

## Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen AA7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kompozitlerin Sertlik ve Mikroyapısına Mekanik Alaşımlama Süresinin Etkisi

Halit SÜBÜTAY<sup>1</sup>, Salih Bilal ÇETİNKAL<sup>1</sup> ve Gökhan ARICI<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü / Teknoloji Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, Türkiye

\*([arici@selcuk.edu.tr](mailto:arici@selcuk.edu.tr))

(Received: 28 July 2023, Accepted: 09 August 2023)

(1st International Conference on Modern and Advanced Research ICMAR 2023, July 29-31, 2023)

**.ATIF/REFERENCE:** Sübütay, H., Çetinkal, S. B. & Arıcı, G. (2023). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen AA7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kompozitlerin Sertlik ve Mikroyapısına Mekanik Alaşımlama Süresinin Etkisi. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(7), 62-67.

**Özet** – AA7075 alüminyum alaşımı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların yüksek sıcaklık mukavemetleri, aşınma dirençleri gibi özellikler bazı durumlarda yeterli olamamaktadır. Alaşımlara takviye elemanları ilave edilerek üretilen metal matrisli kompozit malzemeler ile bu eksiklik giderilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışma kapsamında AA7075 alüminyum alaşımına, mekanik alaşımlama yöntemi ile nano boyutta Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toz takviyesi yapılmıştır. Mekanik alaşımlama yöntemi farklı sürelerde (0, 1 ve 5 sa) uygulanmış ve elde edilen tozlar önce 500 MPa da soğuk presleme işlemine tabi tutulmuş sonrasında 500°C de 25 MPa basınç altında 20 dakika boyunca sıcak preste numuneler üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin sertlik, yoğunluk ve mikroyapı analizleri için metalografik numune hazırlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle numuneler sırasıyla 600-2000'lik zımparalar yardımı ile zımparalanmış, hemen sonrasında 6 ve 0,5 µm alümina solüsyon ile parlatma işlemi tamamlanmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler, uygun bileşimlerde hazırlanan Modifiye Keller solüsyonu ile dağlanmıştır. Dağlanmış numunelerin mikroyapıları optik mikroskop ile incelenmiştir. Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmadan üretilen numunede daha büyük taneler göze çarparken artan mekanik alaşımlama süresi ile daha ince taneli yapıların oluştuğu görülmüştür. Mekanik alaşımlama süresinin sertlik ve yoğunluk üzerindeki etkileri incelemek amacı ile yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibi ile sertlik ölçümleri ise, Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda en yüksek yoğunluk değeri (2,81 gr/cm<sup>3</sup>) 1 saat mekanik alaşımlanmış alaşımda elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri (237,2 HB) ise 5 saat mekanik alaşımlanmış alaşımda elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** – AA7075, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mekanik Alaşımlama, Toz Metalurjisi, Metal Matrisli Kompozit

### I. GİRİŞ

AA7075 alaşımı yüksek mukavemetli, ısı işlem uygulanabilir bir alüminyum alaşımıdır [1]. Alaşım, mükemmel mukavemet-ağırlık oranına sahiptir ve bu sayede havacılık, uzay, askeri ve yüksek performans uygulamalarında, otomotiv

parçalarında ve spor ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Ancak bu alaşımların yüksek sıcaklıklarda, aşınma hasarına maruz kalan uygulamalarda kullanımında sınırlamalar mevcuttur.

Alüminyum alaşımlarının kullanımını daha etkili ve verimli hale getirmek için çeşitli yöntemler ile

özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür [3]. Alaşıma dışardan oksit, karbür, nitrür gibi seramik takviye elamanları ile oluşturulacak metal matrisli kompozitler üretilerek malzemelerin mukavemeti, yüksek sıcaklık direnci, aşınma direnci gibi özelliklerin artırılması mümkündür [4]. Bu kompozitlerin oluşturulması için farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bir tanesi de mekanik alaşımlama yöntemidir. Mekanik alaşımlama yönteminde matris tozu ile ilave edilecek takviye tozu bir haznede belirli süre alaşımlanmaktadır. Mekanik alaşımlama süresinin artırılması malzemenin toz boyutlarını değiştirmekle birlikte, malzemenin homojen bir şekilde karışmasını da sağlayarak daha yüksek mekanik özellikler sergileyebilmesine olanak vermektedir [5].

Bu çalışmada 40-50  $\mu\text{m}$  boyutundaki matris AA7075 tozuna, 50 nm boyutlarındaki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozları ağırlık %5 oranında karıştırılarak 0, 1 ve 5 saat süre ile mekanik olarak alaşımlanmıştır. Mekanik alaşımlama sonrasında tozlar, 500  $^\circ\text{C}$ 'de sıcak pres yöntemiyle üretilmiştir ve üretilen numunelerin mikro yapı, sertlik ve yoğunluklarında meydana gelen değişimler incelenmiştir.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

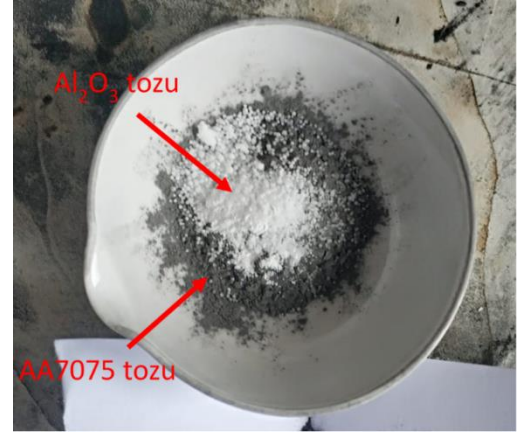
Bu çalışma kapsamında matris malzemesi olarak AA7075 alüminyum tozu kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak ise alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nano partikül kullanılmıştır. Matris ve takviye malzemelerinin fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri

Özellik	AA7075	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Toz saflık oranı (%)	99,5	99,99
Toz şekli	Küresel	Küresel
Toz boyutu	40 -50 $\mu\text{m}$	50 nm
Teorik yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	2,81	3,95

Matris ve takviye malzemesinin oranları sırasıyla ağırlık %95 ve %5; alaşımlama süreleri ise 0, 1 ve 5 saat olacak şekilde belirlenmiştir. Matris malzemesi olan AA7075 tozundan 4,5 gr takviye malzemesi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozundan ise 0,5 gr tartılarak tungsten karbür alaşımlama haznesi içerisine konulmuştur. Alaşımlama işleminde kullanılacak olan 10 mm çapında tungsten karbür bilyeler, bilye oranı 15:1 olacak şekilde tartılıp hazne içerisine konulmuştur. İKK olarak sisteme hekzan ağırlık %2 ilave edilmiştir. Mekanik alaşımlama işlemi iki

haznede, 450 rpm'de, 5 dk öğüt, 5 dk bekle şeklinde farklı mekanik alaşımlama sürelerinde alaşımlanmıştır. Her alaşımlama için hazneler temizlenip tekrar kullanılmıştır.



Şekil 1. Mekanik alaşımlama öncesi karıştırılan tozlar

Bulk numune üretimi için alaşımlanmış 2 gr AA7075 ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  karışım tozu preslenmek için tartılmıştır. Numune üretimi için 13 mm çapında kalıp kullanılmıştır. Kalıba yerleştirilen tozlara şekil vermek için sıcak pres öncesi kısa süreli 500 MPa'lık basınç uygulanmıştır. Daha sonra kalıp 500  $^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılmış ve bu sıcaklık altında, 20 dk boyunca 25 MPa basınç uygulanmıştır.



Şekil 2. Sıcak pres yöntemi ile üretilen numuneler

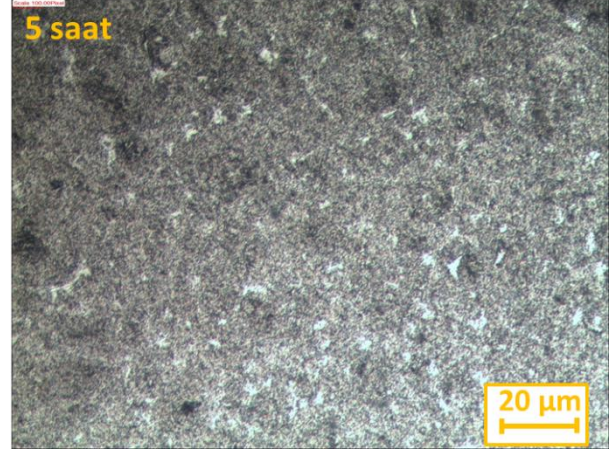
Çalışmada üretilen tüm numunelere metalografik numune hazırlama işlemi uygulanmıştır. Her numuneye 600 meshten 2000 meshe kadar zımparalanmıştır. Parlatma işlemi için sırayla 6  $\mu\text{m}$  ve 0,5  $\mu\text{m}$  alümina pasta kullanılmıştır. Mikroyapının ortaya çıkarılması için Modifiye Keller solüsyonu ile numuneler dağlanmıştır.

Numunelerin mikroyapı analizi için Nikon Eclipse MA100 mikroskop kullanılarak mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri, Brinell sertlik metoduna göre 62,5 kgf yük altında DIGIROCK-LC-RBOV sertlik ölçüm

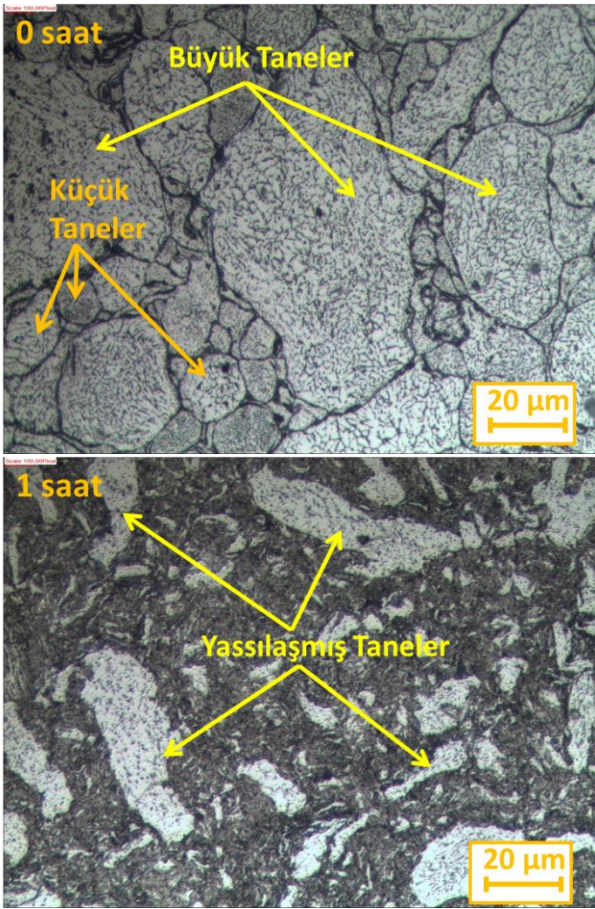
cihazı ile yapılmıştır. ASTM B595-11 standardına göre yoğunluk ölçümü Arşimed prensibine göre yapılmıştır. Sertlik ve yoğunluk ölçümleri 5 tekrar olacak şekilde yapılmıştır. Sonuçlar 5 tekrarın ortalaması alınarak sunulmuştur.

### III. BULGULAR

Şekil 3' te toz metalurjisi üretim yöntemlerinden biri olan sıcak pres metodu ile üretimi gerçekleştirilen ağ. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli AA7075 metal matrisli kompozit numunelerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

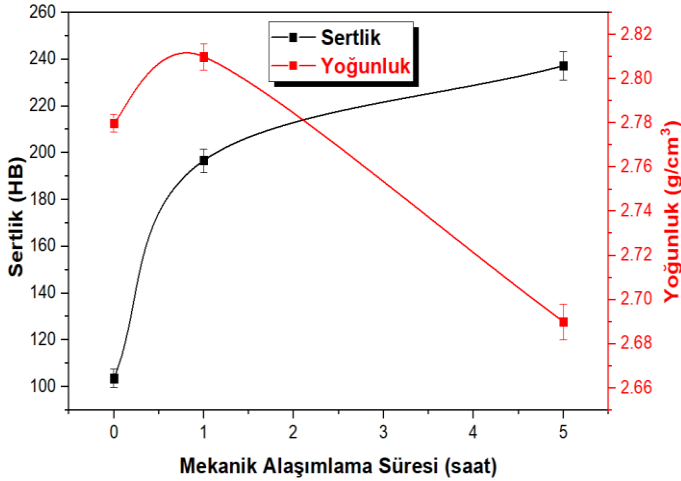


Şekil 3. Mekanik alaşımlama süresinin bir fonksiyonu olarak AA7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit numunelerinin optik mikroskop görüntüleri



Sıcak pres işlemi sonrasında elde edilen optik mikroskop görüntülerinden, mekanik alaşımlama süresinin, numunelerin mikroyapısına doğrudan etki ettiği anlaşılmaktadır. Farklı öğütme sürelerinde uygulanan mekanik alaşımlama işlemi, mikroyapıda tanelerin boyutuna ve şekline etki ederek nihai ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir.

Şekil 4' te sıcak preslenmiş AA7075- ağ.% 5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitlerinin sertlik sonuçları verilmektedir. Mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak sertliklerin 0, 1 ve 5 saat için sırası ile 103,6, 196,7 ve 237,2 HB olduğu görülmektedir. Artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak sertlik değerlerinde gözle görülür bir artış meydana geldiği anlaşılmaktadır. Yine Şekil 4' ten numunelerin yoğunluk değerleri incelendiğinde, mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak yoğunlukların 0, 1 ve 5 saat için sırası ile 2,78, 2,81 ve 2,69 g/cm<sup>3</sup> olarak saptandığı görülmektedir. Sonuçlara göre numunelerin yoğunluk değerlerinin de mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Bu değişime bağlı olarak yoğunluk ve sertlik sonuçları birlikte incelendiğinde mekanik alaşımlama süresinin yoğunluk ve sertlik üzerinde önemli bir etken olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4. Mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak sertlik ve yoğunluk değerlerinde meydana gelen değişim

#### IV. TARTIŞMA

Sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntülerinden, artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak partikül boyutunun değiştiği ve bu değişen boyutun sinterleme işleminde oluşan tanelerin boyutlarına doğrudan etki ettiği görülmektedir. Mekanik alaşımlama esnasında başlangıç tozları önce pulsulaşmakta, daha sonra pulsulaşan partiküller kırılarak daha küçük parçacıklara dönüşmektedir [6]. Literatür ile uyumlu olan bu sonuç ışığında artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak mikro yapıda daha ince tane morfolojisi elde edildiği ve buna bağlı olarak sertlikte artış meydana geldiği anlaşılmaktadır.

Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen, mekanik alaşımlama işlemi yapılmamış (0 sa) numunenin sertlik değerinin literatürdeki saf AA7075 alaşımının sertlik değerinden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebinin dışarıdan yapıya takviye edilen  $Al_2O_3$  partiküllerinin, yapıya homojen dağılmasına bağlı olarak, mukavemet artırıcı mekanizmalardan biri olan dispersiyon ile sertleştirme mekanizmasının etkinleşmesini sağlayarak, numunenin mukavemetinin artışına yardımcı olduğu söylenebilir. Ayrıca  $Al_2O_3$  takviyesi yapıлып mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulan numunelerde artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak partikül yüzeylerinde etkili olan aşırı plastik deformasyon ve soğuk kaynak gibi deformasyon mekanizmalarının etkin hale gelmesi sonucunda daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu mekanizmaların etkin hale gelmesi sonucunda partiküllerin sertlik ve

kırılabilirliğinde artış meydana gelmektedir [7]. Mekanik alaşımlama esnasında sürekli olarak gerçekleşen bilye-toz-bilye ve bilye-toz-havan çarpışmaları sonucunda etkin hale gelen deformasyon mekanizmalarına bağlı olarak dislokasyon yoğunluğunda ve kafes gerilmesinde de bir artış söz konusudur [8]. Nano boyutta ilave edilen  $Al_2O_3$  partiküllerinin artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak yapıya homojen dağılmasının sağlanması partiküller arasındaki mesafeyi azaltmaktadır. Artan öğütme süresine bağlı olarak kısa mesafelerde dizilen nano  $Al_2O_3$  partikülleri sinterleme işlemi esnasında numunede tane büyümesini geciktirebilir. Sertlik ile tane boyutu arasındaki bağıntıyı göz önüne sunan Hall-Patch denklemine göre tane boyutunda meydana gelen bir azalma sertlikte artış ile kendini göstermektedir [9]. Sertlik sonuçlarından da anlaşılacağı üzere 5 saat mekanik alaşımlama işlemi sonucunda meydana gelen aşırı plastik deformasyon ile AA7075 matrisinde nano  $Al_2O_3$  partiküllerinin homojen dağılımı sonucunda dispersiyon mekanizması dislokasyon hareketlerini engelleyerek yüksek miktarda dislokasyon yoğunluğuna sebep olurlar [10]. Yüksek dislokasyon yoğunluğu yapıda tane incelleme mekanizmasının hızlanmasına sebebiyet vermekte ve matris içerisinde fazla miktarda küçük açılı tane sınırı ve buna bağlı olarak alt tanelerin oluşmasını sağlamaktadır. Bu küçük açılı tane sınırlarının farklı dizilimleri ve tane sınırlarının etrafındaki kafes düzensizlikleri kayma düzlemlerindeki dislokasyonların hareketlerini engellemekte ve bunun sonucunda sertlikte artış meydana gelmektedir [11]. Yapılan çalışma ve literatürden elde edilen bilgiler ışığında, mekanik alaşımlanmış tozlardan üretilen numunenin sertlik değerinin mekanik alaşımlama yapılmamış tozlardan üretilen numunelerin sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Toz metalurjisi yönteminde tozun morfolojisi, boyutu ve dağılımı sinterleme sonrası malzemenin yoğunluğuna etki eden parametrelerin başında gelmektedir. Özellikle toz boyutu nihai ürünün tam yoğunluğa ulaşabilmesi için kontrol edilmesi gereken bir parametredir. Yüksek yoğunluğa sahip bir malzeme üretebilmek için ideal bir paketleme yoğunluğu, bunun için de optimum bir toz boyutu gerektiği literatürdeki çalışmalarda mevcuttur. İdeal bir paketlenabilirlik için yapıda hem büyük partikül hem de küçük partikül boyutuna sahip

tozlar bir arada bulunmalıdır. Bundan dolayı mekanik alaşımlama işleminde alaşımlama süresi toz morfolojisine etki eden başlıca faktörlerden biridir. Optimum toz boyutunu elde edebilmek için en ideal mekanik alaşımlama süresi belirlenmelidir. Mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmadan küresel formda sıcak pres işlemine tabi tutulan tozlarda presleme esnasında mekanik kilitlenme olayı gerçekleşmektedir. Bunun sonucu tozlar birbirlerine yaklaşmakta fakat tek tip (monomodal) toz dağılımı olmasından dolayı tozlar arasında boşluklar meydana gelmekte, bu da nihai ürünün yoğunlaşabilirliğini ve sinterlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir [12]. 1 saat mekanik alaşımlama sonrasında yapıda sürekli tekrarlanan bilye-toz-bilye çarpışmalarından kaynaklı olarak küresel tozlar hem bilye darbelerinden meydana gelen kesme kuvveti etkisi sonucunda yassılaşmaya başlamakta, hem de soğuk kaynak deformasyon mekanizmasına bağlı olarak daha küçük boyutta toz parçacıklarının oluşmasını sağlamaktadır. Yapıda hem yassı tozların hem de küçük boyutlarda tozların birlikte bulunması sonucu paketlenabilirlik değerinin arttığı ve buna bağlı olarak yoğunluk değerinin arttığı Şekil 4'ten anlaşılmaktadır. Artan mekanik alaşımlama süresi (5 saat) ile aşırı plastik deformasyon ve soğuk kaynak mekanizmalarının etkisi ile tozlarda dislokasyon yoğunluğu ve kafes gerinimleri artmakta bunun sonucunda tozların paketlenabilirliği azalmaktadır. Aşırı plastik deformasyonun sinterlenmiş numunenin yapısında mikro boşluklar meydana getirerek yoğunluk değerinde azaltıcı etki sergileyeceği ifade edilebilir. Bu deformasyon mekanizmalarının etkin olması sonucunda sinterleme esnasında matris ile partikül takviye elemanı arasında zayıf bir ara yüzey etkileşimi gerçekleşmektedir. Bu da artan mekanik alaşımlama süresinde sinterlenmiş numunenin yoğunluk değerinin neden düşüş eğilimine geçtiği olgusunu açıklamaktadır. Benzer sonuçlar literatürdeki bazı araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. [13],[14].

Yüksek mekanik alaşımlama süresinde tozların yetersiz paketlenme ve sinterlenebilirliğine bağlı olarak var olan mikro gözenekler yapısal bütünlüğü olumsuz etkileyerek gerilim arttırma görevi görmekte ve sonuç olarak numunenin yoğunluğu azalmaktadır [15].

## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen AA7075- ağ. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımlarının yoğunluk, sertlik ve mikroyapı özelliklerine mekanik alaşımlama süresinin etkisi incelenmiştir.

Araştırma sonucu elde edilen bilgiler aşağıda sırası ile sunulmuştur.

- Farklı sürelerde mekanik alaşımlanmış AA7075-ağ.%5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit tozlarının sıcak pres yöntemi ile üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Farklı mekanik alaşımlama sürelerinde öğütülen tozların sinterleme işlemi sonrasında mikro yapılarında artan öğütme süresine bağlı olarak oluşan tanelerin incelendiği açıkça görülmektedir.
- En yüksek yoğunluk değeri optimum paketlenebilirliğin elde edildiği 1 saat mekanik alaşımlanmış ağ. %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikül takviyeli kompozit numunelerinde (2,81 g/cm<sup>3</sup>) elde edilirken en düşük yoğunluk değeri aşırı plastik deformasyon ve soğuk kaynak mekanizmasının birlikte etkili olduğu 5 saat mekanik alaşımlanmış kompozit numunede (2,69 g/cm<sup>3</sup>) elde edilmiştir.
- En yüksek sertlik değeri 5 saat mekanik alaşımlanmış sıcak pres yöntemi ile sinterlenmiş AA7075- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit alaşımında (237,2 HB) elde edilirken en düşük sertlik değeri mekanik alaşımlama işlemi gerçekleştirilmemiş AA7075- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit alaşımında (103,6HB) elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] T. Sunar, T. Tuncay, D. Özyürek, and M. Gürü, "Investigation of mechanical properties of AA7075 alloys aged by various heat treatments," *Physics of Metals and Metallography*, vol. 121, pp. 1440-1446, 2020.
- [2] I. Mobasherpour, A. Tofigh, and M. Ebrahimi, "Effect of nano-size Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying," *Materials chemistry and physics*, vol. 138, no. 2-3, pp. 535-541, 2013.
- [3] E. Salur, M. Acarer, and C. Nazik, "Mekanik Alaşımlama Süresinin Toz Metalurjisi ile Üretilen AA7075 Matrisli Nanokompozit Malzemelerinin Sertliklerine Etkisi," *Journal of the Institute of Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 2218-2231, 2021.

- [4] S. Gökhan and İ. Kayabaşı, "Hafif Metal Ana Fazlı Kompozit Malzeme Üretim Sisteminin Tasarım, İmalat Ve Performansının İncelenmesi," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 63-79.
- [5] M. Adamiak, "Mechanical alloying for fabrication of aluminium matrix composite powders with Ti-Al intermetallics reinforcement," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 191-196, 2008.
- [6] C. Shuai *et al.*, "Mechanical alloying of immiscible metallic systems: process, microstructure, and mechanism," *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 4, p. 2001098, 2021.
- [7] T. Varol and A. Canakci, "Effect of particle size and ratio of B4C reinforcement on properties and morphology of nanocrystalline Al2024-B4C composite powders," *Powder Technology*, vol. 246, pp. 462-472, 2013.
- [8] B. Babu and L.-E. Lindgren, "Dislocation density based model for plastic deformation and globularization of Ti-6Al-4V," *International Journal of Plasticity*, vol. 50, pp. 94-108, 2013.
- [9] C. Suryanarayana, "Mechanical alloying and milling," *Progress in materials science*, vol. 46, no. 1-2, pp. 1-184, 2001.
- [10] H. Wang, G. Li, Y. Zhao, and G. Chen, "In situ fabrication and microstructure of Al2O3 particles reinforced aluminum matrix composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 12, pp. 2881-2885, 2010.
- [11] R. Casati *et al.*, "Mechanical and functional properties of ultrafine grained Al wires reinforced by nano-Al2O3 particles," *Materials & Design*, vol. 64, pp. 102-109, 2014.
- [12] M. Canaran, "Mekanik alaşımlamanın volfram ağır alaşımlarının yüksek sıcaklık sinterleme davranışlarına olan etkilerinin incelenmesi," Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [13] S. A. Hewitt and K. A. Kibble, "Effects of ball milling time on the synthesis and consolidation of nanostructured WC-Co composites," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 27, no. 6, pp. 937-948, 2009.
- [14] K. A. Nazari, A. Nouri, and T. Hilditch, "Effects of milling time on powder packing characteristics and compressive mechanical properties of sintered Ti-10Nb-3Mo alloy," *Materials Letters*, vol. 140, pp. 55-58, 2015.
- [15] X. Ye, Y. Li, Y. Ai, and Y. Nie, "Novel powder packing theory with bimodal particle size distribution-application in superalloy," *Advanced Powder Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 2280-2287, 2018.