

# A356 Alaşımında Cu Miktarının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi

Tansel TUNÇAY

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 34469, Balıklarkayası, Karabük

(Geliş / Received : 25.04.2016 ; Kabul / Accepted : 15.06.2016 )

## ÖZ

Bu çalışmada, farklı oranda (%0.1-0.4 Ağ.) Cu ilave edilen A356 alaşımları döküm yöntemi ile üretilerek, Cu miktarının A356 alaşımının mikro yapı ve aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üretilen A356 alaşımlarına yaşlandırma (T6) ısıl işlemi yapılmıştır. Alaşımların mikro yapıları optik mikroskop (OM), tarama elektron mikroskobu (SEM), X-ışınımı kırınımı analizi (XRD) ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Aşınma testleri pin-on tipi aşınma test cihazında farklı yük (10, 20 ve 30 N) 1 ms<sup>-1</sup> kayma hızı ve farklı kayma mesafesi (500, 1000, 1500 ve 2000 m.) kullanılarak test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarı arttıkça Al-Si ötektik morfolojisinin incelendiği ve yapıda homojen dağıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, yapıda oluşan demir bazlı intermetalikler de incelenmektedir. A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının artmasına bağlı olarak mikro yapıda oluşan Al<sub>2</sub>Cu çökeltilerinin (yaşlandırma nedeniyle) miktarı ve alaşımların sertlikleri artmaktadır. Aşınma testleri sonucunda 10 ve 20 N yük altında en düşük aşınma oranları %0.2 ve 0.4 Cu ilaveli A356 alaşımında, 40 N yük altında %0.4 Cu ilaveli A356 alaşımında elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** A356 alaşımı, mikro yapı, aşınma davranışı.

## Effect of Cu Content on Microstructure and Wear Behaviour in A356 Alloy

### ABSTRACT

In this study, A356 alloys with various amount of Cu (0.1-0.4 wt. %) were produced by casting and the effects of Cu content on the microstructure and wear behaviour of these alloys were investigated. T6 heat treatment was applied to the produced A356 alloys. The microstructures of the produced A356 alloys were examined by optical microscope (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-Ray diffraction analysis (XRD) and hardness measurements. Wear tests were carried out on a pin-on disk type wear apparatus at 1 ms<sup>-1</sup> sliding speed for different sliding distances (500, 1000, 1500 and 2000 m) under different loads (10, 20 and 30 N). The results showed that the morphology of Al-Si eutectic was refined and distributed uniformly in the microstructure with increasing Cu amount. In addition, iron-based intermetallic phases formed in the microstructure were also seen to be refined. With increasing Cu amount added to A356, the amount of Al<sub>2</sub>Cu precipitates (due to aging) and the hardness values of the alloys increased. According to the wear test results, while the lowest wear rates were obtained for A356 alloys with 0.2% and 0.4% Cu under 10 and 20 N loads, the lowest wear rate under 40 N load was obtained for A356 alloy with 0.4% Cu content.

**Keywords:** A356 alloy, microstructure, wear behaviour.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

A356 (Al-Si-Mg) alüminyum alaşımı yüksek dayanım/ağırlık oranı, üstün dökülebilirlik özellikleri ve yaşlandırma ile mekanik özellikleri iyileştirilebildiğinden dolayı, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan alaşımlardır [1]. Bu alaşımların çekme, darbe ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanında aşınma direnci de büyük önem taşımaktadır. Malzemelerin mekanik özellikleri, tane boyutu ve şekli, intermetalik fazların oluşumu ve oluşan fazların boyut ve dağılımları gibi mikro yapısal faktörlere bağlıdır. Al alaşımlarına bakır, silisyum ve magnezyum gibi farklı elementler ilave edilerek ve uygun yaşlandırma ısıl işlemi (T6 gibi) ile dayanımları artırılabilir.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: tanseltuncay@karabuk.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 585-592

Alaşımın bileşiminde bulunan magnezyum ve silisyum miktarına bağlı olarak oluşan Mg<sub>2</sub>Si fazı ile bakır miktarına bağlı olarak oluşan Al<sub>2</sub>Cu fazları mekanik özellikleri iyileştirmektedir [2]. Solüsyona alma, hızlı soğutma ve yaşlandırma aşamalarından oluşan yaşlandırma ile Al-Si-Cu-Mg alaşımlarının mekanik özellikleri geliştirilmektedir [3]. Al-Si ötektik alaşımlarına ilave edilen Cu ve Fe'in miktarına bağlı olarak katılaşma ve ısıl işlem ile Cu ve Fe'ce zengin fazlar oluşmaktadır. Katılaşma sırasında oluşan demir bazlı intermetalikler plaka veya çinçe yazıya benzeyen şekindedir. Bakır bazlı çökeltiler ise α- alüminyum dendritleri tane sınırlarında küresel şekilde oluşmaktadır. Alaşımın yapısında farklı morfolojilerde oluşan bu fazlar, maksimum çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerini artırmaktadır [4]. Endüstriyel amaçlı birçok uygulamada alüminyum alaşımlarından üretilen parçalar, değişen yüklerde ve sıcaklıklarda ciddi aşınma

şartlarında görev yapmaktadır. Bu nedenle, aşınma direnci bu alaşımlarda istenilen bir özelliktir ve bu alaşımlardan üretilen parçaların servis ömrünü artırmak için gereklidir. Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini ve aşınma direncini etkileyen en önemli parametreler ise tane boyutu ve yapısı, inklüzyonlar, çökeltiler, intermetalik fazlar ve yapıda oluşan boşluk miktarıdır [5]. Kori ve Prabhudev yaptıkları bir çalışmada, A356 ve 0.5% Cu ilaveli A356 alaşımlarının aşınma testlerinde kayma hızı ve mesafesindeki artışa rağmen, aşınma oranının iyileştirildiğini belirtmektedirler [6]. Bu çalışmada, döküm yöntemi ile farklı miktarlarda Cu (%0.1, 0.2 ve 0.4 Ağ.) ilave edilerek üretilen A356 alaşımlarında, Cu miktarının alaşımların mikro yapıları ve yapıda oluşan fazların, alaşımların aşınma davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

## 2. MALZEME VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

DeneySEL çalışmalarda kullanılan A356 alaşımı ve elektrolitik bakırın kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir. Ergitme işlemlerinde grafit potali ve 12 kW gücünde elektrik direnç ocağı kullanılmıştır. A356 alaşımı ergitildikten sonra, %0.1, 0.2 ve 0.4 Cu bileşimine ulaşmak için hesaplanan miktarda elektrolitik bakır (Cu) sıvı metale ilave edilerek aynı sıcaklıkta (ergimesi ve homojen karışmasının sağlanması) için 10 dak. bekletilmiştir. 60-70 AFS tane iriliğine sahip silis kum, reçine ve sertleştirici ilave edilerek hazırlanan kalıplarda, sıvı metalin hazırlanması ve aktarılması sırasında oluşması muhtemel inklüzyonların uzaklaştırılması için (20 ppi) seramik köpük filtreler kullanılmıştır. Ergitilen sıvı metal hazırlanan kum kalıplara, 730-740 °C sıcaklıkta dökülmüştür. Döküm işlemi sonrasında kimyasal analizlerin belirlenmesinde OBLF GS-1000 spektral analiz cihazı kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Çalışmada kullanılan A356 ve elektrolitik bakırın kimyasal bileşimi (Chemical composition of A356 and electrolytic cooper are used in study)

Alaşım	Elementler (% Ağ.)							
	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Al
A356	7.20	0.392	0.18	-	0.001	0.120	0.005	Kalan
Elektrolitik Bakır	-	-	-	99.99	-	-	-	-

Döküm işlemleri tamamlandıktan sonra, üretilen farklı Cu bileşimine sahip A356 alaşımlarına T6 ısıl işlemi yapılmıştır. T6 ısıl işlemi için üretilen alaşımlar 540 °C'de 8 saat solüsyona alınarak suda hızlı soğutulmuştur. Oda sıcaklığına hızlı soğutulan alaşımlara 24 saat doğal ve 170 °C'de 10 saat yapay yaşlandırılma ısıl işlemi yapılmıştır. Farklı miktarlarda Cu içeren döküm A356 alaşımları optik mikroskop incelemeleri için (ASTM E04.01 standardına göre) metalografik işlemler yapılmıştır. Hazırlanan numuneler Keller solüsyonu (2ml HF (48%) + 3ml HCl + 5ml HNO<sub>3</sub> + 190ml H<sub>2</sub>O) ile 30-45 sn. dağlanmıştır. Optik mikroskop incelemeleri,

MEIJI marka optik mikroskop ve MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz programında yapılmıştır. Ayrıca, karakterizasyon çalışmalarında Carl Zeiss Ultra Plus Gemini (FEG) marka taramalı elektron mikroskobu ve Rigaku Ultima IV X-Ray Diffractometer (XRD) cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinde SHIMADZU marka mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Alaşımların sertlikleri, bütün alaşım gruplarında 2 N yük altında, 2 farklı numuneden 10 adet sertlik ölçümünün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Üretilen alaşımların yoğunlukları Arşiment prensibine göre Precisa marka yoğunluk ölçüm kitinde yapılmıştır. Aşınma testlerinde, standart pin-on tipi aşınma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma testleri, ASTM G99-05 standardına göre yapılmıştır. Aşınma testlerinde 1ms<sup>-1</sup> kayma hızı, üç farklı yük (10, 20 ve 40 N) ve dört farklı kayma mesafesi (500, 1000, 1500 ve 2000 m) kullanılmıştır. Bütün alaşım gruplarından 3 adet numuneye aşınma testi uygulanmıştır. Elde edilen ağırlık kaybı verilerinin ortalaması alınmıştır. Aşınma testlerinde, test öncesinde aşındırıcı disk ve numune yüzeyleri aseton ile temizlenmiştir. Aşındırılan numuneler hassas terazide tartılarak, ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Aşınma testlerinde karşılık malzemesi olarak, Ø230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60-64 HRC sertliğinde AISI 4140 çelik disk kullanılmıştır. Aşınma testleri tamamlandıktan sonra, numune yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Aşınma oranı hesaplamalarında Eşitlik 1. kullanılmıştır.

$$W_a = \frac{\Delta G}{d \times P \times S} \dots \dots \dots (1)$$

Burada, W<sub>a</sub> aşınma oranı (mm<sup>3</sup>/Nm), ΔG ağırlık kaybını (gr), d yoğunluk (gr/cm<sup>3</sup>), P aşınma testinde uygulanan yük (N) ve S aşınma mesafesidir.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### 3.1. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructure Examination)

Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımlarının döküm işlemleri sonrasındaki kimyasal bileşimleri Çizelge 2 'de verilmiştir.

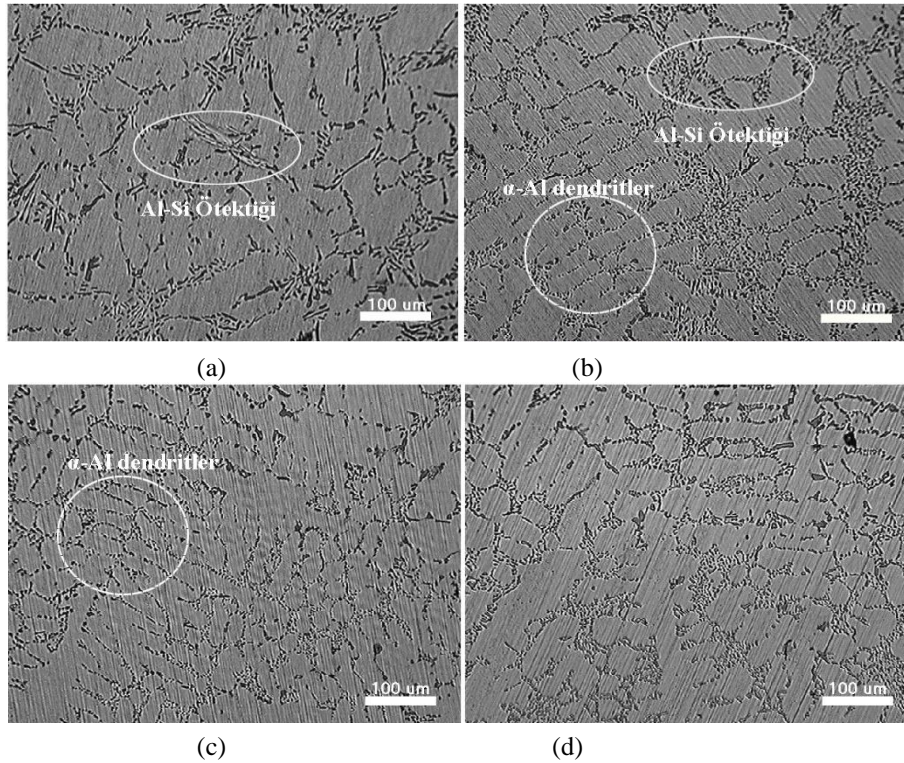
**Çizelge 2.** Farklı miktarda Cu içeren A356 alaşımlarının kimyasal bileşimleri (Chemical composition of A356 alloys with various Cu amount)

Alaşım Grupları	Elementler (%Ağ.)							
	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Al
A356	7.21	0.375	0.19	-	0.001	0.120	0.005	
Cu 0.1	7.83	0.37	0.125	0.103	0.001	0.106	0.005	Kalan
Cu 0.2	7.6	0.379	0.14	0.218	0.001	0.108	0.005	
Cu 0.4	7.64	0.35	0.129	0.392	0.001	0.106	0.0051	

Şekil 1’de farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımlarının optik mikroskop (OM) görüntüleri verilmiştir. Bu OM görüntüleri incelendiğinde, Cu miktarına bağlı olarak meydana gelen mikro yapısal değişimler görülmektedir. A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının artmasıyla Si parçacık boyutlarının azalarak incelendiği ve morfolojisinin lameler (fibrous) yapısının küresel doğru değiştiği gözlenmektedir. Ayrıca dendritlerin daha düzenli gelişerek, ikincil dendrit kollar arasındaki mesafe de (SDAS) azalmaktadır. SDAS A356 alaşımında 31  $\mu\text{m}$ , 0.1 Cu ilave edildiğinde 26  $\mu\text{m}$ , 0.2 Cu ilave edildiğinde 24  $\mu\text{m}$  ve 0.4 Cu ilave edildiğinde ise 23  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Yaşlandırılmış Al-Si-Mg alaşımlarının mikro yapısı  $\alpha$ -alüminyum dendritler, Al-Si ötektığı, Fe bazlı

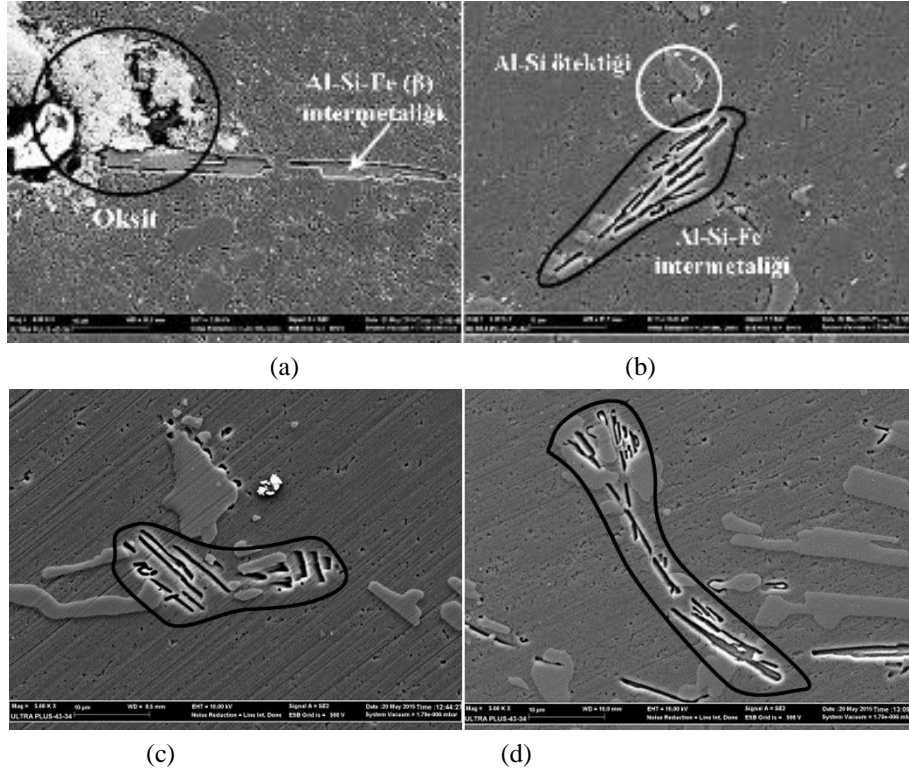
intermetalikler (Fe miktarına bağlı olarak) ve yaşlandırma  $\text{Mg}_2\text{Si}$  fazından oluşmaktadır [8].

Şekil 2’de farklı Cu oranlarındaki A356 alaşımlarının SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, alaşımların katılaşması sırasında yapıda demir bazlı intermetaliklerin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu intermetalik fazlar içerdikleri demir miktarına ve morfolojisine göre sınıflandırılmaktadır. Genellikle bu fazlar çubuk şekilli  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Si}$ , ve  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  ve  $\text{Al}_{19}\text{Fe}_4\text{MnSi}_2$  fazlardır [9]. Bu intermetalik fazlar özellikle döküm malzemelerin yapısındaki hataların olduğu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Çubuk şekilli  $\beta$ - $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Si}$  fazı,  $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$  ve  $\text{Al}_{19}\text{Fe}_4\text{MnSi}_2$  fazlarına göre daha kalın ve keskin köşelidir. A356 alaşımının SEM

**Şekil 1.** Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımının OM görüntüleri; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) ve Cu 0.4 (d) (OM images of A356 alloys with various Cu amount; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) and Cu 0.4 (d))

görüntüsünde (Şekil 2a) oksit ve silisyum parçacıkları çevresindeki kusurlu bölgede çekirdeklenen  $\beta$ - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$  fazı görülebilmektedir. %0.1, 0.2 ve 0.4 Cu içeren alaşım sistemlerinde ise demir bazlı intermetaliklerin incelendiği ve alüminyum matriste homojen olarak dağıldığı anlaşılmaktadır.

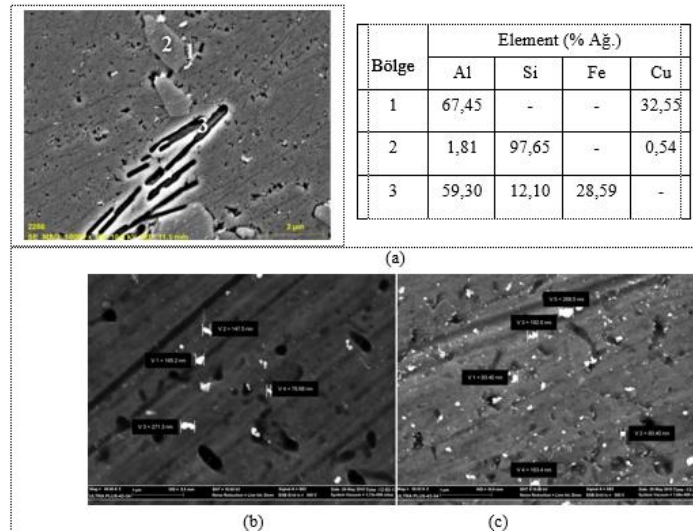
3a) Al-Si ötektığı (1.nokta), çevresinde bakır ilavesi ve yaşlandırma ısıl işlemine bağlı olarak oluşan  $\text{Al}_2\text{Cu}$  çökelti fazı (2.nokta), demir intermetalığı (3.nokta) olduğu görülmektedir. Ayrıca %0.2 Cu (Şekil 3b) ve %0.4 Cu içeren A356 alaşımının (Şekil 3c) SEM görüntüleri. %0.2 ve 0.4 Cu miktarına sahip A356



Şekil 2. Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımının SEM görüntüleri; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) ve Cu 0.4 (d) (SEM images of A356 alloys with various Cu amount; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) and Cu 0.4 (d))

Farklı Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının dayanımının artırılması için T6 ısıl işlemi yapılmıştır. Şekil 3'te yaşlandırılan alaşımların SEM görüntüleri ve EDS analizi sonucu verilmektedir. % 0.1 Cu içeren A356 alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizlerinde (Şekil

alaşımlarında yapıda oluşan nano boyutlu  $\text{Al}_2\text{Cu}$  çökeltileri görülmektedir. Cu miktarının artması ile yapıda oluşan  $\text{Al}_2\text{Cu}$  çökeltilerin boyutları ve hacimsel miktarı da artmaktadır. %0.2 Cu A356 alaşımında  $\text{Al}_2\text{Cu}$  çökeltilerin boyutları 76-271nm olarak ölçülürken, %0.2



Şekil 3. Cu 0.1 alaşımı SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu (a), Cu 0.2 (b) ve Cu 0.4 alaşımlarının SEM görüntüleri. (SEM image and EDS result of Cu 0.1 alloy (a), SEM image of Cu 0.2 alloy (b) and SEM image of Cu 0.4 alloy



Cu A356 alaşımında 94-269 nm olarak ölçülmüştür. Al<sub>2</sub>Cu çökeltilerin minimum ve maksimum boyutları hemen hemen yakın olmasına rağmen boyutsal dağılımları farklıdır.

Farklı Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının içerdiği fazların belirlenmesi için yapılan XRD analizi sonucu Şekil 4'te verilmektedir. Alaşımların yapısında Al matris fazı (2θ yansıma açısı, açısı 39, 43 ve 64°), Al<sub>2</sub>Si ötektik fazı (2θ yansıma açısı, 39, 43, 64, 112 ve 116-117°) oluşmaktadır. Ayrıca Cu ilave edilmemiş A356 alaşımında Mg<sub>2</sub>Si fazı (2θ yansıma açısı) 64° ve 78° oluşurken, Cu ilave edilen A356 alaşımlarında Al<sub>2</sub>Cu fazının (2θ yansıma açısı) 27, 38, 42, 47, 57, 79 ve 99° oluştuğu belirlenmiştir. Özellikle bakır ilavesinin artması ile Al<sub>2</sub>Cu fazı pik yüksekliklerinin (2θ yansıma açısı, 27 ve 38 °) arttığı görülmektedir. A356 alaşımının %0.4 bakır ilavesi sonrasında Al-Si ötektiklerinin pik yüksekliğindeki artış dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, Cu ilavesi ile yapıda oluşan β-Al<sub>5</sub>FeSi intermetaliklerinin ve Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si intermetalikliği arasında faz ve morfolojik dönüşümün gerçekleştiği düşünülmektedir. β-Al<sub>5</sub>FeSi intermetaliklerinin oluşumunu %0.1 ve 0.2 Cu içeren alaşım sisteminde azalırken (2θ yansıma açısı, 38 °) %0.4Cu içeren A356 alaşımında ise aniden artmaktadır. Lee vd., farklı demir içeriğine sahip Al-Si alaşımlarında β-Al<sub>5</sub>FeSi intermetaliklerinin α-Al<sub>8</sub>Fe<sub>2</sub>Si intermetalikliğine dönüştüğünü belirtmektedirler [10]. Başka bir çalışmada ise, Sivarupan vd., düşük silis ve yüksek demir oranına sahip Al-Si-Cu-Mg-Fe alaşım sistemlerinde Cu ilavesinin artması ile tane inceltme etkisinin ve mikroyapı morfolojisini değiştirdiğini

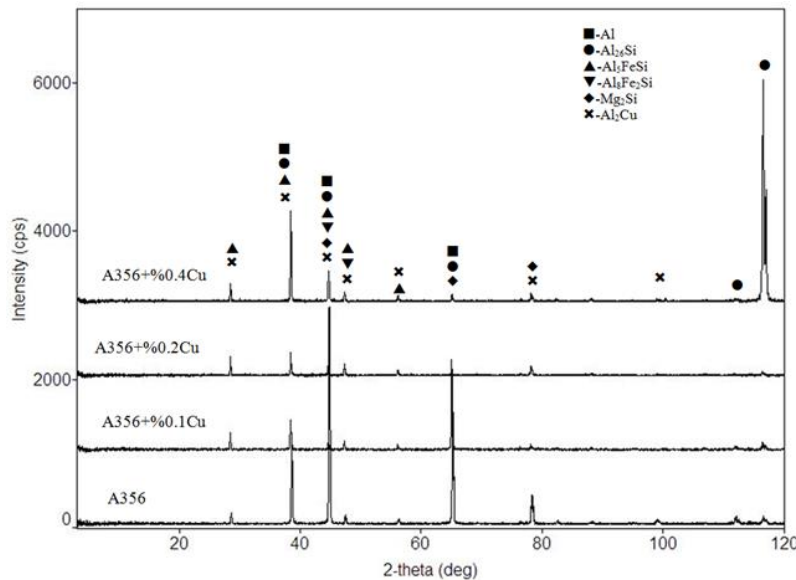
sertlik değerlerinin bir miktar arttığı görülmektedir. Bunun sebebi yaşlandırma ile yapıda oluşan Al<sub>2</sub>Cu fazıdır (Şekil 3). Oluşan Al<sub>2</sub>Cu çökeltileri boyut ve dağılımına bağlı olarak sertlik değerlerindeki S.S'nın arttığı düşünülmektedir.

**Çizelge 3.** Farklı Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının sertlik sonuçları (Hardness result of A356 alloys with various Cu amount)

Alaşım Grupları	Sertlik (HVM0.2)	
	O.S.S	S.S (±)
A356	90	5.4
Cu 0.1	93	7.9
Cu 0.2	99	5.6
Cu 0.4	100	12.0

#### Aşınma Davranışı (Wear Behaviour)

Bir malzemenin mekanik özellikleri ve aşınma davranışı, mikro yapıyı oluşturan fazlar ve faz miktarları ile doğrudan ilgilidir. Farklı miktarda Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının üç farklı yük altındaki ağırlık kayıpları ve aşınma oranları Şekil 5'te verilmiştir. Ağırlık kaybı grafikleri incelendiğinde, 10 ve 20 N yük altında en düşük ağırlık kaybı 0.2 ve 0.4 Cu alaşımlarında elde edilirken, 40 N yük altında ise 0.4 Cu alaşımında elde edilmiştir. Bununla birlikte, 40 N yük altında Cu ilave edilmeyen A356 alaşımı da hemen hemen 0.4 Cu alaşımına yakın ağırlık kaybı elde edilmiştir. Bunun sebebi, sürtünme sırasında meydana gelen deformasyon etkisi ile yumuşak matristen kopan parçacıkların tekrar yüzeye yapışmasıdır. Chen vd. tarafından yapılan bir çalışmada, Al-12.5Si-1.0Mg alaşımlarında 10N yük altında aşınma oranının bakır ilavesinden bağımsız

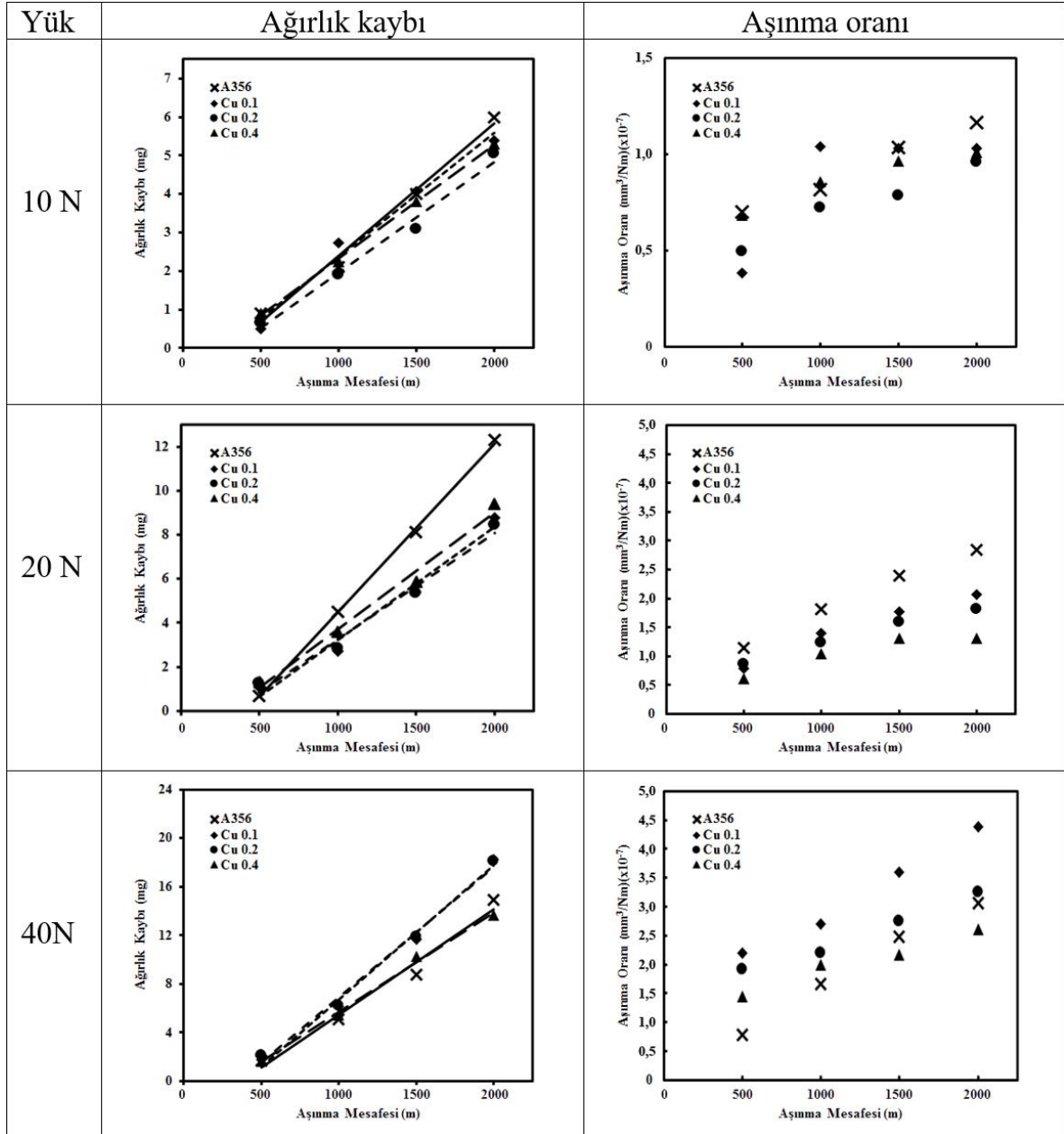


**Şekil 4.** Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımlarının XRD analizi sonuçları.(XRD analysis result of A356 alloys with various Cu amount)

vurgulamaktadırlar [11]. Chen vd., Mg<sub>2</sub>Si fazının Cu ilavesi ile oluşmasının azaldığını not etmişlerdir [12].

Farklı Cu miktarına sahip alaşımların ortalama sertlik sonuçları (O.S.S) ve standart sapmaları (S.S.) Çizelge 3'de verilmiştir. Cu miktarının artmasına bağlı olarak

olarak değiştiğini, fakat 40N yük altında ise Cu miktarının artmasıyla aşınma direncinin iyileştirildiği belirtilmiştir [12]. Test edilen alaşımlarda ağırlık kaybı, aşındırıcı disk ve test malzemesi arasındaki teması bağlı olarak gelişmektedir. Uygulanan yükünün artmasına bağlı olarak, ağırlık kaybı da artmaktadır.

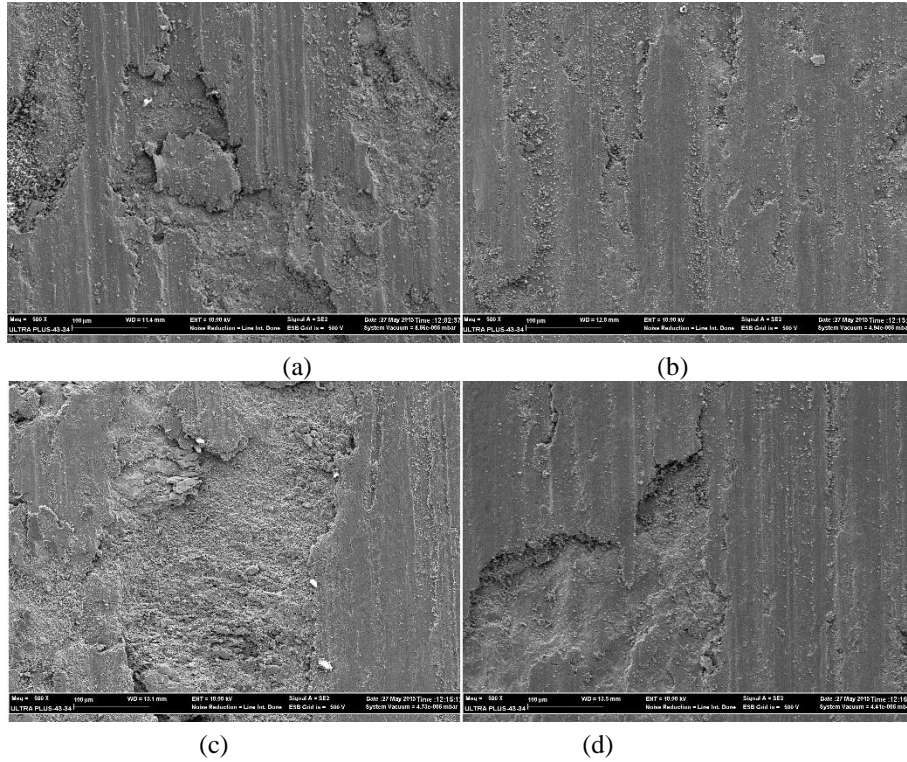


Şekil 5. Farklı Cu içerikli A356 alaşımların farklı yüklerdeki ağırlık kaybı ve aşınma oranı grafikleri (Wear loss and wear rate graphics of A356 with various Cu amount, in different load)

Ayrıca, Al-%13Si alaşımlarına ilave edilen Mg miktarına bağlı olarak yapıda oluşan  $Mg_2Si$  fazı da aşınma davranışını iyileştirmektedir [13]. Şekil 5’de verilen aşınma oranı sonuçları incelendiğinde, 10 N yük altında 0.2 Cu alaşımının, 20 ve 40 N yük altında 0.4 Cu alaşımının aşınma oranlarının daha düşük olduğu görülmektedir. 10 N yük altında 0.2 Cu alaşımının aşınma oranının özellikle 1000- 2000 m. mesafelerde 0.4 Cu alaşıma göre düşük olmasının sebebi, yaşlandırma ile yapıda oluşturulan  $Al_2Cu$  fazından kaynaklanmaktadır. Çizelge 3 de verilen sertlik sonuçları da bu sonuçları desteklemektedir.

Şekil 6’da farklı Cu içerikli A356 alaşımlarının 40 N yük altında 2000 metre kayma mesafesi sonunda elde edilen

aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerde numune ve disk arasındaki sürtünme etkisi ile yüzeylerde ağır deformasyon meydana geldiği görülebilmektedir. Özellikle Cu ilavesiz A356 alaşımın aşınma yüzeyinde (Şekil 6a), sürtünme sırasında yüzeyden kopan parçacıkların tekrar yüzeye yapışarak sıvandıği anlaşılmaktadır. Aynı etki diğer alaşımlarda da gözlenmektedir. Ayrıca aşınma yüzeylerinde çizikler ve dökülmeler de gözlenmektedir. Genel olarak yüzeylerde adhezif aşınma mekanizmasının aktif olduğu, bununla birlikte kısmen abrasif aşınmanın da olduğu anlaşılmaktadır.



**Şekil 6.** 40 N yük altında aşınma testi uygulanan A 356 alaşımların aşınma yüzeyleri SEM görüntüsü. A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) ve Cu 0.4 (d) (Worn surfaces SEM images of A356 alloys (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) and Cu 0.4 alloy (d), under 40 N load)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı Cu miktarına sahip A356 döküm alaşımlarının mikro yapısı ve aşınma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının (%0.1 ile 0.4) artması ile yapıda oluşan  $Al_2Cu$  intermetaliklerin boyutu ve miktarı artmaktadır. Ayrıca Al-Si ötektığının yapısı da incelenmektedir.
- A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının artmasıyla alaşımın sertliğinde yaklaşık %10 artış olmaktadır.
- Aşınma testinde uygulanan yükün artması ile ağırlık kaybının arttığı belirlenmiştir. 10 ve 20 N yük altında en düşük ağırlık kaybı %0.2 ve %0.4 Cu alaşım gruplarında olmasına karşın, 40N yük altında ise A356 ve %0.4 Cu alaşım sistemlerinde elde edilmiştir.
- Aşınma testleri sonucunda en düşük aşınma oranları 10N yük altında %0.4 Cu alaşımında, 20 N yük altında A356 alaşımlarında, 40 N yük altında ise %0.4 Cu alaşımında elde edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmaya KBÜ-BAP-14/1-YL-013 nolu proje kapsamında destek sağlayan Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Edwards K.L., "Strategic substitution of new materials for old: Applications in automotive product development", *Materials and Design*, 25: 529–533, (2004).
- [2] Reif W., Dutkiewicz J., Ciach R., Yu S., Krol J., "Effect of ageing on the evolution of precipitates in AlSiCuMg alloys", *Materials Science and Engineering A*, 234–236: 165-168, (1997).
- [3] Wang G., Bian X., Wang W., Zhang J., "Influence of Cu and minor elements on solution treatment of Al–Si–Cu–Mg cast alloys", *Materials Letter*, 57: 4083–4087, (2003).
- [4] Wang E.R., Hui X.D., Wang S.S., Zhao Y.F., Chen G.L., "Improved mechanical properties in cast Al–Si alloys by combined alloying of Fe and Cu", *Materials Science and Engineering A*, 527: 7878–7884, (2010).
- [5] Lumley R., "Fundamentals of Aluminium Metallurgy, 1st Edition, Production, Processing and Applications", Application of modern aluminium alloys to aircraft , *Woodhead Publishing*, Cambridge, (2010).
- [6] Kori S.A., Prabhudev M.S., "Sliding wear characteristics of Al-7Si-0.3Mg alloy with minor additions of copper at elevated temperature", *Wear*, 271: 680–688, (2011).
- [7] Chen M., Perry T., Alpas A.T., "Ultra-mild wear in eutectic Al–Si alloys", *Wear*, 263: 552–561, (2007).
- [8] Voort G.F.V., "Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys ", *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures, ASM International*, Materials Park, USA, (2004).
- [9] Samuel E., Samuel A. M., Doty H. W., Valtierra S. and Samuel F. H., "Intermetallic phases in Al–Si based cast

- alloys: new perspective”, *International Journal of Cast Metals Research*, 27: 107-114, (2014).
- [10] Lee S., Kim, B., Lee S., "Prediction of Solidification Paths in Al-Si-Fe Ternary System and Experimental Verification: Part I. Fe-Containing Hypoeutectic Al-Si Alloys", *Materials Transactions*, 52: 1053-1062, (2011).
- [11] Sivarupan T., Taylor J. A., and Caceres C. H., "Alloy Composition and Dendrite Arm Spacing in Al-Si-Cu-Mg-Fe Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44: 4071-4080, (2013).
- [12] Chen W.C., Wu C.T., Bor H.Y., and Lee S. L., "Effects of Cu Content on Thermal Stability and Wear Behavior of Al-12.5Si-1.0Mg Alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22: 3854–3859, (2013).
- [13] Kun X.I.E., Mei-qing C.A.O., Peng-cheng X.I.A., Li-jie Y.U.E., "Improving wear resistance of magnesium by droplet spraying of Al-Si alloy”, *Journal of Central South University*, 20: 1781–1785, (2013).