120.	1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	86
Şekil 121.	5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	86
Şekil 122.	0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	87
Şekil 123.	2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	87
Şekil 124.	1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	88
Şekil 125.	5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	88
Şekil 126.	0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	89
Şekil 127.	2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	89
Şekil 128.	1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	90
Şekil 129.	5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	90

Şekil 130.	0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	91
Şekil 131.	2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	91
Şekil 132.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	93
Şekil 133.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	93
Şekil 134.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	94
Şekil 135.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	94
Şekil 136.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	95
Şekil 137.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-0,5Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	95
Şekil 138.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	96
Şekil 139.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	96
Şekil 140.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	97
Şekil 141.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	97
Şekil 142.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	98
Şekil 143.	Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	98

Şekil 144.	0,25 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	99
Şekil 145.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	99
Şekil 146.	3 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	100
Şekil 147.	1 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	100
Şekil 148.	8 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	101
Şekil 149.	0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	101
Şekil 150.	3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	102
Şekil 151.	0,25 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	102
Şekil 152.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	103
Şekil 153.	3 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	103
Şekil 154.	1 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	104

Şekil 155.	8 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	104
Şekil 156.	0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	105
Şekil 157.	3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	105
Şekil 158.	0,25 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	106
Şekil 159.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	106
Şekil 160.	3 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	107
Şekil 161.	1 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	107
Şekil 162.	8 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	108
Şekil 163.	0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	108
Şekil 164.	3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü .....	109
Şekil 165.	0,25 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	109
Şekil 166.	1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	110
Şekil 167.	3 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	110

Şekil 168.	1 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	111
Şekil 169.	8 MPa'lık basınç, 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	111
Şekil 170.	0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	112
Şekil 171.	3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm <sup>3</sup> /saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü.....	112
Şekil 172.	Yağlı durumda kısa mesafeli aşınma deneyine (yağ debisi: 1 cm <sup>3</sup> /saat, basınç: 8 MPa basınç, kayma hızı: 2 m/s, yol: 108 km) tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	114
Şekil 173.	Yağlı durumda kısa mesafeli aşınma deneyine (yağ debisi: 1 cm <sup>3</sup> /saat, basınç: 8 MPa, kayma hızı: 2 m/s, yol: 108 km) tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	114
Şekil 174.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	115
Şekil 175.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	115
Şekil 176.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	116
Şekil 177.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	116
Şekil 178.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	117
Şekil 179.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	117

Şekil 180.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımına ait numunenin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	118
Şekil 181.	Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü .....	118
Şekil 182.	Yağsız durumda 1MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	119
Şekil 183.	Yağsız durumda 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	119
Şekil 184.	Yağsız durumda 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	120
Şekil 185.	Yağsız durumda 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	120
Şekil 186.	Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	121
Şekil 187.	Yağsız durumda 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	121
Şekil 188.	Yağsız durumda 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	122
Şekil 189.	Yağsız durumda 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü.....	122
Şekil 190.	Zn-15Al-3Cu alaşımının yağsız aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumlardaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler .....	123

Şekil 191.	Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının yağsız aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler .....	123
Şekil 192.	İki farklı basınçta (1MPa ve 5MPa) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler .....	124
Şekil 193.	İki farklı hızda (0,5 m/s ve 2,5 m/s) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler .....	124
Şekil 194.	İki farklı basınçta (1MPa ve 5MPa) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler.....	125
Şekil 195.	İki farklı hızda (0,5 m/s ve 2,5 m/s) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler.....	125
Şekil 196.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .....	127
Şekil 197.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü.....	127
Şekil 198.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılmış işlemi görmüş numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .....	128
Şekil 199.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtılmış işlemi görmüş numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .....	128
Şekil 200.	3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü.....	129
Şekil 201.	1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .....	129
Şekil 202.	5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .....	130
Şekil 203.	0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .....	130



Şekil 204.	2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü .....	131
Şekil 205.	1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü.....	131
Şekil 206.	5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü.....	132
Şekil 207.	0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü.....	132
Şekil 208.	2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü.....	133
Şekil 209.	Zn-15Al esaslı alaşımlarda (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin sürtünme katsayısına göre değişimlerinin gösterimi.....	144
Şekil 210.	Zn-15Al esaslı alaşımların (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda sürtünme katsayısı değerlerinin sertliğe göre değişimlerini gösteren grafikler .....	145
Şekil 211.	Zn-15Al esaslı alaşımlarda (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının sertliğe göre değişimlerini gösteren grafikler.....	146
Şekil 212.	Zn-15Al esaslı alaşımların (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda sürtünme katsayısı değerlerinin çekme dayanımına göre değişimlerini gösteren grafikler.....	147
Şekil 213.	Zn-15Al esaslı alaşımlarda (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının çekme dayanımına göre değişimlerinin grafiksel gösterimi.....	148

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.	İkili çinko-alüminyum alaşımlarında meydana gelen dönüşümler ..... 4
Tablo 2.	Çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri ..... 6
Tablo 3.	Çinko esaslı bazı ticari alaşımların kimyasal bileşimleri ..... 7
Tablo 4.	Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri ..... 8
Tablo 5.	Çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri ..... 11
Tablo 6.	Sürtünme ve aşınma deneylerine ilişkin koşullar ..... 20
Tablo 7.	Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri ..... 22
Tablo 8.	SAE 660 Bronzu ve Al-12Si alaşımının kimyasal bileşimleri ..... 22
Tablo 9.	Zn-15Al-(0-5)Cu-(0-3)Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması, basma dayanımı ve darbe direnci değerleri ..... 35
Tablo 10.	Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Al-12Si alaşımından elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerleri ..... 70

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Çinko esaslı ticari alaşımlar ilk önce 1920'li yılların sonunda Zamak 2, 3, 5 ve 7 adlar altında üretilerek piyasaya sürülmüştür. Üretim ve şekillendirilmesi kolay ve ekonomik olan bu alaşımlar yeterli mukavemet ve aşınma dirençleri sayesinde pek çok mühendislik uygulamasında başarıyla kullanılmıştır [1-4]. İkinci Dünya Savaşı sırasında karşılaşılan yatak malzemesi sorununu gidermek amacıyla Almanya'da Zamak alaşımlarından daha yüksek oranlarda alüminyum içeren çinko esaslı alaşımlar üzerine yoğun araştırmalar yapılmıştır [1-5]. Bu çalışmalar sonucunda ALZEN 305 (Zn-30Al-5Cu) ve ALZEN 501 (Zn-50Al-1Cu) adlı ticari alaşımlar geliştirilmiştir [4-6]. Çinko esaslı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar savaş sonrası dönemde de sürdürülmüş ve 1970'li yıllarda ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 adlı alaşımlar geliştirilmiştir. Bu alaşımlar sırasıyla %8, 12 ve 27 oranında alüminyum içermektedir [2,4,5].

Yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda çinko esaslı alaşımların beyaz metal, bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak malzemelerine göre bir takım üstünlüklere sahip oldukları görülmüştür [1-12]. Bu üstünlüklerin başında söz konusu alaşımların üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, yüksek aşınma direnci ve özgül mukavemete (mukavemet/yoğunluk) sahip olmaları, iyi yüzey kalitesi elde etmeye elverişli olmaları, sert parçacıkları içine alma özelliğine sahip olmaları, yetersiz yağlama durumunda bile ideal tribolojik davranış sergilemeleri ve yüksek titreşim sönümleme kapasitesine sahip olmaları gelmektedir [4-12]. Ancak, alüminyum ve bakır içeren çinko esaslı alaşımların bazı dezavantajlara sahip oldukları da gözlenmiştir [7,8,13,14]. Bu dezavantajların başında söz konusu alaşımların dökülmüş durumda boyutsal kararsızlık sergilemeleri ve mekanik özelliklerinin sıcaklığa duyarlı olması gelmektedir [7,8,14]. Boyutsal kararsızlık problemi, döküm sırasında oluşan yarı kararlı (metastabil) fazların alaşımların kullanımı sırasında kararlı fazlara dönüşmesinden kaynaklanmaktadır [8,13]. Yapılan çalışmalar sonucunda bu alaşımlara ısıl işlem uygulamak veya uygun alaşım elementi katmak suretiyle hem mekanik özelliklerin iyileştirilebileceği hem de boyutsal kararsızlık probleminin büyük ölçüde giderilebileceği görülmüştür [6,7,13,15]. Bakır oranının %1'i aşması durumunda ortaya çıkan boyutsal kararsızlık problemi döküm

sırasında oluşan metastabil  $\epsilon$  fazının kullanım sırasında dörtlü faz reaksiyonu ( $\alpha + \epsilon \rightleftharpoons T' + \eta$ ) ile kararlı  $T'$  ve  $\eta$  fazlarına dönüşmesinden kaynaklanmaktadır [16-20]. Bu dönüşüm sonucunda söz konusu alaşımlarda %4'e varan oranlarda hacimsel büyüme meydana gelmektedir [8,18-20]. Çinko esaslı alaşımların içyapıları stabilizasyon olarak da adlandırılan T5 ısıl işlemi ile kararlı hale getirilebilmektedir [1,3,4,13]. Bu işlem, alaşımların 100-200°C arasındaki sıcaklıklarda uygun bir süreyle tavlınmaları (yaşlandırma) sonucunda gerçekleştirilmektedir. Ancak, alaşımların içyapılarının kararlı hale gelmesini sağlayan bu işlem sertlik ve mukavemet değerlerinin düşmesine yol açmaktadır [1,3,4,10,11,15,16]. Mekanik özelliklerinin sıcaklığa duyarlı olması durumu ise, ergime sıcaklıkları düşük olan bu alaşımlardaki difüzyon hızının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır [22]. Bu nedenle, bu durum söz konusu alaşımların kullanım sıcaklıklarının sınırlanmasına yol açmaktadır.

Alüminyum ve bakır içeren çinko esaslı üçlü alaşımların sertlik, mukavemet ve aşınma direncini artırmak amacıyla katılan alaşım elementlerinin başında silisyum, magnezyum, mangan ve nikel gelmektedir [6-8,16,17,19-23]. Yapılan çalışmalar silisyum katkılarının söz konusu alaşımların mukavemetinden çok sertlik ve aşınma direncini artırdığını göstermiştir [6-8,13,14]. Bakır kadar etkili olmamakla birlikte magnezyum, mangan ve nikel katkılarının da ikili Zn-Al alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerini artırdığı gözlenmiştir [15,16,22-26].

İkili Al-Zn faz diyagramında yer alan dönüşümlere göre Zn-Al alaşımları ötektik (Zn-5Al), ötektoid (Zn-22Al) ve monotektoid [Zn-(30-48)Al] olarak sınıflandırılmaktadır [27]. Monotektoid alaşımlar ötektik ve ötektoid alaşımlara göre daha yüksek sertlik ve mukavemet, ötektik ve ötektoid alaşımlar ise monotektoid alaşımlara göre daha yüksek darbe direnci ve süneklik sergilemektedir [2,4,29,30].

Bakır ve silisyum katkılarının çinko-alüminyum alaşımlarının yapı ve özelliklerine etkileri üzerinde yapılan yoğun çalışmalar sonucunda üstün özelliklere sahip Zn-25Al-3Cu, Zn-27Al-2Cu, Zn-40Al-2Cu ve Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımları geliştirilmiştir [13,20,21,29-32]. Bu alaşımlarda boyutsal kararsızlığa yol açan  $\epsilon$  fazının oluşmasını önlemek amacıyla son yıllarda çinko içeren alüminyum esaslı alaşımlar üzerinde çalışmalar başlatılmış ve bu çalışmalar sonucunda Al-40Zn-3Cu, Al-40Zn-3Cu-2Si, Al-25Zn-3Cu ve Al-25Zn-3Cu-3Si alaşımları geliştirilmiştir [33-37]. Alüminyumun çinko ile yer değiştirmesi ile alaşımların içyapısında kararlı  $\theta$  fazının oluşması sağlanmış ve böylece boyutsal kararsızlık problemi büyük ölçüde giderilmiştir [37]. Ancak, bu alaşımların ticarileşme süreci henüz

tamamlanmamıştır. Diğer taraftan ticarileştirilmiş çinko esaslı alaşımların özelliklerinin daha da iyileştirilmesine yönelik çalışmalar halen sürdürülmektedir. Bu durum çinko esaslı alaşımlar hakkında halen araştırılması gereken pek çok konunun bulunduğunu göstermektedir. Nitekim bakır ve silisyum katkıları ile farklı ısıl işlemlerin yüksek oranda çinko içeren alaşımların yapı ve özelliklerine etkilerinin sistematik olarak ve ayrıntılı biçimde incelenmediği göze çarpmaktadır. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada ötektoid noktaya (Zn-22Al) yakın kimyasal bileşime sahip bir Zn-Al alaşımı seçip, bakır ve silisyum katkılarının yanı sıra farklı ısıl işlemlerin bu alaşımın yapı ve özelliklerine etkilerini inceleyerek mühendislik uygulamaları için en uygun kimyasal bileşim ve ısıl işlem koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

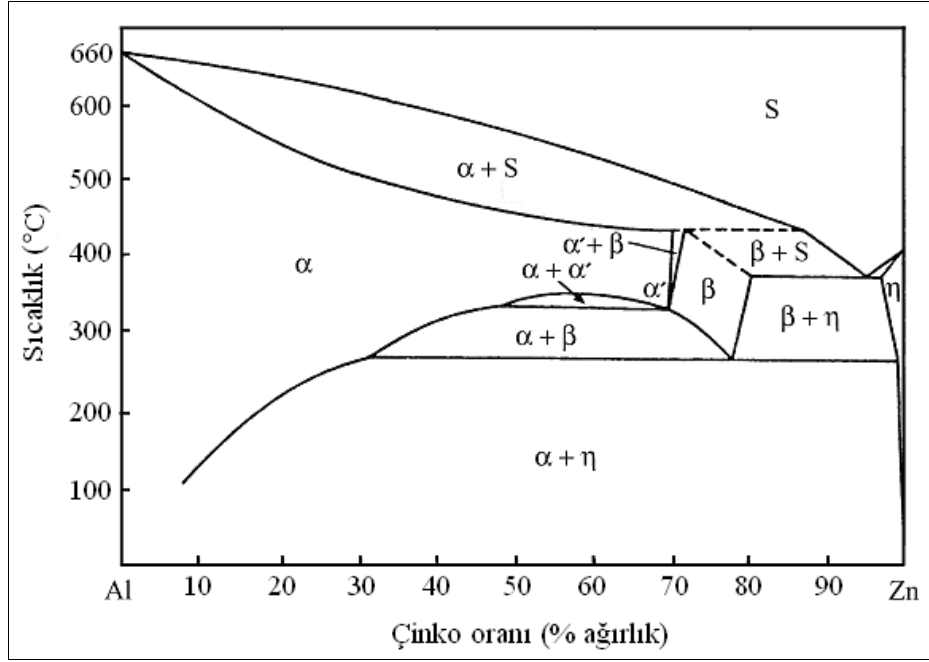
## **1.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların Faz Diyagramları**

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

Pek çok araştırmacı [38-55] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda belirlenen alüminyum-çinko (Al-Zn) faz diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu faz diyagramında yer alan  $\alpha$  alüminyumca zengin,  $\eta$  ise çinkoca zengin faz bölgelerini göstermektedir [38,39]. Çinkonun alüminyum içerisindeki çözünürlüğü %83 oranına ulaşmakta ve bu durum  $\alpha$ ,  $\alpha'$  ve  $\beta$  olarak adlandırılan üç farklı faz bölgesinin oluşmasına yol açmaktadır [27]. Bu sistemde meydana gelen faz dönüşümleri Tablo 1'de verilmiştir. Yavaş soğutma sonucunda kararlı çinko ve alüminyum fazlarına dönüşen bu fazların tümü yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahiptir [27]. Hızlı soğutma işlemi ise, çinkonun aşırı doymuş katı çözelti içerisinde tutulmasına ve bundan sonraki yaşlandırma işlemi sırasında bir dizi geçiş fazının oluşmasına neden olmaktadır [27]. Kafes parametrelerinin birbirine çok yakın olması nedeniyle  $\alpha$  ve  $\alpha'$  fazları arasındaki sınır tam olarak belirlenememekte ve bu durum faz diyagramında  $\alpha + \alpha'$  olarak adlandırılan bir karışmazlık veya kısmi çözünürlük bölgesi oluşmasına yol açmaktadır, Şekil 1.

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklığı, katılaşma aralığı ve içyapısı alüminyum oranına göre değişmektedir. Şöyle ki, Al-Zn faz diyagramında 382°C sıcaklık ve %5 Al oranında ötektik, 276°C sıcaklık ve %22 Al oranında ötektoid dönüşüm meydana gelmektedir. Ötektik dönüşüm sonucunda, YMK yapıları  $\beta$  ile sıkı paketlenmiş hegzagonal yapıları  $\eta$  fazlarını içeren bir içyapı oluşmaktadır [27,56]. Alüminyumun  $\eta$  fazı içerisindeki

katı çözünürlüğü azalan sıcaklıkla azalmakta ve ötektik dönüşüm sıcaklığında %3 civarında olan katı çözünürlük 20°C sıcaklıkta %0,05 Al oranına düşmektedir.  $\beta$  fazı ise, 276°C sıcaklıkta meydana gelen ötektoid reaksiyon sonucunda alüminyumca zengin  $\alpha$  ve çinkoca zengin  $\eta$  fazlarına dönüşmektedir [27].



Şekil 1. İkili çinko-alüminyum faz diyagramı [38-53].

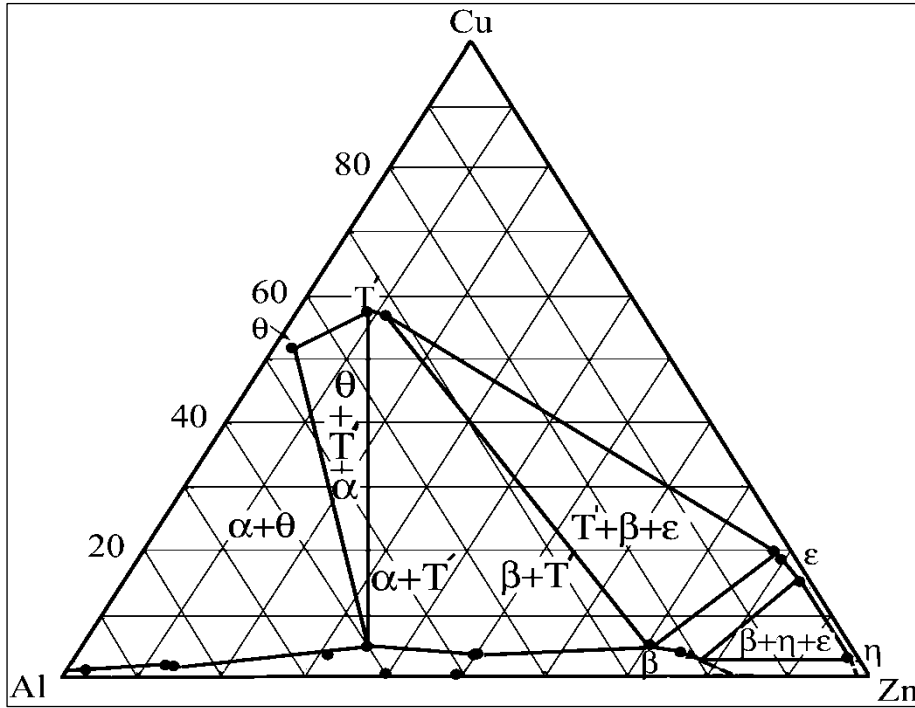
Tablo 1. İkili çinko-alüminyum alaşımlarında meydana gelen dönüşümler [1,27,38].

Dönüşüm	Dönüşüm formülü	Dönüşüm noktası	
		Kimyasal bileşim (% Zn)	Sıcaklık (°C)
Ötektik	$S \rightleftharpoons \beta + \eta$	95	382
Ötektoid	$\beta \rightleftharpoons \alpha + \eta$	78	276
Monotektoid	$\alpha / \alpha' \rightleftharpoons \alpha + \beta$	52-70	340
Peritektik	$\alpha + s \rightleftharpoons \beta$	72	443

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

Üçlü çinko-alüminyum-bakır faz diyagramı üzerindeki çalışmalar 1940 yılından itibaren sürdürülmektedir [16-18,54-60]. Ancak söz konusu faz diyagramı henüz tamamlanamamıştır. Bu sistemin özellikle düşük oranlarda bakır içeren kısmı Murphy

tarafından yapılan ayrıntılı incelemeler sonucunda belirlenmiştir [54]. Bu faz diyagramının 350°C sıcaklık için Murphy tarafından belirlenen izotermal kesiti Şekil 2’de gösterilmiştir. Düşük oranlarda bakır içeren Zn-Al-Cu alaşımlarında meydana gelen faz dönüşümleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloda yer alan  $\alpha$  alüminyumca zengin,  $\beta$  ve  $\eta$  çinkoca zengin fazları;  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) yarı kararlı,  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) ise kararlı metallar arası bileşikler göstermektedir [54-57].



Şekil 2. Üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminin 350°C sıcaklıktaki kesiti [54].

Çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminde  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ),  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) gibi metallar arası (intermetalik) bileşiklerin oluşması faz dönüşümlerini ikili sisteme göre çok daha karmaşık duruma sokmaktadır [54]. Döküm sırasında oluşan metastabil  $\epsilon$  fazı, dörtlü faz reaksiyonu ( $\alpha + \epsilon \rightleftharpoons T' + \eta$ ) ile kararlı  $T'$  ve  $\eta$  fazlarına dönüşmektedir [54-56]. Uzun bir süre içerisinde gerçekleşen bu dönüşüm sonucunda söz konusu alaşımlarda hacimsel büyüme meydana gelir [17-19]. Bu büyüme alaşımların bakır içeriğine bağlı olarak %4,5 oranına kadar ulaşabilir. Bu nedenle, yatak imalatından önce bu alaşımların uygun bir ısıl işlemle kararlı hale getirilmeleri gerekir [17,18,33]. Bunun için söz konusu alaşımlara kararlı hale getirme (stabilizasyon veya T5) işlemi uygulanır [13,33]. Bu işlem,

genellikle dökülmüş durumdaki alaşımların 100-200°C arasındaki bir sıcaklıkta uygun bir süre yaşlandırılması suretiyle gerçekleştirilir [13,33].

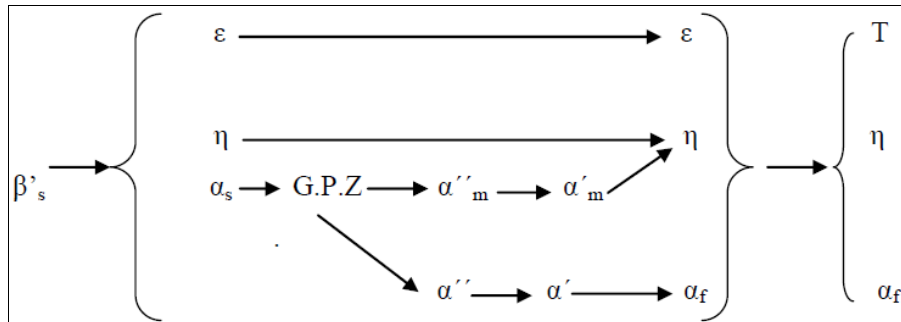
Tablo 2. Çinko-alüminyum-bakır alaşım sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri

Dönüşüm	Sıcaklık (°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 Al-Zn-Cu-Si Faz Diyagramı

Dörtlü Al-Zn-Cu-Si faz diyagramı henüz belirlenmemiştir. Ancak, bu sistemdeki bazı faz dönüşümleri Zhu ve arkadaşları [61-63] tarafından incelenmiştir. Silisyumun çinko-alüminyum matrisi içerisindeki çözünürlüğünün çok az olduğu, bu nedenle söz konusu alaşımlarda meydana gelen faz dönüşümlerini belirgin bir şekilde etkilemediği görülmüştür [61-63].

Çözündürme ve su verme işlemlerinden sonra yaşlandırılan Zn-20Al-3Cu-2Si alaşımında meydana gelen faz dönüşümleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Su verme işlemi sonunda elde edilen aşırı doymuş  $\alpha_s$  katı çözeltisinin yaşlandırılması sırasında önce Guiner-Preston bölgeleri (GPZ) oluşmaktadır. Bu bölgeler yaşlandırmanın ilerleyen aşamalarında  $\alpha''_m$ ,  $\alpha'_m$ ,  $\alpha''$ ,  $\alpha'$  sembolleriyle gösterilen geçiş fazlarına dönüşmekte, bu geçiş fazlarının dönüşümü sonucunda da çinkoca zengin  $\eta$  ve alüminyumca zengin  $\alpha_f$  fazları oluşmaktadır.



Şekil 3. Dörtlü Zn-Al-Cu-Si alaşım sisteminde meydana gelen faz dönüşümleri [61-63].



Silisyum parçacıklarının büyüklüğü ve alaşım içerisindeki dağılımı silisyum oranına bağlı olarak değişmektedir [16,36,64]. Monotektoid esaslı alaşımlar üzerinde yapılan araştırmalar silisyum oranının %2'nin üzerine çıkması durumunda silisyum parçacıklarının hem büyüdüklerini hem de farklı bölgelerde toplanarak kümeleştiklerini göstermiştir [16,36,64].

### 1.3. Çinko Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri ve Özellikleri

#### 1.3.1. Çinko Esaslı Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

Piyasada yaygın olarak kullanılan çinko esaslı Zamak 2, 3, 5, 7, ZA-8, ZA-12, ZA-27 ve ZA-35 alaşımlarının kimyasal bileşimleri Tablo 3'de verilmiştir [2-4,25]. Bu tablo Zamak ve ZA-8 adlı alaşımların ötektik, ZA-27 alaşımının ötektoid, ZA-35 alaşımının ise monotektoid noktalara yakın bileşimlere sahip olduklarını göstermektedir. Diğer taraftan bu alaşımların hepsi düşük oranlarda bakır içermektedir, ancak ZA-35 alaşımının kimyasal bileşiminde bakırın yanı sıra silisyum da bulunmaktadır.

Tablo 3. Çinko esaslı bazı ticari alaşımların kimyasal bileşimleri [2-4,25].

Alaşım	Alaşım elementi oranı (% ağırlıkça)									
	Al	Cu	Mg	Fe (maks)	Pb (maks)	Cd (maks)	Sn (maks)	Ni (maks)	Si	Zn
Zamak 2	3,7	2,6	0,02	0,035	0,040	0,003	0,0015	-		Geriye kalan
	- 4,3	- 3,3	- 0,06	- 0,05	- 0,005	- 0,004	- 0,002			
Zamak 3	3,7	0,1	0,02	0,035	0,040	0,003	0,0015	-		Geriye kalan
	- 4,3	(max)	- 0,06	- 0,05	- 0,005	- 0,004	- 0,002			
Zamak 5	3,7	0,7	0,02	0,035	0,004	0,003	0,0015	-		Geriye kalan
	- 4,3	- 1,2 (max)	- 0,06	- 0,5	- 0,005	- 0,004	- 0,002			
Zamak 7	3,7	0,1	0,005	0,035	0,003	0,002	0,001	0,005		Geriye kalan
	- 4,3	(max)	- 0,02	- 0,05	- 0,003	- 0,002	- 0,001	- 0,02		
ZA-8	8,0	0,8	0,01	0,035	0,005	0,005	0,002	-		Geriye kalan
	- 8,8	- 1,3	- 0,03	- 0,075	- 0,006	- 0,006	- 0,003			
ZA-12	10,5	0,5	0,01	0,05	0,005	0,005	0,002	-		Geriye kalan
	- 11,5	- 1,2	- 0,03	- 0,075	- 0,006	- 0,006	- 0,003			
ZA-27	25,0	2,0	0,01	0,07	0,005	0,005	0,002	-		Geriye kalan
	- 28,0	- 2,5	- 0,02	- 0,075	- 0,006	- 0,006	- 0,003			
ZA-35	30,0	3,0	-	0	0	0	0		2,0	Geriye kalan
	- 35,0	- 5,0	-	- 0,1	- 0,004	- 0,003	- 0,002		- 5,0	

### 1.3.2. Çinko Esaslı Alaşımların Fiziksel Özellikleri

Çinko esaslı alaşımların fiziksel özellikleri içerdikleri alaşım elementleri ve bunların oranlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Alüminyum oranı arttıkça bu alaşımların ergime sıcaklığı yükselirken, katılaşma aralığı daralır [1,38]. Çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak malzemelerinin çoğundan daha düşük ergime sıcaklığına sahip oldukları bilinmektedir [1,2,65,66]. Bu nedenle, bu alaşımların üretiminde hem daha az enerjiye ihtiyaç duyulur hem de döküm işlerinde kullanılan araç ve gereçlerin ömürleri daha uzun olur [65,66].

Çinko-esaslı alaşımların yoğunluğu artan alüminyum oranı ile azalırken, artan bakır oranı ile artmaktadır. Ancak, bunların yoğunluk değerleri bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak alaşımlarının söz konusu değerlerinden daha düşüktür [65]. Ayrıca, bu alaşımların ısı genleşme katsayısı artan alüminyum oranı ile artmaktadır [65,66]. Tablo 4'te Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. Çinko esaslı ticari alaşımlar ile bazı geleneksel yatak malzemelerinin fiziksel özellikleri [1,2,11,65,66].

Alaşım	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Katılaşma aralığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (µm/m/°C)	Isıl iletkenlik katsayısı (W/m/°C)	Elektriksel iletkenlik katsayısı (%IACS)
Zamak 2	6600	390-379	27,8	104,7	25,0
Zamak 3	6600	387-381	27,4	113,0	27,0
Zamak 5	6600	386-380	27,4	108,9	26,0
Zamak 7	6600	387-381	27,4	113,0	27,0
ZA-8	6300	404-375	23,3	114,7	27,7
ZA-12	6000	432-377	24,2	116,1	28,3
ZA-27	5000	484-376	26,0	125,5	29,7
SAE 40 pirinci	8500	1010-855	18,0	72	15
SAE 660 bronz	8910	975-855	18,0	59	12
Kır dökme demir	7300	1260-1090	11,9	45	6

### 1.3.3. Çinko Esaslı Alaşımların Mekanik Özellikleri

Çinko esaslı alaşımların mekanik özelliklerinin geleneksel yatak malzemelerinin söz konusu özelliklerinden daha üstün olduğu bilinmektedir, Tablo 5 [1,2,4,5,11,65,66].

Yapılan araştırmalar, ikili çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerinin artan alüminyum oranı ile arttığını göstermiştir [29,30,67]. Bu durum söz konusu alaşımların dendrit kol aralığının azalmasından kaynaklanmaktadır [68]. Çinko esaslı alaşımların kırılma tokluğu ve süneklik değerleri artan alüminyum oranı ile artmaktadır [65-69]. Bir başka deyişle, çinko oranı daha düşük olan monotektoid alaşımlar ötektik ve ötektoid alaşımlara göre daha yüksek sertlik ve mukavemete sahip olurken, daha yüksek oranda çinko içeren ötektik ve ötektoid alaşımlar monotektoid alaşımlara göre daha yüksek darbe direnci ve süneklik değerleri sergilemektedirler [29,30,65-69].

İkili inko-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin bakır, silisyum, magnezyum, mangan ve nikel katkıları ile iyileştirildiği bilinmektedir [14,21,23,30,32,33, 64,70-75]. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda daha çok bakır ve silisyum katkılarının bu alaşımların özekliklerine etkileri ele alınmıştır. Bu alışmalar sonucunda özellikle %2-3 oranlarındaki bakır ve silisyum katkılarının bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür [21,29,30,36,73]. Sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen bu artışlar katı çözelti setleşmesinin yanı sıra söz konusu alaşımların içyapılarında sert ve gevrek  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) ve  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) fazları ile silisyum parçacıklarının oluşumuna dayandırılarak açıklanmaktadır [1,29,30,35]. Ancak, bakır ve silisyum oranlarının belirli değerleri (%2-3) aşması durumunda alaşımların çekme mukavemeti azalmaktadır [29,30,32,76]. Bu azalmanın adı geçen alaşım elementleri tarafından oluşturulan sert ve gevrek fazların ( $\epsilon$ ,  $\theta$  ve Si) söz konusu alaşımları gevrekleştirmesinden kaynaklandığı ileri sürülmektedir [29,30,32,76].

Yapılan alışmalar bazı ısıl işlemlerle çinko esaslı alaşımların içyapılarının kararlı hale getirilebildiğini, bazı ısıl işlem uygulamalarıyla da sertlik ve mukavemetlerinin artırılabilirdiğini göstermiştir [4,6,10,28,77-79]. Bu alaşımların içyapılarını kararlı hale getirmek için uygulanan ısıl işlemlerin başında T5 veya T7, sertlik ve mukavemetlerini artırmak için uygulanan ısıl işlemlerin başında ise T6 ısıl işlemi gelmektedir. T5 ısıl işlemi, söz konusu alaşımların 100-200°C arasındaki sıcaklıklarda uygun bir süre tavlınmaları (yaşlandırma) suretiyle gerçekleştirilmektedir. Bu işlem alaşımların dendritik yapısında önemli bir değişime yol açmadan metastabil fazların kararlı fazlara dönüşmesini sağlamaktadır. Ancak, bu işlem sonunda alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinde belirgin azalmalar meydana gelmektedir [6,10,13]. Bu azalma, dökülmüş durumdaki alaşımların yapısında denge dışı soğuma nedeniyle oluşan kalıntı veya artık gerilmelerin yaşlandırma sırasında giderilmesinden kaynaklanmaktadır [67]. Söz konusu alaşımlara

uygulanan T6 ve T7 ısıt işlemleri ise çözündürme, su verme ve yapay yaşlandırma aşamalarını içermektedir [28,79]. Ancak, T6 ısıt işleminde su verilen alaşım en yüksek sertlik ve mukavemet elde edilinceye kadar, T7 ısıt işleminde ise kararlı içyapı elde edilinceye kadar yaşlandırılır. Başka bir deyişle T6 ısıt işleminin yaşlandırılması, T7 ısıt işleminin aşırı yaşlandırılması ile gerçekleştirilir. Bu işlemler sayesinde alaşımların dendritik yapıları tamamen ortadan kaldırılarak ince taneli homojen yapılar elde edilebilir [13,28]. Ancak, istenen yapı ve özelliklerin elde edilebilmesi için yaşlandırma sıcaklık ve süresinin deneysel verilere dayanarak belirlenmesi gerekir.

Zamak ve ZA alaşımlarının darbe dirençleri artan bakır oranı ile artmakta, bakır oranının belirli değerlerin üzerine çıkması durumunda ise azalmaktadır, Tablo 5. Bu durum bakırın alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı içerisindeki katı çözünlüğüne ve bakırca zengin  $\epsilon$  fazının oluşumuna dayandırılarak açıklanmaktadır [29,30,76]. Ancak, Zamak alaşımları genelde ZA alaşımlarına göre daha yüksek darbe direnci sergilerler.

Çinko esaslı alaşımların yorulma dayanımları bu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerine bağlı olup, bu değerlerin artmasıyla yorulma dayanımları da artmaktadır [2,4,11]. Hem hava ortamı hem de korozyonlu ortamda yapılan deneyler sonucunda çinko esaslı alaşımların yorulma dayanımlarının artan alüminyum ve bakır oranlarıyla arttığı görülmüştür [80,81]. Ancak, bakır oranının belirli bir değerin (%2) üzerine çıkması durumunda, alaşımların çekme dayanımlarında olduğu gibi yorulma dayanımlarında da azalma meydana gelmektedir [80,81]. Çinko esaslı alaşımların sürünme özellikleri üzerinde yeterli düzeyde sistematik çalışma bulunmamaktadır. Ancak Savaşkan ve Murphy [82-84] tarafından yapılan bir dizi çalışma sonucunda bakır katkılarının bu alaşımların sürünme direncini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiş ve bu alaşımların kararlı sürünme hızının  $\dot{\epsilon}_s = C t \sigma^n$  eşitliği ile belirlenebileceği ortaya konulmuştur. Ayrıca, ZA serisi içerisinde yer alan alaşımlardan en yüksek sürünme direncini ZA-8 alaşımının sergilediği ve bunu sırasıyla ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarının izlediği görülmüştür. ZA-8 alaşımı üzerinde yapılan başka bir çalışma sonucunda bu alaşımın sürünme direncinin %2Cu oranına kadar artan bakır oranı ile arttığı, bu oranın üzerinde ise fazla değişmediği belirlenmiştir [85].

Tablo 5. Çinko esaslı bazı ticari alaşımlar ile geleneksel yatak malzemelerinin mekanik özellikleri [1,2,4,5,11,65,66]

Alaşım	Mekanik Özellikler						
	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Sertlik (BSD)	Yorulma dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı (MPa)	Young modülü (psix10 <sup>6</sup> )	
Zamak 2	359	7	100	59	48	12,4	
Zamak 3	283	10	82	48	58	12,4	
Zamak 5	331	7	91	56	65	12,4	
Zamak 7	283	13	80	47	58	12,4	
ZA-8	221-255	1-2	80-90	103	20	12,4	
ZA-12	310-345	1-3	90-105	103	25	12,0	
ZA-27	400-440	3-6	110-120	117	47	11,3	
SAE-40 pirinci	255	30	60	76	15	12,0	
SAE 660 bronzu	270	11	81	90	15	11,5	
Kır dökme demir	214	10	210	97	54	13-16,4	

### 1.3.4. Çinko Esaslı Alaşımların Tribolojik Özellikleri

Yapılan çalışmalar alüminyum, bakır ve/veya silisyum içeren çinko esaslı üçlü ve dördü alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre üstün tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [1,9,10-12,15,20,21,35]. Bu durum söz konusu alaşımların çok fazlı bir yapıya sahip olmalarının yanı sıra aşınma yüzeylerinde oluşan çinko ve alüminyum oksit tabakalarına dayandırılarak açıklanmaktadır [7-9,19,86,87]. Söz konusu alaşımların içyapılarında bulunan alüminyumca zengin  $\alpha$ , bakırca zengin  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ),  $T'$  ( $\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$ ) veya  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) fazları ve silisyum parçacıkları yük taşıma görevi yaparken, çinkoca zengin ve nispeten yumuşak olan  $\eta$  fazı kaymayı kolaylaştırmaktadır [7-9,20]. Ayrıca, aşınma yüzeylerinde oluşan sert alüminyum oksit tabakasının yük taşıma görevi yaptığı, çinko oksit tabakasının ise özellikle sınır ve karışık sürtünme durumlarında kaymayı kolaylaştırmak suretiyle yetersiz yağlama durumunda bile söz konusu alaşımların üstün tribolojik davranış sergilemesine yol açtığı ileri sürülmektedir [20,86-88].

Yapılan çalışmalar bu alaşımların aşınma direncinin artan bakır ve silisyum oranları ile arttığını ve yaklaşık %3Cu ve %2Si oranlarının üzerine çıkılması durumlarında ise azaldığını göstermiştir [14,16,21,29,30,32,36,37]. Bu alaşım elementlerinin söz konusu alaşımların aşınma direncine etkileri katı çözeltili sertleşmesi ve içyapıda oluşan sert fazlar ile bunların büyüklük ve dağılımına dayandırılarak açıklanmaktadır [30,32,36,37].

Bu konuda literatürde yer alan bilgiler tribolojik çalışmaların bakır ve/veya silisyum içeren ötektoid ve monotektoid Zn-Al alaşımlar üzerinde yoğunlaştığını göstermektedir [16,29-37]. Ancak, ötektik ve ötektoid noktalar arasında yer alan ve aynı alaşım elementlerini içeren çinko-alüminyum alaşımlarının tribolojik özellikleri üzerinde yeterli ve sistematik çalışmaların yapılmadığı görülmüştür.

### 1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Geleneksel yatak malzemelerinin üretiminde kullanılan alaşım elementlerinin (Cu ve Sn) tedarikinin zor olması ve bu malzemelerin birim maliyetlerinin yüksek olması nedenlerinden dolayı bunların yerine çinko esaslı alaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan Zamak, ZA ve ALZEN serisi alaşımlar mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır. Çinko esaslı alaşımların geleneksel yatak malzemelerine göre daha üstün fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklere sahip oldukları belirlenmiştir. Bu üstünlüklerinin

başında özgül mukavemetlerinin (mukavemet/yoğunluk) yüksek olması, üretim ve ısıt işlemlerin kolay olması gelmektedir. Çinko esaslı alaşımların üstün tribolojik özellikler sergilemesi bunların içyapı ve mekanik özelliklerinin uygun olmasının yanı sıra kullanım sırasında yüzeylerinde oluşan çinko ve alüminyum oksit filmlerine dayandırılarak açıklanmaktadır. Şöyle ki, söz konusu alaşımların içyapıları yumuşak matris ile bunun içerisinde bulunan sert fazlardan oluşmaktadır. Bu alaşımların yumuşak matrisleri katı yağlayıcı gibi davranarak kaymayı kolaylaştırırken, matris içerisinde bulunan sert fazlar yük taşıma görevi yapmaktadır. Bütün bu üstünlüklerin yanı sıra bu alaşımların kullanımı sırasında bir takım sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu sorunların başında mekanik özelliklerin bazı uygulamalar için yetersiz olması ve kullanım sırasında ortaya çıkan boyutsal kararsızlık gelmektedir. Söz konusu alaşımların mekanik özellikleri, içerdikleri alaşım elementi ve bunların oranlarını değiştirmek veya ısıt işlem uygulamak suretiyle belirli ölçülerde iyileştirilebilmektedir. Bu alaşımlarda meydana gelen boyutsal kararsızlık problemi ise döküm sonucunda oluşan kararsız  $\epsilon$  fazının kararlı  $T'$  fazına dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sorunun ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için uygun kimyasal bileşimin seçilmesi ya da uygun ısıt işlemin uygulanması gerekmektedir. Bu amaçla söz konusu alaşımlara bakır yerine silisyum katılması yoluna gidilmiş, ancak silisyumun alaşımların mukavemetini yeterince artırmadığı gözlenmiştir. Bu durum hem bakır hem de silisyum içeren Zn-27Al-3Cu-2Si, Zn-40Al-2Cu-2Si ve Al-40Zn-3Cu-2Si gibi dörtlü alaşımların geliştirilmesine yol açmıştır.

Bu alanda yapılan çalışmaların genelde ötektik (Zn-%5 Al), ötektoid (Zn-22Al), monotektoid (Zn-40Al), Al-40Zn ve Al-25Zn esaslı alaşımlar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Ancak, kimyasal bileşimi ötektik ve ötektoid noktalar arasında (%5-22 Al) yer alan çinko esaslı alaşımlar ele alınarak yeterince ve sistematik olarak incelenmemiştir. Ayrıca, silisyumun bu aralıkta yer alan çinko esaslı alaşımların yapı ve özelliklerine etkilerinin araştırılmadığı görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı bu çalışmada kimyasal bileşimi ötektik ve ötektoid noktalar arasında (%5-22 Al) yer alan ve düşük oranlarda bakır ve silisyum içeren çinko esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin sistematik olarak incelenerek elde edilen bulguların ticari Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzundan aynı koşullarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmıştır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

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

Bu çalışmada farklı bileşimlere sahip beş adet ikili çinko-alüminyum (Zn-5Al, Zn-10Al, Zn-15Al, Zn-20Al, Zn-25Al), beş adet üçlü çinko-alüminyum-bakır [Zn-15Al-(1-5)Cu] ve altı adet dördü çinko-alüminyum-bakır-silisyum [Zn-15Al-3Cu-(0,5-3Si)] alaşımı kokile döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde ticari saflıkta alüminyum (%99,70), yüksek saflıkta çinko (%99,9) ve elektrolitik bakır (%99,99) kullanıldı. Üçlü Zn-15Al-(1-5) Cu alaşımının üretiminde alüminyum-bakır (Al-50Cu) alaşımı, dördü Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımının üretiminde ise ETİAL-190 (Al-20Si) alaşımı kullanıldı. Alaşımın üretilmesi için belirlenen miktarlardaki alaşım elementleri bir elektrikli pota fırını içerisinde ergitilerek karıştırıldı. Sıvı durumdaki alaşımın kimyasal bileşimlerine göre belirlenen döküm sıcaklıklarından (430-700°C), oda sıcaklığında tutulan 45 x 60 x 190 mm boyutlarındaki bir çelik kalıba (kokil) dökülerek katılaştırıldı. İncelenen SAE 660 bronz ve Al-12Si (ETİAL-140) alaşımı ise piyasadan temin edildi. Üretilen alaşımın kimyasal bileşimleri atomik absorpsiyon, piyasadan temin edilen alaşımın kimyasal bileşimleri ise spektral analiz yöntemleriyle belirlendi.

### **2.2. Alaşımın Yapısal, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**

Alaşımın yapısının incelenmesi için alınan numuneler standart metalografi yöntemleriyle hazırlandı ve farklı oranlarda nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) ve etanol içeren Nital ayırıcı ile dağlandı. Şöyle ki; dökülmüş ve ısı işlem görmüş durumdaki Zn-15Al-(0-5)Cu ve Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımına ait numuneler %1-4, Al-12Si alaşımına ait numuneler %10 ve SAE 660 bronzuna (CuSn7Pb7Zn3) ait numuneler %30 oranında nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) içeren Nital içerisinde dağlandı. Hazırlanan numuneler önce ışık mikroskopunda daha sonra da taramalı elektron mikroskopunda incelendi ve içyapıları gösteren fotoğraflar (mikrograf) çekildi. Ayrıca, bu alaşımın içyapılarında bulunan fazların kimyasal bileşim oranları enerji dispersif spektroskopisi (EDS) yöntemiyle belirlendi.



Alaşımların yoğunluklarının belirlenmesi için önce talaşlı işleme silindirik numuneler hazırlandı ve daha sonra bunların kütle ve boyutları ölçüldü. Numunelerin kütlelerinin ölçülmesinde  $\pm 0,01$  mg hassasiyetine sahip bir dijital terazi, boyutlarının ölçülmesinde ise  $\pm 0,001$  mm hassasiyetine sahip bir dijital mikrometre kullanıldı. Ölçülen kütle değerlerinin hesaplanan hacim değerlerine bölünmesiyle alaşımların yoğunlukları belirlendi.

Sertlik ölçümleri Rockwell F yöntemi uygulanarak gerçekleştirildi ve her bir alaşımın sertliği 5 ölçümün ortalaması alınarak belirlendi. Zn-15Al esaslı alaşımların içyapılarında bulunan bazı fazların mikrosertliği ise Vickers sertlik ölçme yöntemi ile 10 g'lık yük altında ölçüldü. Her bir fazın mikrosertlik değeri en az 5 ölçümün ortalaması alınarak belirlendi. Alaşımların darbe dirençlerinin ölçülmesinde talaşlı işleme hazırlanan 10 x 10 x 55 mm boyutlarındaki V-çentikli numuneler kullanıldı. Her bir alaşım için üç ölçüm yapıldı ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak darbe enerjileri belirlendi. Çekme ve basma deneylerinde ise talaşlı imalat yöntemiyle 8 x 40 TS 138 ve 10 x 10 TS 206 standartlarına uygun olarak hazırlanan numuneler kullanıldı. Üretilen numuneler  $6,25 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 'lik ortalama deformasyon hızında deneye tabi tutuldu. Her bir alaşım için 4 adet çekme ve basma deneyi yapıldı ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşımların çekme dayanımı, kopma uzaması ve basma dayanımı değerleri belirlendi.

### 2.3. Isıl İşlemler

Üretilen üçlü ve dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına T5 ve T7 ısıl işlemleri uygulandı. T5 ısıl işlemi dökülmüş durumdaki alaşımların 150°C sıcaklıkta 50 saatlik bir süre, T7 ısıl işlemi ise 340°C sıcaklıkta 36 saat süreli çözündürme aşamasından sonra su verilen alaşımların 180°C sıcaklıkta 10 saatlik bir süre yaşlandırılmalarıyla gerçekleştirildi. Belirtilen yaşlandırma süreleri, alaşımların sertlik ve boyutlarının söz konusu ısıl işlem koşullarında 240 saatlik (10 gün) yaşlandırma süresi boyunca belirli aralıklarla ölçülmesi sonucunda elde edilen sertlik-yaşlandırma süresi ve boy değişimi-yaşlandırma süresi eğrilerinden yararlanılarak belirlendi. Sertlik ve boyut değişimlerinin ölçümü için sırasıyla 15 x 10 mm ve 8 x 45 mm boyutlarındaki silindirik numuneler kullanıldı.

#### 2.4. Alaşımın Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

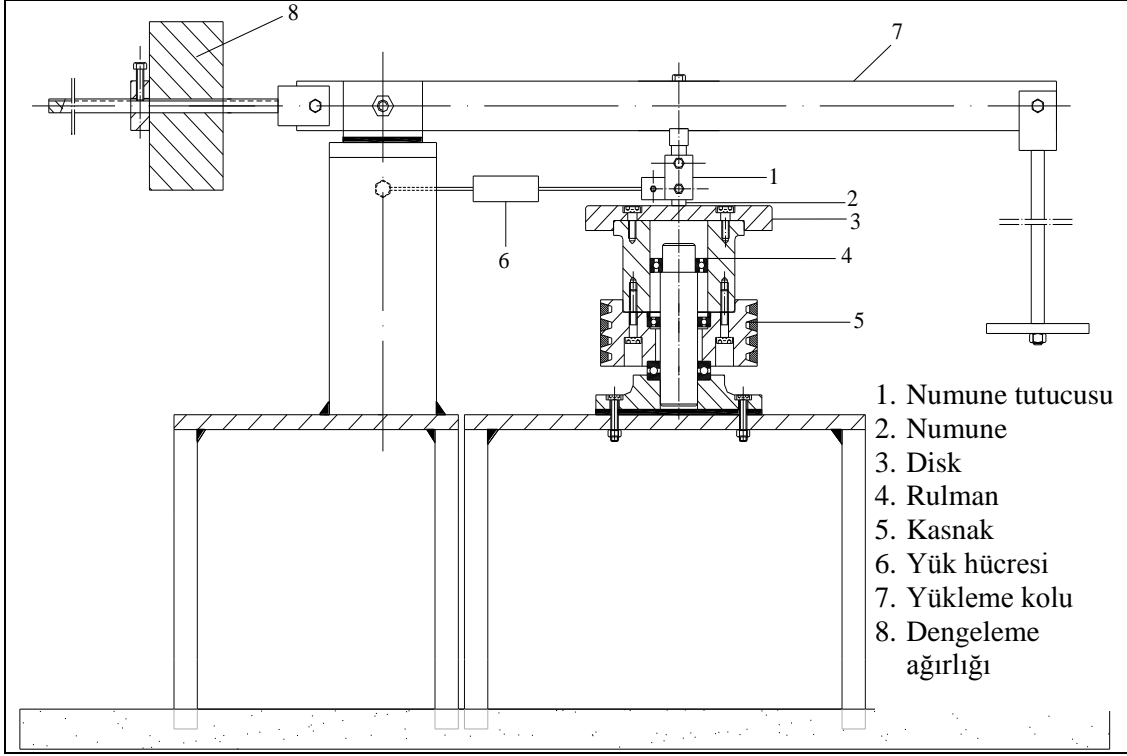
Üretilen alaşımların sürtünme ve aşınma deneyleri blok-disk esaslı bir deney düzeneğinde gerçekleştirildi. Bu düzeneğe ait teknik resimler sırasıyla Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Söz konusu düzenek 3 kW gücünde bir elektrik motoru, bu motor tarafından tahrik edilen bir mil ve buna bağlı bir aşındırma diski, bir numune tutucusu, bir yükleme kolu, bir hız kontrol ünitesi, yağlama sistemi ve sürtünme kuvveti ölçüm devresinden oluşmaktadır. Bu deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 6'da, numune tutucusu ile yük hücrecini yakından gösteren fotoğraf ise Şekil 7'de verilmiştir. Sözü edilen aşındırma diski SAE 1045 (Fe-0.46%C-0.6%Mn, 0.035%P-0.03%S) çeliğinden imal edildi ve ısıtma işlemi 55 RSD-C değerine kadar sertleştirildi. Sertleştirme işleminden sonra söz konusu diskin aşındırıcı yüzeyi taşlanarak ortalama 0,07-0,13 µm değerinde bir yüzey pürüzlülüğü elde edildi.

Deney düzeneğindeki yağlama işlemi, numunenin bulunduğu konumdan daha yüksek bir yere yerleştirilen depodan ince bir hortum yardımıyla alınan SAE 20W/50 normundaki bir motor yağının bir debi ayarlayıcısından geçirildikten sonra disk üzerine damlatılmasıyla gerçekleştirildi. Yükleme işlemi ise, numune tutucusu ile irtibatlandırılmış olan bir yükleme kolunun ucuna ağırlık asmak suretiyle gerçekleştirildi. Sürtünme kuvveti numune tutucusu ile düzenekteki sabit bir mesnet arasına yerleştirilen 50 kg kapasiteli S-50 tipi bir yük hücresi yardımıyla ölçüldü. Bu yük hücresinde sürtünme kuvveti nedeniyle oluşan gerilime karşı gelen kuvvet değerinin belirlenmesi için deneylere başlamadan önce yük hücresindeki gerilim-kuvvet ilişkisini gösteren bir eğri elde edildi. Yük hücresinin ucuna ağırlık asılarak elde edilen bu eğrinin denklemi veri toplama ünitesinin programına işlendi. Veri toplama kartına gelen gerilim sinyalleri bu denklem aracılığı ile kuvvet değerlerine dönüştürüldü ve bu değerler deney sırasında bir bilgisayar yardımıyla sürekli kaydedildi.

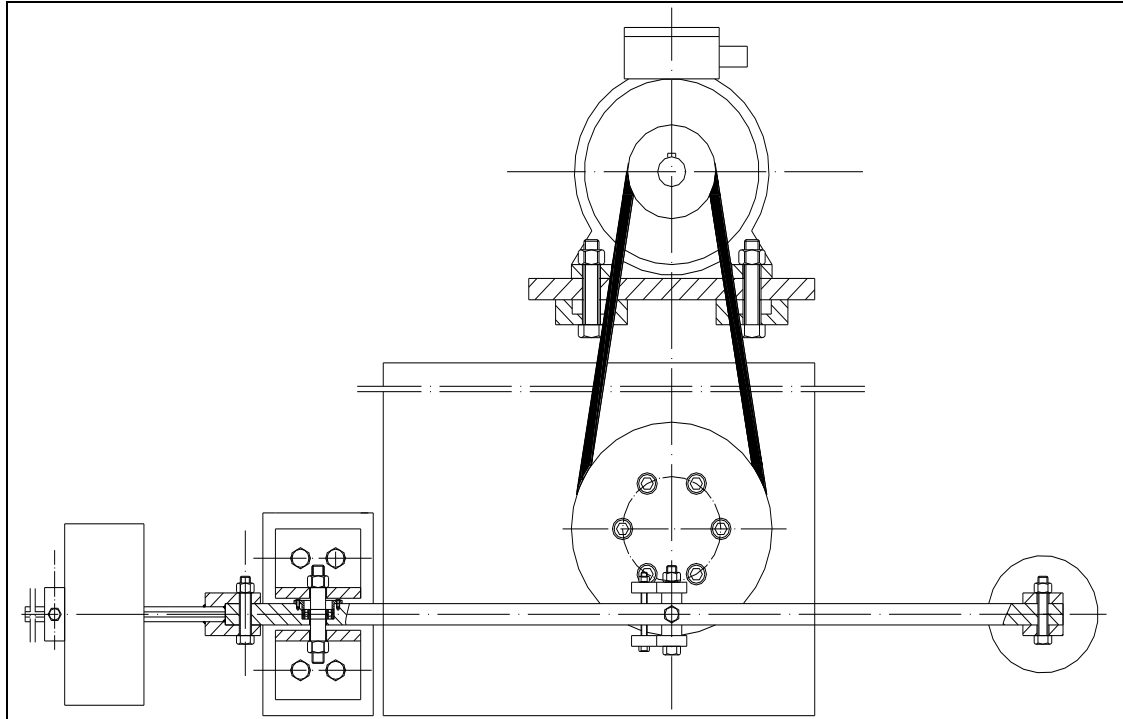
Sürtünme ve aşınma deneyleri talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanan ve teknik resmi Şekil 8'de verilen 10 x 15 x 26,6 mm boyutlarındaki numuneler ile gerçekleştirildi. Deney sırasında numunelerin sıcaklığı (çalışma sıcaklığı) aşındırıcı diske temas eden yüzeylerinden 2 mm yukarıya açılan bir deliğe yerleştirilen bir bakır-nikel termoeleman çifti tarafından üretilen gerilim ile belirlendi. Söz konusu termoeleman çifti tarafından üretilen gerilim değerleri bir veri toplama ünitesi yardımıyla sıcaklık değerine dönüştürüldü ve bu değerler bilgisayar ortamında deney süresince kaydedildi.

Sürtünme ve aşınma numuneleri hem deneylere başlamadan önce hem de deneyler tamamlandıktan sonra ultrasonik bir temizleyicide sırasıyla trikloretilen ( $C_2HCl_3$ ) ve alkol-aseton karışımı kullanılarak temizlendi. Temizlenen numunelerin kütleleri 0,01 mg'lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Ölçülen kütle kaybı değerleri alaşımların yoğunluklarına bölünerek numunelerde aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kayıpları belirlendi.

Alaşımların sürtünme ve aşınma özellikleri yağlı ve yağsız durumlarda incelendi. Yağlı durumda uzun ve kısa mesafeli olmak üzere iki tür deney yapıldı. Bu deneylerin yapılışına ilişkin koşullar Tablo 6'da verilmiştir. Yağlı durumda yapılan uzun mesafeli deneyler sonucunda Zn-15Al-(1-5)Cu ve Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımları ile birlikte ETİAL-140 ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimleri belirlendi. Yağlı durumda yapılan kısa mesafeli deneyler sonucunda ise farklı basınç, yağ debisi ve kayma hızı değerlerinde alaşımların sürtünme ve aşınma özellikleri ortaya konuldu. Bu deneyler üretilen üçlü ve dördü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncini sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımları ile bu alaşımlarla karşılaştırmak amacıyla piyasadan temin edilen SAE 660 bronzu ve ETİAL-140 (Al-12Si) alaşımları ile gerçekleştirildi. Kuru sürtünme ve aşınma deneyleri ise yağlı durumda yapılan kısa mesafeli deneylerde olduğu gibi Zn-15Al-3Cu, Zn-15Al-3Cu-1Si, SAE 660 bronzu ve ETİAL-140 (Al-12Si) alaşımlarına ait numunelerle gerçekleştirildi. Bu alaşımların yağsız durumdaki aşınma davranışlarını incelemek amacıyla bu deneylerden sonra disk yüzeyinden bir karbon bant yardımıyla aşınma parçacıkları toplandı. Üçlü ve dördü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direnci sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımları hem dökülmüş hem de ısıtılmış (T5 ve T7) görmüş durumlarda sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutuldu.



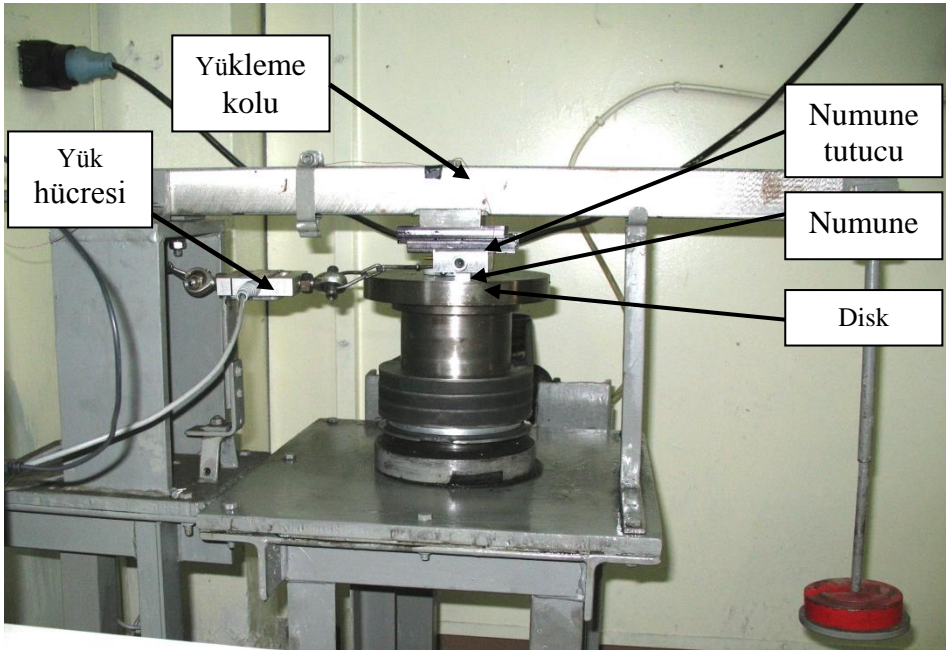
Şekil 4. Aşınma deney düzeneğinin önden görünümü



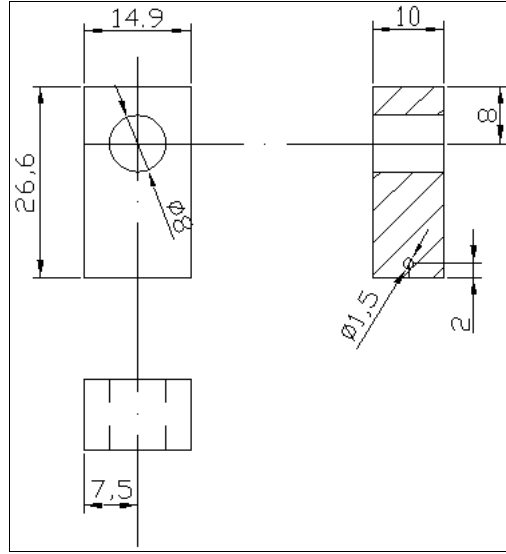
Şekil 5. Aşınma deney düzeneğinin üstten görünümü



Şekil 6. Aşınma deney düzeneğinin fotoğrafı



Şekil 7. Aşınma deney düzeneğinin diski ile deneylerde kullanılan numune, numune tutucusu ve yük hücresinin yakından görünümü.



Şekil 8. Sürtünme ve aşınma deney numunesinin teknik resmi

Tablo 6. Sürtünme ve aşınma deneylerine ilişkin koşullar

Deney adı		Deney koşulları				Aşınım
		Basınç (MPa)	Yağ debisi (cm <sup>3</sup> /saat)	Hız (m/s)	Alınan yol (m)	
Yağlı durumda	Uzun mesafeli	6	1	2	108.000	Zn-15Al-(1-5)Cu
						Zn-15Al-3Cu*
						Zn-15Al-3Cu**
	Kısa mesafeli	1-8	0,25-3	0,5-3	30.000	Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si
						Zn-15Al-3Cu-1Si*
						Zn-15Al-3Cu-1Si**
						ETİAL-140 (Al-12Si) SAE 660 Bronzu
Yağsız durumda (kuru)		3	-	1,5	2500	Zn-15Al-(1-5)Cu
						Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si
	1-5	-	0,5-2,5	2500	Zn-15Al-3Cu	
					Zn-15Al-3Cu*	
Zn-15Al-3Cu**						
						Zn-15Al-3Cu-1Si
						Zn-15Al-3Cu-1Si*
						Zn-15Al-3Cu-1Si**
						ETİAL-140 (Al-12Si) SAE 660 Bronzu
* : T5 ısıtıl işlemi uygulanmış						
** : T7 ısıtıl işlemi uygulanmış						

## **2.5. Aşınma Yüzeylerinin ve Parçacıklarının İncelenmesi**

Yağlı durumda deneye tabi tutulan numunelerin aşınma yüzeyleri, kuru deneylere tabi tutulan numunelerin ise hem aşınma yüzeyleri hem de enine ve boyuna kesitleri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) ikincil elektron görüntülemesi yöntemiyle incelendi ve bu kesitlerdeki sertlik değişimleri mikrosertlik ölçümleriyle belirlendi. Aşınma deneylerinden sonra disk yüzeyinden toplanan aşınma parçacıkları da SEM yardımıyla incelenerek görüntülendi.

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Alaşımların Kimyasal Bileşimleri

Üretilen çinko esaslı alaşımlar ile SAE 660 bronzu ve Al-12Si alaşımının kimyasal bileşimleri sırasıyla Tablo 7 ve 8’de verilmiştir.

Tablo 7. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal bileşim oranı (% ağırlık)			
	Zn	Al	Cu	Si
Zn-5Al	95,2	4,8	---	---
Zn-10Al	90,1	9,9	---	---
Zn-15Al	85,1	14,9	---	---
Zn-20Al	80,5	19,5	---	---
Zn-25Al	75,2	24,8	---	---
Zn-15Al-1Cu	84,2	14,9	0,9	---
Zn-15Al-2Cu	82,9	15,0	2,1	---
Zn-15Al-3Cu	81,9	15,2	2,9	---
Zn-15Al-4Cu	81,3	14,8	3,9	---
Zn-15Al-5Cu	80,4	14,8	4,8	---
Zn-15Al-3Cu-0,5Si	81,3	15,1	3,0	0,6
Zn-15Al-3Cu-1Si	81,3	14,9	2,9	0,9
Zn-15Al-3Cu-1,5Si	80,4	14,9	3,1	1,6
Zn-15Al-3Cu-2Si	80,0	15,0	2,9	2,1
Zn-15Al-3Cu-2,5Si	79,6	14,8	3,0	2,6
Zn-15Al-3Cu-3Si	78,9	15,2	2,8	3,1

Tablo 8. SAE 660 Bronzu ve Al-12Si alaşımının kimyasal bileşimleri

Alaşım	Kimyasal bileşim oranı (% ağırlık)										
	Cu	Sn	Pb	Zn	Al	Si	Fe	Mn	Mg	Ni	Ti
SAE 660 bronzu	82,8	6,9	6,3	4,0	-	-	-	-	-	-	-
Al-12Si	0,1	0,05	0,1	0,1	85,3	11,5	0,6	0,4	0,1	0,1	0,14



### 3.2. Alaşımlarının Metalografik İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

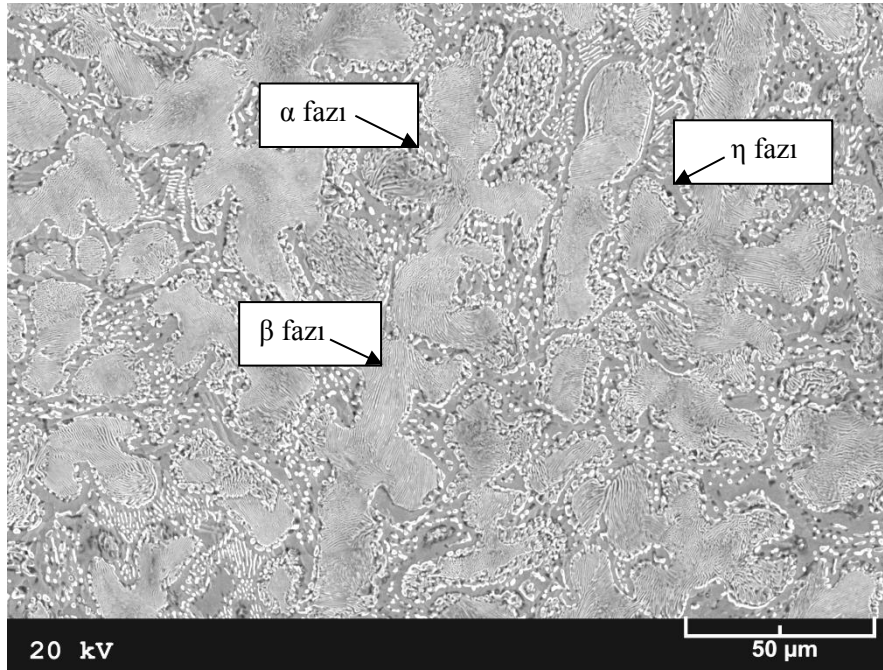
Bu çalışma kapsamında üretilen ikili Zn-15Al ve üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapılarının SEM görüntüleri Şekil 9-13'de verilmiştir. İkili Zn-15Al alaşımının içyapısının  $\beta$  dendritleri ile bunları çevreleyen  $\beta + \eta$  ötektik karışımından oluştuğu belirlendi, Şekil 9. Ancak, bu yapının bazı bölgelerinde  $\beta$  fazının dönüşüm ürünleri olan  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarının yer aldığı gözlemlendi. Üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının içyapılarının ise ikili alaşımın içyapısına benzediği, ancak %3 ve daha yüksek oranlarda bakır içeren alaşımların dendritler arası bölgelerinde  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazının oluştuğu gözlemlendi, Şekil 10-13. Yapılan incelemeler sonucunda  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazının boyut ve hacimsel oranının artan bakır oranı ile arttığı belirlendi.

T5 ve T7 ısıt işlemleri sonrası üçlü Zn-15Al-3Cu alaşımından SEM ile elde edilen içyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 14-17'de verilmiştir. Bu görüntüler T5 ısıt işlemi sonunda söz konusu alaşımın dendritik yapısının değişmediğini, ancak  $\epsilon$  fazının parçalanarak küçüldüğünü göstermektedir. T7 ısıt işlemi sonunda ise alaşımın dendritik yapısının tamamen ortadan kalkmasının yanı sıra  $\epsilon$  fazının hem şeklinin değiştiği hem de boyutunun azaldığı gözlemlendi. Yaşlandırma süresi artırıldığında  $\epsilon$  fazının dördümlü faz reaksiyonu ( $\alpha + \epsilon \rightleftharpoons T' + \eta$ ) ile T' fazına dönüştüğü gözlemlendi, Şekil 18. Ancak,  $\epsilon$  fazının T' fazına dönüşümünün uygulanan T7 ısıt işlemi için belirtilen süreye göre çok daha uzun bir yaşlandırma süresi (yaklaşık 100 saat) sonunda tamamlandığı görüldü. Bu süre sonunda  $\epsilon$  fazının tamamen ortadan kalkarak bunun yerini T' fazının aldığını gösteren SEM görüntüleri Şekil 19 ve 20'de verilmiştir.

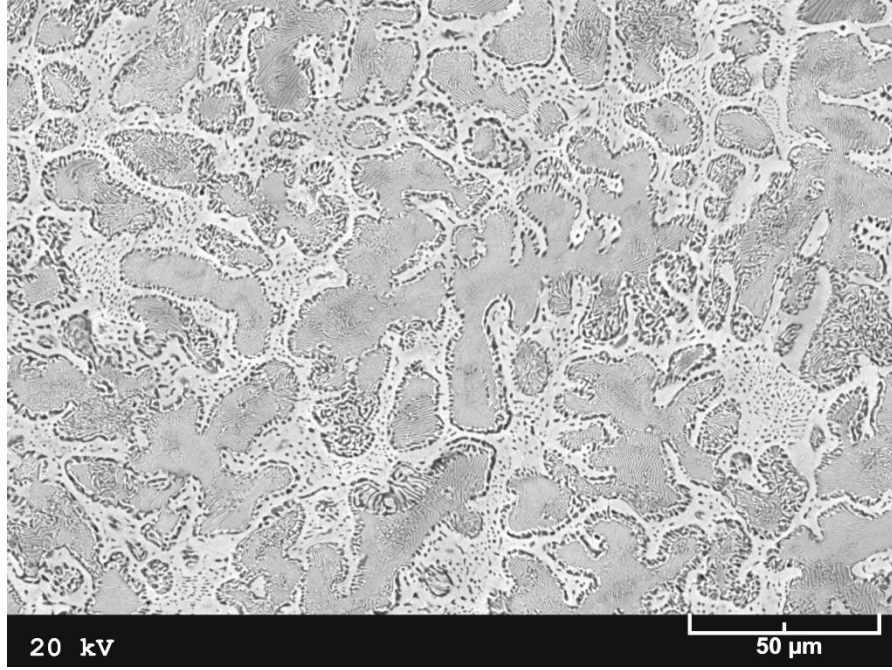
Dördümlü Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının dökülmüş durumdaki içyapılarının SEM görüntüleri Şekil 21-23'de verilmiştir. Bu fotoğraflar, söz konusu alaşımların içyapılarında silisyum içermeyen üçlü alaşımlarda bulunan  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta$  ve  $\epsilon$  fazlarının yanı sıra silisyum parçacıklarının yer aldığını göstermektedir. Silisyum oranı arttıkça alaşımların içyapılarında bulunan silisyum parçacıklarının boyut ve hacimsel oranlarının arttığı ve rastgele kümeleşme sergiledikleri gözlemlendi, Şekil 23. Dördümlü alaşımlar içerisinde seçilen Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımından T5 ve T7 ısıt işlemleri sonrasında elde edilen içyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 24 ve 25'de verilmiştir. Bu görüntüler T5 ısıt işleminin üçlü Zn-15Al-3Cu alaşımında gözlemlendiği gibi, dördümlü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dendritik yapısını etkilemeden  $\epsilon$  fazının parçalanarak küçülmesine yol açtığını göstermektedir. T7 ısıt işleminin ise üçlü Zn-15Al-3Cu alaşımında olduğu gibi, dördümlü alaşımın dendritik

yapısını tamamen ortadan kaldırmasının yanı sıra  $\epsilon$  fazının hem boyut hem de hacimsel oran yönünden azalıp, şeklinin değişmesine yol açtığı belirlendi. Ancak, T5 ve T7 ısıt işlemleri sonrası söz konusu alaşımın içyapısında bulunan silisyum parçacıklarında herhangi bir değişim meydana gelmediği görüldü.

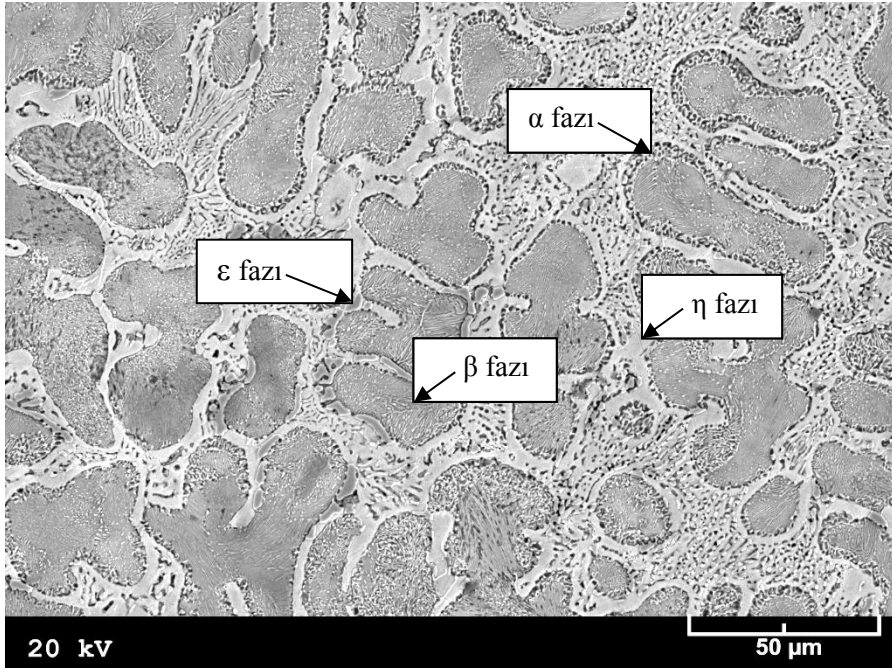
Al-12Si alaşımının içyapısının alüminyumca zengin ana faz (matris) ile bunun içerisinde hemen hemen homojen olarak dağılmış ötektik silisyum parçacıklarından, SAE 660 bronzunun içyapısının ise bakırca zengin  $\alpha$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektoid  $\alpha$  ve  $\delta$  fazlarından oluştuğu görüldü. Bu yapıların SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 26 ve 27'de verilmiştir.



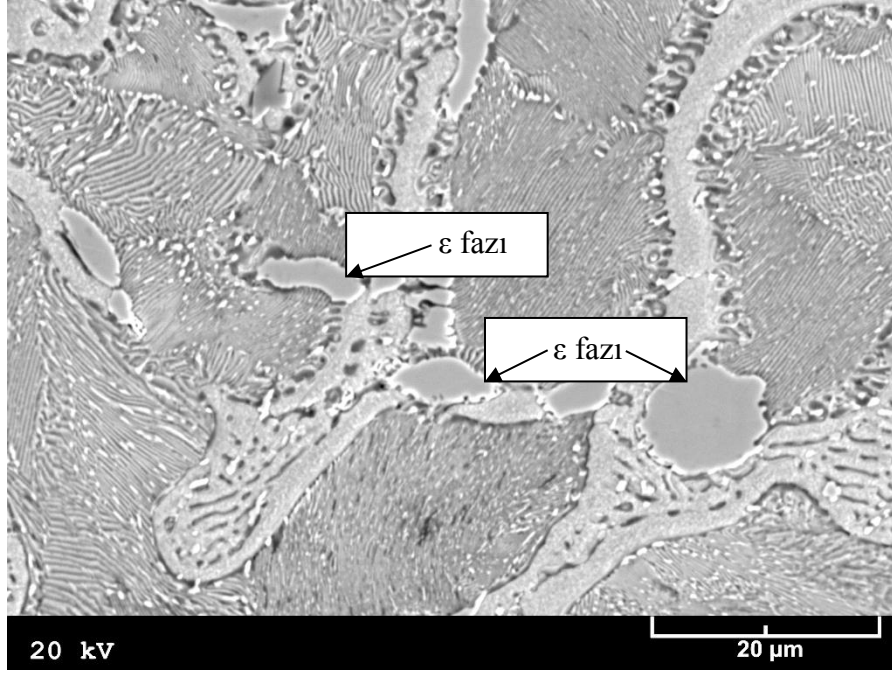
Şekil 9. Zn-15Al alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü



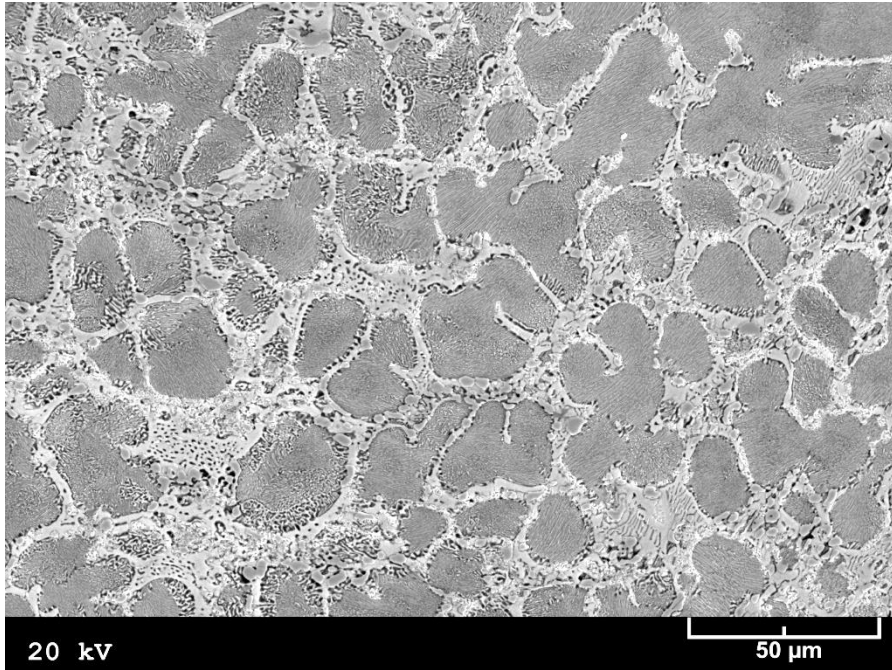
Şekil 10. Zn-15Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü



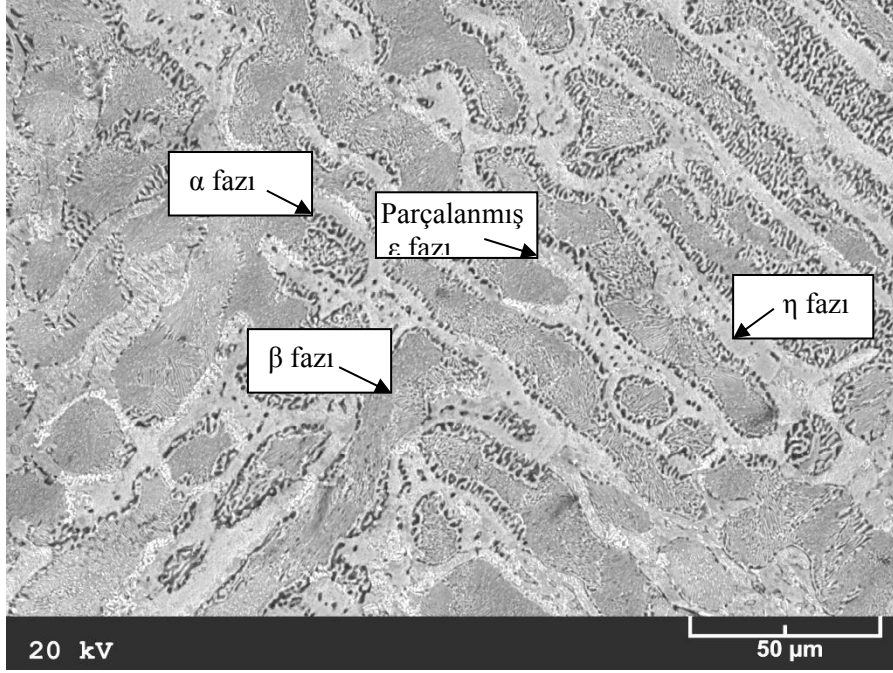
Şekil 11. Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü



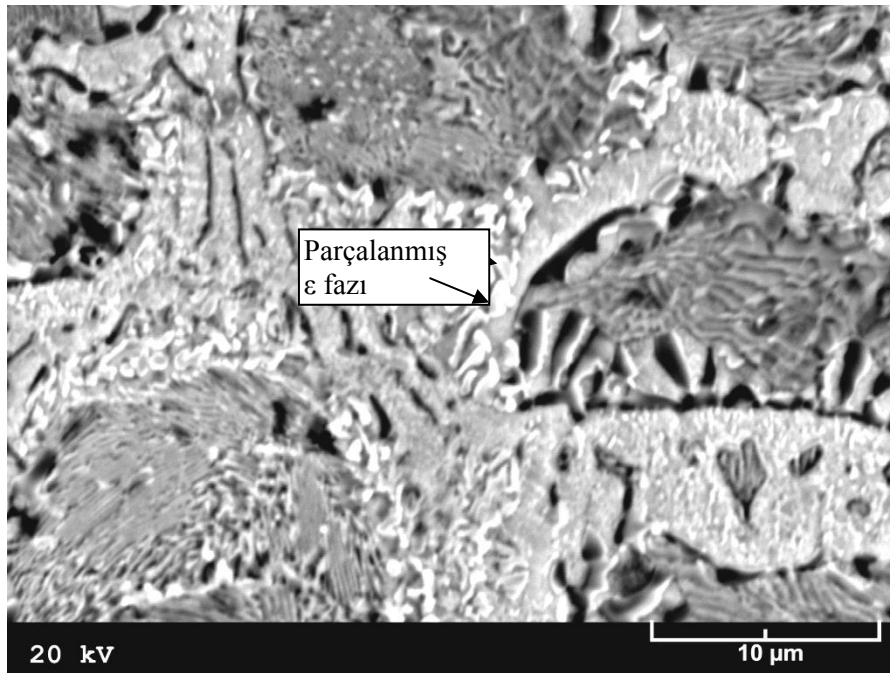
Şekil 12. Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinden yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü



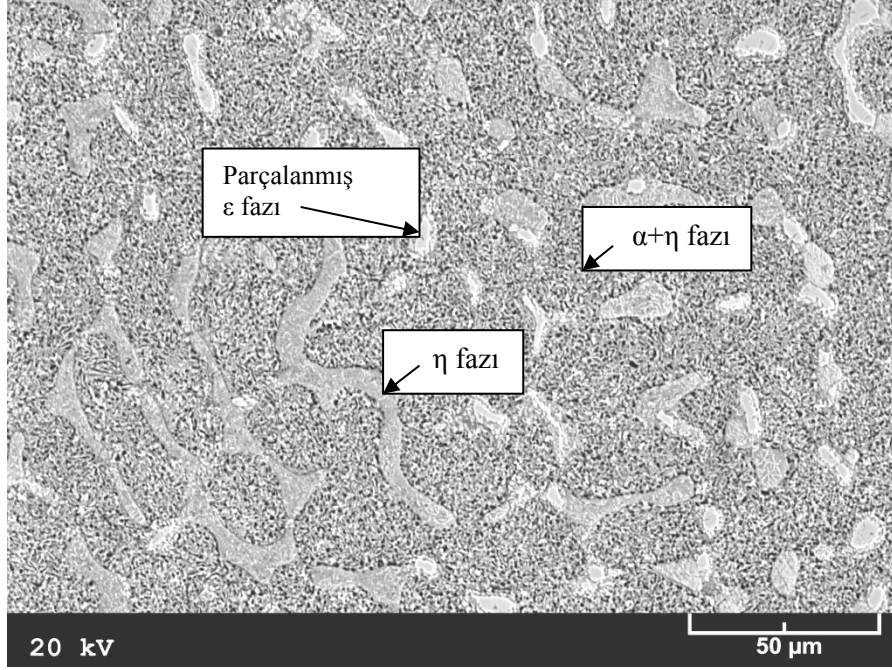
Şekil 13. Zn-15Al-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki iç yapısının SEM görüntüsü



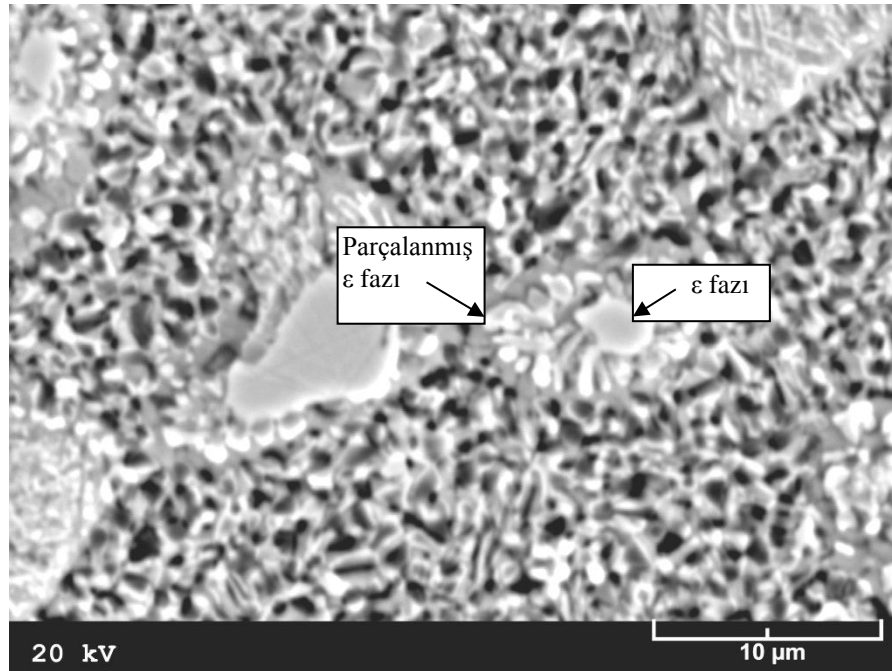
Şekil 14. Zn15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin içyapısı



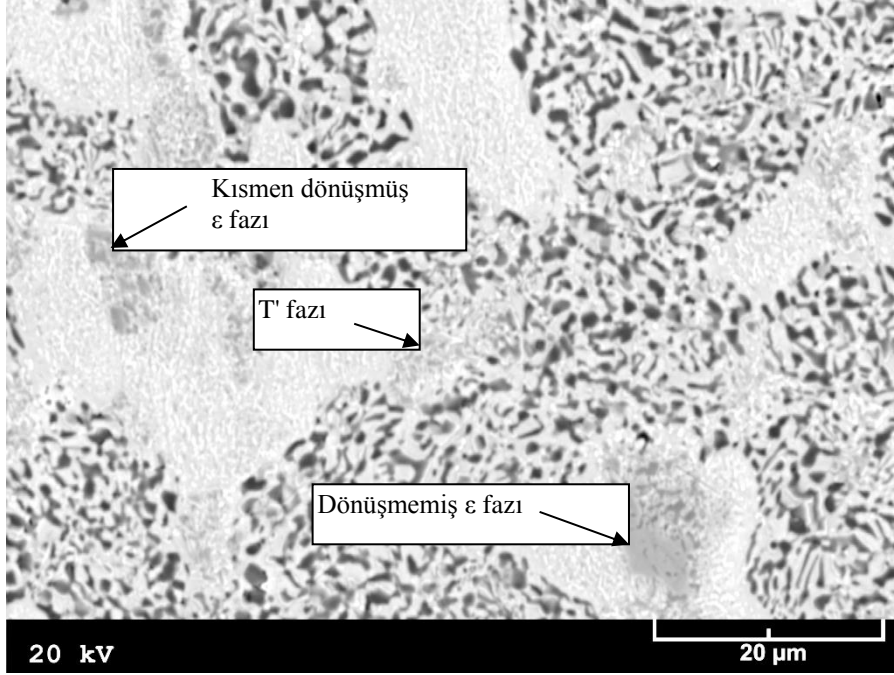
Şekil 15. Zn15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtıl işlemine tabi tutulmuş numunesinden yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü



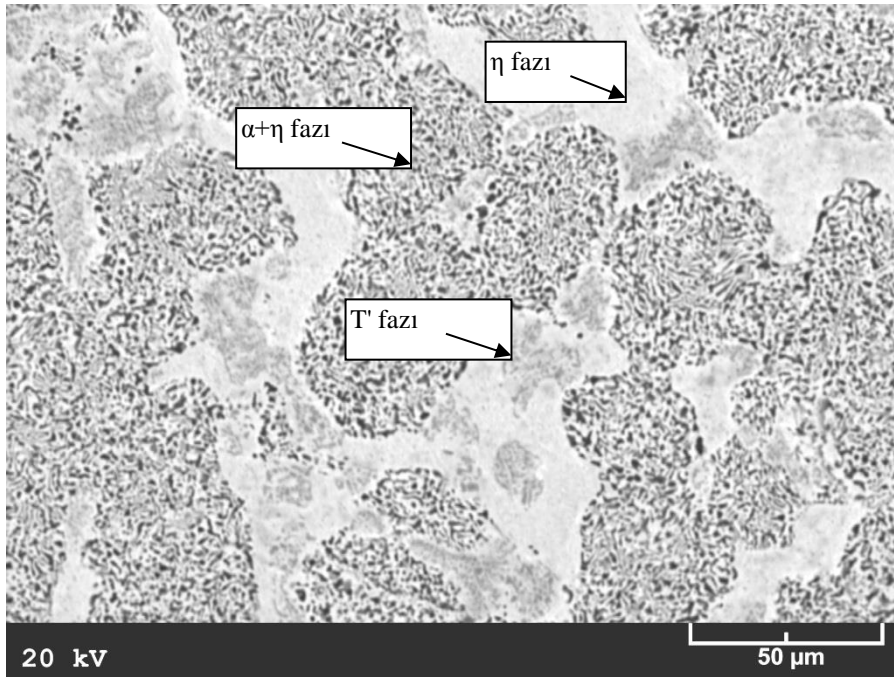
Şekil 16. Zn15Al-3Cu alaşımlının T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinin içyapısı



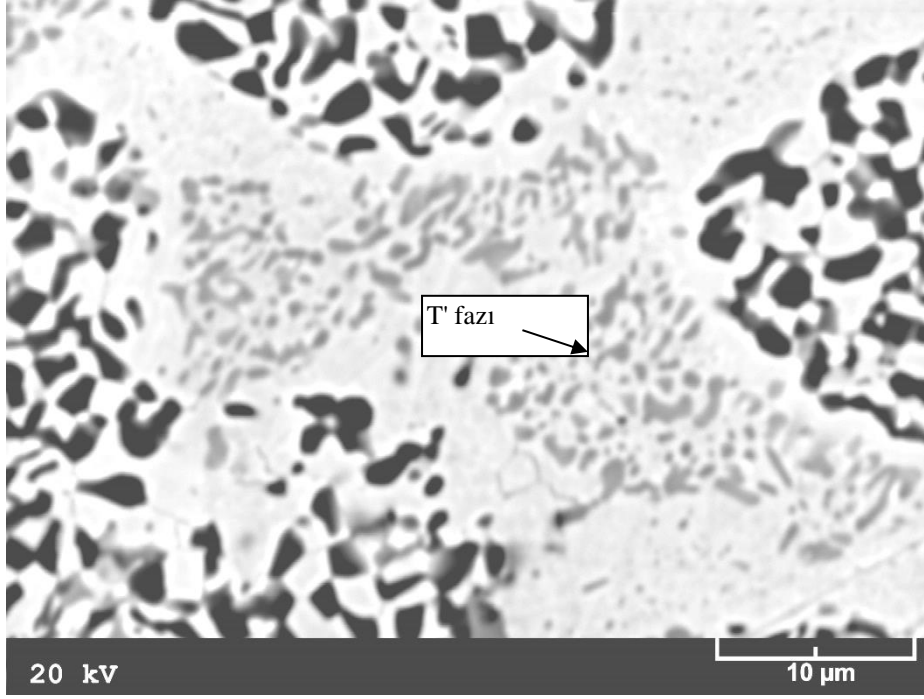
Şekil 17. Zn15Al-3Cu alaşımlının T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunesinden yüksek büyütmede elde edilen SEM görüntüsü



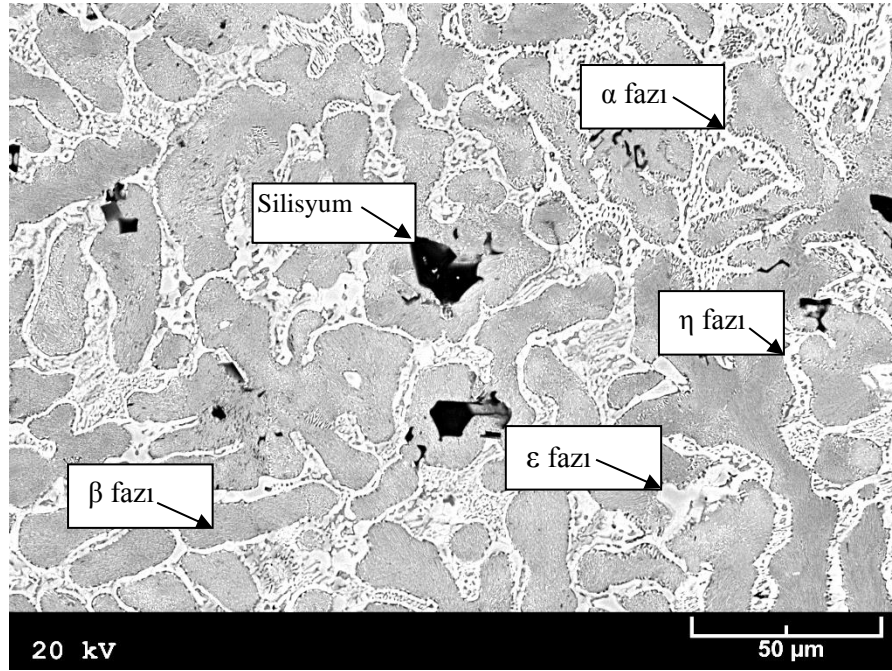
Şekil 18. Zn15Al-3Cu alaşımında 50 saatlik yapay yaşlandırma süresi sonunda oluşan içyapının görünümü



Şekil 19. Zn15Al-3Cu alaşımında 100 saatlik yaşlandırma süresi sonunda oluşan içyapının görünümü

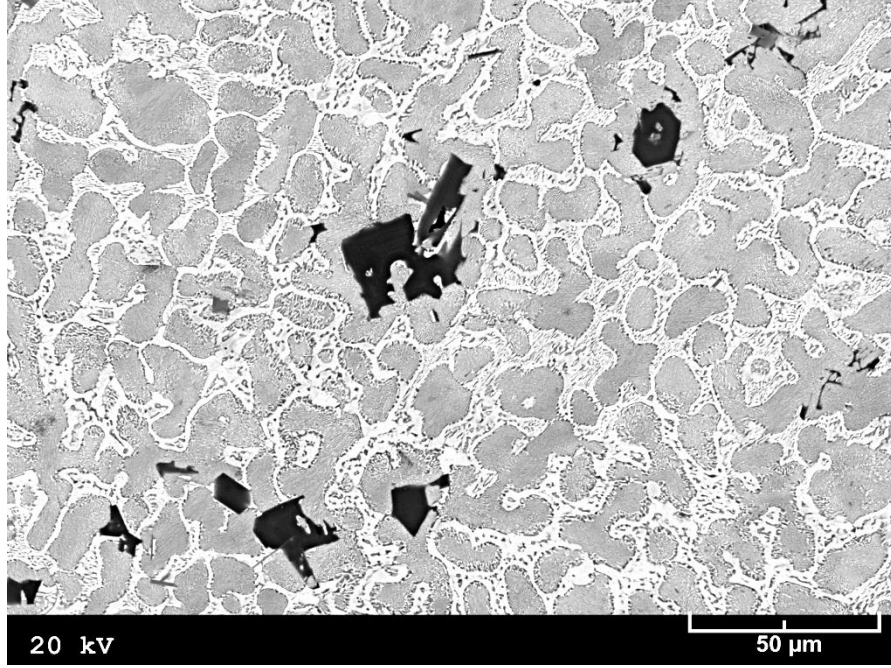


Şekil 20. Zn15Al-3Cu alaşımında 100 saatlik yaşlandırma süresi sonunda oluşan içyapının yüksek büyütmedeki görünümü

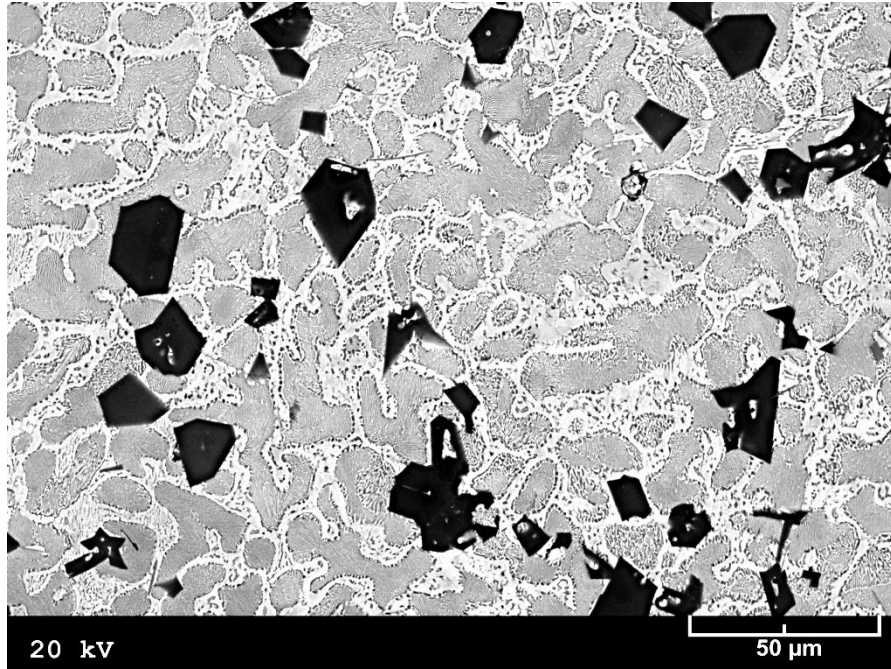


Şekil 21. Zn-15Al-3Cu-0,5Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü

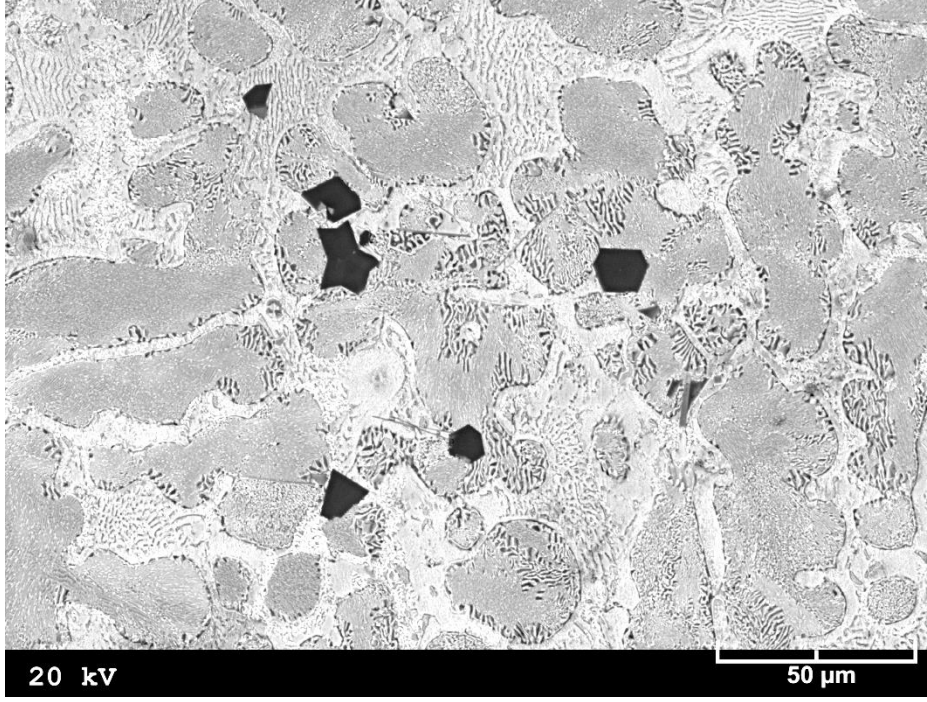




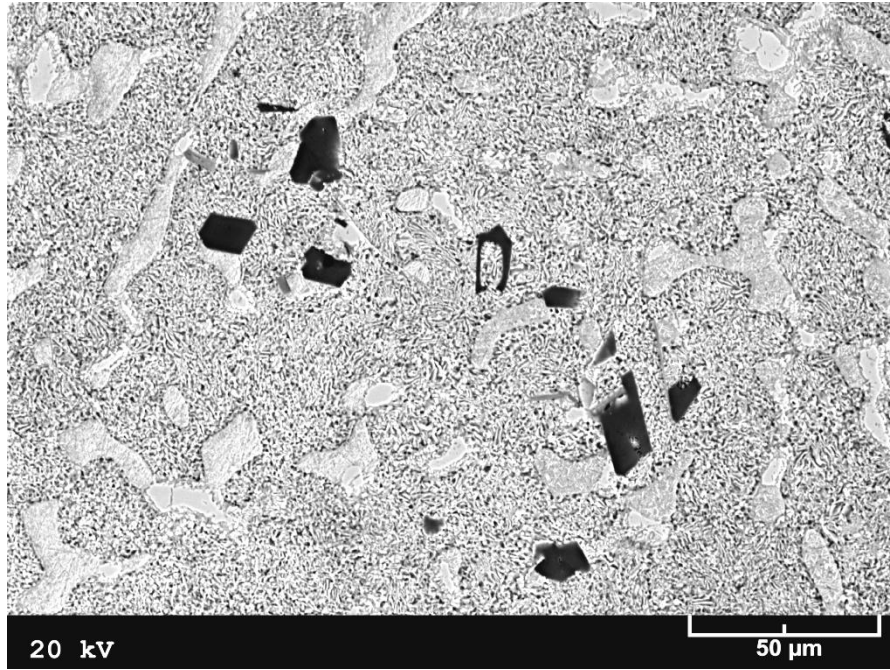
Şekil 22. Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü



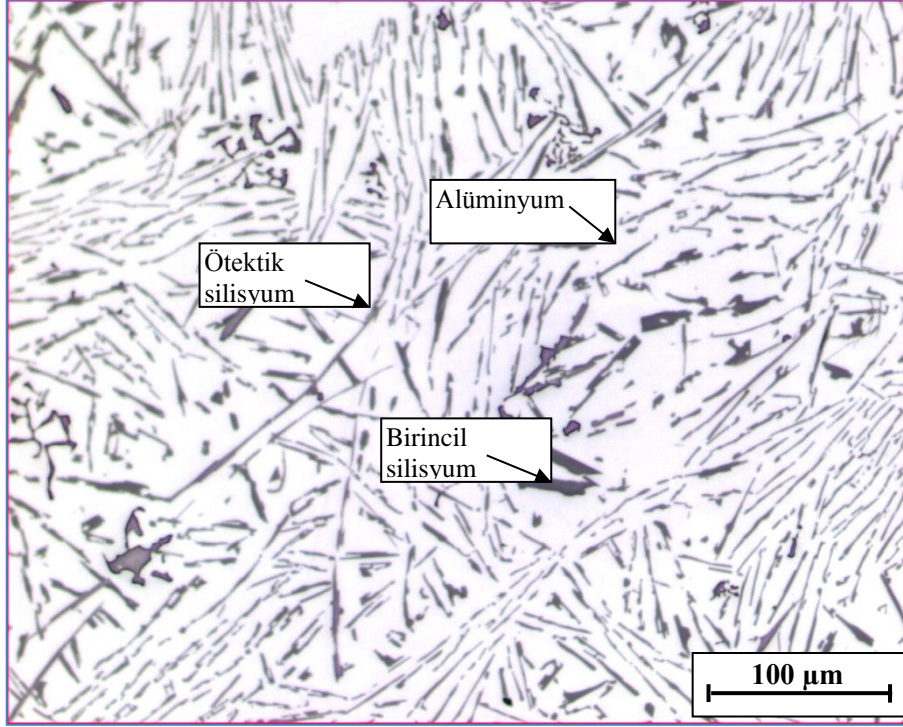
Şekil 23. Zn-15Al-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki içyapısının SEM görüntüsü



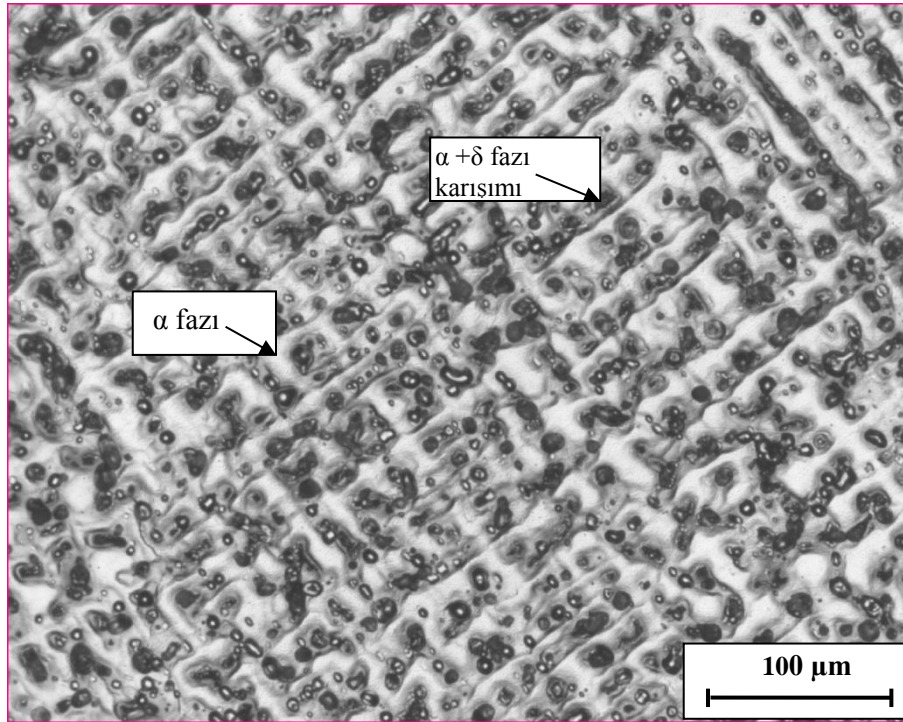
Şekil 24. Zn15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısııl işleme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görüntüsü



Şekil 25. Zn15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısııl işleme tabi tutulmuş numunesinin içyapısının SEM görüntüsü



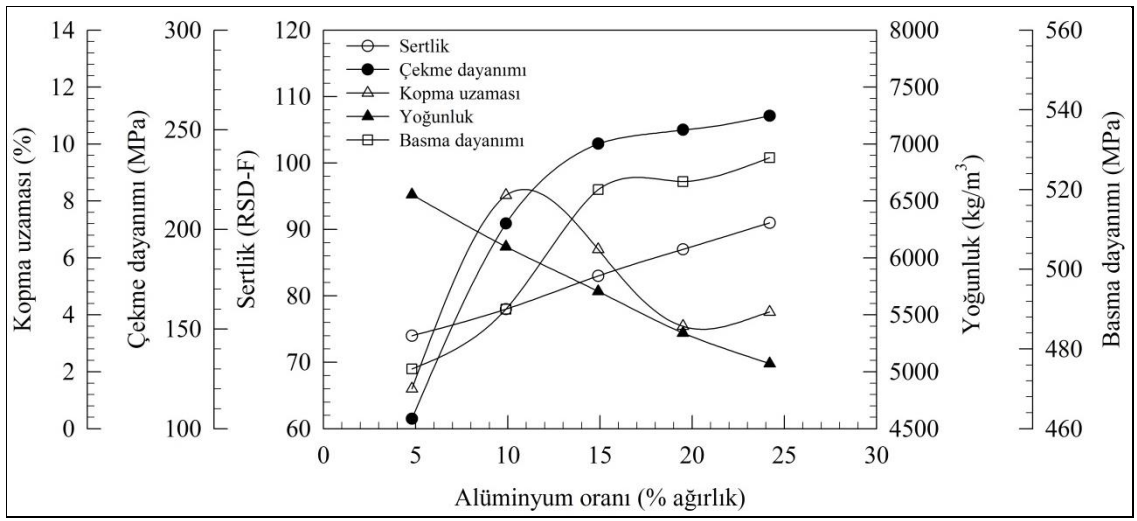
Şekil 26. Al-12Si alaşımının içyapısının görünümü



Şekil 27. SAE 660 bronzunun içyapısı

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

İkili Zn-(5-25)Al alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması, basma dayanımı ve yoğunluk değerlerinin alüminyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 28’de verilmiştir. Bu eğriler, alüminyum oranı arttıkça söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin arttığını, yoğunluk değerlerinin ise azaldığını göstermektedir. Ayrıca, kopma uzaması değerinin %10 Al oranına kadar artan alüminyum oranı ile arttığı, bu oranın üzerine çıkılması durumunda ise azaldığı görülmektedir.



Şekil 28. İkili Zn-(5-25)Al alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması, basma dayanımı ve yoğunluk değerlerinin alüminyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler

Üçlü Zn-15Al-(0-5)Cu ve dördü Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarının yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması, basma dayanımı ve darbe dayanımı değerleri Tablo 9’da, bu değerlerin bakır ve silisyum oranlarına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 29-32’de verilmiştir. Bu eğriler Zn-15Al-(0-5)Cu alaşımlarının yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı değerlerinin artan bakır oranıyla arttığını, kopma uzamasının azaldığını, çekme dayanımının ise %3 Cu oranına kadar artış gösterdikten sonra az da olsa azaldığını göstermektedir.

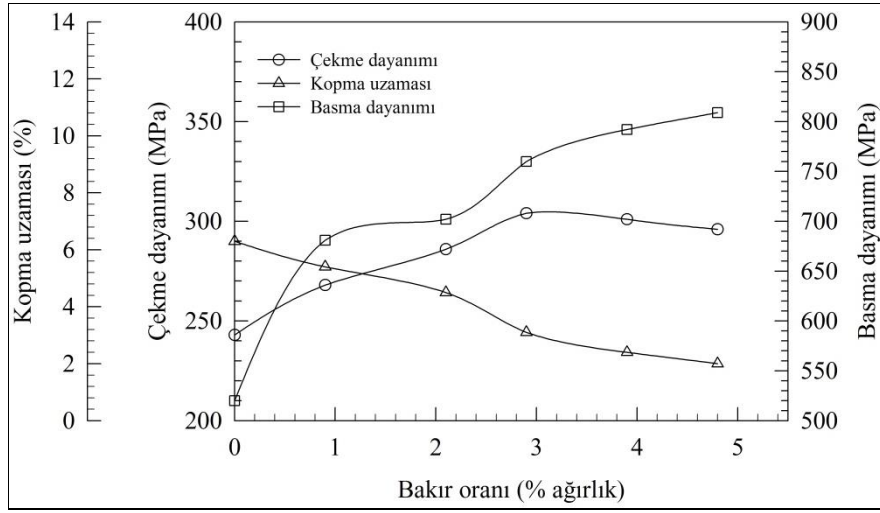
Tablo 9. Zn-15Al-(0-5)Cu-(0-3)Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması, basma dayanımı ve darbe direnci değerleri

Alaşım	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Sertlik (RSD-F)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Basma dayanımı (MPa)	Darbe direnci (J)
Zn-15Al	5698,90	83	243	6,3	520	2,85
Zn-15Al-1Cu	5703,68	87	268	5,4	681	2,67
Zn-15Al-2Cu	5719,34	88	286	4,5	702	2,12
Zn-15Al-3Cu	5748,16	90	304	3,1	760	1,93
Zn-15Al-4Cu	5762,19	91	301	2,4	792	1,34
Zn-15Al-5Cu	5782,41	92	296	2,1	809	1,07
Zn-15Al-3Cu*	5721,67	81	235	0,9	670	1,73
Zn-15Al-3Cu**	5728,38	84	291	2,1	655	1,21
Zn-15Al-3Cu-0,5Si	5711,90	91	310	2,5	775	1,61
Zn-15Al-3Cu-1Si	5696,70	92	314	1,9	785	1,49
Zn-15Al-3Cu-1,5Si	5659,40	94	305	1,4	795	1,43
Zn-15Al-3Cu-2Si	5628,90	95	301	1,2	820	1,39
Zn-15Al-3Cu-2,5Si	5611,90	96	297	1,1	830	1,32
Zn-15Al-3Cu-3Si	5601,30	97	294	1,0	836	1,28
Zn-15Al-3Cu-1Si*	5670,45	82	240	0,8	680	1,31
Zn-15Al-3Cu-1Si**	5677,10	85	295	1,6	670	0,94
Al-12Si	2610,60	67	128	1,8	400	1,98
SAE 660 bronz	8901,14	83	295	15	1080	14,12
* : T5 ısıl işlemine tabi tutulmuş						
** : T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş						

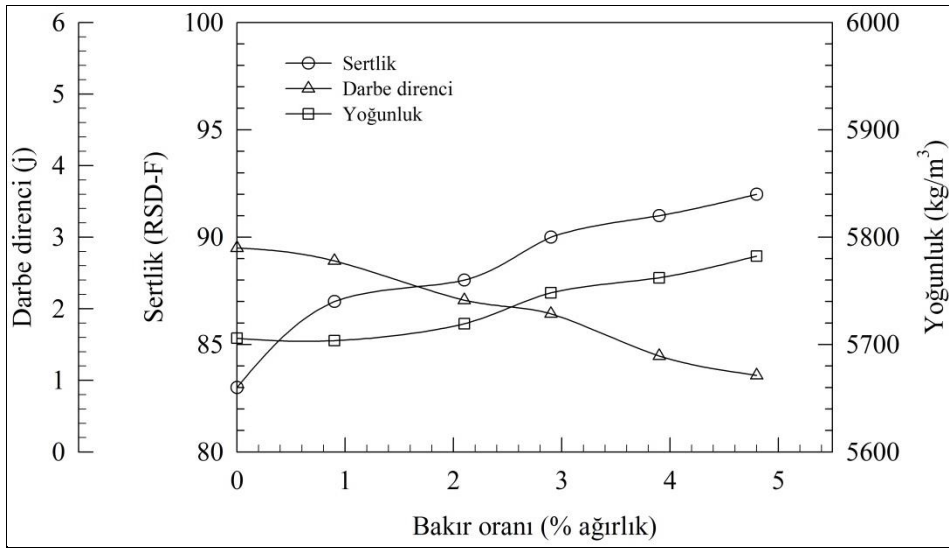
Dörtlü Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarında ise silisyum oranı arttıkça sertlik ve basma dayanımı değerlerinin arttığı, kopma uzaması, darbe dayanımı ve yoğunluk değerlerinin azaldığı, çekme dayanımının ise %1 Si oranına kadar belirgin bir artış sergiledikten sonra azaldığı görülmektedir. Bu alaşımların içyapılarında bulunan  $\beta$  dendritleri ile  $\beta + \eta$  faz karışımından oluşan dendritler arası bölgelerin mikrosertlik değerlerinin bakır ve silisyum oranlarına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 33 ve 34'de verilmiştir. Bu eğriler üçlü alaşımlarda bulunan  $\beta$  fazının mikrosertlik değerinin %3 Cu oranına kadar artan bakır oranı arttıktan sonra hemen hemen sabit kaldığını, dendritler arası bölgenin ( $\beta + \eta$ ) mikrosertliğinin artan bakır oranı ile sürekli arttığını, silisyum oranının ise söz konusu faz ve bölgenin mikrosertlik değerleri üzerinde etkili olmadığını göstermektedir.

T5 ve T7 ısıl işlemleri için en uygun yaşlandırma süresini belirlemek amacıyla yapılan deneyler sırasında Zn-15Al-3Cu alaşımının sertlik ve boyunda meydana gelen

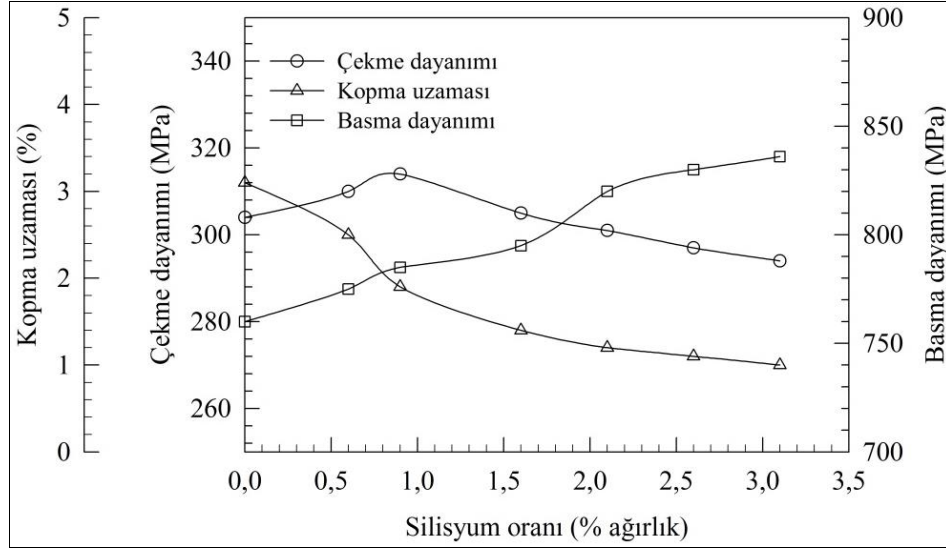
değişimleri gösteren eğriler Şekil 35-36'da verilmiştir. Bu eğriler T5 ısıtma işlemi sırasında söz konusu alaşımın sertliğinin azalması, boyunun uzadığını ve bu büyüklüklerin yaklaşık 50 saatlik bir süre sonunda hemen hemen sabit değerlere ulaştığını göstermektedir. Ayrıca, bu eğriler T7 ısıtma işlemi sırasında alaşımın sertliğinin önce artıp bir tepe noktasına ulaştıktan sonra azaldığını, boyunun ise bir azalma devresinden sonra artışa geçtiğini ve her iki büyüklüğün yaklaşık 10 saatlik bir yaşlandırma süresi sonunda hemen hemen sabit değerlere ulaştıklarını göstermektedir.



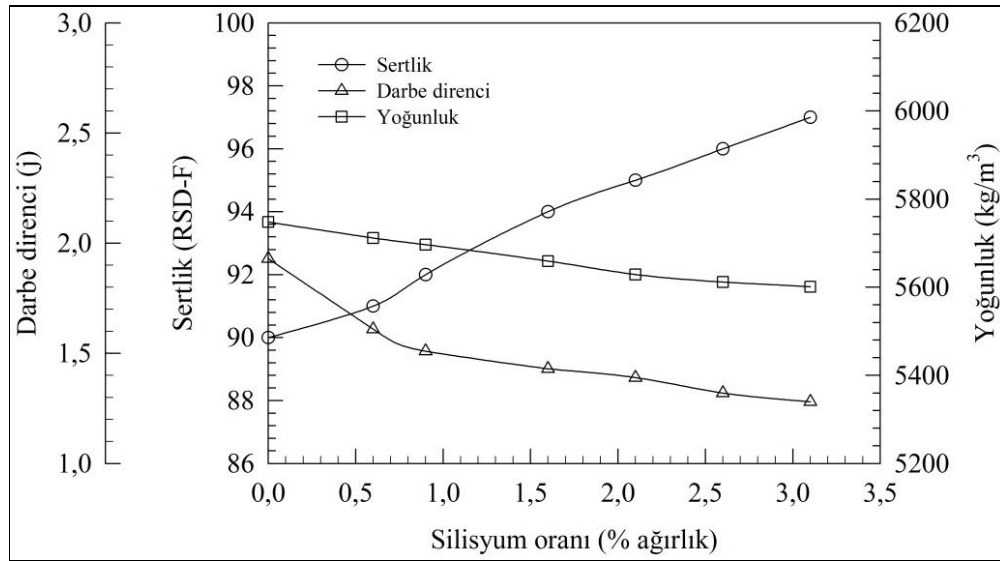
Şekil 29. Zn-15Al-(0-5)Cu alaşımlarının çekme ve basma dayanımları ile kopma uzaması değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



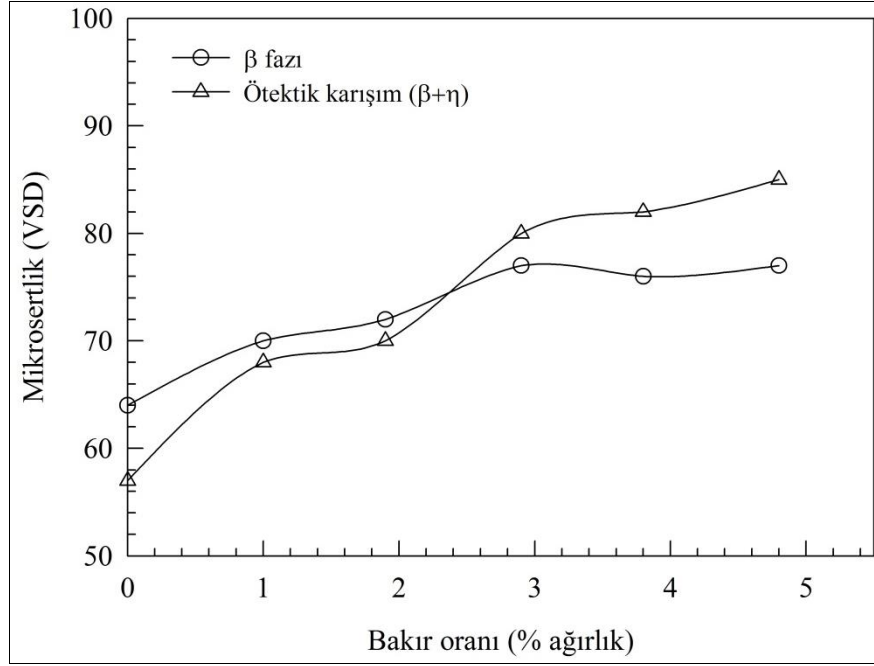
Şekil 30. Zn-15Al-(0-5)Cu alaşımlarının sertlik, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



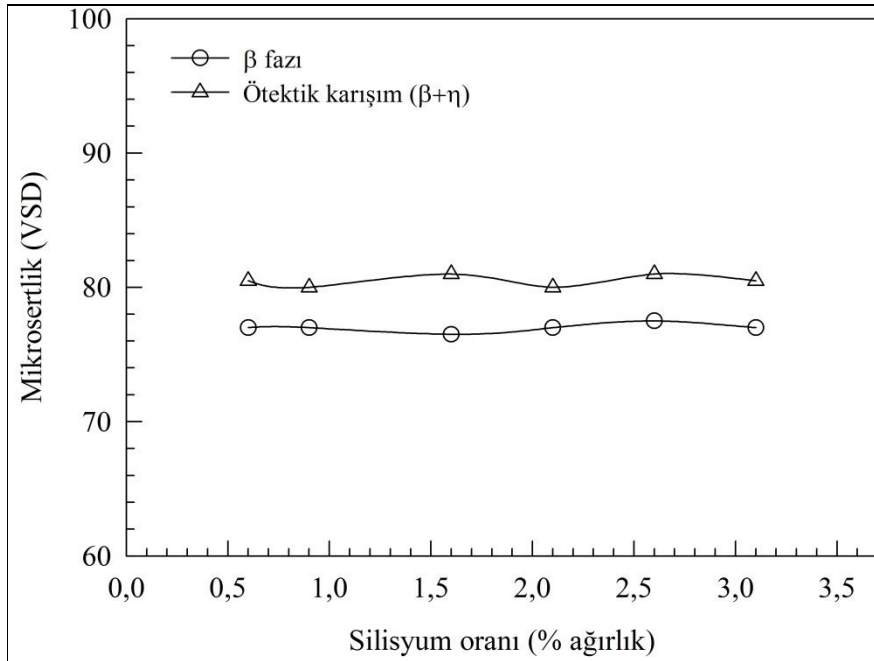
Şekil 31. Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarının çekme dayanımı, basma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 32. Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarının sertlik, darbe direnci ve yoğunluk değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler

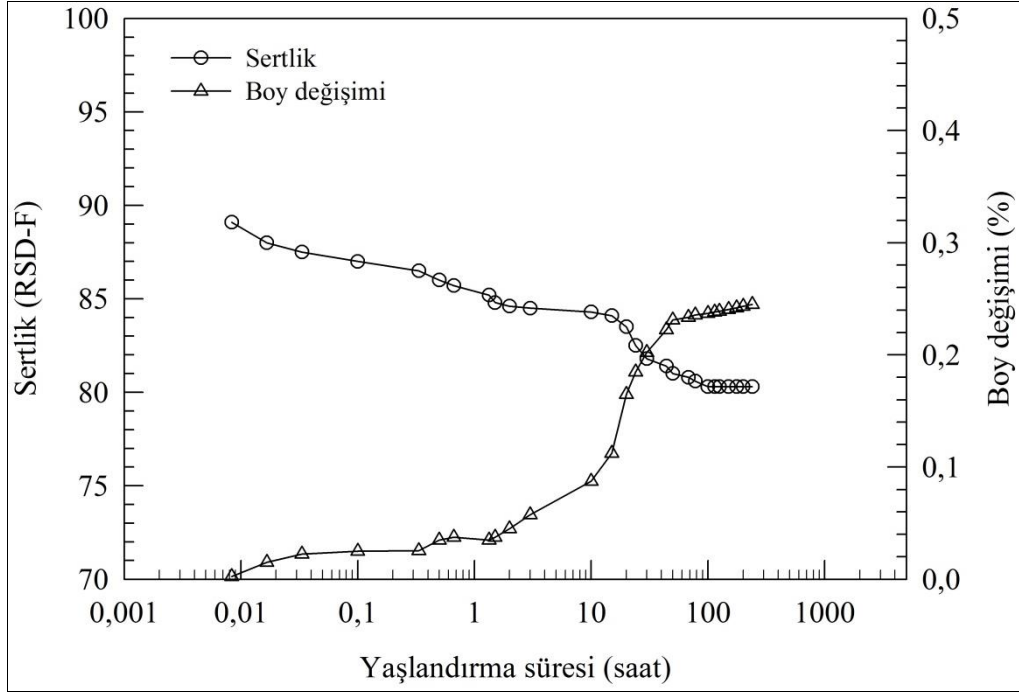


Şekil 33. Zn-15Al-(0-5)Cu alaşımlarının içyapılarında bulunan  $\beta$  fazı ve ( $\beta+\eta$ ) ötektik karışımının mikrosertlik değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler

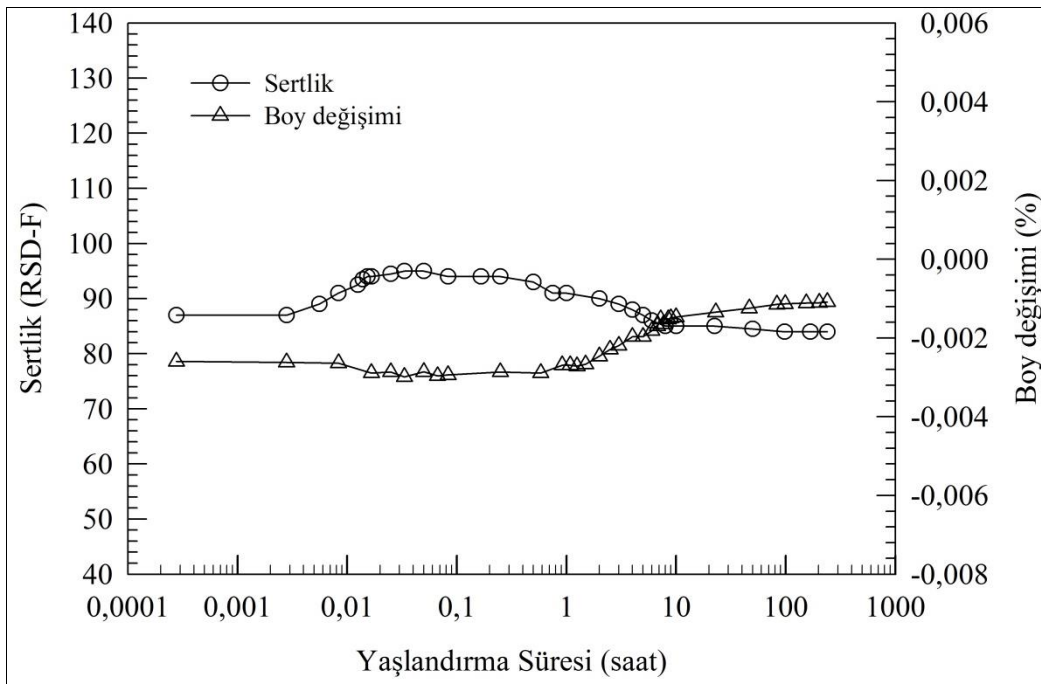


Şekil 34. Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarının içyapısında bulunan  $\beta$  fazı ve ( $\beta+\eta$ ) ötektik karışımının mikrosertlik değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler





Şekil 35. Zn-15Al-3Cu alaşımının sertlik ve boy değişimi değerlerinin T5 ısıl işlemi sırasındaki değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 36. Çözündürme ve su verme işlemi sonrasında 180°C sıcaklıkta yaşlandırılan Zn-15Al-3Cu alaşımının sertlik ve boyunda meydana gelen değişimlerin yaşlandırma süresine göre değişimlerini gösteren eğriler

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

Yağsız durumda 3 MPa basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik yol tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu ve Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 37-40'da, verilmiştir. Bu eğriler alaşımların söz konusu değerlerinin ilk 200 m'lik yola karşı gelen başlangıç aşamasında hızlı bir artış gösterdikten sonra azalan bir hızla arttığını göstermektedir. Söz konusu alaşımlara ait deney numunelerinden yukarıda belirtilen koşullarda yapılan deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin bakır ve silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 41 ve 42'de verilmiştir. Bu eğriler Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin artan bakır oranı ile azalıp, %3 Cu oranında minimum seviyelerden geçtikten sonra arttıklarını göstermektedir, Şekil 41. Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının söz konusu değerlerinin ise artan silisyum oranı ile azalıp, %1 Si oranında en düşük seviyelere düştükten sonra artışa geçtikleri görülmektedir, Şekil 42.

Üçlü ve dördü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncini sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının T5 ve T7 ısıl işlemine tabi tutulmuş numunelerinin sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 43-46'da verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımların dökülmüş ve ısıl işlem görmüş durumlardaki numunelerinden elde edilen sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı değerlerinin yola göre benzer değişimler sergilediklerini yani deneylerin başlangıç aşamasındaki hızlı bir artıştan sonra azalan hızlarla arttıklarını göstermektedir. Deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı değerleri ile ölçülen hacim kaybı değerlerine göre çizilen çubuk diyagramı (Şekil 47) dikkate alındığında Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının ısıl işlem görmüş numunelerinin dökülmüş durumdaki numunelerine göre daha yüksek sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı sergiledikleri görülmektedir.

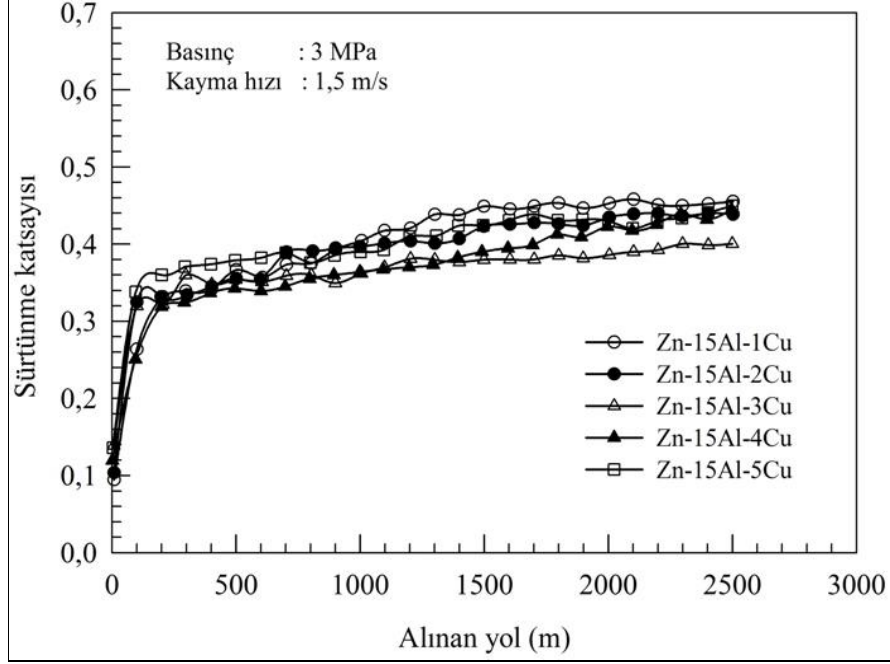
Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinden elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin basınç ve kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 48-59'da verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımların yağsız çalışma durumdaki sürtünme katsayılarının artan basınç ile azaldığını, hacim kaybı ve sıcaklık değerlerinin ise arttığını,

ayrıca bu alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızından fazla etkilenmediğini, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise artan kayma hızı ile arttığını göstermektedir.

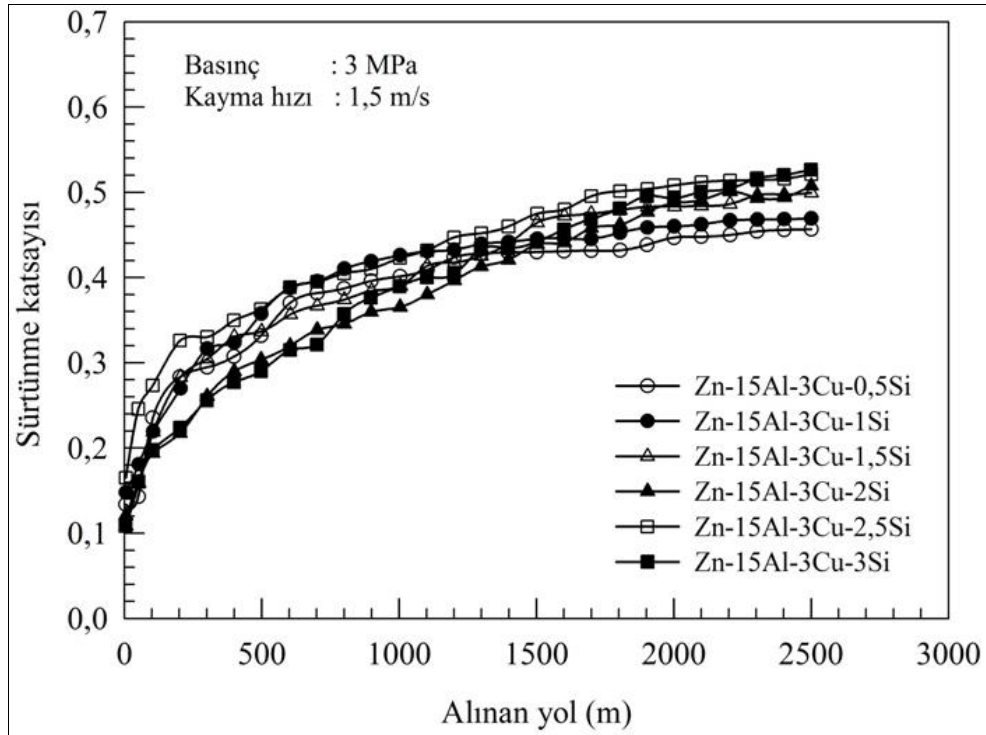
1cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç, 2 m/s'lik hız ve 108 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu ve Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 60-65'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımların söz konusu değerlerinin deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir artış sergiledikten sonra artan kayma yoluyla azalarak hemen hemen sabit değerlere ulaştıklarını göstermektedir. Yukarıda belirtilen koşullarda yapılan deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin bakır ve silisyum oranlarına göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 66 ve 67'de verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin artan bakır ve silisyum oranlarıyla azalıp, sırasıyla %3 Cu ve %1 Si oranlarında en düşük seviyelerinden geçtikten sonra arttıklarını göstermektedir.

Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının T5 ve T7 ısıtılmasına tabi tutulan numunelerinin yağlı durumdaki sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğrilerin, bu alaşımlardan dökülmüş durumda elde edilen söz konusu eğrilerle benzerlik arz ettiği görüldü, Şekil 68-73. Ayrıca, bu alaşımların gerek yağsız, gerekse yağlı koşullardaki en yüksek aşınma direncini dökülmüş durumda sergiledikleri belirlendi, Şekil 72,73.

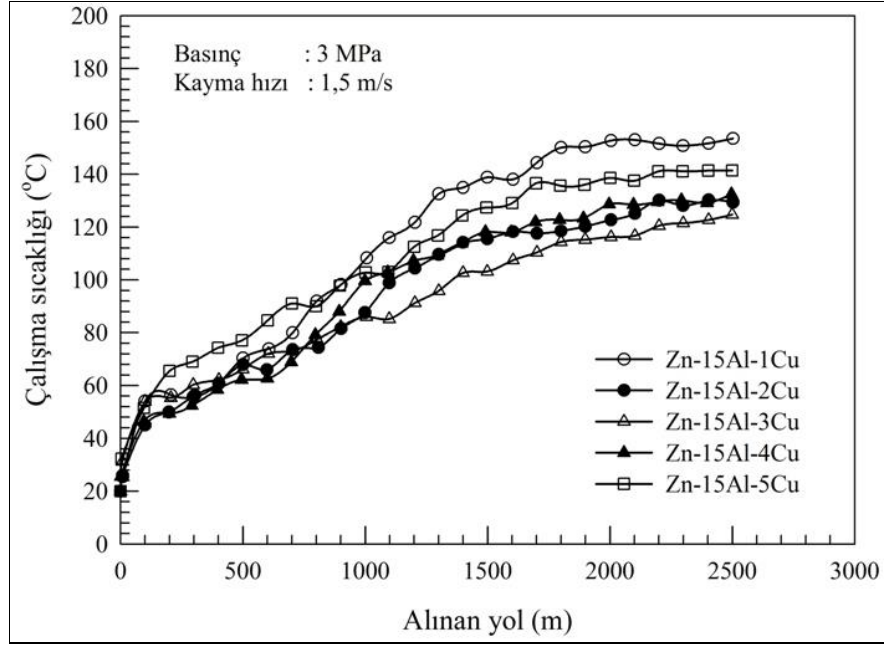
Söz konusu alaşımların dökülmüş ve ısıtılma işlemi görmüş durumlardaki numunelerinden elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisi, basınç ve kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 74-91'de verilmiştir. Bu eğriler sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin artan yağ debisi ile azaldıklarını, basıncın artması durumunda ise sürtünme katsayısının azalıp, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin arttığını göstermektedir. Ayrıca, bu eğrilere bakıldığında kayma hızının artmasıyla sıcaklığın arttığı, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinde ise belirgin bir değişimin meydana gelmediği görülmektedir.



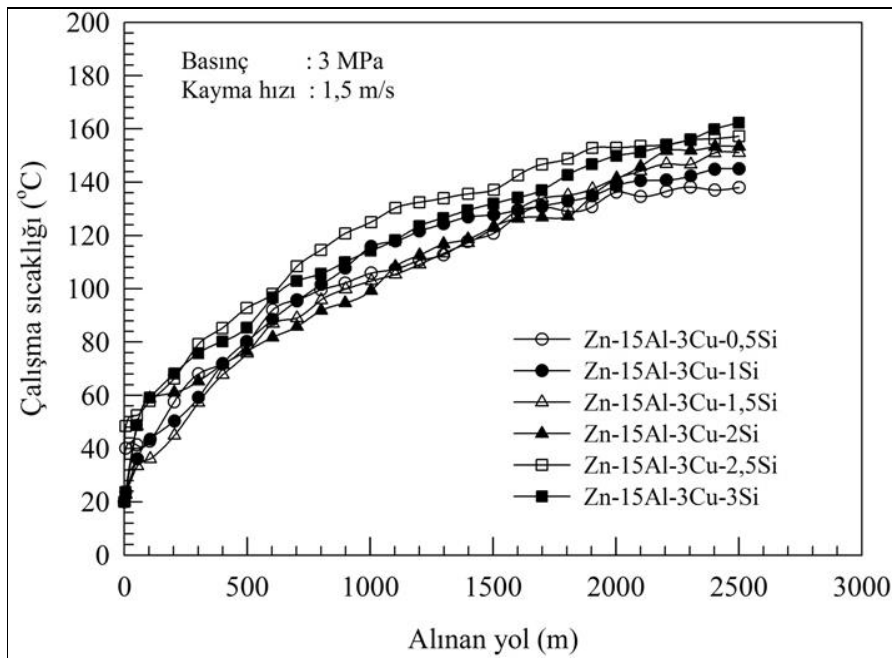
Şekil 37. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



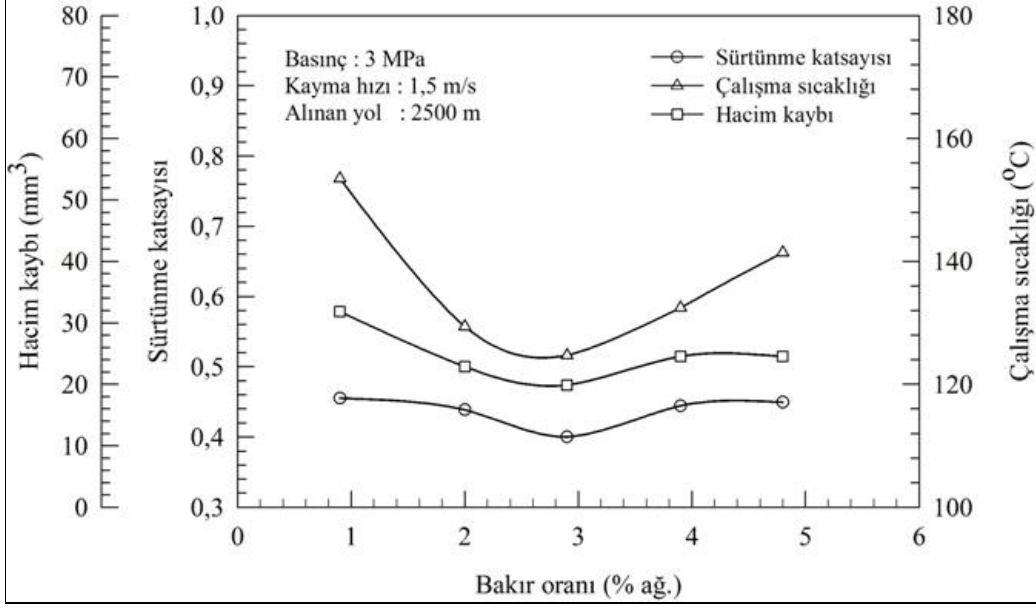
Şekil 38. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



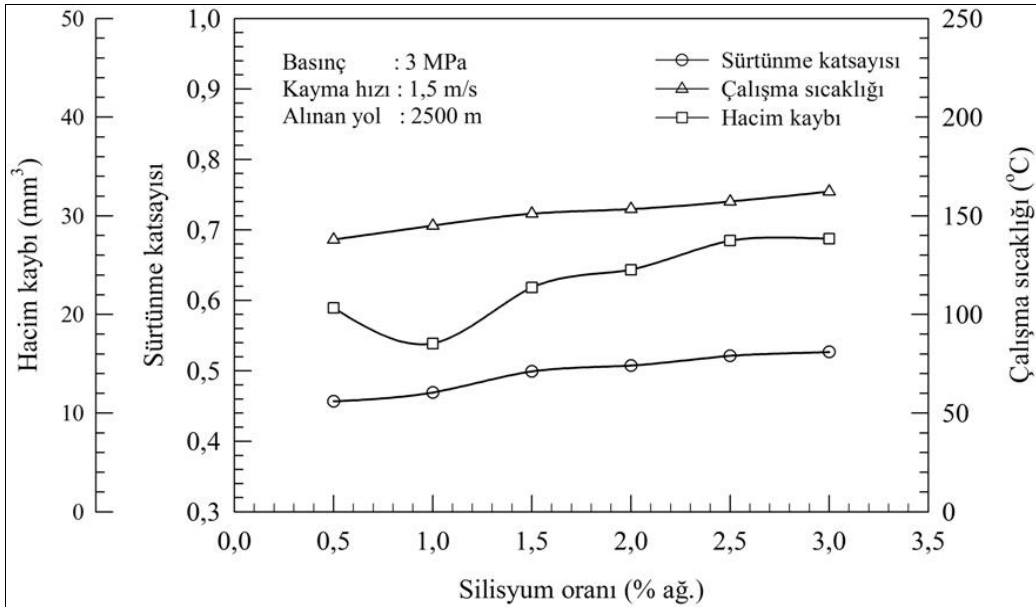
Şekil 39. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



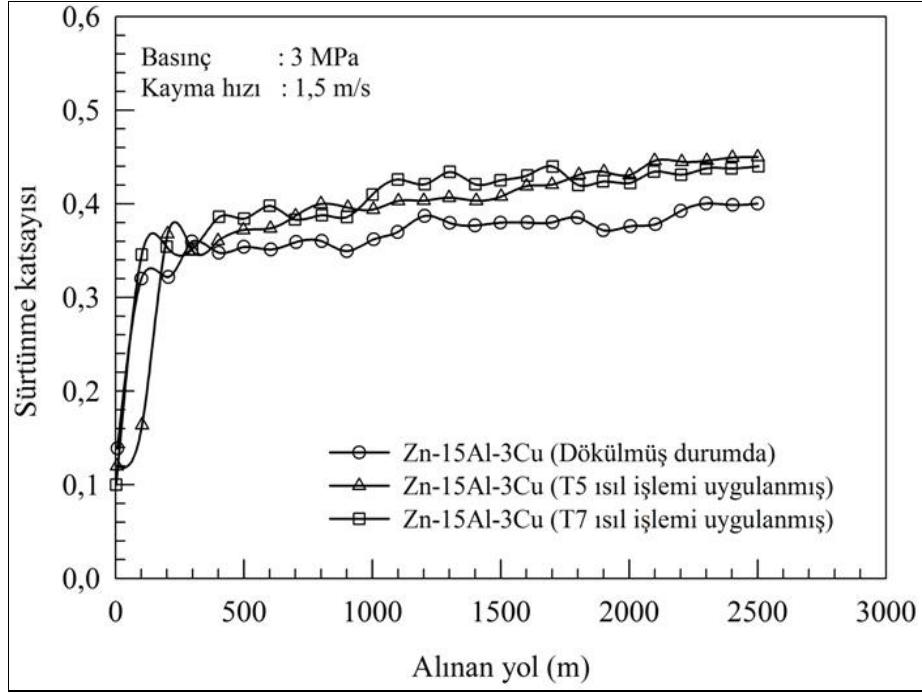
Şekil 40. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



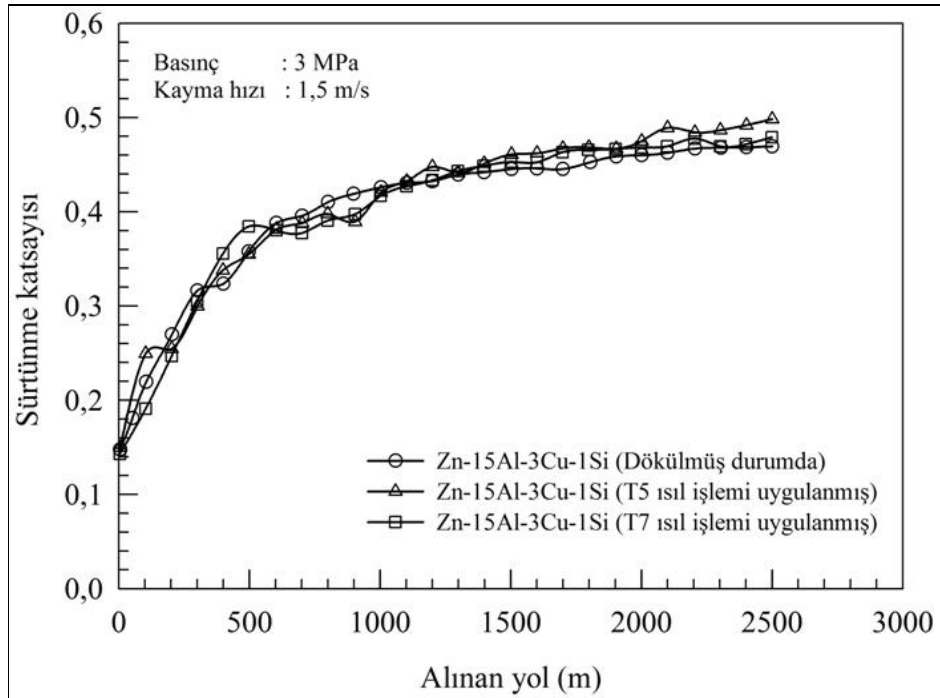
Şekil 41. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



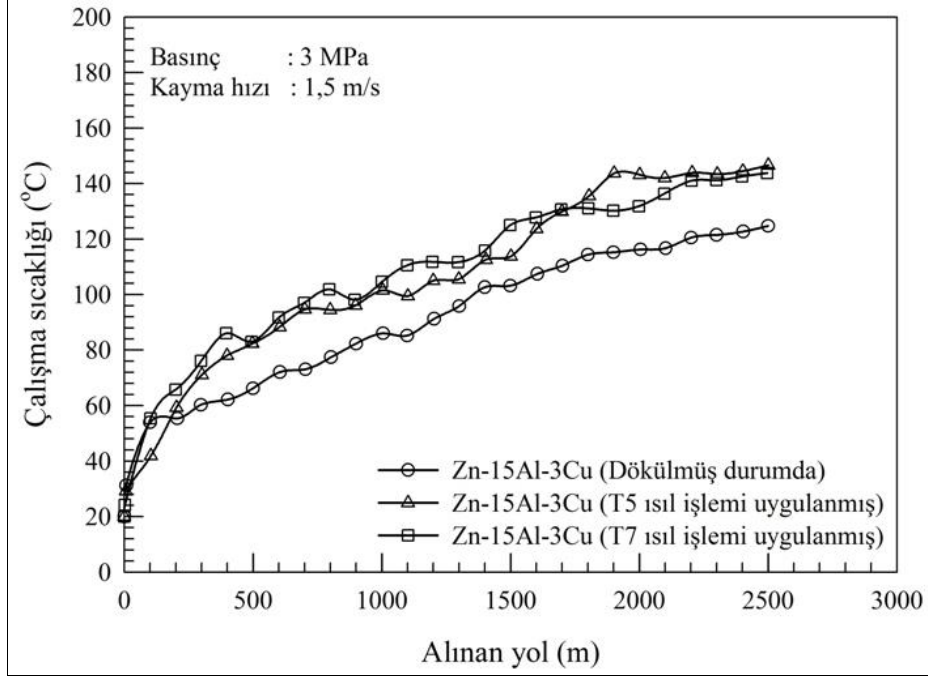
Şekil 42. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



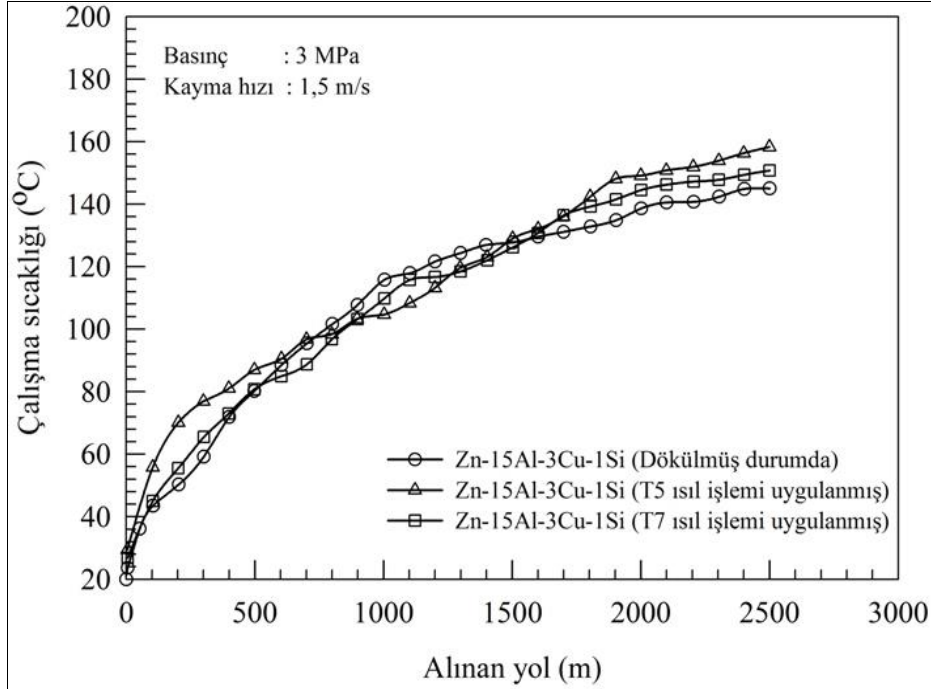
Şekil 43. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılması görmüş numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 44. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılması görmüş numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

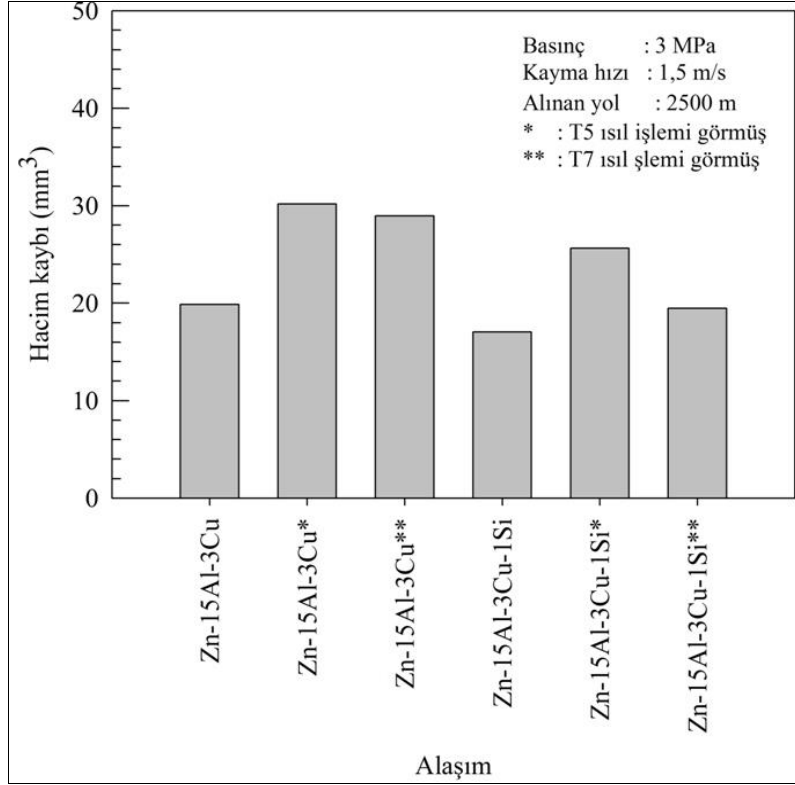


Şekil 45. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıtılması görmüş numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

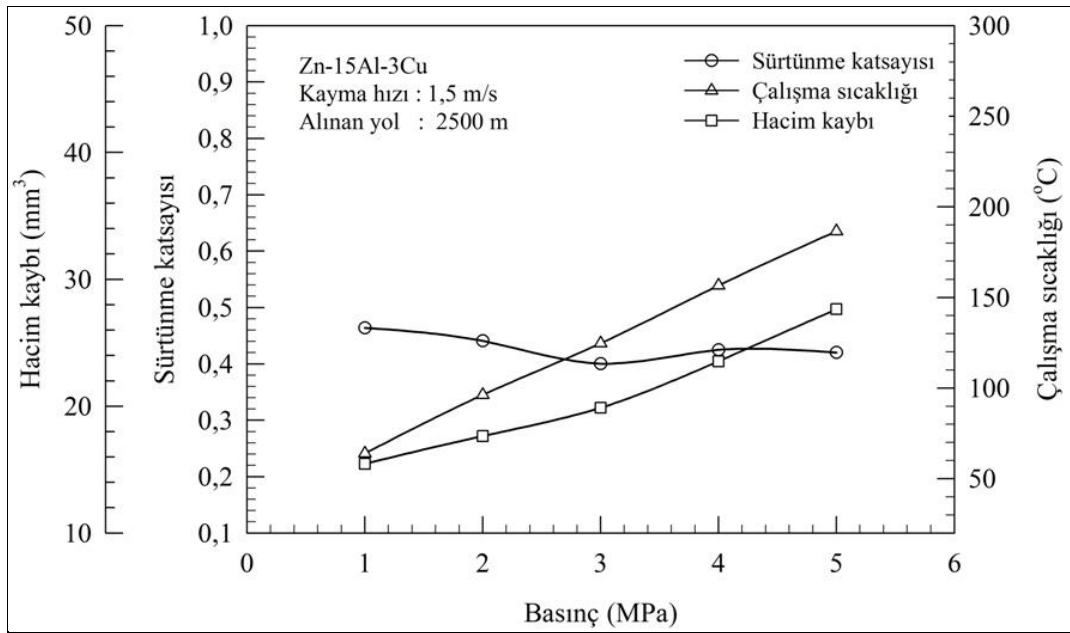


Şekil 46. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıtılması görmüş numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

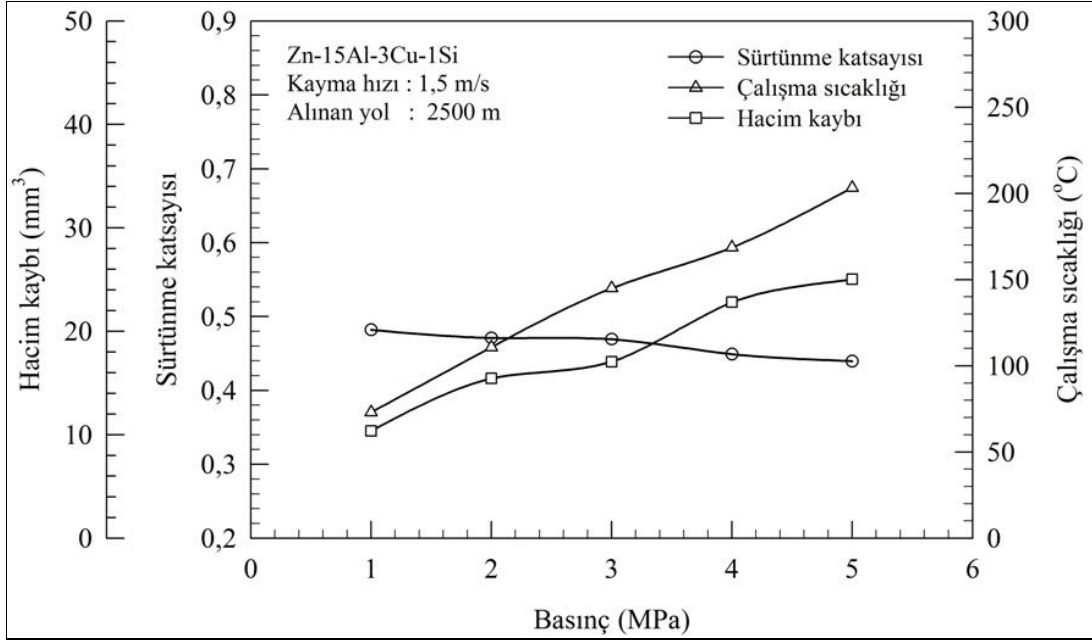




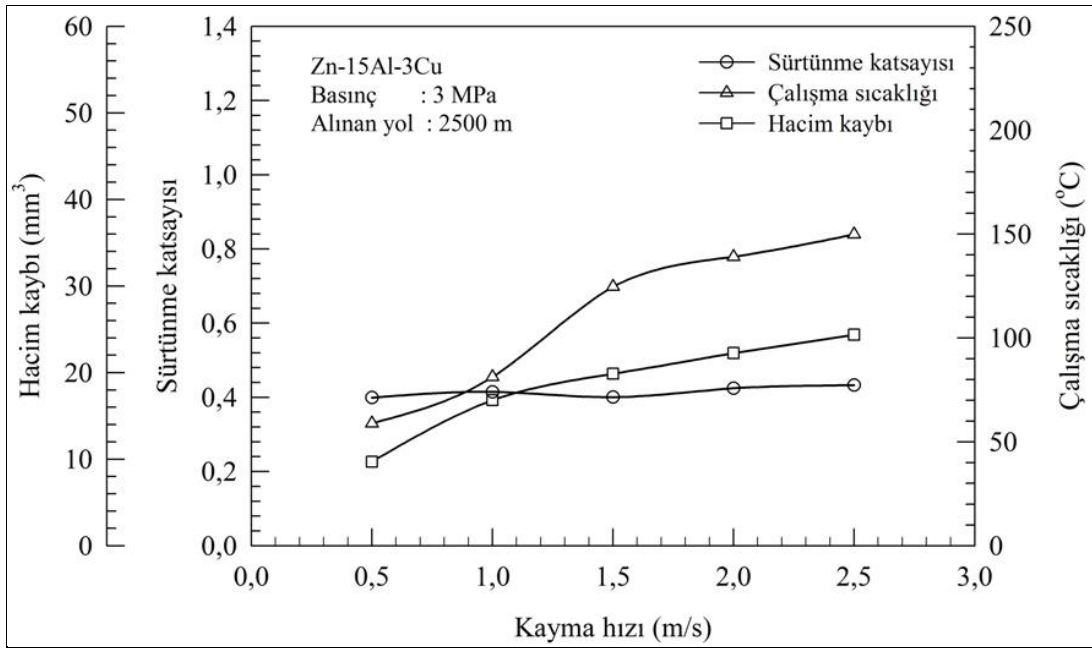
Şekil 47. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıt işleme (T5 ve T7) görmüş numunelerinde meydana gelen hacim kaybı değerlerini gösteren çubuk diyagramı



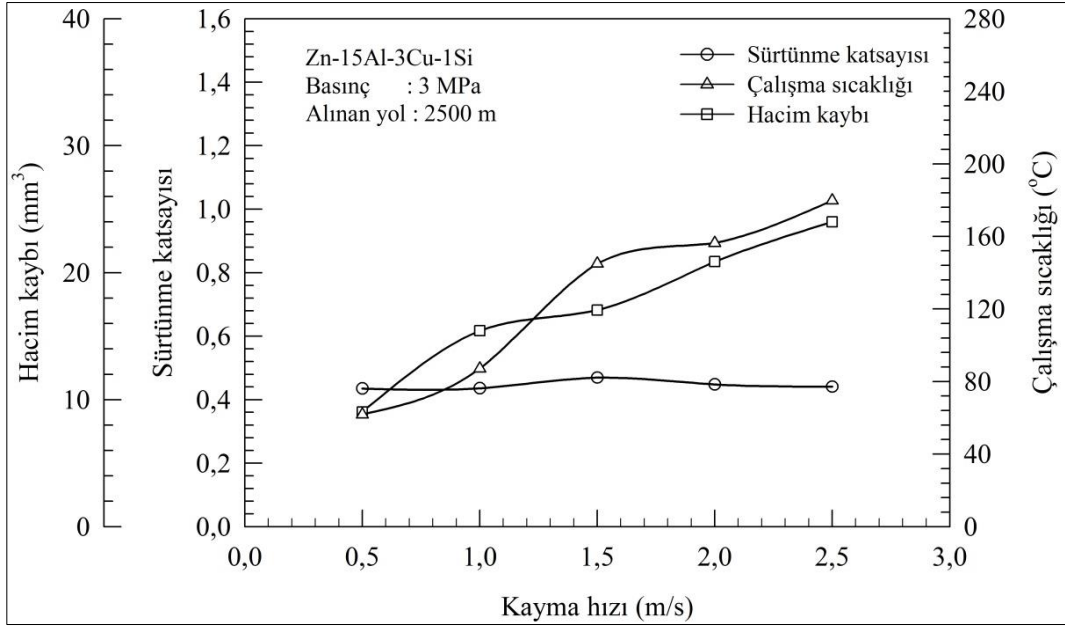
Şekil 48. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



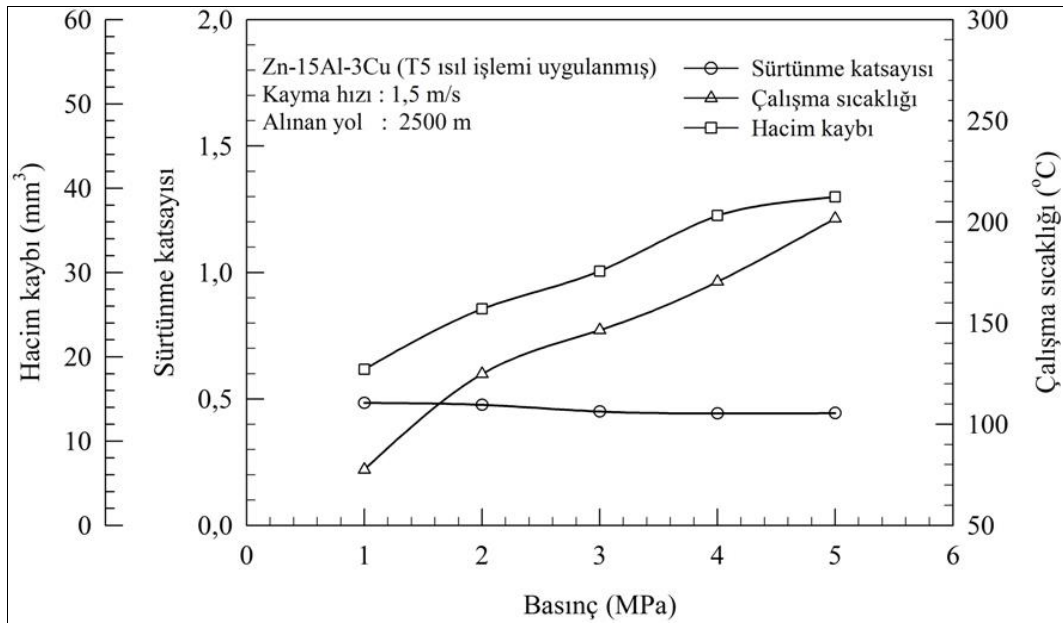
Şekil 49. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



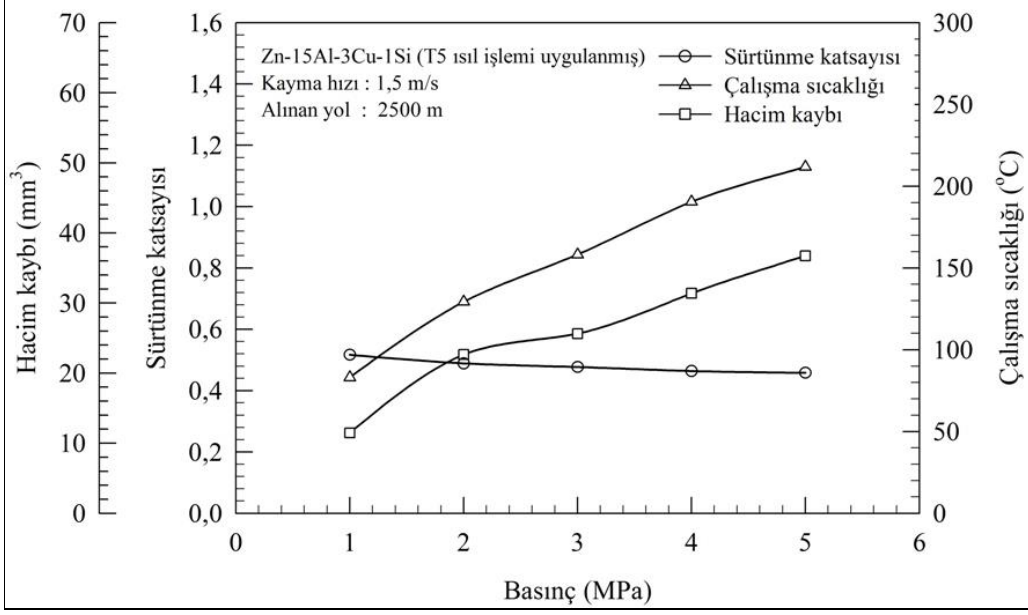
Şekil 50. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



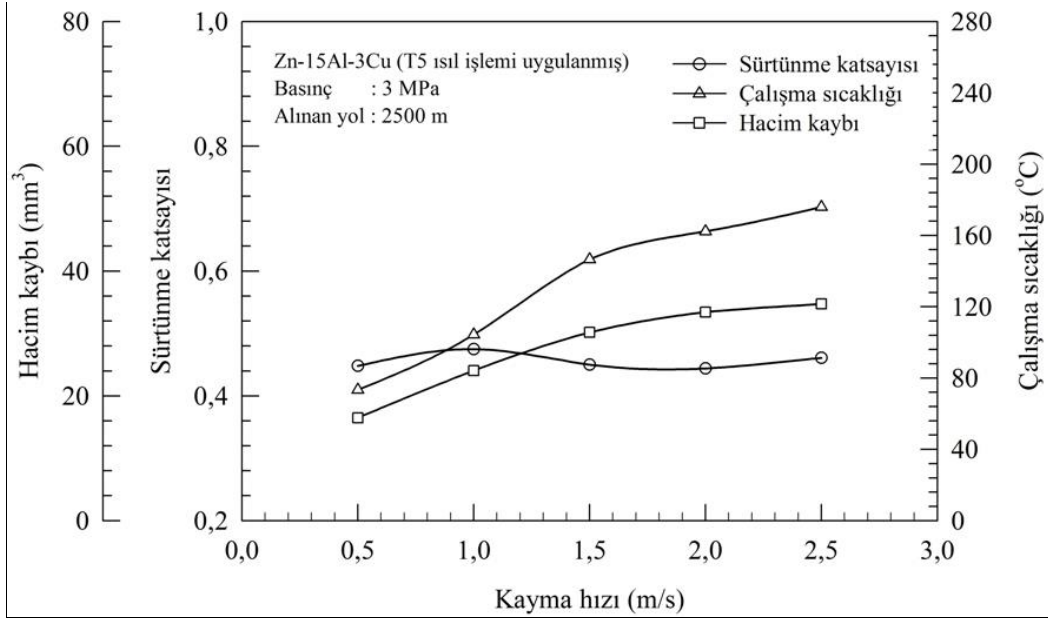
Şekil 51. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



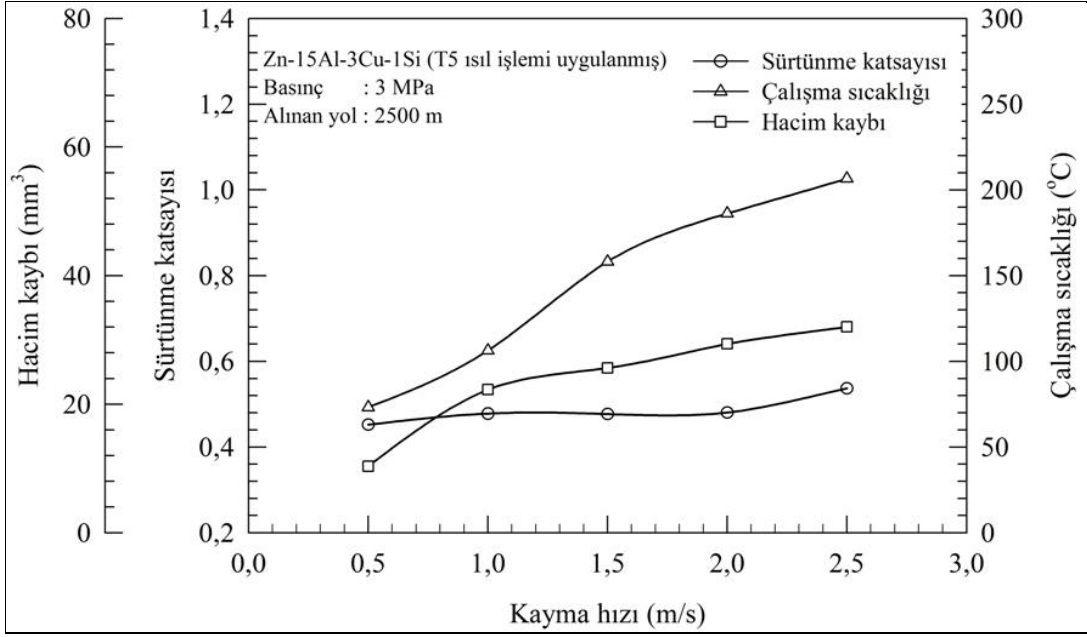
Şekil 52. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



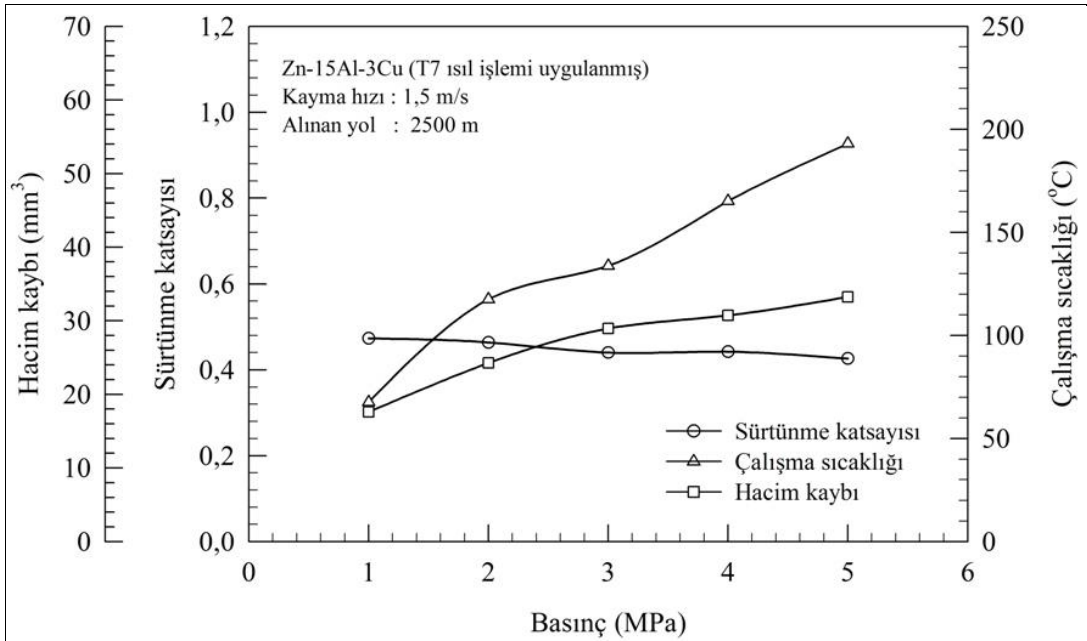
Şekil 53. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınçla değişimini gösteren eğriler



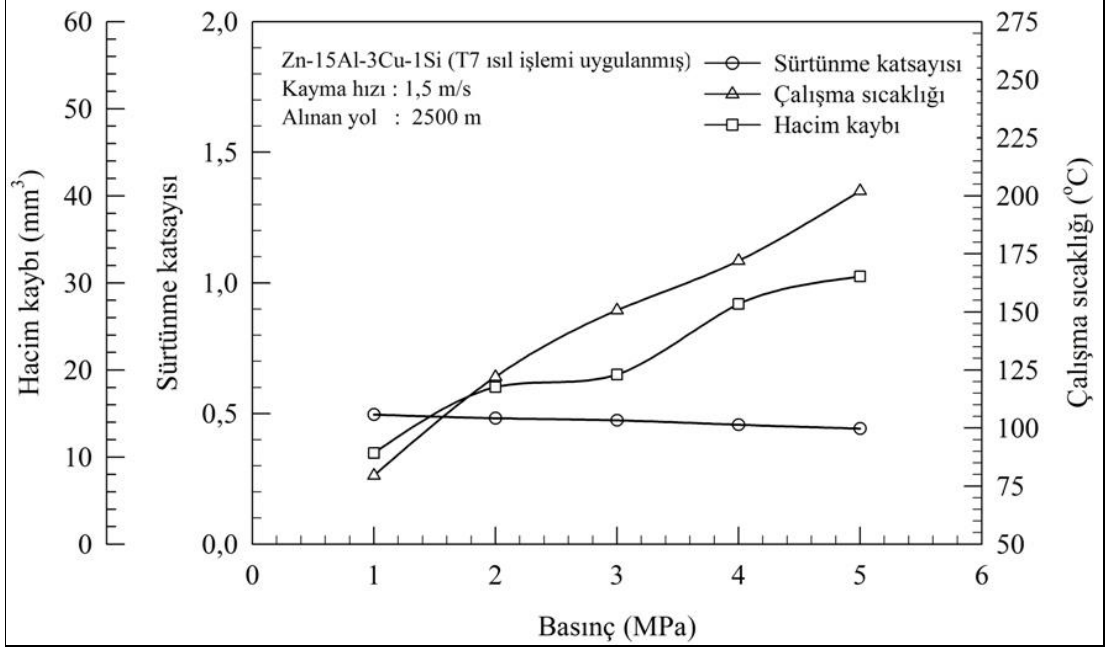
Şekil 54. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimini gösteren eğriler



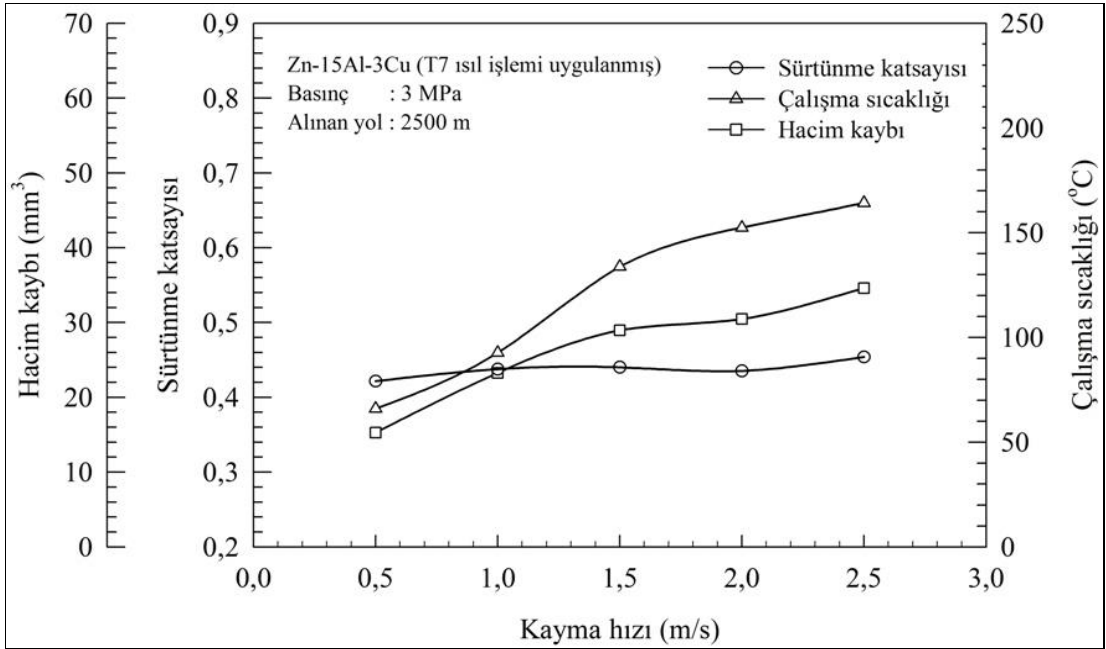
Şekil 55. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtılması uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



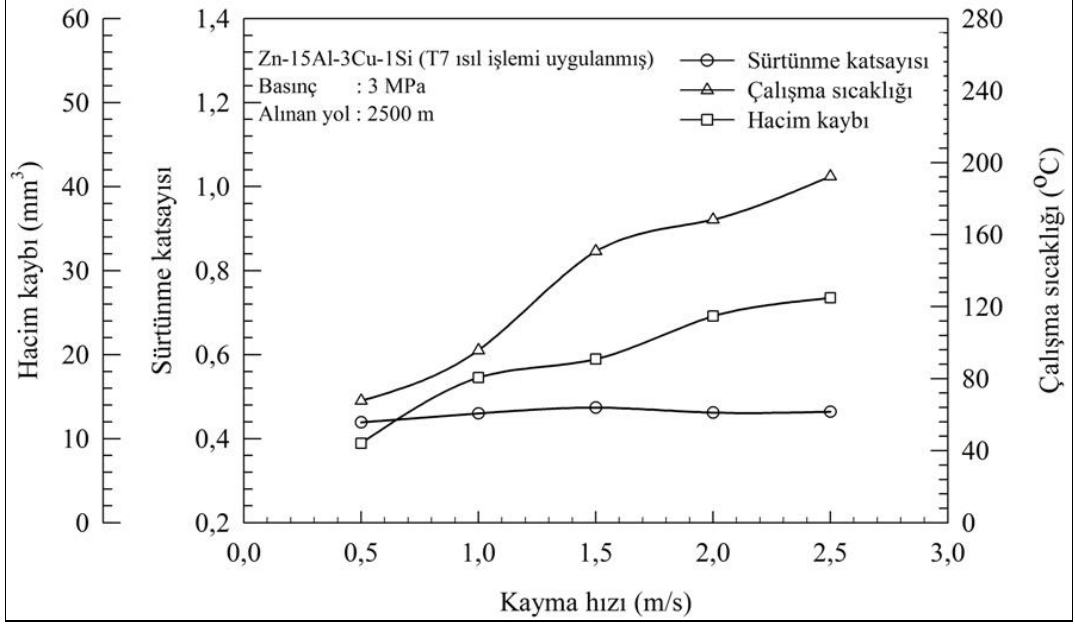
Şekil 56. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılması uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



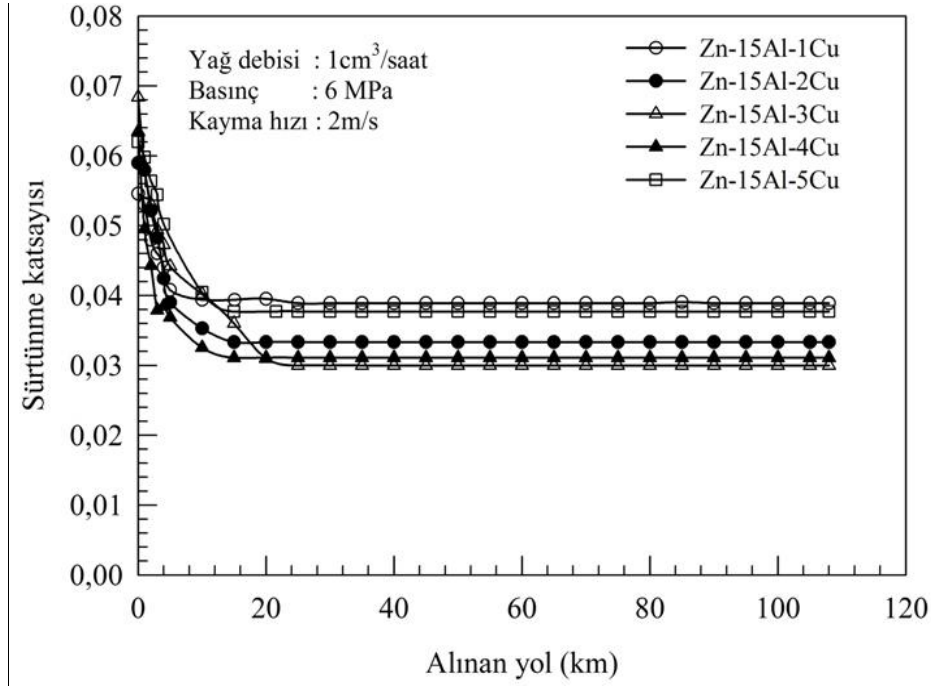
Şekil 57. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtılmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



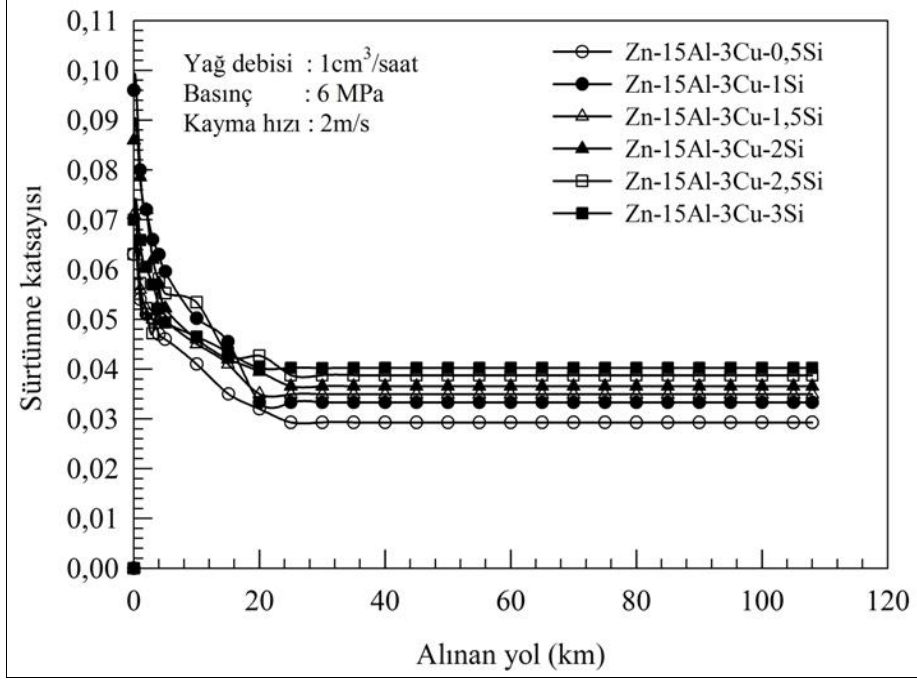
Şekil 58. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



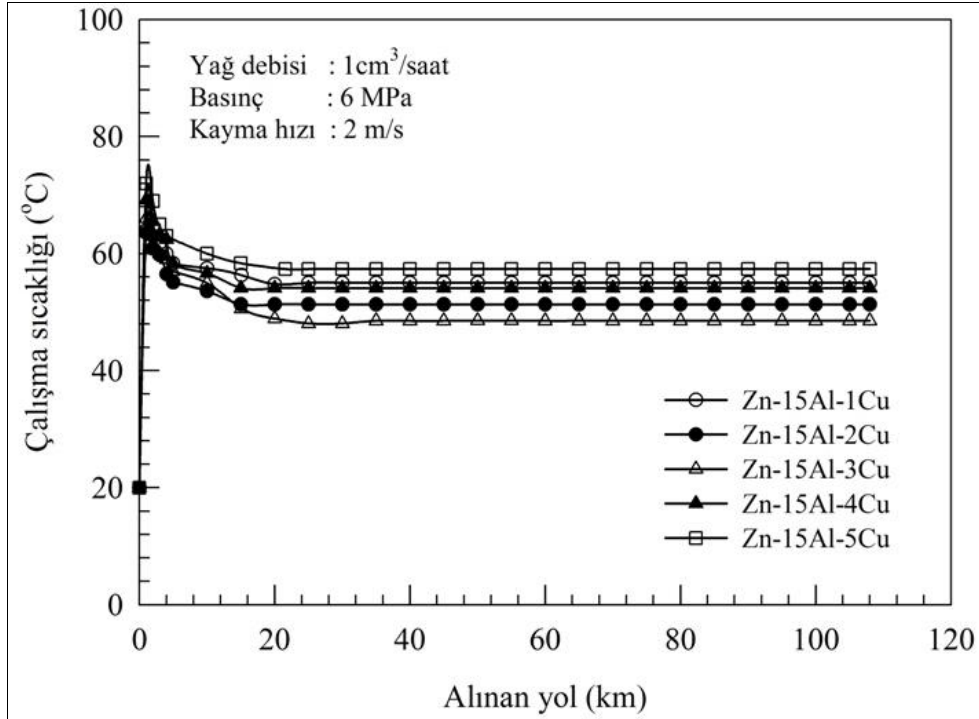
Şekil 59. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 60. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

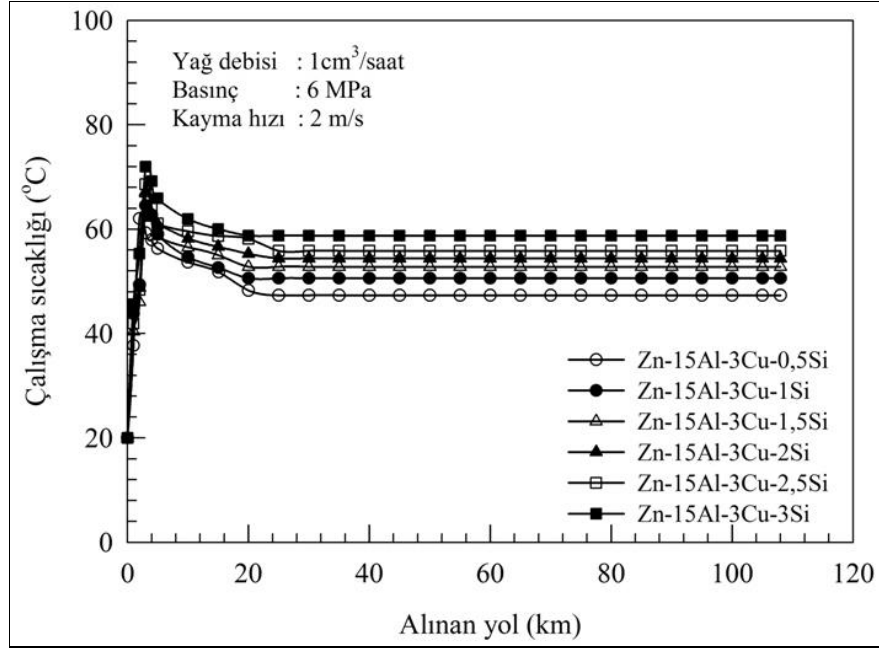


Şekil 61. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

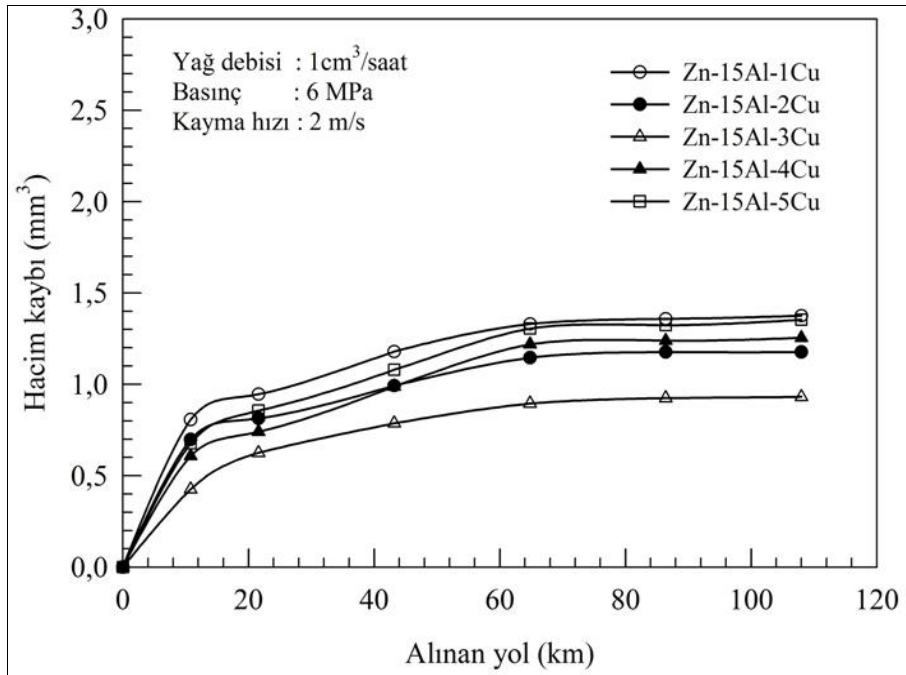


Şekil 62. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler

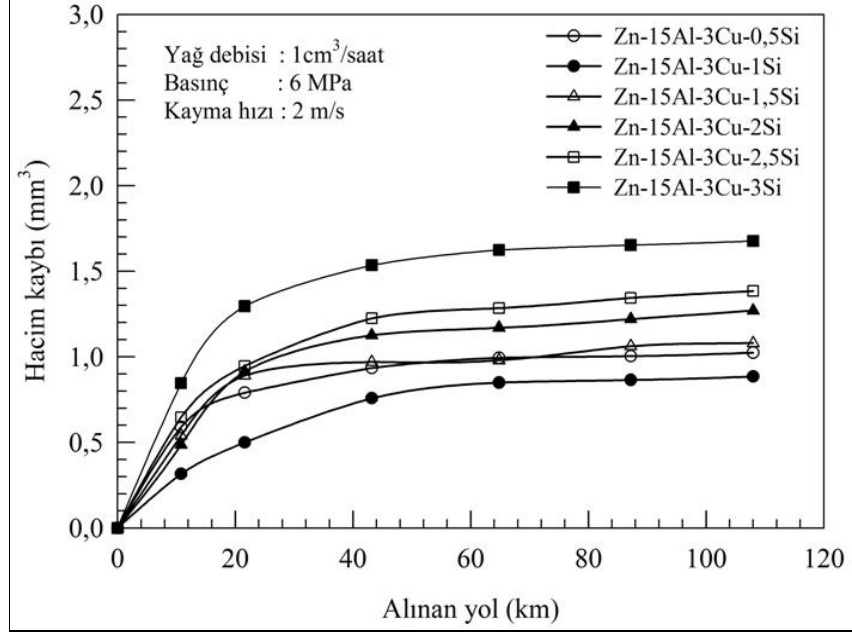




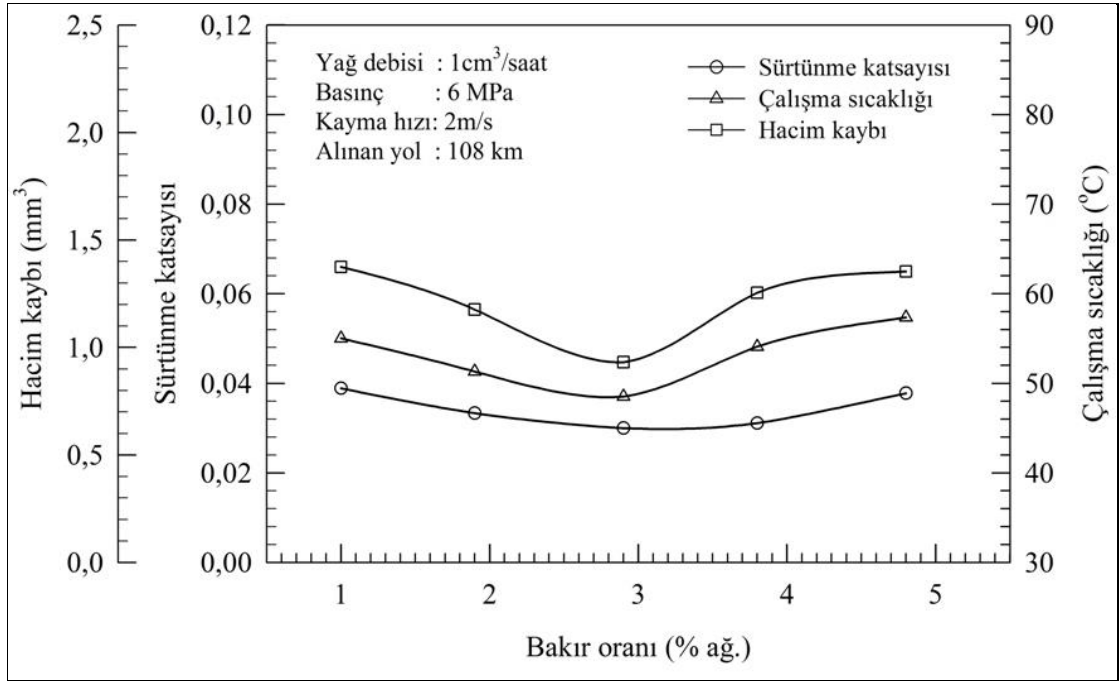
Şekil 63. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



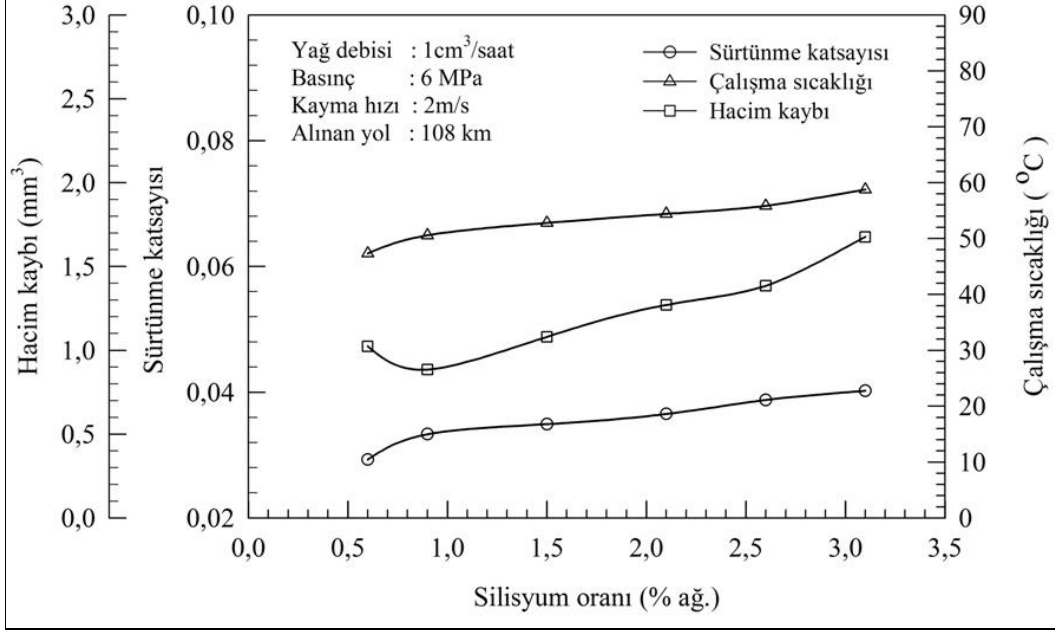
Şekil 64. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarında meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



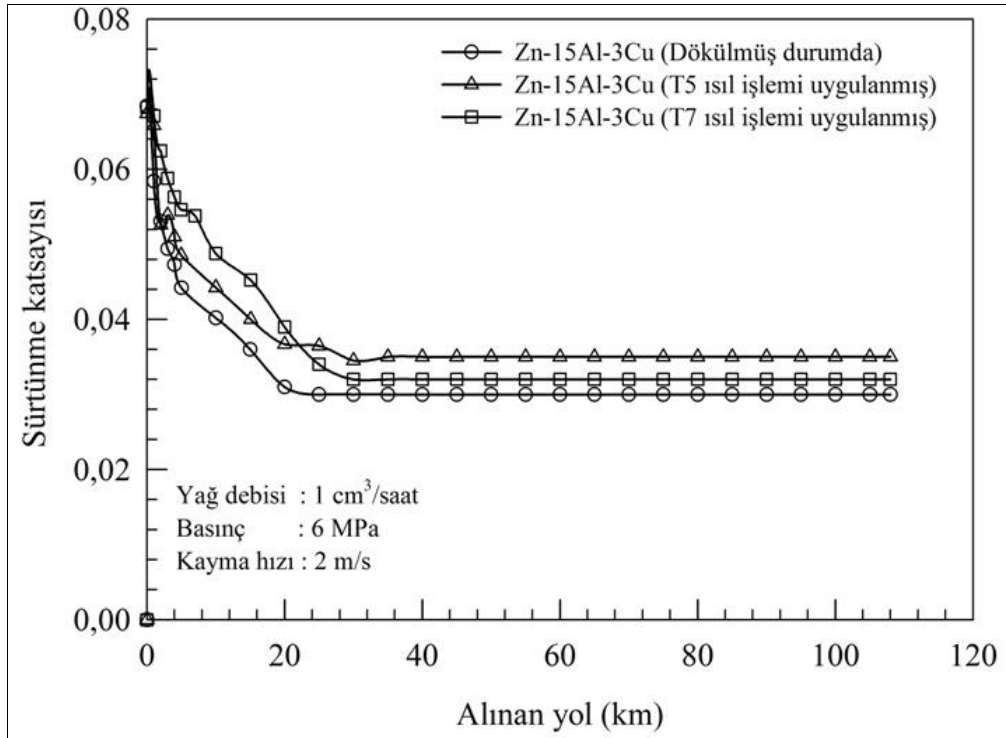
Şekil 65. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarında meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



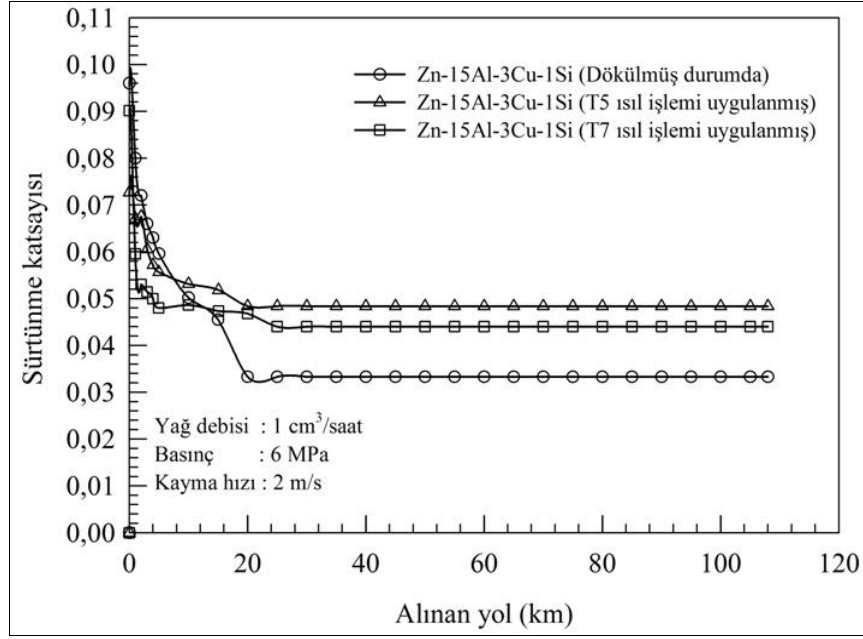
Şekil 66. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin bakır oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



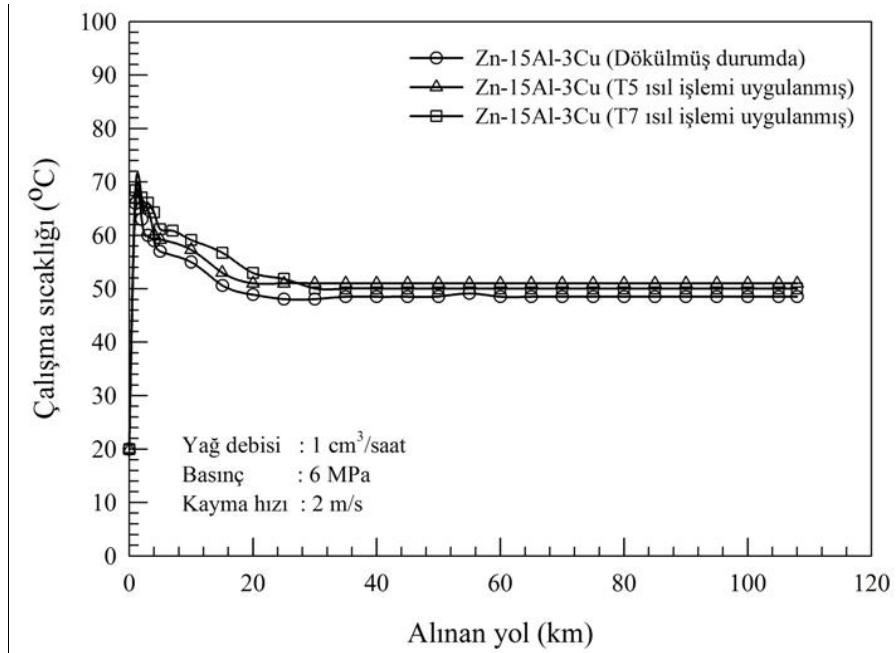
Şekil 67. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin silisyum oranına göre değişimlerini gösteren eğriler



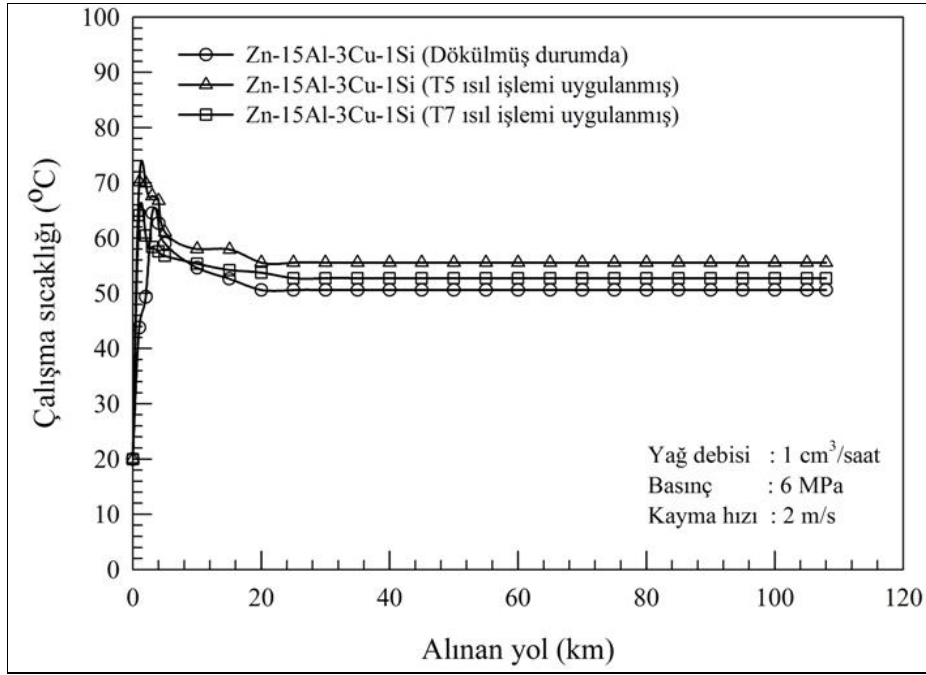
Şekil 68. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



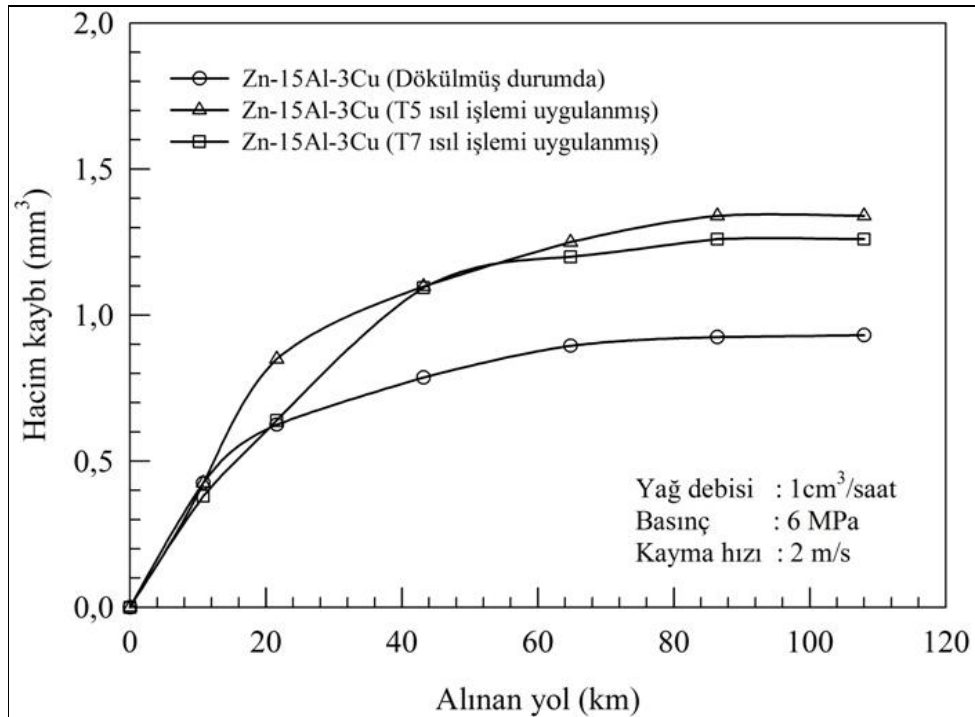
Şekil 69. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinin sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



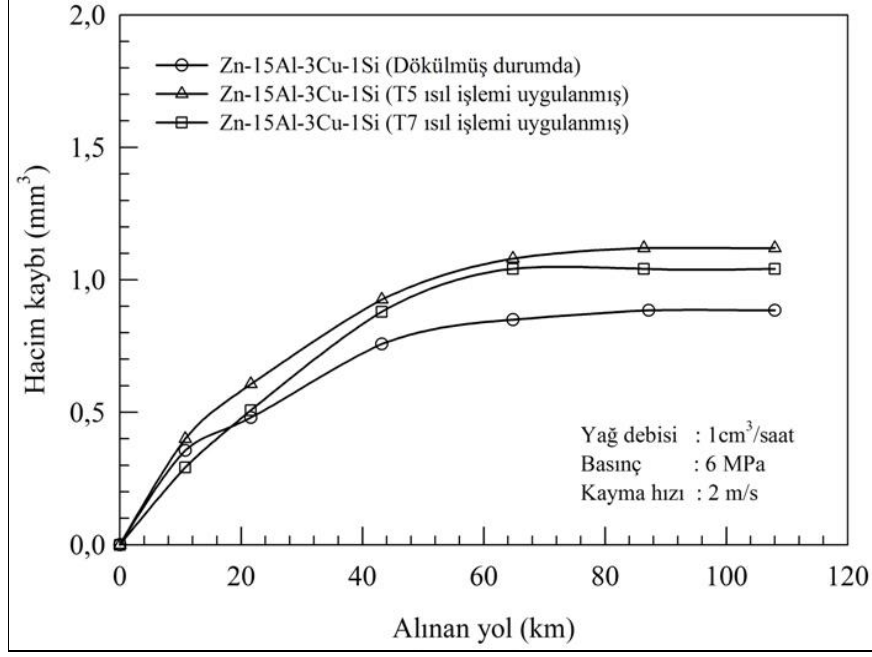
Şekil 70. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



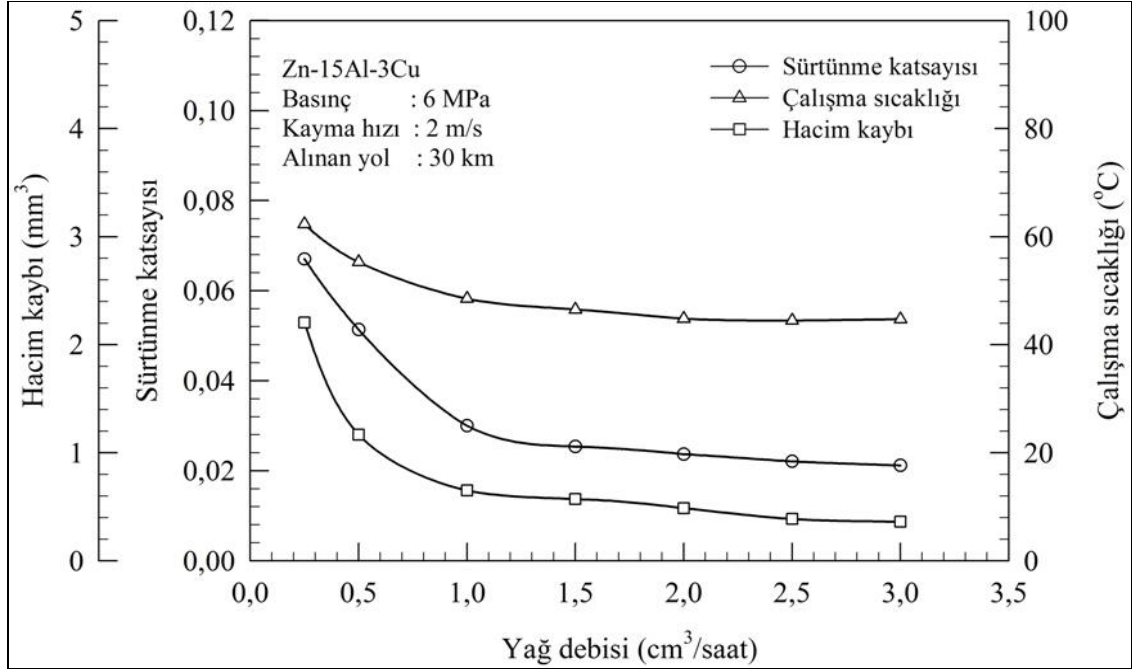
Şekil 71. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinin sıcaklık değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



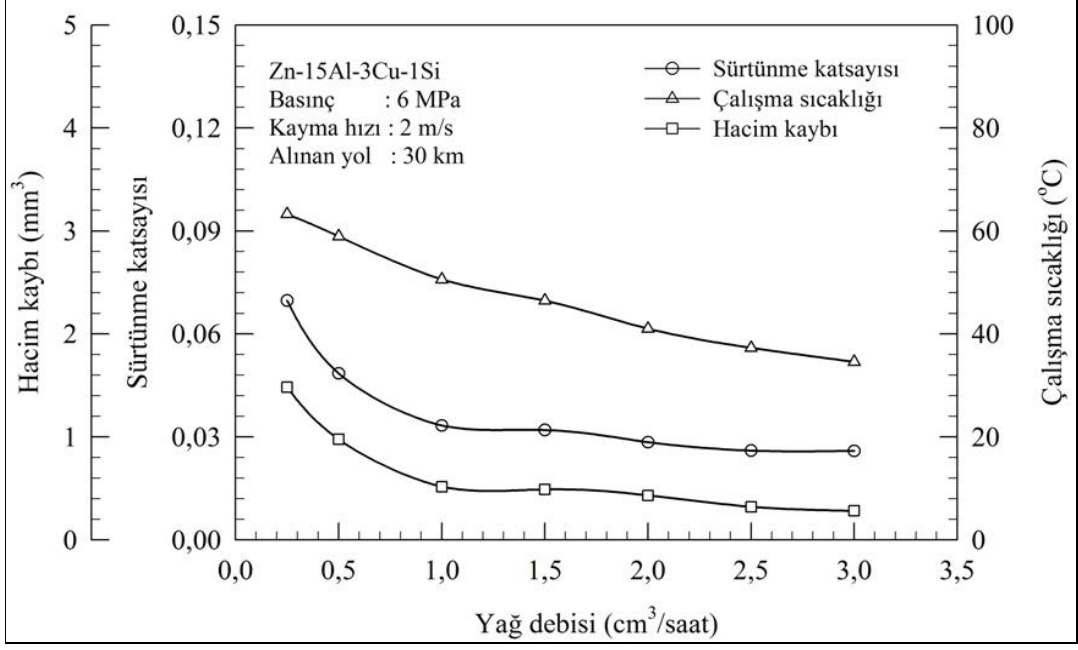
Şekil 72. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinde meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



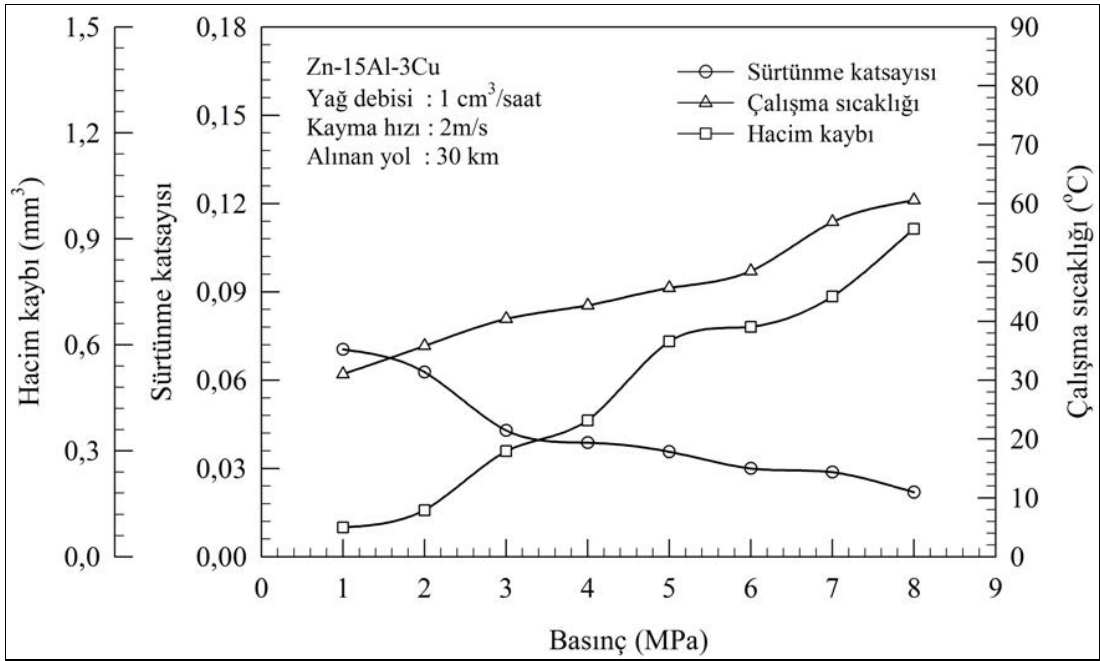
Şekil 73. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelerinde meydana gelen hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



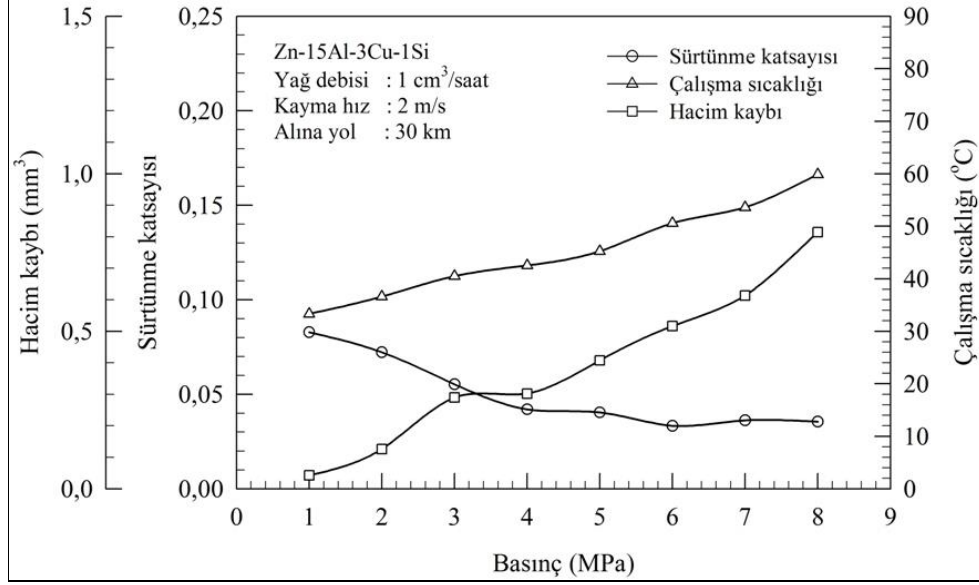
Şekil 74. Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



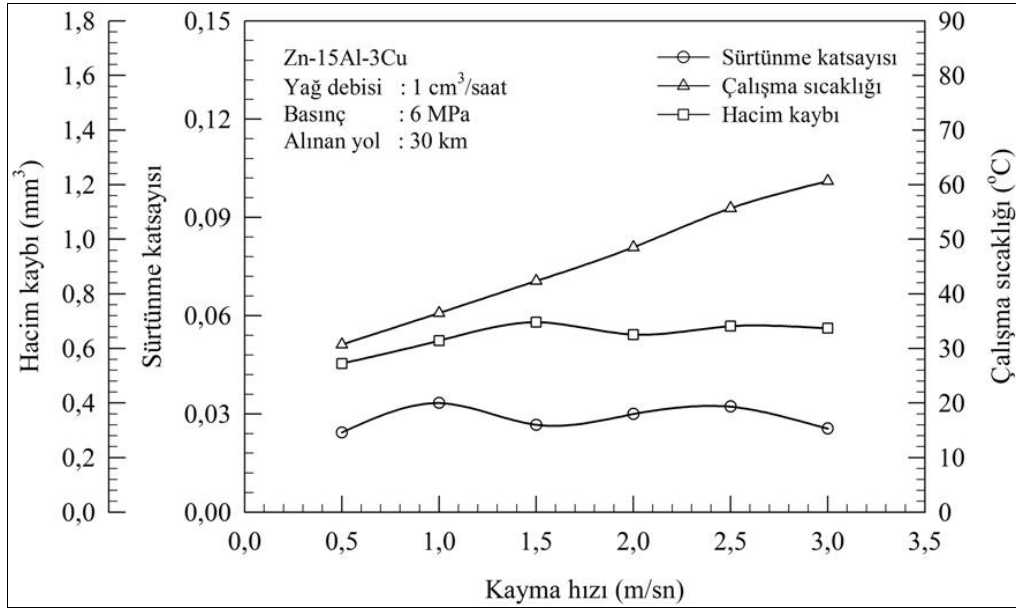
Şekil 75. Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 76. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler

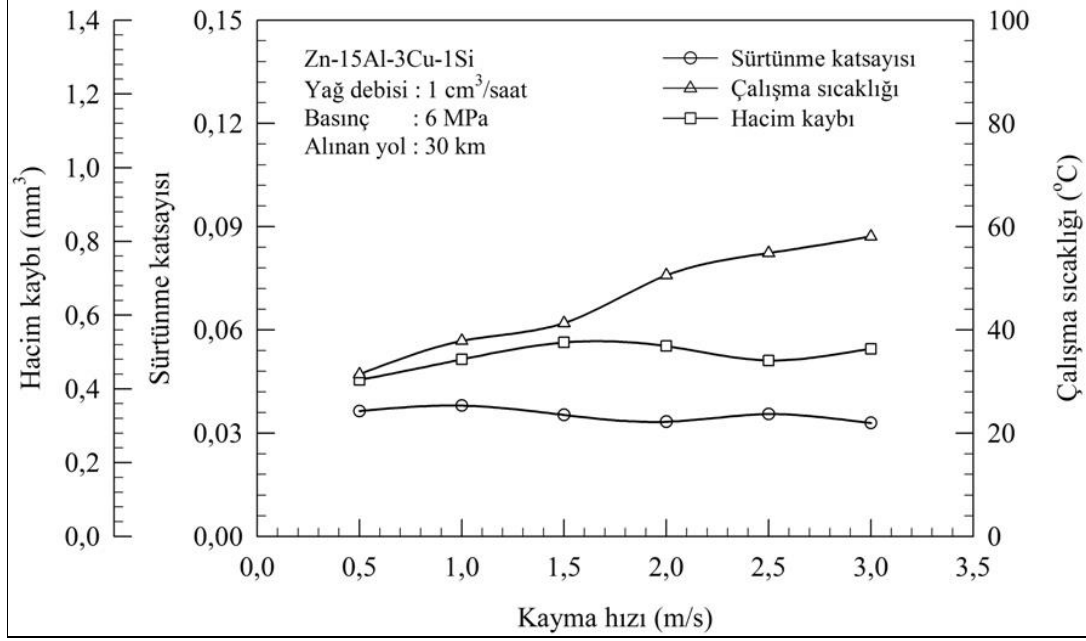


Şekil 77. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler

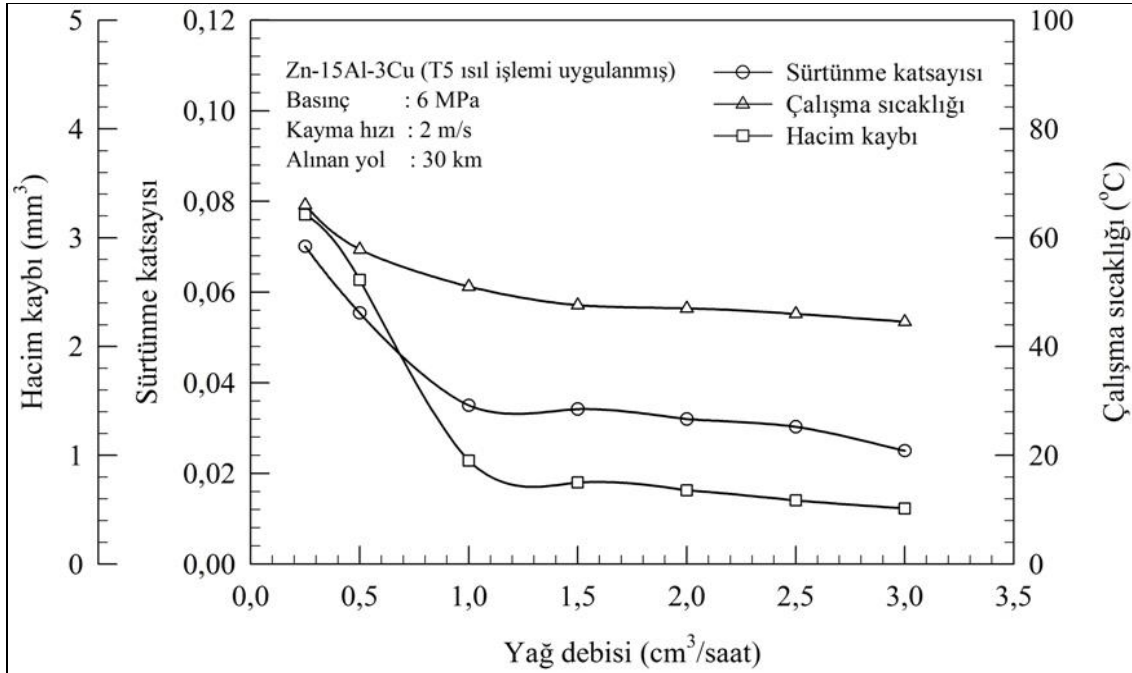


Şekil 78. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler

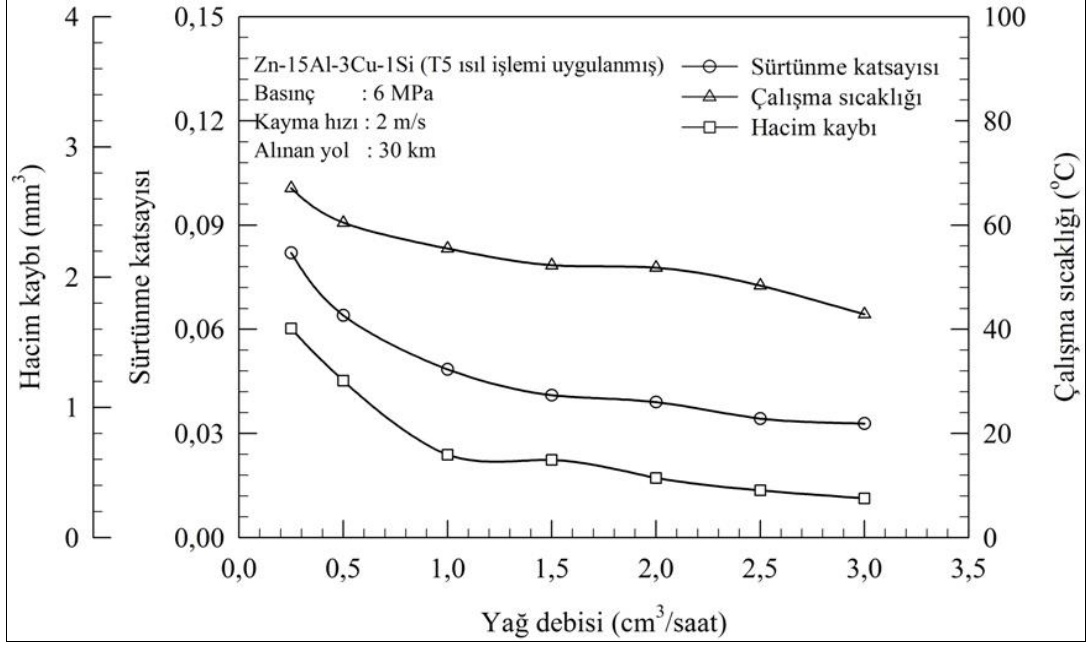




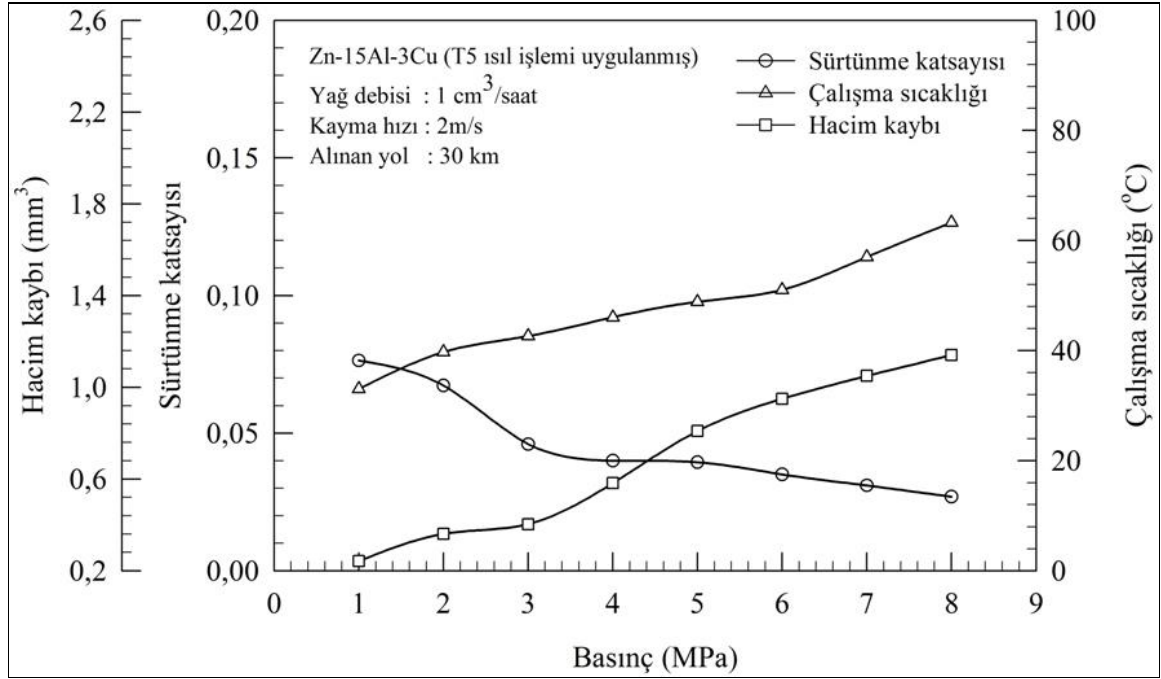
Şekil 79. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



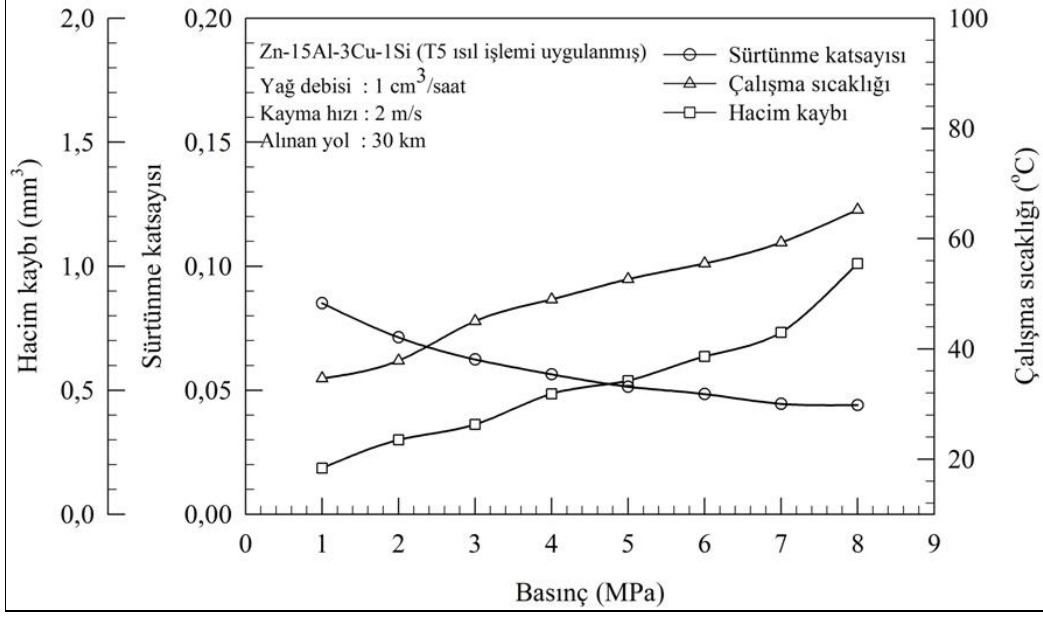
Şekil 80. Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



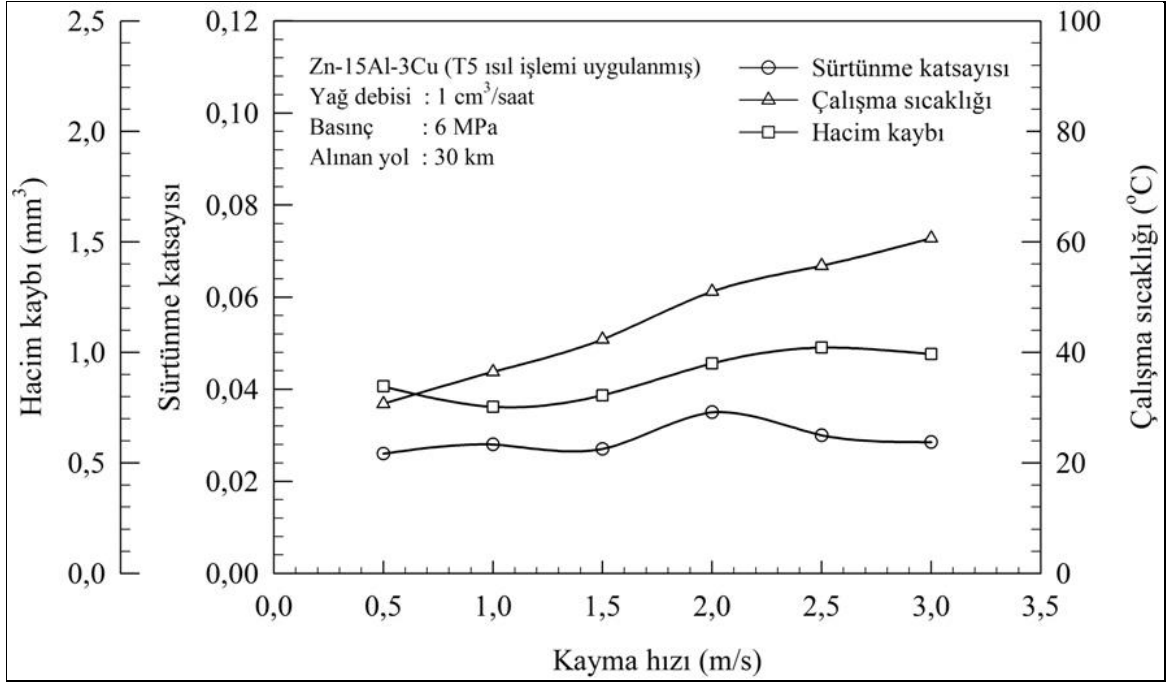
Şekil 81. Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



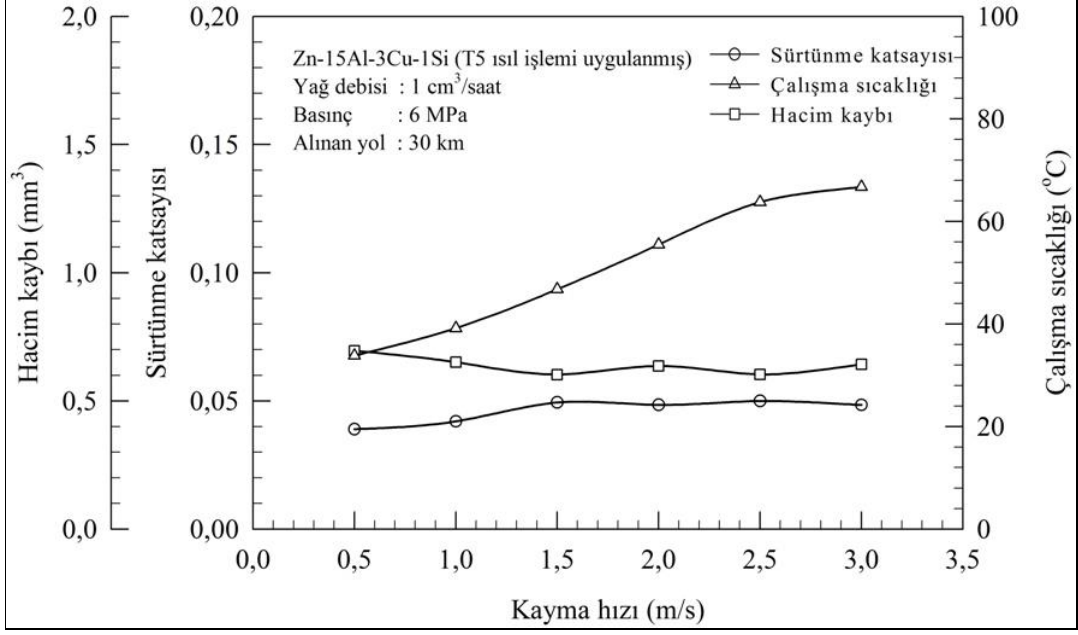
Şekil 82. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



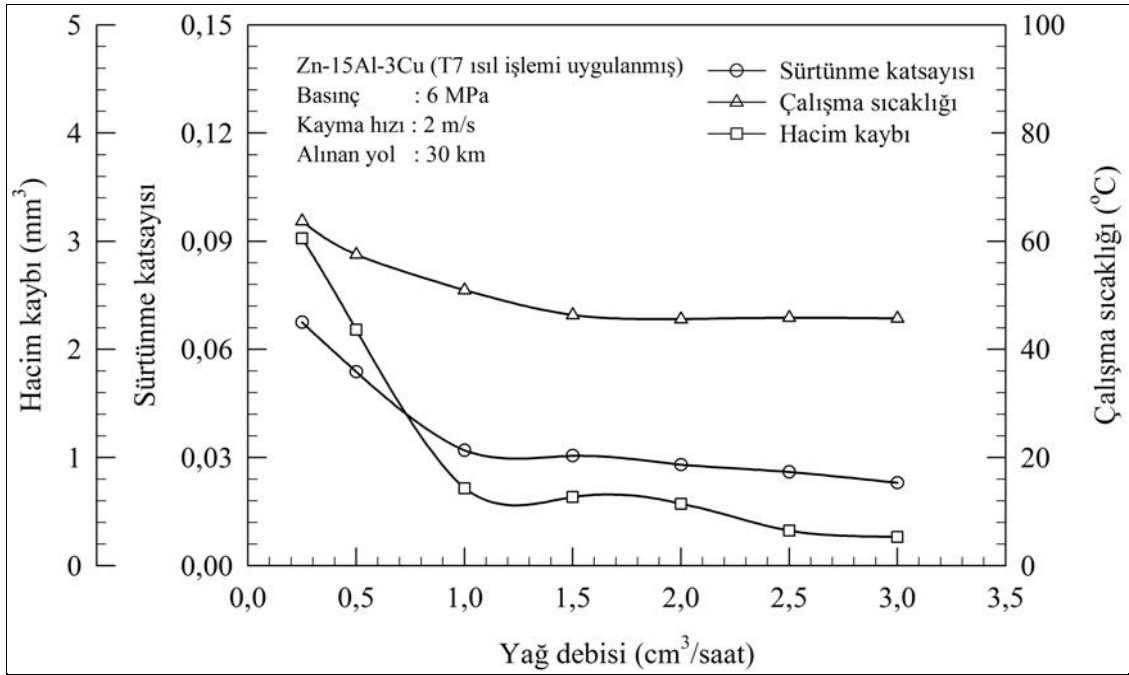
Şekil 83. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



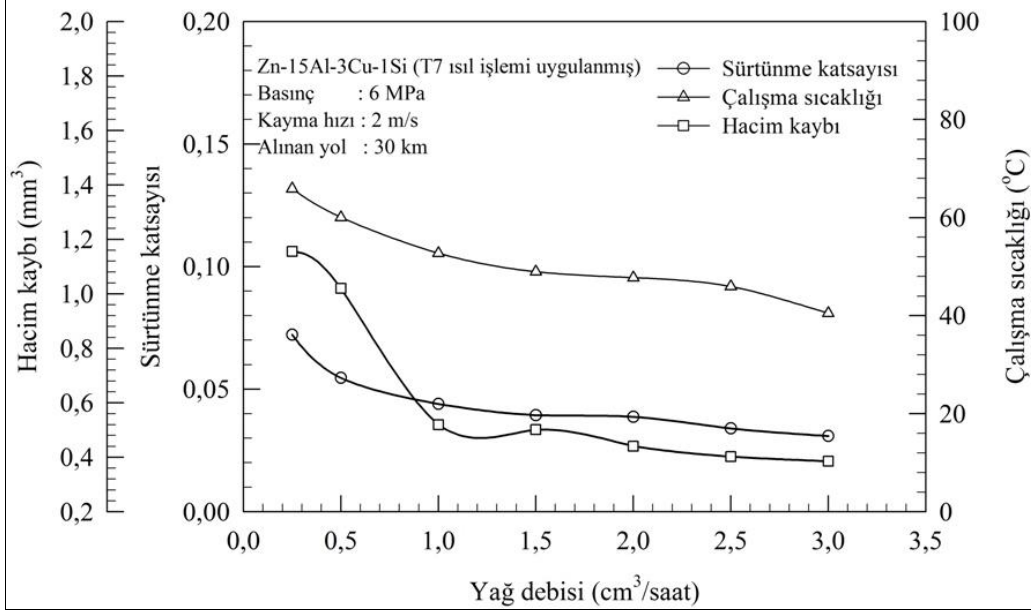
Şekil 84. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



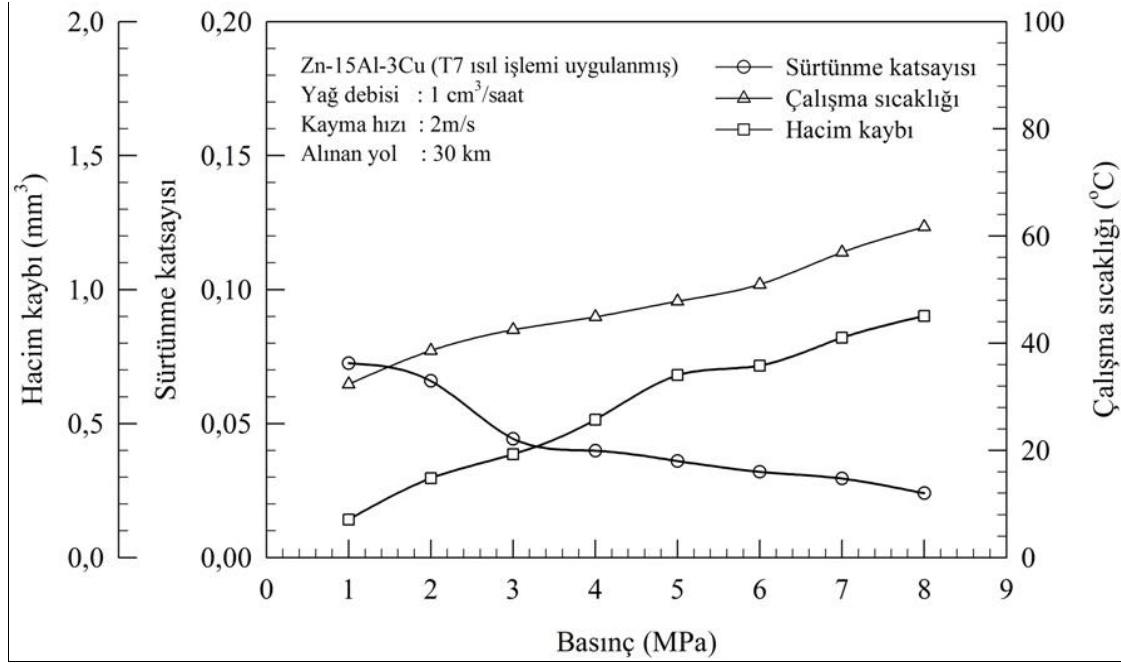
Şekil 85. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtılması uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



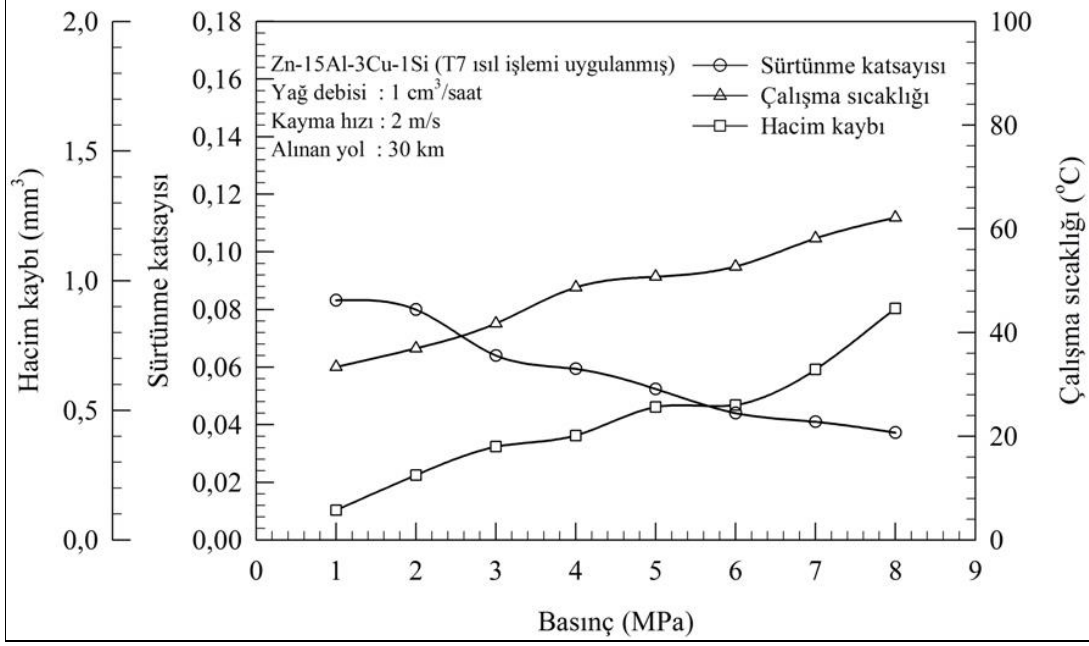
Şekil 86. Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılması uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



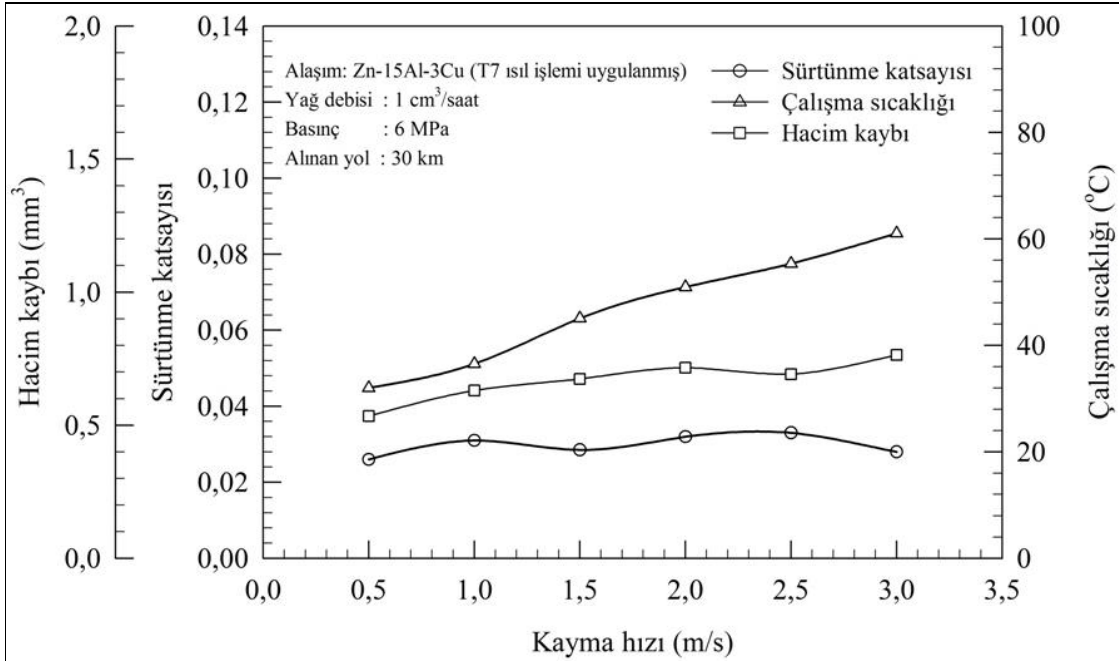
Şekil 87. Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



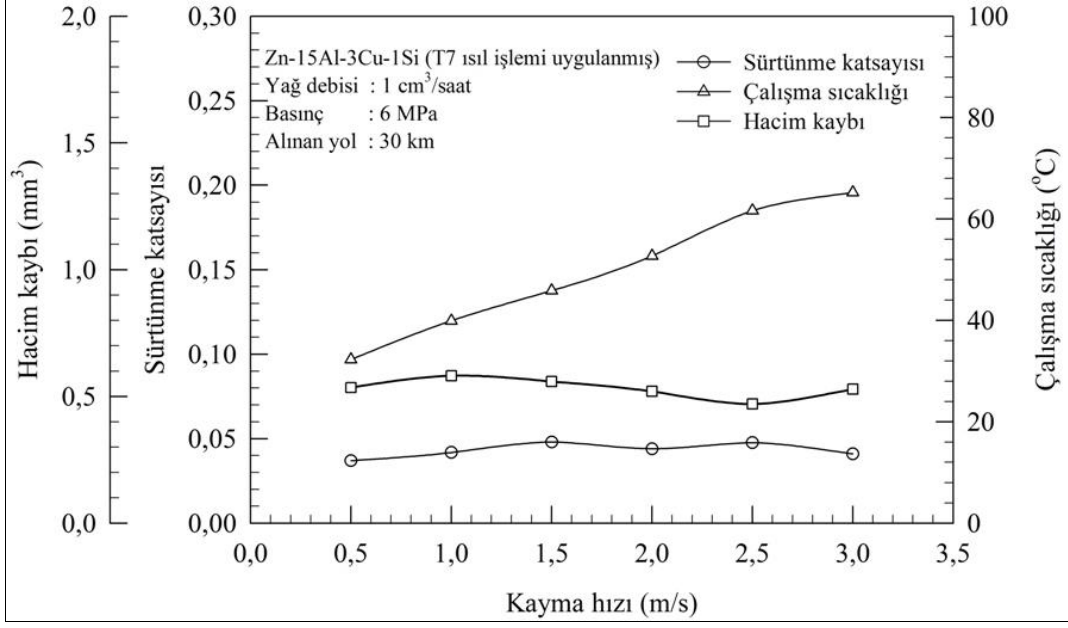
Şekil 88. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 89. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 90. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 91. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtılması uygulanmış numunelerinin sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler

Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında yapılan aşınma deneylerinde Al-12Si alaşımına ait numunelerin farklı yollara karşı gelen farklı zamanlarda hasara uğradıkları görülmüştür. Bu nedenle bu alaşımdan elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin basınç ve kayma hızına göre değişimlerini belirlemek mümkün olamamıştır. Ancak, bu alaşımdan elde edilen veriler Tablo 10'da verilmiştir. Bu tabloda yer alan veriler basınç ve kayma hızı arttıkça hasar süresinin veya hasarın meydana gelmesine kadar alınan kayma yolunun azaldığını; sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin ise artan basınç veya kayma hızıyla düzenli bir değişim sergilemediklerini göstermektedir.

Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında yapılan aşınma deneylerinde tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı ile bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı değerlerinin basınç ve kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 92 ve 93'de verilmiştir. Bu eğriler SAE 660 bronzunun söz konusu değerlerinin artan basınç ve kayma hızıyla arttığını göstermektedir.

Yağsız durumda 3 MPa basınç ve 1,5 m/s kayma hızında deneye tabi tutulan Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzundan elde edilen sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 94 ve 95'de verilmiştir. Bu eğriler Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklığının hasar meydana

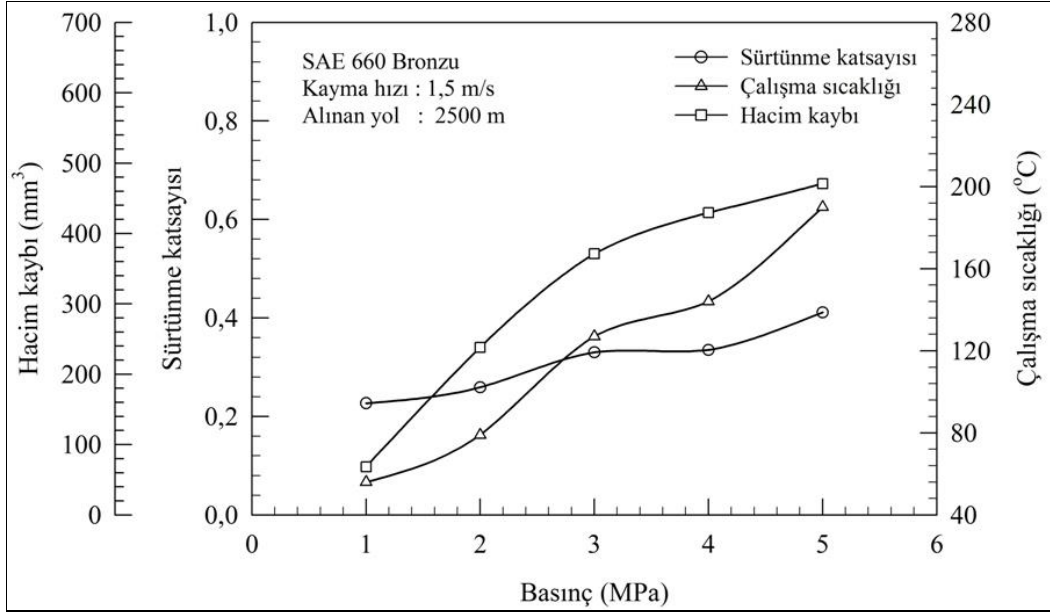
gelene veya 77 m'lik kayma yolu tamamlanana kadar hızlı bir artış sergilediklerini göstermektedir. SAE 660 bronzunun sıcaklığının kayma yolu ile doğru orantılı olarak arttığını, sürtünme katsayısının ise ilk 500 m'lik yola karşılık gelen başlangıç aşamasında belirgin bir artış sergiledikten sonra hemen hemen sabit bir değere ulaştığını göstermektedir.

1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa basınç ve 2 m/s kayma hızında 108 km'lik kayma yolu tamamlanincaya kadar yapılan aşınma deneylerinde Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin başlangıçta hızlı bir artış sergiledikten sonra 40 km sonunda hemen hemen sabit değerlere ulaştıkları görüldü, Şekil 96 ve 97. Al-12Si ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı ve çalışma sıcaklığı ile bu alaşımlarda meydana gelen hacim kaybı değerlerinin yağ debisi, basınç ve kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler Şekil 98-103'de verilmiştir. Bu eğriler sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin artan yağ debisi ile azaldığını göstermektedir, Şekil 98 ve 99. Ayrıca, bu eğriler basınç arttıkça sürtünme katsayısının azalıp, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin arttığını göstermektedir, Şekil 100 ve 101. Kayma hızının artması durumunda ise sıcaklık artmakta, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerleri belirgin bir değişim sergilememektedir, Şekil 102 ve 103.

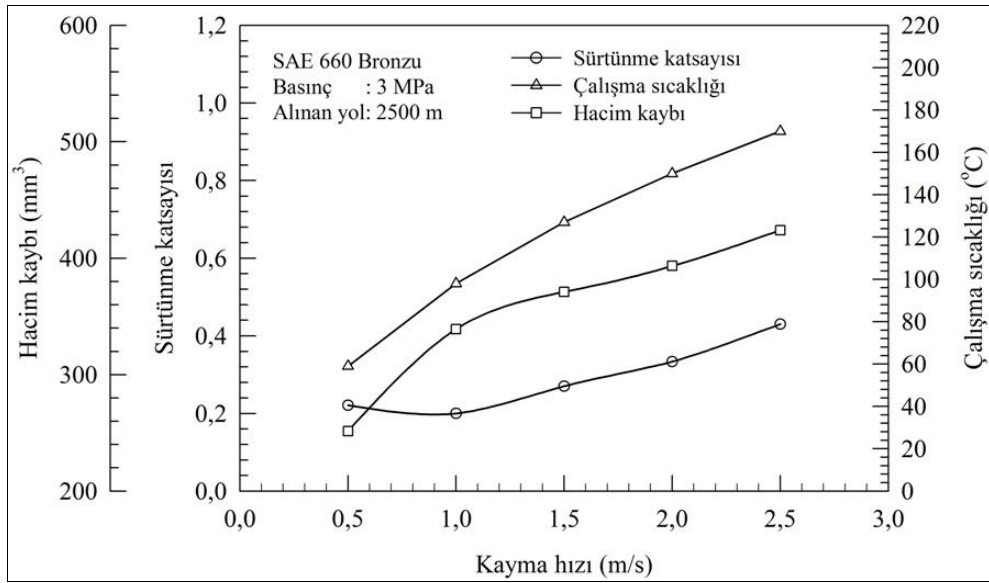
Tablo 10. Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Al-12Si alaşımından elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerleri

Basınç	Kayma hızı (m/s)	Al-12Si			
		Sürtünme katsayısı	Çalışma sıcaklığı (°C)	Hacim kaybı (mm <sup>3</sup> )	Alınan yol (m)
1	1,5	0,260	83	76,3	720
2		0,591	74	23,2	122
3		0,544	119	73,7	77
4		0,535	120	15,9	52
5		0,466	87	249,6	40
3	0,5	0,320	74	55,5	2000
	1	0,511	81	57,4	90
	1,5	0,544	110	73,5	77
	2	0,555	113	66,7	44
	2,5	0,577	120	118,7	24

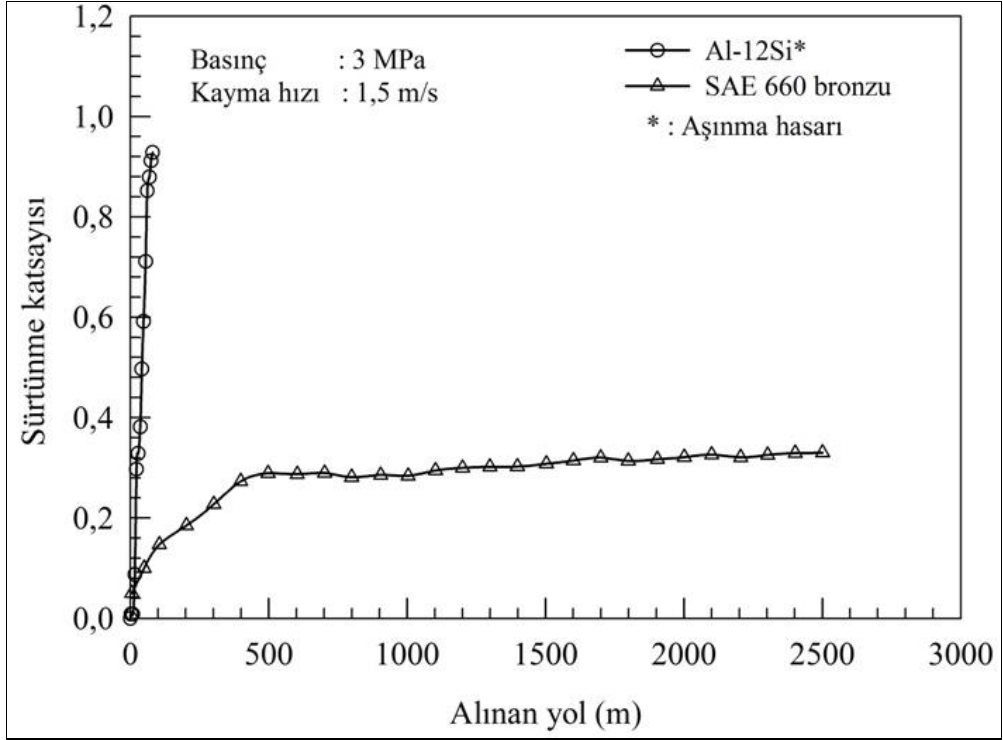




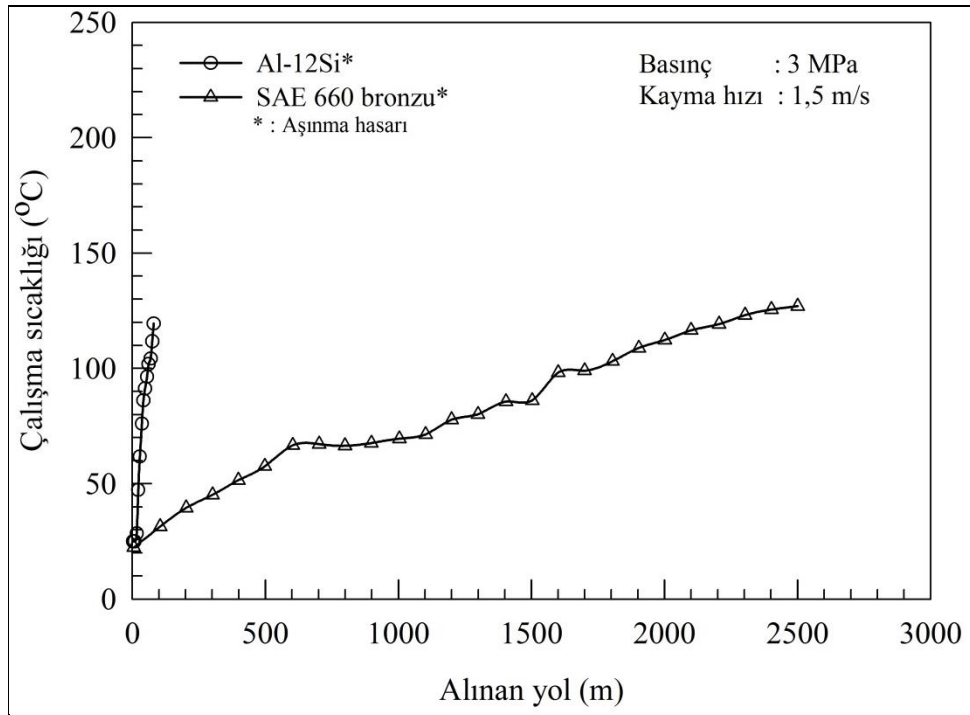
Şekil 92. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



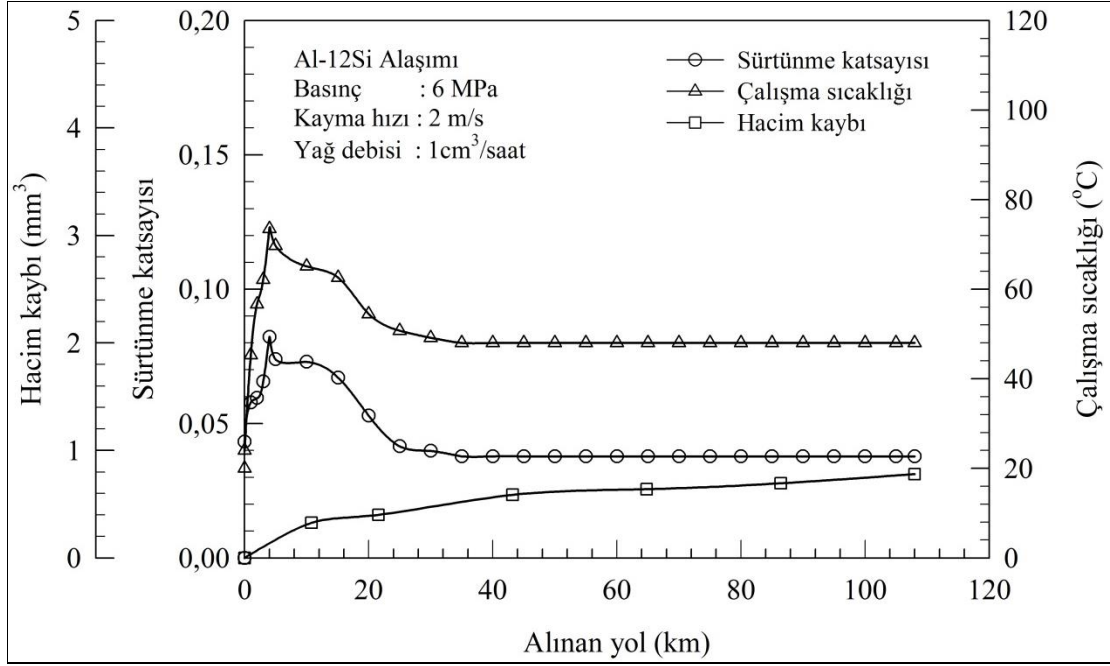
Şekil 93. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



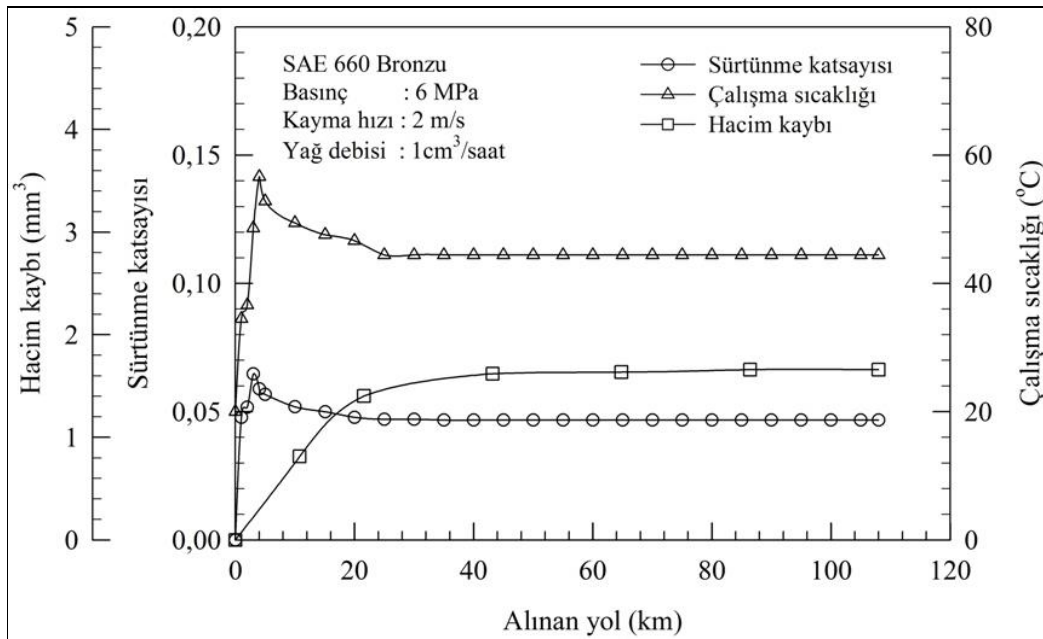
Şekil 94. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun sürtünme katsayılarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



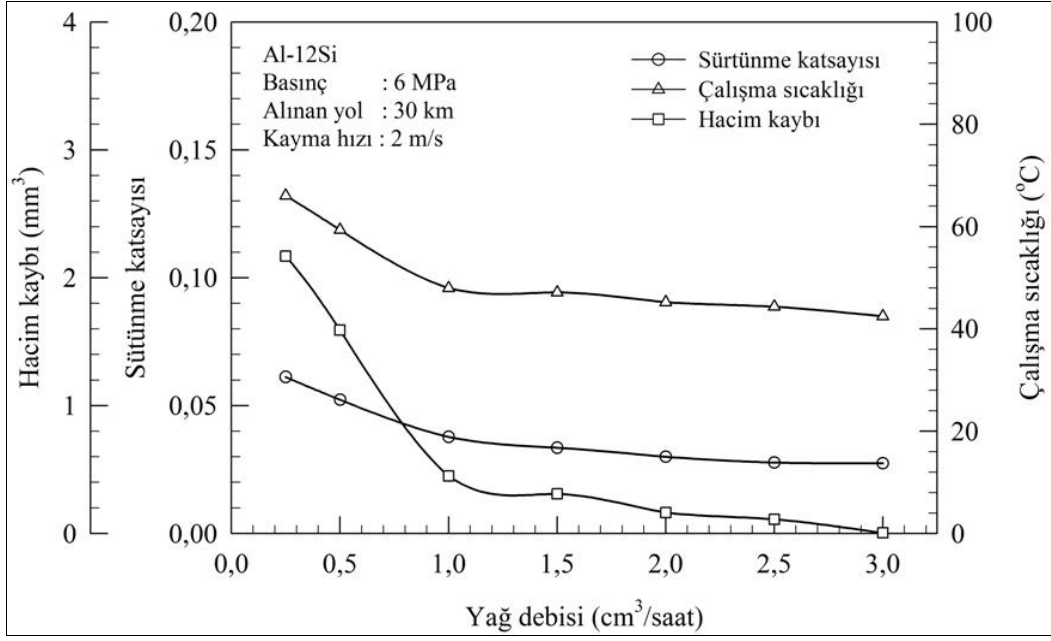
Şekil 95. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzunun çalışma sıcaklıklarının alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



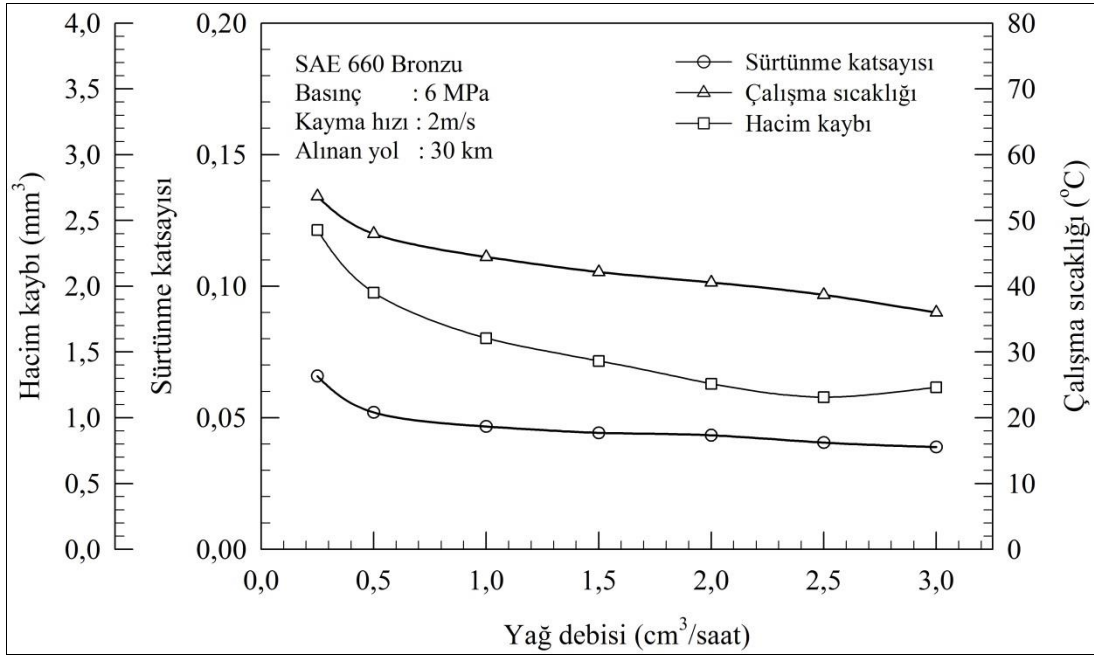
Şekil 96. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımının sıcaklık, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



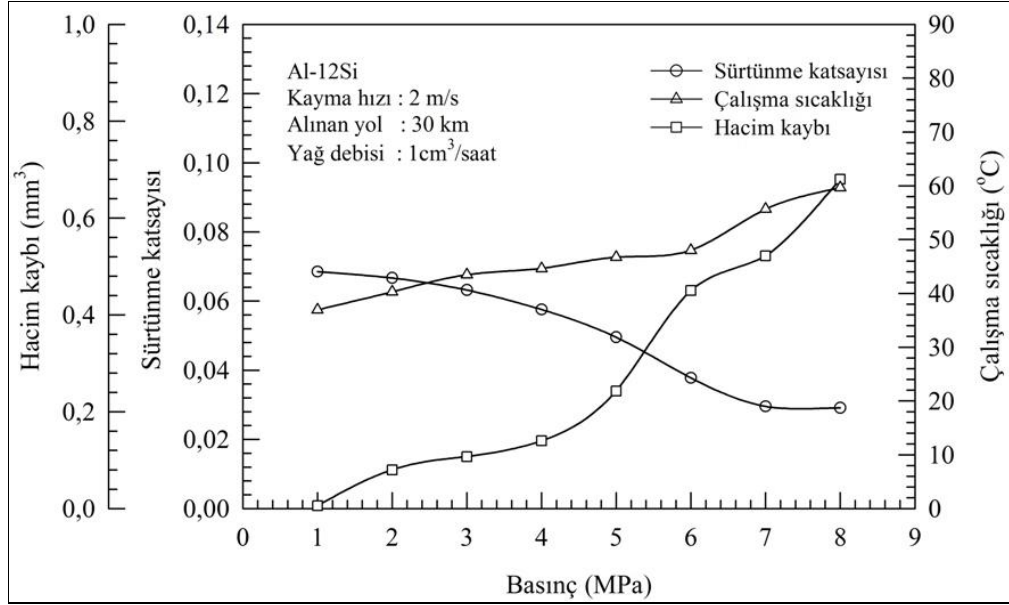
Şekil 97. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sıcaklık, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin alınan yola göre değişimlerini gösteren eğriler



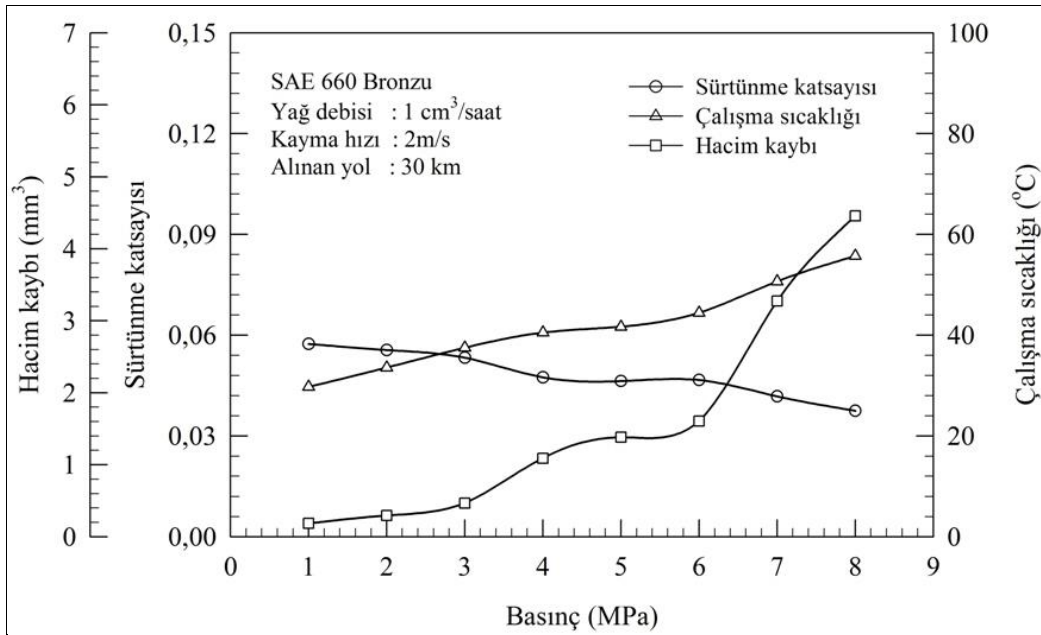
Şekil 98. Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



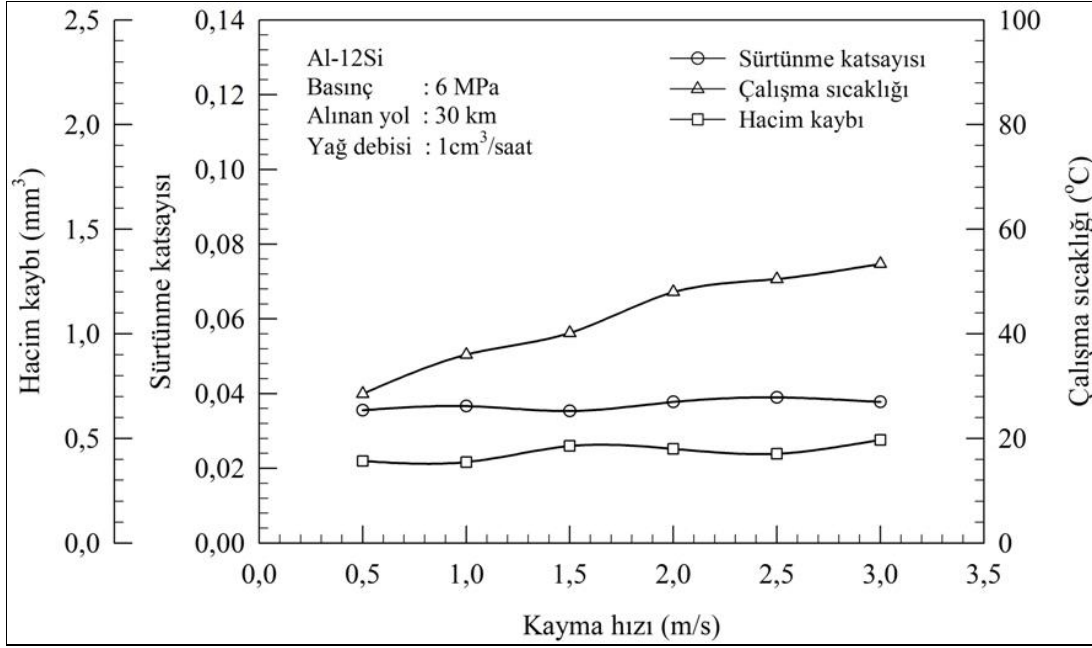
Şekil 99. SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin yağ debisine göre değişimlerini gösteren eğriler



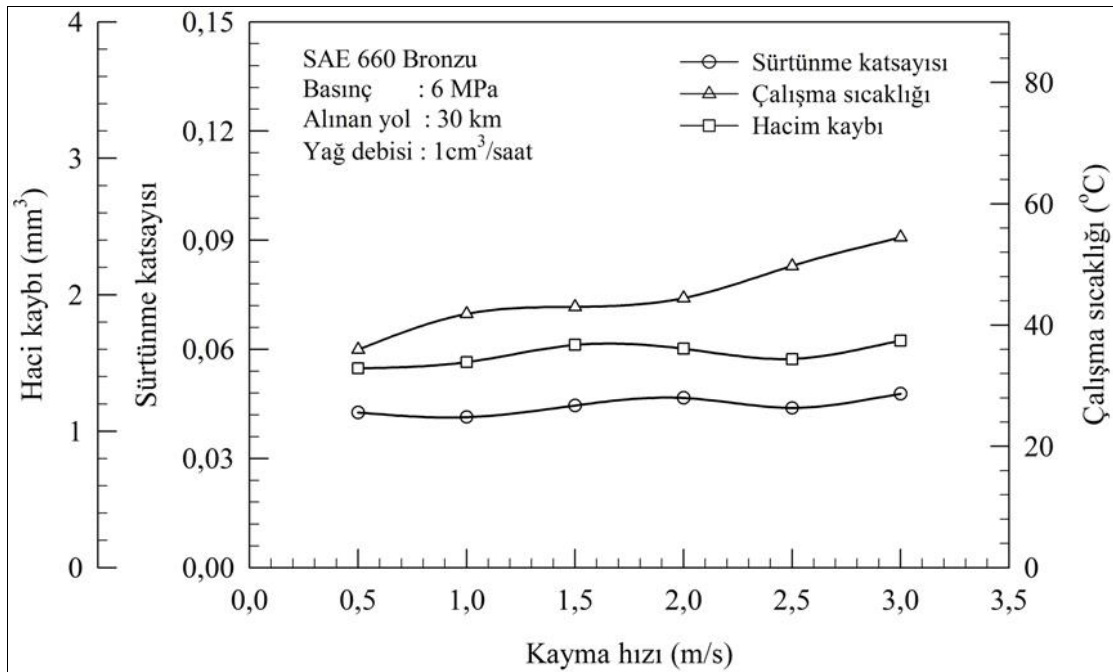
Şekil 100. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 101. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



Şekil 102. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler

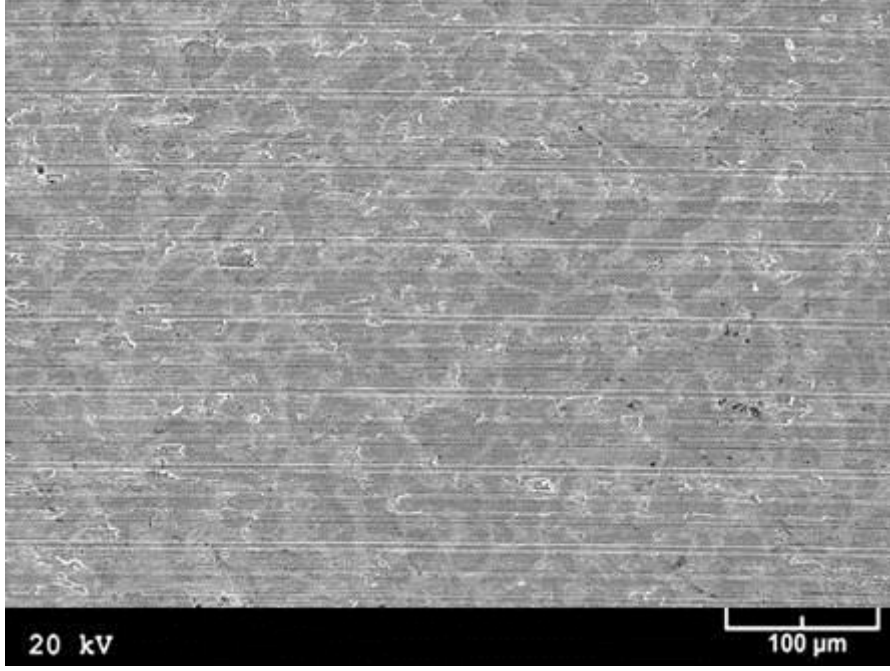


Şekil 103. Yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler

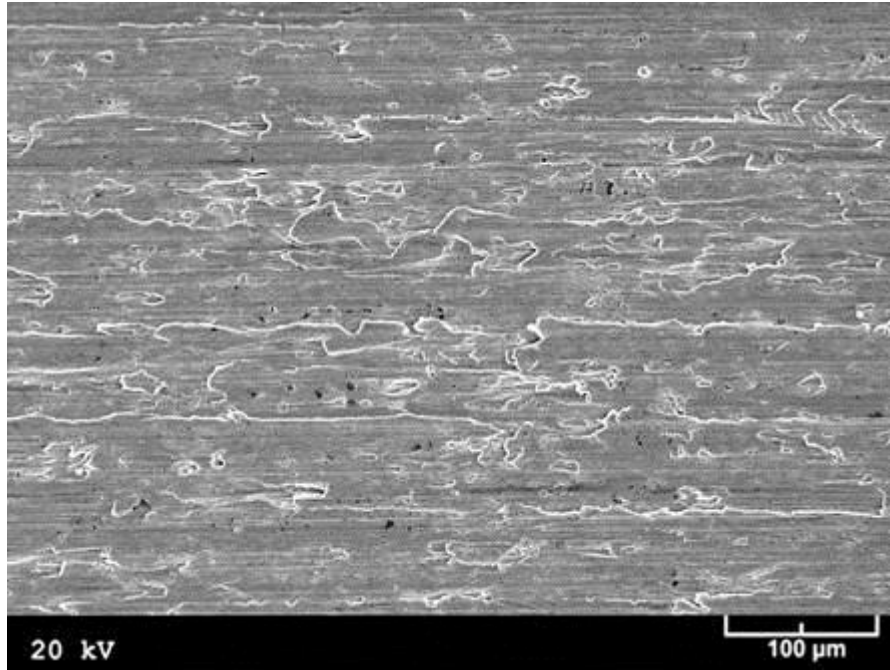
### 3.5. Yağsız (Kuru) Durumda Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Numunelerin Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Deneylere başlamadan önce alaşımlara ait aşınma numunelerinin yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 104-107'de verilmiştir. Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu ve dörtlü Zn-15Al-3Cu-(1-3)Si alaşımlarına ait numunelerin yüzeylerinde sıvama tabakaları ile hasar boyutunda aşınma izlerinin bulunduğu, ancak bakır ve silisyum oranlarının alaşımların aşınma yüzeylerinin görünümü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadıkları görüldü. Bu nedenle, burada yalnız üçlü ve dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek mukavemet ve aşınma direnci sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait dökülmüş ve ısıtılmış durumdaki aşınma numunelerinin yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir, Şekil 108-113. Bu görüntülere göre dökülmüş ve ısıtılmış durumdaki numunelerin aşınma yüzeyleri arasında belirgin farklılıkların olduğunu söylemek mümkün değildir. Aynı şartlarda aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımının yüzeyinde belirgin bir değişime rastlanmazken, SAE 660 bronzunun yüzeyinde pullanma ve soyulmanın meydana geldiği görüldü, Şekil 114 ve 115.

Üçlü Zn-15Al-3Cu ve dörtlü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının dökülmüş ve ısıtılmış durumdaki numuneleri ile Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzuna ait numunelerin yüzeylerinden farklı basınç ve kayma hızlarında yapılan yağsız aşınma deneyleri sonucunda elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 116-131'de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde basınç ve kayma hızı arttıkça alaşımların yüzeylerinde meydana gelen aşınma izlerinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir.

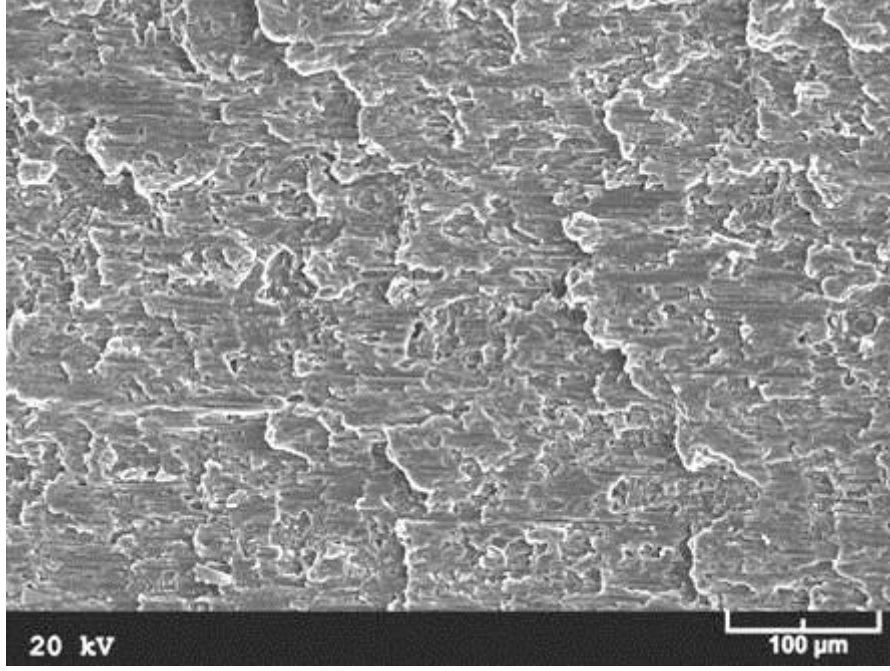


Şekil 104. Zn-15Al-3Cu alaşımına ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü

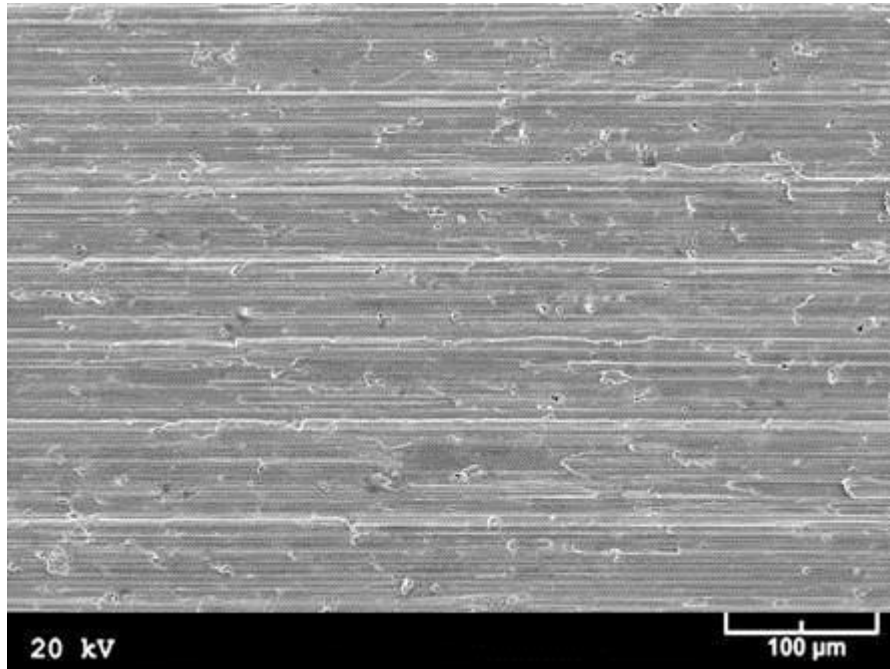


Şekil 105. Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımına ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü

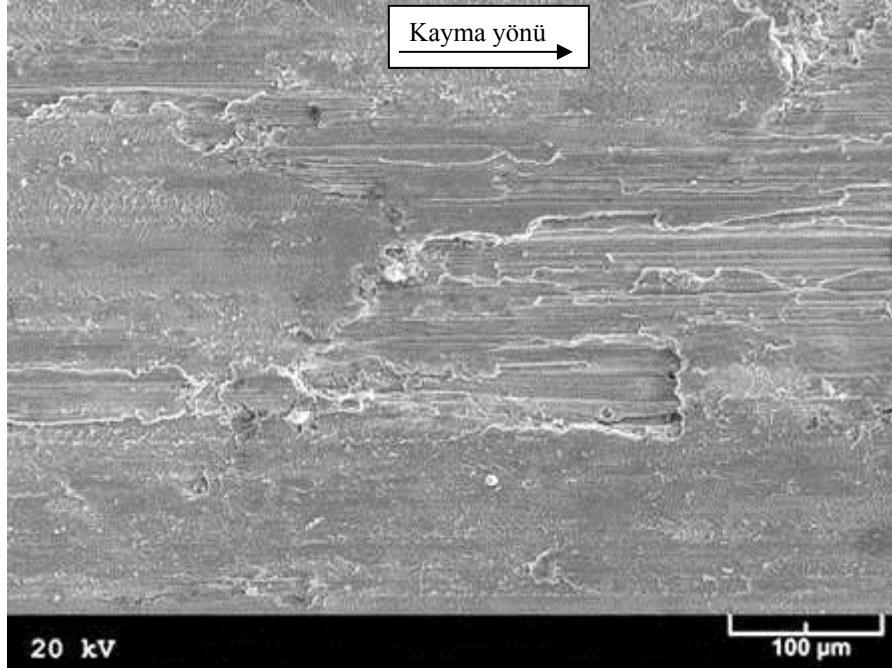




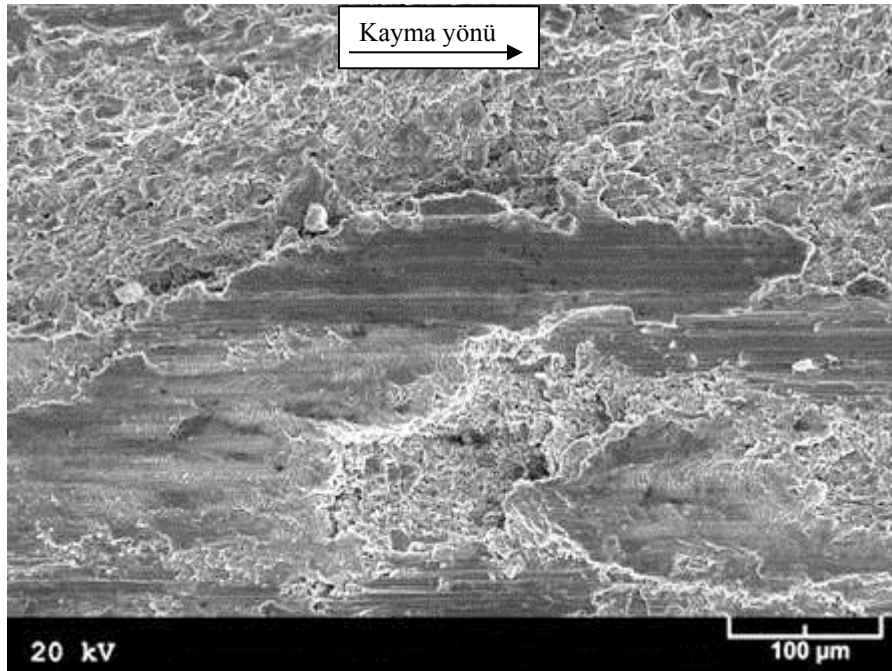
Şekil 106. Al-12Si alaşımına ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



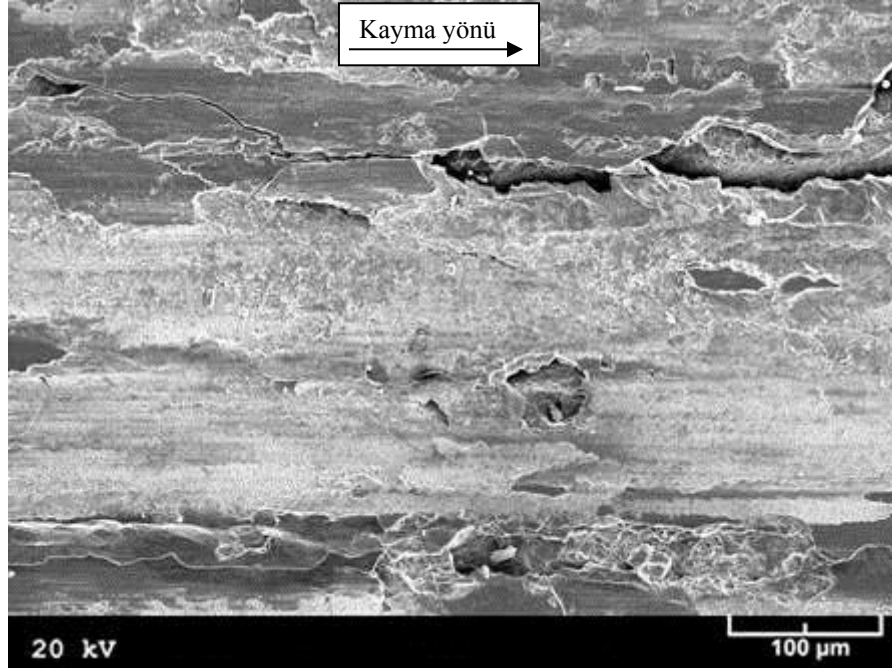
Şekil 107. SAE 660 bronzuna ait aşınma deney numunesinin yüzeyinden deney öncesi elde edilen SEM görüntüsü



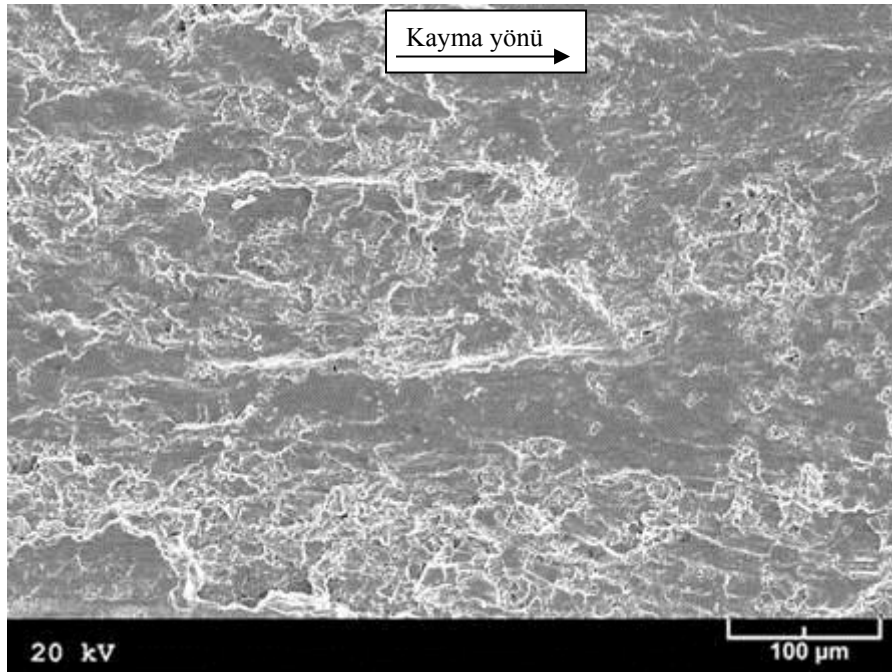
Şekil 108. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız (kuru) aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



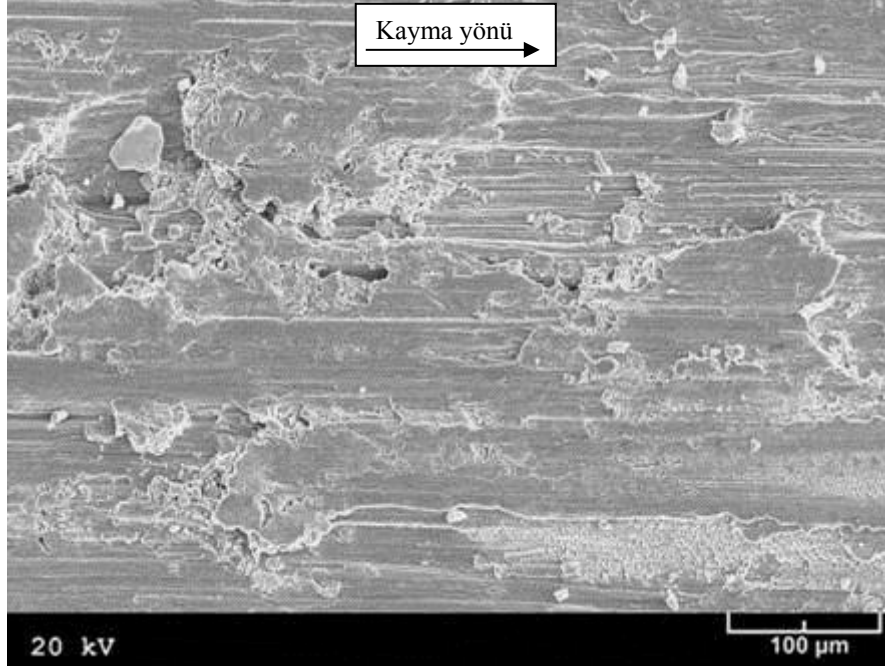
Şekil 109. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



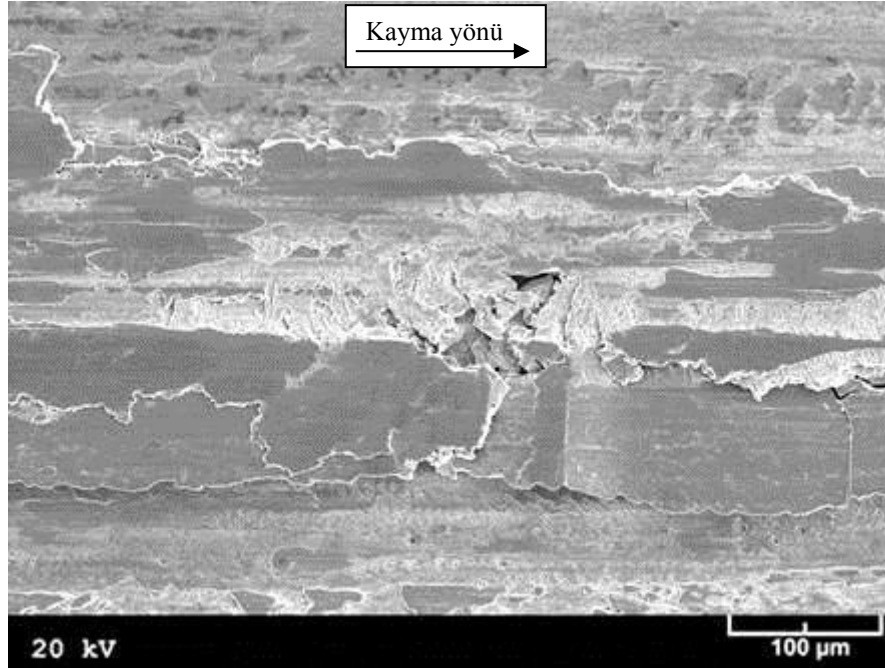
Şekil 110. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



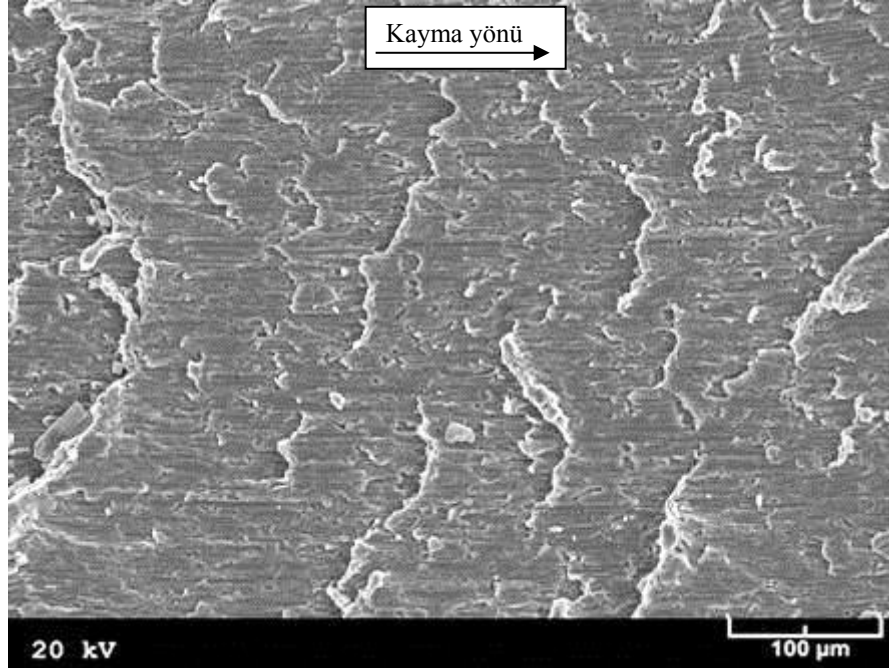
Şekil 111. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



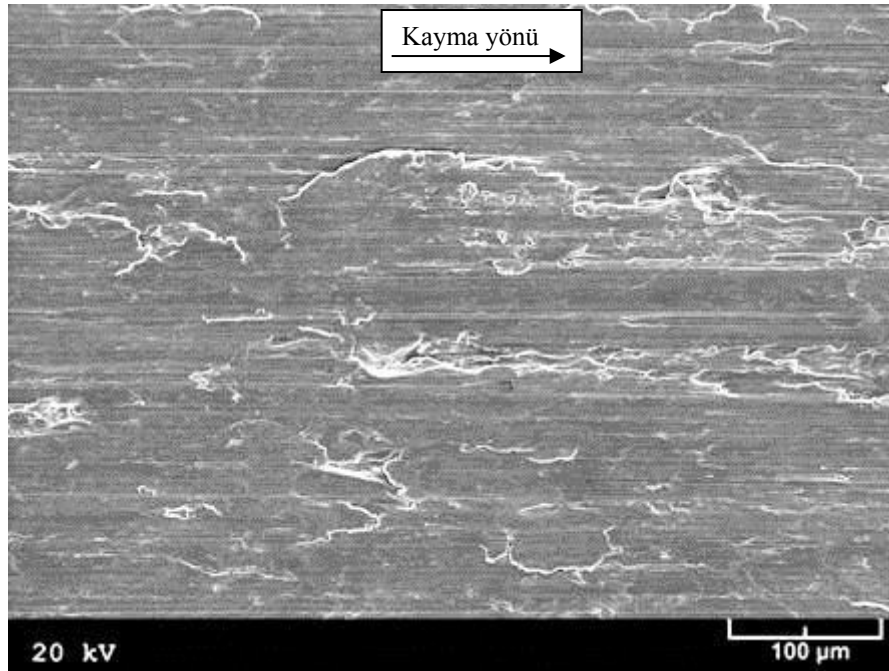
Şekil 112. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılması uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



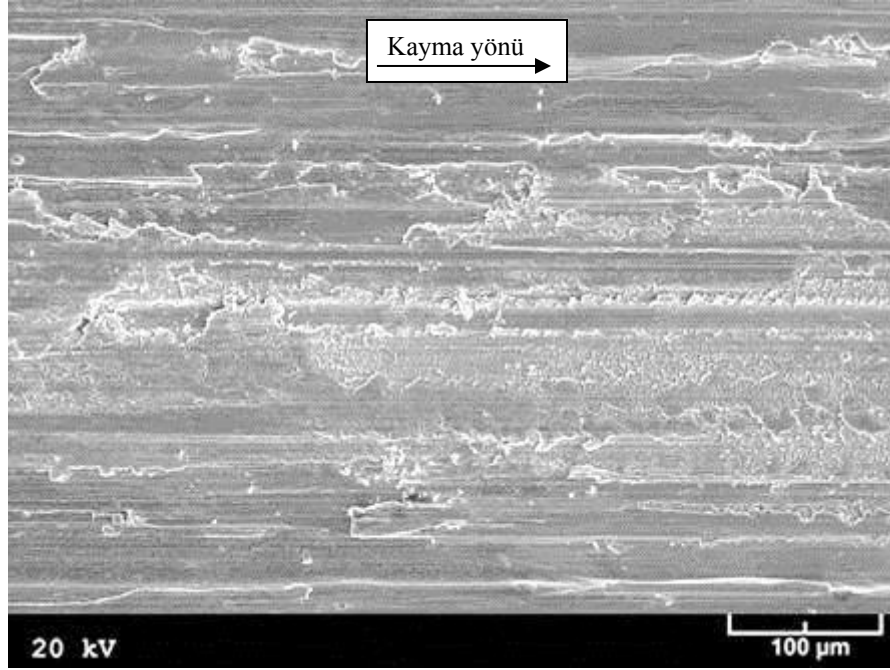
Şekil 113. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıtılması uygulanmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



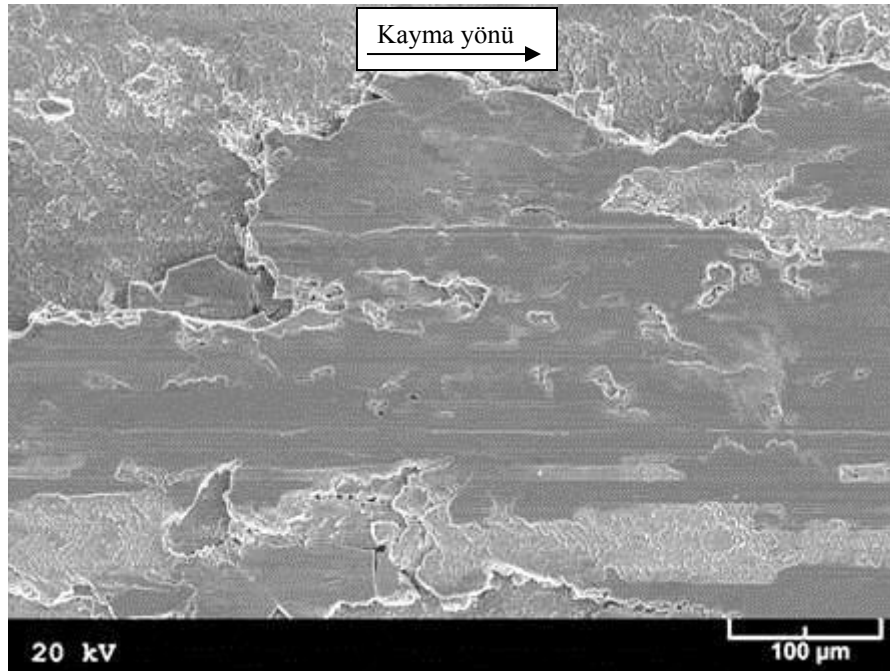
Şekil 114. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



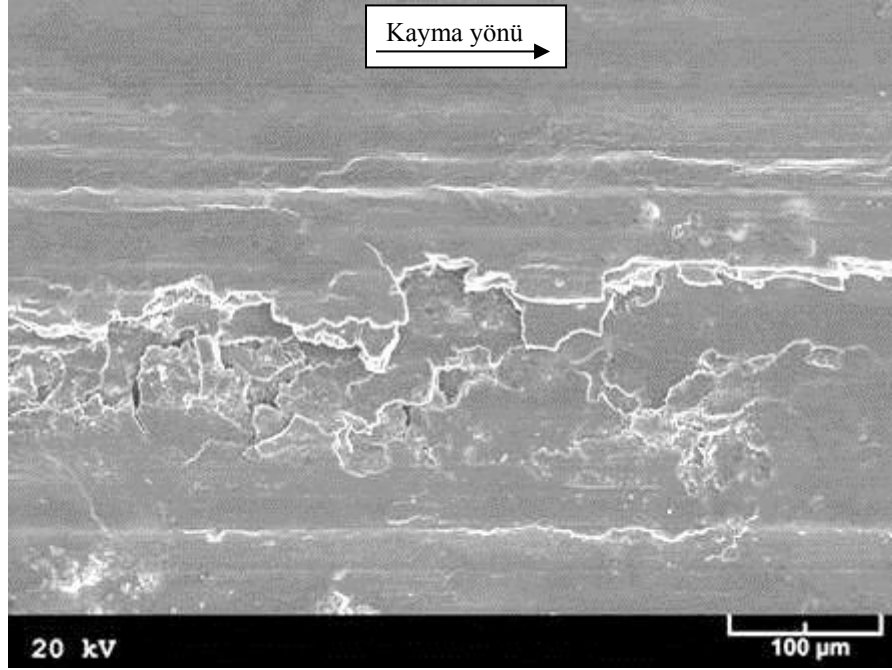
Şekil 115. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



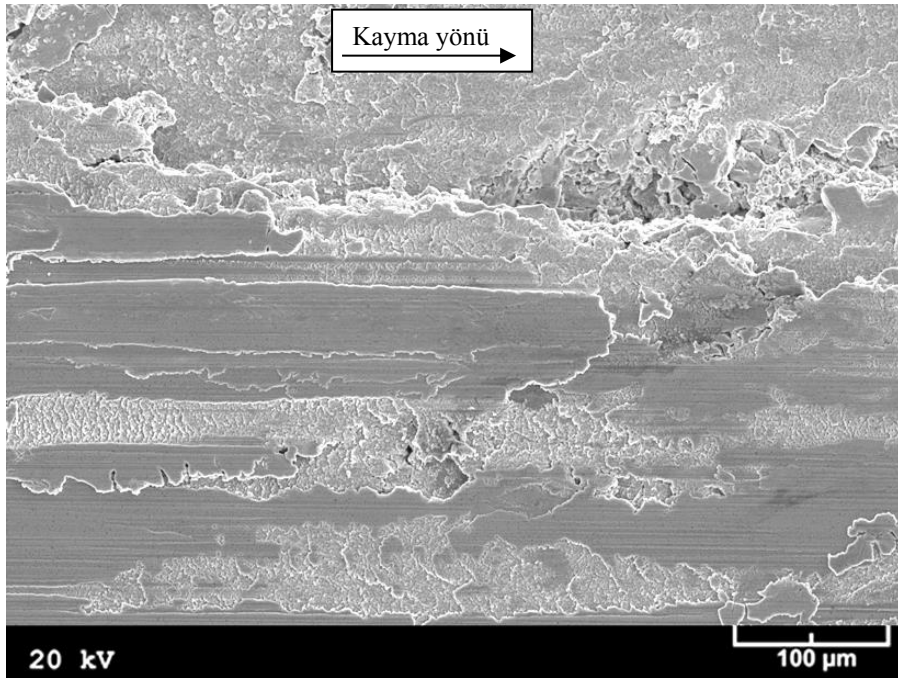
Şekil 116. 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



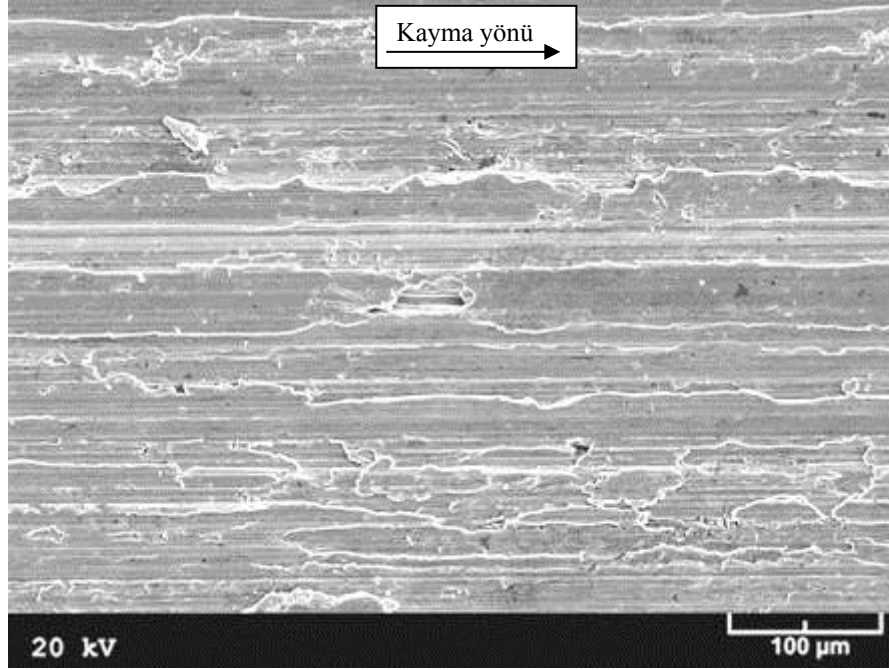
Şekil 117. 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



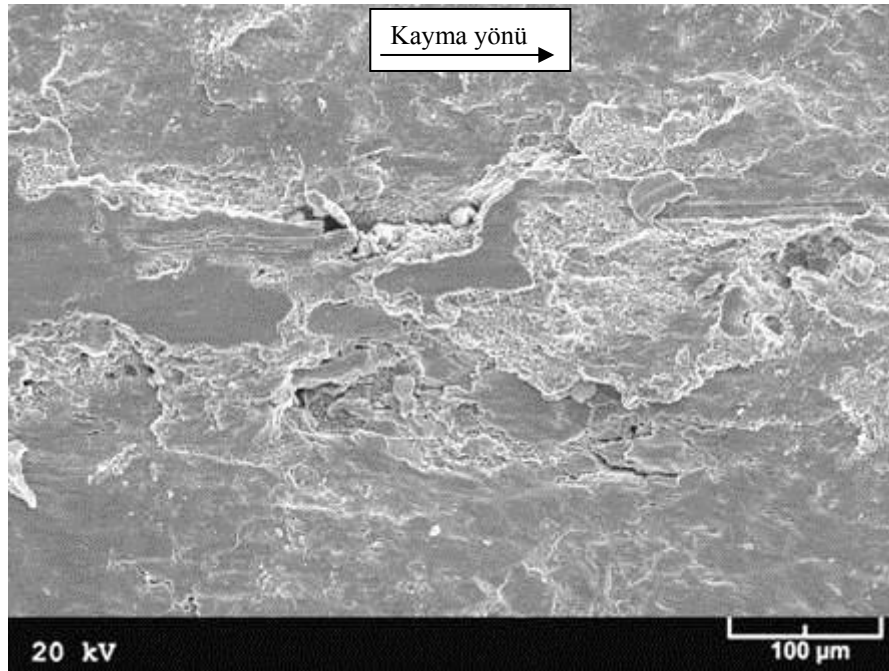
Şekil 118. 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 119. 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

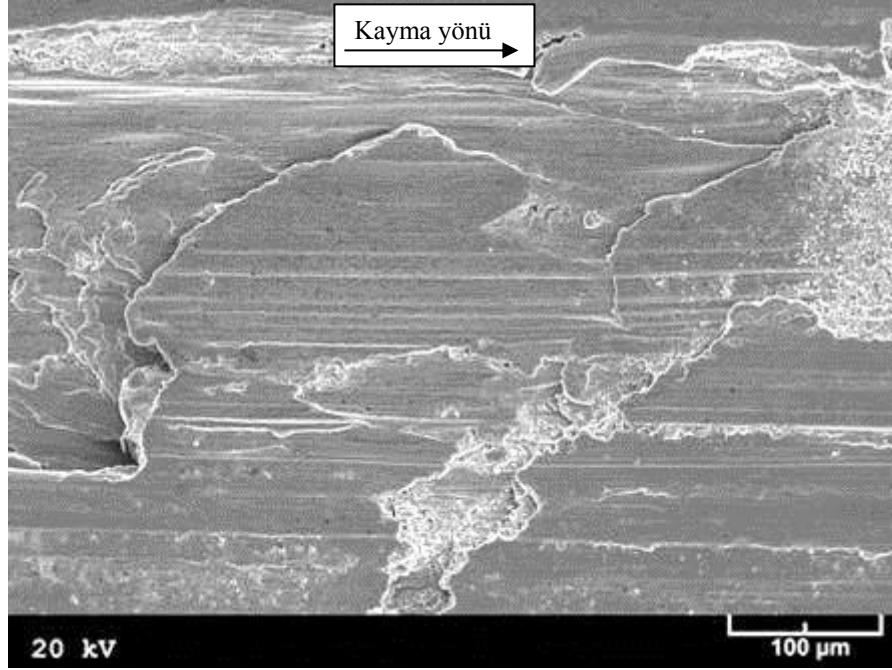


Şekil 120. 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

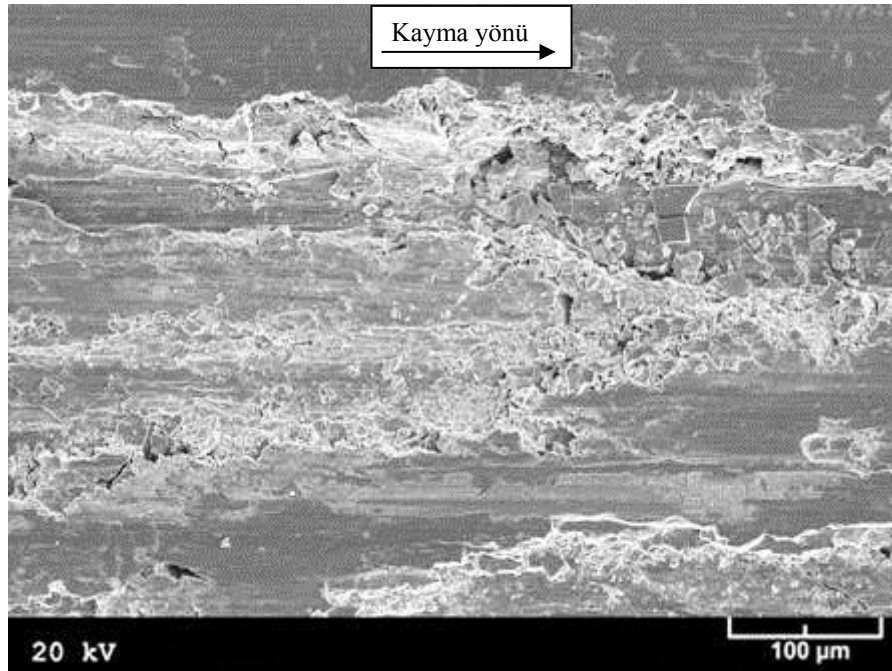


Şekil 121. 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

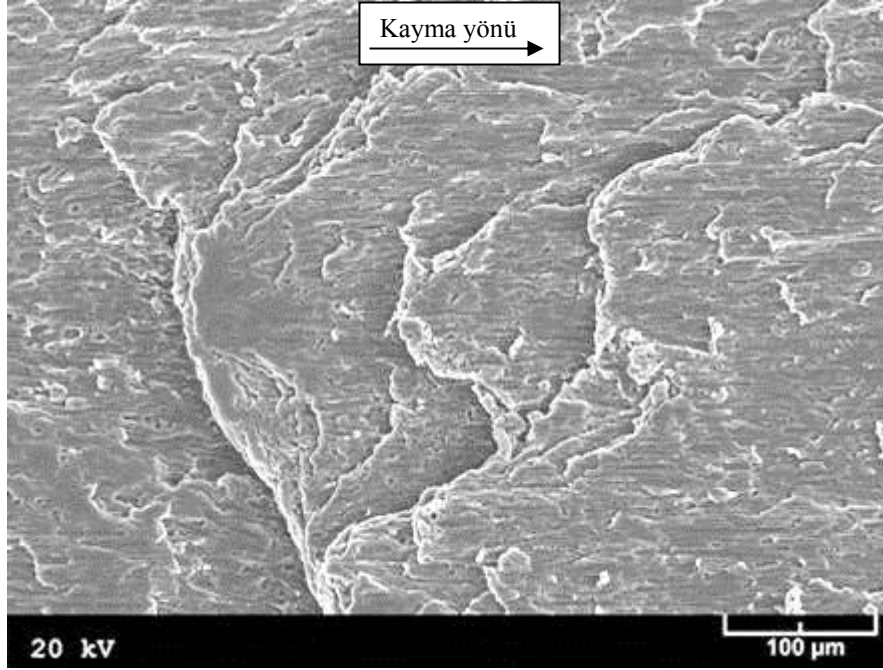




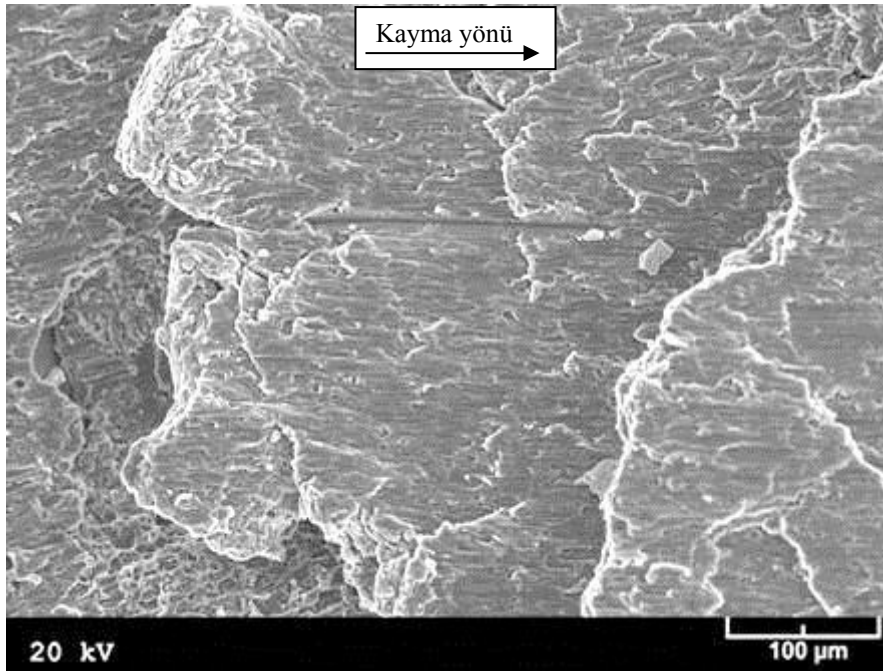
Şekil 122. 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



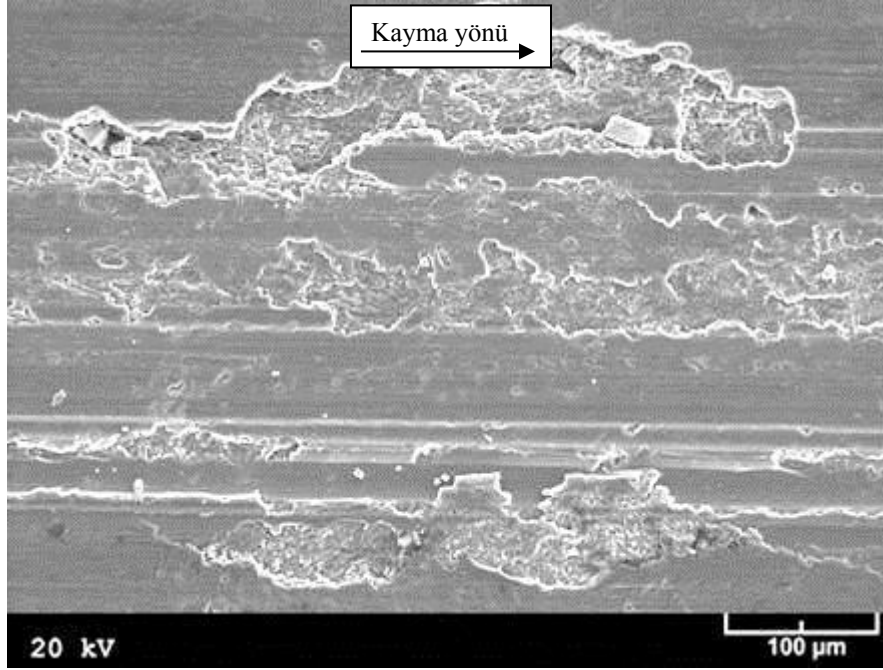
Şekil 123. 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



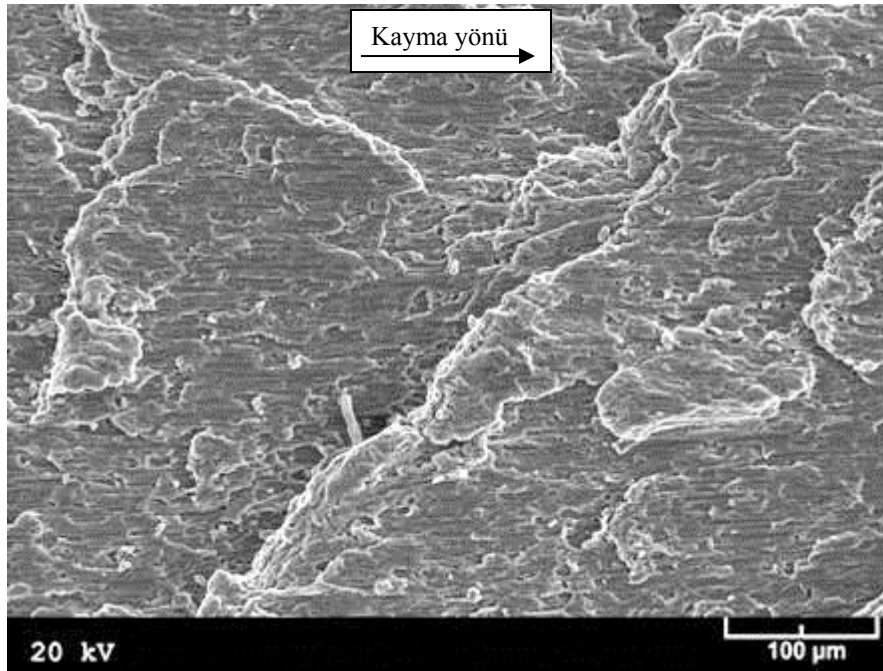
Şekil 124. 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



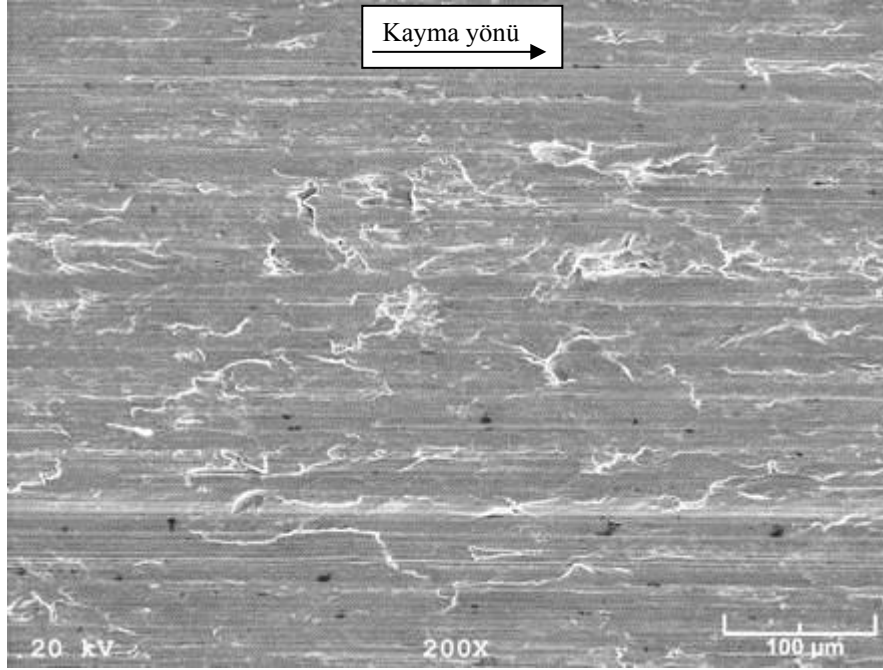
Şekil 125. 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



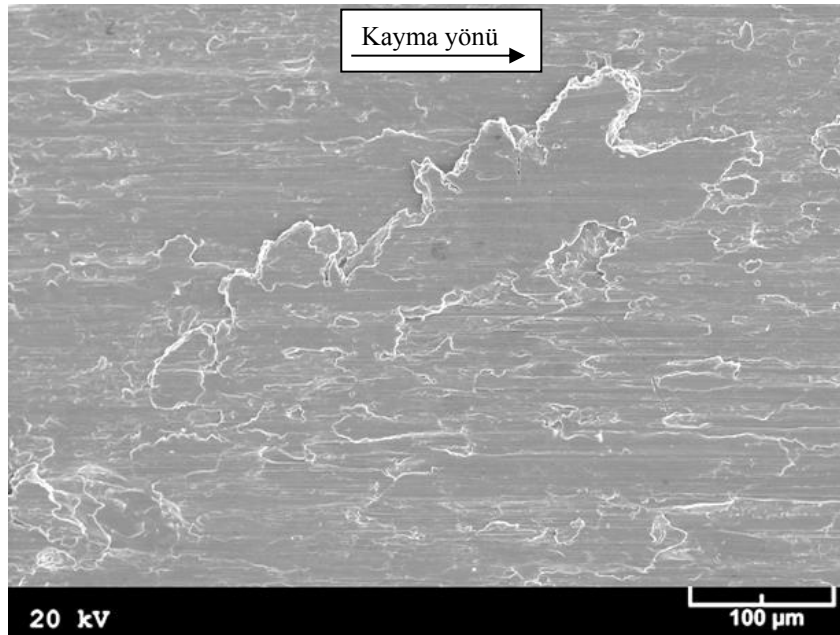
Şekil 126. 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



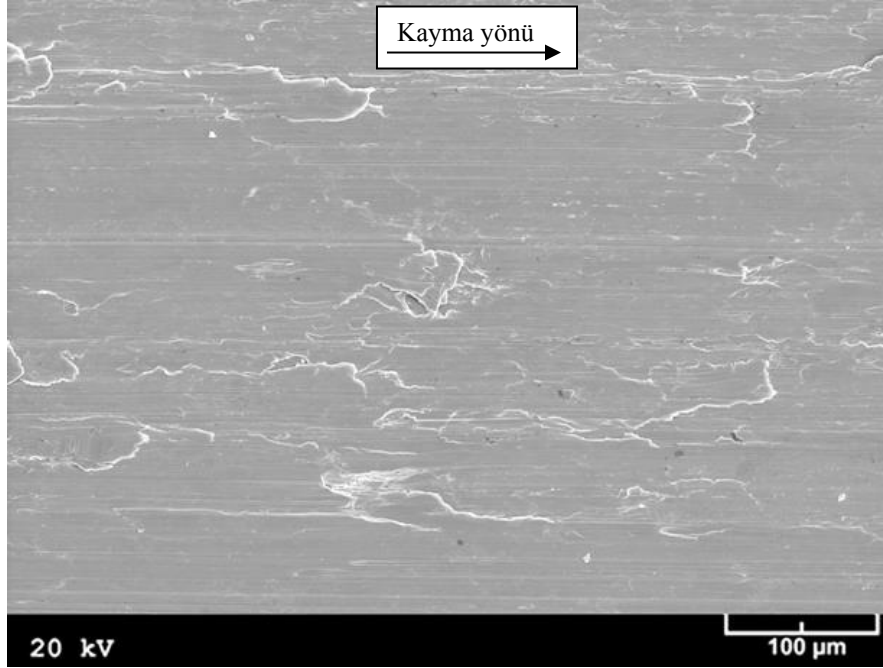
Şekil 127. 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



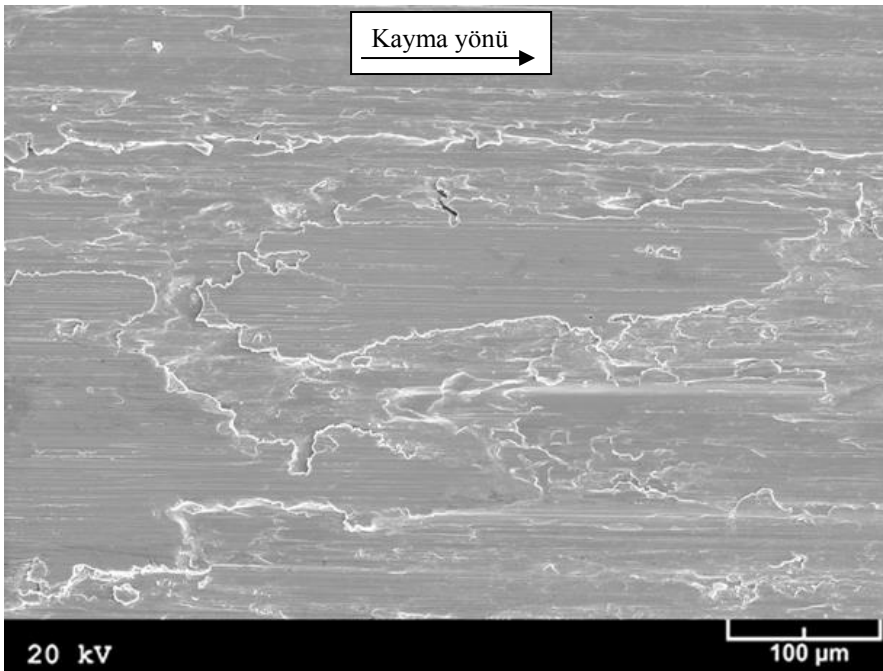
Şekil 128. 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 129. 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 130. 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

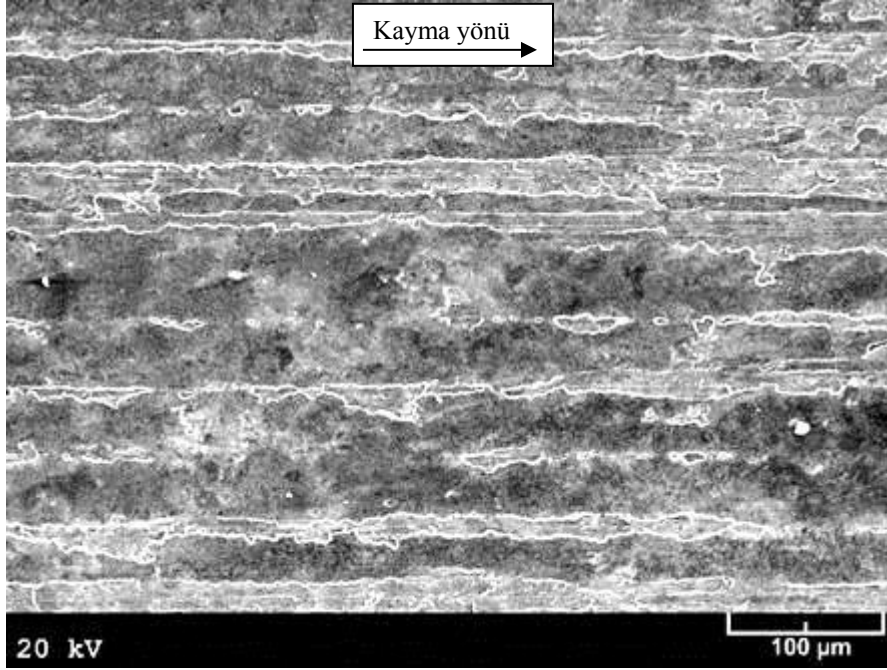


Şekil 131. 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

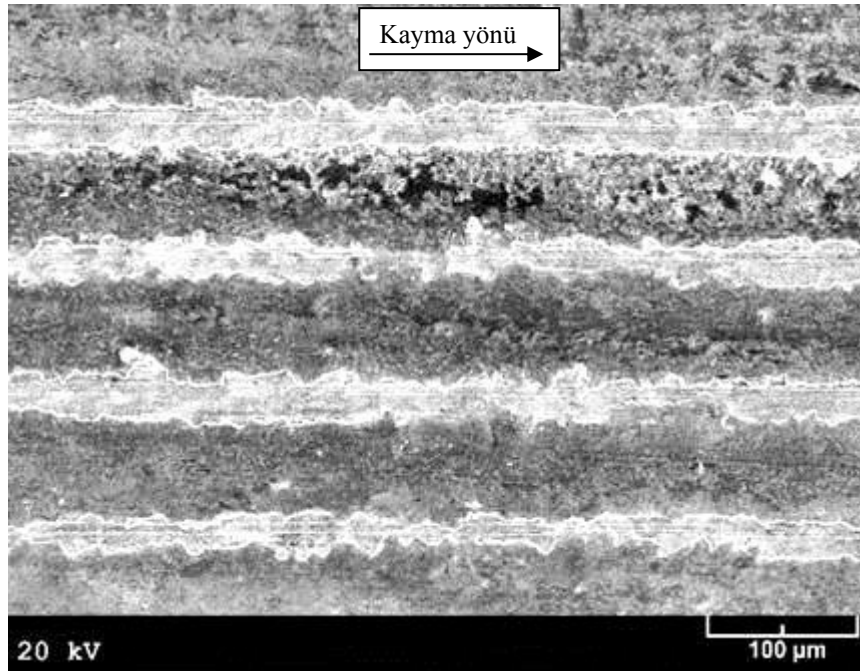
### 3.6. Yağlı Deneye Tabi Tutulan Aşınma Numunelerinin Yüzeylerinin İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneylerine tabi tutulan üçlü (Zn-15Al-1Cu, Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-5Cu) ve dördü (Zn-15Al-3Cu-0,5Si, Zn-15Al-3Cu-1Si ve Zn-15Al-3Cu-3Si) alaşımlar ile ticari Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzuna ait numunelerden SEM ile elde edilen görüntüler Şekil 132-143'de verilmiştir. Bu şekiller deney sırasında bütün alaşımların alaşımların aşınma yüzeylerinde sıvama tabakası ile çiziklerin oluştuğunu ve çinko esaslı alaşımlarda bakır ve silisyum oranı arttıkça sıvanmış bölge alanının azalıp, çiziklerin genişlediğini göstermektedir. Ancak, üçlü alaşımların aşınma yüzeylerinde dördü alaşımların aşınma yüzeylerine göre daha geniş sıvanma bölgelerinin yer aldığı görülmektedir. Ayrıca, dördü alaşımların aşınma yüzeylerindeki sıvanma bölgelerine gömülmüş durumda bulunan silisyum parçacıklarına rastlandı, Şekil 137-141.

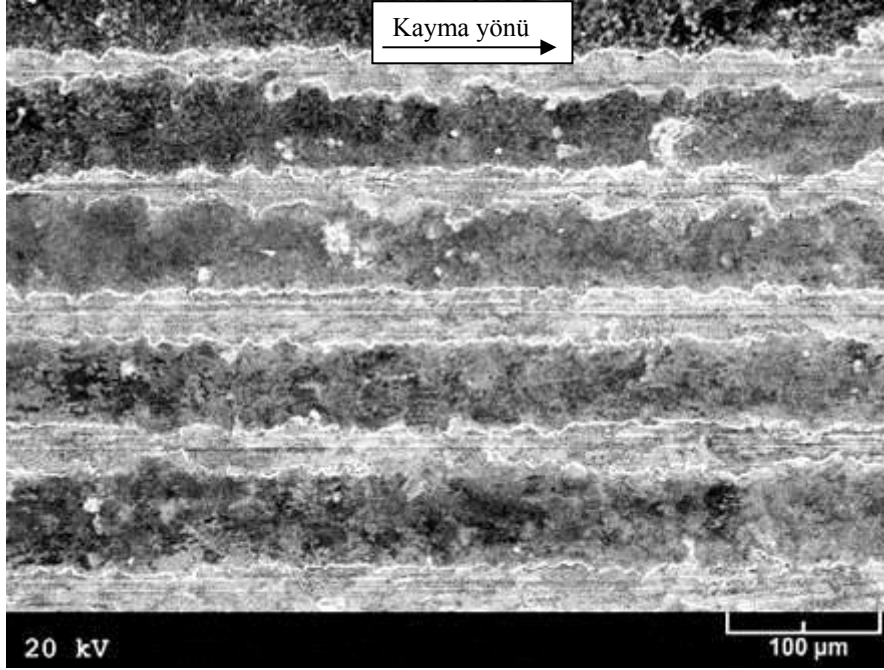
Üçlü Zn-15Al-3Cu ve dördü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımları ile Al-12Si alaşımı ve SAE 660 bronzuna ait numunelerin aşınma yüzeylerinden farklı yağ debisi, basınç ve kayma hızlarında yapılan deneyler sonucunda elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 144-171'de verilmiştir. Bu görüntüler söz konusu alaşımlara ait numunelerin aşınma yüzeylerindeki sıvanmış bölge alanının artan yağ debisi ile azalıp, artan basınçla arttığını göstermektedir. Ancak, kayma hızının bu alaşımların aşınma yüzeyi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı görüldü (Şekil 149, 150, 156, 157, 163, 164, 170 ve 171).



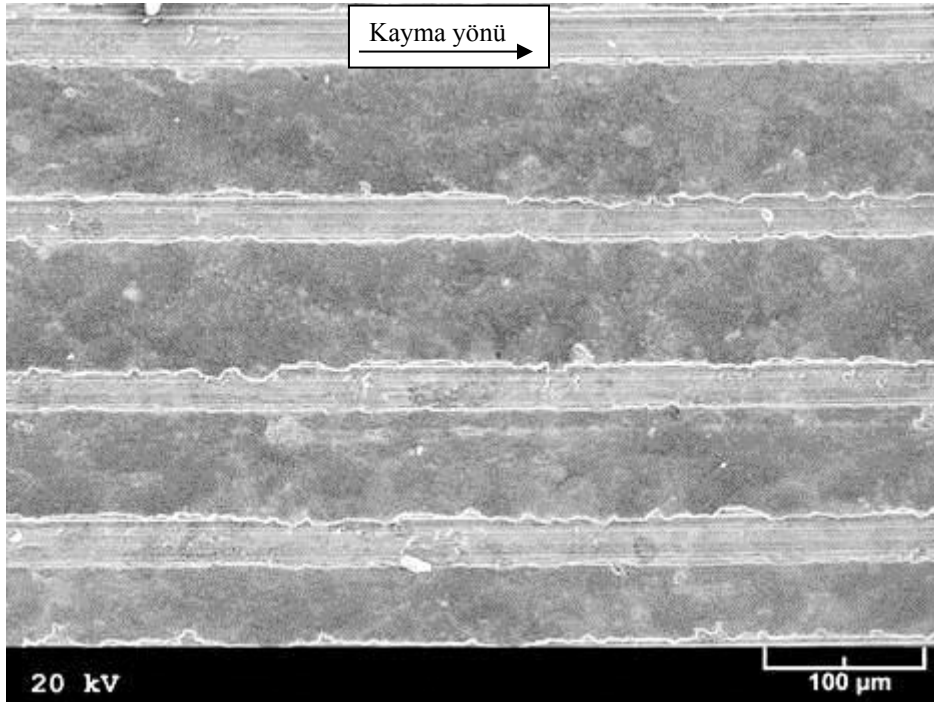
Şekil 132. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-1Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 133. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

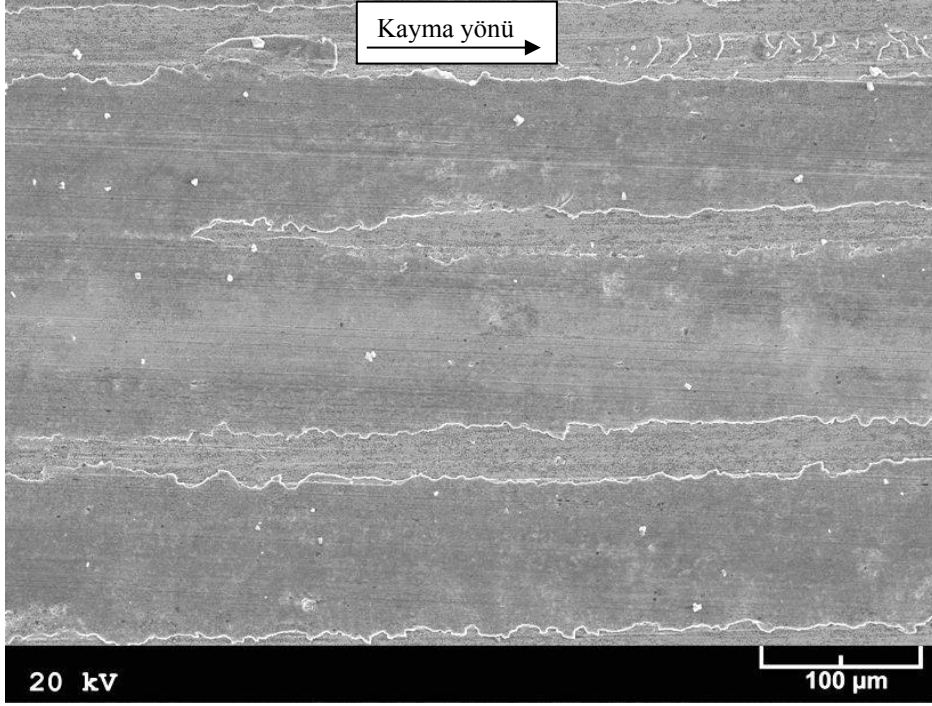


Şekil 134. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-5Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

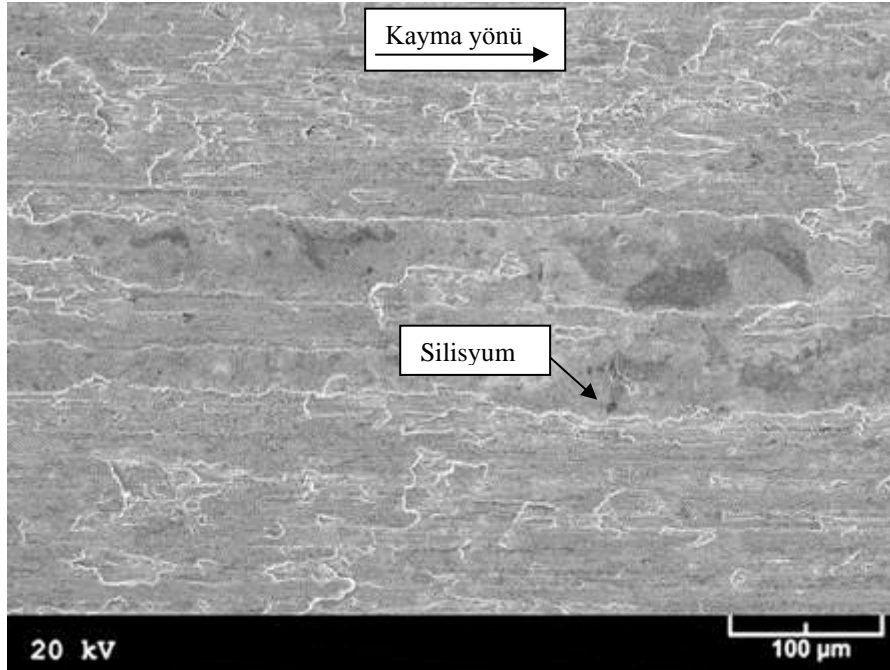


Şekil 135. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtılmış durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

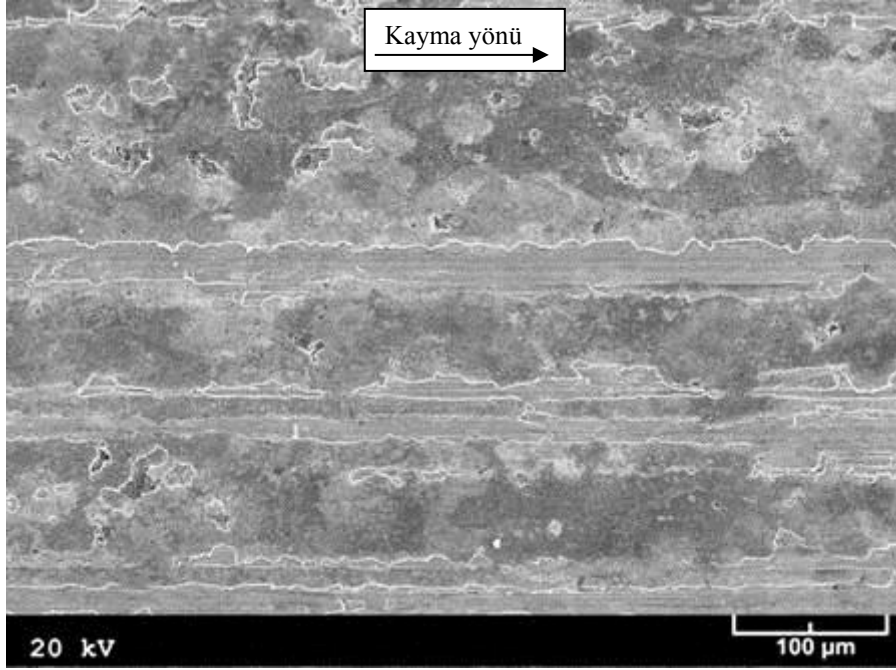




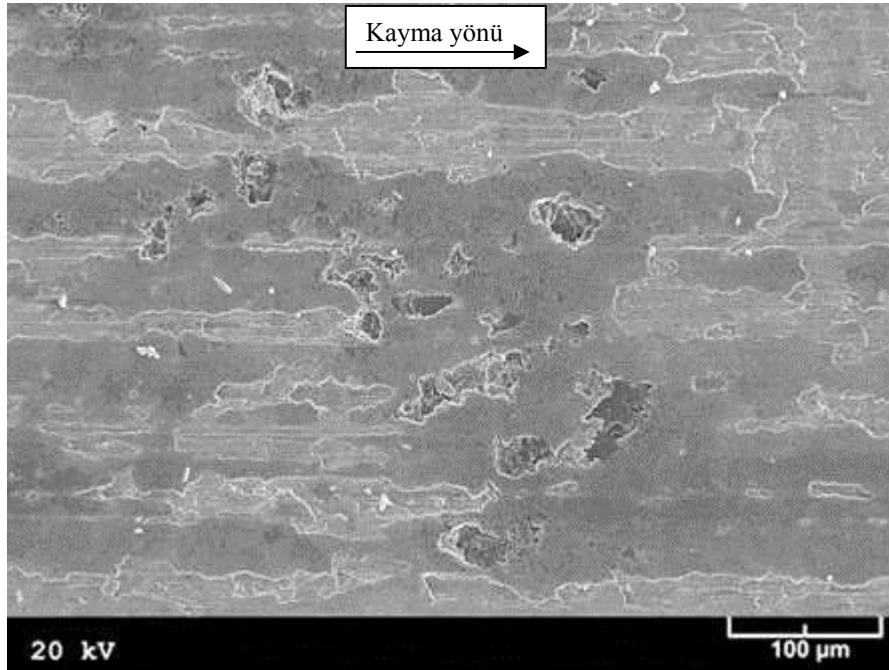
Şekil 136. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıtılması görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



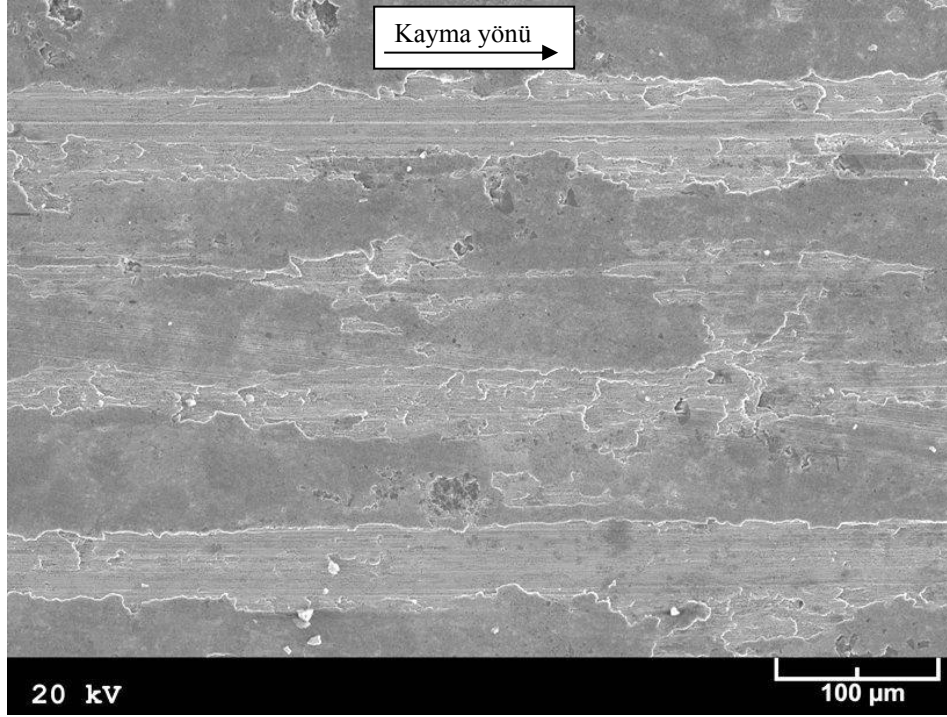
Şekil 137. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-0,5Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



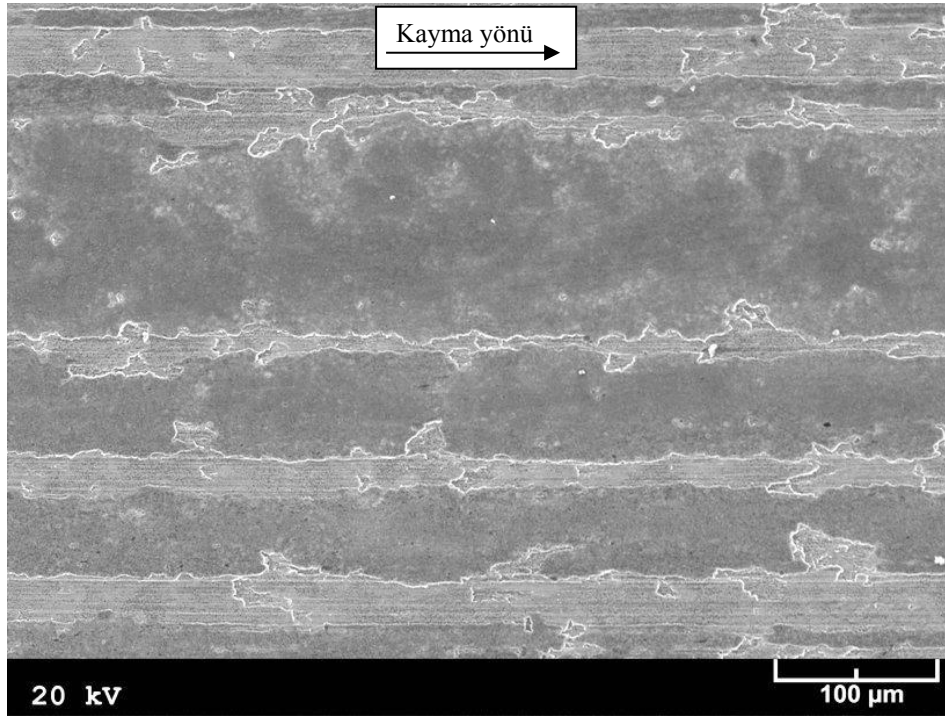
Şekil 138. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



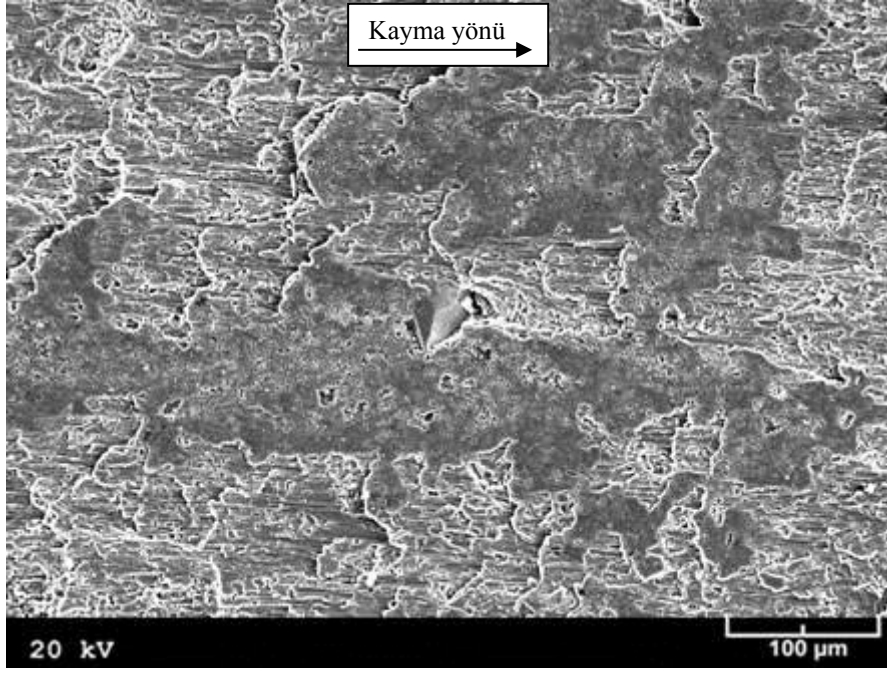
Şekil 139. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-3Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



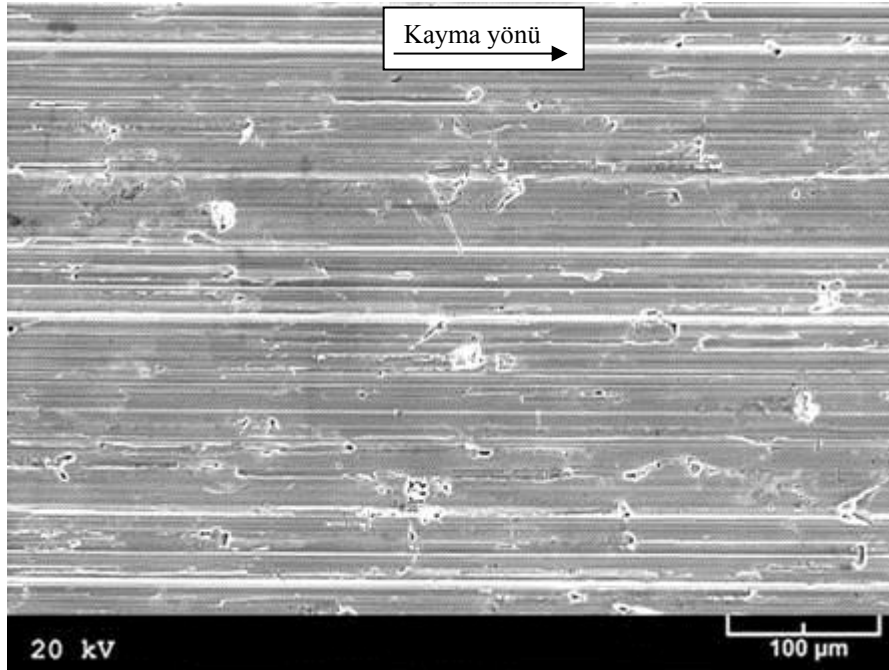
Şekil 140. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



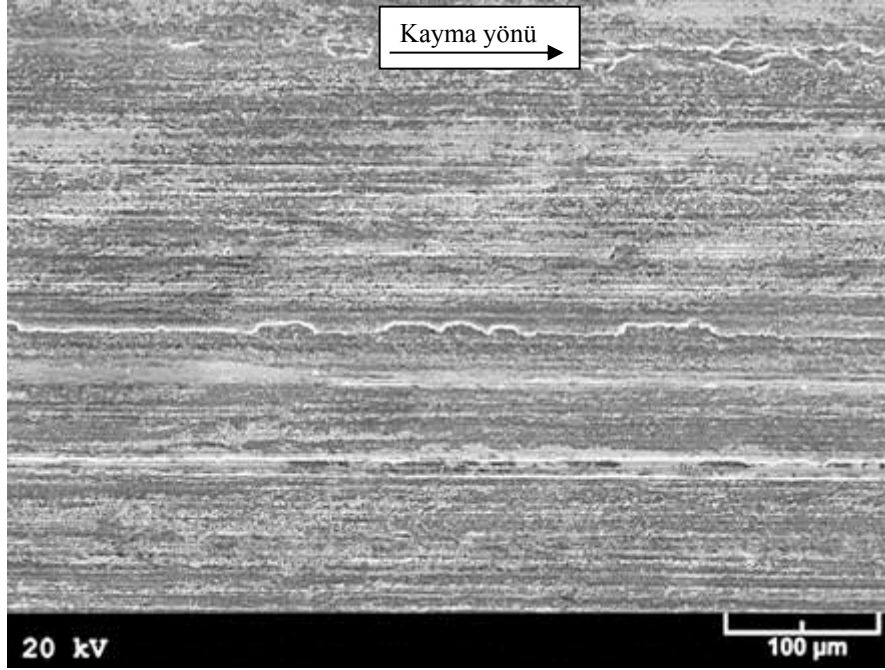
Şekil 141. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



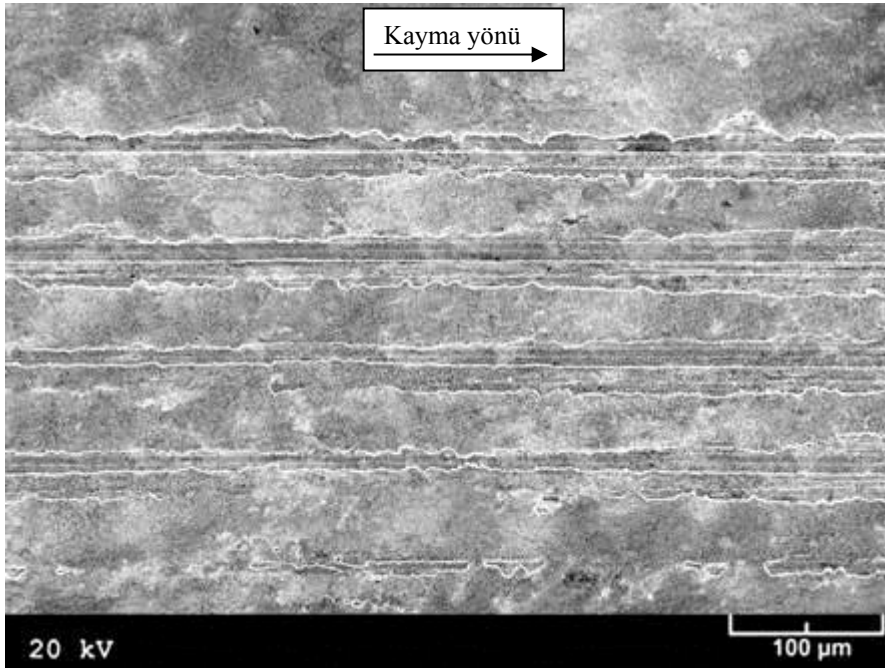
Şekil 142. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



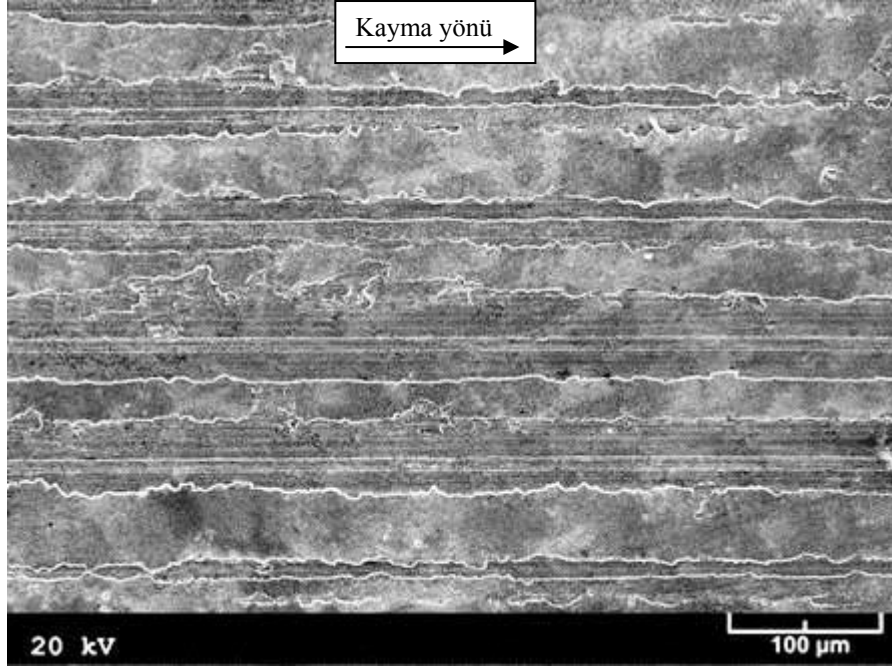
Şekil 143. Yağlı durumda uzun mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



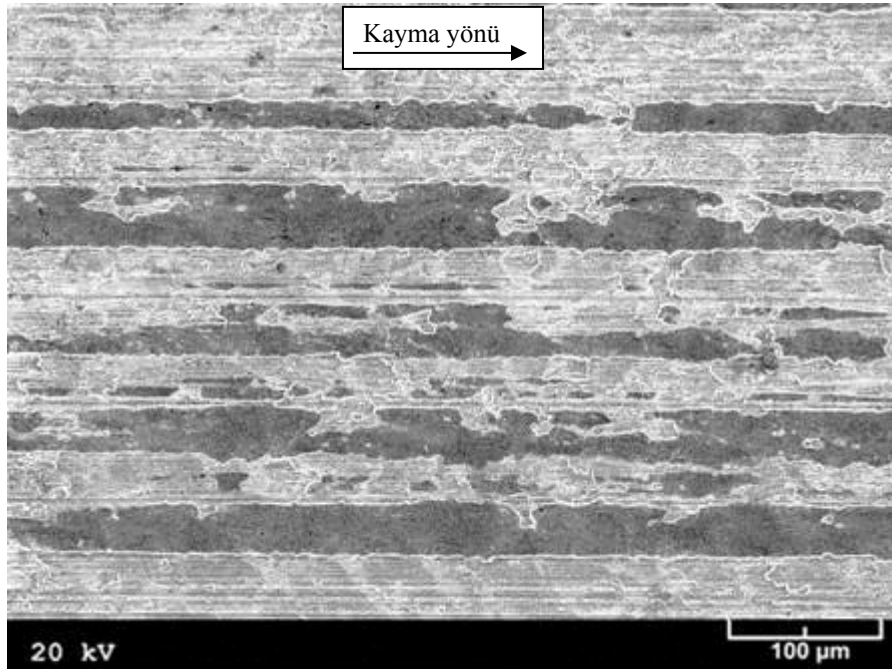
Şekil 144. 0,25 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



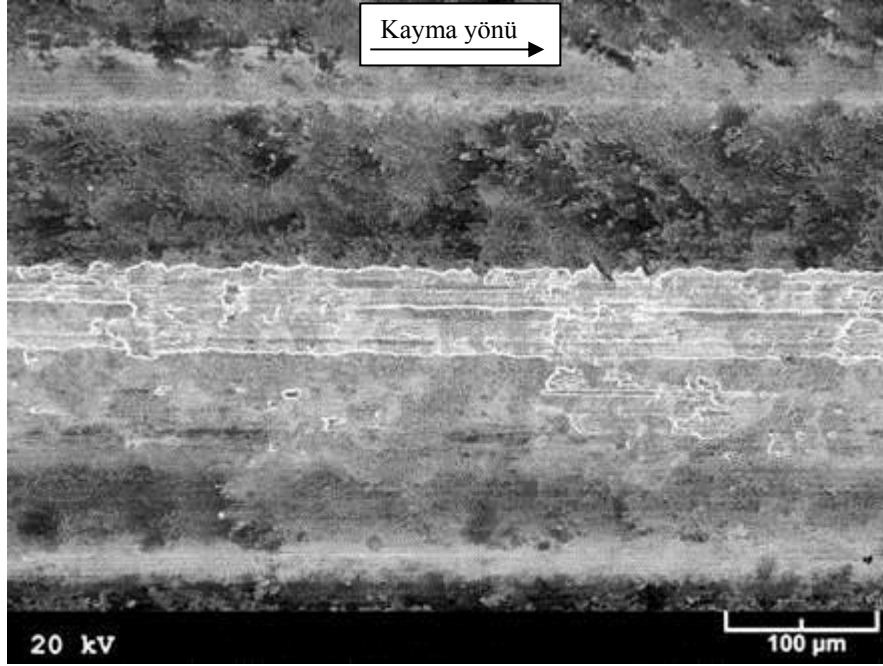
Şekil 145. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



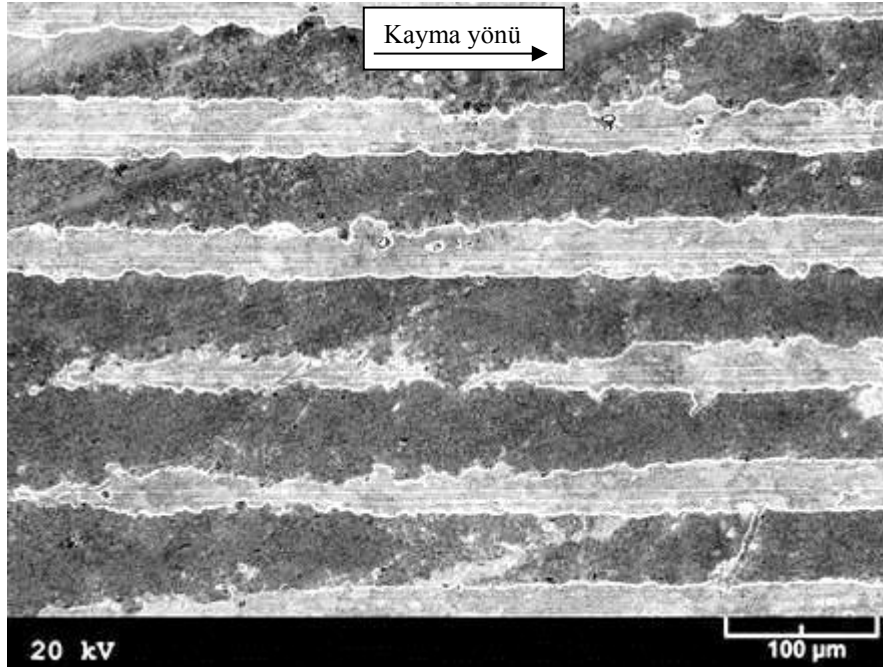
Şekil 146. 3 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki munesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



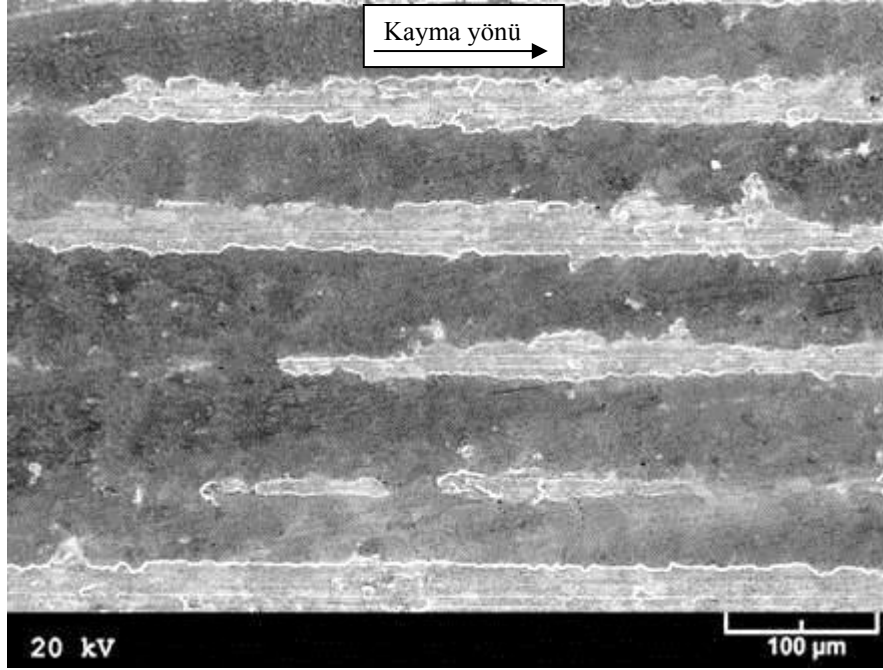
Şekil 147. 1 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



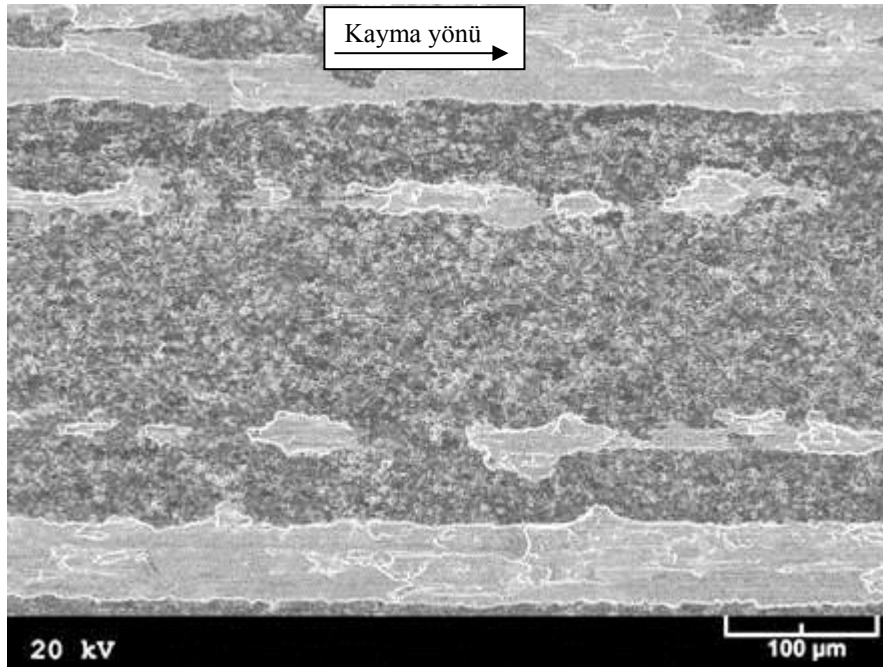
Şekil 148. 8 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 149. 0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

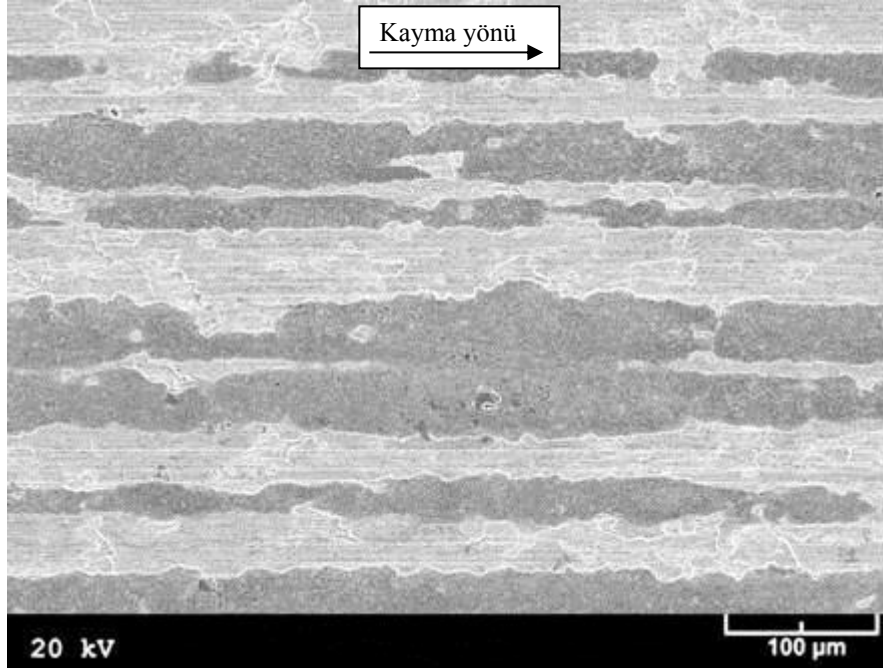


Şekil 150. 3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

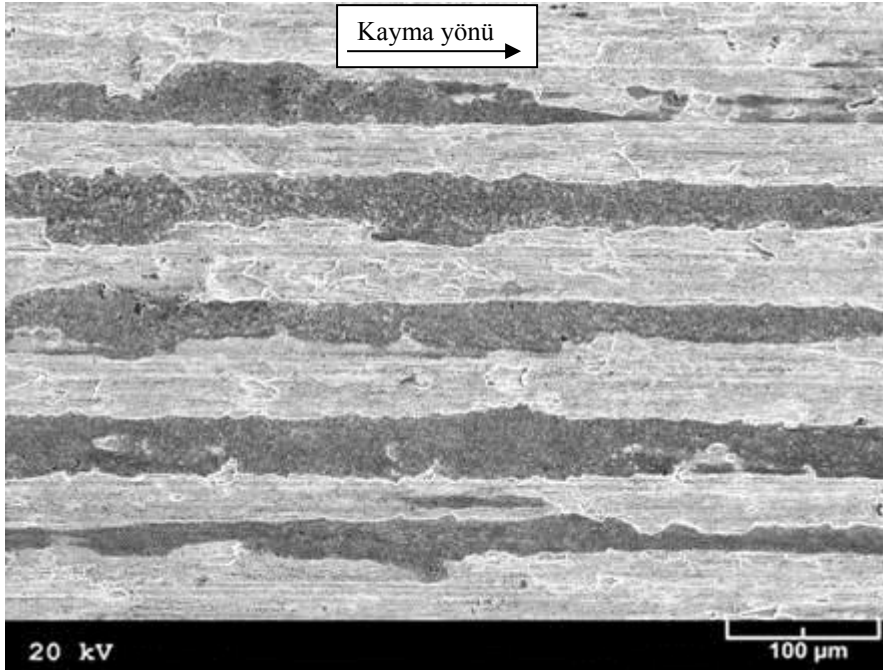


Şekil 151. 0,25 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

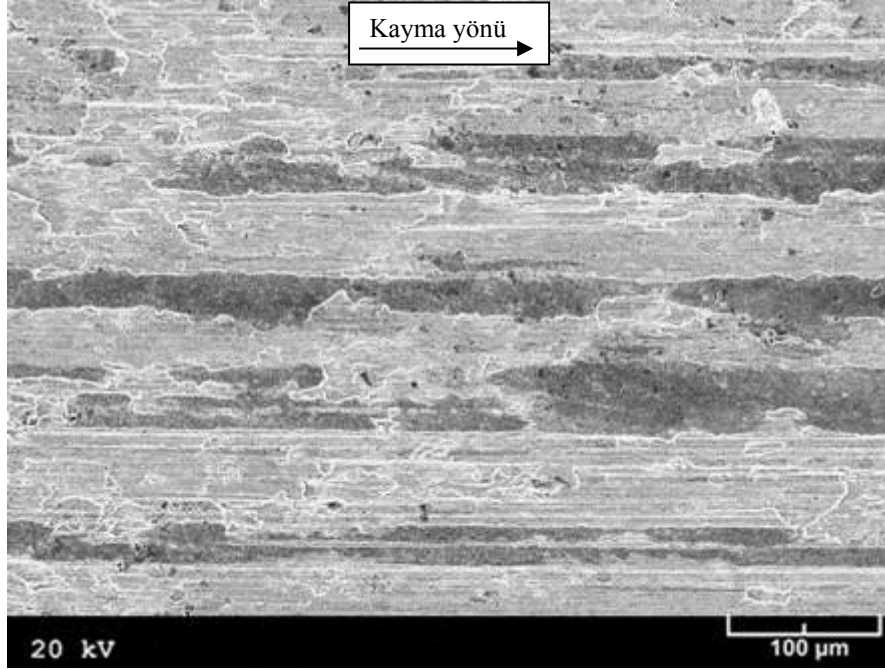




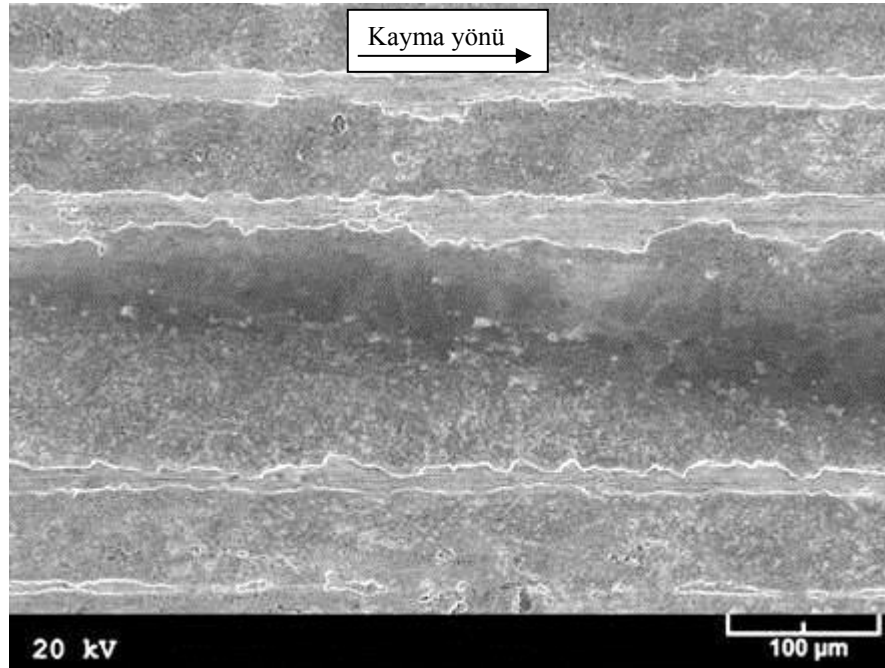
Şekil 152. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



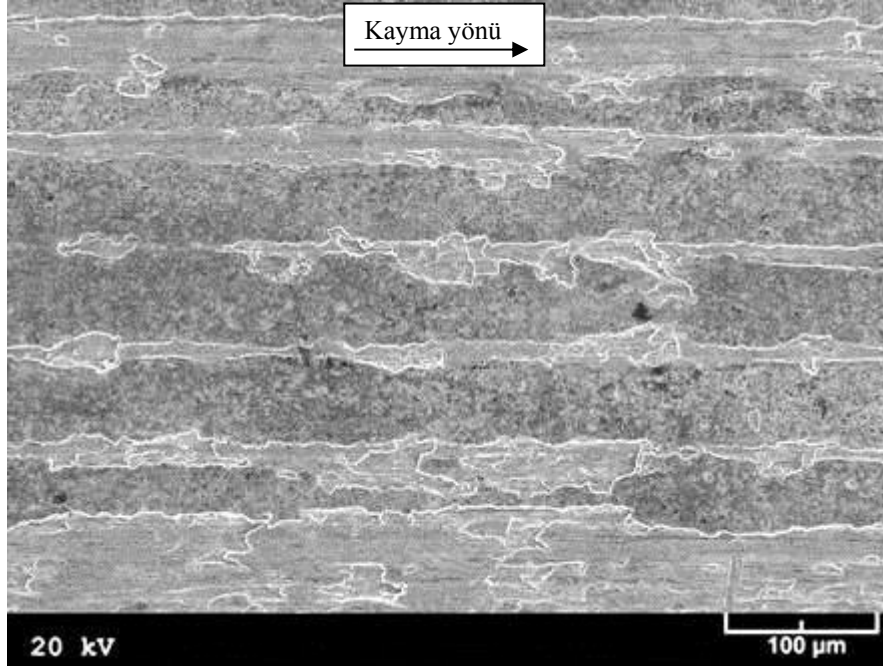
Şekil 153. 3 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



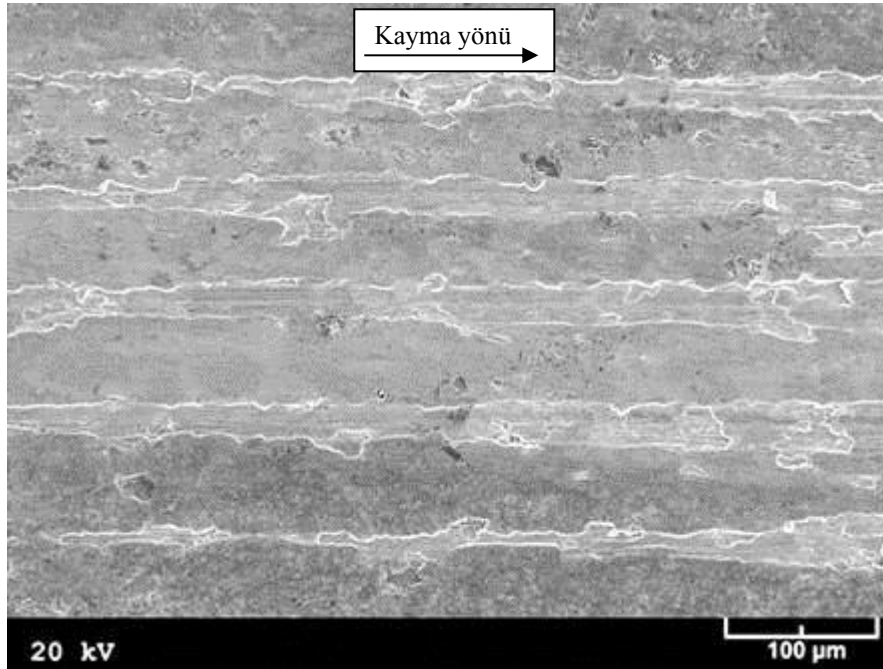
Şekil 154. 1 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



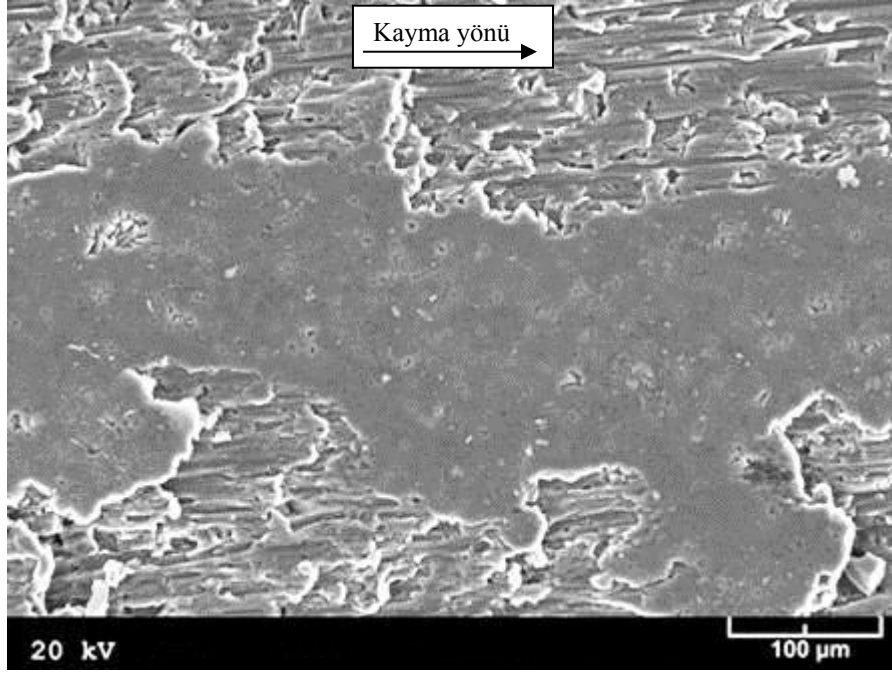
Şekil 155. 8 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



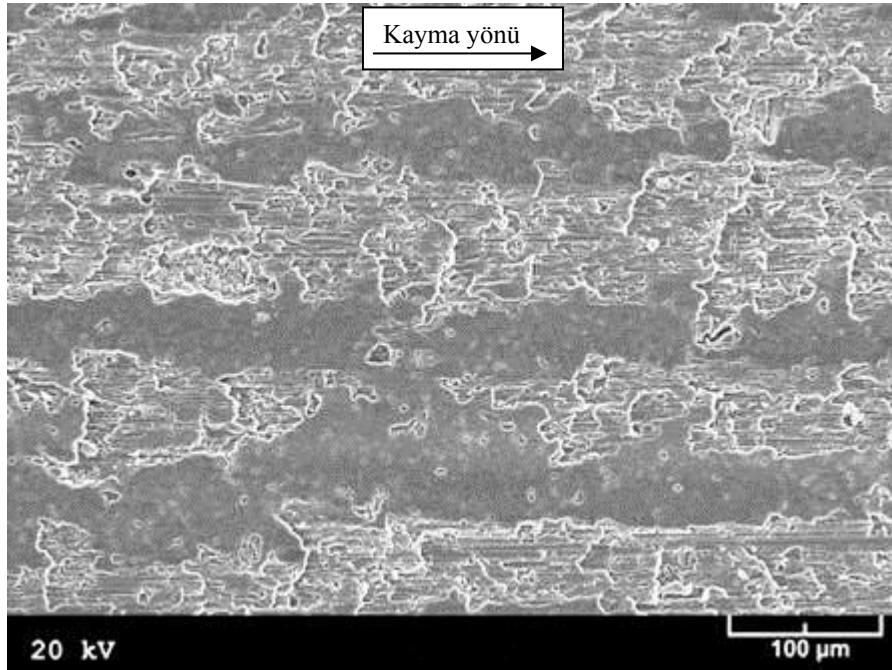
Şekil 156. 0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



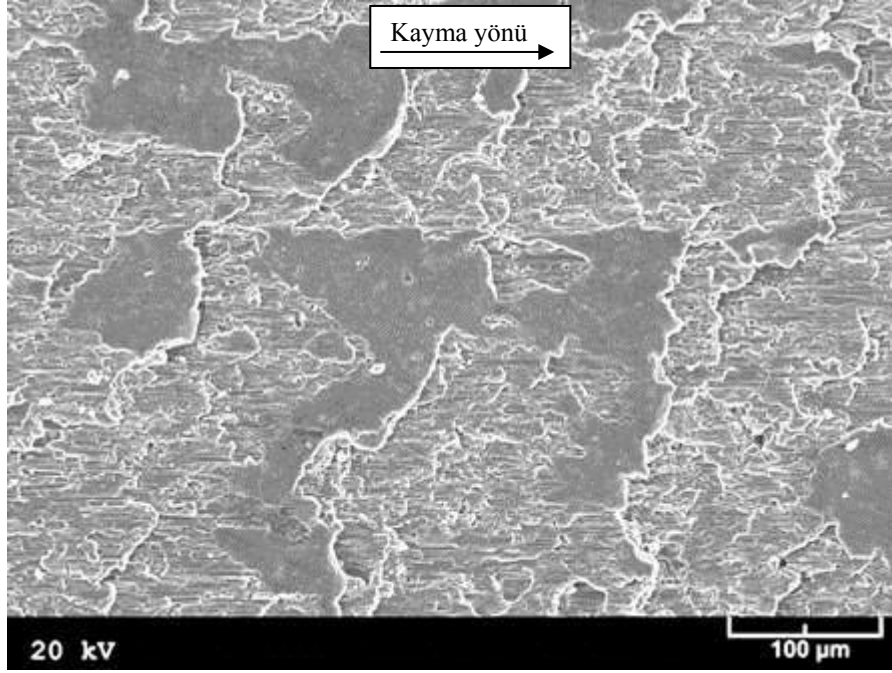
Şekil 157. 3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



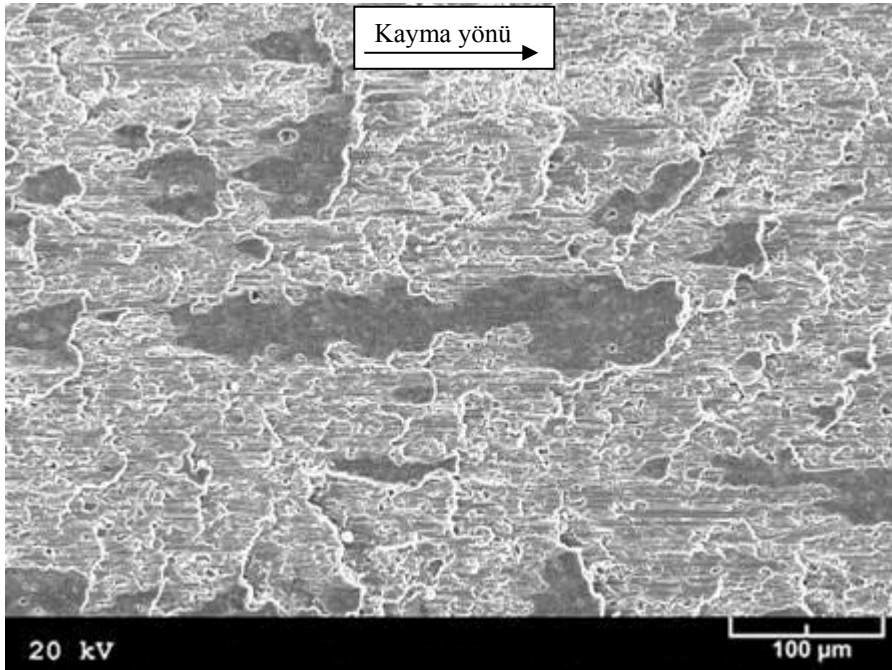
Şekil 158. 0,25 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



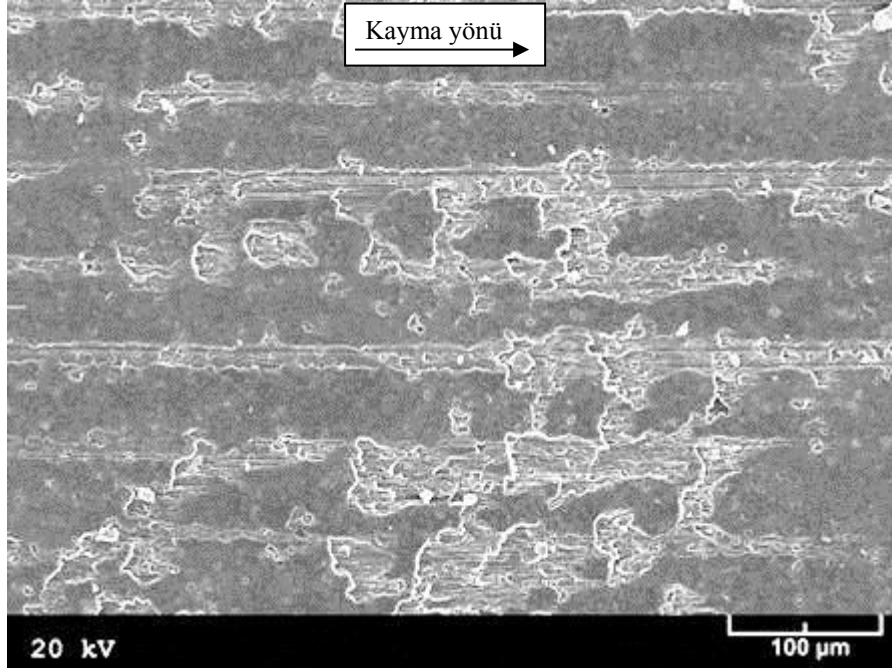
Şekil 159. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



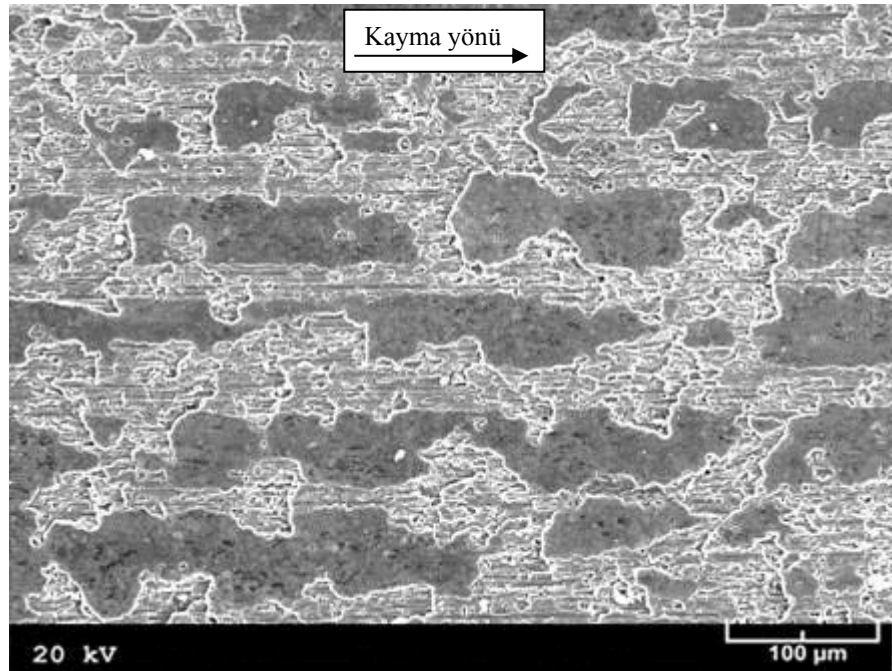
Şekil 160. 3 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



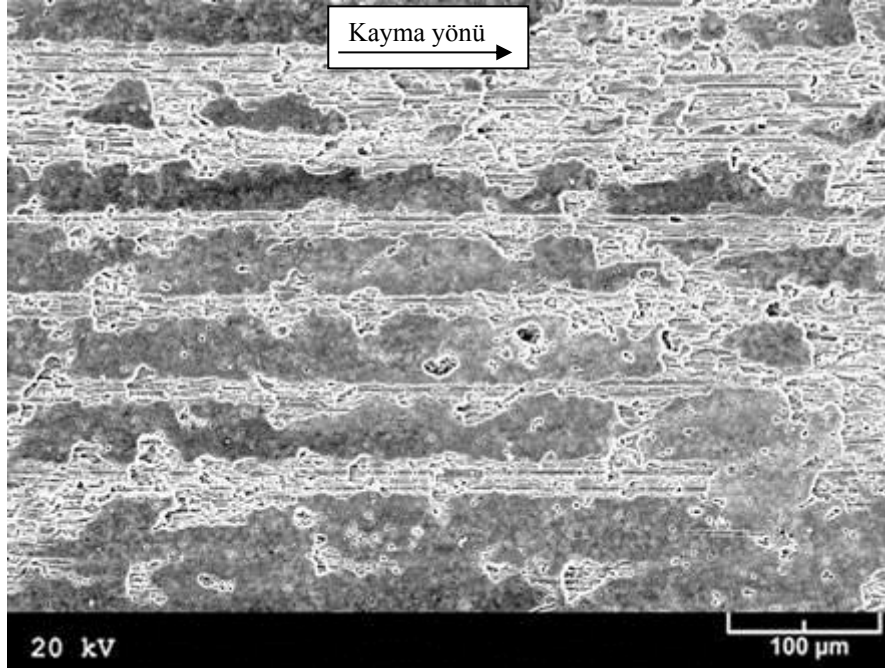
Şekil 161. 1 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



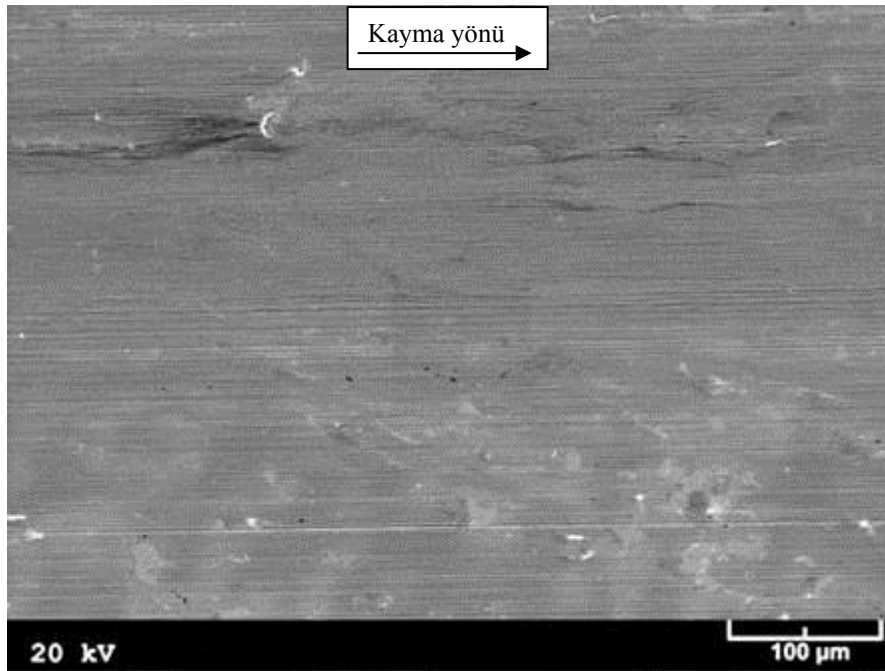
Şekil 162. 8 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



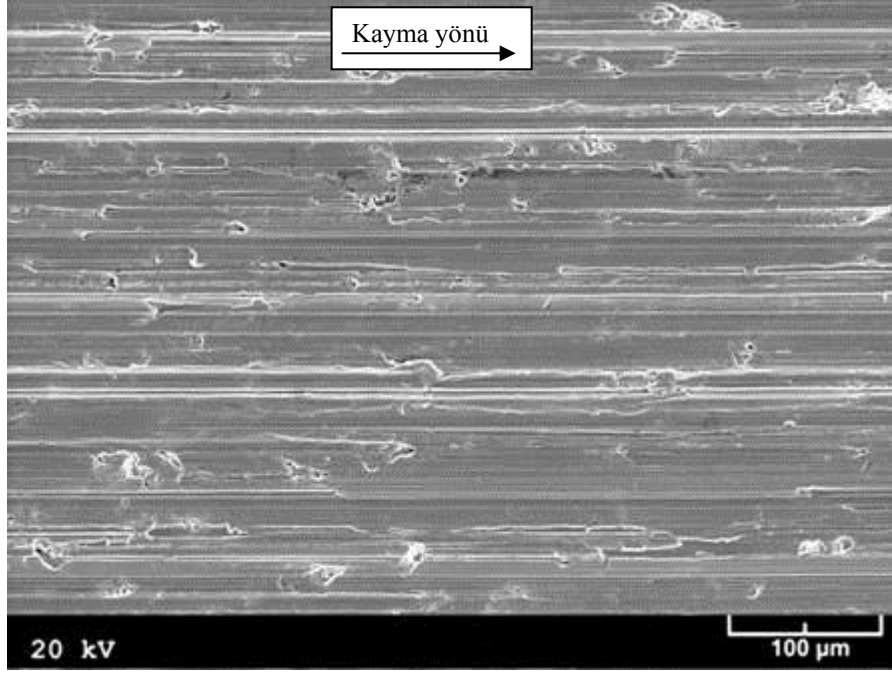
Şekil 163. 0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



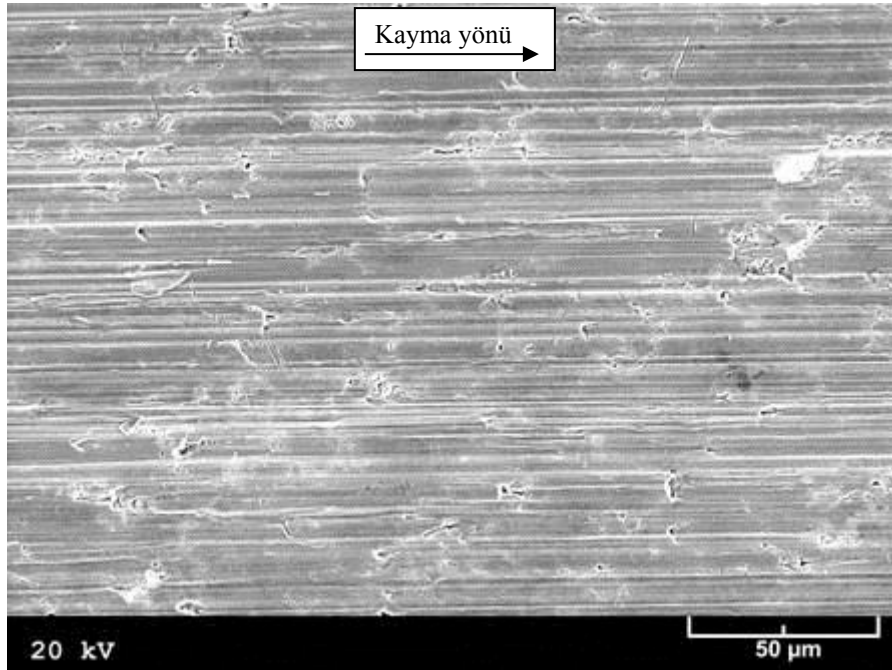
Şekil 164. 3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan Al-12i alaşımına ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 165. 0,25 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

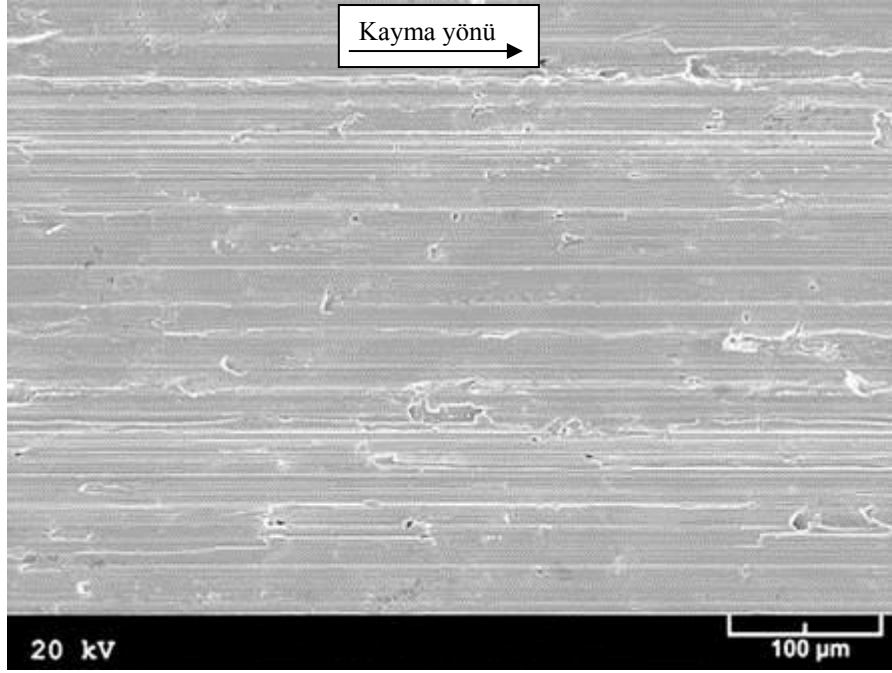


Şekil 166. 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

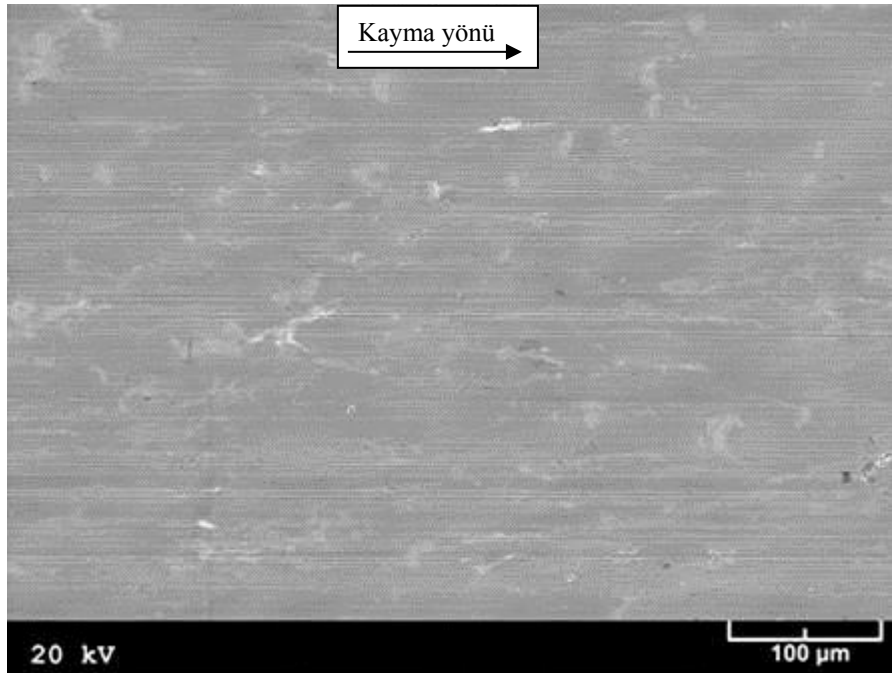


Şekil 167. 3 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli deneye tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

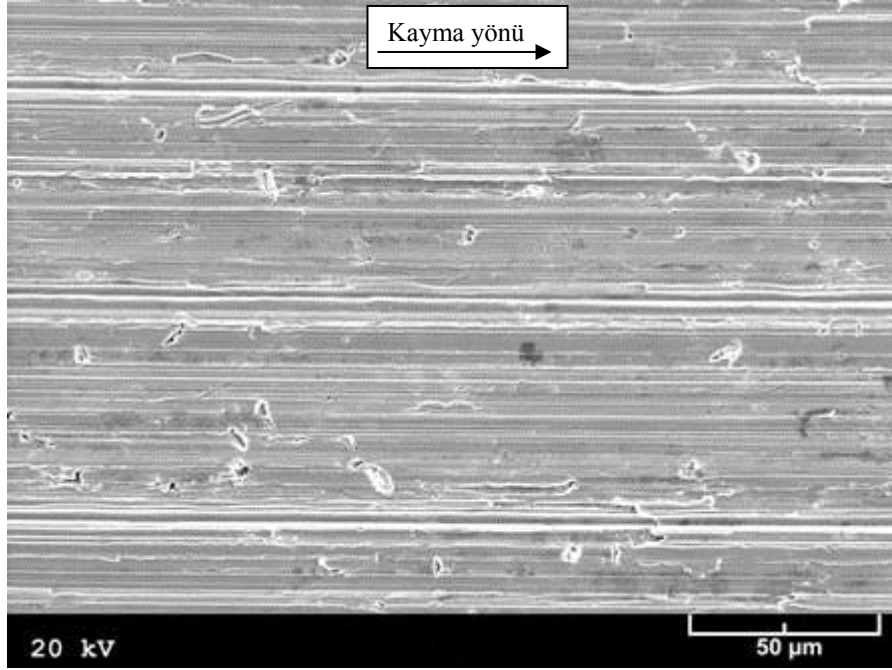




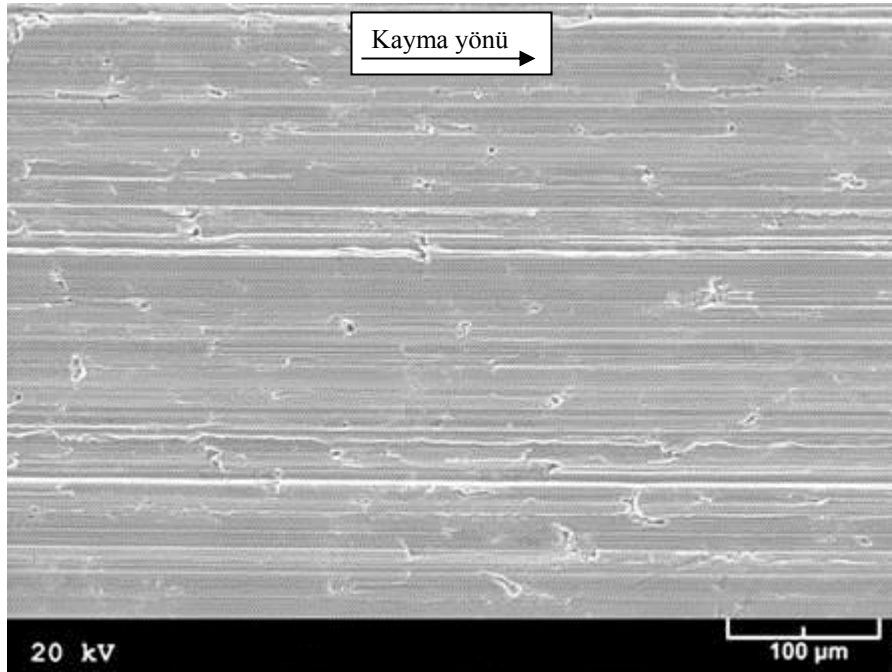
Şekil 168. 1 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 169. 8 MPa'lık basınç, 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi ve 2 m/s'lik kayma hızında kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 170. 0,5 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



Şekil 171. 3 m/s'lik kayma hızı, 6 MPa'lık basınç ve 1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisinde kısa mesafeli aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

### 3.7. Aşınma Deneyine Tabi Tutulan Numunelerin Yüzey Altı İncelemelerinden Elde Edilen Bulgular

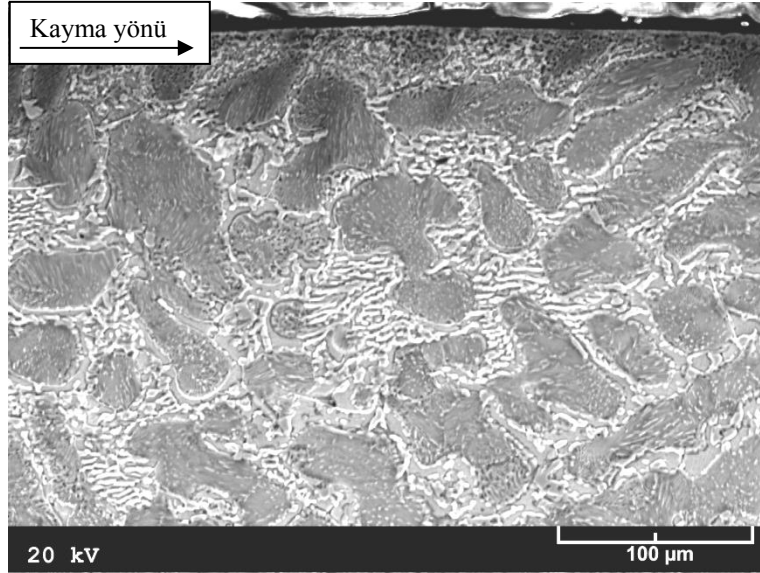
1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 8 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında 108 km'lik yol alınmaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan üçlü Zn-15Al-3Cu ve dörtlü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının dökülmüş durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinin SEM görüntüleri Şekil 172 ve 173'de verilmiştir. Bu görüntülere bakıldığında yağlı durumda aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinin altında belirgin bir yapısal değişimin meydana gelmediği görülmektedir.

Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik yol alınmaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu, Zn-15Al-3Cu-1Si ve Al-12Si alaşımları ile SAE 660 bronzuna ait numunelerin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinin SEM görüntüleri ise Şekil 174-181'de verilmiştir. Bu görüntüler çinko esaslı alaşımların söz konusu kesitleri üzerinde yukarıdan aşağıya doğru sıvama tabakası, ince taneli tabaka ve yönlenme izleri sergileyen tabaka ile yapısal değişime uğramamış bir bölgenin yer aldığını göstermektedir. Bu tabakalar sırasıyla A, B ve C harfleriyle; yapısal değişime uğramamış bölge ise D harfiyle gösterilmiştir. Diğer taraftan Al-12Si alaşımına ait numunenin yüzeyinin altında belirgin bir yapısal değişimin meydana gelmediği, SAE 660 bronzuna ait numunenin yüzeyinin altında ise yalnız kayma doğrultusunda yönelmiş bir bölgenin yer aldığı görülmüştür, Şekil 180 ve 181.

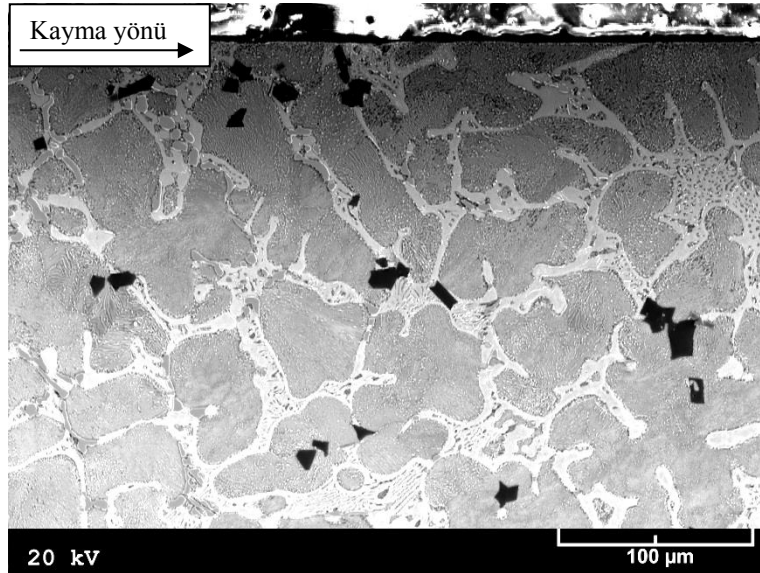
Yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait numunelerin kayma doğrultusuna paralel kesitleri üzerinde yapılan SEM incelemeleri sonucunda yüzey altında yer alan ince taneli tabakanın derinliğinin artan basınç ve kayma hızı ile arttığı görüldü, Şekil 182-189.

Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik yol alınmaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait numunelerin kayma doğrultusuna paralel kesitleri üzerinde ölçülen sertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler (sertlik profili) Şekil 190-191'de verilmiştir. Bu eğriler alaşımlara ait aşınma numunelerinin mikrosertlik değerlerinin artan derinlikle azalıp, minimum değerlerden geçtikten sonra az da olsa artarak sabit değerlere ulaştığını göstermektedir. Yağsız durumda farklı basınç ve hızlarda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait dökülmüş durumdaki numunelerin yüzey altı sertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler ise Şekil 192-195'de verilmiştir. Bu eğriler basınç ve kayma hızı arttıkça yüzey tabakasının

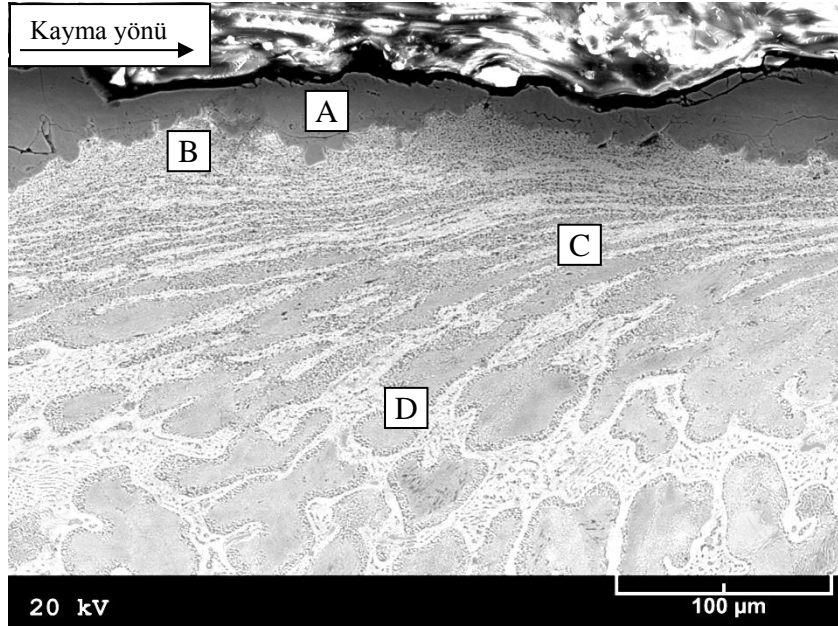
sertliğinin arttığını, ancak sertlik artışında basıncın hıza göre çok daha etkili olduğunu göstermektedir.



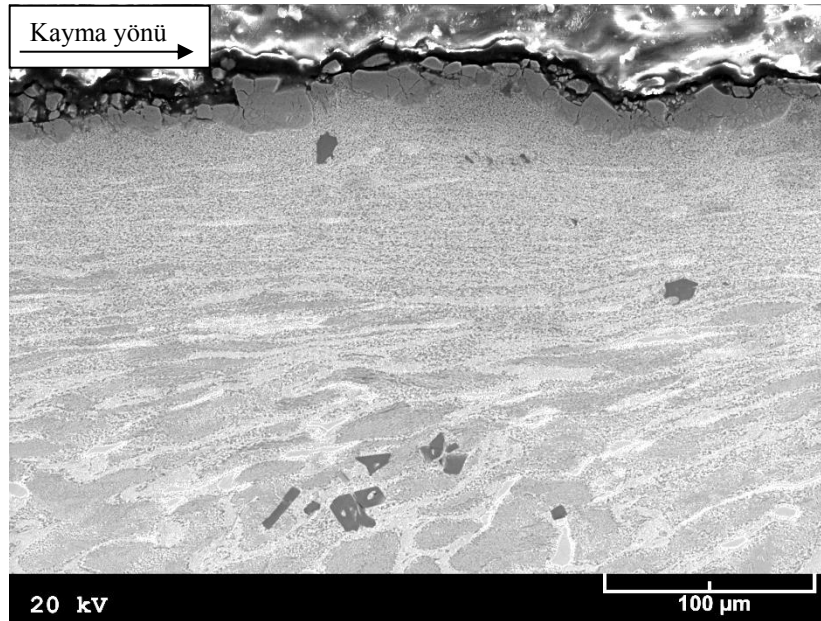
Şekil 172. Yağlı durumda kısa mesafeli aşınma deneyine (yağ debisi: 1 cm<sup>3</sup>/saat, basınç: 8 MPa basınç, kayma hızı: 2 m/s, yol: 108 km) tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



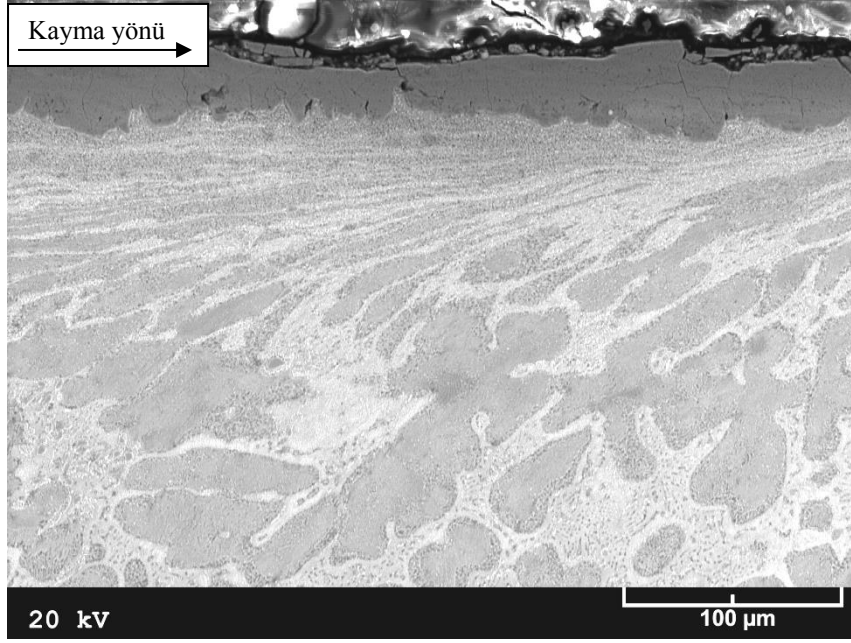
Şekil 173. Yağlı durumda kısa mesafeli aşınma deneyine (yağ debisi: 1 cm<sup>3</sup>/saat, basınç: 8 MPa, kayma hızı: 2 m/s, yol: 108 km) tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



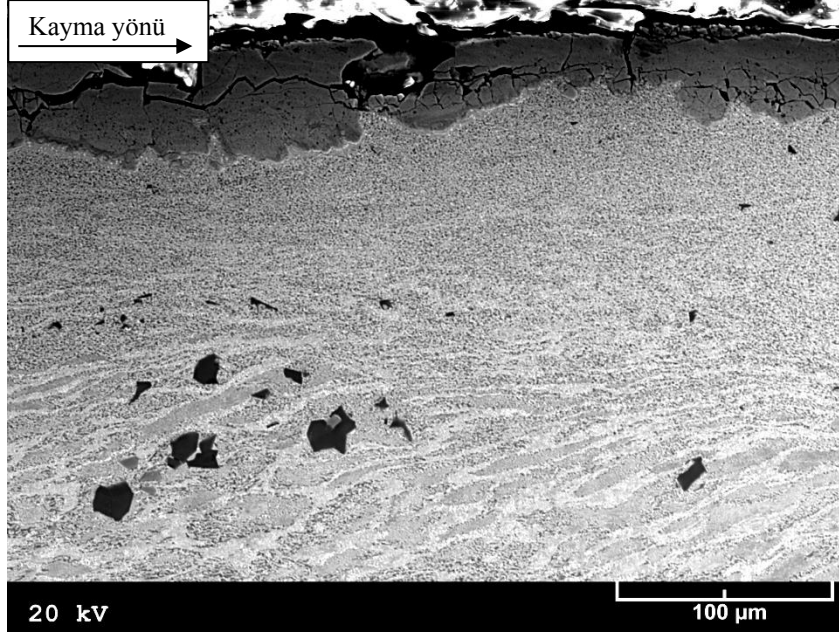
Şekil 174. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



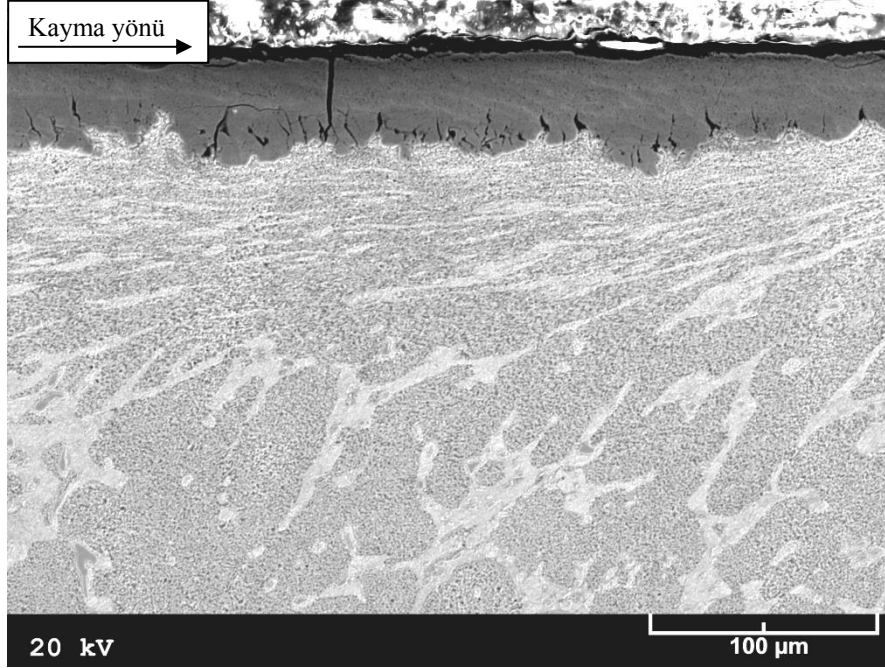
Şekil 175. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



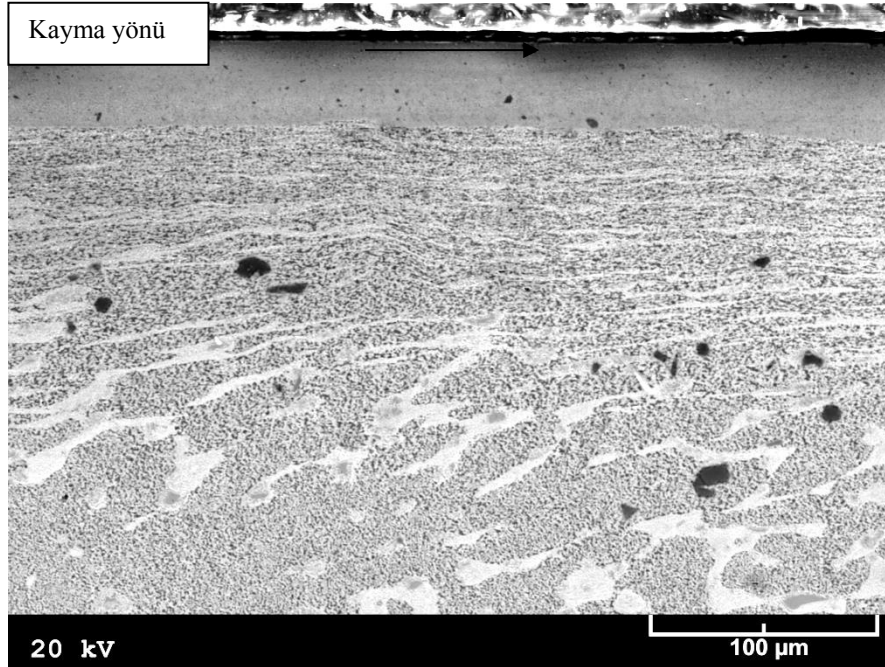
Şekil 176. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T5 ısıtılması uygulanmış durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



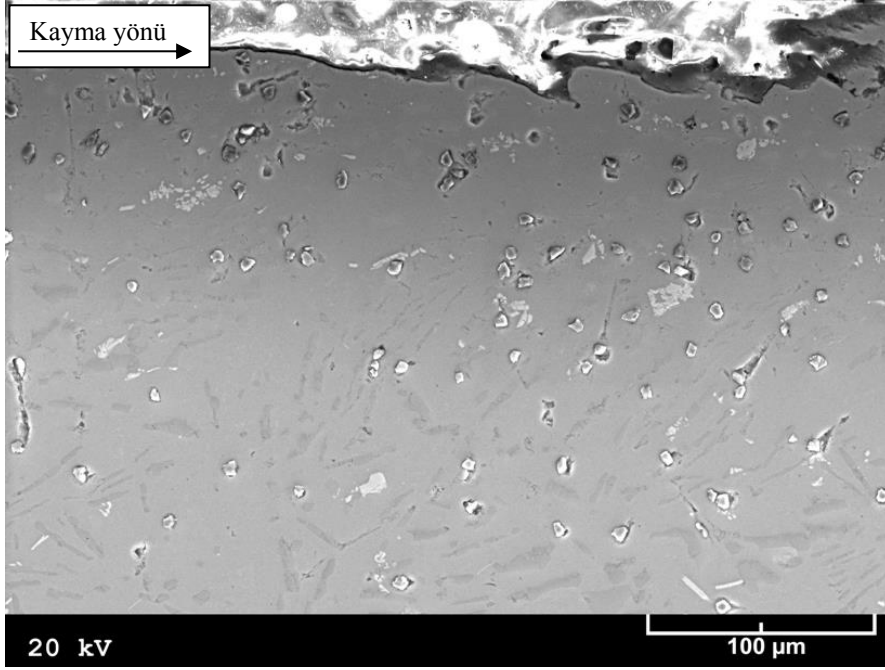
Şekil 177. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T5 ısıtılması uygulanmış durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



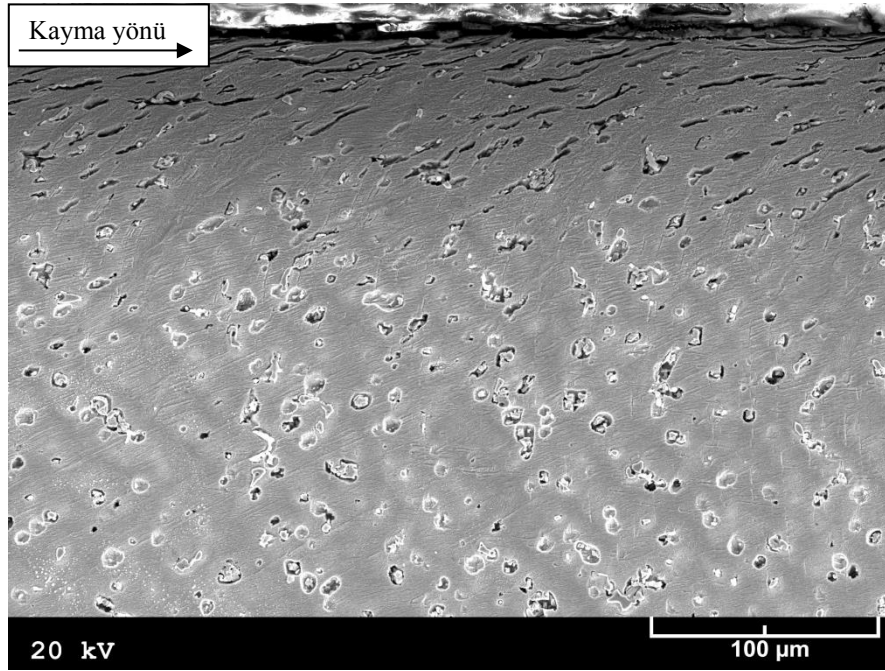
Şekil 178. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıt işlemleri uygulanmış durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



Şekil 179. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıt işlemleri uygulanmış durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

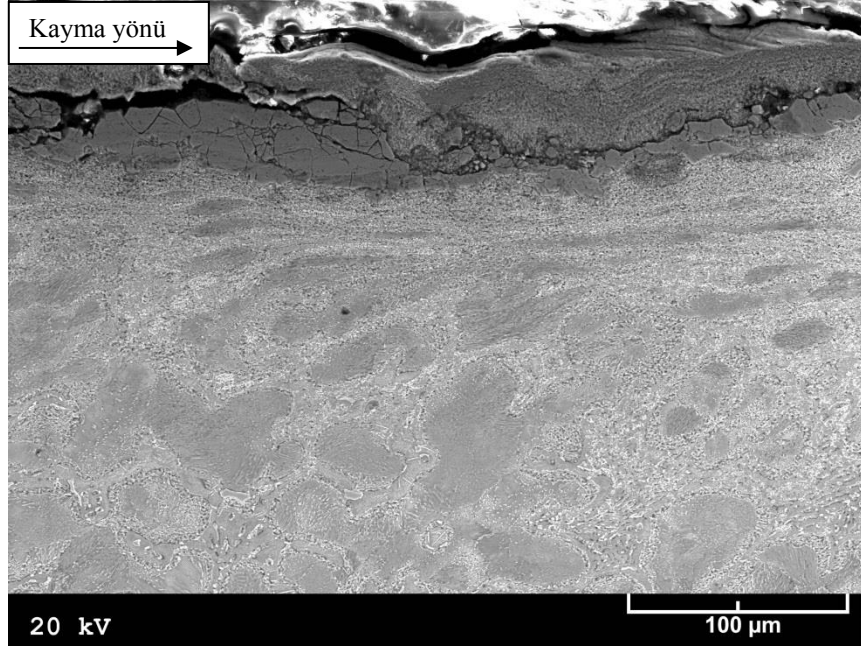


Şekil 180. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Al-12Si alaşımına ait numunenin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

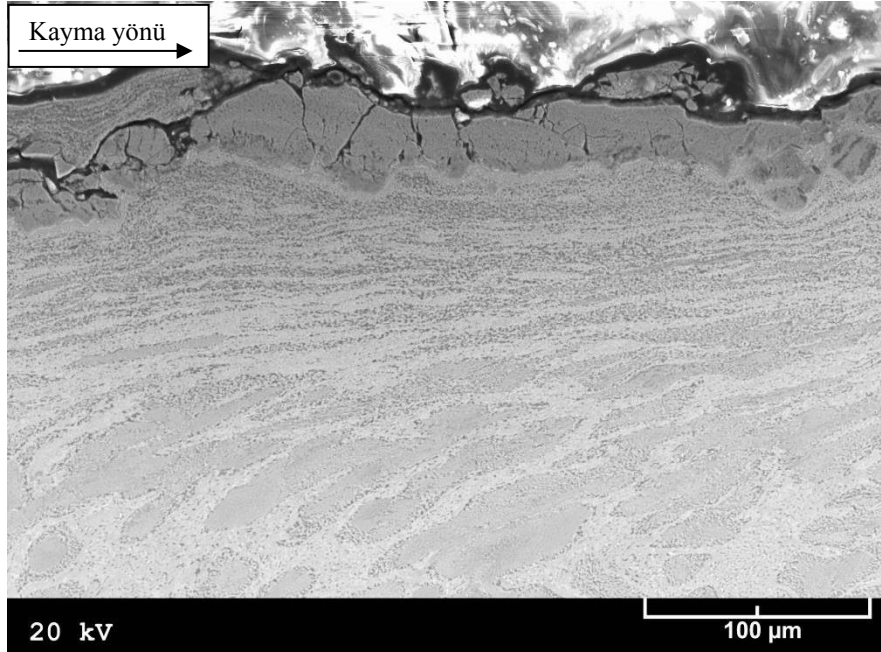


Şekil 181. Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzuna ait numunenin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

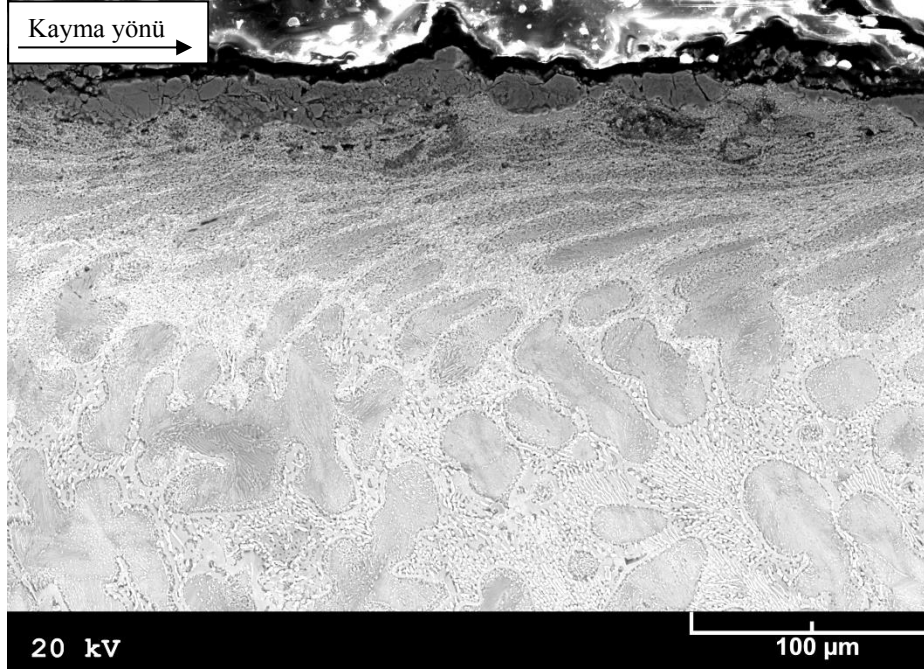




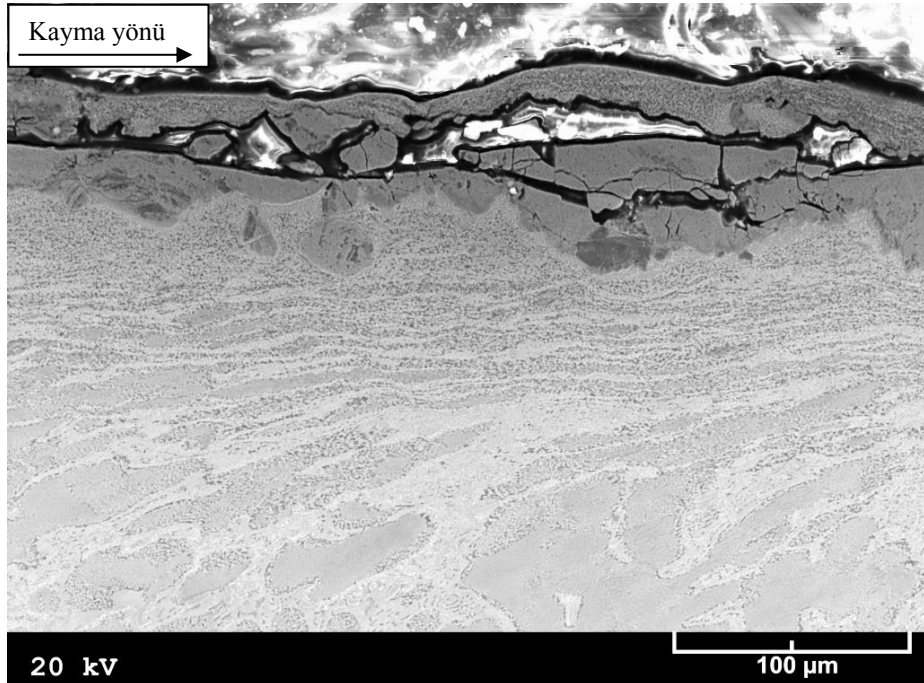
Şekil 182. Yağsız durumda 1MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



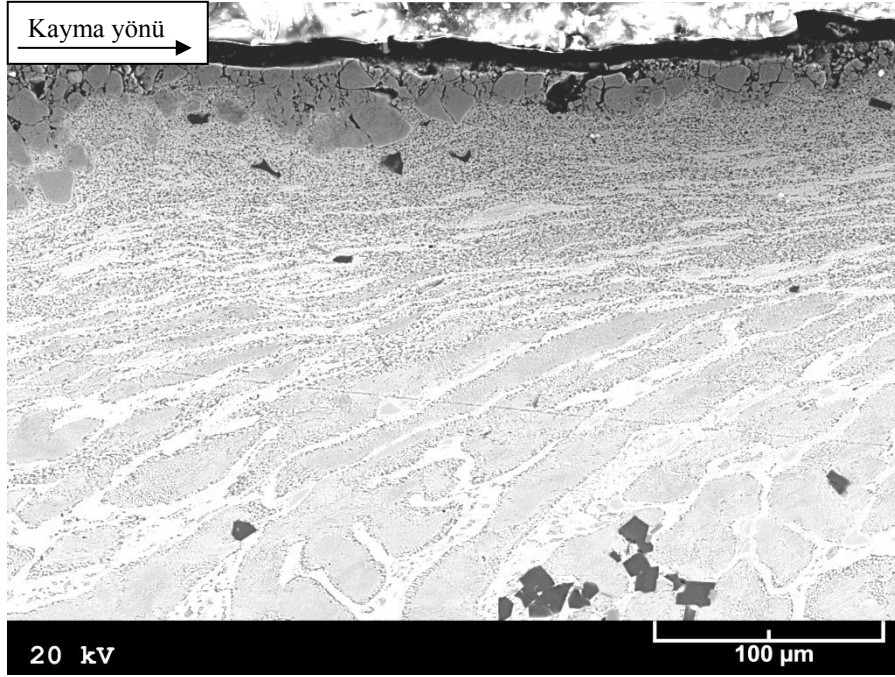
Şekil 183. Yağsız durumda 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



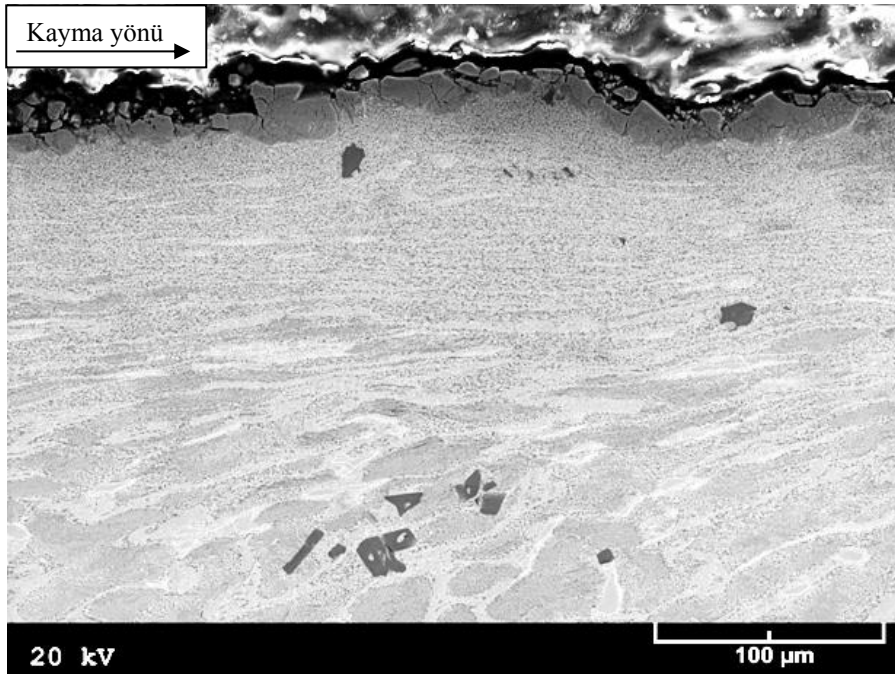
Şekil 184. Yağsız durumda 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



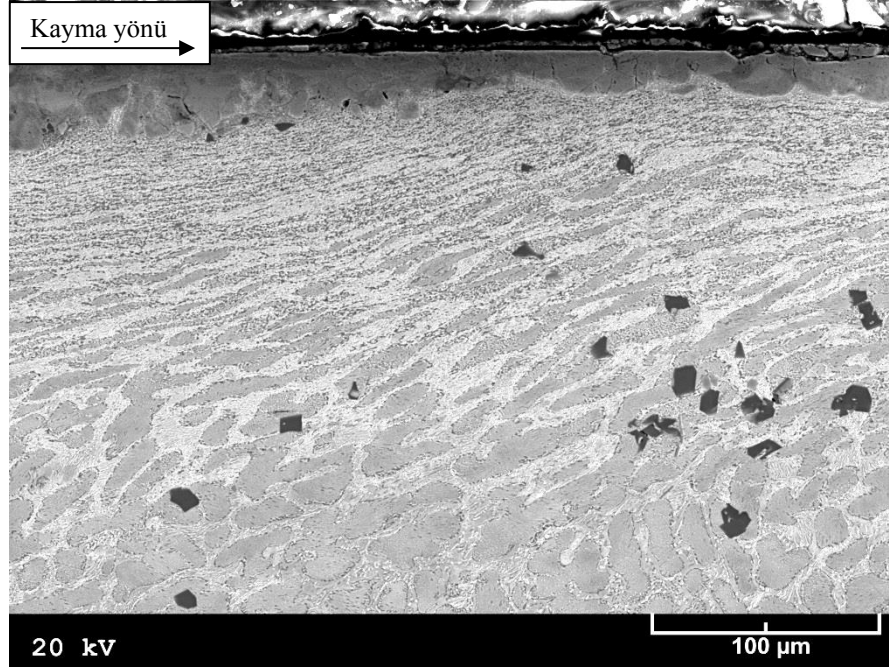
Şekil 185. Yağsız durumda 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



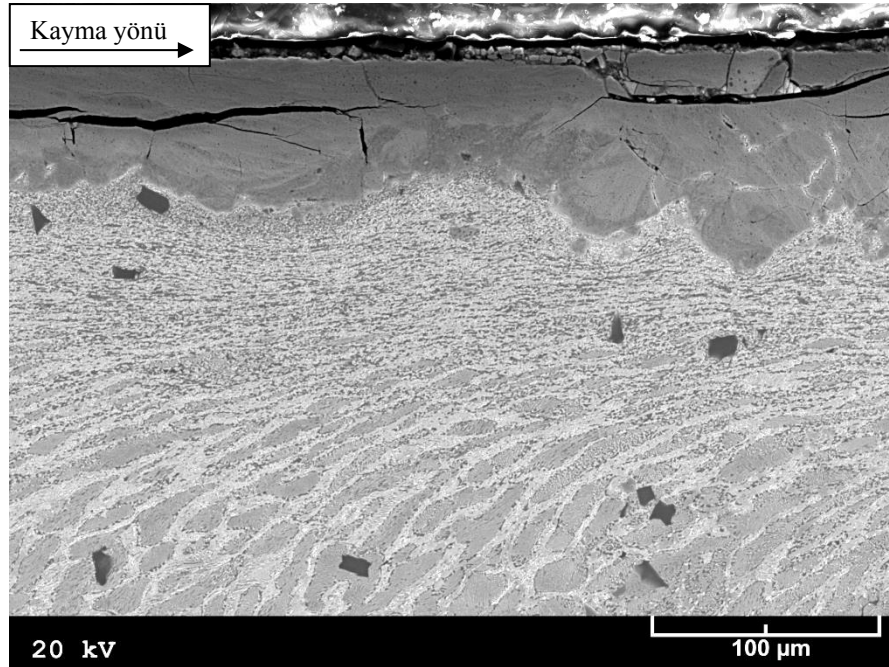
Şekil 186. Yağsız durumda 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



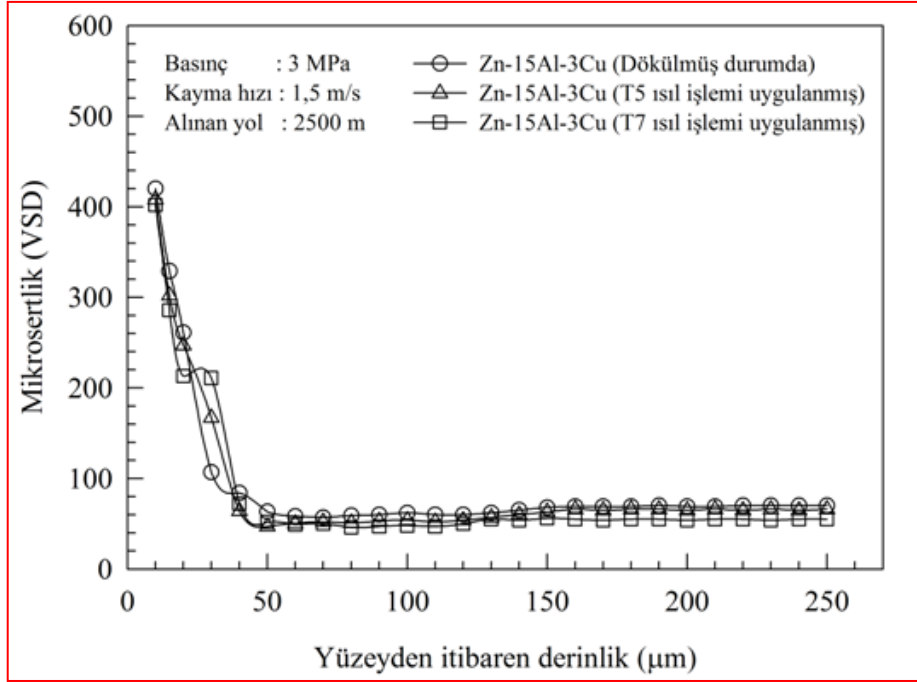
Şekil 187. Yağsız durumda 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



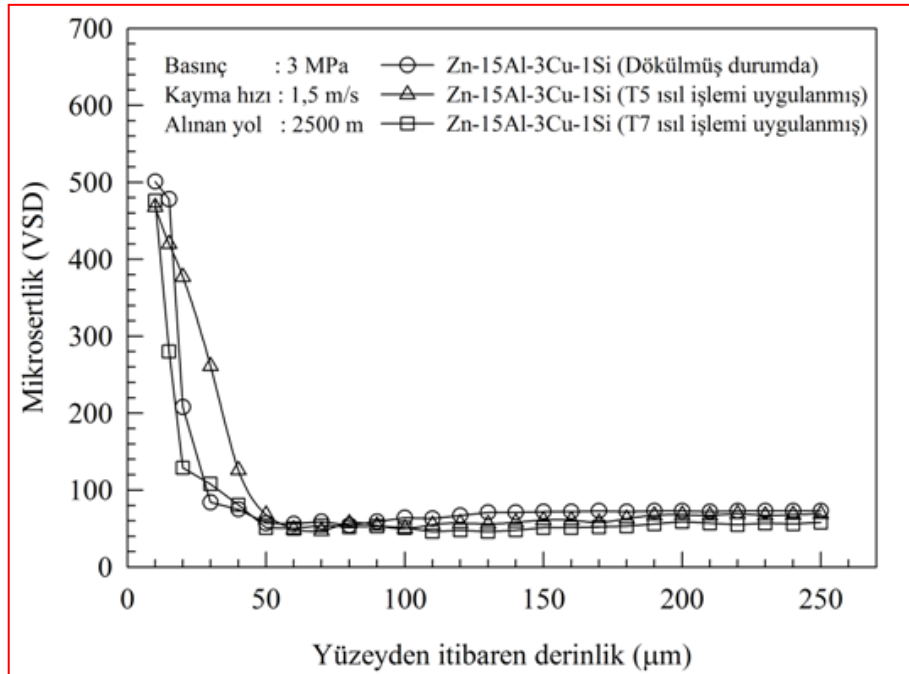
Şekil 188. Yağsız durumda 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



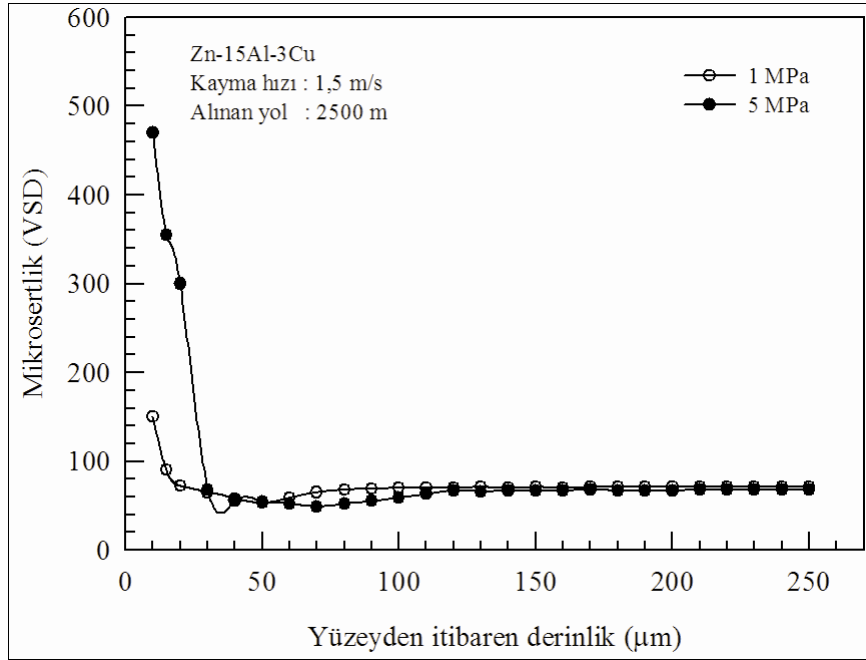
Şekil 189. Yağsız durumda 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



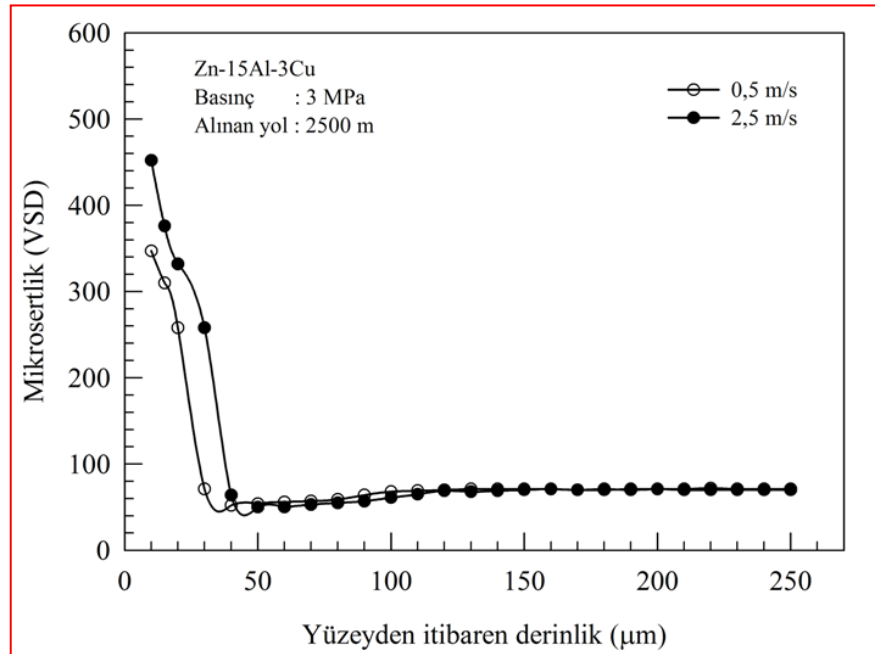
Şekil 190. Zn-15Al-3Cu alaşımının yağsız aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış durumlardaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler



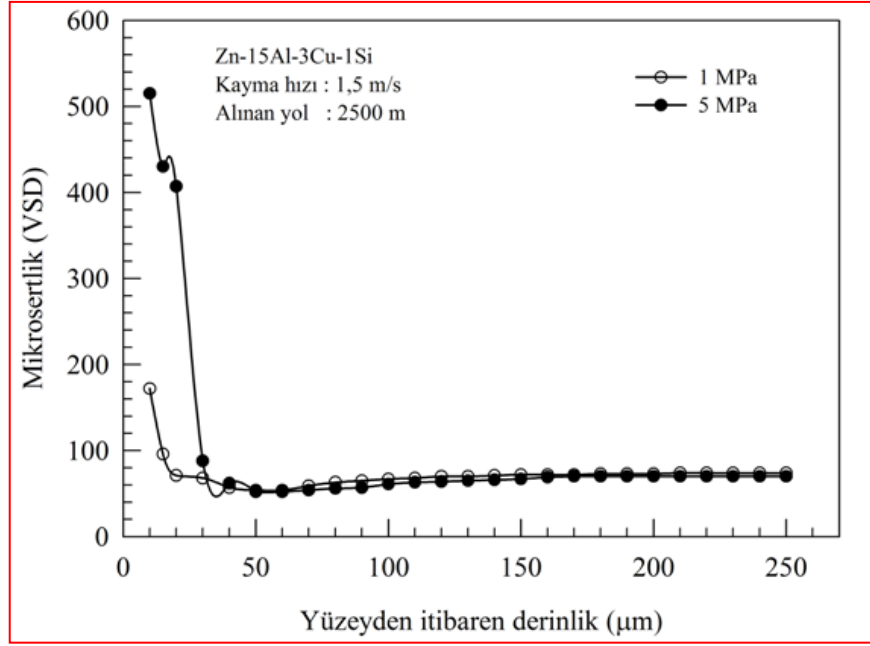
Şekil 191. Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının yağsız aşınma deneyine tabi tutulan dökülmüş ve ısıtılmış durumlardaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler



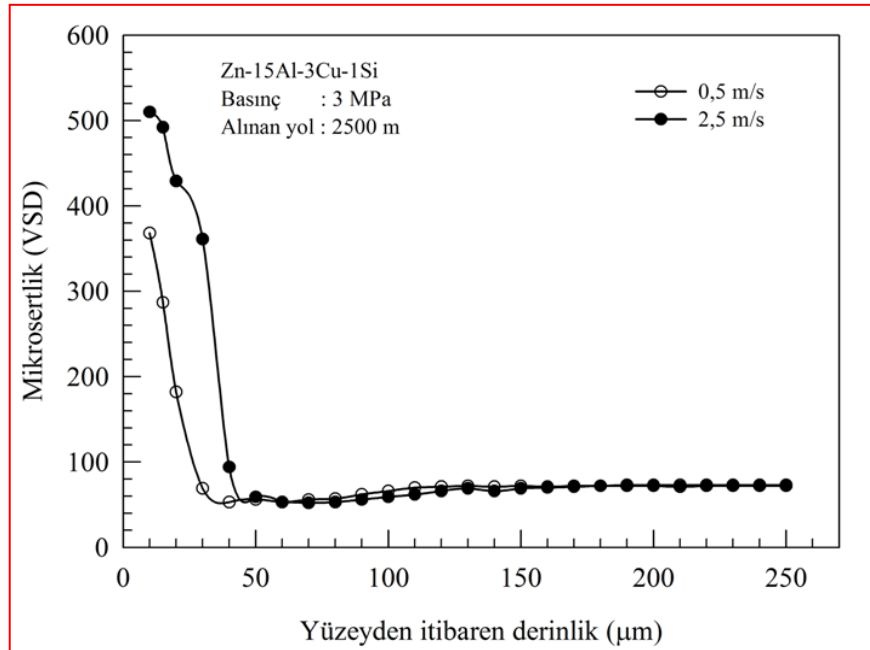
Şekil 192. İki farklı basınçta (1MPa ve 5MPa) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumundaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 193. İki farklı hızda (0,5 m/s ve 2,5 m/s) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumundaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler



Şekil 194. İki farklı basınçta (1MPa ve 5MPa) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımın dökülmüş durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler



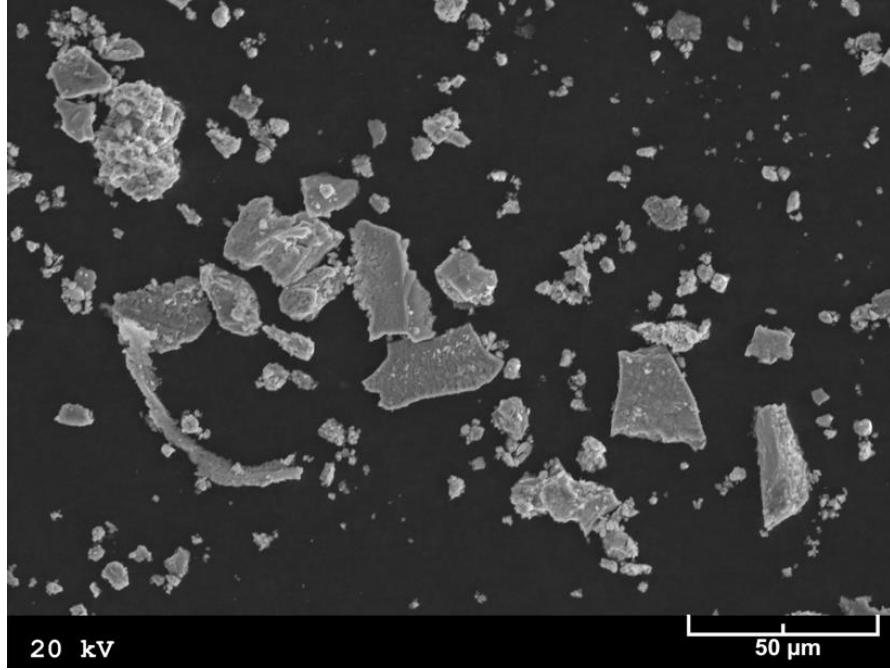
Şekil 195. İki farklı hızda (0,5 m/s ve 2,5 m/s) yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımın dökülmüş durumdaki numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler

### 3.8. Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulgular

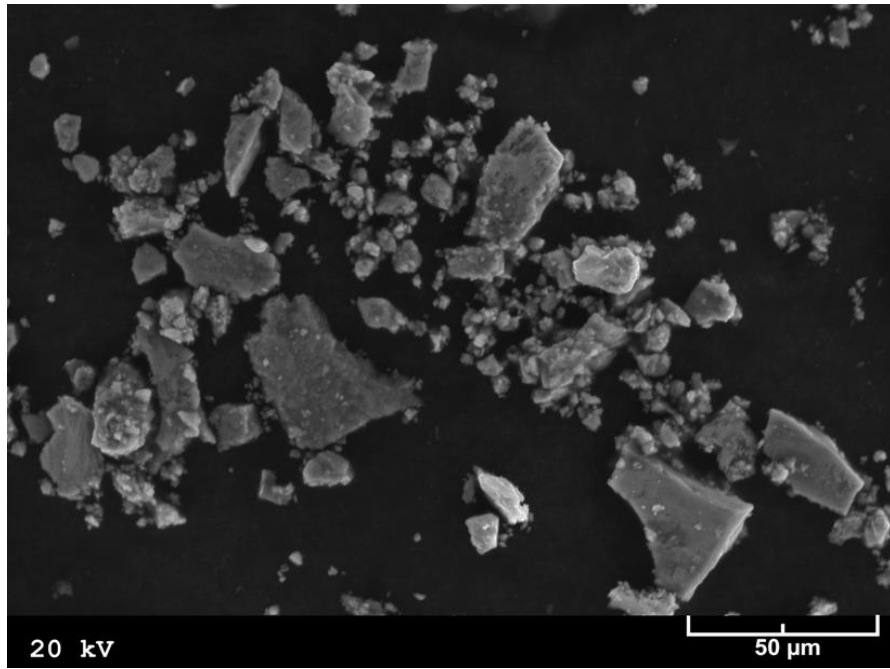
Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımları ile SAE 660 bronzuna ait numunelerden yağsız durumda yapılan aşınma deneyleri sonunda elde edilen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri Şekil 196-200'de verilmiştir. Bu görüntüler çinko esaslı alaşımlara ait aşınma parçacıklarının farklı şekil ve boyutlara sahip olduklarını göstermektedir. Uygulanan ısıl işlemlerin bu parçacıkların morfolojisi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadıkları görüldü ve bu nedenle burada yalnız T7 ısıl işlemi görmüş numunelerden alınan aşınma parçacıklarının SEM görüntülerine yer verildi. SAE 660 bronzuna ait aşınma parçacıklarının ise yassı ve nispeten ince görünümüne sahip oldukları görülmektedir. Al-12Si alaşımından aşınma sonucu ayrılan malzemenin tamamen disk yüzeyine yapışması nedeniyle bu alaşıma ait numunelerden aşınma parçacıkları almak mümkün olamamıştır.

İncelenen üçlü ve dörtlü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncine sahip olan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait numunelerden yağsız durumda farklı basınç ve kayma hızlarında yapılan aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri Şekil 201-208'de verilmiştir. Bu görüntülerde yer alan aşınma parçacıklarının şekil ve büyüklükleri arasında bazı farklılıklar olduğu gözlenmektedir. Ancak, basınç ve kayma hızının söz konusu parçacıklarının şekil ve boyutu üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduklarını söylemek mümkün değildir.

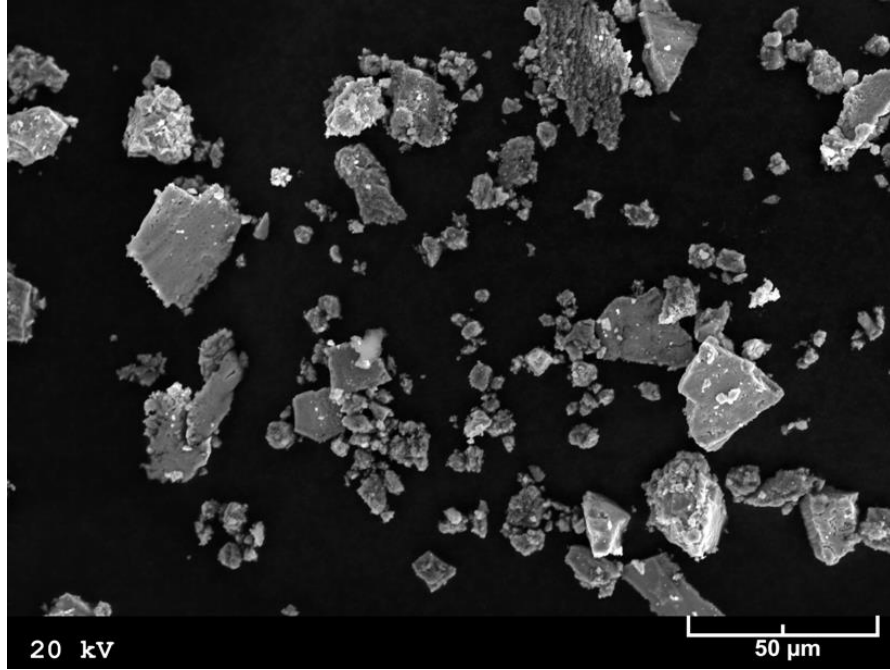




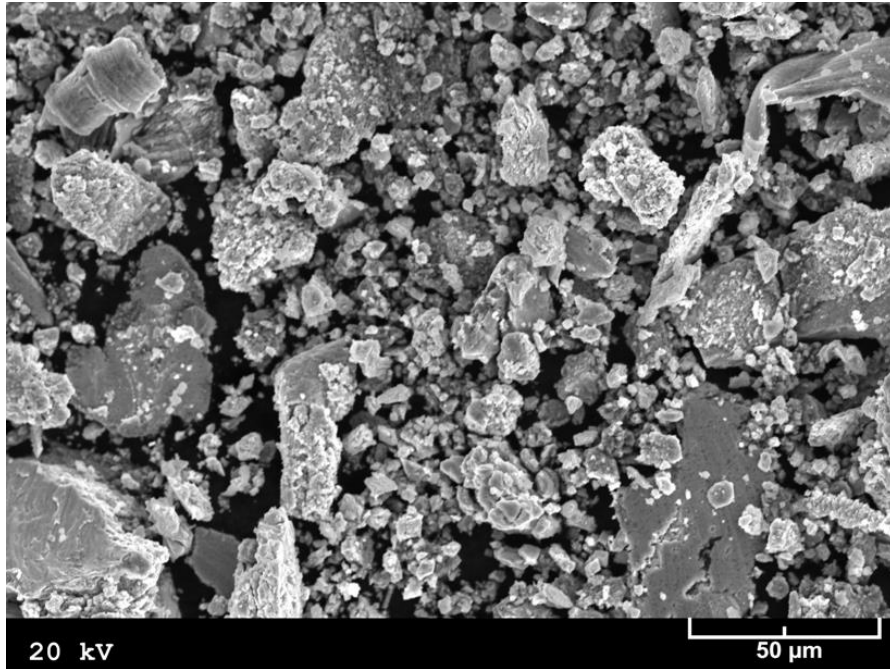
Şekil 196. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



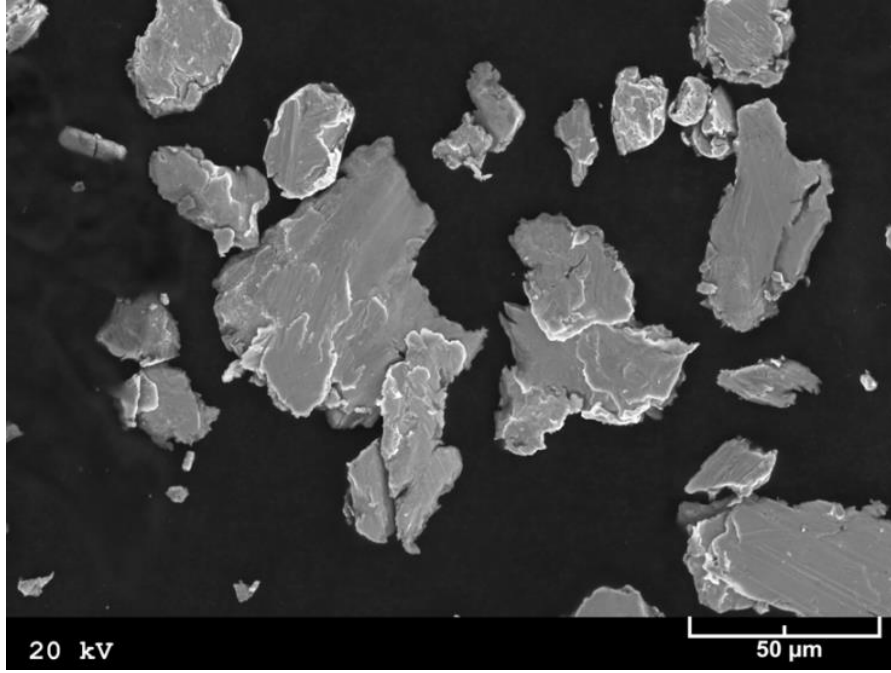
Şekil 197. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



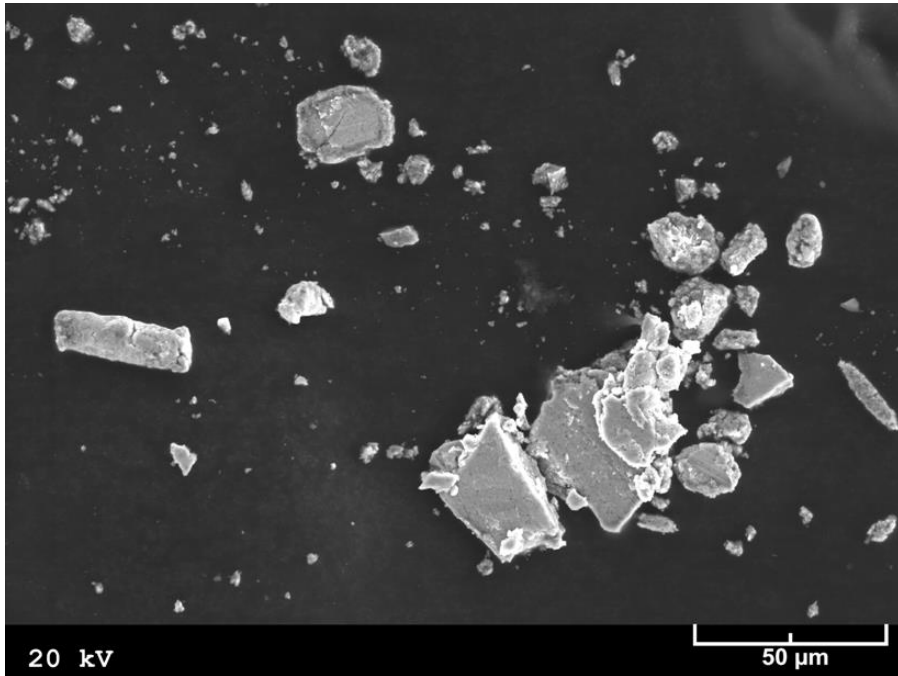
Şekil 198. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



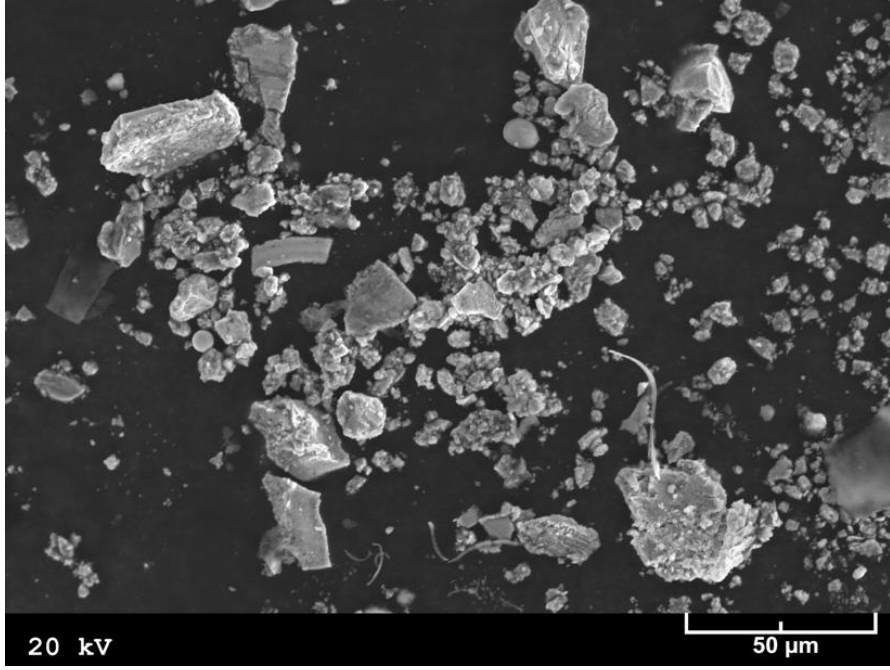
Şekil 199. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının T7 ısıl işlemi görmüş numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



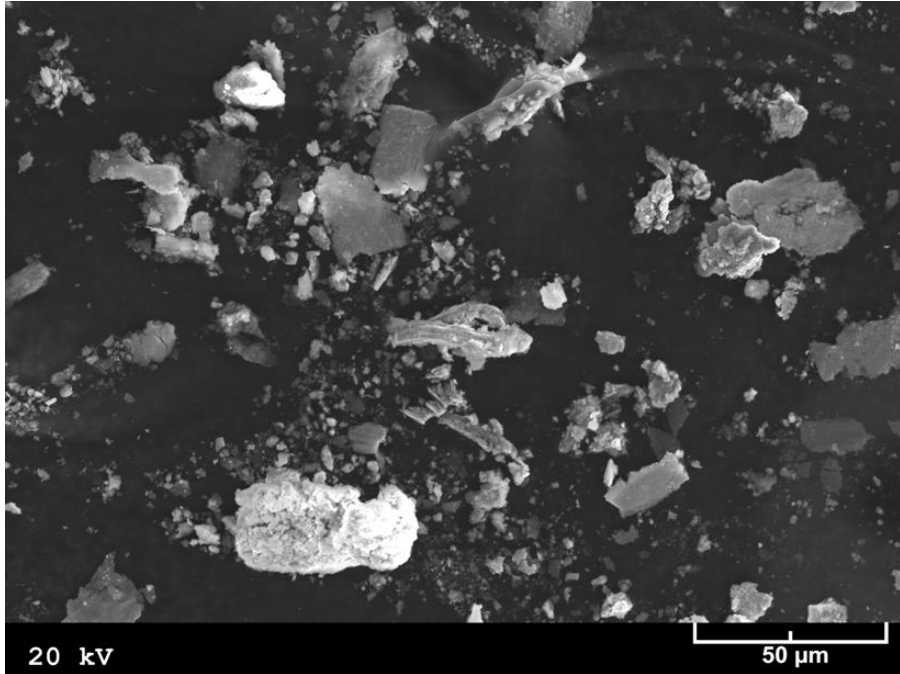
Şekil 200. 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun numunesine aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



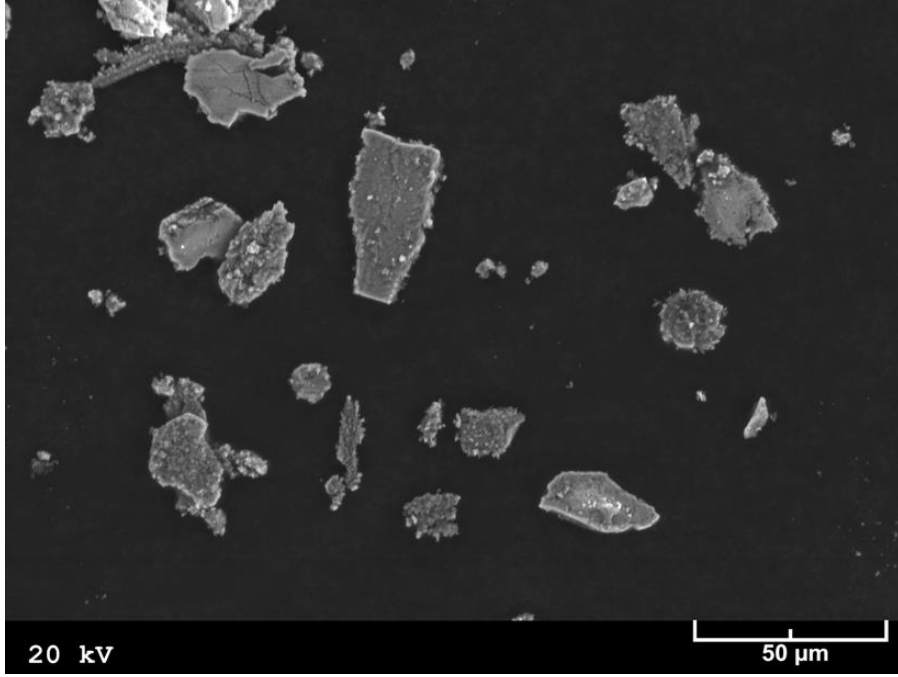
Şekil 201. 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



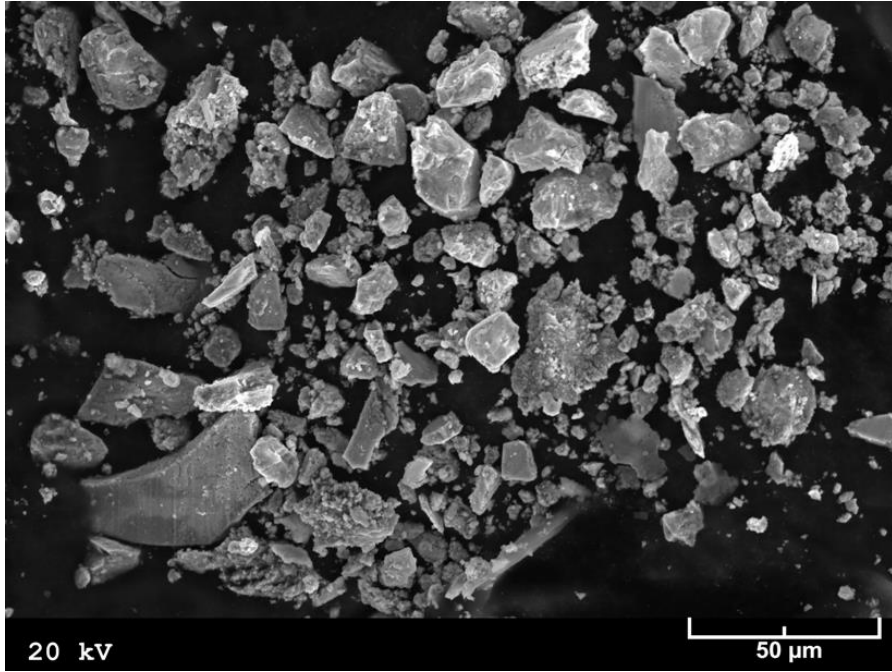
Şekil 202. 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



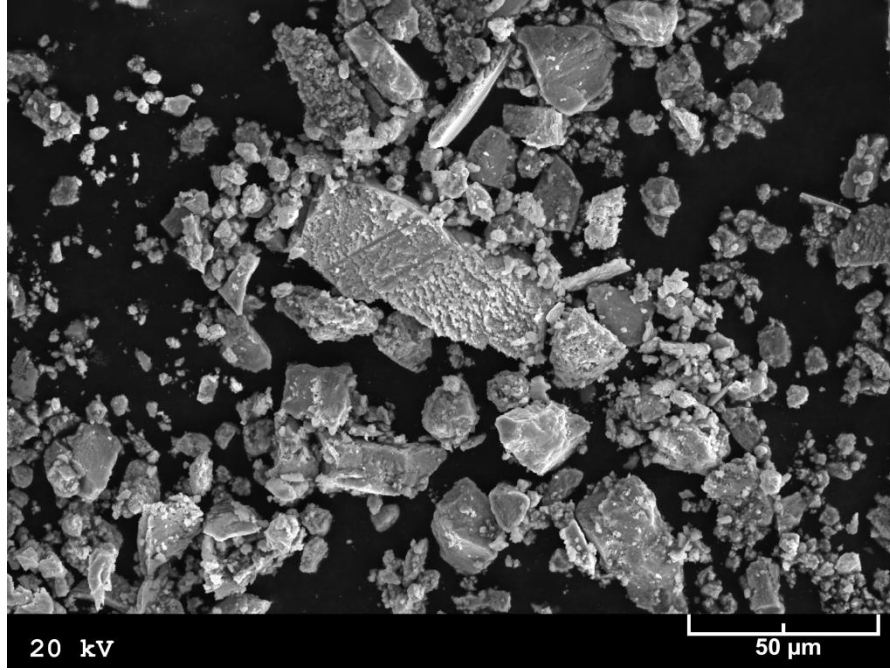
Şekil 203. 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



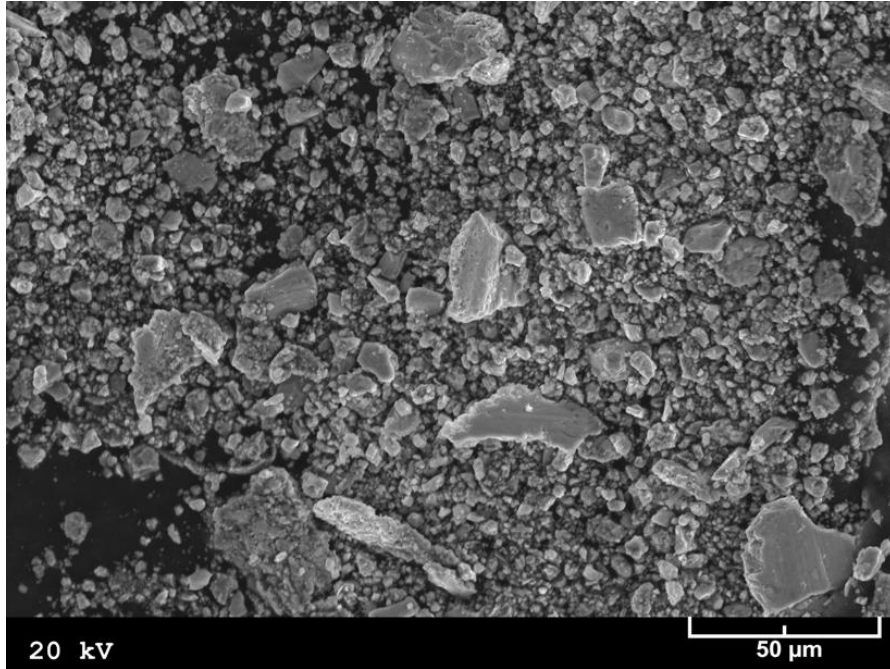
Şekil 204. 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



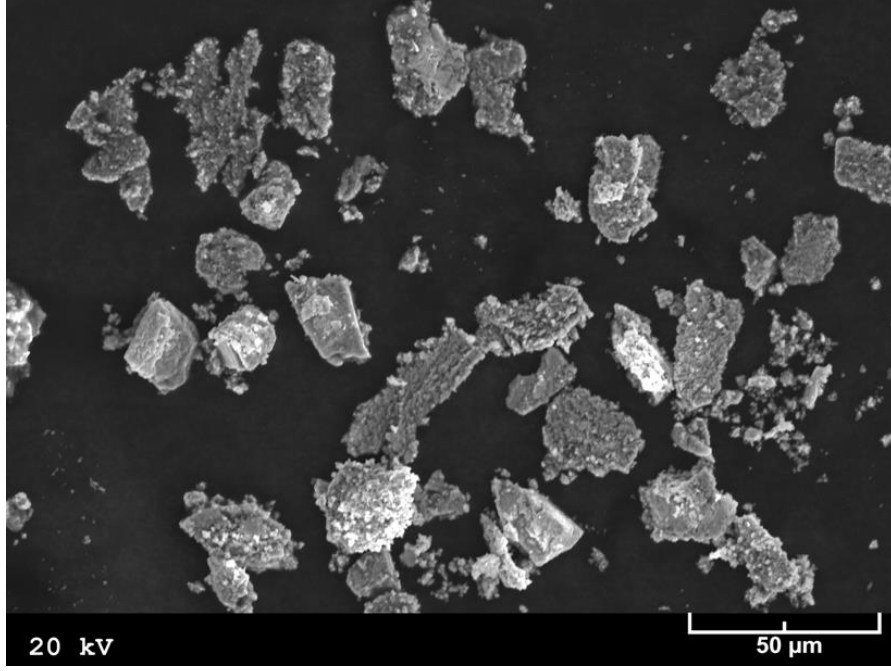
Şekil 205. 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 206. 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 207. 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 208. 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında yağsız aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımının dökülmüş durumdaki numunesine ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

## 4. İRDELEME

### 4.1. Metalografik İncelemelerinden Elde Edilen Bulguların İrdelemesi

Dökülmüş durumdaki ikili Zn-15Al alaşımının içyapısının  $\beta$  dendritleri ile bunları çevreleyen  $\beta + \eta$  ötektik karışımdan oluştuğu görüldü, Şekil 9. Yapılan metalografik incelemeler bu yapının bazı bölgelerinde  $\beta$  fazının dönüşüm ürünleri olan  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarının yer aldığını gösterdi. Bakır içeren üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımların içyapılarının ikili alaşımın içyapısına benzediği, ancak %3 ve daha yüksek oranlarda bakır içeren alaşımların dendritler arası bölgelerinde  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazının yer aldığı görüldü, Şekil 10-13. Bakır oranı arttıkça  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazının yapı içerisindeki hacimsel oranının arttığı gözlemlendi. Bu gözlemler bakırın bu alaşımlardaki çözünme durumuna göre açıklanabilir. Yapılan EDS analizleri bakırın bu alaşımların matrisini oluşturan  $\beta$  fazı içerisinde en yüksek çözünme oranının %3 dolayında olduğunu göstermiştir. Bu duruma göre %3 ve daha yüksek oranlarda bakır içeren alaşımlarda gözlenen  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazının  $\beta$  fazı içerisinde çözünemeyen fazlalık bakırın çinko ile reaksiyonu girmesi sonucunda oluştuğu söylenebilir [29,30,76].

Silisyum içeren dördü alaşımların içyapılarında ise  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\eta$  ve  $\epsilon$  fazlarının yanı sıra silisyum parçacıklarının da bulunduğu görüldü, Şekil 21-23. Ancak, bu parçacıklarının yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilemedikleri ve %1'den daha yüksek oranda Si içeren alaşımlarda ise hem dendrit hem de dendritler arası bölgelerde kümelenedikleri gözlemlendi. Yapılan metalografik incelemeler ve EDS analizleri söz konusu parçacıkların birincil (primer) silisyum parçacıkları olduklarını göstermiştir. Bu parçacıkların yapı içerisinde kümeleşmeleri yoğunluk farkına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, yoğunluğu düşük olan bu parçacıklar sıvı metal içerisinde yüzeye doğru hareket ederlerken birbirlerine rastgele çarparak veya temas ederek bir arada toplanırlar. Sıvı içerisinde meydana gelen bu durum silisyum parçacıklarının içyapıda kümeleşmesine yol açmış olabilir [21,64].

Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına uygulanan T5 ısıl işleminin bu alaşımların metalografik yapısında belirgin bir değişime yol açmadığı, ancak  $\epsilon$  parçacıklarının parçalanarak boyutlarının azalmasına neden olduğu görüldü, Şekil 14,15 ve 24. T7 ısıl işleminin ise alaşımların dendritik yapılarını tamamen ortadan kaldırıp,  $\epsilon$  fazının parçalanarak küçülmesine yol açtığı gözlemlendi, Şekil 16,17-24. Ancak, yapılan incelemeler



T5 ve T7 ısıt işlemlerinin silisyum parçacıkları üzerinde etkili olmadıklarını göstermiştir. Bakır ve/veya silisyum içeren çinko esaslı üçlü ve dörtlü alaşımlar üzerinde daha önceden yapılan çalışmalar sonucunda da benzer sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar ısıt işlem sırasında meydana gelen faz dönüşümlerine göre açıklanmıştır [13,21,26,28,89]. Şöyle ki, T5 ısıt işlemi kritik dönüşüm sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta uygulandığından bu işlem sırasında yalnız metastabil  $\epsilon$  fazı dönüşüme uğrayarak parçalanmaktadır. T7 ısıt işlemi sırasında ise aşırı doymuş  $\beta$  katı çözeltisinin  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarına ayrışması ve  $\epsilon$  fazının  $\alpha$  fazı ile reaksiyona girerek kısmen T' fazına dönüşmesi nedeniyle gözlenen yapısal değişimler meydana gelmektedir [13,21,26-28,89]. Ancak, T7 ısıt işleminin yaşlandırma aşaması uzatıldığında  $\epsilon$  fazının T' fazına dönüşümü daha belirgin hale gelmekte ve yaklaşık 100 saatlik bir süre sonunda bu dönüşüm tamamlanmaktadır, Şekil 19 ve 20.

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

İkili Zn-(5-25)Al alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı ve basma dayanımı değerlerinin artan alüminyum oranı ile arttığı, kopma uzaması değerlerinin ise alüminyum oranının %10'u aşması durumunda azaldığı görüldü, Şekil 28. Sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerinde meydana gelen bu değişimler  $\beta$  dendritlerinin oluşumuna ve oranına göre açıklanabilir. Şöyle ki, alüminyum oranının belirli bir değerin (%5) üzerine çıkması durumunda bu alaşımlarda ötektik karışımın ( $\beta + \eta$ ) yanı sıra  $\beta$  dendritleri oluşmaya başlamakta ve alüminyum oranı arttıkça bu fazın boyut ve hacimsel oranı artmaktadır [90]. Alüminyum oranının %10 değerinin üzerine çıkması durumunda ise  $\beta$  dendritleri etrafında ötektoid  $\alpha + \eta$  fazları oluşmaktadır. Yapılan mikrosertlik ölçümleri içyapıda bulunan en sert fazın  $\alpha$ , en yumuşak fazın ise  $\eta$  olduğunu göstermiştir. Alüminyum oranı arttıkça yapı içerisindeki sert faz ( $\alpha$  ve  $\beta$ ) oranı artmaktadır. Bu nedenle ikili alaşımların alüminyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet değerleri artmakta, süneklik değeri ise azalmaktadır.

Üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sertlik ve basma dayanımı değerlerinin artan bakır oranıyla sürekli arttığı; kopma uzaması ve darbe dayanımı değerlerinin sürekli azaldığı; çekme dayanımının ise %3 Cu oranına kadar belirgin bir artış sergiledikten sonra az da olsa azaldığı görüldü, Şekil 29 ve 30. Bu değişimler katı çözelti sertleşmesi mekanizması ve  $\epsilon$  fazının oluşumuna dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, bakır bu alaşımların matrisini oluşturan  $\beta$  fazı içerisinde %3 oranına kadar çözünmekte ve bakır oranının bu değerin üzerine çıkması durumunda ise sert ve gevrek  $\epsilon$  fazı oluşmaktadır. Bu

duruma göre alaşımların sertlik ve basma dayanımının artan bakır oranı ile sürekli artmasının %3 Cu oranına kadar katı çözelti sertleşmesinden, bu değerden daha yüksek bakır oranlarında ise katı çözelti sertleşmesinin yanı sıra sert ve gevrek  $\epsilon$  fazının oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir. Çekme dayanımının artan bakır oranı ile artması katı çözelti sertleşmesinden, bakır oranının %3 değerinin üzerine çıkması durumunda düşmesi ise sert ve gevrek  $\epsilon$  fazının oluşmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü sert ve gevrek olan  $\epsilon$  fazı dendritler arasındaki bağın zayıflamasına ve alaşımların belirli ölçüde gevrekleşmesine yol açmaktadır [29,30,32,76]. Alaşımların kopma uzaması ve darbe direncinin artan bakır oranıyla sürekli azalması %3 Cu oranına kadar katı çözelti sertleşmesinden, bu oranının üzerinde ise katı çözelti sertleşmesinin yanı sıra yapıda oluşan  $\epsilon$  fazının alaşımları gevrekleştirmesinden kaynaklanmaktadır [29,30,32,76].

Dörtlü Zn-15Al-3Cu-(0-3)Si alaşımlarında silisyum oranı arttıkça sertlik ve basma dayanımı değerlerinin sürekli arttığı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerlerinin sürekli azaldığı, çekme dayanımı değerlerinin ise %1 Si oranına kadar belirgin bir artış sergiledikten sonra azaldığı görüldü, Şekil 31 ve 32. Bu alaşımların sertlik ve basma dayanımı değerlerinde meydana gelen artışlar sert ve gevrek davranış sergileyen silisyum parçacıklarının hacimsel oranının artan silisyum oranı ile artmasından, kopma uzaması değerlerinde meydana gelen azalma ise silisyum parçacıklarının alaşımları gevrekleştirmesinden kaynaklanmaktadır. Silisyum içeren çinko ve alüminyum esaslı alaşımlar üzerinde daha önceden yapılan çalışmalarda da benzer bulgulara rastlanmıştır [21,32,36,64]. Çekme dayanımı değerlerinin artan silisyum oranı ile artması ve silisyum oranının %1'in üzerine çıkması durumunda azalması söz konusu alaşımların içyapılarında bulunan silisyum parçacıklarının büyüklüğüne ve dağılım biçimine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, %1 Si oranına kadar yapı içerisinde nispeten homojen bir dağılım sergileyen silisyum parçacıkları bu değerden daha yüksek oranlarda silisyum içeren alaşımlarda hem irileşmekte hem de farklı konumlarda kümelenmektedir. Bu gözleme dayanarak alaşımların çekme dayanımının %1 Si oranına kadar artan silisyum oranı ile artmasının dispersiyon sertleşmesinden, silisyum oranının bu değeri aşması durumunda azalmasının ise hem dispersiyon sertleşmesi etkisinin azalmasından hem de iri silisyum parçacıklarının alaşımları gevrekleştirmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Söz konusu alaşımların kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinin artan silisyum oranı ile sürekli azalması ise içyapıdaki sert ve gevrek silisyum parçacıklarının çentik etkisi yapmaları ve dendritler arası bölgeleri zayıflatmalarından kaynaklanmaktadır [21,32,36,64,71].

Üçlü ve dördü alaşımlar içerisinde en yüksek çekme dayanımı ve aşınma direnci sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının sertlik, darbe direnci, çekme dayanımı, basma dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin uygulanan T5 ve T7 ısıt işlemleri sonunda azaldıkları görüldü, Tablo 9. T5 ısıt işleminde söz konusu alaşımların mekanik özelliklerinde gözlenen değişimler döküm sırasındaki denge dışı soğumadan kaynaklanan artık gerilmelerin bu işlem sırasında azalmasından ve  $\epsilon$  fazının kısmen parçalanmasından kaynaklanmış olabilir. T7 ısıt işleminde alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin azalması ise aşırı yaşlanmadan kaynaklanmaktadır [28,79]. Söz konusu alaşımların kopma uzaması değerlerinin T5 ısıt işleminden sonra azalması  $\epsilon$  fazının parçalanarak keskin köşeli ince parçacıklar oluşturmasından, T7 ısıt işleminden sonra azalması ise bu fazın  $\alpha$  fazı ile tepkimeye girerek kendisinden daha sert ve gevrek olan T' fazını oluşturmasından kaynaklanmış olabilir [91].

### 4.3. Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Bulguların İrdelemesi

Yağsız durumda sabit basınç (3 MPa) ve sabit kayma hızında ( $1,5 \text{ ms}^{-1}$ ) aşınma deneyine tabi tutulan üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu ve dördü Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin gittikçe azalan bir artış hızı ile arttığı gözlemlendi, Şekil 37-40. Alaşımların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin artış hızının gittikçe azalması sürtünen yüzeylerin birbirlerine alışmasından kaynaklanmış olabilir. Ayrıca, Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan bakır oranıyla azalır, %3 Cu oranında minimum seviyelerine düştükleri, bakır oranının bu değerin üzerine çıkması durumunda ise artışa geçtikleri görüldü, Şekil 41. Bu gözlemler alaşımların içyapılarına ve çekme dayanımlarına göre açıklanabilir. Daha önceden belirtildiği gibi; söz konusu alaşımların sertlik ve basma dayanımı artan bakır oranı ile sürekli artarken, kopma uzaması ve darbe direnci değerleri sürekli azalmakta, çekme dayanımı %3 Cu oranına kadar artmakta, bakır oranının bu değerin üzerine çıkması durumunda ise azalmaktadır. Ayrıca, bakır oranının %3 değerini aşması durumunda alaşımların içyapılarında sert ve gevrek  $\epsilon$  fazı oluşmakta ve bakır oranı arttıkça bu fazın yapı içerisindeki oranı artmaktadır. Bu bulgulara dayanarak alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan bakır oranıyla azalarak %3 Cu oranında minimum seviyelerine düşmeleri bunların çekme dayanımının artmasından, bakır oranının bu değeri aşması durumunda artmaları ise alaşımlarında sert ve gevrek  $\epsilon$  fazının

oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu bulgular çekme dayanımının söz konusu alaşımların aşınma davranışı üzerinde sertlik, basma dayanımı, kopma uzaması ve darbe direnci değerlerinden çok daha etkili olduğunu göstermektedir. Daha önceden bu konuda yapılan çalışmalarda da benzer bulgular elde edilmiştir [29,30,76].

Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının yağsız durumdaki sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin artan silisyum oranı ile düşük bir hızda da olsa sürekli olarak arttığı; hacim kaybı değerinin %1 Si oranına kadar azaldığı, Si oranının bu değer üzerine çıkması durumunda ise artışa geçtiği görüldü, Şekil 42. Sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinde gözlenen bu artışlar silisyum oranı arttıkça söz konusu alaşımların içyapılarında bulunan sert ve gevrek silisyum parçacıklarının artmasından kaynaklanmış olabilir. Hacim kaybının %1 Si oranına kadar azalıp, bu değerden sonra artması ise bu alaşımların çekme dayanımında meydana gelen değişimden kaynaklandığı söylenebilir. Çünkü bu çalışmada yapılan çekme deneylerinden elde edilen bulgular söz konusu alaşımların çekme dayanımlarının artan silisyum oranı artıp %1 Si oranında en yüksek değerine ulaştığını, silisyum oranının bu değer üzerine çıkması durumunda ise azaldığını göstermiştir.

Üçlü ve dördü alaşımlar içersinde dökülmüş durumda en yüksek aşınma direncini sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin uygulanan T5 ve T7 ısı işlemlerinden sonra arttığı, başka bir deyişle söz konusu ısı işlemlerin alaşımların aşınma dirençlerini azalttığı görüldü, Şekil 43-46. Sürtünme katsayısı ve sıcaklıkta gözlenen bu artışlar yapısal değişimler nedeniyle abrasiv etkinin artmasından kaynaklanmış olabilir. Şöyle ki, uygulanan ısı işlemler sonunda her iki alaşımın içyapılarında bulunan sert ve gevrek  $\epsilon$  fazının parçalanarak küçük parçacıklara dönüştüğü gözlemlendi, Şekil 15 ve 17. Bu duruma göre deney sırasında numunelerin yüzeyinden kopan sert ve gevrek  $\epsilon$  parçacıkları abrasiv etki yaparak sürtünme katsayısı ve sıcaklığın artmasına yol açtığı söylenebilir. Alaşımların hacim kaybı değerlerinde meydana gelen artış ise, yukarıda belirtilen abrasiv etkinin yanı sıra söz konusu alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin uygulanan ısı işlemler sonrasında azalması nedeniyle adhesiv aşınmanın daha etkin hale gelmesinden kaynaklanmış olabilir [13,28,88].

Diğer taraftan dördü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımından hem dökülmüş hem de ısı işlem görmüş durumda elde edilen hacim kaybı değerlerinin, aynı koşullarda üçlü Zn-15Al-3Cu alaşımından elde edilen değerlerden daha düşük olduğu; bir başka deyişle dördü alaşımın

üçlü alaşıma göre daha yüksek aşınma direnci sergilediği görüldü, Şekil 47. Bu durum dördlü alaşımının içyapısında sert silisyum parçacıklarının bulunmasının yanı sıra, bu alaşımın sertlik ve mukavemet değerlerinin üçlü alaşımın söz konusu değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir.

Yağsız durumda 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan SAE 660 bronzunun sürtünme katsayısının ilk 500 m'lik yola karşı gelen başlangıç aşamasında hızlı bir artış gösterdikten sonra hemen hemen sabit kaldığı, sıcaklığının ise sürekli arttığı görüldü, Şekil 94 ve 95. Sürtünme katsayısının hızlı bir artıştan sonra hemen hemen sabit bir değere ulaşması başlangıçta etkin olan pürüz temasının çalışma sırasında yüzeylerde meydana gelen aşınma nedeniyle azalmasından ve aşınan malzemenin disk ve numune yüzeylerine yapışmamasından kaynaklanmış olabilir. Sıcaklığın sürekli artması ise söz konusu bronza ait numunede depolanan sürtünme ısısının sürekli artmasından kaynaklanmış olabilir.

Yukarıda belirtilen koşullarda deneye tabi tutulan Al-12Si alaşımının sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinde başlangıçta hızlı bir artış sergilediği, ancak bu alaşıma ait numunenin 100 m'lik yol sonunda aşırı aşınma nedeniyle hasara uğradığı görüldü, Şekil 94 ve 95. Bu durumun söz konusu alaşımın matrisini oluşturan alüminyum fazının deney sırasında disk yüzeyine sıvanarak hem sürtünme kuvvetini hem de hacim kaybını büyük ölçüde artırmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Çinko esaslı üçlü ve dördlü alaşımların yağsız durumda SAE 660 bronz ve Al-12Si alaşımına göre çok daha düşük hacim kaybı veya yüksek aşınma direnci sergiledikleri görüldü, Şekil 47 ve 92, Tablo 10. Bu durum çinko esaslı alaşımların içyapılarına, sertlik ve mukavemet değerleri ile yüzeylerinde oluşan oksit filmlerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, çinko esaslı alaşımların içyapısında bulunan alüminyum ve bakırca zengin fazlar ile silisyum parçacıkları yük taşıma görevi yaparken, nispeten yumuşak olan  $\eta$  fazı ile aşınma sırasında oluşan çinko oksit tabakası kaymayı kolaylaştırmaktadır [1,7-9,19,86-88]. Ayrıca, bu alaşımların yumuşak olan matrisinin aşınma parçacıklarını yutma veya içine alma özelliğine sahip olduğu bilinmektedir [86]. Öte yandan çinko esaslı alaşımların sertlik ve mukavemet değerlerinin, karşılaştırma amaçlı kullanılan SAE 660 bronz ve Al-12Si alaşımının söz konusu değerlerinden daha yüksek olduğu yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Bu açıklamalara dayanarak çinko esaslı üçlü ve dördlü alaşımların SAE 660 bronz ve Al-12Si alaşımına göre daha yüksek aşınma direnci sergilemeleri içyapılarının tribolojik uygulamalar için uygun olması ve yüzeylerinde yük

taşıma kapasitesini artırıcı alüminyum oksit (alümina) ve kaymayı kolaylaştırıcı çinko oksit filmlerinin oluşmasının yanı sıra daha yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olmalarından kaynaklandığı söylenebilir.

Çinko esaslı alaşımlar içerisinde ise en düşük hacim kaybı veya en yüksek aşınma direnci dördü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımından elde edildi. Bu durum bu alaşımın silisyum parçacıkları içermesinin yanı sıra sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin üçlü alaşımın söz konusu değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. Sertlik ve mukavemet arttıkça alaşımların aşınma dirençlerinin arttığı bilinmektedir [13,22,29,30,32,34,36,76]. Diğer taraftan dördü alaşım içerisinde bulunan silisyum parçacıkları yük taşıma görevi yaparak bu alaşımın aşınma direncini artırıcı rol oynamaktadır.

Üçlü Zn-15Al-3Cu ve dördü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının yağsız çalışma durumundaki sürtünme katsayılarının artan basınç ile azaldığı, hacim kaybı ve sıcaklık değerlerinin ise arttığı görüldü, Şekil 48,49,52,53,56 ve 57. Ayrıca, bu alaşımların sürtünme katsayılarının kayma hızından fazla etkilenmediği, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise artan kayma hızı ile arttığı gözlemlendi, Şekil 50,51,54,55,58 ve 59. Bu alaşımların sürtünme katsayılarının artan basınç ile azalması aşınma numunelerinin temas yüzeylerinde oluşan oksit tabakalarına dayandırılarak açıklanabilir. Basınç arttıkça çinko esaslı alaşımların yüzeylerinde oksit tabakalarının oluşum hızının arttığı bilinmektedir [92,93]. Bu durum yüzeyde oluşan oksit filmi miktar veya alanının artan basınçla artması anlamına gelmektedir. Sürtünme katsayılarının artan basınçla azalması numunelerin yüzeylerinde oluşan çinko oksit tabakasının kaymayı kolaylaştırmasından kaynaklanmış olabilir [88,89,92,94,95]. Söz konusu alaşımların sürtünme katsayısı değerlerinin kayma hızından pek fazla etkilenmemesi ise numunelerin yüzeylerinde oluşan oksit filminin kaymayı kolaylaştırması nedeniyle sürtünme kuvvetinin fazla değişmemesine bağlanabilir. Alaşımların sıcaklıklarının artan basınç ve hız ile artması ise çalışma sırasında açığa çıkan sürtünme ısısının numunelerde sürekli birikmesinden kaynaklanmış olabilir.

Söz konusu alaşımların sürtünme katsayılarının artan basınç ile sürekli azalırken, hacim kaybı değerlerinin sürekli olarak artması sürtünme ve aşınma nedeniyle yüzeyde meydana gelen yapısal değişimlere dayandırılarak açıklanabilir. Yağsız durumundaki çalışma sırasında çinko esaslı alaşımlara ait numunelerin yüzeylerinde sert ve gevrek bir tabaka oluştuğu ve bu tabakanın sertlik ve kalınlığının artan basınç ile arttığı gözlemlenmiştir, Şekil 192 ve 194. Bu tabakanın sertliğinin artan basınç ile artması sürtünme katsayısının

azalmasına, gevrek olması ise kırılma nedeniyle yüzeyden kopan parçaların artmasına ve dolayısıyla hacim kaybının yükselmesine yol açmaktadır [92]. Diğer taraftan bu gözlem yağsız durumda temas eden hareketli yüzeylerde aşınma ile meydana gelen hacim kaybının yüzeylere etkiyen normal yük veya basınç ile doğru orantılı olduğunu ifade eden adhesiv aşınma kanunu ile uyum içerisinde [96]. Bu aşınmalarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artan kayma hızı ile artması ise, yüzeylerden ayrılan aşınma parçacıklarına etkiyen merkezkaç kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Kayma hızı diskin dönme hızının artmasıyla artar. Dönme hızı arttıkça numuneden koparak disk yüzeyine geçen aşınma parçacıklarına etki eden merkezkaç kuvveti de artar. Merkezkaç kuvvetinin artması bu parçacıkların daha fazla savrulmasına yol açar. Böylece aşınma parçacıklarının numune yüzeyine sıvanmaları zorlaşır veya büyük ölçüde engellenir. Bu durum hacim kaybının sürekli artmasına neden olabilir.

SAE 660 bronzunun yağsız durumdaki sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan basınç ve kayma ile arttığı görüldü, Şekil 92 ve 93. Bu durum söz konusu bronzun içyapısına ve aşınma davranışına dayandırılarak açıklanabilir. Yapılan inceleme ve gözlemler bu bronzdaki baskın aşınma mekanizmasının abrazyon olduğunu ve bunun da çalışma sırasında numune yüzeyinden koparak ayrılan sert ve gevrek  $\delta$  fazının numune yüzeyini çizmesi ve kazımasından kaynaklandığını göstermiştir. Basınç ve kayma hızı arttıkça abrasiv etki de artmakta ve bu durum sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artmasına yol açmaktadır.

1 cm<sup>3</sup>/saat'lik yağ debisi, 6 MPa'lık basınç ve 2 m/s'lik kayma hızında 108 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar deneye tabi tutulan tüm aşınmaların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinin başlangıç aşamasında hızlı bir artış gösterdikten sonra bir miktar azalarak 20-30 km aralığında yer alan kayma yolu sonunda sabit kaldıkları görüldü, Şekil 60-63,96 ve 97. Aşınmalarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının ise hızlı bir artıştan sonra artan kayma yolu ile azalarak sabit sayılabilecek değerlere ulaştıkları görüldü, Şekil 64,65,96 ve 97. Sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin rodaj devresi olarak da adlandırılan deneylerin başlangıç aşamasında hızlı bir şekilde artması yüzeyler arasında yeterli kalınlıkta yağ filmi oluşmaması nedeniyle meydana gelen metal-metal temasından kaynaklanmaktadır [21,89,97]. Yağ filmi kalınlığı arttıkça sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri ile hacim kaybının artış hızı azalmakta, yağ filmi kalınlığının yüzeyleri birbirinden ayırmaya yeterli büyüklüğe erişmesi durumunda ise söz konusu değişkenler kararlı durumu yansıtan sabit değerlere erişmektedir.

Yağlı durumda sabit basınç (6 MPa) ve sabit kayma hızında hızında (2 m/s) aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin artan yağ debisi ile sürekli azaldığı görüldü, Şekil 74,75,80,81,86,87,98 ve 99. Söz konusu değerlerde meydana gelen azalmalar artan yağ debisi ile yağ filmi kalınlığının artması ve dolayısıyla metal-metal temasının azalmasından kaynaklanmış olabilir. Bu durumun literatürde yer alan bulgularla uyum içerisinde olduğu görülmüştür [89,97].

Sabit yağ debisi (1 cm<sup>3</sup>/saat) ve kayma hızında (2 m/s) aşınma deneyine tabi tutulan alaşımların sürtünme katsayısının artan basınç ile azaldığı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise sürekli arttığı görüldü, Şekil 76,77,82,83,88,89,100 ve 101. Bu durum belirtilen koşullardaki çalışma sırasında hidrodinamik yağlamanın gerçekleştiğini göstermektedir. Nitekim yağlı sistemlerin sürtünme katsayısının yalnız hidrodinamik yağlama devresinde artan basınçla azaldığı bilinmektedir [97]. Yağ filmi kalınlığının azalması yağ molekülleri arasındaki sürtünmenin azalmasına ve dolayısıyla sürtünme katsayısının düşmesine yol açmış olabilir. Sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin sürekli artması ise özellikle rodaj döneminde meydana gelen metal-metal temasının artan basınç ile artması nedeniyle sürtünme kuvvetinin ve sürtünme ısısının yükselmesinden kaynaklanmış olabilir.

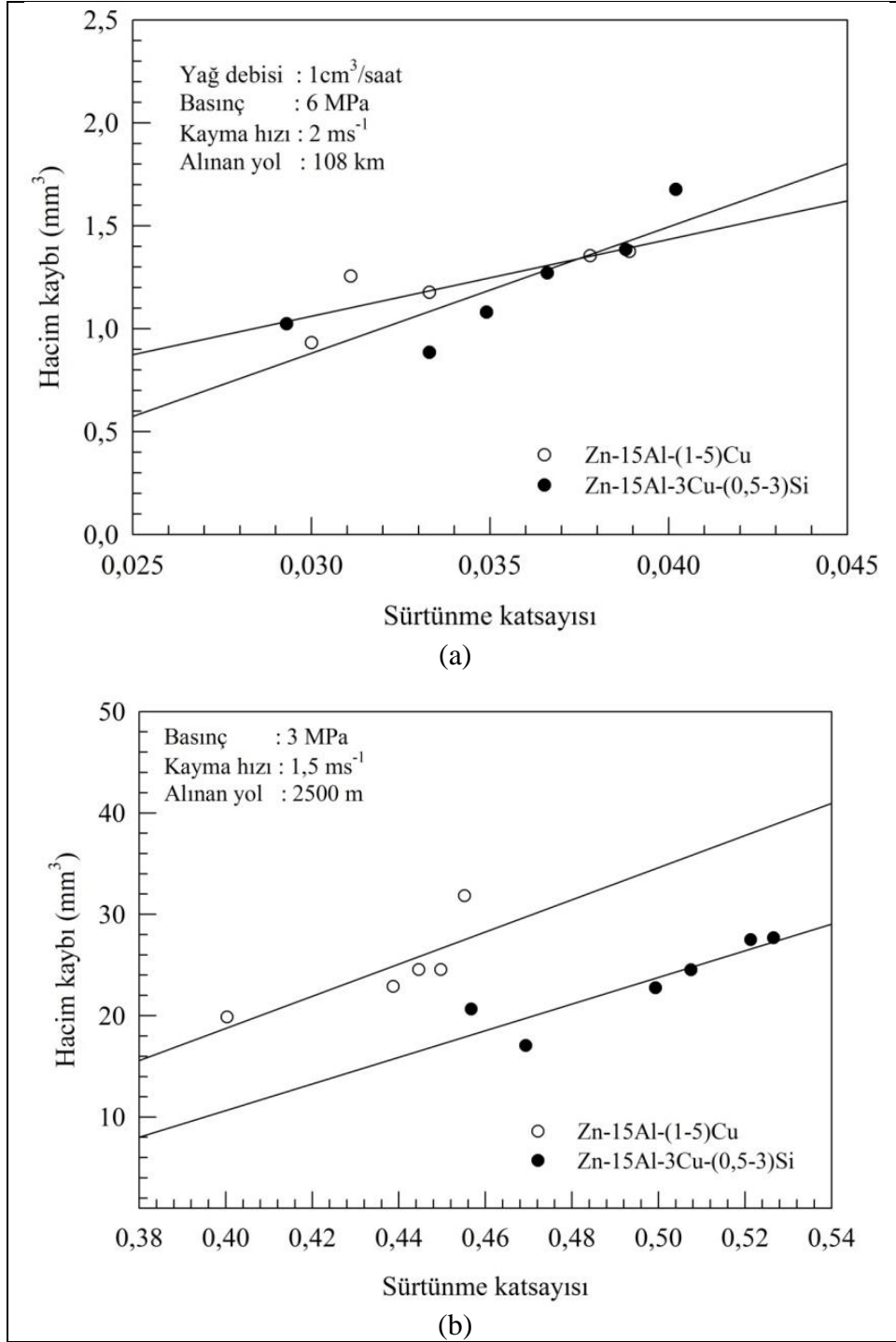
Sabit yağ debisi (1 cm<sup>3</sup>/saat) ve basınç (2 m/s) altında yapılan aşınma deneylerinde artan kayma hızı ile alaşımların sıcaklığının sürekli arttığı, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin ise fazla değişmediği gözlemlendi, Şekil 78,79,84,85,90,91,102 ve 103. Artan kayma hızıyla sıcaklığın artması yağa etki eden merkezkaç kuvveti ile yağda meydana gelen çalkalanmaya dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, kayma hızı arttıkça disk ve numune yüzeylerindeki yağa etki eden merkezkaç kuvveti artar ve yüzeyler arasındaki yağda daha fazla çalkalanma meydana gelir. Yağ etki eden merkezkaç kuvveti ve çalkalanmanın artması daha fazla yağın savrulmasıyla sistemden uzaklaşmasına ve yağ içerisinde daha fazla sürtünmenin meydana gelmesine neden olur. Hem yağ miktarının azalması hem de yağ içerisindeki sürtünmenin artması numune sıcaklığının artmasına yol açabilir. Sıcaklığın artması yağ viskozitesinin azalmasına neden olur. Yağ viskozitesinin azalması da yağın iç sürtünmesinde meydana gelen artışı dengeleyerek sürtünme katsayısının fazla değişmemesine yol açmış olabilir. Alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının kayma hızından fazla etkilenmemesi ise, aşınma hızının en yüksek olduğu rodaj döneminin süre olarak artan kayma hızıyla azalmasına rağmen, yol olarak değişmemesinden kaynaklanmış olabilir.



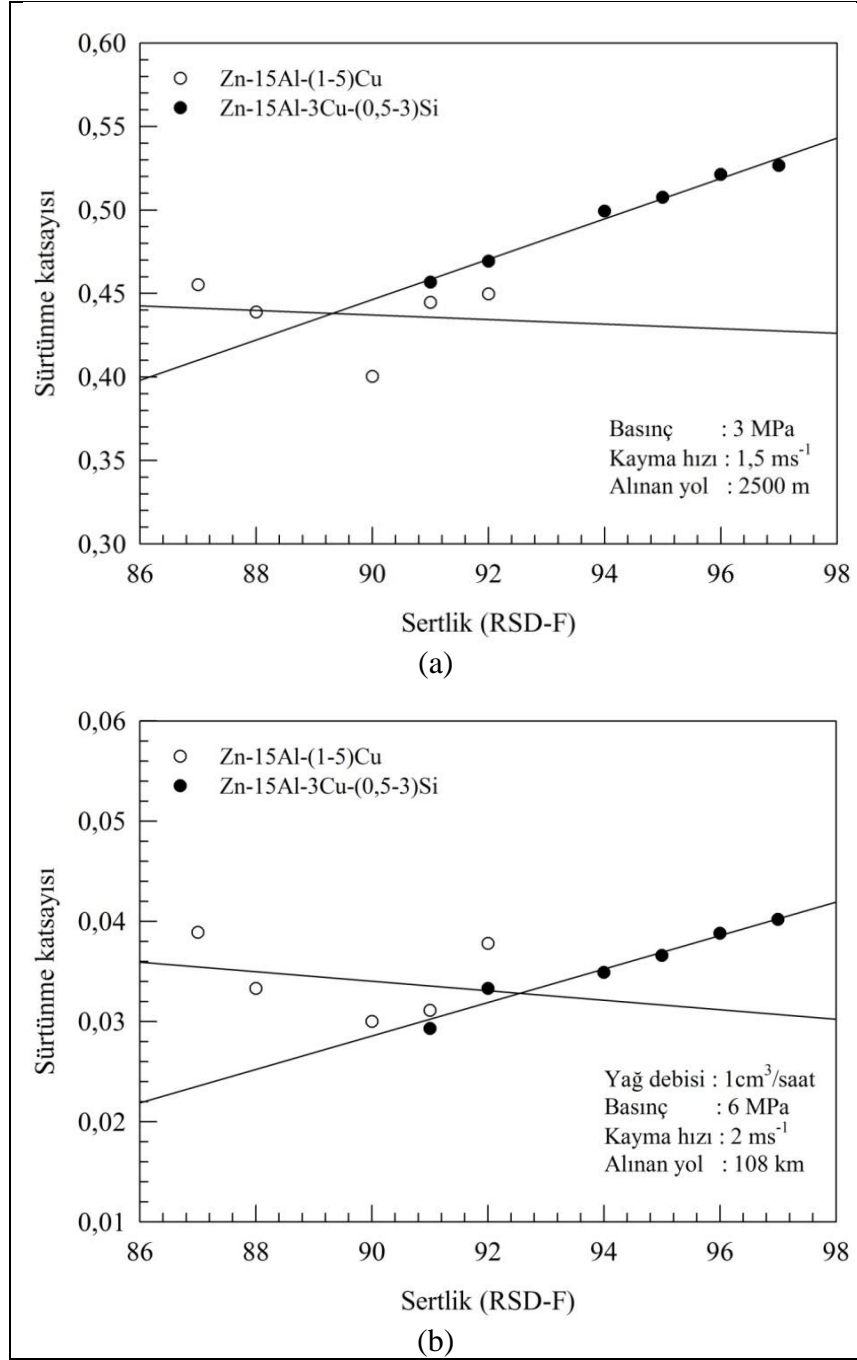
#### 4.4. Mekanik ve Tribolojik Deneylerden Elde Edilen Bulguların Korelasyonu

Aynı koşullarda deneye tabi tutulan Zn-15Al esaslı alaşımlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının sürtünme katsayısına göre değişimleri Şekil 209'da gösterilmiştir. Bu şekiller sürtünme katsayısı arttıkça hacim kaybının da arttığını göstermektedir. Bu durum yüzeye etki eden sürtünme kuvvetine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, deneyler sabit yük altında gerçekleştirildiğinden sürtünme katsayısının artması sürtünme kuvvetinin artmasından kaynaklanır. Sürtünme kuvvetinin artması ise numune yüzeyine etki eden kayma gerilmelerinin dolayısıyla kesme etkisinin artmasına yol açar. Bu nedenle sürtünme katsayısı arttıkça aşınma ile meydana gelen hacim kaybı da artar.

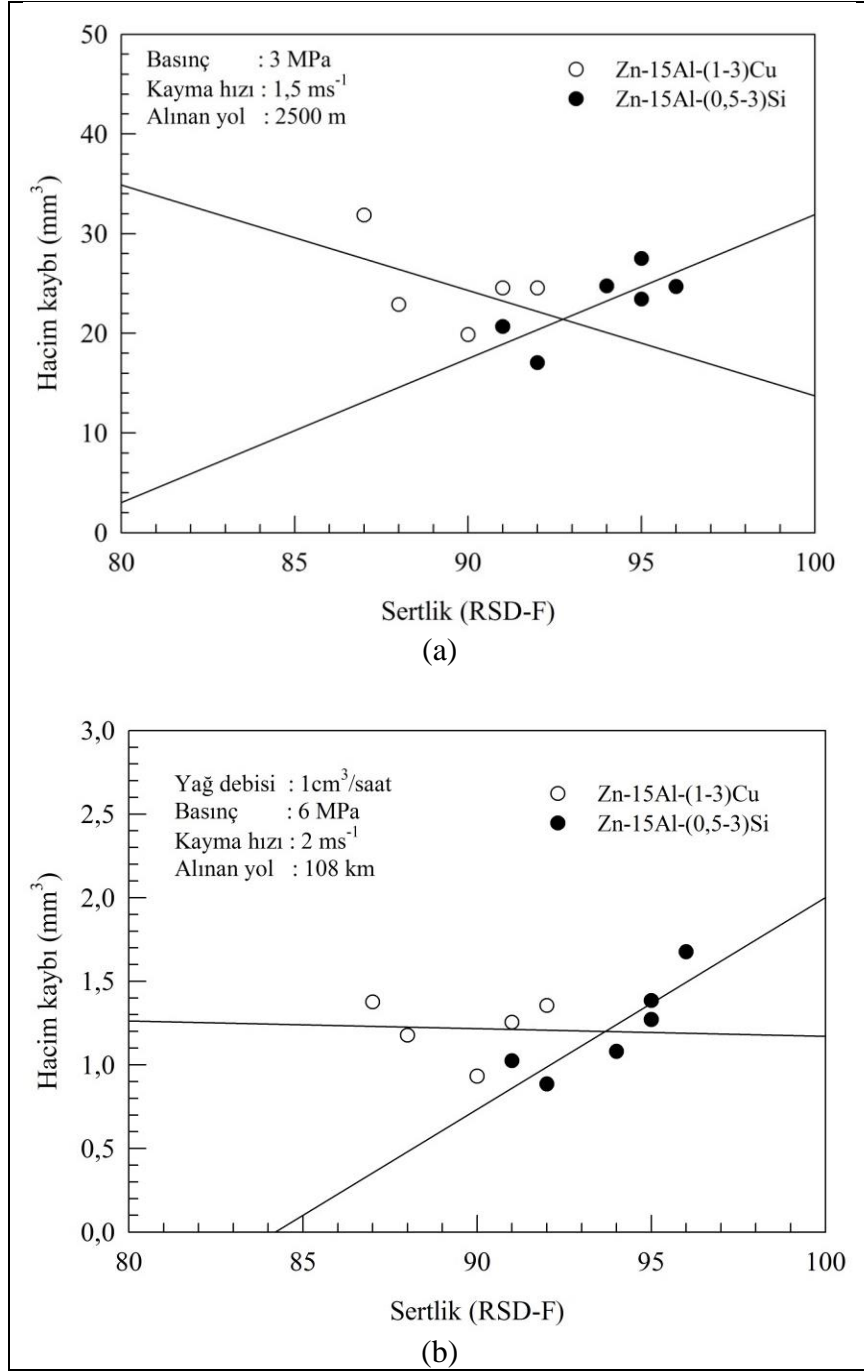
Diğer taraftan Zn-15Al esaslı üçlü alaşımların sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin artan sertlikle azaldığı, dörmlü alaşımların söz konusu değerlerinin ise arttığı görüldü, Şekil 210 ve 211. Ancak, söz konusu alaşımların bu değerlerinin artan çekme dayanımı ile doğrusal olarak azaldığı belirlendi, Şekil 212 ve 213. Elde edilen bu bulgular incelenen alaşımlara ait sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinin sertliğe göre düzensiz, çekme dayanımına göre düzenli değişim sergilediklerini göstermektedir. Başka bir ifade ile çekme dayanımı söz konusu alaşımların sürtünme ve aşınma davranışı üzerinde sertlikten daha etkili olmaktadır. Bu durum söz konusu alaşımların dayanımlarına dayandırılarak açıklanabilir. Adhesiv sürtünme teorisine göre aşınan malzemenin akma dayanımı arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır [96]. 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 alaşımların çekme dayanımı arttıkça aşınma ile meydana gelen hacim kaybının azalması beklenir.



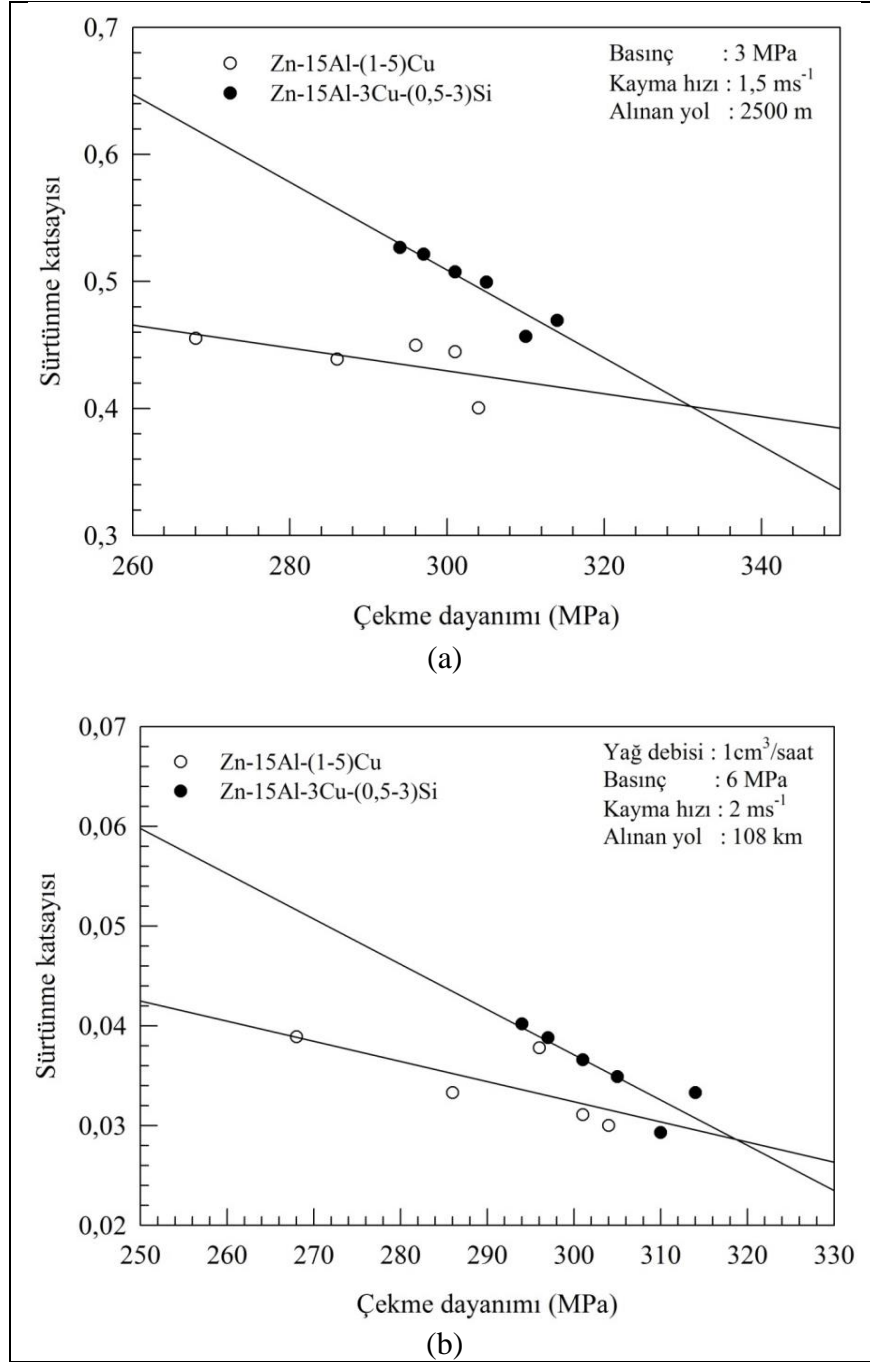
Şekil 209. Zn-15Al esaslı alaşımlarda (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybı değerlerinin sürtünme katsayısına göre değişimlerinin gösterimi



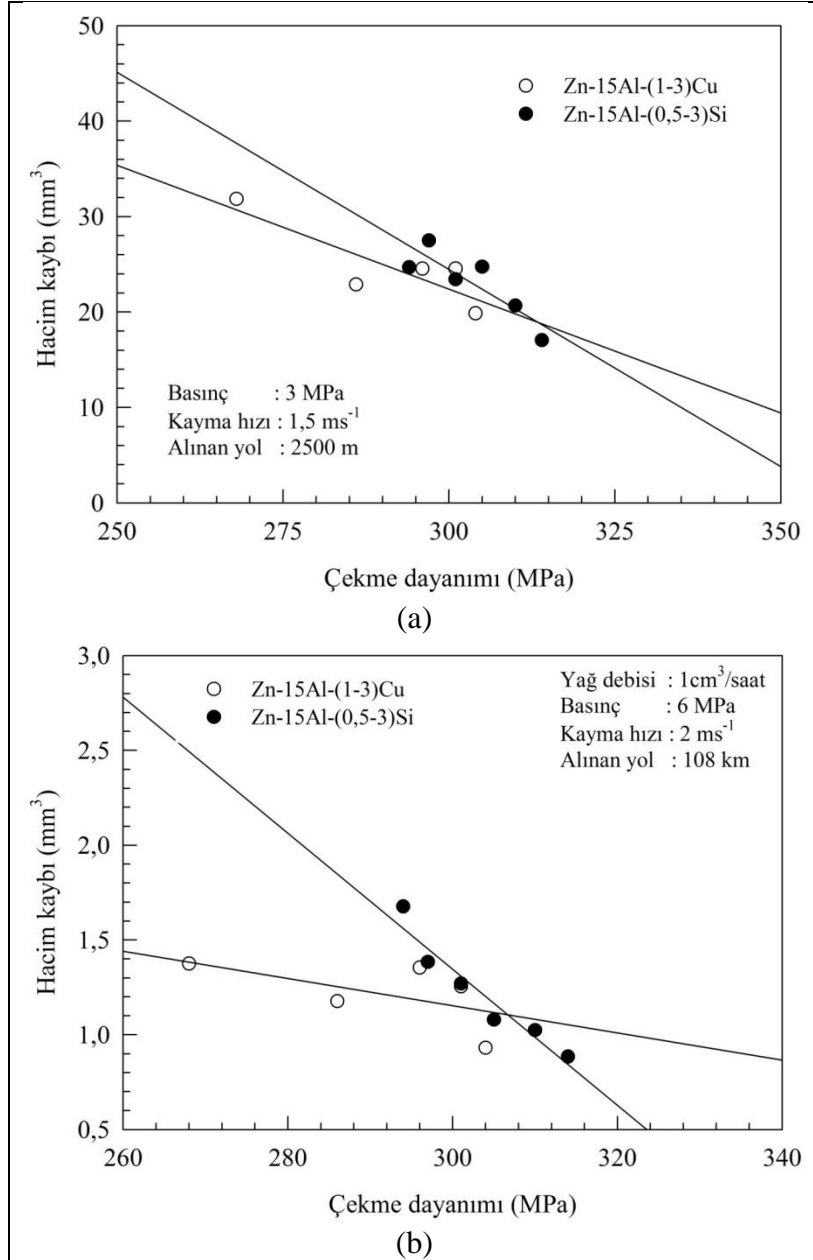
Şekil 210. Zn-15Al esaslı alaşımların (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda sürtünme katsayısı değerlerinin sertliğe göre değişimlerini gösteren grafikler



Şekil 211. Zn-15Al esaslı alaşımlarda (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda aşınma ile meydana gelen hacim kayıplarının sertliğe göre değişimlerini gösteren grafikler



Şekil 212. Zn-15Al esaslı alaşımların (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda sürtünme katsayısı değerlerinin çekme dayanımına göre değişimlerini gösteren grafikler



Şekil 213. Zn-15Al esaslı alaşımlarda (a) yağsız ve (b) yağlı durumlarda aşınma ile meydana gelen hacim kaybının çekme dayanımına göre değişimlerinin grafiksel gösterimi

#### 4.5. Aşınma Yüzeyleri, Yüzey Altı Bölgeleri ve Aşınma Parçacıklarının İncelenmesinden Elde Edilen Bulguların İrdelemesi

Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan çinko esaslı alaşımlara ait numunelerin yüzeylerinde sıvama tabakaları ile aşırı aşınma izlerine rastlandı ve uygulanan basınç ve kayma hızının artmasıyla sıvama tabakalarının derinliğinin arttığı ve aşınma izlerinin daha belirgin hale geldiği gözlemlendi, Şekil 108-123. Sıvama tabakası derinliğinin artan basınç ve

kayma hızı ile artması aşınan malzeme hacminin artan basınç ve hız ile artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Aşınan malzemenin hacmi arttıkça yüzeye sıvanan malzeme miktarı da artmakta ve bunun sonucunda sıvama tabakasının kalınlığında artış meydana gelmektedir. Aşınma belirtilerinin daha belirgin hale gelmesi ise, yüzeyde oluşan sert ve gevrek sıvama tabakasında çatlama, kırılma ve kopma şeklinde meydana gelen aşınmanın artan basınç ve hızla artmasından kaynaklanmış olabilir. SAE 660 bronzuna ait aşınma numuneleri üzerinde yapılan SEM incelemelerinde ise yüzeyde pullanma ve soyulma şeklinde aşınma belirtilerine rastlandı ve basınç ve kayma hızı arttıkça bu belirtilerin daha belirgin hale geldikleri görüldü, Şekil 128-131. Bronz numunesinin yüzeyinde soyulma ve pullanma ile meydana gelen aşınmanın plastik deformasyon nedeniyle kayma yönünde yönelen yüzey malzemesinin ince parça veya tabaka halinde yüzeyden ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Yüzey altı incelemeleri bu durumu doğrulamaktadır. Basınç ve kayma hızının artmasıyla yönelme gösteren yüzey tabakalarında daha fazla kırılma ve soyulma meydana gelmekte ve bunun sonucunda aşınma artmaktadır.

1 cm<sup>3</sup>/saat yağ debisi, 6 MPa basınç, 2 m/s kayma hızında 108 km'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu ve dördü Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarına ait numuneler üzerinde yapılan SEM incelemeleri sonucunda numunelerin yüzeylerinde sıvama tabakası ile çiziklerin yer aldığı gözlemlendi, Şekil 132-141. Ayrıca, alaşımların bakır ve silisyum oranları arttıkça sıvanan yüzey alanının azalıp, çiziklerin genişlediği ve dördü alaşımlarda üçlü alaşımlara göre daha az bir sıvamanın meydana geldiği görüldü, Şekil 132-134 ve 137-139. Alaşımların sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı eğrilerine bakıldığında sıvama tabakası ve çizik şeklindeki aşınma belirtilerinin rodaj dönemi olarak adlandırılan başlangıç aşamasında meydana gelen metal-metal temasından kaynaklandığı söylenebilir. Bakır oranı arttıkça yüzeydeki sıvamanın azalıp, çiziklerin daha belirgin hale gelmesi oluşan  $\epsilon$  fazının hacimsel oranının artmasının yanı sıra alaşımların sertliğinin artıp, sünekliğinin azalmasından kaynaklanmış olabilir. Dördü alaşımlarda daha fazla çiziklerin oluşması ise bu alaşımların yapısında bulunan sert ve gevrek  $\epsilon$  fazı ile silisyum parçacıklarının abrasiv etkilerine dayandırılabilir.

Farklı yağ debisi, basınç ve kayma hızlarında deneye tabi tutulan Zn-15Al-3Cu, Zn-15Al-3Cu-1Si ve Al-12Si alaşımları ile SAE 660 bronzuna ait numunelerin aşınma yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri sıvlanmış yüzey alanının artan yağ debisi ile azalıp, basınçla arttığını; kayma hızının ise bu alaşımların aşınma yüzeylerini fazla

etkilemediğini göstermektedir, Şekil 144-171. Bu gözlemler numunelerin özellikle rodaj dönemindeki aşınma davranışlarına göre açıklanabilir. Numune yüzeyindeki sıvanmanın daha çok rodaj döneminde meydana geldiği bilinmektedir [8,96]. Yağ debisinin artması yağ filmi oluşumu ve kalınlaşmasını hızlandırarak yüzeyler arasındaki metal-metal temasının azalmasına neden olur. Metal-metal temasının azalması aşınmanın azalmasına, aşınmanın azalması da sıvanan malzeme miktarının azalmasına yol açar. Bu nedenle, yağ debisi arttıkça sıvanan yüzey alanı azalır. Sıvanan yüzey alanının artan basınç ile artması, rodaj döneminde artan oranda aşınmanın meydana gelmesi ve aşınan malzemenin daha geniş yüzeye yayılmasının bir sonucu olabilir. Numunelerin aşınma yüzeylerinin kayma hızından fazla etkilenmemesi ise, rodaj döneminin süre olarak artan kayma hızı ile azalmasına rağmen, kayma yolu olarak fazla değişmemesinden kaynaklanmış olabilir.

Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait numunelerin kayma doğrultusuna paralel kesitleri üzerinde yapılan incelemelerde numunelerin yüzeylerinin altında farklı yapısal görünümlere sahip tabakaların yer aldığı görüldü, Şekil 174-179. Söz konusu numunelerde düşük basınç ve hızlarda iki, yüksek basınç ve hızlarda ise üç farklı tabakanın oluştuğu gözlemlendi, Şekil 182-189. Yüzeyde oluşan sıvanma tabakası A, bunun altında yer alan ve farklı yapısal görünüm sergileyen tabakalar sırasıyla B ve C harfleriyle, yapısal değişime uğramamış bölge ise D harfiyle gösterilmiştir, Şekil 174. Yapılan metalografik incelemeler sonucunda A tabakasının çok ince taneli, B tabakasının ince taneli, C tabakasının ise yönlenme çizgileri veya izleri içeren yapılara sahip oldukları gözlemlendi, Şekil 174-179. Bu kesitlerin mikrosertlik profiline (Şekil 190-195) bakıldığında sıvanma tabakasının (tabaka A) orijinal alaşımdan (bölge D) daha sert, B ve C tabakalarının ise daha yumuşak oldukları görülmektedir. Gözlenen bu yapısal değişimler sürtünme, plastik deformasyon, sıvanma, oksitlenme ve yeniden kristalleşme etkilerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki; çalışma sırasında sürtünme nedeniyle yüzeyden kopan aşınma parçacıkları basınç ve sıcaklığın etkisi ile yüzeye sıvanarak çok ince taneli bir tabaka (A) oluşur. Bu tabakanın orijinal malzemedan çok daha yüksek sertliğe sahip olması bu tabakayı oluşturan aşınma parçacıklarının gerek yüzeye sıvanmadan, gerekse sıvandıktan sonra oksitlenmelerinin yanı sıra aşırı basınç etkisi ile deformasyon sertleşmesine maruz kalmalarından kaynaklanmaktadır [37]. İnce taneli B tabakası ise  $\beta$  dendritlerinin basınç ve sıcaklığın etkisiyle  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarına dönüşmesi sonucunda oluşmaktadır. B ve veya C tabakalarının orijinal alaşımdan daha yumuşak olmaları ise basınç, sıcaklık ve plastik deformasyonun



etkisi ile yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen yeniden kristalleşmeden kaynaklanmış olabilir. C tabakasında görülen yönlenme çizgileri veya izleri dönen diskin numune yüzeyine uyguladığı teğetsel kuvvet ile sıcaklığın etkisi ile meydana gelen plastik akışın yönünü göstermektedir. D bölgesinin alaşımın orijinal yapısını sergilemesi bu bölgedeki gerilme ve sıcaklığın yapısal değişime yol açabilecek büyüklüğe erişmemelerinden kaynaklanmaktadır.

Çinko esaslı alaşımların aşınma numunelerinin yüzeylerinin altında oluşan A, B ve C tabakalarının kalınlık veya derinliklerinin artan basınç ve kayma hızı ile arttığı görüldü, Şekil 182-195. Bu gözlem basınç ve kayma hızının numunenin sıcaklığına ve numunede meydana gelen plastik deformasyon ile hacim kaybına etkilerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, basınç ve kayma hızı arttıkça hem numune sıcaklığı hem plastik deformasyon oranı hem de hacim kaybı artmaktadır. Bu durum aşınan malzemenin yüzeye sıvanması ile oluşan A tabakasının, bunun hemen altında yer alan ince taneli B tabakasının ve yönlenmiş plastik deformasyon sonucunda oluşan C tabakasının kalınlık veya derinliklerinin artmasına yol açar. Diğer taraftan basınç ve kayma hızı arttıkça A tabakasının mikrosertliğinin arttığı, ancak basıncın bu tabakanın mikrosertlik değeri üzerinde kayma hızından çok daha etkili olduğu görüldü, Şekil 192-195. Mikrosertliğin artması basınç ve kayma hızının numune sıcaklığı ve deformasyon oranına etkilerine dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, basınç ve kayma hızı arttıkça numunenin sıcaklığı ile deformasyon oranı artar, sıcaklık ve deformasyon oranının artması sırasıyla aşınma parçacıklarının oksitlenme hızı ve oranı ile deformasyon sertleşmesi (pekleşme) etkisinin artmasına yol açar. Bunun sonucunda A tabakasının mikrosertlik değeri artar. Basıncın mikrosertlik üzerinde kayma hızından çok daha etkili olması ise numune sıcaklığı ile numunede meydana gelen deformasyonun basınca daha duyarlı olmasından kaynaklanmış olabilir.

Aşınma deneyine tabi tutulan çinko esaslı alaşımların numuneleri üzerinde yapılan yüzey ve yüzey altı incelemeleri ile mikrosertlik ölçümlerinden elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi sonucunda, çalışma sırasında önce yüzeyde plastik deformasyon nedeniyle yönlenmenin meydana geldiği, yönlene malzemenin dönüşerek ince taneli bir yapı oluşturduğu, bu yapıya ait fazların aşınma nedeniyle parçacıklar halinde yüzeyden ayrıldığı, aşınma parçacıklarının bir kısmının tekrar numune yüzeyine sıvandığı ve sıvanan parçacıklardan oluşan tabakanın basınç ve sıcaklığın etkisiyle oksitlenmesi ve pekleşmesi nedenleriyle sertleştiği söylenebilir.

Al-12Si alaşımının aşınma numunelerinde ise herhangi bir yapısal değişime rastlanmamıştır, Şekil 180. Bu durum söz konusu alaşıma ait numunelerin, yapısal değişime fırsat vermeyecek kadar kısa bir süre içerisinde hasara uğrayarak çalışamaz hale gelmelerinden kaynaklanmaktadır. SAE 660 bronzuna ait aşınma numunesinin yüzey altında yönlenme belirtilerinden başka belirgin bir yapısal değişimin meydana gelmediği görüldü, Şekil 181. Bu yönlenmenin çinko esaslı alaşımlarda gözlendiği gibi, dönen disk tarafından numune yüzeyine uygulanan teğetsel kuvvetin etkisiyle deforme olan  $\alpha$  fazının kayma yönünde uzaması sonucunda meydana geldiği söylenebilir.

Yağsız durumda aşınma deneyine tabi tutulan Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına ait numunelerden elde edilen aşınma parçacıklarının farklı boyut ve Őekillere sahip oldukları görüldü, Şekil 196-199,201-208. Bu nedenle, aşınma parçacıklarının boyut ve Őekli ile deney koşulları arasında ilişki kurmak mümkün olamamıştır. Bu durum, söz konusu numunelerin aşınma yüzeylerinin homojen yapı ve özelliklere sahip olmaması ve disk yüzeyine sıvanan malzemenin disk yüzeyinde pürüzlülük oluşturarak sürtünme ve aşınmayı etkilemesi gibi nedenlerden kaynaklanmış olabilir. Ancak, bu alaşımlarda oluşan aşınma parçacıklarının boyut ve özellikleri ile deney değişkenleri arasındaki ilişkiler daha sistematik ve ayrıntılı bir çalışma ile ortaya konulabilir.

SAE 660 bronzuna ait numunelerden alınan aşınma parçacıklarının ise pul Şeklinde oldukları görüldü, Şekil 200. Bu parçacıkların oluşumu söz konusu bronz aıt numunelerin yüzeylerinde meydana gelen aşırı plastik deformasyon ile oluşan yönlenmiş ince tabakaların kırılarak yüzeyden ayrılmalarından kaynaklanmış olabilir.

## 5. SONUÇLAR

1. Zn-15 Al alaşımının içyapısı  $\beta$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektik ( $\beta + \eta$ ) ve ötektoid ( $\alpha + \eta$ ) karışımlardan oluşmaktadır.
2. Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının içyapıları ikili alaşımın içyapısına benzemekte, ancak %3 ve bundan daha yüksek oranlarda bakır içerenlerin dendritler arası bölgelerinde  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazı oluşmakta ve bu fazın boyutu ve hacimsel oranı artan bakır oranı ile artmaktadır.
3. Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının içyapılarında  $\beta$ , ötektik  $\beta + \eta$ , ötektoid  $\alpha + \eta$  ve  $\epsilon$  fazlarının yanı sıra birincil silisyum parçacıkları yer almakta ve bu parçacıklar silisyum oranının %1'i aşması durumunda rastgele kümelenmektedir.
4. Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarına uygulanan T5 ısıl işlemi alaşımların dendritik yapılarının görünümlerini etkilememekte, ancak  $\epsilon$  fazının parçalanarak boyutunun küçülmesine yol açmaktadır.
5. T7 ısıl işlemi sonunda Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının dendritik yapıları tamamen ortadan kalkarak bunların yerini  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarından oluşan ince taneli bir yapı almakta ve  $\epsilon$  fazı kısmen dönüşmektedir. Sözü edilen  $\epsilon$  fazının T' fazına dönüşümü, 180°C sıcaklıkta yaklaşık 100 saatlik bir yaşlandırma süresi sonunda tamamlanmaktadır.
6. İgili Zn-(5-25)Al alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı ve kopma uzaması değerleri artan alüminyum oranı ile artmakta, ancak kopma uzaması değerleri %10 Al oranından sonra azalmaktadır.
7. l Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarının sertlik ve basma dayanımı değerleri artan bakır oranıyla sürekli artarken, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri sürekli azalmakta; çekme dayanımı değerleri ise %3 Cu oranına kadar belirgin bir artış sergiledikten sonra azalmaktadır.
8. Dörtlü Zn-15Al-3Cu-(0,5-3)Si alaşımlarının sertlik ve basma dayanımı değerleri artan silisyum oranı ile sürekli artarken, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerleri sürekli azalmakta; çekme dayanımı değeri ise %1 Si oranına kadar az da olsa bir artış sergiledikten sonra azalmaktadır.

9. Üçlü Zn-15Al-(1-5)Cu alaşımlarında bulunan  $\beta$  dendritlerinin mikrosertlik değeri %3 Cu oranına kadar artan bakır oranı ile artmakta ve bu orandan sonra fazla değişmemekte, dendritler arası bölgelerin mikrosertliği ise artan bakır oranı ile sürekli artmaktadır. Silisyum katkısı üçlü Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapısında bulunan fazların mikrosertlik değerlerini etkilememektedir.
10. T5 ve T7 ısıt işlemleri Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının sertlik, çekme dayanımı, basma dayanımı, kopma uzaması, darbe direnci ve aşınma direnci değerlerini farklı oranlarda azaltmaktadır.
11. Çinko esaslı üçlü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncini Zn-15Al-3Cu alaşımı, dördü alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncini ise Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımı sergilemektedir.
12. Çinko esaslı alaşımlardan elde edilen sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan yağ debisi ile büyük ölçüde azalmakta, yağ debisinin belirli bir değerin ( $1\text{cm}^3/\text{saat}$ ) üzerine çıkması durumunda ise bu parametreler fazla değişmemektedir.
13. Gerek yağlı, gerekse yağsız çalışma durumlarında basınç arttıkça çinko esaslı alaşımların sürtünme katsayıları azalmakta, aşınma ile meydana gelen hacim kaybı ve sıcaklık değerleri ise artmaktadır.
14. Yağsız durumda deneye tabi tutulan çinko esaslı alaşımların sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artan kayma hızı ile artmakta, ancak sürtünme katsayısında belirgin bir değişim meydana gelmemektedir. Yağlı durumda ise kayma hızı arttıkça yalnız sıcaklık artmakta, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerleri fazla değişmemektedir.
15. Yağsız çalışma durumunda Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının aşınma yüzeylerin altında sıvanma ve yapısal dönüşümler sonucunda farklı görünümlere sahip tabakalar oluşmaktadır. Bu tabakaların kalınlıklarının yanı sıra sıvama tabakasının mikrosertlik değeri artan basınç ve kayma hızı ile artmaktadır.
16. İncelenen tüm alaşımlar içerisinde, yağsız çalışma durumunda en yüksek aşınma direncini dördü Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımı, en düşük aşınma direncini ise Al-12Si alaşımı sergilemektedir.
17. Yağlı durumda Al-12Si alaşımı, çinko esaslı alaşımlar içerisinde en yüksek aşınma direncine sahip Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımı ile hemen hemen aynı aşınma

direncini sergilerken, SAE 660 bronzu en düşük aşınma direncini sergilemektedir.

18. İncelenen çinko esaslı alaşımların aşınma dirençleri bunların sertlik değerlerinden çok çekme dayanımlarına bağlıdır ve çekme dayanımı arttıkça aşınma direnci de artmaktadır.

## 6. ÖNERİLER

1. Zn-15Al esaslı alaşımlar içerisinde en yüksek çekme mukavemeti ve aşınma direnci sergileyen Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarının yorulma ve sürünme davranışları ile korozyon özellikleri incelenerek bunlardan üretilecek parçaların tasarım ve kullanımına yönelik veriler elde edilebilir.
2. Zn-15Al-3Cu ve Zn-15Al-3Cu-1Si alaşımlarından kaymalı yataklar yapılarak bunların statik ve dinamik yük altındaki tribolojik davranışları araştırılabilir.
3. Zn-15Al-3Cu alaşımında  $\epsilon$  fazının T' fazına dönüşümü X-ışını ve elektron difraksiyonu yardımıyla ortaya konulabilir. Ayrıca, oluşan T' fazının bu alaşımın mekanik özellikleri ve aşınma davranışına etkileri araştırılabilir.
4. Mg, Mn ve Ni gibi farklı element katkılarının Zn-15Al esaslı alaşımların yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri incelenebilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., The Structure and Properties of Zinc-Aluminium Based Bearings Alloys, PhD Thesis, University of Aston 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. 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.
4. 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, Metallwissenschaft und Technik, 37, 9 (1983) 898-902.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Savaşkan, T. ve Alemdağ Y., Effects of Pressure and Sliding Speed on the Friction and Wear Properties of Al-40Zn-3Cu-2Si Alloy: A Comparative Study with SAE 65 Bronze, Materials Science and Engineering A, 496 (2008) 517-523
9. Prasad, B.K., Sliding Wear Response of a Zinc-based Alloy and its Composite and Comparison With a Gray Cast Iron: Influence of Exeternal Lubrication and Microstructural Features, Materials Science and Engineering A, 392 (2005) 427-439.
10. 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.
11. Lyon, R., The Properties and Applications of ZA Alloys, The British Foundryman, August/ September 1986, 344-349.
12. Ünlü, B.S., Yılmaz, S.S. ve Kurgan, N., Compare of Wear and Mechanical Properties of Bronze-Ferrous, P/M-Casting Bearings, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Mayıs 2009, Karabük, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 990-993.
13. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Mechanical Properties and Lubricated Wear of Zn-25 Al Based Alloys, Wear, 116 (1987) 221-224.

14. Zhu, Y., Yan, B. ve Huang, W., Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35), Journal of Materials Science and Technology, 11 (1995) 109-113.
15. Calayag, T. ve Ferres, D., High-Performance, High-Aluminum Zinc Alloys for Low-Speed Bearings and Bushings, SAE Annual Conference, Paper No 820643, (1983) 2241-2251.
16. Köster, W. ve Moeller, K., On the Synthesis and Constitution of Zinc-Copper-Aluminum Alloys. II. The Correlation of CuAl with the Ternary Crystalline Phase, Z. Metallkd., 33 (1941) 284-288
17. Köster, W., On the Synthesis and Constitution of Alloys of Brass. III. Review of the Equilibrium in Copper-Aluminum-Zinc System, Z. Metallkd., 33 (1941) 289-296.
18. Köster, W. ve Moeller, K., The Constitution and Volume Changes of Zn-Cu-Al Alloys. V. The Division of the Ternary Phases at Low Temperatures, Z. Metallkd., 34 (1942) 206-207.
19. Türk, A., Kurnaz, C. ve Şefik, H., Comparison of the Wear Properties of Modified ZA-8 Alloys and Conventional Bearing Bronze, Materials and Design, 28 (2007) 1889-1897.
20. Savaşkan, T. ve Azaklı, Z., An Investigation of Lubricated Friction and Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Comparison with SAE 65 Bearing Bronze, Wear 264 (2008) 920-928.
21. Savaşkan, T. ve Bican, O., Effects of Silicon Content on the Microstructural Features and Mechanical and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si Alloys, Materials Science and Engineering A, 404 (2005) 259-269.
22. Savaşkan, T., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Genişletilmiş 6. Baskı, Trabzon, 2012.
23. Türk, A., Durman, M. ve Kayalı, E.S., The Effect of Manganese on The Microstructure and Mechanical Properties of Zinc-Aluminium Based ZA-8 Alloy, Material Science, 42 (2007) 8298-8305.
24. Iwai, Y., Hou, W., Honda, T. ve Yoneda, H., Wear Behaviour of High Tensile Strength Aluminium Alloy Under Dry and Lubricated Conditions, Wear 196 (1996) 46-53.
25. Prasad, B.K., Effect of Microstructure on the Sliding Wear Performance of a Zn-Al-Ni Alloy, Wear, 240 (2000) 100-112.
26. 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.
27. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging, Materials Science and Technology, 6 (1990) 695-703.



28. Prasad, B.J., Influence of Heat Treatment Parameters on the Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc Based Alloy, Wear, 257 (2004) 1137-1144.
29. 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.
30. Savaşkan, T., Purçek, G. ve Hekimoğlu, AP., Effect of copper content on the mechanical and tribological properties of ZnAl27-based alloys, Tribology Letters, 15(3) (2003) 257-263.
31. Azaklı Z. ve Savaşkan T. An Examination of Frictional and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Case of Oil Cut Off, Tribology International, 41 (2008) 9-16.
32. Savaşkan, T. ve Bican, O., Effects of Silicon Content on the Microstructural Features and Mechanical and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-(0-5)Si Alloys, Materials Science and Engineering A, 404 (2005) 259-269.
33. Savaskan, T. ve Alemdağ, Y., Effect of Nickel Additions on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Al-40Zn-3Cu Alloy, Wear, 268 (2010) 565-570.
34. Alemdağ Y. ve Savaşkan, T., Mechanical and Tribological Properties of Al-40Zn-Cu Alloys, Tribology International, 42 (2009) 176-182.
35. Savaşkan, T. ve Alemdağ Y., Effects of Pressure and Sliding Speed on the Friction and Wear Properties of Al-40Zn-3Cu-2Si Alloy: A Comparative Study with SAE 65 Bronze, Materials Science and Engineering A, 496 (2008) 517-523
36. Alemdağ Y. ve Savaşkan, T., Effects of Silicon Content on the Mechanical Properties and Lubricated Wear Behaviour of Al-40Zn-3Cu-(0-5)Si Alloys, Tribology Letters, 29 (2008) 221-227
37. 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) (2012) 327-336.
38. Presnyakov, A.A., Gorban, Y.A. ve Chrevyakova, V.V., The Aluminum-Zinc Phase Diagram, Russian Journal of Physical Chemistry, 35, 6 (1961) 632-633
39. Hanson D. ve Gayler M.L.V., "A Further Study Of The Alloys Of Aluminium And Zinc", J. Inst. Met. 27 (1922) 267-306.
40. Fuller M.L. ve Wilcox R.L., Phase Changes during Aging of Zinc-alloy Die Castings, II-Changes in the Solid Solution of Aluminum in Zinc and Their Relation to Dimensional Changes, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 122 (1936) 231-243.
41. Fink W.L. ve Willey L.A., Equilibrium Relations in Aluminum-zinc Alloys of High Purity, II, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 122 (1936) 244-265.

42. Auer H. ve Mann K.E., Magnetische Untersuchung des Systems Zink-Aluminium, Z. Metallkd., 28 (1936) 323–326.
43. Isihara T., On The Equilibrium Diagram Of The Aluminium-Zinc System, J. Inst. Met. 33 (1925) 73–90.
44. Rosenhain W., Archbutt S.L., The Alloys Of Aluminium And Zinc, J. Inst. Met. 6 (1911) 236–258.
45. Ellwood E.C., The Solid Solutions Of Zinc In Aluminium, J. Inst. Met., 80 (1951/52) 217–224.
46. Ellwood E.C., An X-ray Study of the Constitution of Aluminium-Zinc alloys of High Purity Above 275 °C., With a Description of A New High-Temperature X-Ray Camera, J. Inst. Met., 66 (1940) 87–96.
47. Mey S.A., Reevaluation of the Al-Zn System, Z. Metallkd., 84 (1993) 451–455.
48. Murray J.L., Al-Zn (Aluminum-Zinc), Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd Ed., Ed. T.B. Massalski, 1 (1990) 239–241.
49. An Mey S. ve Effenberg G., A Thermodynamic Evaluation of the Aluminium-Zinc System, Z. Metallkd., 77 (1986) 449–453.
50. Kuznetsov G.M., Barsukov A.D. ve Krivosheeva G.B., Calculation Of Phase Equilibria Of The Al-Zn System, Russ. Metall., 5 (1986) 195–198.
51. Kang T., Araki H., Minamino Y., Yamane T., Saji S., Azuma K. ve Miyamoto Y., Phase Diagram of Al-Zn System under High Pressure, Nippon Kinzoku Gakkaishi 57 (1993) 990-997.
52. Okamoto H., Comment on Al-Zn (Aluminum-Zinc), J. Phase Equilib., 15 (1994) 125-126.
53. Okamoto H., Al-Zn (Aluminum-Zinc), J. Phase Equilib., 16 (1995) 281–282.
54. Murphy, S., Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System, Zeitschrift Für Metallkunde, 71 (1980) 96-102.
55. Zhu, Y.H., General Rule of Phase Decomposition in Zn-Al Based Alloys (II)-On Effects of External Stresses on Phase Transformation, Material Transactions, 45 (2004) 3083-3097.
56. 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.
57. Zhu, Y. ve Murphy, S., A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys, Chin. J. Met. Sci. Technol., 2 (1986) 105-116.

58. Negrete, J., Zhu, Y.H. ve Torres-Villasenor, G., Effect of Copper Modification on Impact Strength of Zinc-Aluminum Alloys, Materials Transactions, 35 (1994) 332-335.
59. Haughton J.L. ve Bingham K.E., The Constitution of the Alloys of Aluminium, Copper, and Zinc containing High Percentages of Zinc, Proc. R. Soc. London, Ser. A99 (1921) 47-69.
60. Gebhardt E., "Gleichgewichtsuntersuchungen in den Systemen Zink-Aluminium und Zink-Aluminium-Kupfer", Z. Metallkd., 40 (1949) 136-140.
61. Zhu, Y., Phase Equilibria in Zn-Al-Cu-Si System at 285°C, Chin. J. Met. Sci. Technol., 5 (1989) 113-118.
62. 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.
63. Zhu, Y. ve Murphy, S., A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys, Chin. J. Met. Sci. Technol., 2 (1986) 105-116.
64. Savaşkan, T. ve Aydın, A., Effect of Silicon Content on the Mechanical and Tribological Properties Monotectoid-Based Zinc-Aluminium-Silicon Alloys, Wear, 257 (2004) 377-388.
65. Calayag, T. ve Ferres, D., High-Performance, High-Aluminum Zinc Alloys for Low-Speed Bearings and Bushings, SAE Annual Conference, Paper No 820643, (1983) 2241-2251.
66. Altorfer, K., Zinc Alloys Compete With Bronze in Bearings and Bushings, Metal Progress, 122, 6 (1982) 29-31.
67. Savaşkan, T., Torul, O. ve Çuvalcı, H., Çinko-Alüminyum Alaşımlarının İyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 5. Ulusal Metalurji Kongresi, Kasım 1988, Ankara, Bildiriler Kitabı II: 784-796.
68. Savaşkan, T. ve Turhal, M.Ş., Relationships Between Cooling Rate, Copper Content and Mechanical properties of Monotectoid Based Zn-Al-Cu Alloys, Materials Characterization, 51 (2003) 259-270.
69. Savaşkan, T., Turhal, M.Ş. ve Murphy, S., Effect of Cooling Rate on Structure and Mechanical Properties of Monotectoid Zinc-Aluminium Alloys, Materials Science and Technology, 19 (2003) 67-73.
70. 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.
71. 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.

72. 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.
73. Savaskan, T. ve Alemdağ, Y., Effect of Nickel Additions on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Al-40Zn-3Cu Alloy, Wear, 268 (2010) 565-570.
74. Costa, E.M., Costa, C.E., Vecchia, F.D., Rick, C., Scherer, M., Santos, C.A. ve Dedavid, V.A., Study of The Influence of Copper and Magnesium Additions on the Microstructure Formation of Zn-Al Hypoeutectic Alloys, Journal of Alloys and Compounds, 488 (2009) 89-99.
75. 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.
76. 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.
77. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri, 4.Ulusal Metalurji Kongresi, Ekim 1986, Ankara, Bildiriler Kitabı I: 532-555.
78. 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.
79. 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.
80. Aydın, M. ve Savaşkan, T., Fatigue Properties of Zinc-Aluminium Alloys in 3.5% NaCl and 1% HCl Solutions, International Journal of Fatigue, 26 (2004) 103-110.
81. Savaşkan, T., Aydın, M. ve Odabaşoğlu, H.A., Fatigue Behaviour of Zn-Al Casting Alloys, Materials Science And Technology, 17 (2001) 682-685.
82. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Sürünme (Creep) Davranışlarının İncelenmesi, Metallurji Dergisi, 53 (1987) 15-23.
83. Savaşkan, T. ve Murphy, S., Creep Behaviour of Zn-Al-Cu Bearing Alloys, Zeitschrift Für Metallkunde, 74, 2 (1983) 76-82.
84. Murphy, S., Savaşkan, T. ve Hill, J., The Creep Kinetics of Zinc-Aluminium Alloys, Canadian Metallurgical Quarterly, 25, 2 (1986) 145-150.
85. Türk, A., Durman, M. ve Kayalı, E.S., The Effect of Copper on The Creep Behaviour of Gravity-cast Zinc-Aluminium-Based ZA-8 Alloy, Z. Metallkd., 89 (1998) 351-355.

86. Mondal, D. P., Das, S. ve Rajput, V., Effect of Zinc Concentration and Experimental Parameters on High Stress Abrasive Wear Behaviour of Al-Zn Alloys: A Factorial Design Approach, Materials Science and Engineering A, 406 (2005), 24-33.
87. Savaşkan, T., Pürçek, G. ve Murphy, S., Sliding Wear of Cast Zinc-Based Alloy Bearing under Static and Dynamic Loading Conditions, Wear, 252 (2002) 693-703.
88. Murphy, S. ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al Based Alloys in an Automotive Engine Application, Wear, 98 (1984) 151-161.
89. Bican, O., Bakır ve Silisyum İçeren Al-25Zn Esaslı Alaşımların Dökülmüş ve Isıl İşlem Görmüş Durumlardaki Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010.
90. Türk, A., Durman, M. ve Kayalı, E.S., The Effect of Cu and Al on the Mechanical Properties of Gravity-Cast Hyper-Eutectic Zn-Al-Based Alloys, Z. Metallkd., 94 (2003) 1001-1005.
91. Bobic, B., Mitrovic, S., Babic, M., Vencl, A. ve Bobic, I., Corrosion Behavior of the As-Cast and Heat-Treated ZA27 Alloy, Tribology in Industry, 33 (2011) 87-93.
92. Savaşkan, T. ve Bican, O., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al-25Zn-3Cu-3Si Alloy, Tribology International, 43 (2010) 1346-1352.
93. Gulbransen, E.A., The Kinetics of Oxide Film Formation on Metals and Alloys, Trans. Electrochem. Soc., 91, 1 (1947) 573-604.
94. Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T. ve Murphy, S., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Zinc-Based Alloys, Wear, 252 (2002) 894-901.
95. Pandey, J. P. ve Prasad, B. K., Dry Sliding Wear Behaviour of A Zinc-Based Alloy Against Different Counterface Materials, Zeitschrift Fur Metallkunde, 88 (1997) 739-743.
96. Halling, J., Principles of Tribology, Macmillan Education Ltd., Great Britain, 1989.
97. 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.

## ÖZGEÇMİŞ

Ali Paşa Hekimoğlu 1975 yılında Trabzon'da doğdu. 1992 yılında Trabzon Affan Kitapçioğlu Lisesi'ni bitirdi. Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1997 yılında Makina Mühendisi unvanı ile mezun olduktan sonra KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve bu eğitimini 2002 yılında tamamladı. Aynı anabilim dalında 2006 yılında doktora eğitimine başladı. Bu dönem içerisinde bir bilimsel araştırma projesinde araştırmacı olarak görev yaptı.

1998-2002 yılları arasında Köy Hizmetleri Tunceli İl Müdürlüğü'nde, 2002-2004 yılları arasında Köy Hizmetleri Ankara İl Müdürlüğü'nde, 2004-2005 yılları arasında Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü'nde, 2005-2011 yılları arasında Sanayi ve Ticaret Bakanlığı merkez teşkilatında Mühendis olarak çalıştı. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı'ndaki görevi sırasında Türkiye Cumhuriyeti ile Avrupa Birliği arasında yürütölen tarama müzakerelerinin bazı fasıllarına Türk Delegasyonu üyesi olarak katıldı. 2011 yılından itibaren halen personeli olduğu Doğu Karadeniz Kalkınma Ajansı'nda Uzman olarak çalışmaktadır.