

## Basınç ve Kayma Hızının Zn-15Al-3Cu Alaşımının Yağsız Çalışma Durumundaki Sürtünme ve Aşınma Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi

Ali Paşa HEKİMOĞLU<sup>1\*</sup>, Temel SAVAŞKAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Rize, Türkiye

<sup>2</sup> Haliç Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

**Geliş Tarihi:** 14.06.2018

**\*Sorumlu Yazar e mail:** ali.hekimoglu@erdogan.edu.tr **Kabul Tarihi:** 23.07.2018

### Özet

Bu çalışmada Zn-15Al-3Cu alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Metalografik incelemeler sonucunda bu alaşımın içyapısının  $\beta$  dendritleri ile a,  $\eta$  ve  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazlarından oluştuğu görüldü. Alaşımın yağsız durumdaki sürtünme ve aşınma özellikleri blok-disk esaslı bir aşınma deney düzeneğinde farklı basınç (1-5 MPa) ve kayma hızlarında ( $0,5-2,5 \text{ ms}^{-1}$ ) 2500 m'lik kayma yolu tamamlanmaya kadar incelendi. Alaşımın sürtünme katsayısının artan basınç ile azaldığı, kayma hızından ise fazla etkilenmediği gözlemlendi. Aşınma ile meydana gelen hacim kaybı ve sıcaklık değerlerinin artan basınç ve kayma hızıyla arttığı görüldü. Ayrıca basınç ve kayma hızı arttıkça yüzeylerdeki aşınma ve/veya hasar izlerinin daha belirgin hale geldiği görüldü. Aşınma yüzeylerinin altında farklı mikroyapı ve mikrosertlik değerlerine sahip tabakaların yer aldığı gözlemlendi. Bu tabakaların oluşumu gerilme etkisi ile yüzey altında meydana gelen yapısal dönüşümlere ve aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanmalarına dayandırılarak açıklandı. Yüzeyde yer alan sıvama tabakasının kalınlık ve mikrosertlik değerinin artan basınç ve kayma hızı ile arttığı belirlendi. Basınç ve kayma hızının alaşımın tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri çalışma sırasında yapısal ve mekanik özelliklerde meydana gelen değişimlere göre açıklandı.

**Anahtar Kelimeler:** Zn-15Al-3Cu Alaşımı, Basınç ve Kayma Hızı, Mekanik Özellikler, Sürtünme ve Aşınma, Yüzey Altı Yapısal Değişimler, Aşınma Parçacıkları

# Investigation of the Effects of Contact Pressure and Sliding Speed on the Unlubricated Friction and Wear Properties of Zn-15Al-3Cu Alloy

## Abstract

In this study, Zn-15Al-3Cu alloy was prepared by permanent mold casting. The microstructure of the alloy was observed to be consisted of  $\beta$  dendrites and  $\alpha$ ,  $\eta$  and  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) phases. Unlubricated friction and wear properties of the alloy were investigated at different contact pressures (1-5 MPa) and sliding speeds ( $0.5\text{-}2.5\text{ ms}^{-1}$ ) for a sliding distance of 2500 m with a block-on-disk type wear test machine. The friction coefficient of alloy decreased with contact pressure, but was not affected significantly by the sliding speed. The wear volume and temperature of the sample increased with contact pressure and sliding speed. As the contact pressure and sliding speed increased, the wear and/or damage traces on the surface became more apparent. Layers with different microstructures and microhardness values were observed underneath the wear surfaces. The formation of these layers was explained on the basis of the stress-induced microstructural changes under the surface and smearing of the wear particles on the surface. It was observed that the thickness and microhardness values of the smeared layer on the wear surface increased with increasing contact pressure and sliding speed. The effects of contact pressure and sliding speed on the tribological properties of the alloy were discussed in terms of the changes took place in microstructural and mechanical properties of the alloy during the tests.

**Keywords:** Zn-15Al-3Cu Alloy, Contact Pressure and Sliding Speed, Mechanical Properties, Friction and Wear, Subsurface Microstructural Changes, Wear Particle

## 1. Giriş

Çinko esaslı alaşımlar üretimlerinin kolay ve ekonomik olmasının yanı sıra yüksek aşınma direncine sahip olmaları, iyi yüzey kalitesi elde etmeye elverişli olmaları, sürtünme koşullarında sert parçacıkları içine alabilmeleri, yetersiz yağlama durumunda bile ideal tribolojik davranış sergilemeleri ve yüksek titreşim sönümleme kapasitesine sahip olmaları gibi nedenlerden dolayı pek çok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır [1-4]. Bu uygulamaların başında kaymalı yatak ve makine parçası imalatı gelmektedir [1-4]. Bunlara otomobil parçası, ara bağlantı elemanı, spor aleti, dekoratif parça ve oyuncak yapımı da eklenebilir.

Çinko esaslı alaşımların yapı ve özellikleri içerdikleri alaşım elementlerinin türü ve oranına göre değişmektedir. Örneğin ikili Zn-Al alaşımlarında alüminyum oranı arttıkça yoğunluk azalmakta; sertlik ve akma ve çekme dayanımları artmakta; süneklik değerleri ise belirli bir alüminyum oranına kadar artıp daha sonra azalmaktadır [5]. Bakır katkısının ikili Zn-Al alaşımının mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra korozyon direncini de önemli ölçüde artırdığı görülmüştür [6-9]. Ancak belirli bir oranın üzerindeki bakır katkılarının söz konusu alaşımın hem boyutsal kararlılığını hem de mekanik ve tribolojik özelliklerini olumsuz etkilemektedir [6-10]. Bakır katkısının ikili Zn-Al alaşımının sözü edilen özellikleri üzerindeki etkileri katı çözelti sertleştirmesinin yanı sıra metallerarası  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) ve  $T'$  ( $\text{Al}_5\text{Zn}_4\text{Cu}$ ) fazlarının oluşmasına dayandırılarak açıklanmaktadır [6, 10]. Yapılan çalışmalar Zn-Al-Cu alaşımlarının beyaz metal ve bronz gibi geleneksel yatak malzemelerinden daha üstün mekanik ve tribolojik özelliklere sahip olduklarını göstermiştir [11,12]. Bu alaşımların üstün tribolojik özellikler sergilemesi yapısal ve mekanik özelliklerine dayandırılarak açıklanmaktadır [9, 12-17]. Şöyle ki bu alaşımların içyapıları yumuşak  $\alpha$ ,  $\eta$  ve/veya  $\beta$  fazlarını içeren nispeten yumuşak bir matris ile sert  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) ve/veya  $T'$  ( $\text{Al}_5\text{Zn}_4\text{Cu}$ ) fazlarından oluşmaktadır [6, 10, 12-17]. Bu alaşımların içyapısında bulunan sert fazlar yük taşıma görevi yaparken nispeten yumuşak fazlar kaymayı kolaylaştırmaktadır [12-17].

Piyasada ALZEN 305, ALZEN 501, ZA 8, ZA 12 ve ZA 27 gibi Zn-Al esaslı pek çok ticari alaşım kullanılmaktadır [1]. Son zamanlarda en uygun kimyasal bileşimi belirlemek amacıyla Zn-Al esaslı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda üçlü Zn-15Al-3Cu alaşımı geliştirilmiştir [6,9]. Bu alaşımın yapısal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra yağlı çalışma şartlarındaki tribolojik özellikleri detaylı olarak ortaya konulmuştur [18]. Ancak literatürde bu alaşımının yağsız çalışma durumundaki tribolojik özellikleri hakkında herhangi bir bilgi yer almamaktadır. Gerçek uygulama sırasında yağ kesilmesine yol açan nedenlerden dolayı iş makinalarında bazen yağsız

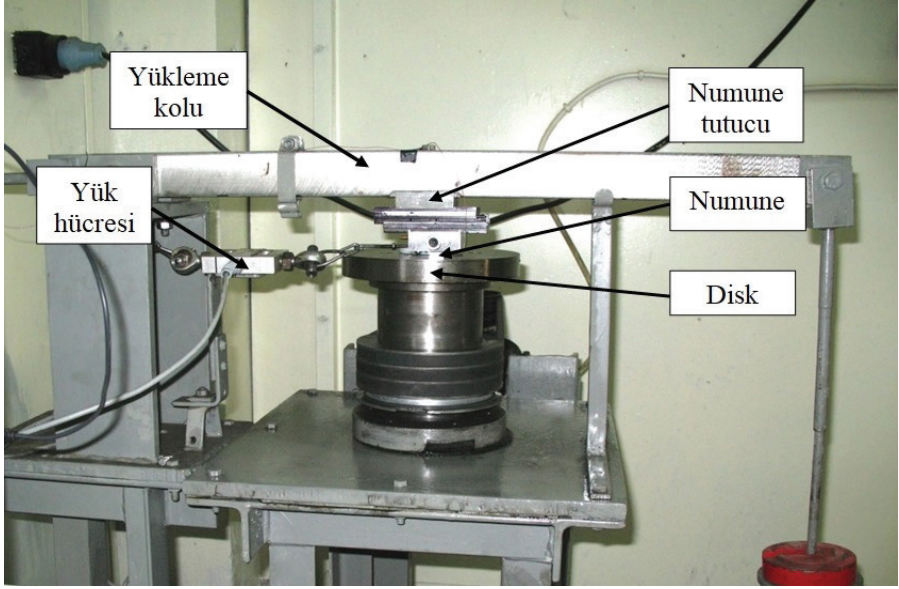
çalışma durumu ortaya çıkabilir. Bu durumda yatak malzemesinin sürtünme ve aşınma özellikleri ön plana çıkar. Bu nedenle bu çalışmada basınç ve kayma hızının Zn-15Al-3Cu alaşımının yağsız çalışma durumundaki sürtünme ve aşınma özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

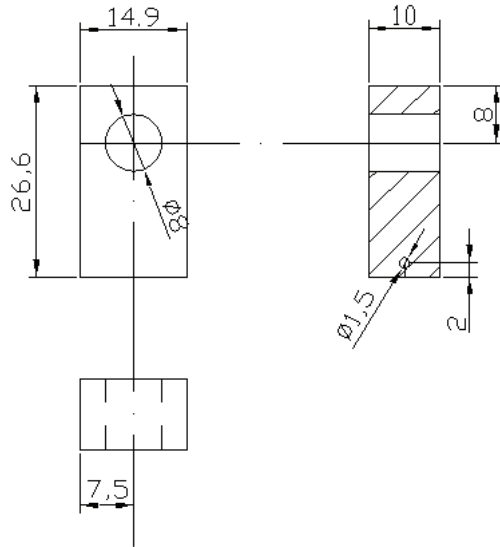
Bu çalışmada Zn-15Al-3Cu alaşımı kokil döküm yöntemiyle üretildi. Alaşımın üretiminde ticari saflıkta alüminyum (%99,70), yüksek saflıkta çinko (%99,9) ve alüminyum-bakır (Al-50Cu) alaşımı kullanıldı. Alaşımın üretilmesi için belirlenen miktarlardaki alaşım elementleri bir elektrikli pota fırını içerisinde ergitilerek karıştırıldı. Sıvı durumdaki alaşım yaklaşık olarak 510°C'lik sıcaklıktan, oda sıcaklığında tutulan 45 x 60 x 190 mm boyutlarındaki bir çelik kalıba (kokil) dökülerek katılaştırıldı. Üretilen alaşımın kimyasal bileşimi atomik absorpsiyon yöntemiyle belirlendi. Alaşımın iç yapısının incelenmesi için alınan numuneler standart metalografi yöntemleriyle hazırlandı ve %3 oranında nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) ve etanol içeren Nital ayırıcı ile dağlandı. Hazırlanan numuneler önce ışık mikroskopunda daha sonra da taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelendi ve iç yapılarını gösteren fotoğraflar (mikrograf) elde edildi. Ayrıca, bu alaşımın iç yapısında bulunan fazlar enerji dispersif spektroskopisi (EDS) yöntemiyle belirlendi. Alaşımın yoğunluğunun belirlenmesi için önce taşlı işlemle silindirik numuneler hazırlandı ve daha sonra bunların kütle ve boyutları ölçüldü. Numunelerin kütlelerinin ölçülmesinde ±0,01 mg hassasiyetine sahip bir dijital terazi, boyutlarının ölçülmesinde ise ±0,001 mm hassasiyetine sahip bir dijital mikrometre kullanıldı. Ölçülen kütle değerlerinin hesaplanan hacim değerlerine bölünmesiyle alaşımın yoğunlukları belirlendi.

Sürtünme ve aşınma deneyleri, fotoğrafı Şekil 1'de verilen blok-disk esaslı bir deney düzeneği yardımıyla oda sıcaklığında ve %55-65 nem oranına sahip bir ortamda gerçekleştirildi. Söz konusu düzenek

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. Aşındırma diski SAE 1045 (Fe-0.46%C-0,6%Mn, 0.035%P-0.03%S) çeliğinden imal edildi ve ısıl işleme 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 düzeneğinde yükleme işlemi, 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. Sürtünme ve aşınma deneyleri talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanan ve teknik resmi Şekil 2’de verilen 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 yardımıyla ölçüldü ve deney süresince bilgisayar ortamında kaydedildi. Sürtünme ve aşınma numuneleri hem deneylere başlamadan önce hem de deneyler tamamlandıktan sonra ultrasonik bir temizleyicide sırasıyla trikloretilen (C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>) ve alkol-aseton karışımı kullanılarak temizlendi. Temizlenen numunelerin kütleleri 0,01 mg’lık hassasiyete sahip bir terazi ile ölçüldü. Ölçülen kütle kaybı değerleri alaşımın yoğunluğuna bölünerek numunelerde aşınma nedeniyle meydana gelen hacim kayıpları belirlendi. Alaşımın sürtünme ve aşınma deneyleri beş farklı basınç (1, 2, 3, 4 ve 5 MPa) ve beş farklı kayma hızında (0,5, 1,0, 1,5, 2,0 ve 2,5 m/s) 2500 m’lik kayma yolu mesafesinde gerçekleştirildi. Deneye tabi tutulan numunelerin aşınma yüzeyleri ve yüzey altı yapıları SEM’de ikincil elektron görüntülemesi yöntemiyle incelendi. Söz konusu numunelerin mikrosertlik profilleri Vickers yöntemiyle 10 g’lık yük altında yapılan ölçümler sonucunda belirlendi. Deneylerden sonra disk yüzeyinden yapışkan bir karbon bant yardımıyla alınan aşınma parçacıkları SEM’de incelenerek görüntülendi.



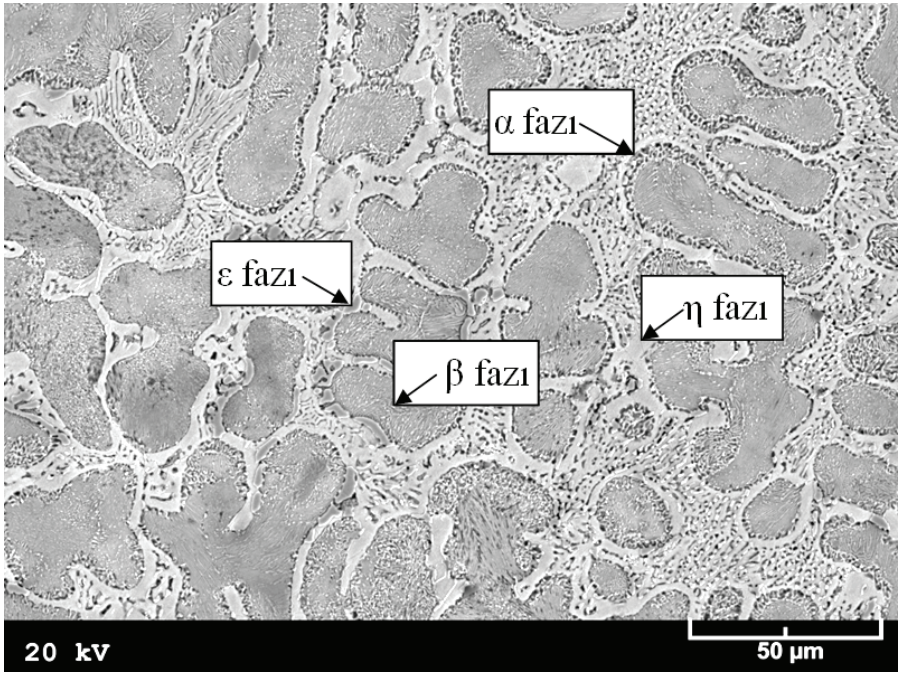
Şekil 1. Aşınma deney düzeneğinin yakından görünümü



Şekil 2. Sürtünme ve aşınma deney numunesinin teknik resmi

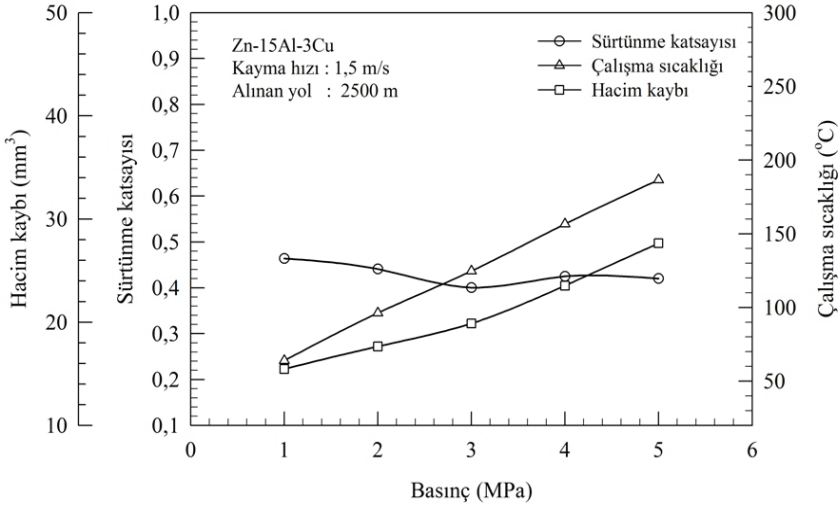
### 3. Bulgular

Yapılan kimyasal analizler sonucunda, üretilen Zn-15Al-3Cu alaşımının çinko, alüminyum ve bakır oranlarının sırasıyla %81,3, %14,9 ve %2,9 olduğu belirlendi. Alaşımın içyapısının  $\beta$  dendritleri ile bunları çevreleyen  $\beta + \eta$  ötektik karışım ve  $\varepsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazından oluştuğu gözlemlendi, Şekil 3.

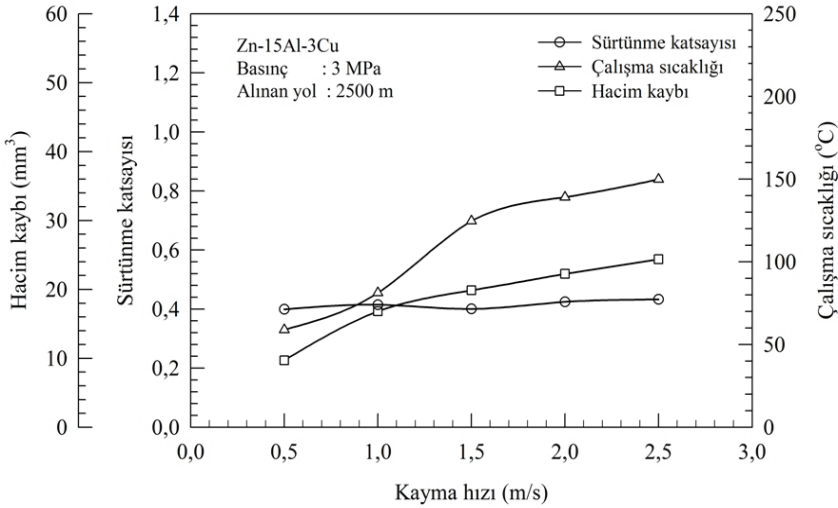


Şekil 3. Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapısının SEM görüntüsü

Alaşımının aşınma numunelerinden elde edilen sürtünme katsayısı, çalışma sıcaklığı ve hacim kaybı değerlerinin basınç ve kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler sırasıyla Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Bu eğriler söz konusu alaşımın sürtünme katsayısının artan basınç ile azaldığını ancak kayma hızından fazla etkilenmediğini, hacim kaybı ve sıcaklık değerlerinin ise hem artan basınç hem de artan kayma hızı ile arttığını göstermektedir.



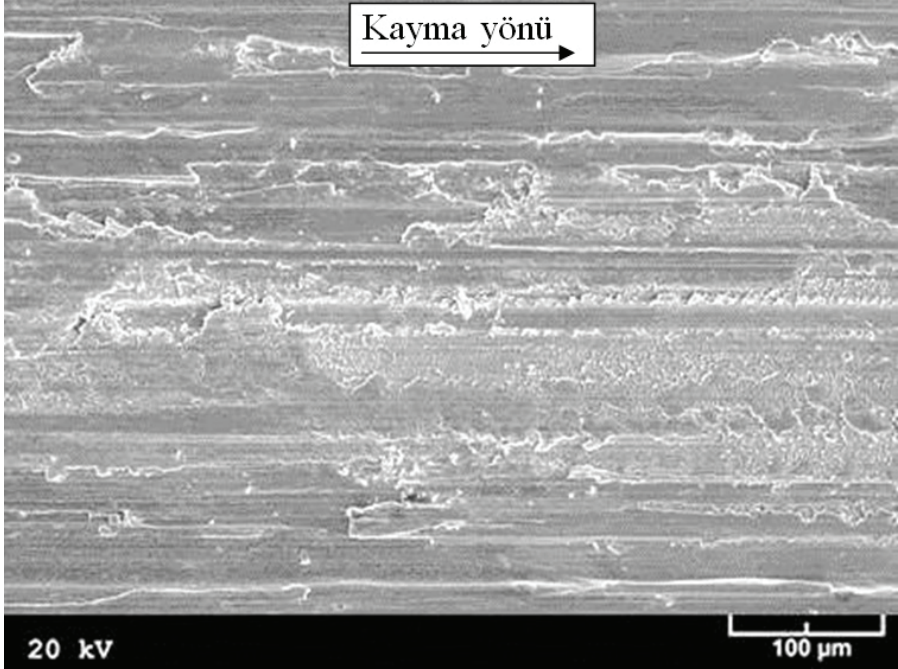
**Şekil 4.** Zn-15Al-3Cu alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin basınca göre değişimlerini gösteren eğriler



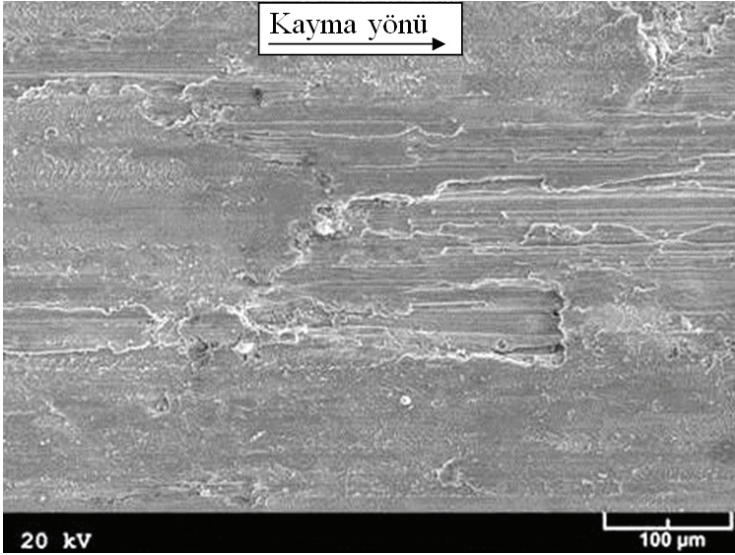
**Şekil 5.** Zn-15Al-3Cu alaşımının sürtünme katsayısı, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin kayma hızına göre değişimlerini gösteren eğriler



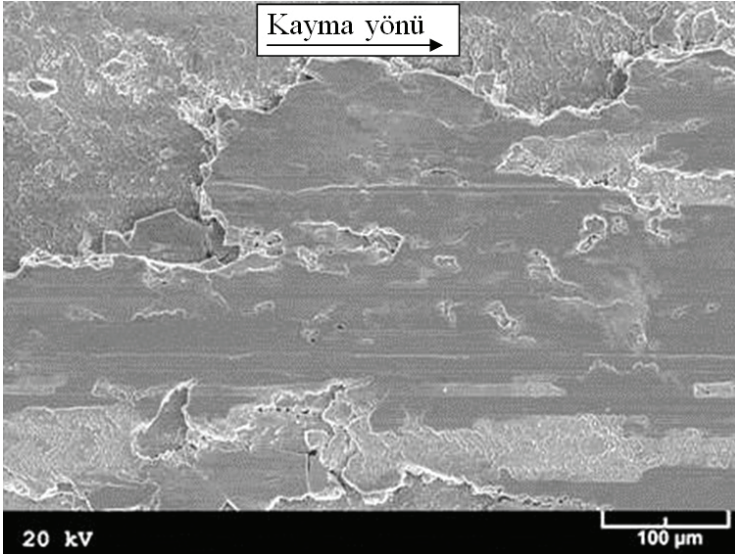
Farklı basınç ve kayma hızlarında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6-10'da verilmiştir. Bu görüntüler basınç ve kayma hızı arttıkça alaşıma ait numunelerin yüzeylerinde meydana gelen aşınma izlerinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.



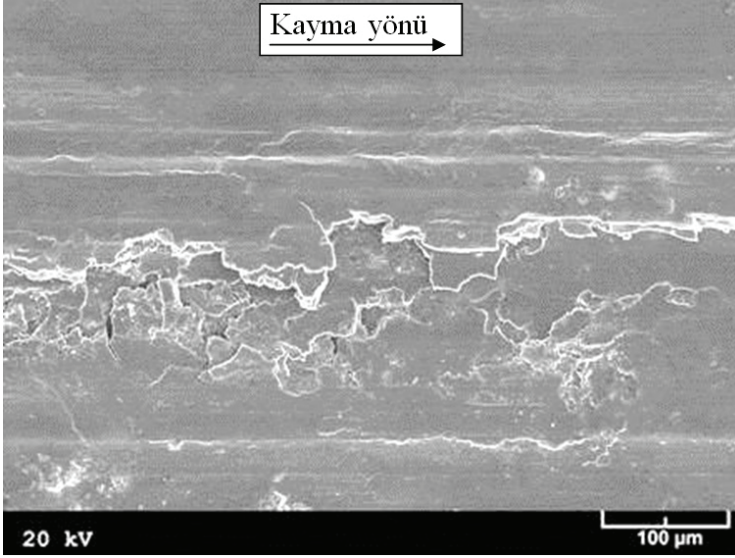
**Şekil 6.** 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında 2500 m'lik kayma yolu tamamlanıncaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



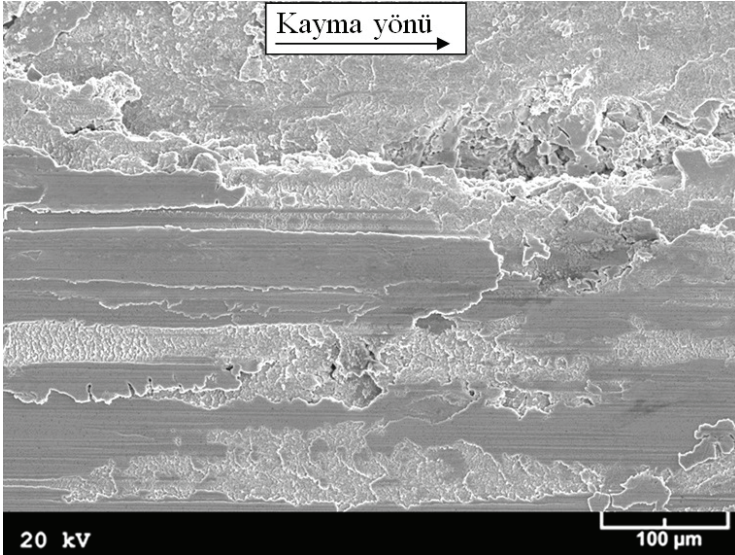
**Şekil 7.** 3 MPa’lık basınç ve 1,5 m/s’lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü



**Şekil 8.** 5 MPa’lık basınç ve 1,5 m/s’lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

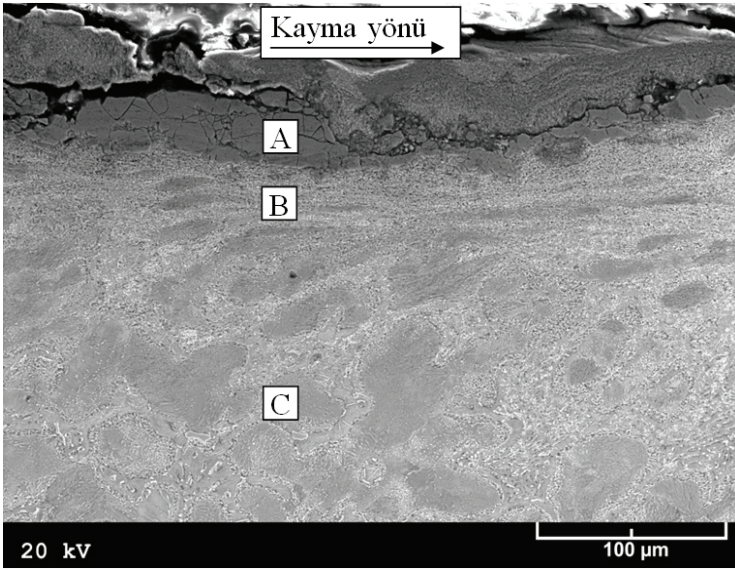


**Şekil 9.** 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

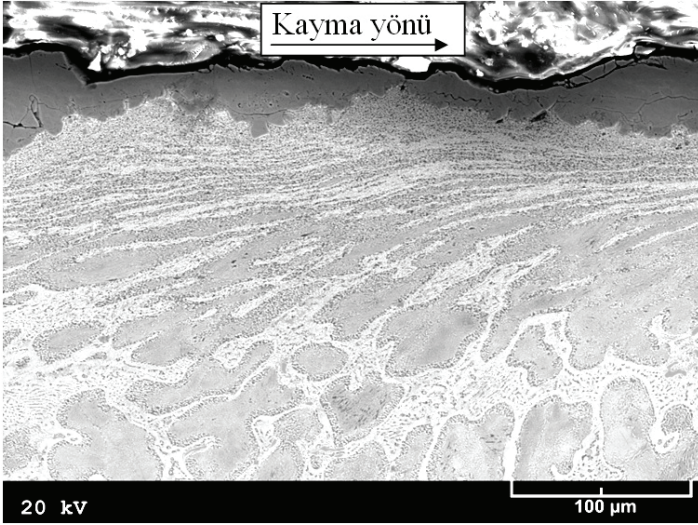


**Şekil 10.** 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin yüzeyinden elde edilen SEM görüntüsü

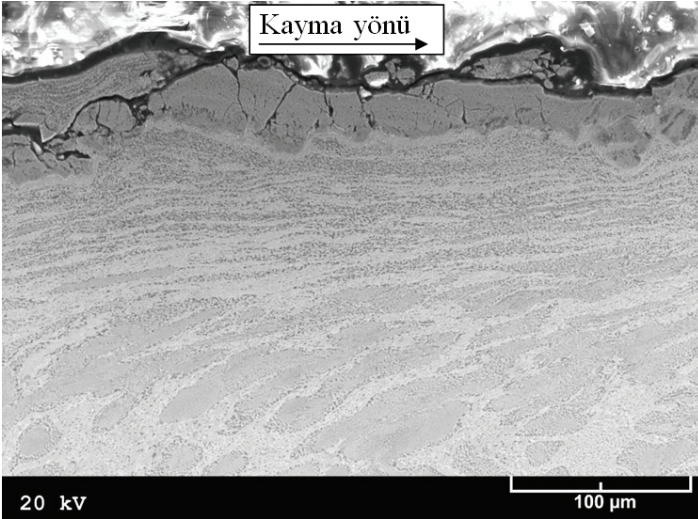
Üç farklı basınç (1, 3 ve 5 MPa) ve iki farklı kayma hızında (0,5 ve 2,5 m/s) 2500 m'lik yol alınincaya kadar aşınma deneyine tabi tutulan deney numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinin SEM görüntüleri Şekil 11-15'te verilmiştir. Bu görüntüler alaşımın söz konusu kesitleri üzerinde yukarıdan aşağıya doğru sıvama tabakası (A), yönlenme izleri sergileyen bir tabaka (B) ile yapısal değişime uğramamış bir bölgenin (C) yer aldığını göstermektedir. Numunelerin kayma doğrultusuna paralel kesitleri üzerinde yapılan SEM incelemelerinden elde edilen fotoğraflarda ayrıca yüzey altında yer alan ince taneli tabakanın derinliğinin artan basınç ve kayma hızı ile arttığı görülmektedir, Şekil 11-15.



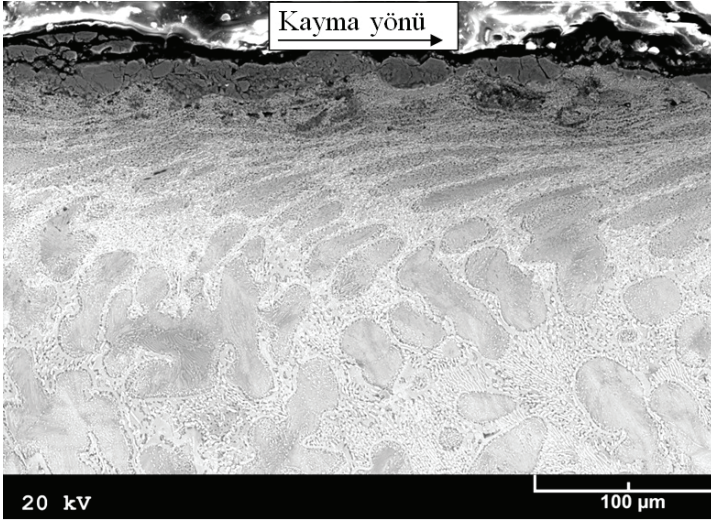
**Şekil 11.** 1 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



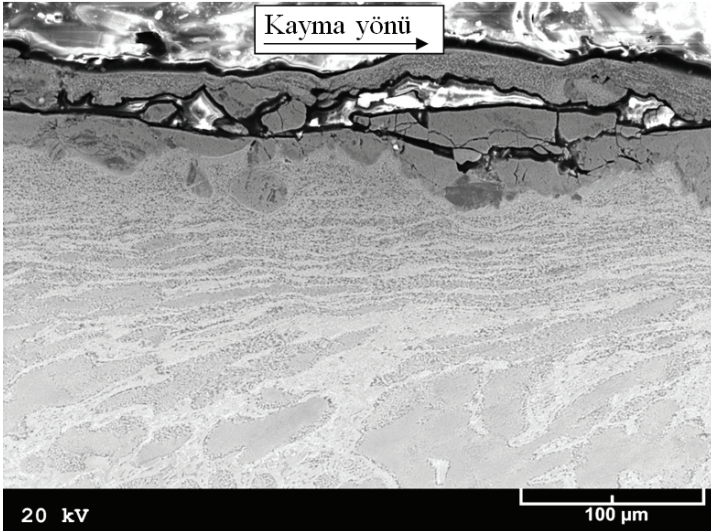
**Şekil 12.** 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü



**Şekil 13.** 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

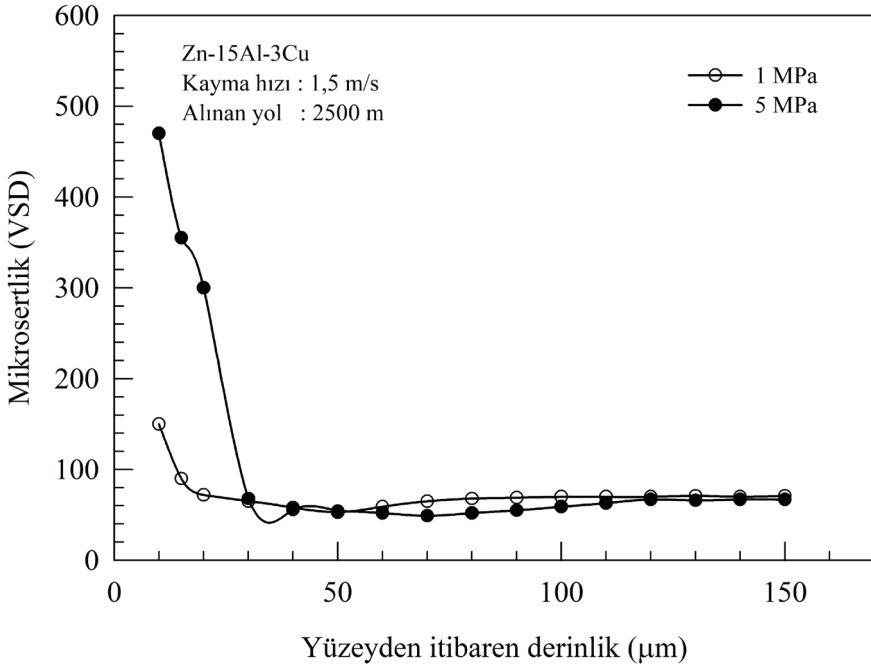


**Şekil 14.** 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

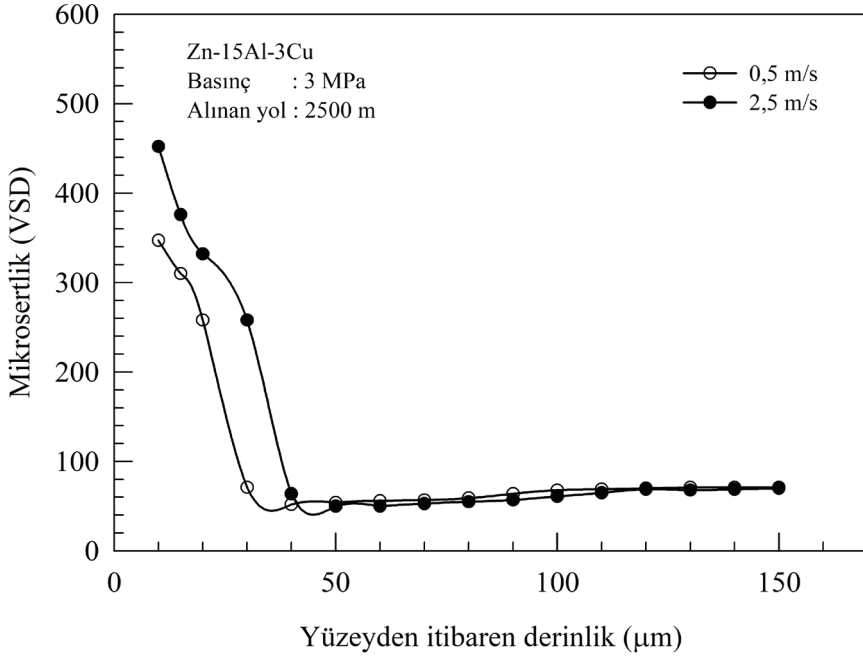


**Şekil 15.** 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında aşınma deneyine tabi tutulan alaşım numunesinin kayma doğrultusuna paralel kesitinin SEM görüntüsü

Deney numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitleri üzerinde ölçülen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimlerini gösteren eğriler (sertlik profili) Şekil 16-17’de verilmiştir. Bu eğriler alaşıma ait aşınma numunelerinin mikrosertlik değerlerinin artan derinlikle azalıp minimum değerlerden geçtikten sonra az da olsa artarak sabit değerlere ulaştıklarını göstermektedir. Bu eğriler ayrıca basınç ve kayma hızı arttıkça yüzey tabakasının sertliğinin arttığını, ancak sertlik artışında basıncın hıza göre çok daha etkili olduğunu göstermektedir.



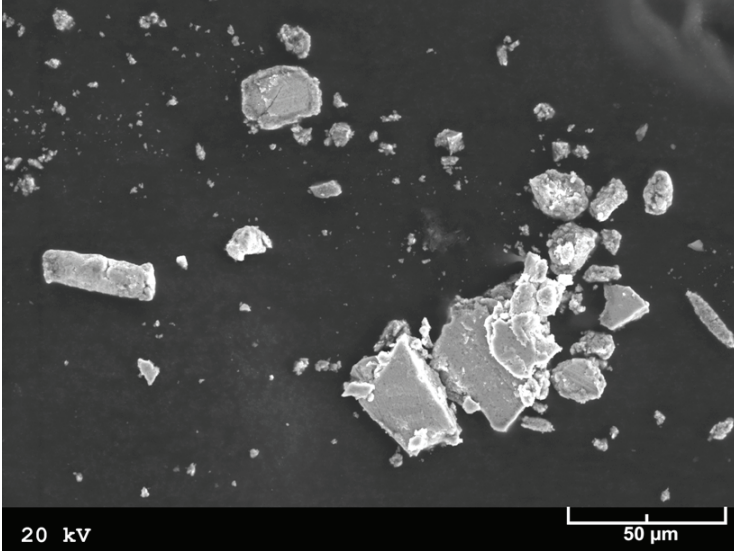
**Şekil 16.** İki farklı basınçta (1MPa ve 5MPa) deneye tabi tutulan alaşım numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler



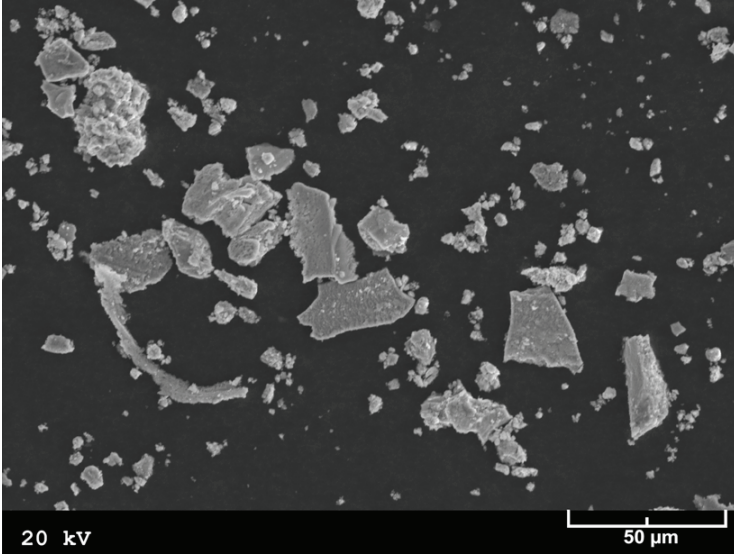
**Şekil 17.** İki farklı kayma hızında (0,5 m/s ve 2,5 m/s) deneye tabi tutulan alaşım numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitlerinden elde edilen mikrosertlik değerlerinin derinliğe göre değişimini gösteren eğriler

Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma parçacıklarının SEM görüntüleri Şekil 18-22’de verilmiştir. Bu görüntüler, basınç arttıkça aşınma parçacıklarının miktar ve büyüklüklerinin az da olsa arttığını göstermektedir. Kayma hızının artması durumunda ise aşınma parçacıklarının sayısının azalıp büyüklüklerinin arttığı gözlemlendi, Şekil 21 ve 22.

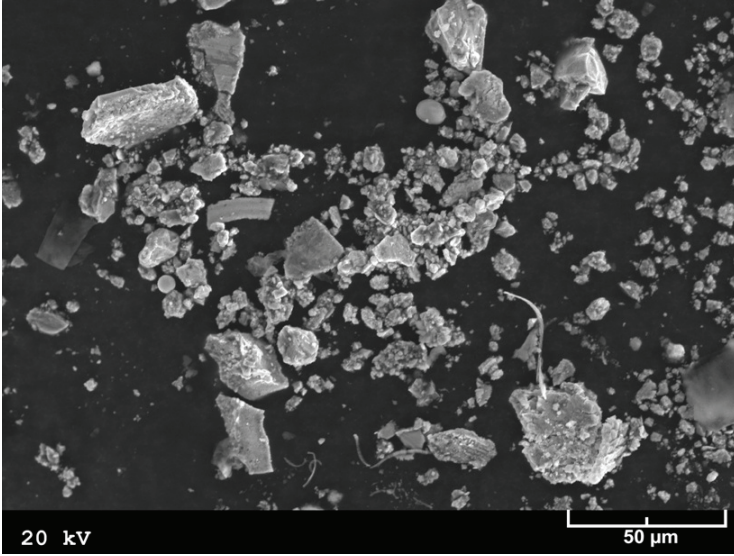




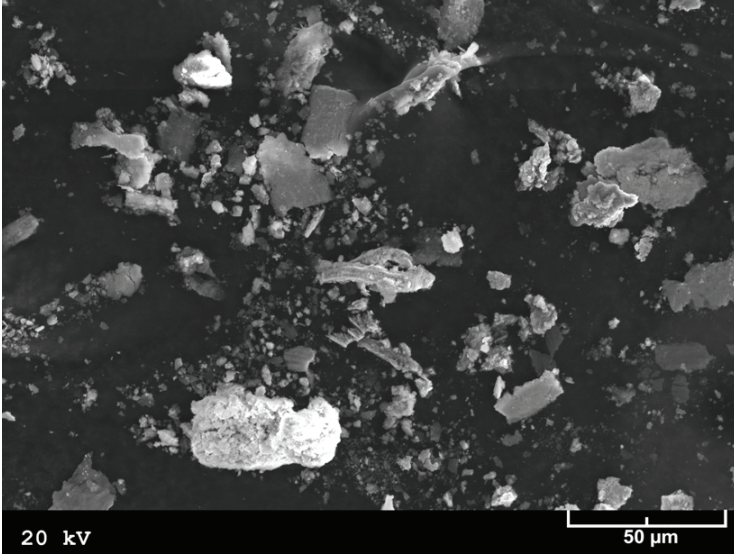
**Şekil 18.** 1MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan numuneye ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



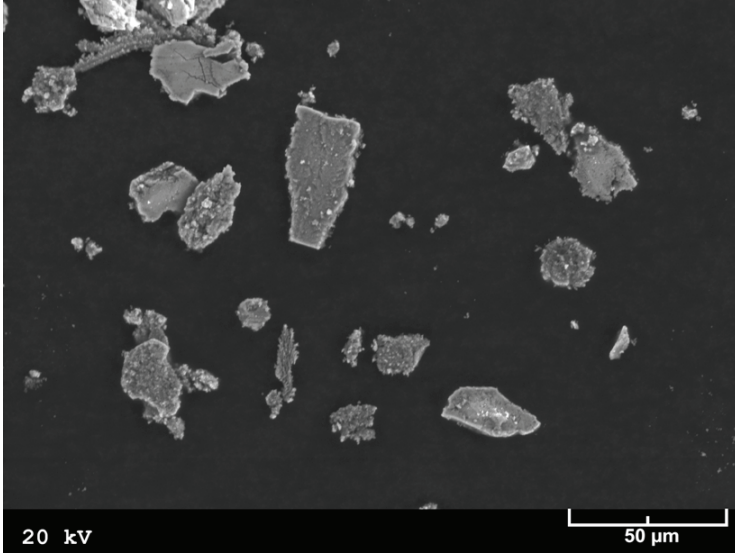
**Şekil 19.** 3 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan numuneye ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



**Şekil 20.** 5 MPa'lık basınç ve 1,5 m/s'lik kayma hızında deneye tabi tutulan numuneye ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



**Şekil 21.** 0,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında deneye tabi tutulan numuneye ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü



**Şekil 22.** 2,5 m/s'lik kayma hızı ve 3 MPa'lık basınç altında deneye tabi tutulan numuneye ait aşınma parçacıklarının SEM görüntüsü

#### 4. Tartışma

Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapısının  $\beta$  dendritleri ile bunları çevreleyen  $\beta + \eta$  ötektik karışımı ve  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazından oluştuğu görüldü, Şekil 3. Söz konusu alaşımın içyapısındaki fazların oluşumu katılaşma ve soğuma sırasında meydana gelen faz dönüşümlerine dayandırılarak açıklanmaktadır [9].

Basınç arttıkça Zn-15Al-3Cu alaşımının sürtünme katsayısının azaldığı, hacim kaybı ve sıcaklık değerlerinin ise arttığı görüldü, Şekil 4. Ayrıca, sürtünme katsayısının kayma hızından fazla etkilenmediği, sıcaklık ve hacim kaybı değerlerinin ise artan kayma hızı ile arttığı gözlemlendi, Şekil 5. Sürtünme katsayısının 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

[19, 20]. 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 [17, 19-22]. Söz konusu alaşımın sürtünme katsayısı değerlerinin kayma hızından pek fazla etkilenmemesi ise numunelerin yüzeylerinde oluşan oksit filminin kaymayı kolaylaştırması nedeniyle sürtünme kuvvetinin fazla değişmemesine bağlanabilir. Alaşımın çalışma sıcaklığının artan basınç ve hız ile artması ise çalışma sırasında açığa çıkan sürtünme ısısının numunelerde sürekli birikmesinden kaynaklanmış olabilir.

Söz konusu alaşımın sürtünme katsayısının artan basınç ile sürekli azalırken, hacim kaybı değerlerinin sürekli olarak artması sürtünme ve aşınma nedeniyle yüzeyde meydana gelen yapısal değişimlere dayandırılarak açıklanabilir. Yağsız durumdaki çalışma sırasında çinko esaslı alaşımlara ait numunelerin yüzeylerinde sert ve gevrek bir tabaka oluştuğu ve bu tabakanın sertlik ve kalınlığının artan basınç ile arttığı gözlemlendi, Şekil 16 ve 17. Bu tabakanın sertliğinin artan basınç ile artması sürtünme katsayısının azalmasına, gevrek olması ise kırılma nedeniyle yüzeyden kopan parçaların artmasına ve dolayısıyla hacim kaybının artmasına yol açmaktadır [19]. Diğer taraftan bu gözlem, yağsız durumda temas eden hareketli yüzeylerde aşınma ile meydana gelen hacim kaybının yüzeylere etkileyen normal yük veya basınç ile doğru orantılı olduğunu ifade eden adhesiv aşınma kanunu ile uyum içerisinde [23]. Zn-15Al-3Cu alaşımında aşınma ile meydana gelen hacim kaybının artan kayma hızı ile artması ise, yüzeylerden ayrılan aşınma parçacıklarına etkileyen 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.

Aşınma numunelerinin yüzeylerinde sıvama tabakası ile aşırı aşınma belirtisi olarak ifade edilen derin çiziklere rastlandı, Şekil 6-10. Yüzeylerdeki sıvama tabakası, çalışma sırasında numuneden disk yüzeyine geçen aşınma parçacıklarının önemli bir bölümünün tekrar numune yüzeyine geri transfer olup basınç ve sıcaklığın etkisiyle yüzeye yapışması sonucunda oluşmaktadır [24, 25]. Numune yüzeyinde sıvama tabakasının oluşumu adhesiv aşınmanın bir göstergesi olarak kabul edilmektedir [24, 25]. Bu nedenle bu aşınmalardaki baskın aşınma mekanizmasının adezyon olduğu söylenebilir. Yüzeyde gözlenen derin çizikler ise çalışma sırasında sistemde oluşan ve yüzeyler arasında hareket eden sert aşınma parçacıklarının yüzeyleri kazınması sonucunda oluşmaktadır [24, 25]. Bu durum söz konusu aşınmaların aşınmasında adezyonun yanı sıra abrazyonun da önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Uygulanan basınç ve kayma hızının artmasıyla sıvama tabakasının derinliğinin arttığı ve aşınma izlerinin daha belirgin hale geldiği gözlemlendi, Şekil 6-10. 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.

Aşınma numunelerinin kayma doğrultusuna paralel kesitleri üzerinde yapılan incelemelerde, numunelerin yüzeylerinin altında farklı yapısal görünlümlere sahip tabakaların yer aldığı görüldü, Şekil 11-15. Yüzeyde oluşan sıvama tabakası A, bunun altında yer alan tabaka B ve değişime uğramayan bölge ise C harfleriyle gösterilmiştir, Şekil 11 ve 12. Yapılan metalografik incelemeler sonucunda A tabakasının pürüzsüz veya çok ince taneli, B tabakasının ise

yönlenme çizgileri veya izleri içeren bir görünüme sahip oldukları ve basınç veya kayma hızının artması durumunda bu tabakalar arasında ince taneli bir yapının oluştuğu gözlemlendi, Şekil 11-15. Bu kesitlerin mikrosertlik profiline (Şekil 16-17) bakıldığında sıvanma tabakasının (tabaka A) orijinal alaşımdan daha sert, B tabakasının 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 parçacıklarının basınç ve sıcaklığın etkisi ile yüzeye sıvanmaları sonucunda çok ince taneli bir tabaka (A) oluşur. Bu tabakanın orijinal alaşımdan çok daha yüksek sertliğe sahip olması bu tabakayı oluşturan aşınma parçacıklarının gerek yüzeye sıvanmadan, gerekse sıvanıldıktan sonra oksitlenmelerinin yanı sıra aşırı basınç etkisi ile deformasyon sertleşmesine maruz kalmalarından kaynaklanmaktadır [24, 26]. A ve B tabakaları arasında artan basınç veya kayma hızıyla oluşan ince taneli tabaka ise  $\beta$  dendritlerinin basınç ve sıcaklığın etkisiyle  $\alpha$  ve  $\eta$  fazlarına dönüşmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu ince taneli yapı ve B tabakasının orijinal alaşımdan daha yumuşak olmaları ise basınç, sıcaklık ve plastik deformasyonun etkisi ile meydana gelen yeniden kristalleşmeden kaynaklanmış olabilir. B tabakasında görülen yönlenme çizgileri veya izleri dönen diskin numune yüzeyine uyguladığı teğetsel kuvvet ve sıcaklığın etkisi ile meydana gelen plastik akışın yönünü göstermektedir.

Aşınma numunelerinin yüzeylerinin altında oluşan tabakaların (A ve B) kalınlık veya derinliklerinin artan basınç ve kayma hızı ile arttığı görüldü, Şekil 16-17. 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, oluşan B 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 16-17. Mikrosertlik değerinin 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.

Alaşımın aşınma davranışı aşınma numunelerinin yüzey görünüşleri, yüzey altı mikroyapıları ve mikrosertlik değerlerine dayanılarak açıklanabilir. Elde edilen bulgular, çalışma sırasında önce numune yüzeyinde plastik deformasyon nedeniyle yönlendirmenin meydana geldiğini, yönlendirilen malzemenin dönüşüme uğrayarak ince taneli bir yapı oluşturduğunu, bu yapıya ait fazların aşınma nedeniyle parçacıklar halinde yüzeyden ayrıldığını ve bunların bir kısmının geri transfer olup numune yüzeyine sıvanmaları sonucunda A tabakasının oluştuğunu göstermektedir. Bu tabakanın yüksek sertliğe sahip olması ise basınç ve sıcaklık etkisiyle meydana gelen oksitlenme ve pekleşmeden kaynaklandığı söylenebilir.

Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerden alınan aşınma parçacıkları üzerinde yapılan SEM incelemeleri, basınç arttıkça aşınma parçacıklarının miktar ve büyüklüklerinin az da olsa arttığını gösterdi, Şekil 18-20. Bu durum aşınma ile meydana gelen hacim kaybının, Şekil 4'te görüldüğü gibi artan basınçla doğru orantılı olarak artmasından kaynaklanmaktadır. Kayma hızının artması durumunda ise aşınma parçacıklarının sayısının azalıp büyüklüklerinin arttığı gözlemlendi, Şekil 21 ve 22. Bu durum ise artan kayma hızıyla artan merkezkaç kuvvetinin daha çok küçük boyutlu yani düşük kütleyle sahip aşınma

parçacıklarını sistemden uzaklaştırmasından kaynaklanmış olabilir. Ayrıca, aşınma parçacığı toplama yönteminden de bu tür sonuçların elde edilmesinde etkili olduğu söylenebilir. Bu nedenle bu alaşımın aşınma parçacıklarının şekil, boyut ve özellikleri ile deney değişkenleri arasındaki ilişkiler daha sistematik ve ayrıntılı bir çalışma sonunda belirlenebilir.

## 5. Sonuçlar

1. Zn-15Al-3Cu alaşımının içyapısı  $\beta$  dendritleri ile bunları çevreleyen ötektik ( $\beta + \eta$ ), ötektoid ( $\alpha + \eta$ ) ve  $\epsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ) fazından oluşmaktadır.
2. Basınç arttıkça Zn-15Al-3Cu alaşımının yağsız çalışma durumundaki sürtünme katsayısı azalmakta, aşınma ile meydana gelen hacim kaybı ve sıcaklık değeri ise artmaktadır.
3. Kayma hızı arttıkça Zn-15Al-3Cu alaşımının sıcaklık ve hacim kaybı değerleri artmakta, sürtünme katsayısında ise belirgin bir değişim meydana gelmemektedir.
4. Yağsız çalışma durumunda Zn-15Al-3Cu alaşımının aşınma yüzeylerin altında farklı mikroyapı ve sertlik değerlerine sahip tabakalar oluşmaktadır. Bu tabakaların oluşumu plastik deformasyon, yapısal değişim ve aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanmalarına dayandırılarak açıklanmaktadır. Yüzey tabakasının kalınlık ve mikrosertlik değerleri artan basınç ve kayma hızı ile artmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından desteklenmiştir. (Kod No: 2008.112.03.2).



## Kaynaklar

- [1] Goodwin, F.E., ve Ponikvar, A.L., Engineering Properties of Zinc Alloys, International Lead Zinc Research Organization, USA, (1989).
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Gervais, E., Levert, H. ve Bess, M., The Development of a Family of Zinc-Based Foundry Alloys, American Foundrymen's Society Transaction, 88, (1980) 183-194.
- [5] Hekimoğlu, A.P., ve Savaşkan, T., Structure and mechanical properties of Zn-(5–25) Al alloys, International Journal of Materials Research, 105(11), (2014) 1084-1089.
- [6] Savaşkan, T., ve Hekimoğlu, A.P., Relationships between mechanical and tribological properties of Zn-15Albased ternary and quaternary alloys, International Journal of Materials Research, 107(7), (2016) 646-652.
- [7] Savaşkan, T., Hekimoğlu, A.P., ve Pürçek, G., Effect of Copper Content on the Mechanical and Sliding Wear Properties of Monotectoid-Based Zinc-Aluminum-Copper Alloys, Tribology International., 37, (2004), 45-50.
- [8] 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.
- [9] Savaşkan, T., ve Hekimoğlu, A.P., Relationships between mechanical and tribological properties of Zn-15Albased ternary and quaternary alloys, International Journal of Materials Research, 107(7), (2016) 646-652.
- [10] Savaşkan T., Hekimoğlu A.P., Effect of quench–ageing treatment on the microstructure and properties of Zn- 15Al-3Cu alloy, International Journal of Materials Research, 106(5), (2015) 481-487.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] Delneville, P., Tribological Behaviour of Zn-Al Alloys (ZA27) Compared with Bronze When Used as a Bearing Material with High Load and very Low Speed, *Wear*, 105, (1985) 283-292.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Murphy, S., ve Savaşkan, T., Comparative Wear Behaviour of Zn-Al Based Alloys in an Automotive Engine Application, *Wear*, 98, (1984) 151-161.
- [18] Hekimoğlu, A.P., ve Savaşkan, T., Lubricated friction and wear properties of Zn-15Al-(1-5) Cu Alloys, *Turkish Journal of Electromechanics & Energy* 1(2), (2016) 1-7.
- [19] Savaşkan, T., ve Bican, O., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Al-25Zn-3Cu-3Si Alloy, *Tribology International*, 43, (2010) 1346-1352.
- [20] Gulbransen, E.A., The Kinetics of Oxide Film Formation on Metals and Alloys, *Transactions of the Electrochemical Society*, 91(1), (1947) 573-604.
- [21] Pürçek, G., Savaşkan, T., Küçükömeroğlu, T., ve Murphy, S., Dry Sliding Friction and Wear Properties of Zinc-Based Alloys, *Wear*, 252, (2002) 894-901.
- [22] 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.
- [23] Halling, J., *Principles of Tribology*, Macmillan Education Ltd., Great Britain, (1989).
- [24] Hekimoğlu, A.P., ve Savaşkan, T., Effects of Contact Pressure and Sliding Speed on the Unlubricated Friction and Wear Properties of Zn-15Al-3Cu-1Si Alloy, *Tribology Transactions*, 59(6), (2016) 1114-1121.
- [25] Hutchings, I. M., *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, UK, (1992).
- [26] 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.