



# Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-Cu-Mg alaşımlarının mikroyapı ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi

## Investigation of the microstructure and tribological properties of Al-Cu-Mg alloys produced by powder metallurgy

Murat Beder<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, Al-Cu-Mg alaşımı 450°C (A), 500°C (B) ve 550°C (C) sıcaklıklarında sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Sıcak presleme yöntemi kullanılarak yoğunlaştırılan A, B ve C kodlu numunelerin sıcak pres sonrası mikro yapısı ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarda elde edilen mikro yapı incelemelerinde A kodlu numunedeki porozite miktarının B ve C kodlu numunelerdeki porozite oranına göre yüksek olduğu ve artan presleme sıcaklığı ile yoğunluğun doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Buna ek olarak artan pres sıcaklığı ile birlikte iç yapıda bulunan  $\alpha$ -Al fazının nispeten daha düzgün ve eş taneler şeklinde yapıya homojen dağıldığı gözlenmiştir. En yüksek sertlik değeri 550°C'de sıcak presleme işlemine tabi tutulan C kodlu numunede elde edilmiştir. Buna göre, C numunesinin sertlik değeri B kodlu numuneye göre %20, A kodlu numuneye göre %26, mikro sertlik değeri ise B kodlu numuneye göre %30 A kodlu numuneye göre %33'lük bir artış sergilemiştir. Ayrıca A, B ve C kodlu numunelerin yoğunluk değerleri sırasıyla, 2.7554, 2.7640 ve 2.7655 gr/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Yapılan sürtünme ve aşınma testlerinden elde edilen hacim kaybı-çevrim sayısı verilerine göre en düşük aşınma direnci A numunesinde, en yüksek aşınma direnci ise C numunesinde elde edilmiştir. Buna göre 25x10<sup>3</sup>, 50x10<sup>3</sup> ve 75x10<sup>3</sup> çevrim sayısındaki C kodlu numune A numunesine göre sırasıyla %39, %23 ve %45 daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir. Farklı sıcaklıklarda presleme işlemi yapılan A, B ve C numunelerinin aşınma yüzeylerinin, aşınma parçacıklarının ve bilye yüzeylerinin benzer görüntü sergilediği belirlenmiştir. Buna göre aşınma yüzeyleri sıvama tabakalarından ve soyulmalardan, aşınma parçacıklarının irili ufaklı tozlardan bilye yüzeylerinin ise sıvama tabakalarından meydana geldiği gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Al-Cu-Mg alaşımı, Sıcak presleme, Sertlik, Mikro yapı, Triboloji

### 1 Giriş

Metal malzemeler içerisinde alüminyum (Al) ve alaşımları gerek saf gerekse alaşım halinde en çok kullanılan matris malzemeleridir [1-3]. Saf alüminyumun oksijene olan ilgisinden dolayı döküm kabiliyetinin kötü oluşu ve mekanik özelliklerinin düşük olmasından dolayı alaşımlama yapılarak

### Abstract

In this study, Al-Cu-Mg alloy was hot pressed at 450°C (A), 500°C (B) and 550°C (C). The microstructure and tribological properties of the samples A, B and C, which were densified by hot pressing method, were investigated after hot pressing. In the microstructure examinations obtained as a result of the experiments, it was determined that the amount of porosity in the sample coded A was higher than the porosity ratio in the samples coded B and C and the density increased in direct proportion with increasing pressing temperature. In addition, with increasing pressing temperature, it was observed that the  $\alpha$ -Al phase in the microstructure was relatively more uniform and homogeneously distributed in the structure in the form of equal grains. The highest hardness value was obtained in sample C, which was subjected to hot pressing at 550°C. Accordingly, the hardness value of sample C increased by 20% compared to sample B, 26% compared to sample A, and the microhardness value increased by 30% compared to sample B and 33% compared to sample A. In addition, the density values of specimens A, B and C were determined as 2.7554, 2.7640 and 2.7655 g/cm<sup>3</sup>, respectively. According to the volume loss-cycle number data obtained from the friction and wear tests, the lowest wear resistance was obtained in sample A and the highest wear resistance was obtained in sample C. Accordingly, at 25x10<sup>3</sup>, 50x10<sup>3</sup> and 75x10<sup>3</sup> cycles, sample C exhibited 39%, 23% and 45% higher wear resistance than sample A, respectively. It was determined that the wear surfaces, wear particles and ball surfaces of specimens A, B and C, which were pressed at different temperatures, exhibited a similar appearance. Accordingly, it was observed that the wear surfaces consisted of smearing layers and delamination, the wear particles consisted of large and small debris and the ball surfaces consisted of smearing layers.

**Keywords:** Al-Cu-Mg alloy, Hot pressing, Hardness, Micro structure, Tribology

özellikleri geliştirilmeye çalışılmaktadır [1-5]. Al alaşımlarının yaygın olarak kullanılma sebeplerinin başında dayanım/özellik ağırlık oranının yüksek olması, elektrik iletkenliği/özellik ağırlık oranının yüksek olması, korozyon dirençlerinin yüksek olması ve plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olması gelmektedir [4-10]. Literatür

kapsamında yapılan çalışmalara bakıldığında Al alaşımları arasında en yaygın kullanıma sahip alaşım grubunun Al-Cu-Mg alaşımları olduğu göze çarpmaktadır [1-5, 10-12]. Esas olarak alüminyum, bakır ve magnezyumdan oluşan bu alaşım, 2xxx serisinin iyi bilinen bir ısıl işlem alaşımıdır [1-5, 10]. Al-Cu-Mg alaşımı, uçak endüstrisinde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Al-Cu-Mg, uçak gövdesinde, uçak kanatlarında, dümende, uçak egzoz borularında, uçak kapılarında, zeminlerinde ve diğer havacılık bileşenlerinde, koltuklarda, motor türbinlerinde ve uçak kokpitinde kullanılan bazı parçalarda kullanılır [2, 3, 10-15]. Yukarıda bahsedildiği gibi Al alaşımlarının döküm kabiliyetlerinin kötü olması ve mekanik özelliklerinin düşük olması bu alanda farklı yöntemlerin kullanımına sebep olmuştur. Bu yöntemlerin başta gelenlerinden birisi toz metalürjisi (TM) yöntemidir.

Toz metalürjisinde küçük parçacıklar bir araya gelmesi ile presleme ve yüksek sıcaklık uygulanarak parça imalatı yapılmaktadır [16-19]. Bu küçük parçacıklara örnek olarak saf metallere, alaşımlar ve seramikler verilebilir [18-20]. Söz konusu bu parçacıklar basınç altında şekillendirilmeye uygundur. Sonraki adımda bu parçacıklara ana malzemenin ergime noktasının altında bir sıcaklıkta basınç uygulanarak yoğunlaşmanın istenilen ölçüde olması sağlanmaktadır [18-20]. Toz metalürjisinde düşük maliyetlerle karmaşık parçaların imalatı gerçekleştirilebilmektedir [20-22]. Ayrıca bu yöntem ile malzeme sarfiyatı en aza indirilebilmektedir [20-22].

Toz metalürjisi yapılırken olması istenen parçanın ölçülerindeki kalıba toz koyulur. Sonraki adımda tozların birbiriyle etkileşimini sağlamak adına ön yükleme uygulanır. Bu etkileşimin (bağlanmanın) daha efektif olması adına sıkıştırılan tozlara faz difüzyonunun gerçekleşmesi için ana fazın ergime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta ısıl işlem uygulanır. Toz metalürjisi yönteminde ergime ya da kalıba döküm işlemleri olmadığı dolayısıyla maliyet en aza indirilmiş olur [18-22].

TM yöntemi döküm yönteminde olduğu gibi bir ergime işleminin olmayışı istenmeyen reaksiyonların gerçekleşmesine engel teşkil etmektedir. Bu yüzden bu yöntem daha çok kompozit malzeme üretiminde yüksek oranlarda takviye içeren malzemelerde etkin olarak kullanılmaktadır [18-22].

Literatür kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde, Akopyan ve diğerleri, [23] sıcaklığı  $515 \pm 5^\circ\text{C}$ , basınç değeri 100 MPa, tutma süresi 3 saat olan sıcak pres uygulaması alüminyum matrisli Al-Si-Cu kompozit alaşımından yapılmış dökümlerin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak alaşımın mukavemetinin 335'ten 360 MPa'a, bağıl uzamanın  $\sim\%35$  (2,0'den  $\%2,8$ e) oranında arttığını ve mekanik özelliklerin belirgin şekilde iyileştiğini belirlenmişlerdir.

Teng ve diğerleri [24] Al ve Cu arasındaki difüzyon bağlaması sıcak presleme (HP) yöntemiyle başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık  $500^\circ\text{C}$  olduğunda, 50 MPa'lık bir işleme basıncıyla 3 saat boyunca tutulduğunda, Al ve Cu, birkaç difüzyon katmanından oluşan ara yüzüyle bağlandı sonucuna varılmıştır.

Ammar ve diğerleri [25] sıcak preslemenin Al-Si-Cu-Mg döküm alaşımının yorulma ömrü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yüzey gözenekliliği, sıcak preslenmemiş numunelerin yorulma ömrü üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirlenmiştir. Sıcak preslemenin, gözenekliliği ortadan kaldırarak ve/veya gözeneklerin boyutunu azaltarak numunelerin yorulma ömrünü önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir.

Zhao ve arkadaşlar [26], bir çalışmada, Al-Si-Cu alaşımlarının mikro yapısını ve özelliklerini iyileştirmek için hızlı katılaştırma/toz metalürjisi ile sıcak ekstrüzyonun birleşimine dayanan yeni bir yöntem önermiştir. Ekstrüde edilmiş Al-Si-Cu alaşımının faz bileşimi, mikro yapısı ve mekanik özellikleri sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, ekstrüde işlemi Al-Si-Cu alaşımının yoğunluğunu iyileştirirken gözenekliliği önemli ölçüde azaltmıştır. Ekstrüde edilmiş alaşımın çekme mukavemeti ve uzama değerleri, ekstrüde edilmemiş alaşımın değerlerinden çok daha büyüktür. Önerilen yöntemin kullanımı, geleneksel döküm yöntemine göre Al-Si-Cu alaşımının mekanik özelliklerini büyük ölçüde iyileştirmiştir.

Suresh ve arkadaşları [27] ise yaptıkları çalışmada Al-Si-Mg alaşımlarının dökülmüş ve kompozit durumundaki aşınma davranışlarını 600-2400 m kayma mesafesi aralığında incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda artan kayma mesafesiyle aşınma kaybının arttığını ve 2400 m sonundaki ağırlık kaybının 600 m kayma mesafesi sonunda oluşan ağırlık kaybından 1.2 kat daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Literatür kapsamında yapılan diğer birkaç çalışmada Alüminyum alaşımları üzerine aşınma davranışı ve ısıl işlem özellikleri incelenmiştir [28-30]. Bu çalışmalara göre Al-Cu-Mg 'nin akma dayanımı ve basma dayanımı, sırasıyla  $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  gerinim hızında yaklaşık 698-712 MPa değerine ulaşmış olup, bu değerler iri taneli Al-Cu-Mg (T6) alaşımına göre önemli ölçüde daha yüksektir. Al-Cu-Mg alaşımı üzerinde yapılan aşınma deneylerinde, 0,3'lük bir sürtünme katsayısı ve  $\sim 12 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^2$  bir aşınma oranı tespit edilmiştir. Bu değerlerin Al-Cu-Mg (T6) durumuna göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir [28-30].

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Al-Cu-Mg tozlarının sabit basınç değerinde değişken sıcaklıklarda preslenmesi sonucu mikro yapı, sertlik ve tribolojik özelliklerinin karşılaştırılması yapılarak literatüre kazandırılması amaçlanmıştır.

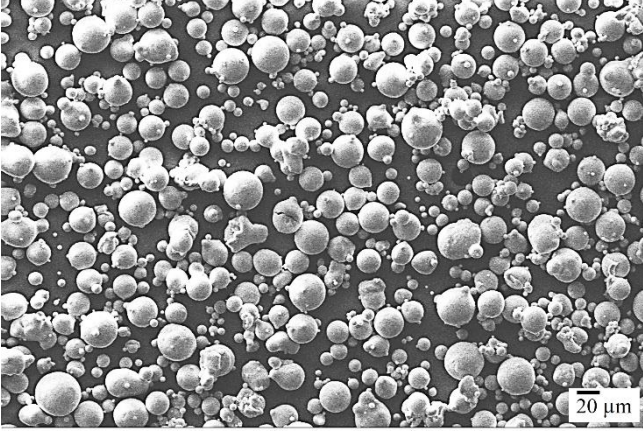
## 2 Materyal ve metod

Bu çalışmada Al-Cu-Mg alaşımı (ortalama parçacık boyutu 30-40  $\mu\text{m}$ ) ABD'den Alfa Aesar isimli firmadan temin edilmiştir.

Tablo 1'de Al-Cu-Mg alaşımının kimyasal bileşimi, Şekil 1'de ise, Al-Cu-Mg alaşım tozlarına ait toz morfolojileri verilmiştir.

**Tablo 1.** Al-Cu-Mg alaşımına ait kimyasal kompozisyon

Alaşım	Kimyasal bileşim (% ağırlık)									Teorik Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )
	Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	
Al-Cu-Mg	0.374	0.385	4.85	0.042	0.312	1.78	0.138	0.005	Kalan	2.77

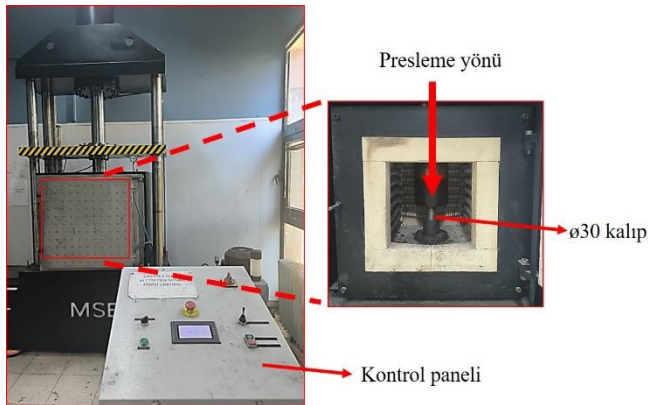


**Şekil 1.** Al-Cu-Mg tozlarına ait başlangıç morfolojisini gösteren SEM fotoğrafı

Şekil.1 incelendiğinde Al-Cu-Mg partiküllerin nispeten küresel bir morfolojiye sahip oldukları açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Değişken SP parametreleri kullanılarak üretilen Al-Cu-Mg alaşımının üretim parametreleri Tablo 2’de, bu işlemleri gerçekleştirmek için kullanılan sıcak pres (SP) makinesi ise Şekil.2’de yer almaktadır.

**Tablo 2.** Al-Cu-Mg alaşımına ait SP parametreleri

Numune kodu (Al-Cu-Mg)	SP		
	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Süre (saat)
A	450		
B	500	500	3
C	550		



**Şekil.2.** Sıcak presleme makinesi

Sıcak presleme işlemleri vakum ortamında, MSE marka zaman ayarlı sıcak presleme makinesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin nihai ölçüleri imalattan sonra 30 mm çap ve 15 mm kalınlıktır. Al-Cu-Mg malzemelerine ait mikro yapısal incelemeler için A, B ve C

numuneleri metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Bu metalografik işlemlerden olan dağlama, %5’lik floroborik asit (HBF<sub>4</sub>) ile Struers Lectropol cihazında elektrolitik dağlama yoluyla gerçekleştirilmiştir. Alaşımın mikro yapıları Zeiss Axio Observer A1m optik mikroskobu kullanılarak araştırılmıştır. Elementel analiz ise Edax Apex™ Octane Elite EDS System ile belirlenmiştir. Numunelerin mikrosertlik testleri ISO 6507-1:2018 standardına uygun şekilde Struers Duramin A/S DK-2750 cihazı kullanılarak 500 g yük altında gerçekleştirilmiştir. Makro sertlik testleri, Nemesis 9000 test cihazı ile 2.5 mm çapında çelik bilye ve 62.5 kg yük kullanılarak Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Hem mikro sertlik hem de sertlik testlerindeki değerler, doğrusal bir hat üzerinden 5 farklı bölgeden alınan değerlerin ortalamasıyla belirlenmiştir. Sertlik değerlerinin belirlenmesinde ölçüm konumu olarak kenarlardan 2.5 kat iz miktarı uzaklık esas alınmıştır. Buna ek olarak ölçüm yapılan izlerin arasındaki mesafe 3 iz miktarı olarak alınmıştır. Ölçümler 5 sertlik değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunelerin yoğunluk değerleri ise Arşimet yoğunluk prensibi kullanılarak ölçülmüştür.

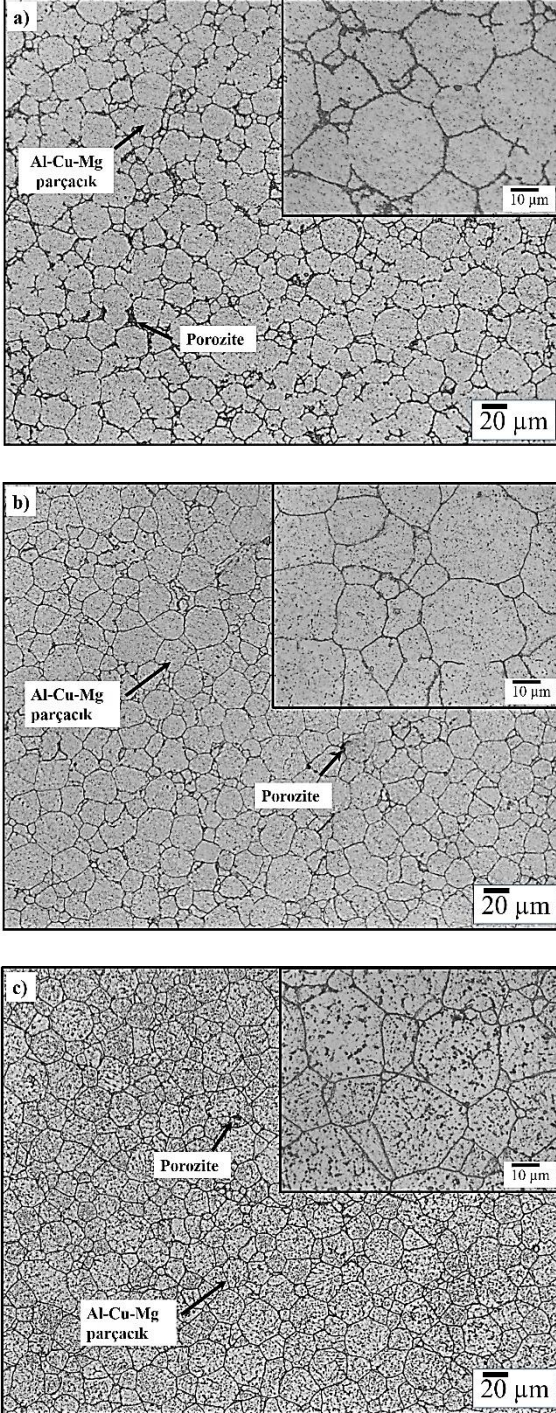
Numunelerin sürtünme ve aşınma özellikleri ASTM:G99 standartlarına göre, plaka üzerinde bilyeli disk tipi UTS Design Tribolog model aşınma cihazı ile ileri geri hareket yaptırılarak belirlenmiştir. Karşı aşındırıcı yüzey olarak 60±2 RSD-C sertliğinde 100Cr6 çeliğinden imal edilmiş 6 mm çapında bilyeler kullanılmıştır. Her bir sürtünme ve aşınma testinden önce numunelerin yüzeyleri zımparalanmış ve parlatılmıştır. Sürtünme ve aşınma testlerinde, test frekansı, test iz büyüklüğü ve test yükü sırasıyla 4 Hz, 8 mm ve 5 N olarak seçildi. Çevrim sayıları 25x10<sup>3</sup>, 50x10<sup>3</sup> ve 75x10<sup>3</sup>’dir ve her numune için en az 3 tekrar gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ve aşınma testlerinden önce ve sonra, numune yüzeyleri ultrasonik temizleyicide alkol + aseton karışımı kullanılarak 5 dakika boyunca temizlenmiştir. Sürtünme ve aşınma testleri sonucunda aşınan numunelerin kütle kaybı ±0.01 mg hassasiyete sahip bir terazi ile ölçülmüştür. Hacim kaybı ise ölçülen kütle kayıplarının Arşimet yoğunluk prensibiyle belirlenmiş numune yoğunluğuna bölünmesi ile belirlenmiştir. Sürtünme ve aşınma testleri sonucunda elde edilen toz parçacıkları karbon bant yardımı ile toplanmıştır. Numunelerin SEM fotoğrafları ve EDS ölçümleri, aşınma, toz ve bilye yüzeyleri Zeiss Evo LS10 cihazı kullanılarak incelenmiştir.

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Mikroyapı

450°C (A), 500°C (B) ve 550°C (C) sıcaklıklarında sıcak presleme uygulanmış Al-Cu-Mg numunelerinin mikro yapısı Şekil 3(a-c)’de gösterilmiştir. Sıcak presleme ile yoğunlaştırılmış bütün alaşım numunelerinin mikro

yapısında  $\alpha$ -Al fazı gözlemlenmiştir. Farklı sıcak presleme sıcaklıklarında üretilen A, B ve C numunelerinin mikro yapıları çoğunlukla eş eksenli ve birbirine benzer tanelerden oluşmuştur ve doku, Şekil 3(a), (b) ve (c)'de gösterildiği gibi net olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca artan sıcak presleme sıcaklığı ile yoğunluğun iyileşmesi  $\alpha$ -Al fazının yapı içerisine daha düzgün ve homojen yayılmasına ayrıca porozite miktarının azalmasına neden olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3. Sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg alaşımının mikro yapısını gösteren optik fotoğraflar; (a) 450°C (A), (b) 500°C (B) ve (c) 550°C (C)

Ayrıca, artan sıcak presleme sıcaklığıyla paralel olarak artan difüzyon hızı yoğunlaşmanın daha iyi olmasına, mikro yapıdaki porozite miktarının azalmasına ve artan sıkıştırılabilirlik etkisinden dolayı iç yapının nispeten daha düzenli ve küresel bir şekil almasına neden olmuştur. Nitekim sıcak presleme sıcaklığı artarken yoğunlaşmanın da iyileşmesi beklenen bir durumdur. Bu nedenle artan sıcaklık miktarı poroziteye ters etki ederek en yüksek sıcaklıkta en düşük porozite miktarının olmasına neden olacaktır.

### 3.2 Yoğunluk ve sertlik

Tablo.3, 450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında sıcak pres uygulaması yapılan A, B ve C kodlu numunelere ait sertlik, mikro sertlik ve yoğunluk değerlerini göstermektedir. Bütün pres sıcaklıklarında sertlik ve mikro sertlik değerleri ile yoğunluk değerleri benzer eğilim sergilemiştir. Sonuç olarak, sertlik ve mikro sertlik değerleri ile alaşımın yoğunluğu artan pres sıcaklığıyla sürekli artmıştır. Buna göre C kodlu numunenin sertlik değeri ile B kodlu numunenin sertlik değeri arasında %20, A kodlu numunenin sertlik değeri arasında ise %26 oranında bir fark belirlenmiştir. C numunesinin mikro sertlik değeri ise B kodlu numuneye göre %30, A kodlu numuneye göre %33'lük bir artış sergilemiştir. Sertlik ve mikro sertlik değerlerindeki artış yoğunlukla ilişkilidir. Nitekim artan sıcak presleme sıcaklığıyla birlikte Al-Cu-Mg alaşımının iç yapısındaki porozite miktarı azalmaktadır. Azalan porozite sertlik değerlerinin artmasına neden olmuş olabilir. Ayrıca artan presleme sıcaklığı alaşım iç yapısındaki difüzyon mekanizmasını hızlandırdığı için Al-Cu-Mg alaşımının iç yapısında bulunan  $\alpha$ -Al tanelerinin nispeten daha düzenli ve küresel bir şekil alması sertlik değerlerinin artmasına neden olmuş olabilir. Sonuç olarak yapılan deneylerde C kodlu numunenin yoğunluk değerinin A kodlu numuneye göre %0.3 oranında artış sergilediği belirlenmiştir.

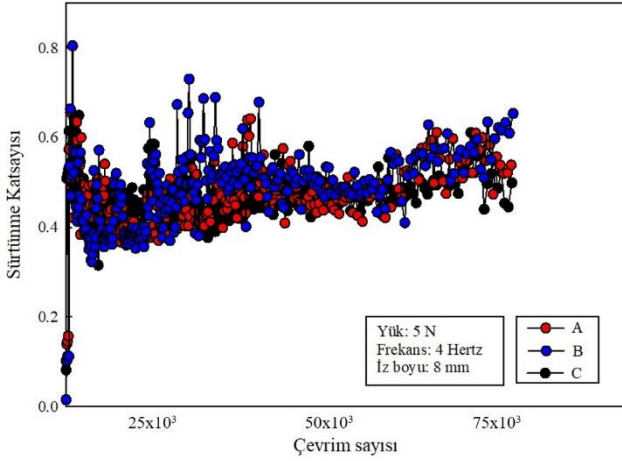
Tablo 3. A, B ve C kodlu numunelere ait sertlik, mikro sertlik ve yoğunluk değerleri

Numune kodu	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Bağlı yoğunluk (%)	Sertlik (BSD)	Mikrosertlik (VSD)
A	2.75548	99.4758	84.0±2	103.5±1
B	2.76405	99.7855	101.5±2	133.9±2
C	2.76552	99.8384	106.7±3	137.1±4

### 3.3 Sürtünme ve aşınma deneyleri

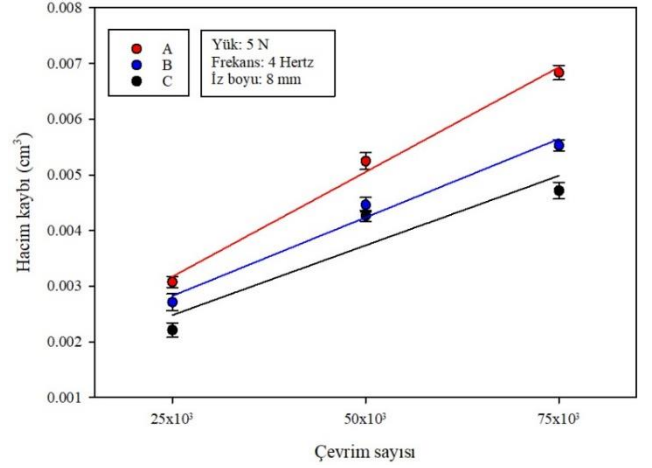
450°C, 500°C ve 550°C'de sıcak presleme işlemine tabi tutulmuş A, B ve C kodlu Al-Cu-Mg alaşımlarının çevrim sayısına göre sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Alaşım numunesinin sürtünme katsayısı test çalışmasının başlangıcında ani bir şekilde artmakta ve belli bir çevrim sayısından sonra kademeli olarak azalmakta ve ardından dalgalanmalarla karakteristiği sergilemektedir. Bu durum tribolojik açıdan değerlendirilebilir. Sürtünme ve aşınma testlerinde yukarıda açıklandığı gibi aşındırıcı olarak bilye kullanılmaktadır. Aşınma testlerinin ilk aşamasında, temas yüzeylerinde bilye-plaka şeklinde bir temas alanı oluşmaktadır. Bu, numune yüzeyinde yüksek basınç ve temas yüzeyleri arasında adezyon bağının oluşmasına neden

olur. Oluşan bu bağlar kaymaya karşı direnç oluşturarak sürtünme katsayısının deneyin başlangıç aşamasında ani bir şekilde artmasına neden olur. Deney devam ettikçe yüzeylerin birbirine alışması ile temas yüzey alanı nispeten artar ve kararlı durum sağlanır. Artan çevrim sayısı numune yüzeyinden kopan parçacıklar bilye yüzeyine sonra tekrar numune yüzeyine sıvanması şeklindeki malzeme transferi sürtünme katsayısında dalgalanmaya neden olur.



**Şekil.4.** 450°C, 500°C ve 550°C'de, 5 N yükte, 4 Hertz frekansta ve 8 mm iz boyunda sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg alaşımlarının sürtünme katsayısındaki değişim

Sürtünme ve aşınma deneyine tabi tutulan 450°C (A), 500°C (B) ve 550°C (C) sıcaklıklarında sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg numunelerine ait hacim kaybı değerlerinin çevrim sayısına göre değişimini gösteren grafik Şekil.5'te verilmiştir. Şekil.5, farklı sıcaklıklarda presleme işlemi yapılan bütün numunelerin hacim kaybı değerlerinin çevrim sayısı ile doğrusal bir şekilde arttığını göstermektedir. Buna göre, bütün çevrim sayıları için en yüksek aşınma direnci C kodlu numunede, en düşük aşınma direnci ise A kodlu numunede belirlenmiştir. Bu durum numunelerin iç yapı, yoğunluk ve sertlik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Artan sıcak presleme sıcaklığı ile numunelerin iç yapısında yoğunlaşmanın daha baskın olduğu belirlenmiştir. Artan yoğunluk ile birlikte numunelerin iç yapısındaki Al-Cu-Mg tozlarının sıkıştırılabilme kabiliyeti artmakta ve porozite oluşumu neredeyse en aza inmektedir. Bu, sürtünme ve aşınma deneylerindeki parçacık kopmasını ve malzeme transferini azaltmaktadır. Buna ek olarak, metallerin aşınma kaybı değerleri Archard aşınma kanunu olarak bilinen  $V = kWL/H$  eşitliği ile belirlenir. Bu eşitlikte yer alan W uygulanan yükü, V hacim kaybını, H malzemenin sertliğini, L kayma yolunu (çevrim sayısını), ve k aşınma sabitini göstermektedir. Buna göre çevrim sayısı yani alınan yol ile aşınma kaybı doğru, sertlik değerleri ile ters orantılıdır. Sonuç olarak yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen aşınma verileri Archard eşitliği ile uyum sağlamaktadır. Uygulanan sıcak presleme işleminde de artan sıcaklıkla birlikte sertlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Dolayısıyla numunelerin hacim kaybı değerleri Archard eşitliği ile uyum sağlamaktadır.



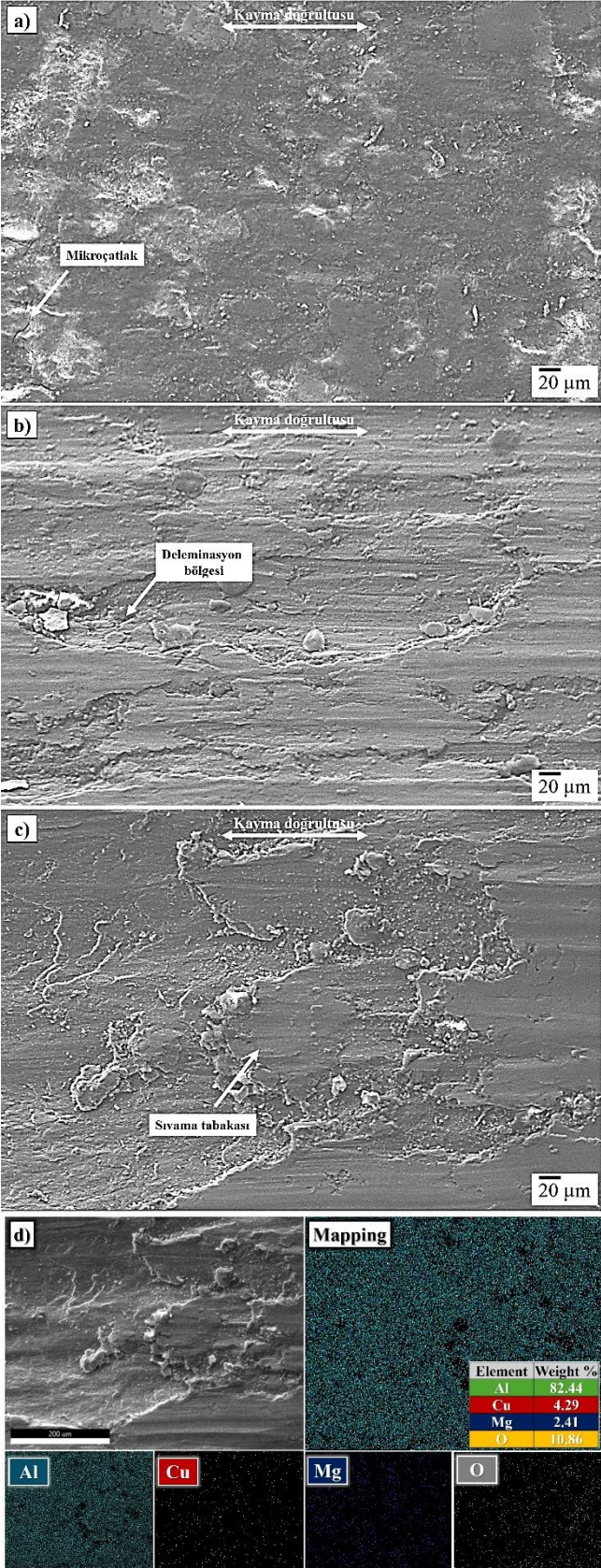
**Şekil.5.** 550 °C'de, 5 N yükte, 4 Hertz frekansta ve 8 mm iz boyunda sıcak presleme yapılmış Al-Cu-Mg alaşımının artan çevrim sayısına göre hacim kaybı değerleri

### 3.4 Aşınma yüzey görüntüleri

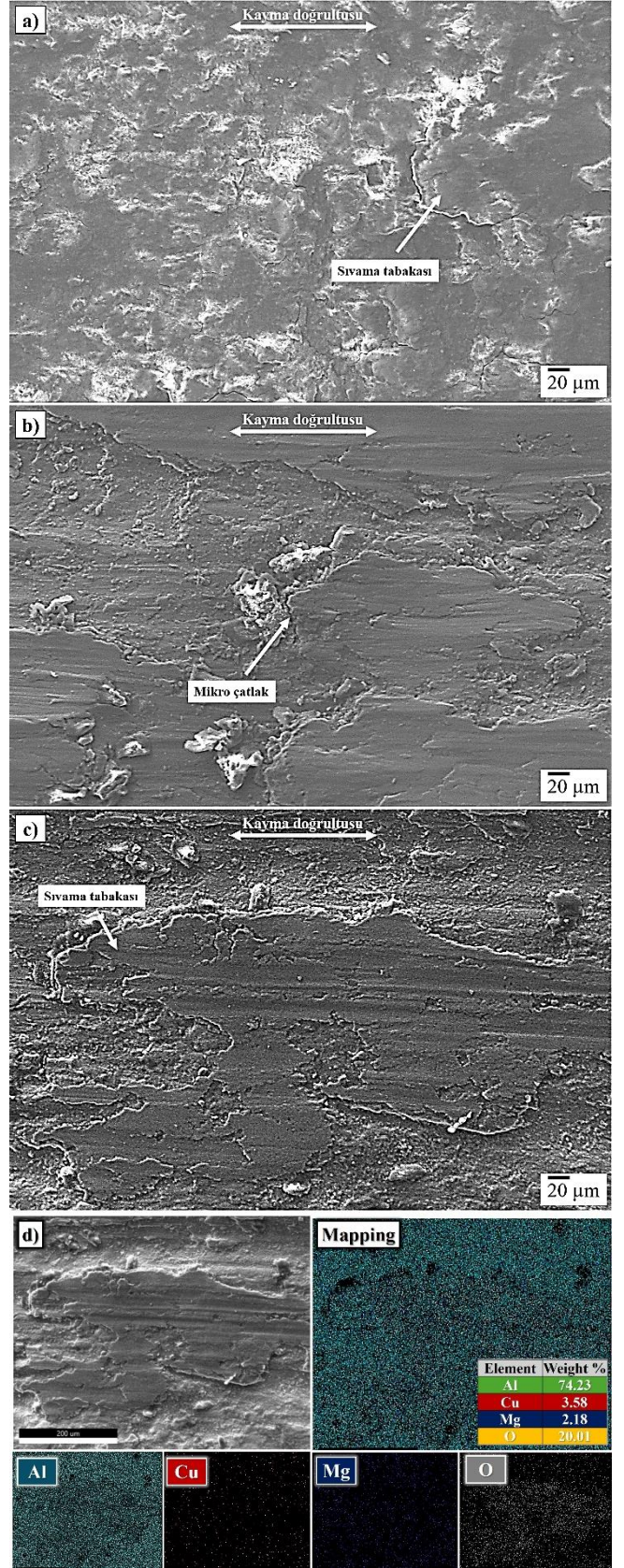
Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemeler sonucunda Al-Cu-Mg alaşımına farklı pres sıcaklıklarında elde edilen A, B ve C kodlu numunelerin aşınma yüzeylerine ve EDS analizlerine ait fotoğraflar Şekil.6-8'de verilmiştir. Buna göre, sıcak presleme işlemi yapılan bütün numunelerin aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının ve soyulmaların meydana geldiği ayrıca mikro çatlakların oluştuğu belirlenmiştir. Sıvama tabakalarının (Şekil.6a, b ve c) sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda ortaya çıkan aşınma parçacıklarının yüzeye sıvanması ile oluşmaktadır. Diğer taraftan soyulmaların numune yüzeyinde oluşan mikro çatlakların birleşmesi ile artan sıcaklık etkisinin birleşmesi sonucu sıvama bölgelerinin kırılması ve numune yüzeyinden ayrılması sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

### 3.5 Aşınma parçacıkları

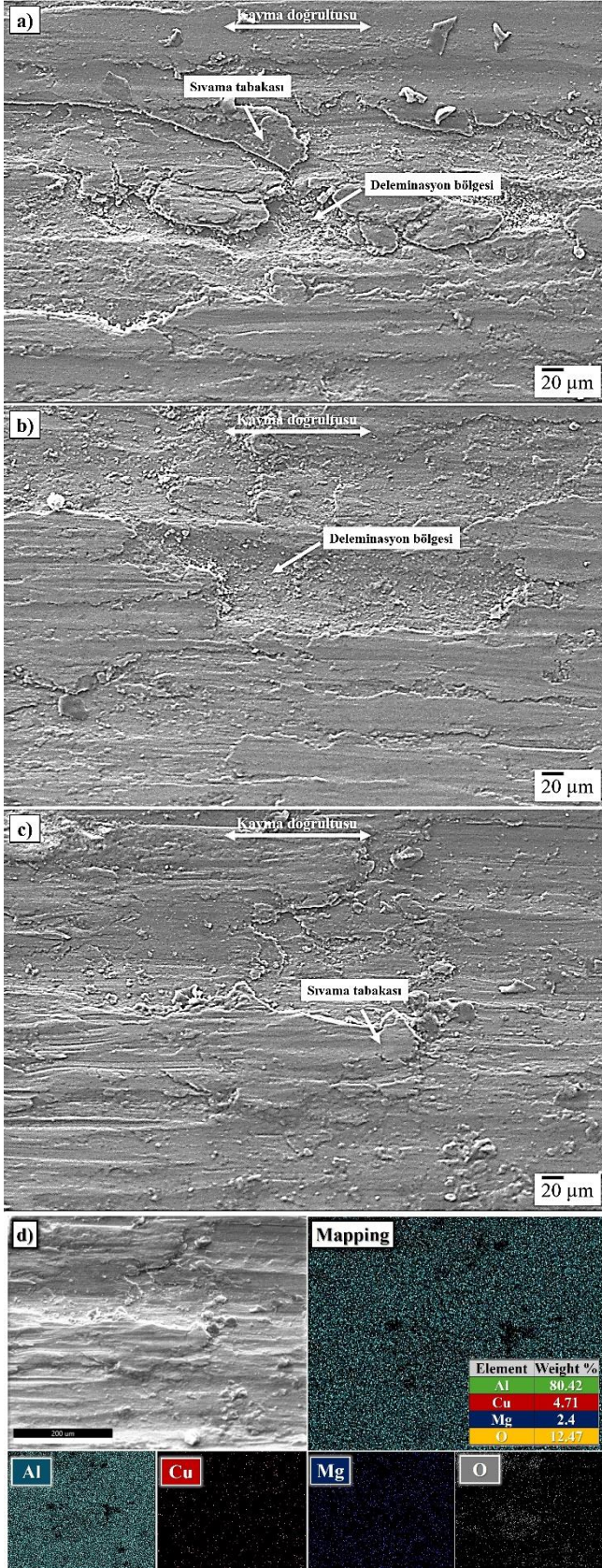
Sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda A, B ve C kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinden elde edilen irili ufaklı aşınma parçacıklarının SEM fotoğrafları Şekil 9-11'de verilmiştir. Artan çevrim sayısı ile toz şeklindeki parçacıkların sayısı artmıştır. Bu numunelerin sertlik özelliklerine dayandırılarak açıklanabilir. Presleme sıcaklığı arttıkça sertlik değerinde bir artış belirlenmiştir. Artan sertlikle sürtünme ve aşınma deneylerinin başlangıç temas yüzeyi azalmaktadır. Bu durum temas yüzeyleri arasındaki yapışma bağının kuvvetini azaltmaktadır. Hareketin başlangıç aşamasında kesme kuvvetinin etkisiyle temas yüzeyleri arasında kırılmalar gerçekleşir ve aşınma parçacıkları oluşur. Bu parçacıklar deney süresince temas yüzeyleri arasına girerek bilyeye ve numune yüzeyine sıvanırlar. Artan sertlikle birlikte numune yüzeyine sıvama işlemi giderek zorlaşır ve temas yüzeyleri arasında kalan parçacıklar giderek küçülür.



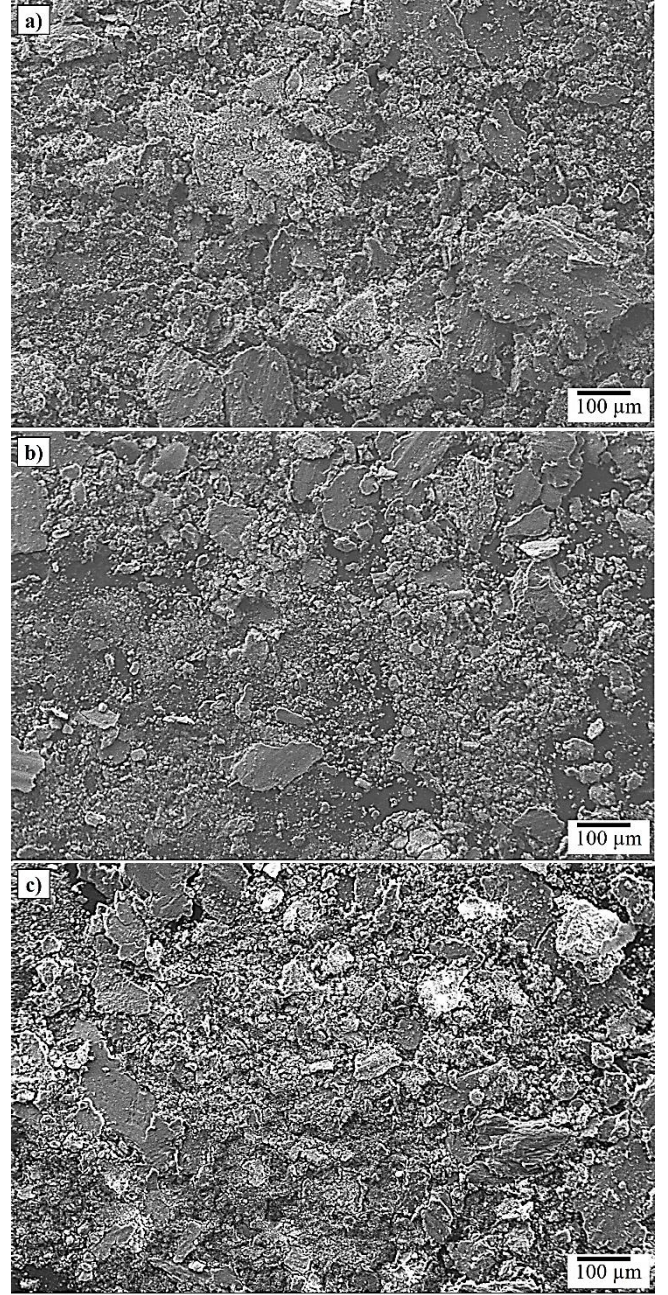
Şekil.6. A kodlu numuneye ait 450°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları; a) 25x10<sup>3</sup> çevrim, b) 50x10<sup>3</sup> çevrim, c) 75x10<sup>3</sup> çevrim ve d) 75x10<sup>3</sup> çevrime ait EDS analizi



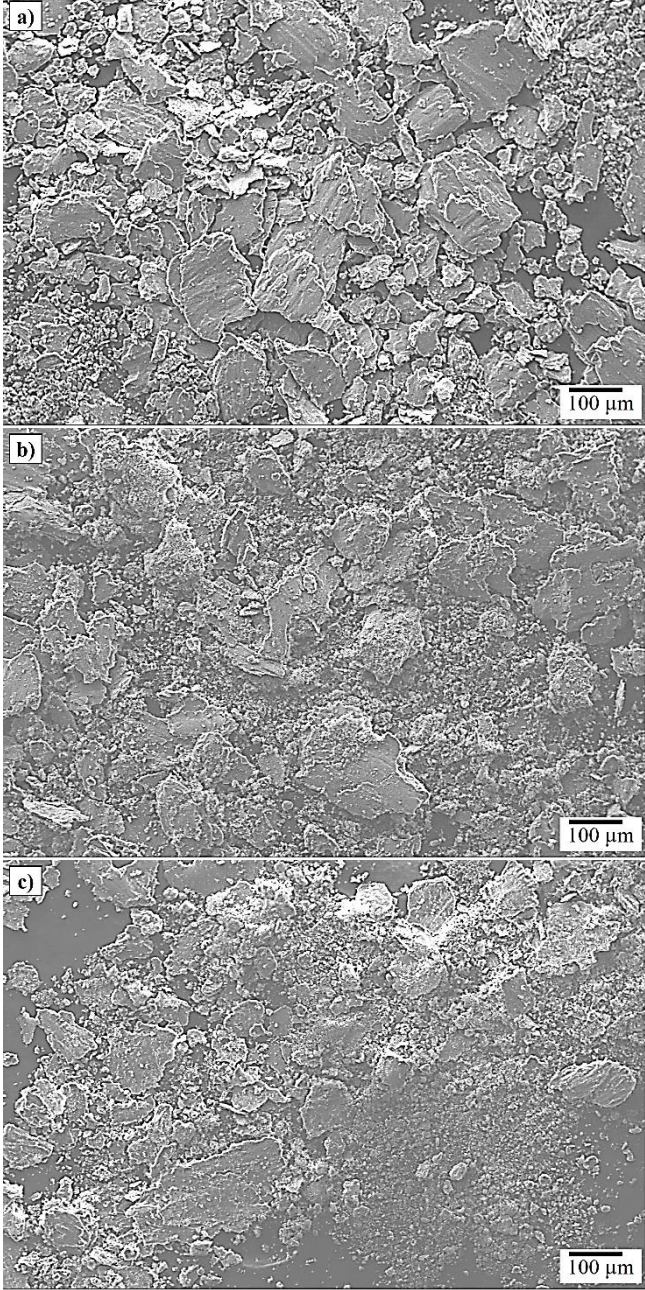
Şekil.7. B kodlu numuneye ait 500°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları; a) 25x10<sup>3</sup> çevrim, b) 50x10<sup>3</sup> çevrim, c) 75x10<sup>3</sup> çevrim ve d) 75x10<sup>3</sup> çevrime ait EDS analizi



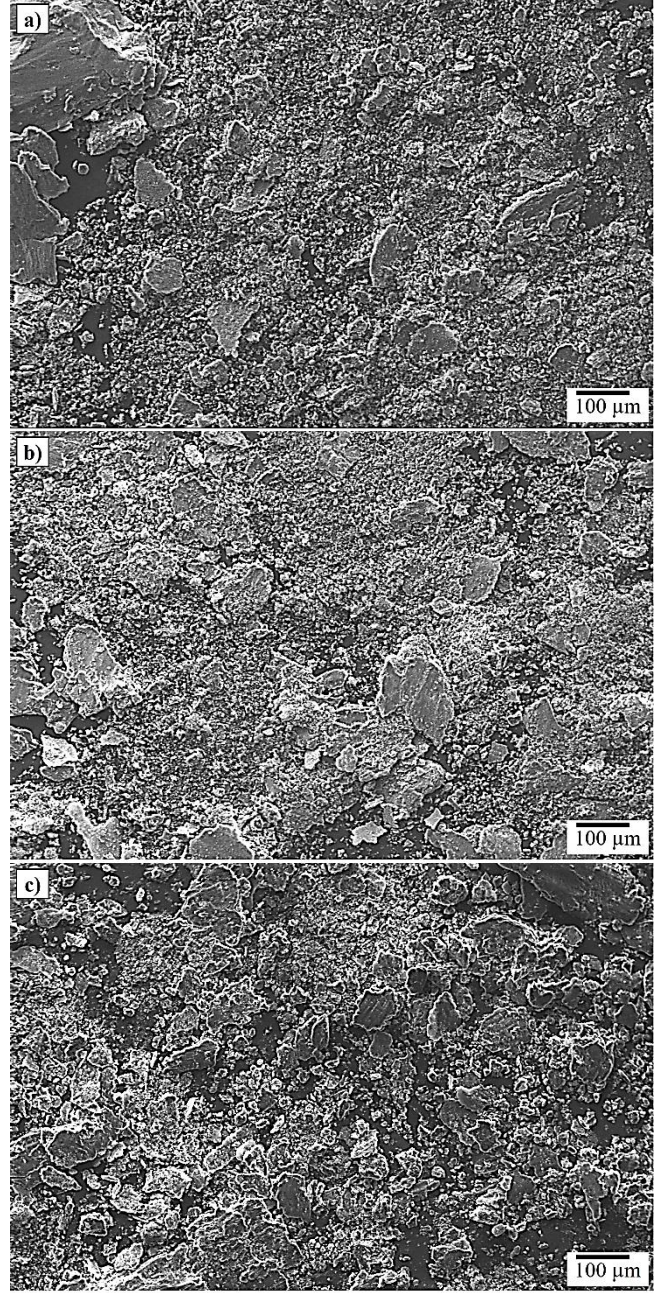
Şekil.8. C kodlu numuneye ait 550°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları; a) 25x10<sup>3</sup> çevrim, b) 50x10<sup>3</sup> çevrim, c) 75x10<sup>3</sup> çevrim ve d) 75x10<sup>3</sup> çevrime ait EDS analizi



Şekil.9. A kodlu numuneye ait 450°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinden elde edilen toz parçacıklarının SEM fotoğrafları; a) 25x10<sup>3</sup> çevrim, b) 50x10<sup>3</sup> çevrim ve c) 75x10<sup>3</sup> çevrim



**Şekil.10.** B kodlu numuneye ait 500°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinden elde edilen toz parçacıklarının SEM fotoğrafları; a)  $25 \times 10^3$  çevrim, b)  $50 \times 10^3$  çevrim ve c)  $75 \times 10^3$  çevrim

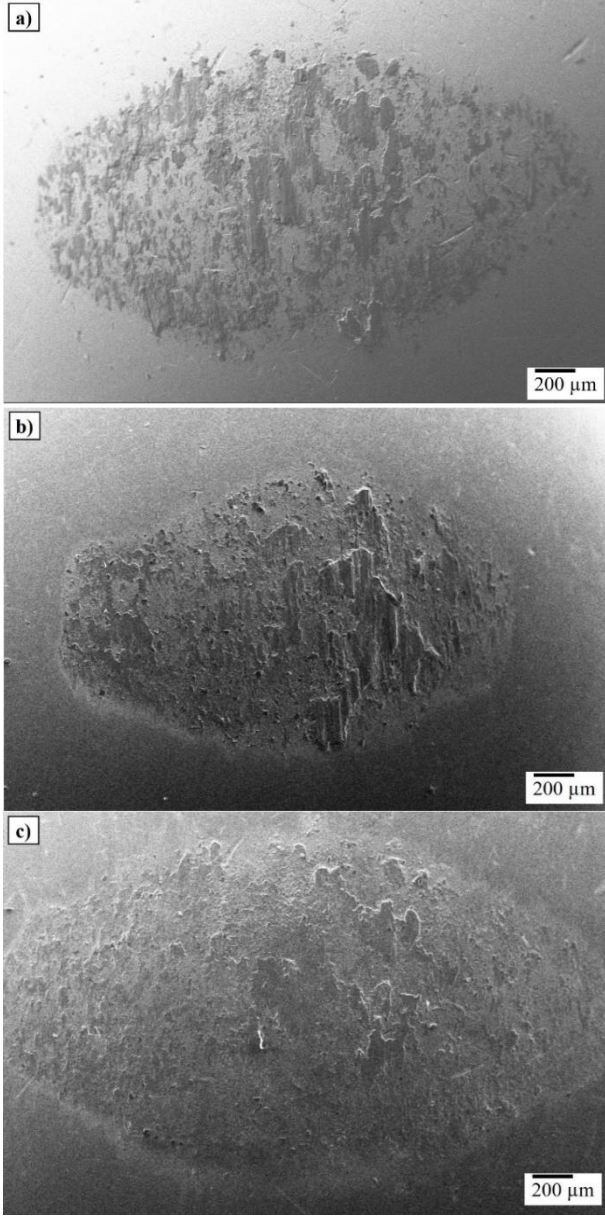


**Şekil.11.** C kodlu numuneye ait 550°C presleme sıcaklığında elde edilen aşınma yüzeylerinden elde edilen toz parçacıklarının SEM fotoğrafları; a)  $25 \times 10^3$  çevrim, b)  $50 \times 10^3$  çevrim ve c)  $75 \times 10^3$  çevrim

### 3.6 Bilye yüzey incelemesi

A, B ve C kodlu numunelere ait aşındırıcı olarak kullanılan 100Cr6 bilyelerin yüzeylerinde benzer tabakaların olduğu belirlenmiştir. Yapılan EDS incelemelerinde bilyenin yüzeyindeki tabakaların Al-Cu-Mg alaşımı olduğu ve oksitlenmelerin meydana geldiği görüldü. Bu duruma örnek olarak A, B ve C kodlu numunelerin 5 N'luk yük, 4 hertz'lik frekans, 8 mm iz boyu ve  $50 \times 10^3$ 'lük çevrim sayısında yapılan sürtünme ve aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin yüzeyinde oluşan sıvama tabakasının SEM görüntüsü verilmiştir, [Şekil 12](#).





Şekil.12. A,B ve C kodlu numunelere ait 5 N'lük yük, 4 hertz'lik frekans, 8 mm iz boyu ve  $50 \times 10^3$ 'lük çevrim sayısına karşılık gelen aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyelerin SEM görüntüsü

#### 4 Sonuçlar

Elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- 450°C, 500°C ve 550°C sıcaklıklarında pres uygulaması yapılan A, B ve C kodlu numunelere ait iç yapı incelemelerinde artan sıcaklık miktarı ile birlikte sıkıştırılma kabiliyetinin artması  $\alpha$ -Al tanelerinin daha düzgün bir dağılım sergilemesine yol açmıştır.
- A, B ve C kodlu numunelere uygulanan presleme sıcaklığı arttıkça numunelerin yoğunluk değerleri artmıştır. Buna bağlı olarak C kodlu numune A kodlu numuneye göre %0,3 değerinde bir artış göstermiştir. Sonuç olarak porozite miktarı azalmıştır.
- A, B ve C kodlu numunelerde elde edilen sertlik ve mikro sertlik değerlerinin artan presleme sıcaklık miktarı ile

sürekli arttığı belirlendi. Buna göre, en yüksek sertlik ve mikro sertlik değeri sırasıyla A numunesinden %26 ve %33 daha yüksek değer sergileyen C kodlu numune göstermiştir.

- Sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen hacim kaybı-çevrim sayısı verilerine göre en düşük hacim kaybı değeri en yüksek sertlik değerine sahip olan C kodlu numunede gerçekleşmiştir. Buna göre  $75 \times 10^3$  çevrim sayısındaki A kodlu numuneye karşılık gelen hacim kaybı değeri C kodlu numuneye göre %45 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerin sürtünme ve aşınma yüzeylerinde sıvama tabakalarının, mikro çatlakların ve delemantasyon bölgelerinin olduğu ve artan çevrim sayısı ile sıvama ve delemantasyon bölgelerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Sürtünme ve aşınma deneyleri sonucunda numune yüzeyinden toplanan aşınma tozlarının irili ufaklı olduğu gözlenmiştir. Artan çevrim sayısı ve presleme sıcaklığı ile bu tozların büyüklüklerinin nispeten azaldığı belirlenmiştir.
- Sürtünme ve aşınma deneylerinden elde edilen aşındırıcı bilye görüntüleri incelendiğinde bilye yüzeyine malzeme transferinin gerçekleştiği, buna bağlı olarak bilye yüzeyinde sıvama tabakalarının olduğu gözlenmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %8**

#### Kaynaklar

- [1] S. J. Maddox, Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures. *International Journal of Fatigue*, 25 (12), 1359–1378, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(03\)00063-X](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(03)00063-X).
- [2] R.E. Sanders, T.H. Sanders, J.T. Stanley, Relationships Between Microstructure, Conductivity, and Mechanical Properties of Alloy 2024-T4 (II)., *Aluminium*, 59 (2), 143-148, 1983.
- [3] D.G. Altenpohl, Present structure and future trends in key materials industries, *Materials in World Perspective: Assessment of Resources*, 21–126, 1980. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-81453-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-81453-2_2).
- [4] G.E. Totten, D.S. Mackenzie, *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*, New York-Basel, 2015.
- [5] M. Gazizov, R. Kaibyshev, Precipitation structure and strengthening mechanisms in an Al-Cu-Mg-Ag alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 702, 29–40, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.110>.
- [6] W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge, Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, *Materials Science and Engineering: A*, 280 (1), 37–49, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X)
- [7] B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler, Application of aluminum and aluminum alloys in engineering, *Applied Engineering Letters*, 3 (2), 52–62, 2018. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2018.3.2.2>

- [8] M. Tisza, Z. Lukács, High strength aluminum alloys in car manufacturing, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 418 (1), 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012033>
- [9] J. Hirsch, Aluminium alloys for automotive application, Materials Science Forum, 242, 33–50, 1997. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.242.33>.
- [10] J. Hirsch, Aluminium in innovative light-weight car design, Materials Transaction, 52 (5), 818–24, 2011. <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201132>.
- [11] J.P. Adams, History of Powder Metallurgy, Powder Metallurgy, 7, 3–8, 2015. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v07.a0006017>.
- [12] J.R. Pickens, Aluminium powder metallurgy technology for high-strength applications, Journal of Materials Science, 16 (6), 1437–1457, 1981. <https://doi.org/10.1007/bf00553958>.
- [13] E. Fitriatun, Introduction to powder metallurgy the process and its products, European Powder Metallurgy Association, 53 (9), 1689–1699, 2019.
- [14] J.R. Moon, Introduction to PM, A Residential training course for young materials engineers, course booklet, European Powder Metallurgy Association, London, 2007.
- [15] H. Hyer, L. Zhou, S. Park, G. Gottsfritz, G. Benson, B. Tolentino, B. McWilliams, K. Cho, Y. Sohn, Understanding the Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy, Metallography Microstructure and Analysis, 9 (4), 484–502, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13632-020-00659-w>.
- [16] M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin, H. reza Baharvandi, The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, made by powder metallurgy, Journal of Materials Process Technology, 209 (14), 5387–5393, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.04.007>.
- [17] B. Chen, S.K. Moon, X. Yao, G. Bi, J. Shen, J. Umeda, K. Kondoh, Comparison Study on Additive Manufacturing (AM) and Powder Metallurgy (PM) AlSi10Mg Alloys, Powder Metallurgy of Non-ferrous Metals, 70 (5), 644–649, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2793-4>.
- [18] T.K. Akopyan, N.A. Belov, A.G. Padalko, N. V. Letyagin, Effect of Hot Isostatic Pressing on the Structure and the Mechanical Properties of an Al–7Si–7Cu Composite Alloy, Russian Metallurgy, 2019 (9), 843–849, 2019. <https://doi.org/10.1134/S0036029519090027>.
- [19] Q. Teng, X. Li, Q. Wei, Diffusion Bonding of Al 6061 and Cu by Hot Isostatic Pressing, Journal of Wuhan University Technology Materials Science Education, 35 (1), 183–191, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2242-4>.
- [20] H.R. Ammar, A.M. Samuel, H.W. Doty, F.H. Samuel, The Influence of Hot Isostatic Pressing on the Fatigue Life of Al–Si–Cu–Mg 354-T6 Casting Alloy, International Journal of Metalcasting, 16 (3), 1315–1326, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00691-8>.
- [21] X. Zhao, J. Meng, C. Zhang, W. Wei, F. Wu, G. Zhang, A novel method for improving the microstructure and the properties of Al-Si-Cu alloys prepared using rapid solidification/powder metallurgy, Materials Today Communicaion, 35, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105802>.
- [22] K.R. Suresh, H.B. Niranjana, P.M. Jebaraj, M.P. Chowdiah, Tensile and wear properties of aluminum composites, Wear, 255 (1–6), 638–642, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00292-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00292-8).
- [23] S.H. Huo, M. Qian, G.B. Schaffer, E. Crossin, Aluminium powder metallurgy, Fundamentals Aluminium Metallurgy Production Processing and Applications, 2011, 655–701, 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.3.655>.
- [24] P.D. Liddiard, Aluminium powder metallurgy in perspective, Powder Metallurgy, 27 (4), 193–200, 1984. <https://doi.org/10.1179/pom.1984.27.4.193>.
- [25] P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. V. Kutumbarao, R.J.H. Wanhill, Aluminium Alloys for Aerospace Applications, Aerospace Materials and Material Technologies, 8 29–52, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_2).
- [26] F. Stergioudi, A. Prospathopoulos, A. Farazas, E.C. Tsirogiannis, N. Michailidis, Mechanical Properties of AA2024 Aluminum/MWCNTs Nanocomposites Produced Using Different Powder Metallurgy Methods, Metals (Basel), 12 (8), 2022. <https://doi.org/10.3390/met12081315>.
- [27] O. V. Rofman, A.S. Prosviryakov, A. V. Mikhaylovskaya, A.D. Kotov, A.I. Bazlov, V. V. Cheverikin, Processing and Microstructural Characterization of Metallic Powders Produced from Chips of AA2024 Alloy, Jom Aluminium Recycling and Environmental Footprint, 71 (9), 2986–2995, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03581-x>.
- [28] M. Jafari, M.H. Enayati, M.H. Abbasi and F. Karimzadeh, Compressive and wear behaviours of bulk nanostructured Al2024 alloy, Materials and Design, 21 (2), 2010. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.020>
- [29] M. Beder, S. B. Akçay, T. Varol and H. Çuvalcı, The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties and Oxidation Resistance of AlSi10Mg Alloy, Arabian Journal for Science and Engineering, 49, 15335–15346, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08971-1>.
- [30] M. Beder, Effect of hot pressing method on the microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg alloy, Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 12 (4), 1420-1427, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1520826>

