

# Mekanik alaşımlama metoduyla üretilen A356/XNi ön alaşımlarda nikelin mikroyapı ve aşınma davranışı üzerine rolü

Tansel TUNÇAY<sup>1\*</sup>, Berat TAŞAR<sup>1</sup>, Badegül TUNÇAY<sup>2</sup> ve Talha SUNAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye,  
<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye,

Geliş Tarihi (Received Date): 01.12.2021  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.02.2022

## Öz

Bu çalışmada, A356 alaşım tozları mekanik alaşımlama (MA) metoduyla farklı miktarda Nikel (Ni) ile ön alaşımlandırılmıştır. Ni miktarına bağlı ön alaşımlanmış A356/XNi alaşımlarındaki mikroyapısal incelemeler optik mikroskop (OM) ve tarama elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir. A356/XNi alaşımların mekanik özellikleri; yoğunluk, makro sertlik ve aşınma testleri ile değerlendirilmiştir. A356X/Ni alaşımları farklı yük ve mesafelerde pin-on disk tipi aşınma test cihazında test edilmiştir. Sonuç olarak karakterizasyon çalışmalarında Ni miktarının artmasına bağlı olarak yapıda oluşan Al-Ni ve Al-Ni-Fe içerikli intermetalik fazlarının tane sınırlarındaki oranının arttığı belirlenmiştir. Makro sertliğin %0,5 Ni ilavesine kadar yaklaşık %10 düştüğü, fakat daha sonra %2,0 Ni ilavesi ile %23 arttığı belirlenmiştir. Aşınma testlerinde aşınma yükünün artması ile hacimsel aşınma miktarı artmaktadır. 10 N da en düşük hacimsel aşınma A356/%2,0Ni alaşımında, 20 N da en düşük hacimsel aşınma A356/%0,25Ni alaşımında elde edilmiştir. Özellikle aşınma testlerinde Ni eklenmesiyle hacimsel aşınma miktarının daha kararlı hale geldiği dikkat çekicidir.

**Anahtar kelimeler:** A356 alaşımı, toz metalurjisi, aşınma davranışı, sertlik, mikroyapı

\*Tansel TUNÇAY, [tanseltuncay@karabuk.edu.tr](mailto:tanseltuncay@karabuk.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0002-7762-8504>.  
Berat TAŞAR, [berattasar@hotmail.com.tr](mailto:berattasar@hotmail.com.tr), <https://orcid.org/0000-0002-3405-917X>  
Badegül TUNÇAY, [badegultuncay@gmail.com](mailto:badegultuncay@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-4012-8343>.  
Talha SUNAR, [talhasunar@karabuk.edu.tr](mailto:talhasunar@karabuk.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0002-4683-6095>

# The role of nickel on wear behavior and microstructure of pre-alloyed A356/XNi alloys produced via mechanical alloying method

## Abstract

*In this study, A356 alloy powders were alloyed with different amounts of Nickel (Ni) by the mechanical alloying (MA) method. Microstructural investigations of A356/XNi alloys based on Ni content were performed with an optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM), energy dispersive x-ray spectrometers (EDS). Mechanical properties of A356/Ni alloys were evaluated by density, macro hardness, and wear tests. The pre-alloyed A356/XNi alloys were tested via pin-on-disc type wear test apparatus at different loads and sliding distances. Eventually, it was determined that the rate of the Al-Ni and Al-Ni-Fe-containing intermetallic phases formed in the structure at the grain boundaries increased due to the increase in the amount of Ni in the characterization studies (OM, SEM, and EDS). It was determined that the macro hardness decreased by about 10% until the addition of 0.5% Ni but then increased by 23% with 2.0% Ni. In wear tests, the wear rate increases with the increase in wear load. The lowest wear at 10 N load was obtained in A356/2.0%Ni alloy, and the lowest wear at 20 N load was obtained in A356/0.25%Ni alloy. Remarkably, the wear amount becomes more stable with the addition of Ni, especially in wear tests.*

**Keywords:** A356 alloys, powder metallurgy, wear behavior, hardness, microstructure.

## 1. Giriş

Alüminyum (Al) ve alaşımları, CO<sub>2</sub> salınımı ve ağırlığı azaltmak için özellikle otomotiv endüstrisinde motor ve gövde parçalarında, yorulma dayanımları, kaynak kabiliyetlerinden ve kolay şekillendirilebilme yeteneklerinden dolayı da havacılık sektöründe öncelikli alaşım grubundadır [1,2]. Ek olarak Al ve alaşımlarının; aşınma, korozyon, çekme mukavemeti gibi istenilen özellikleri geliştirilebilmektedir. Al ve alaşımları, geleneksel ve özel döküm metotları ve toz metalürjisi gibi metotlar ile üretilmektedir. Döküm metotlarının tamamında oksit film, çekme veya gaz porozitesi ve katılaşmanın sonucunda gelişen homojen mikroyapı morfolojisini kontrol etmek oldukça zordur [3–6].

Bu yüzden alternatif toz metalürjisi ve mekanik alaşımla/öğütme metotları Al ve alaşımları üretiminde oldukça rağbet görmektedir. Özellikle mikro ve nano boyutta tozların alaşımlanması ve matrise ilave edilen takviye fazlarının mekanik özelliklere etkisi birçok çalışmaya konu olmuştur [7–10]. Mekanik alaşımlama ve/veya öğütme (MA/MÖ), kap içinde hızlandırılmış ve enerjilendirilmiş bilyeli bir ortamda alaşım veya elementel toz partiküllerin alaşımlanması ve/veya öğütülmesi olarak bilinmektedir [11,12]. MA/MÖ prosesinde; toz partiküllerin boyutları, şekilleri, süneklik veya gevreklik davranışı, öğütülme ortamı ve zamanı başlıca ve kontrol edilebilir parametrelerdir. MA/MÖ prosesinde toz partikülleri sürekli olarak bilyeler veya kap cidarı- bilye arasında deformasyona maruz kalırlar, bu tekrarlı deformasyondan dolayı kırılma, soğuk birleşme ve tekrar ufalanma gerçekleşir. Bu işlem arzu edilen toz partikül

boyutuna ulaşılan kadar devam edebilir [13]. Cante ve ark., %1, 3 ve 5 Ni içeriğine sahip ötektoid altı Al-Ni alaşımlarını doğrusal katılaştırmışlardır. Ni miktarının artmasıyla dendritik morfolojinin değiştiğini ve mekanik özelliklerin arttığını belirtmektedirler [14]. Suwanpreecha ve ark., Al-Ni alaşımlarını Sc ilave ederek döküm metodu ile üretmişlerdir ve yüksek servis sıcaklığında Al<sub>3</sub>Sc intermetalik fazının Al<sub>3</sub>Ni ötektik fiberler ile alaşımların sertliğini arttırdığını bildirmektedirler [15]. Du ve Clavaguera, Al-Ni alaşımları üzerinde termodinamik olarak CALPHAD metodu ile alaşımların faz diyagramı ve oluşan fazların kimyasal bileşimleri hakkında yaptıkları çalışmada, saf metallere ve intermetalik fazların (AlNi<sub>3</sub>, Al<sub>3</sub>Ni<sub>5</sub>, Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>, AlNi, Al<sub>3</sub>Ni) kimyasal bileşimlerini belirli aralıklarda belirlemişlerdir [16]. Yine benzer bir çalışmada Shi ve ark., Al-Ni intermetalik fazların oluşma ısılarını, kayma modüllerini, Young's modüllerini (GPa), Poisson's modüllerini hesaplamışlardır. Sonuç olarak; AlNi, Al<sub>3</sub>Ni, AlNi<sub>3</sub> ve Al<sub>3</sub>Ni<sub>5</sub> bileşiklerinin sünek fazlar olduğunu ama Al<sub>4</sub>Ni<sub>3</sub> ve Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> bileşiklerinin sert olduğunu belirtmektedirler [17].

Hemen hemen bütün mekanik sistemlerde birbirine temas eden iki farklı parçanın yüzeyleri arasında hareket esnasında bir etkileşim olur. İki parça yüzeyinin birbiri üzerinde yuvarlanması veya kayması durumunda sürtünme direnci ve aşınma meydana gelir. Basitçe aşınma, hareketli ve temas halindeki parçaların temas yüzeyindeki deformasyonu sonucu oluşan kütleli kayıptır [18].

Aşınma mekanizmaları; adhezyon, abrazyon, kirlenme, erozyon, sürtünme, yorulma ve oksidasyona bağlı aşınma olarak sınıflandırılabilir. Adhezyon aşınma, aşınan ve aşındırıcı malzeme yüzeyleri arasındaki pürüzlülüğe bağlı olarak aşınma testi esnasında katı parçacıkların kopması ve diğer malzeme yüzeyine yapışması olarak tanımlanır. Abrazyon aşınma, sünek malzemelerin aşınmasında, sert parçacıklardan veya aşınma ile oluşan çıkıntılarının oluşumu olarak bilinmektedir. Kirlenme ise, aşınma yüzeyleri arasındaki ince tabakalar şeklinde görülen delaminasyondur. Derin delaminasyon izleri çatlak oluşumunu tetiklemektedir. Erozyon, katı veya sıvı partiküllerin malzeme yüzeyine çarptıklarında yüzeyde gerçekleşen hasardır. Aşınma mekanizması sonrası oluşan hasar boyutuna bağlı olarak orta ve şiddetli aşınma tarif edilir. Orta aşınmada, dış yüzeyinde döküntü veya parçacık şeklinde 0,01 ila 100 nm arasında değişen boyutlarda ince oksit parçacıkları meydana gelir. Şiddetli aşınmada ise yüzeyde derin aşınma meydana gelir ve aşınma kalıntısı boyutu 100 nm ila 100 µm arasında değişmektedir. Ayrıca aşınma miktarının aşınma mesafesine bağlı olarak değişimi oldukça karmaşıktır [19]. Lu ve ark., Al-Ni alaşım sisteminde MA metodu sırasında toz parçacıklar arasındaki difüzyonu ve etkileşimi incelediklerinde, MA metodu sırasındaki deformasyona bağlı çok sayıda kusurun oluştuğunu ve tane sınırları boyunca difüzyonun çok kolay oluştuğunu belirtmektedirler [20]. MA süresine bağlı olarak oluşan ısının sırasıyla toz parçacıkları yüzeyinde, tane sınırlarında ve kafesin içinde difüzyona sebep olduğu bilinmektedir. Atkinson ve Davies, döküm ve toz parçacıklarındaki ön preslenen parçaların yoğunluklarının artırılması için sıcak izostatik presleme metodu kullanmışlar ve taneler arasındaki boyunlaşma üzerine etkili olduğu belirtmektedirler. Bununla birlikte sıkıştırma kuvvetine ve sinterleme ortamına bağlı olarak özellikle toz parçacıklarının temas yüzeyinin arttığını ve difüzyona sebep olduğunu belirtmektedirler [21]. MA metodu ile ön alaşımlanmış A356 alüminyum alaşımları üzerine literatürde boşluklar bulunmaktadır.

Bu yüzden bu çalışmanın amacı; MA metodu ile üretilen A356/XNi ön alaşımlarında Ni miktarının; mikroyapı, sertlik ve aşınma dayanımı üzerine etkisini araştırmak ve alaşımlama miktarının aşınma testi sonuçlarına göre optimizasyonu üzerine

odaklanmıştır. MA metodu ile A356/Ni alaşımlarında Ni miktarına bağlı olarak mikroyapısal gelişim OM ve SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Makro sertlik, yoğunluk ve aşınma testi ile mekanik özellikleri araştırılmıştır.

## 2. Deneysel çalışmalar

MA metodu ile üretilmesi amaçlanan A356/XNi alaşımlarında kullanılan A356 toz alaşımı ve Ni elementel tozların kimyasal bileşimleri ve toz boyutları Çizelge 1’de verilmiştir. A356 alaşımı tozu LPW Technology Ltd (İngiltere), Ni tozu ME-TOZ şirketinden (Türkiye) temin edilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan A356 alaşım tozlar ve Ni elementel tozların kimyasal bileşimleri, toz boyutları ve şekilleri.

	Si	Mg	Fe	Mn	Al	Ni	Diğer	Toz boyutu	Toz şekli
<b>A356</b>	6,60	0,38	0,17	0,29	Kal.	-	0,1	25-65 $\mu\text{m}$	Küresel
<b>Ni</b>	-	-	-	-	-	99,87	0,1	41-43 $\mu\text{m}$	Süngerimsi

MA metodu, FRITSCH GmbH firmasının planetary tip alaşımlama cihazında (250 ml kapasiteli, paslanmaz çelik kaplı) 400 dev. /dak. hızında, 4 mm paslanmaz çelik bilye (1:10 oranında) ile 4 saat uygulanmıştır. A356 alaşımı ve ağırlıkça %0,25, 0,50, 1,0 ve 2,0 Ni elementel toz parçacıkları ve tozların topaklanmasını engellemek için işlem kontrol kimyasalı olarak, stearik asit (toz şarj miktarının ağırlıkça %0,2si kadar) kullanılmıştır. MA metodunda bilyeler değirmenin hızına ve doluluk oranına bağlı olarak toz parçacıklarının şekillerinde ve boyutlarında değişikliğe yol açmaktadır. Alaşımlanan A356/Ni toz parçacıkları, yaklaşık 350 MPa yük altında tek yönlü olarak 1 dk. soğuk preslenerek (10 mm çapında ve 10 mm yüksekliğinde) ön şekillendirilmiştir. Ön şekillendirilmiş A356/XNi alaşımları (her gruptan 6 adet üretilmiştir), 10-6 bar vakum altında yaklaşık 600° C de 1 saat sıvı faz sinterleme metodu ile sinterlenmiştir. Toz metalürjisi tekniğindeki son aşama olarak bilinen sinterleme basamağı net şeklin korunmasında ve mekanik özelliklerin kazanılmasında önemli rol oynamaktadır. Özellikle sinterleme şartları, matris ve takviye fazlarının veya alaşım elementinin arasındaki bağ oluşumu üzerine oldukça etkilidir. Sinterleme metoduna bağlı olarak; matris ve seramik takviye fazlarında ara yüzey bağı oluşurken, alaşımlama ile intermetalikler oluşmaktadır [22–25]. Ön alaşımlanmış A356/XNi malzemeler, standart metalografik işlemler (ASTM E3 -11) ile hazırlandı ve Keller dağılayıcısı ile 30-45 sn. dağıldı. A356/XNi alaşımları, OM (Clemex Vision Lite görüntü işleme programına sahip Nikon marka optik mikroskop) ve SEM (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini (FEG) cihazında) görüntüleri, yoğunluk ölçümleri (Precisa marka yoğunluk kitinde) ve Affri marka makro sertlik cihazında (2,5 mm bilye çapı 31,25 kg/f kuvvet ile 5 sn.) sertlik ölçümleri ile karakterize edildi. A356/Ni alaşımları 1m/sn hızda 10 ve 20 N yük altında ve 500,1000, 1500 ve 2000m aşınma mesafelerinde pin-on disk tipi aşınma test cihazında aşınma testi uygulandı. Ni miktarının mikro yapıdaki değişimine bağlı olarak gelişen aşınma mekanizmaları SEM görüntüleri ve ağırlık kayıplarının üzerinden değerlendirilmiştir. Literatürde aşınma test sonuçları uygulanan yük ve aşınma oranı ile değerlendirilmektedir, fakat aşınma miktarı ve aşınma mesafesi üzerine bir bağıntı

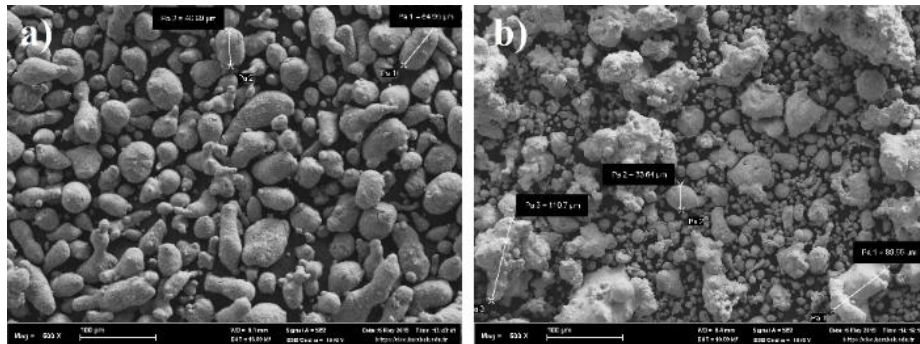
içermemektedir [18,19,26,27]. Aşınma test sonuçları, ağırlık veya hacimsel kayıp miktarının yanında boyutsuz Ks Archard's katsayısı ile değerlendirilmektedir. Boyutsuz Ks Archard's katsayısı, aşınan ve aşındırıcı malzemelerin yüzeylerinin tam temas etmesi durumunda aşınan malzemenin sertliği, yoğunluğu, aşınma mesafesi, aşınma yüküne bağlıdır [26,28]. Eşitlik 1'de boyutsuz aşınma katsayısı Ks, H yumuşak malzemenin Brinell sertliğini, P yükü, L aşınma mesafesi, V hacimsel aşınma miktarı (V) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemden boyutsuz Archard's aşınma katsayısı ağırlık kaybı ve yoğunluğu ile hesaplanmak istenir ise Eşitlik 2 kullanılmaktadır. Eşitlik 2'de, W aşınmaya bağlı ağırlık kaybı (mg),  $\rho$  malzemenin yoğunluğudur [26–30]. Üretilen A356/XNi alaşımları aşınma test sonuçlarında, her gruptan 3 numune test edildi, ağırlık kayıpları ve deneysel yoğunluk ortalamaları (Precisa marka 0,01 mg. hassasiyetteki hassas terazi ile) ölçüldü, ortalama ağırlık kaybı ve yoğunluğa bağlı olarak ortalama hacimsel kayıplar elde edilmiştir.

$$V = K_s \times \frac{(PL)}{(3H)} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{(3HW)}{(PL\rho)} \quad (2)$$

### 3. Sonuçlar ve tartışma

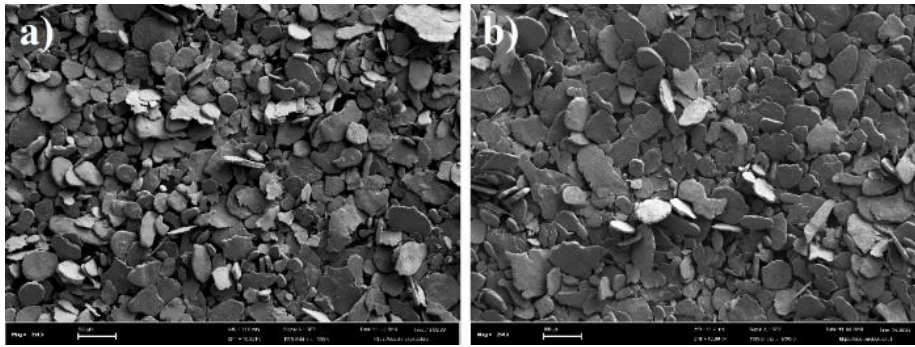
MA metodu öncesi çalışmada kullanılan A356 toz alaşımı ve Ni elementel toz parçacıkları şekilsel ve boyutsal özelliklerini belirlemek için başlangıçta SEM ile görüntülenmiştir (Şekil 1). Başlangıç A356 toz alaşımı parçacıklarının şeklinin küresel ve toz boyutunun 45-65  $\mu\text{m}$  aralığında dağıldığı fakat toz parçacıkları boyutları büyüdüğünde damla şeklinde büyük toz parçacıklar görülmektedir. Ni elementel toz parçacıkları ise, karmaşık yapılı ve süngerimsi toz boyutunun 33- 110  $\mu\text{m}$  civarında düzensiz dağılıma sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 1. MA metodu öncesi A356 alaşımı toz (a) ve elementel Ni (b) tozu SEM görüntüleri

MÖ metodu sonrasında A356 tozu ve MA metodu sonrası %2,0 Ni ile alaşımlandırılmış A356 toz alaşımı SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Başlangıçta hemen hemen küresel olan A356 toz alaşımı parçacıkları mekanik alaşımlama sırasında bilyeler ve kap-bilye arasında sıkışan toz parçacıklar çapmanın etkisi ile deformasyona uğramaktadır. Bu tekrarlı deformasyonun bir sonucu olarak toz parçacıkların kalınlıklarının azaldığı ve toz yüzey alanlarının arttığı görülmektedir. MA/MÖ metodunda bu tekrarlı deformasyonun toz parçacıklarında çatlak oluşumu ve gelişimine, parçacık boyutlarında artışa ve şekil

değişimine sebep olduğu bilinmektedir [11,13]. Toz parçacıkların morfolojik olarak da yassı pul şeklini aldığı belirlenmiştir. Yine benzer şekilde süngerimsi şekilli Ni toz parçacıkları da yassı pul şekline dönüşmüşlerdir. Toz parçacıkların öğütülmesi sırasında toz parçacıkların şeklindeki bu değişim malzemenin sünek olması ile ilgilidir [12,31]. Razavi-Tousi ve Szpunar, Al toz parçacıkların mekanik öğütme sırasındaki parametrelere bağlı olarak geliştiğini ve Al toz parçacıkların öğütme işlemi ile pul şekline geldiğini belirtmektedirler [32]. MA metodu ile sünek davranışlı toz parçacıkların pul şekline geldiği daha sonra ufalandıkları, devam eden öğütme ile ufalanmış toz parçacıkların soğuk kaynaklandığını ve toz boyutunun arttığı bilinmektedir. Buna karşın gevrek davranışlı toz parçacıklarda ise öğütme parametrelerine bağlı olarak sürekli tane boyutunun azaldığı ama şeklinin küresellikten uzaklaştığı bilinmektedir [11,33,34]. Bununla birlikte başlangıçta boyutu büyük olan toz parçacıkların deformasyon işlemi sırasında kenarlarında mikro çatlakların oluştuğu ve sonrasında ufalanmaların başladığı belirlenmiştir.



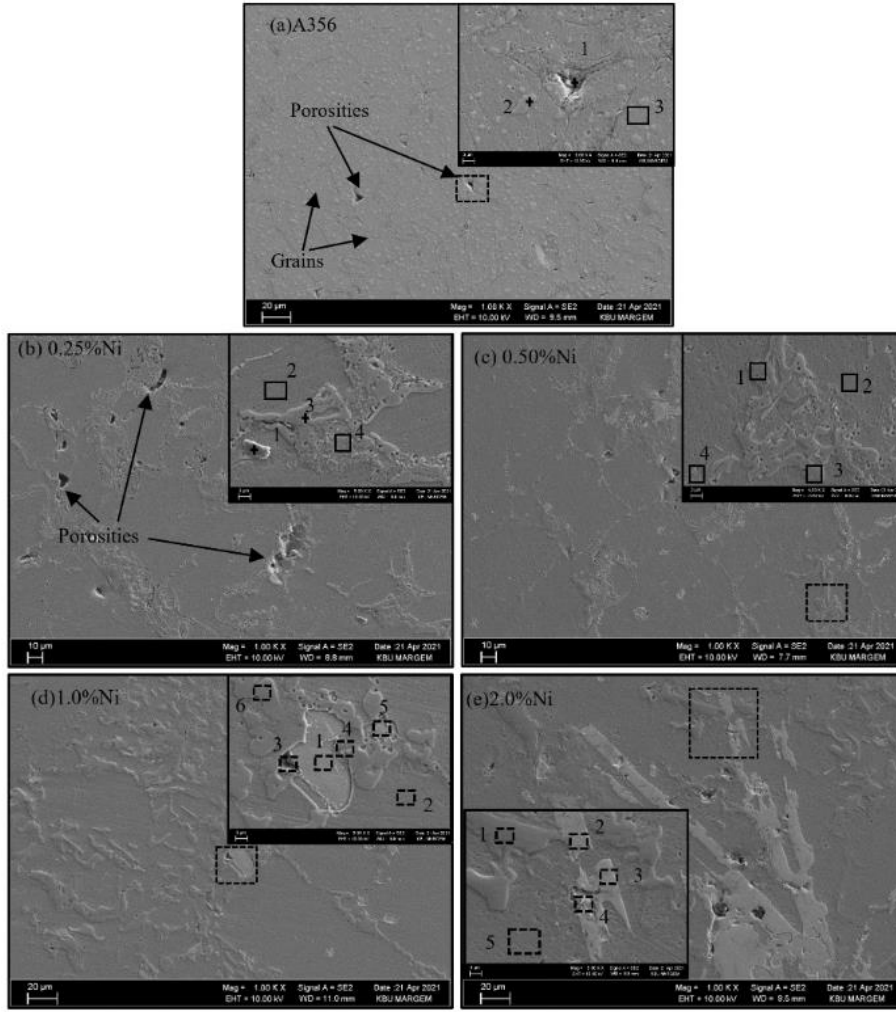
Şekil 2. MÖ metodu ile öğütülmüş A356 alaşım tozları (a) ve MA metodu ile %2,0 Ni ile alaşımlanmış A356 alaşım tozlarının (b) SEM görüntüleri

MA metodu ile üretilen ön alaşımlı A356/XNi (0,25, 0,50, 1,0 ve 2,0 %) alaşımları toz parçacıkları daha sonra soğuk preslenmiş ve sinterleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen parçaların dayanımları için ön şekillendirme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi toz parçacıkların birbirlerine bağlanmaları bakımından çok önemlidir.

### 3.1. Ön alaşımlı A356/XNi alaşım malzemelerin karakterizasyonu

#### 3.1.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

Şekil 3'te A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımlarının sinterleme sonrası SEM görüntüleri ve Tablo 2'de EDS analizleri verilmiştir. A356 ve ön alaşımlı A356 alaşımları toz parçacıkların, ön şekillendirme kuvveti ve sinterleme işlemi sonrasında birbirine temas ettiği ve difüze olduğu görülmektedir. Ön şekillendirme ve sinterleme işleminin toz parçacıkların şeklinin korunmasında ve mekanik özelliklerine önemli ölçüde etkisi olduğu bilinmektedir [22,33]. Şekil 3.a'da ön alaşımsız A356 toz parçacıklarından oluşan tane ve taneler arasındaki tane sınırları görülmektedir. Birden fazla toz parçacığın teması durumunda ise tanelerin birbirine temas ettiği durumda porozite oluşumu gerçekleşmiştir.



Şekil 3. A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımları SEM görüntüleri.

Ni ilavesine bağlı olarak ön alaşımlı A356 alaşımlarının mikro yapıları değişmektedir (Şekil 3. b-e). Ön alaşımlı A356/XNi alaşımları tane boyutları nikel ilavesine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca mikro yapıda Ni miktarının artmasıyla farklı morfolojide intermetaliklerin oluştuğu belirlenmiştir. Özellikle %0,25 ve 0,50 Ni ile mekanik alaşımlandırılmış ön alaşımlı A356 alaşımlarının morfolojisi gözenekli, karmaşık şekilli, Çince yazıya (Chinese Script) benzeyen intermetalikler belirlenmiştir (Şekil 3. b-c). Bununla birlikte %1,0 ve 2,0 Ni ile mekanik alaşımlandırılmış ön alaşımlı A356 alaşımlarının morfolojisinde ise kaba rozet veya plaka şeklinde intermetalikler görülmektedir (Şekil 3. d-e). %0,25 Ni ile mekanik alaşımlandırılmış ön alaşımlı A356 alaşımında (Şekil 3. b) ve %0,50 Ni ile mekanik alaşımlandırılmış ön alaşımlı A356 alaşımında (Şekil 3. c) EDS analizlerinde düşük miktarda Fe içeren Al-Si-Ni intermetalik bileşiklerinin yapıda oluştuğu belirlenmiştir. %1,0 Ni ile mekanik alaşımlandırılmış ön alaşımlı A356 alaşımında Al-Si-Fe-Ni elementlerini içeren rozet şeklinde intermetalik görülmektedir (Şekil 3. d. 1 nolu nokta). %2,0 Ni ile mekanik alaşımlandırılmış ön alaşımlı A356 alaşımında ise 2. ve 3. noktalarda Al-Fe-Ni elementi içeren ve oksijence zengin intermetalikler belirlenmiştir (Şekil 3. e).

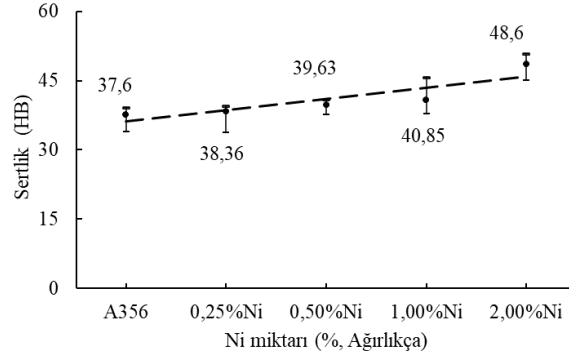
Tablo 2. A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımları EDS analizi sonuçları.

Alaşımlar	Bölgeler	Elementler (%)					
		Al	Si	Mg	Fe	O	Ni
A356	1	89,28	0,64	1,31	0,51	8,26	-
	2	61,53	35,27	0,63	1,30	1,27	-
	3	95,82	1,64	0,76	-	1,78	-
0,25%Ni	1	44,84	33,13	2,20	0,78	13,70	5,35
	2	97,57	0,05	0,77	-	1,01	0,60
	3	9,75	81,69	0,62	0,75	4,43	2,76
	4	70,10	0,30	3,36	-	18,62	7,62
0,50%Ni	1	8,11	86,18	0,77	0,28	4,16	0,50
	2	96,42	0,15	0,76	1,18	0,87	0,63
	3	19,48	78,21	0,39	-	1,42	0,50
	4	88,30	0,10	1,78	-	9,15	0,67
1,0%Ni	1	66,10	14,91	0,46	11,88	5,18	1,47
	2	97,56	0,18	0,69	-	1,01	0,57
	3	39,55	17,20	2,24	0,28	9,39	1,34
	4	70,88	3,60	3,30	1,60	19,54	1,08
	5	65,61	10,86	2,05	6,74	12,79	1,94
	6	19,50	78,80	0,34	-	0,75	0,61
2,0%Ni	1	2,18	95,13	0,36	-	1,54	0,79
	2	40,76	3,92	1,93	3,52	18,28	31,60
	3	43,63	4,24	1,77	2,06	16,55	31,74
	4	49	1,97	3,71	-	26,41	18,91
	5	97,21	0,12	0,66	-	1,36	0,66

### 3.1.2. Sertlik ve aşınma test sonuçları

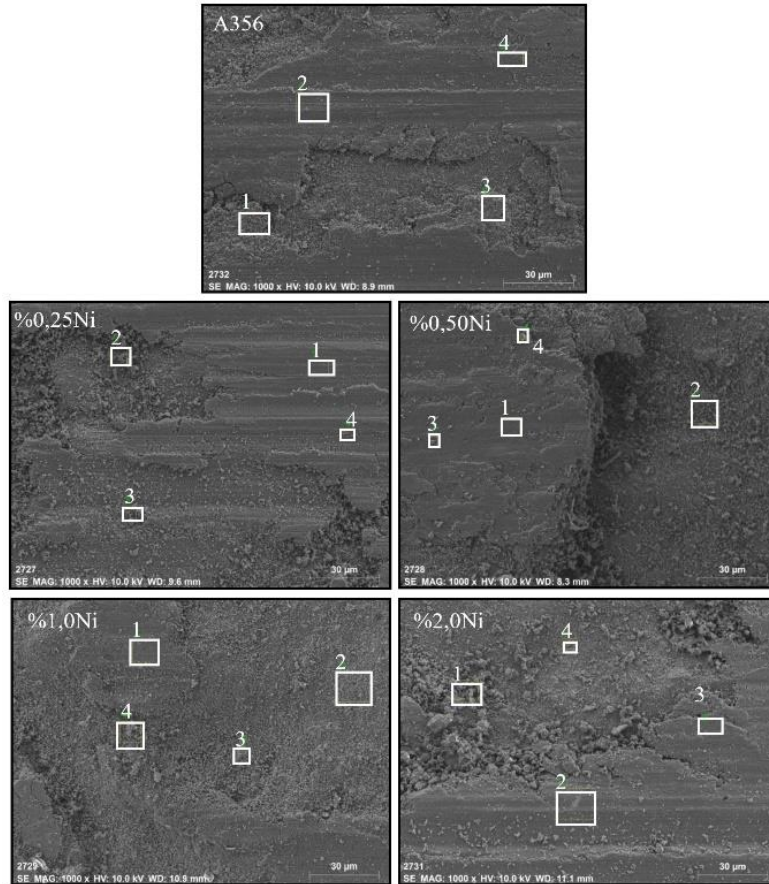
MA metodu ile alaşımlanan A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımları makro sertlik test sonuçları Şekil 4.'te verilmiştir. Ön alaşımlı A356 alaşımındaki Nikel miktarının artmasına bağlı olarak makro sertliğinde sürekli bir artış belirlenmiştir. A356 alaşımını, başlangıçtaki ortalama makro sertliği 37,6 HB ve %2,0 Ni ile mekanik alaşımlandırılmış ön alaşımlı A356 alaşımının ortalama makro sertliği 48,6 HB olarak ölçülmüştür, yaklaşık 24% bir artış elde edilmiştir. Bu artışın sebebi A356 alaşımı mikro yapısında Al-Si-Fe intermetalığının bozulması, Fe miktarının düşmesi ve Al-Si-Fe-Ni intermetalindeki Ni miktarının artışı ile ilişkilidir (Şekil 3'teki SEM ve Tablo 2'deki EDS analizlerine göre). Al-Ni alaşım sisteminde sünek  $AlNi$ ,  $Al_3Ni$ ,  $AlNi_3$  ve  $Al_3Ni_5$  intermetalikleri ve gevrek  $Al_4Ni_3$  ve  $Al_3Ni_2$  intermetaliklerinin oluştuğu bilinmektedir [16,17].





Şekil 4. Ni miktarına bağlı A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımları makro sertlikleri.

Ön alaşımlı A356/XNi alaşımlarının 20 N yük altında 2000 metre aşınma mesafesi sonrasındaki aşınma yüzey görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. A356/XNi alaşımları aşınma yüzeylerinden alınan noktasal veya bölgesel EDS analizleri Tablo 3'te verilmiştir. Ön alaşımlı A356 ve %0,25, 0,50 ve 2,0 Ni alaşımları yüzeylerinde aşınma testindeki deformasyondan kaynaklı sıyrılma çizgileri (aşınma yönündeki), kırılma çukurcukları net bir şekilde görülmektedir. Ön alaşımlı A356 alaşımında sünek davranıştan dolayı aşınma yüzeylerinde yığılma, sıyrılma vb. aşınma mekanizmaları gelişmiştir. Ayrıca aşınma testi sırasında numune yüzeylerinde oluşan ısı ve yüke bağlı olarak oksitlenmenin geliştiği belirlenmiştir. Aşınma testi esnasında oluşan sıyrılma yüzeylerindeki silisyum miktarının diğer bölgelere nazaran yüksek olduğu Tablo 3'teki EDS analizlerinde görülmektedir.

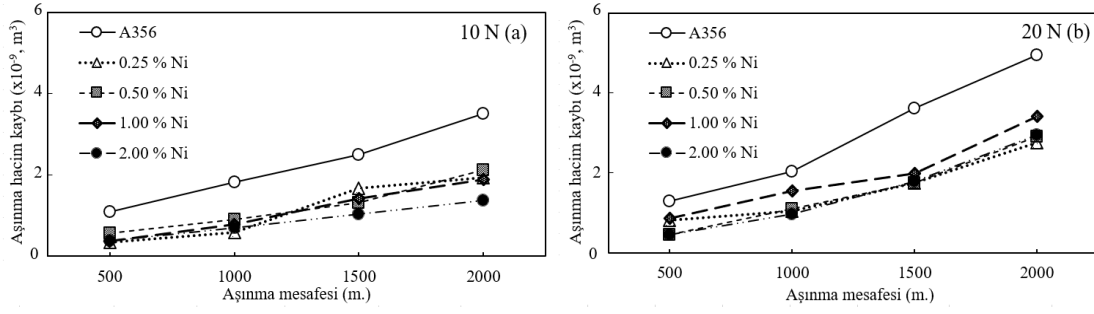


Şekil 5. A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımları aşınma yüzeyleri SEM görüntüleri ve EDS analizi bölgeleri (20N yük altında ve 2000 m. aşınma mesafesinde).

Tablo 3. A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımları aşınma yüzeyleri EDS analizi sonuçları (20N yük altında ve 2000 m. aşınma mesafesinde).

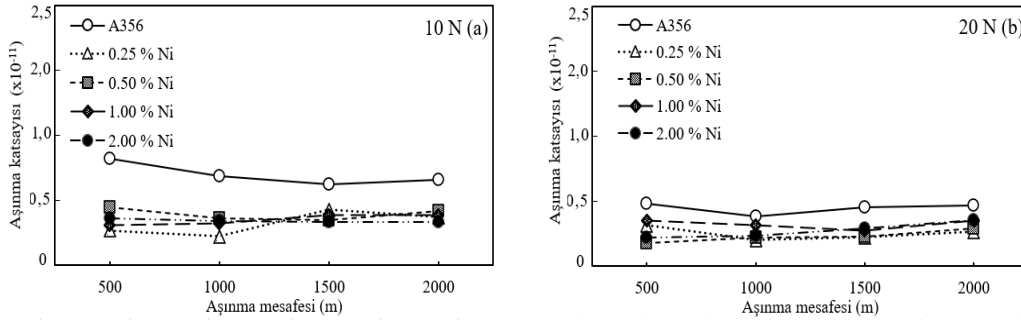
Alaşımlar	Bölgeler	Elementler (%)					
		Al	Si	Mg	Fe	O	Ni
A356	1	44,96	4,37	0,38	16,18	34,11	-
	2	56,68	5,19	0,76	1,37	36,00	-
	3	44,55	4,87	0,53	13,61	36,44	-
	4	38,42	3,01	0,24	16,46	41,87	-
%0,25Ni	1	69,98	4,04	0,88	2,99	21,65	0,47
	2	32,96	0,70	0,11	31,99	34,23	-
	3	49,96	4,75	0,44	4,28	40,58	-
	4	29,62	-	-	62,79	7,59	-
%0,50Ni	1	32,90	3,05	0,30	20,02	43,24	0,50
	2	34,02	2,98	0,23	23,97	38,80	-
	3	33,10	2,46	0,07	19,94	44,44	-
	4	26,65	2,94	0,54	24,31	44,86	0,69
1,0Ni	1	45,56	4,23	0,62	6,23	40,58	2,78
	2	37,61	5,05	0,29	2,46	52,81	1,77
	3	26,53	2,17	0,14	26,32	43,99	0,85
	4	24,71	1,60	0,07	35,46	37,86	0,30
2,0Ni	1	34,91	2,80	-	19,95	42,21	0,14
	2	54,52	9,13	0,63	7,42	27,14	1,16
	3	41,81	2,70	0,55	16,26	38,26	0,32
	4	36,80	2,29	0,25	20,24	38,72	1,69

Ön alaşımlı A356/XNi alaşımlarında Ni miktarına bağlı olarak, 10N ve 20 N yük altında aşınma testlerinden elde edilen hacimsel kayıp Şekil 6'da ve boyutsuz Archard's aşınma katsayısı üzerine etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Aşınma testindeki yük miktarının ve aşınma mesafesinin artması ile A356/XNi alaşımlarında hacimsel kayıpların arttığı görülmektedir. Aşınma testinde uygulanan yüke bağlı olarak aşınma oranının arttığı bildirilmiştir [19,35]. 10 N yük altında en yüksek hacimsel aşınma miktarı ön alaşımsız A356 alaşımında, en düşük hacimsel aşınma miktarı %2,0 Ni ile alaşımlanan ön alaşımlı A356 alaşımında elde edilmiştir. Buna karşın 20 N yük altında ise en yüksek hacimsel aşınma miktarı yine ön alaşımsız A356 alaşımında elde edilirken, en düşük hacimsel aşınma miktarı %0,25 Ni ile alaşımlanan ön alaşımlı A356 alaşımında elde edilmiştir. 10 N yük altında A356 alaşımına ilave edilen Ni miktarına bağlı olarak ulaşılan sertlik değeri ve hacimsel aşınma kayıpları birbirini desteklemektedir. Fakat 20 N yük altında ise en düşük hacimsel aşınma kaybı %0,25 Ni alaşımında elde edilmiştir. Bunun Ni miktarına bağlı olarak yapıda değişen Al-Ni ve Al-Si-Ni intermetaliklerinin morfolojik değişimi ve oranından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6. A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımlarında 10 N (a) ve 20 N (b) yük altında farklı aşınma mesafelerindeki hacimsel aşınma kayıpları.

Farklı yüklerde aşınma mesafesine bağlı boyutsuz Archard's aşınma katsayısı (Şekil 7) grafiği incelendiğinde ön alaşımsız A356 alaşımının 10 N yük altında aşınma mesafesine bağlı olarak sürekli azaldığı belirlenmiştir. Buna karşın 20 N yük altında 500 m aşınma mesafesinden sonra aşınma katsayısının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi yükün artmasına bağlı olarak aşınan kalıntıların aşınmayı güçlendirmesi ve yüzeydeki ısınmaya bağlı oksit oluşumunun etkili olduğu düşünülmektedir. Aşınma testi sonrasında aşınma yüzeyinden alınan EDS analizlerinde (Tablo 3) oksijen miktarının yüksek olduğu belirlenmiştir. Aşınma testinde oluşan oksit oluşumunun aşınma katsayısını yükselttiği birçok çalışmada belirlenmiştir [19,36]. 10 N yük altında en düşük aşınma katsayısının %2,0 Ni ilaveli A356 alaşımında, 20 N yük altında ise en düşük aşınma katsayısının %0,25 Ni ilaveli A356 alaşımında olduğunu belirlenmiştir.



Şekil 7. A356 ve ön alaşımlı A356/XNi alaşımlarında 10 N (a) ve 20 N (b) yük altında farklı aşınma mesafelerindeki aşınma katsayıları.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında; A356/XNi alaşımları mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen A356/XNi alaşımları üzerinde bir dizi karakterizasyon çalışması ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan karakterizasyon metotlarından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sünek davranışa sahip, hemen hemen küresel morfolojideki A356 ve süngerimsi morfolojideki Ni toz parçacıkları mekanik alaşımlama sırasında oluşan plastik deformasyon sonucunda geniş yüzey alanına sahip pul morfolojide görüntülenmiştir. Büyük boyutlu tozların kenarlarında deformasyona bağlı mikro çatlaklar ve ufalanmalar belirlenmiştir.

- A356/XNi alaşımı malzemelerin, sinterleme işlemi sonrası OM ve SEM görüntülerinde, kapalı boşlukların oluştuğu belirlenmiştir. Ni ilave miktarının artması, Al-Si-Fe intermetalığının bozulduğu ve Nikelce zengin Al-Si-Fe-Ni intermetalığının oluştuğu belirlenmiştir.
- Ni ilavesi ile A356 alaşımın makro sertlik değerinde dikkate değer bir artış elde edilmiştir.
- Aşınma test sonuçlarına göre, en yüksek aşınma mesafesinde, 10 N ve 20 N yük altında en yüksek hacimsel kayıp A356 alaşımında elde edilirken, 10 N yük altında en düşük hacimsel kayıp %2,0 Ni ile alaşımlanan A356 alaşımında, 20 N yük altında ise %0,25 Ni ile alaşımlanan A356 alaşımında elde edilmiştir.
- 10 ve 20 N yük altında A356/XNi alaşımları hacimsel aşınma miktarına bağlı olarak hesaplanan Archard's aşınma katsayısı benzer sonuçlar vermiştir. Buna karşın, 10 ve 20 N yük altında A356 alaşımı aşınma katsayısında yük miktarına bağlı olarak dikkate değer bir azalma olduğu belirlenmiştir.

### Teşekkür

Yazarlar FLY-2019-2070 numaralı proje kapsamında bu çalışmaya verdikleri katkılardan dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederler.

### Kaynaklar

- [1] Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler ve A., Vieregge, A., Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, **Mater. Sci. Eng. A.**, 280, (2000).
- [2] Zhou, J., Wan, X. ve Li, Y., Advanced Aluminium Products and Manufacturing Technologies Applied on Vehicles Presented at the EuroCarBody Conference, **Elsevier Ltd.**, (2015)
- [3] Tunçay, T. ve Özyürek, D., The Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Filtration in Al-Si-Mg Alloys, **J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.**, 29, 271–279, (2014).
- [4] Dispınar, D. ve Campbell, J., Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings, **Mater. Sci. Eng. A.**, 528, 3860–3865, (2011).
- [5] Dispınar, D. ve Campbell, J., Effect of casting conditions on aluminium metal quality, **J. Mater. Process. Technol.**, 182, 405–410, (2007).
- [6] Tunçay, T. ve Bayoğlu, S., The Effect of Iron Content on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Cast Alloy, **Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.**, 48, 794–804, (2017).
- [7] Abdoli, H., Salahi, E. ve Farnoush, H., & Pourazrang, K., Evolutions during synthesis of Al–AlN-nanostructured composite powder by mechanical alloying, **Journal of Alloys and Compounds**, 461(1-2), 166-172, (2008).
- [8] Dileep, B. P., Ravikumar, V., ve Vital, H. R.. Mechanical and corrosion behavior of Al-Ni-SiC metal matrix composites by powder metallurgy, **Materials Today: Proceedings**, 5(5), 12257-12264, (2018).

- [9] Hosseini Vajargah, P., Abdizadeh, H., ve Baghchesara, M. A., Fabrication of TiB<sub>2</sub> nanoparticulates-reinforced aluminum matrix composites by powder metallurgy route, **Journal of Composite Materials**, 49(25), 3115-3125, (2015).
- [10] Abdizadeh, H., Ebrahimifard, R., ve Baghchesara, M. A., Investigation of microstructure and mechanical properties of nano MgO reinforced Al composites manufactured by stir casting and powder metallurgy methods: A comparative study, **Composites Part B: Engineering**, 56, 217-221, (2014).
- [11] Suryanarayana, C., Mechanical alloying and milling, **Prog. Mater. Sci.**, 46, 1-84, (2001).
- [12] Suryanarayana, C., Recent advances in the synthesis of alloy phases by mechanical alloying/milling, **Met. Mater. Int.**, 2, 195-209, (1996).
- [13] Benjamin, J.S. ve Volin, T.E., The mechanism of mechanical alloying, **Metall. Trans.**, 5, 1929-1934, (1974).
- [14] Canté, M. V., Spinelli, J. E., Cheung, N., ve Garcia, A., The correlation between dendritic microstructure and mechanical properties of directionally solidified hypoeutectic Al-Ni alloys, **Metals and Materials International**, 16(1), 39-49, (2010).
- [15] Suwanpreecha, C., Pandee, P., Patakham, U., ve Limmaneevichitr, C., New generation of eutectic Al-Ni casting alloys for elevated temperature services, **Materials Science and Engineering: A**, 709, 46-54, (2018).
- [16] Du, Y., ve Clavaguera, N., Thermodynamic assessment of the Al-Ni system, **Journal of Alloys and Compounds**, 237(1-2), 20-32, (1996).
- [17] Shi, D., Wen, B., Melnik, R., Yao, S., ve Li, T., First-principles studies of Al-Ni intermetallic compounds, **Journal of Solid State Chemistry**, 182(10), 2664-2669, (2009).
- [18] Czichos, H., ve Saito, T., **Springer handbook of materials measurement methods**, L. Smith (Ed.). Berlin: Springer, 978, 399-429, (2006).
- [19] Menezes, P. L., Nosonovsky, M., Ingole, S. P., Kailas, S. V. ve Lovell, M. R., **Tribology for Scientists and Engineers**, (pp. 295-340). New York: Springer, (2013).
- [20] Lu, L., Lai, M.O. ve Zhang, S., Materials Processing Technology Diffusion in mechanical alloying, **J. Mater. Process. Technol.**, 67, 100-104, (1997).
- [21] Atkinson, H. V. ve Davies, S., Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview, **Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.**, 31, 2981-3000, (2000).
- [22] Huo, S.H., Qian, M., Schaffer, G.B. ve Crossin, E., **Aluminium powder metallurgy**, in: Fundam. Alum. Metall. Prod. Process. Appl., Elsevier Ltd., 655-701, (2010).
- [23] German, R.M., **Liquid Phase Sintering**, 1st edition, Springer Science, New York, (1985).
- [24] German, R.M., Suri, P. ve Park, S.J., Review: Liquid phase sintering, **J. Mater. Sci.**, 44, 1-39, (2009).
- [25] German, R.M., **Sintering With a Liquid Phase**, in: Sinter. from Empir. Obs. to

- Sci. Princ., Elsevier, 247–303, (2014).
- [26] Archard, J.F. ve Hirst, W., The wear of metals under unlubricated conditions, **Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.**, 236, 397–410, (1956).
- [27] Yang, L.J., Wear coefficient equation for aluminium-based matrix composites against steel disc, **Wear.**, 255, 579–592, (2003).
- [28] Archard, J.F., Contact and rubbing of flat surfaces, **J. Appl. Phys.**, 24, 981–988, (1953).
- [29] Zhang, T., McHugh, P.E. ve Leen, S.B., Computational study on the effect of contact geometry on fretting behaviour, **Wear.**, 271, 1462–1480, (2011).
- [30] Zhu, J. ve Yan, H., Fabrication of an A356/fly-ash-mullite interpenetrating composite and its wear properties, **Ceram. Int.**, 43, 12996–13003, (2017).
- [31] Senna, M., **High-Energy Ball Milling: Mechanochemical Processing of Nanopowders, first edn, in: High-Energy Ball Milling**, Woodhead Publ., 63–91, (2010).
- [32] Razavi-Tousi, S.S. ve Szpunar, J.A., Effect of ball size on steady state of aluminum powder and efficiency of impacts during milling, **Powder Technol.**, 284, 149–158, (2015).
- [33] Samal, P.K. ve Newkirk, J.W., **Powder Metallurgy**, first ed., ASM International Materials Park, Ohio, (2015).
- [34] Sopicka-Lizer, M., **High Energy Ball Milling**, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge (2010), Woodhead Pub., (2010).
- [35] Da Silva, C.R.Á. ve Pintaude, G., Uncertainty analysis on the wear coefficient of Archard model, **Tribol. Int.**, 41, 473–481, (2008).
- [36] Norul Amierah Binti Nor Zamani ve AKM Asif Iqbal ve D.M., Nuruzzaman, Mechanical and Tribological Behavior of Powder Metallurgy Processed Aluminum–Graphite Composite, **Russ. J. Non-Ferrous Met.**, 60, 274–281, (2019).