







# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Oranları ile Takviye Edilmiş Al-Cu-Mg Alaşımalarının Sıcak Pres Yöntemi ile Üretimi

 Serhatcan Berk AKÇAY<sup>a</sup>,  Temel VAROL<sup>a,\*</sup>,  Hüseyin Can AKSA<sup>a</sup>,  Onur GÜLER<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Metaller ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE*

\* *Sorumlu yazarın e-posta adresi: tvarol@ktu.edu.tr*  
DOI:10.29130/dubited.1019419

### ÖZET

Al esaslı alaşımlar havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Düşük yoğunlukları ve yüksek özgül mukavemet özellikleri, Al ve alaşımlarını mühendislik malzemeleri olarak kullanılabilir hale getirir. Al esaslı alaşımlar seramik partiküller ile takviye edildiğinde yüksek sertlik ve mukavemete sahip yeni nesil mühendislik malzemeleri olarak kullanılabilirler. Bu çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri Al-Cu-Mg matrisine ağırlıkça %10, %20 ve %40 oranında mekanik alaşımlama (MA) yöntemiyle takviye edilmiş ve 560 °C, 500 MPa pres koşullarında sıcak pres (SP) yöntemiyle preslenmiştir. MA işleminden sonra partikül boyutu ölçümleri, partikül boyutlarının azaldığını ortaya çıkarmıştır. Al-Cu-Mg ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin MA işlemi öncesi partikül boyutu ölçüm sonuçları sırasıyla 212,434 µm ve 89,208 µm olarak ölçülmüştür. MA işlemi sonrası partikül boyutları %10, %20 ve %40 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli numuneler için sırasıyla 14,224 µm, 13,747 µm ve 10,885 µm olarak ölçülmüştür. %10, %20 ve %40 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile üretilen numunelerin sertlik değerleri sırasıyla 146,867 HV (0,5), 165,290 HV (0,5) ve 206,843 HV (0,5) olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al-Cu-Mg, Mekanik Alaşımlama, Metal Matris Kompozit, Toz Metalurjisi

## Production of Al-Cu-Mg Alloys Reinforced with High Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ratios by Hot-Pressing Method

### ABSTRACT

Al-based alloys are used in many sectors such as aerospace, automotive and defense industries. Their low densities and high specific strength properties make Al and its alloys usable as engineering materials. When Al-based alloys are reinforced with ceramic particles, they can be used as new generation engineering materials with high hardness and strength. In this study, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles were reinforced to Al-Cu-Mg matrix by 10%, 20% and 40% by weight by mechanical alloying (MA) method and pressed by hot press (HP) method at 560 °C, 500 MPa pressing conditions. Particle size measurements after the MA treatment revealed that the particle sizes were reduced. The particle size measurement results of Al-Cu-Mg and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles before MA process were measured as 212.434 µm and 89.208 µm, respectively. The particle sizes after MA process were measured as 14.224 µm, 13.747 µm and 10.885 µm for 10%, 20% and 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced samples, respectively. The hardness values for the samples produced with 10%, 20% and 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content were measured as 146.867 HV (0.5), 165.290 HV (0.5) and 206.843 HV (0.5), respectively.

**Keywords:** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al-Cu-Mg, Mechanical Alloying, Metal Matrix Composite, Powder Metallurgy

# I. GİRİŞ

Yeni nesil malzemeler olarak isimlendirilen metal matrisli kompozit (MMK)'ler, birçok mühendislik alanında kullanılabilecek ve her geçen gün kullanım alanları artan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Farklı partiküllerin takviye olarak kullanıldığı MMK, çok yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir [1]-[3]. Alüminyum (Al) mühendislik ve bilim alanlarında düşük yoğunluğu ve yüksek spesifik mukavemeti nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Al matrisli kompozitler, farklı seramik partiküller ile takviye edildiklerinde çok yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direnci özelliklerine sahip olabilmektedirler. Bu üstün özellikler, Al matrisli kompozitleri havacılık, otomotiv ve yapısal mühendislik malzemeleri endüstrilerinde kullanılabilir hale getirmektedirler [4]-[6].

Al, birçok farklı alaşım grubuna sahiptir ve bunlardan bir tanesi 2XXX serisi Al alaşımlarıdır. Al ve bakır (Cu) elementlerinin temel alaşım elementi olarak kullanıldığı 2XXX serisi Al alaşımları magnezyum (Mg) elementi de ihtiva etmektedir ve sahip oldukları üstün özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay sanayii de olmak üzere birçok farklı mühendislik alanında kullanılmaktadır. Al-Cu-Mg alaşımı alümina ( $Al_2O_3$ ) ile takviye edilebilmektedir ve literatür incelendiğinde bu şekilde birçok çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir. Sahip oldukları yüksek sertlik ve mukavemet özelliklerinden dolayı  $Al_2O_3$  partikülleri takviye olarak kullanıldıklarında, Al matrisin sertlik ve mukavemetini arttırmaktadırlar [4]-[10].

Literatür incelemelerinde ağırlıkça değişken  $Al_2O_3$  içeriğine sahip Al matrisli kompozitlerin üretilmesi için çeşitli çalışmalar mevcuttur. Prabhu ve diğerleri (2006), yüksek enerjili bilyeli öğütme yöntemi ile 50nm, 150nm ve 5 $\mu$ m partikül boyutunda  $Al_2O_3$  partiküller kullanıp %20, %30 ve %50  $Al_2O_3$  içeriğine sahip Al esaslı MMK üretimi ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada 20 saat süre ve 10:1 bilye:toz oranı kullanarak yüksek enerjili öğütme işlemi uygulamışlar ve sonuç olarak homojen bir dağılım elde etmişlerdir [11]. Zabihi ve diğerleri (2014) yaklaşık 40  $\mu$ m partikül boyutuna sahip Al partiküller ile ağırlıkça %2 ve %4 oranında, 3-8  $\mu$ m partikül boyutuna sahip  $Al_2O_3$  partikülleri kullanarak yüksek enerjili öğütme işlemi uygulamışlardır. Yüksek enerjili öğütme yöntemi ile üretmiş oldukları Al/  $Al_2O_3$  partikülleri 100 MPa ham presleme ve 200 MPa SP işlemine tabii tutmuşlar ve sonrasında 45 dakika boyunca yaklaşık 500 °C sıcaklıkta sinterlemişlerdir. Sinterleme işleminin ardından sıcak haddeleme uygulamışlar ve sonuç olarak  $Al_2O_3$  takviyenin sıcak haddeleme işleminde başlangıçta sertliği olumsuz etkilediği ancak artan takviye oranı ile dislokasyon yoğunluğunun artmasına bağlı olarak sertliğin de artma eğiliminde olduğunu ortaya koymuşlardır [12]. Pramod ve diğerleri (2017) yapmış oldukları çalışmada, yaklaşık 150  $\mu$ m partikül boyutuna sahip  $Al_2O_3$  partiküllerin Al7075 matris içerisine ağırlıkça %2-%6 oranlarında takviye edilmesi ile MMK üretimi gerçekleştirmişlerdir. Ağırlıkça %6  $Al_2O_3$  takviyesi içeren yapının aşınma direncinin oldukça yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır [13]. Kanca ve Günen (2016), Al6061 matris içerisine 32 ve 66  $\mu$ m partikül boyutuna sahip  $Al_2O_3$  partikülleri takviye etmişler ve vorteks yöntemi ile MMK üretimi gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda artan  $Al_2O_3$  takviye oranı ile sertlik değerlerinin arttığını, ağırlıkça %20  $Al_2O_3$  takviyeli deney numunesi için yaklaşık 83 HB, bildirmişlerdir [14]. Reddy (2011), %12, %16 ve %20  $Al_2O_3$  takviyeli Al6063 matrisli MMK üretimi ve mekanik özellikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Takviye malzemesinin partikül boyutu 10, 15 ve 20  $\mu$ m olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmaları neticesinde artan takviye oranının uzama özelliklerini azalttığı ancak sertlik özelliklerini arttırdığını ortaya koymuştur. Bu durumu matris alaşımı ve  $Al_2O_3$  arasındaki yüzey etkileşiminin sertlik özelliklerini arttırmaya katkıda bulunabileceği şeklinde açıklamıştır [15]. Ghanaraha ve diğerleri (2016), ağırlıkça %0, 3, 6, 9 ve 12  $Al_2O_3$  takviyesi ve Al 1100-Mg alaşımı matrisi kullanarak ergiyik karıştırma yöntemi ile MMK üretimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda artan takviye oranıyla sertlik değerlerinin yaklaşık olarak 85 HRB sertlik değerine ulaştığını ortaya koymuşlardır [16]. Zhang ve diğerleri (2019), ağırlıkça %20, 40 ve 60 oranında  $Al_2O_3$  içeriğine sahip Al-Cu-Mg matrisli MMK üretimini soğuk sprey kaplama yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde, ağırlıkça %20  $Al_2O_3$  takviye oranına sahip yapının basma dayanımı ve yapışma mukavemetinin yüksek olduğunu ancak artan takviye oranı (%40 ve %60) ile yapıdaki kırılmış  $Al_2O_3$  parçacıkların artması nedeniyle yoğunlaşmanın olumsuz

etkilendiği sonucunu ortaya koymuşlardır [17]. Varol ve diğerleri (2016), Al-Cu-Mg matris içerisine ağırlıkça %1-5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyesini yeni bir yöntem olan pul benzeri partikül metalurjisi yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Artan öğütme süresi ile görünür yoğunluğun azaldığını, artan takviye oranı ile SP sonrası yoğunluğun azaldığını ortaya koymuşlardır. Sertlik değerlerinin ise artan takviye oranı ile arttığı sonucuna ulaşmışlardır [18].

Yapılan literatür araştırmaları MA yöntemi ile yapılan çalışmalarda kullanılan takviye oranlarının genellikle ağırlıkça düşük oranlarda olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, ağırlıkça yüksek (%10, %20 ve %40 ağırlıkça Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) takviye malzemesi oranları ihtiva eden, Al-Cu-Mg alaşımı metalik tozların matris olarak kullanıldığı partikül takviyeli MMK üretimi ve karakterizasyonu incelenmiştir. Seramik partikül takviyesinin yapı içerisinde ağırlıkça artmasının, Al matrisli MMK malzemenin mikroyapı özellikleri ile sertlik ve yoğunluk değerleri üzerine etkileri araştırılmıştır.

## **II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Kullanılan Malzemeler**

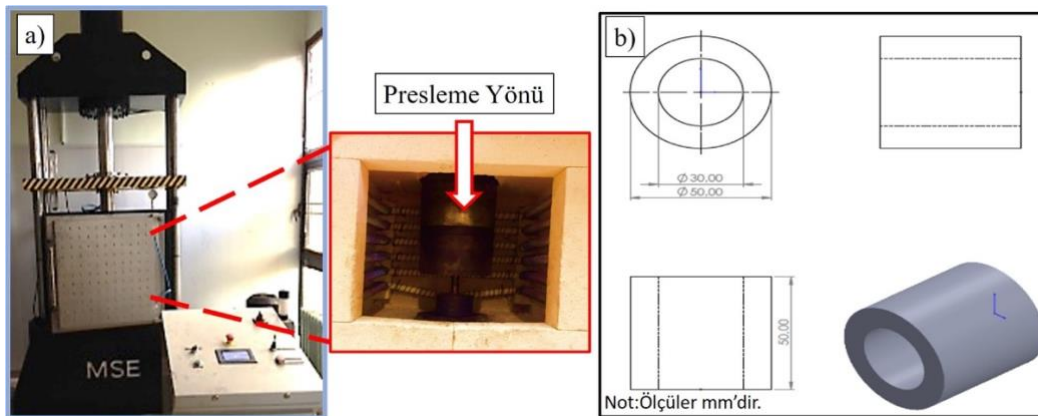
Bu çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan Al-Cu-Mg alaşımı partiküller %99,9 saflığa sahiptir ve Alfa Aesar, Haverhill, Massachusetts, ABD'den temin edilmiştir. Al-Cu-Mg alaşımına ait kimyasal kompozisyon verileri Tablo 1'de yer almaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerin saflık değeri de %99,9'dur ve Nanografi, Türkiye'den temin edilmiştir.

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

Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0,374	0,385	4,85	0,042	0,312	1,78	0,138	0,005	Kalan

### **2.2. Yapılan Deneyler**

Bu çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye partikülleri, Al-Cu-Mg matris partiküllere ilave edilerek MA yöntemi ile MMK tozları üretilmiş ve bu tozlar kullanılarak, toz metalurjisi yöntemlerinden biri olan SP yöntemi ile MMK kompakt üretimi gerçekleştirilmiştir. MA işleminde 10 mm çapında tungsten karbür (WC) bilyeler ve WC hazne kullanılmıştır. Takviye oranları ve MA ile SP parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen MA deneylerinde hazne ve bilye kaynaklı kirlenmelerin engellenmesi ve yüksek sürtünme nedeniyle açığa çıkan ısıyı uzaklaştırmak amacıyla işlem kontrol katkısı (İKK) olarak metil alkol (CH<sub>3</sub>OH) kullanılmıştır. SP işlemi tek eksenli ve kendinden rezistanslı presleme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SP işlemi için kullanılan presleme cihazına ait görsel ve presleme işlemlerinde kullanılan kalıba ait teknik resim Şekil 1'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, kullanılan presleme kalıbı 50 mm dış çapa, 30 mm delik çapına ve 50 mm yüksekliğe sahiptir.



*Şekil 1. (a) Sıcak presleme cihazına ait fotoğraf ve (b) presleme kalıbına ait teknik resim.*

Tablo 2. MA ve SP işlem parametreleri.

Numune Kodu	MA						SP			
	Al-Cu-Mg (% ağı.)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% ağı.)	Bilye:Toz Oranı	Bilye Çapı (mm)	Dönüş Hızı (rpm)	İKK (mL)	Süre (dk)	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Süre (dk)
N1	90	10	10:1	10	400	10	300			
N2	80	20	10:1	10	400	10	300	560	500	180
N3	60	40	10:1	10	400	10	300			

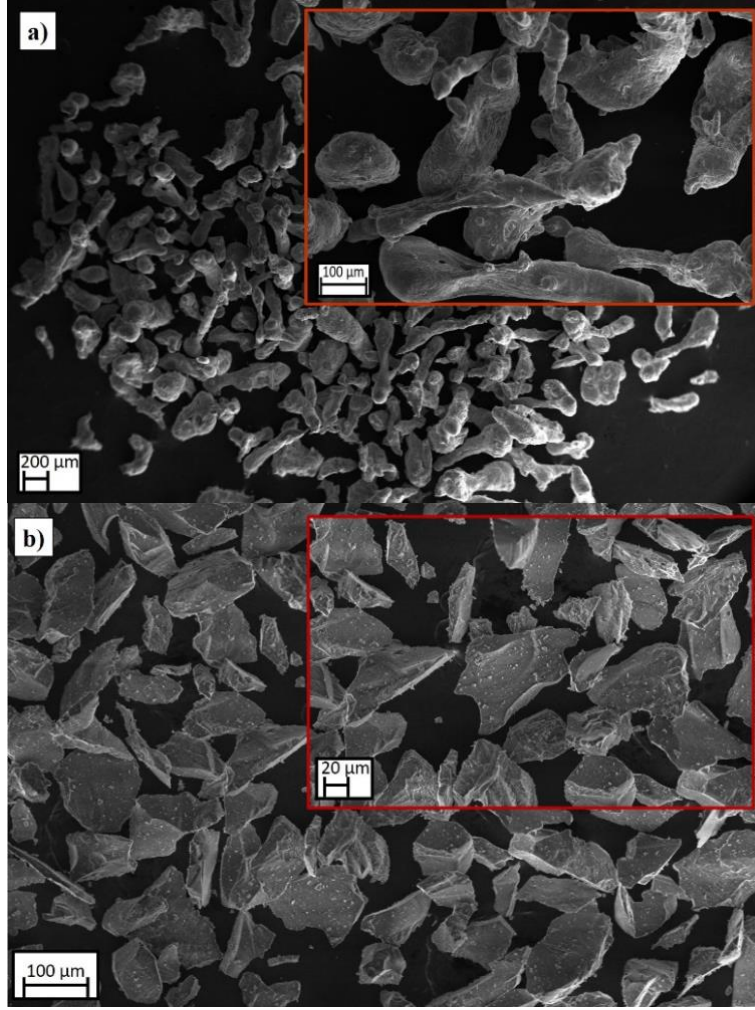
SP yöntemi ile yoğunlaştırma işlemi neticesinde her bir ilave partikül oranına sahip (%10, %20 ve %40 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyesi) kompakt numuneler Şekil 1’de yer alan teknik resimde verilmiş olan geometrik özelliklere sahip olan kalıp içerisinde 10 mm yüksekliğe sahip ve üçer adet olarak aynı şartlar altında üretilmiştir. Üretilen Al-Cu-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompakt malzemeler çeşitli karakterizasyon yöntemleri ile mikroyapı, faz analizi, sertlik ve yoğunluk özellikleri açısından incelenmiştir. Partikül boyut ölçümleri MasterSizer 2000 marka ve model lazer difraksiyonu partikül boyut analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Partikül morfolojisi ve kompakt malzemelerin mikro yapı incelemeleri, Zeiss Evo LS10 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri, her bir kompakt numune için üç ayrı bölgeden üç ayrı sertlik ölçümü yapılarak ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak elde edilmiştir. Sertlik ölçümleri için Nemesis 9000 marka ve model sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Vickers sertlik ölçümleri için deneyler HV/0,5 deney koşullarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kompakt numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre Arşimet yoğunluk ölçümü deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Arşimet prensibi doğrultusunda deneysel yoğunluk (DY) hesaplamaları için Denklem 1’de yer alan matematiksel formül kullanılmıştır. Denklem 1’de, deneysel yoğunluk  $d_{deneyse}$ , havanın ağırlığı  $m_{hava}$ , suyun ağırlığı  $m_{su}$ , havanın yoğunluğu  $d_{hava}$  ve suyun yoğunluğu  $d_{su}$  sembolleri ile tanımlanmaktadır.

$$d_{deneyse} = \left( \frac{m_{hava} (gr)}{(m_{hava} (gr) - m_{su} (gr))} \right) \times (d_{su} (gr. cm^{-3}) - d_{hava} (gr. cm^{-3})) + d_{hava} (gr. cm^{-3}) \quad (1)$$

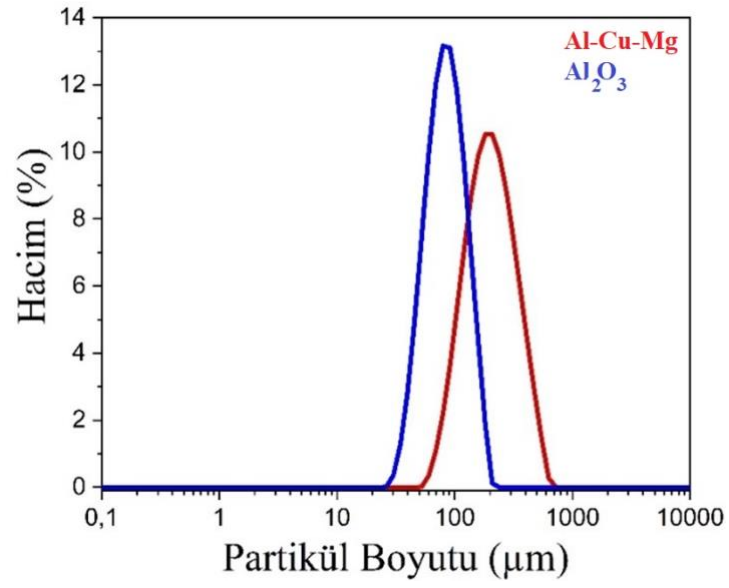
### III. BULGULAR ve TARTIŞMA

#### A. MORFOLOJİ İNCELEMELERİ ve PARTİKÜL BOYUTU ÖLÇÜMLERİ

Matris (Al-Cu-Mg) ve takviye malzemesi olarak kullanılan partiküllere (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ait morfoloji görüntüleri Şekil 2’de gösterilmektedir. Ayrıca, matris ve takviye malzemesine ait partikül boyutu dağılım eğrileri de Şekil 3’te yer almaktadır. Şekil 2.a’dan anlaşılacağı üzere Al-Cu-Mg alaşımı partiküller başlangıçta çubuksu morfolojiye sahiptir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerin başlangıç morfolojisi Şekil 2.b’de görüldüğü gibi düzensiz ve çoğunlukla köşeli morfolojiye sahiptir. Partikül boyutu ölçüm deneyleri sonucunda Al-Cu-Mg alaşımı partiküllere ait ortalama (D50) partikül boyutunun 212,434 µm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllere ait D50 partikül boyutunun ise 89,208 µm olduğu belirlenmiştir. Takviye partikülün boyutunun azalmasıyla elde edilen kompozit yapının sertliğinin arttığı literatürde daha önceki çalışmalarda araştırılmış ve deneysel olarak doğruluğu tespit edilmiştir. Ayrıca metal matris içerisine takviye edilen seramik partiküllerin partikül boyutunun azalması yine literatürde yer alan çalışmalarda ortaya konulduğu üzere, kompozit yapının mekanik özelliklerinin geliştirildiği tespit edilmiştir [19-21]. Bu bağlamda, bu çalışmada takviye partiküllerinin boyutu MA ve SP sonrasında elde edilecek kompakt malzemenin mekanik özelliklerinin yükseltilmesi için matris malzemesi partiküllerinden küçük olacak şekilde seçilmiştir.



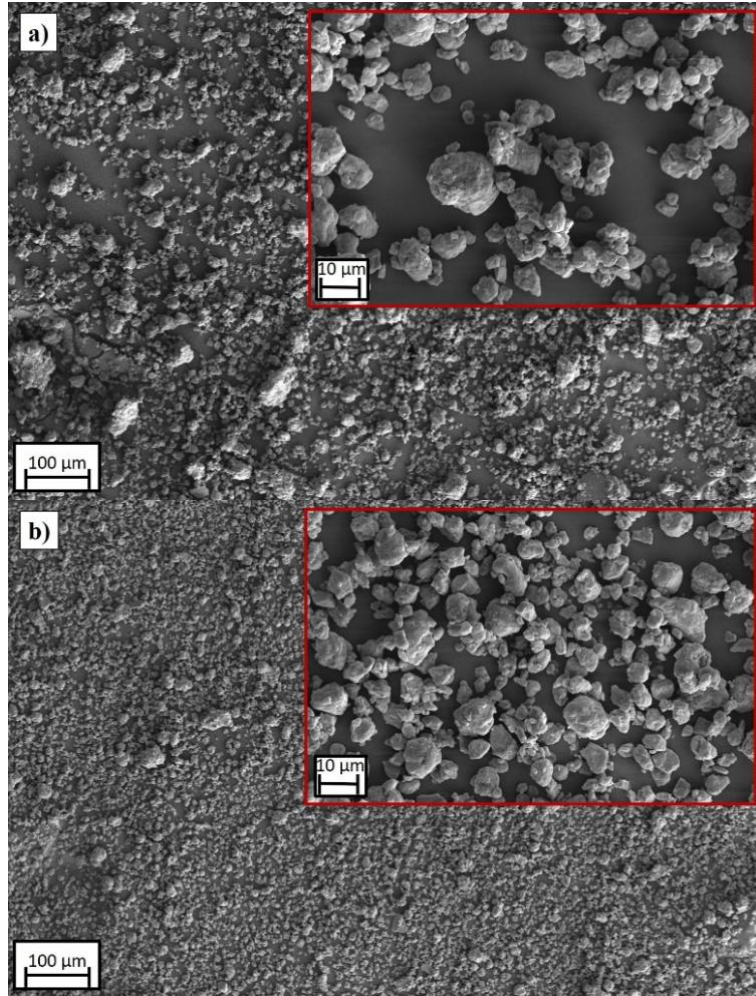
Şekil 2. Matris ve takviye partiküllerinin başlangıç morfolojisi incelemelerine ait SEM görüntüleri; Al-Cu-Mg (a) ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b).

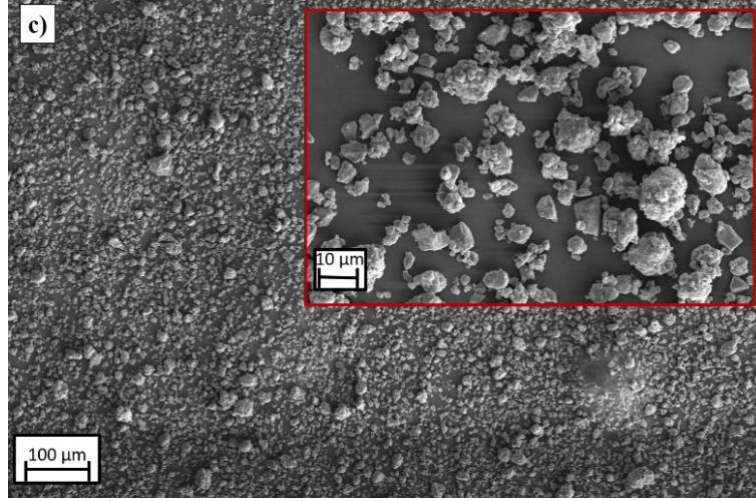


Şekil 3. Matris ve takviye partiküllerin partikül boyut ölçümü deney sonuçları.



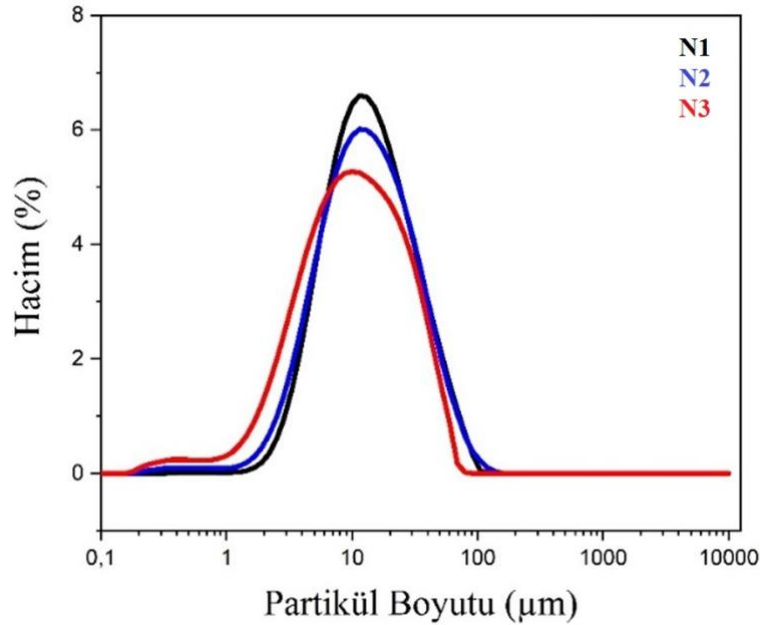
MA işlemi sonrasında elde edilen Al-Cu-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit partiküllere ait morfoloji incelemeleri Şekil 4.a-c’de gösterilmiştir. Şekil 4.a incelendiğinde, başlangıçta çubuk benzeri morfolojiye sahip Al-Cu-Mg ve düzensiz morfolojiye sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküller MA işlemi sonrasında sünek matris partiküllerinin gevrek takviye partiküllerin etrafına sıvanma eğilimine girdiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte partikül boyutunda gözle görülür bir azalmanın mevcut olduğu da elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinden anlaşılmaktadır. Şekil 4.b ve c incelendiğinde, artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı ile elde edilen partiküllerin daha küçük partikül boyutuna sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum literatürde yer alan çalışmalarda ile uyumludur. MA işleminin başlangıç aşamalarında, sünek partiküller MA hücresinde bilyeler, partiküller ve kalıp duvarları arasında meydana gelen plastik deformasyonlardan dolayı genişleyip uzamaya, gevrek partiküller ise parçalanmaya maruz kalmaktadır. İlerleyen aşamalarda, sünek partiküller arasında soğuk kaynak olarak adlandırılan mekanik kenetlenme mekanizması gelişerek parçalanmış gevrek partiküller bu mekanizmanın içerisine hapsolmektedir. İşlemin nihai aşamasında, parçalanmış gevrek partiküller soğuk kaynaklanmış sünek partiküllerin ara yüzlerinde konumlanmakta ve böylece mekanik alaşımlama ile yeni bir kompozit partikül ortaya çıkmaktadır [22-24]. Manooni ve diğerleri (2021) yapmış oldukları çalışmada, literatür çalışmalarına benzer şekilde Al ve NiO partiküller arasındaki reaksiyonlar sırasında sünek-gevrek bir MA sistemi oluştuğu ve buna bağlı olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>3</sub>Ni, AlNi gibi kırılabilir fazların ortaya çıktığını ortaya koymuşlardır. Ortaya çıkan bu yeni fazların ara yüzey sınırlarına yerleşebileceğini ve sünek partiküllerin soğuk kaynak yapmasını engelleyebileceği sonucunu elde etmişlerdir. Ayrıca, gevrek partiküllerin kırılması ve sonrasında sünek partiküllerin ara yüzeylerine yerleşmesi ile partikül boyutunun artmasının engellendiğini ve partikül boyutunun azaldığını ortaya koymuşlardır [25].





**Şekil 4.** Al-Cu-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerin MA işlemi sonrası morfoloji incelemeleri; N1 (a), N2 (b) ve N3 (c).

Şekil 5, MA işlemi sonrasında Al-Cu-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllere ait partikül boyutu ölçümü deneyinin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.a-c’de gösterilen morfoloji görüntülerine paralel olarak, yapıda ağırlıkça artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile MA sonrasında artan takviye oranı ile partikül boyutunun azaldığı Şekil 5’ten açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Partikül boyutu ölçümü deneyleri sonucunda elde edilen D50 partikül boyutu ölçüm değerleri N1, N2 ve N3 partikülleri için sırasıyla 14,224 µm, 13,747 µm ve 10,885 µm olarak elde edilmiştir. Bu durum, sünek matris ile gevrek takviyenin MA işlemi sırasında maruz kaldıkları deformasyon ve gevrek partiküllerin yüksek sertliğe sahip olmalarından kesme etkisinden dolayı parçalanma eğiliminde olmaları ile açıklanabilir.

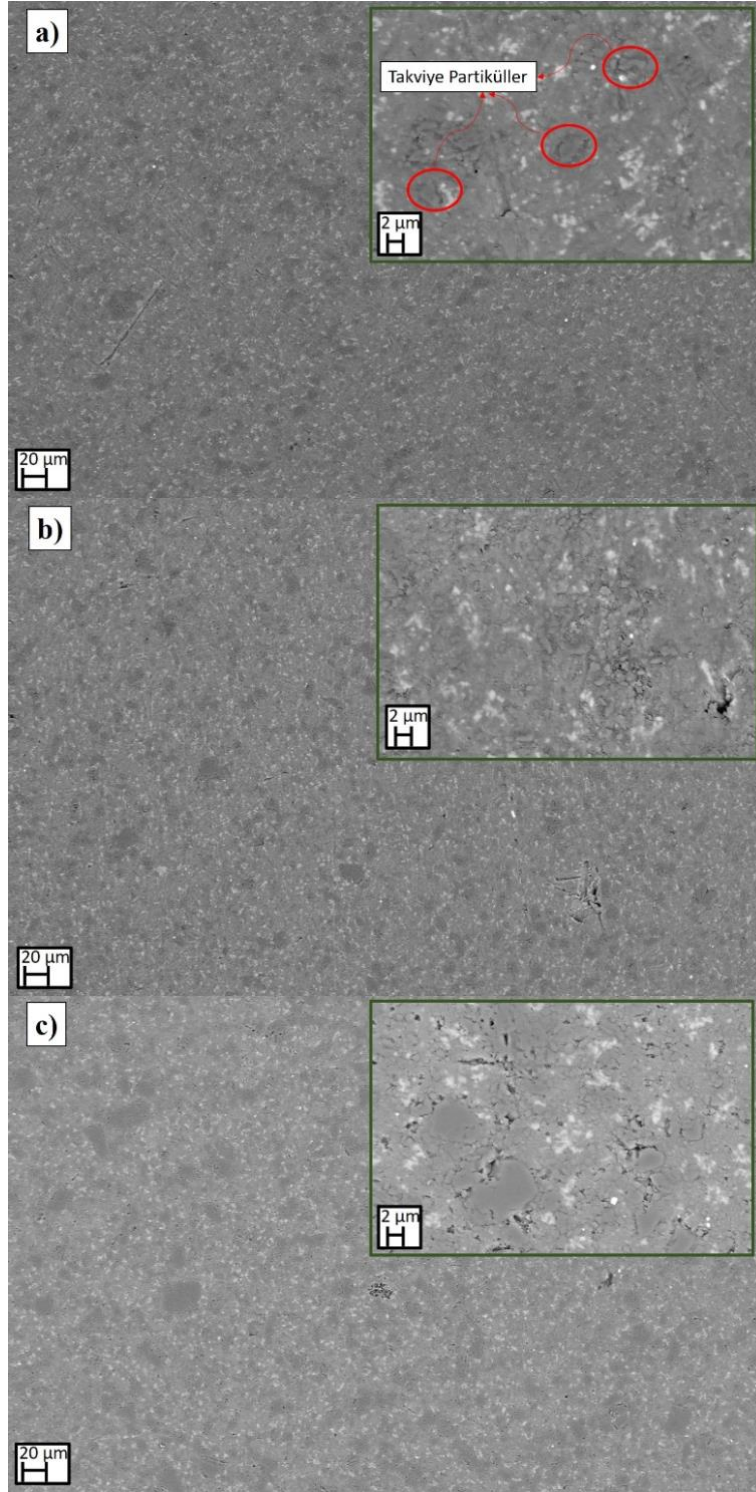


**Şekil 5.** MA sonrası N1, N2 ve N3 partiküllerinin boyut dağılım eğrileri.

## B. MİKROYAPI İNCELEMELERİ ve ELEMENTEL ANALİZ

MA işlemi ile üretilen Al-Cu-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküller SP yöntemi yoğunlaştırılmak suretiyle kompakt hale getirilmişlerdir. Kompakt numunelerin mikro yapı incelemelerine ait SEM görüntüleri, Şekil 6.a-c’de gösterilmektedir. Şekil 6’ya göre, ağırlıkça artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı ile yapı içerisinde porozite oluşumunun arttığı görülmektedir. Bu duruma, literatürde yer alan daha önceki çalışmalarda da değinilmektedir. İki

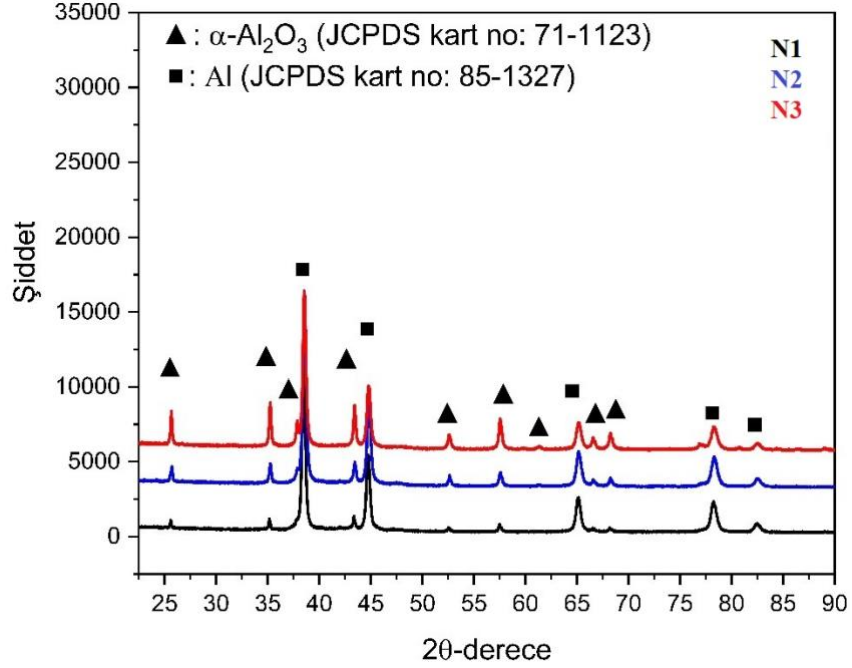
veya daha fazla Al-Cu-Mg esaslı partikül, MA işlemi sırasında boyutu matrise göre daha küçük  $Al_2O_3$  partiküllerin matris partikülleri arasına girmesiyle temas edemez hale gelerek porozite oluşumu meydana gelmektedir. Buna ek olarak, katılan takviye  $Al_2O_3$  fazı sıkıştırılabilir davranışı olmayan bir bileşen olduğundan katkı oranı arttıkça kompozit karışımın sıkıştırılabilir davranışı da zaten düşmektedir. Bu soğuk presleme işlemi yapılan numunelerde boyut farklılığı ile kendini göstermektedir. Böylece, SP ile yoğunlaştırılabilir kabiliyetinde düşüş gözlemlenmektedir [18].



**Şekil 6.** Al-Cu-Mg/ $Al_2O_3$  kompakt numunelerin mikro yapı incelemelerine ait SEM görüntüleri; N1 (a), N2 (b) ve N3 (c).



Al-Cu-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompakt numunelere ait X-ışını kırınım desenleri Şekil 7’de gösterilmektedir. Şekil 7 incelendiğinde, N1, N2 ve N3 kompakt numunelerin tümünde Al ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazlarına ait desenler açık bir şekilde görülmektedir, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının artmasıyla kendine ait karakteristik piklerin şiddetleri de artmaktadır ve yapıda XRD analizi çözünürlük sınırları içerisinde herhangi bir farklı faza ait desen bulunmamaktadır. XRD desenleri incelendiğinde 37,60°, 45,32°, 65,13°, 78,71° ve 82,65° 'deki 2θ kırınım açısı ve göreceli yoğunluğu JCPDS kart no: 85-1327 ile uyumlu olarak Al fazına karşılık gelmektedir [26]. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazı için numunelerin 25,6°, 35,2°, 37,8°, 43,4°, 52,6°, 57,5°, 61,3°, 66,5° ve 68,2°'deki 2θ kırınım açısı ve göreceli yoğunluğu JCPDS kart no: 71-1123 ile uyumludur [27,28].



Şekil 7. N1, N2 ve N3 numunelerine ait X-ışını kırınım desenleri.

Şekil 7’de gösterilen XRD desenlerine ait veriler ve Denklem 2’de yer alan Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanan kristalin boyutları Tablo 3’te verilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde üç numunenin kristalin boyutlarında ağırlıkça artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye oranına bağlı olarak bir azalma görülmektedir. Bu durum, literatürde yer alan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla desteklenmektedir. Bu bağlamda, Danish ve Siddiqui (2012), Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitler üretmişler ve deneysel çalışmaları neticesinde artan öğütme süresi ve artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye miktarı ile kristalin boyutunda azalmanın gözlemlendiğini raporlamışlardır [29]. Jeyasimman ve diğerleri (2015), AA6061 alaşımı ile ağırlıkça sırasıyla %0, %0,5, %1, %1,5 ve %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikül takviyeli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretim sonrası karakterizasyon işlemleri neticesinde yapı içerisinde ağırlıkça artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyesi ile kristalin boyutunun %0, %0,5, %1, %1,5 ve %2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli malzemeler için sırasıyla 88,31 nm, 82,04 nm, 76,60 nm, 70,02 nm ve 57,06 nm olduğunu belirlemişlerdir [30]. Benzer karakterizasyon işlemleri için, bu çalışmada kristalin boyutu belirlemede kullanılan Denklem 2’de yer alan L sembolü kristalin boyutunu, K sembolü Scherrer sabitini, λ sembolü X-ışını dalga boyunu, β sembolü FWHM değerini ve θ sembolü Bragg açısını temsil etmektedir [31].

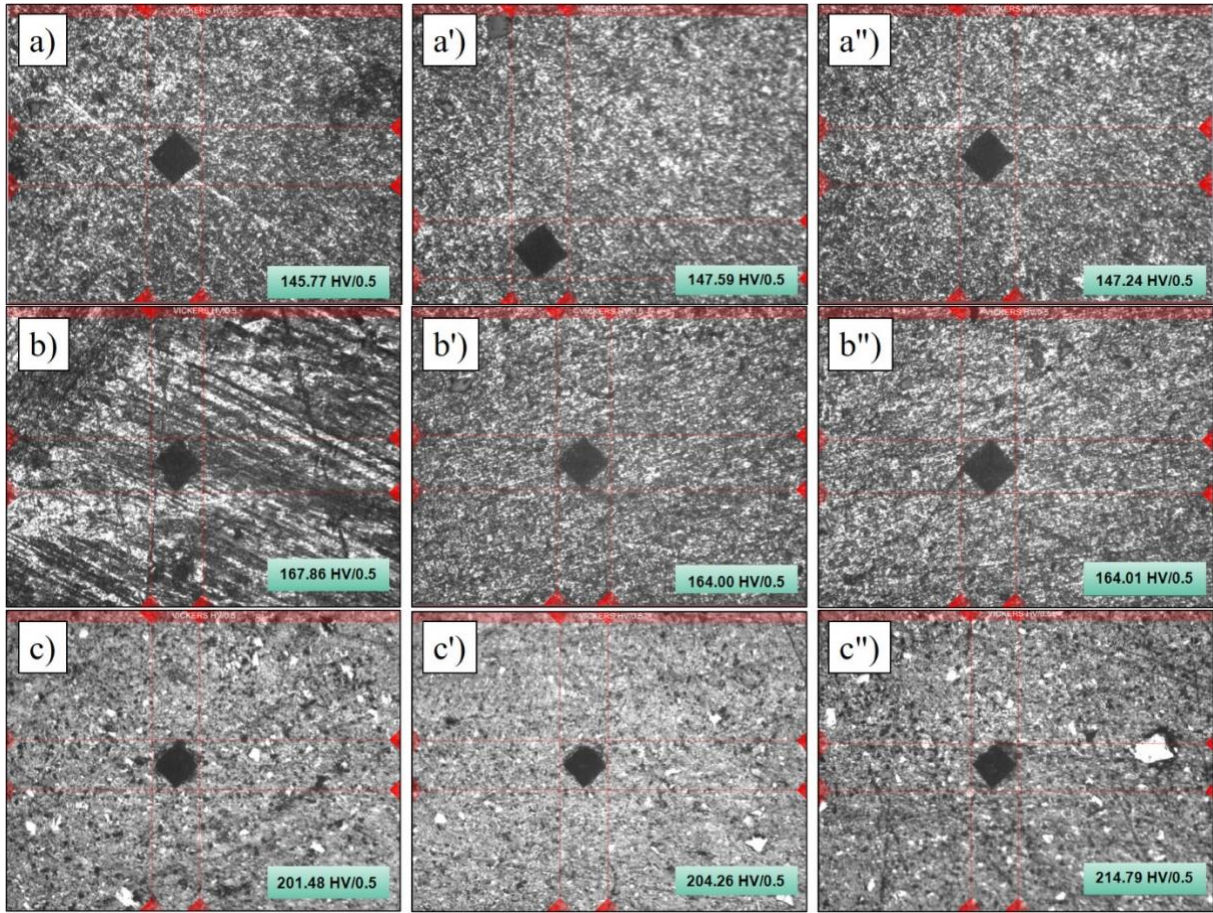
$$L = \frac{K \times \lambda}{\beta \times \cos \theta} \quad (2)$$

Tablo 3. Kompakt numunelere ait kristalin boyutları.

Numune	Kristalin Boyutu (nm)
N1	23,18
N2	21,38
N3	20,03

### C. SERTLİK ÖLÇÜM DENEYLERİ

Şekil 8, ağırlıkça farklı oranlarda  $Al_2O_3$  içeriğine sahip kompakt numunelere ait sertlik ölçüm deneyi sonuçlarını ve sertlik ölçümü sırasında batıcı ucun yüzeyde oluşturduğu izi göstermektedir. Şekil 8.a-a'' incelendiğinde, N1 kompakt malzemenin üç farklı bölgeden alınan sertlik ölçümleri sonucunda homojen bir sertlik dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum Şekil 8.b-b'' ve Şekil 8.c-c'' incelendiğinde benzer olarak görülmektedir. N1, N2 ve N3 kompakt numunelerden elde edilen ortalama sertlik değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde en yüksek ortalama sertlik değerine (206,843 HV (0,5)) sahip kompakt numunelerin N3 olduğu belirlenmiştir.  $Al_2O_3$  fazının sert olması ve MA işlemi ile partikül boyutunun artan  $Al_2O_3$  miktarına bağlı olarak azalması, sertlik değerlerinin artan  $Al_2O_3$  miktarı ile artmasını sağlamıştır.



**Şekil 8.** Sertlik ölçüm deney sonuçları; Al-Cu-Mg+%10  $Al_2O_3$  içeren kompakt numune (a, a' ve a''), Al-Cu-Mg+%20  $Al_2O_3$  içeren kompakt numune (b, b' ve b''), Al-Cu-Mg+%40  $Al_2O_3$  içeren kompakt numune (c, c' ve c'').

**Tablo 4.** Deney numunelerine ait ortalama sertlik değerleri.

Numune	Ortalama Sertlik Değeri (HV/0,5)
N1	146,867
N2	165,290
N3	206,843

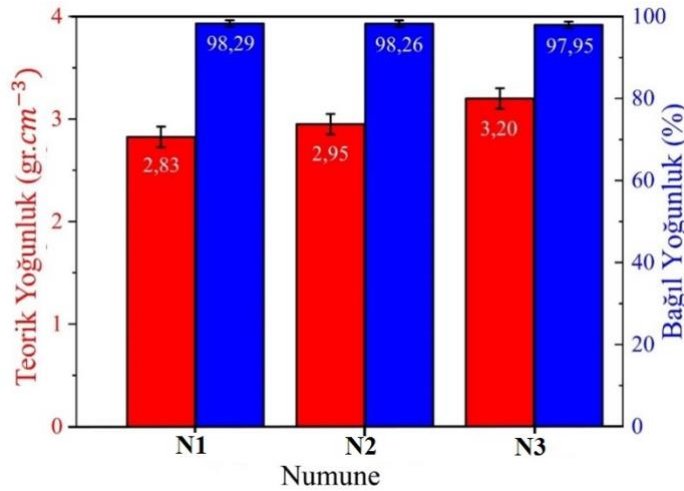
### D. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ DENEYLERİ

Yoğunluk ölçümü deneyleri sonucunda elde edilen DY değerleri, Al ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için teorik yoğunluk değerleri kullanılarak yapı içerisinde ağırlıkça oranları dikkate alınmış ve hesaplanan teorik yoğunluk ile orantılanarak % olarak hesaplanmıştır. Al için teorik yoğunluk değeri 2,7 gr.cm<sup>-3</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için teorik yoğunluk değeri 3,95 gr.cm<sup>-3</sup>'tür. Bu bağlamda N1, N2 ve N3 numunelerin teorik yoğunlukları Denklem 3'te yer alan teorik yoğunluk hesaplama formülü dikkate alınarak hesaplanmıştır. Denklem 3'te yer alan d sembolü yoğunluğu ifade ederken V sembolü ise hacim değerini ifade etmektedir. Yapılan hesaplama sonrasında N1, N2 ve N3 numunelerine ait teorik yoğunluk değerleri sırasıyla 2,825 gr.cm<sup>-3</sup>, 2,95 gr.cm<sup>-3</sup> ve 3,2 gr.cm<sup>-3</sup> olarak hesaplanmıştır.

$$d_{teorik} = d_{Al_2O_3} \times V_{Al_2O_3} + d_{Al-Cu-Mg} \times V_{Al-Cu-Mg} \quad (3)$$

DY hesaplamaları Arşimet prensibine göre özel bir deney düzeneğinde numunenin havada ve sıvı içindeki ağırlığının tartılması sonrası Denklem 1'de bulunan matematiksel formül kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney oda sıcaklığı koşullarında (25 °C) gerçekleştirilmiştir ve sıvı olarak yoğunluğu 1 gr.cm<sup>-3</sup> olan saf su kullanılmıştır. DY değerleri N1, N2 ve N3 kompakt numuneler için sırasıyla 2,777, 2,899 ve 3,135 gr.cm<sup>-3</sup> olarak hesaplanmıştır.

DY değerleri Arşimet prensibine göre belirlenen numunelerin teorik yoğunlukları ile orantılanarak % olarak hesaplanması sonrasında elde edilen bağıl yoğunluk değerleri Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 9 incelendiğinde, artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarına göre teorik yoğunluk değerinin arttığı ancak %bağıl yoğunluğun artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı ile azaldığı görülmektedir. Benzer durumlar literatürde vurgulanmakla birlikte artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının MA işlemi sırasında parçalanarak küçülen gevrek partiküllerin sünek partiküllerin ara yüzeylerine yerleşmesi ve iki ya da daha fazla partikülün birbiriyle temas etmesini engelleyerek porozite oluşumuna yol açması şeklinde açıklanmıştır. Ayrıca Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin daha düşük sıkıştırılabilirlik kabiliyetine sahip olması da %bağıl yoğunluk değerinin azalmasında etkili bir faktördür [18,32,33].



Şekil 9. Numunelerin teorik ve bağıl yoğunluk değerleri.

## IV. SONUÇ

1. Al-Cu-Mg ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküller kullanılarak MA yöntemi ile 300 dk süre ve 10:1 bilye:toz oranı koşullarında başarılı olarak Al-Cu-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit partiküller olarak üretilmiştir. Başlangıç aşamasındaki partikül boyutu ölçümleri ile kıyaslandığında (Al için ortalama partikül boyutu 212,434 µm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> için ortalama partikül boyutu 89,208 µm) MA işlemi sonrasında elde edilen partikül boyutları sert Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin kesme etkisi sayesinde azalmıştır. Bu değerler N1, N2 ve N3 partikülleri için sırasıyla 14,224 µm, 13,747 µm ve 10,885 µm olarak ölçülmüştür.

2. X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde bütün deney numunelerinde yalnızca Al ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazlarına ait desenler tespit edilmiştir. Bu sonuç, MA işlemi ve SP işlemi sırasında yapıda sırasıyla herhangi bir kirlilik, oksitlenme ya da ara yüzey reaksiyonu oluşmadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının artması ile kompozit kompakt numunelerin kristalin boyutu değerlerinin gerini sertleşmesi ve tane iyileşmesi sonucu azaldığı, bu bağlamda N1, N2 ve N3 kompaktlarda elde edilen kristalin boyutu değerlerinin sırasıyla 23,18 nm, 21,38 nm ve 20,03 nm olduğu tespit edilmiştir.

3. Ağırlıkça artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye oranı ile sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Sertlik değerleri N1 numunesi için 146,867 HV (0,5), N2 numunesi için 165,290 HV (0,5) ve N3 numunesi için 206,843 HV (0,5) olarak ölçülmüştür.

4. Artan takviye oranına bağlı olarak DY değerlerinin N1, N2 ve N3 kompakt numunelerde sırasıyla 2,777, 2,899 ve 3,135 gr.cm<sup>-3</sup> olarak değiştiği belirlenmiştir. Ancak, ağırlıkça artan takviye oranı ile %bağlı yoğunluk değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, artan takviye partikül miktarı ile takviye partiküllerinin gevrek olmasından dolayı kırılma mekanizmasını meydana getirmesi ve sünek matris ara yüzeylerinde konumlanması dolayısıyla yapının yoğunlaşabilme kabiliyetini olumsuz etkilemesi şeklinde açıklanmaktadır.

**TEŞEKKÜR:** Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü, FBA-2020-8478 numaralı proje ile bu çalışmanın yürütülmesinde maddi destek sağlamıştır. Yazarlar, desteklerinden dolayı BAP'a teşekkür etmektedir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] M. Senthil Kumar & L. Natrayan, "Processing and Characterization of AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Reinforced Hybrid Composites Using Squeeze Casting Technique," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 55-67, 2019.
- [2] M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin, H.R. 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 Processing Technology*, vol.209, pp. 5387–5393, 2009.
- [3] P. Sharma, S. Sharma, D. Khanduja, "A study on microstructure of aluminium matrix composites," *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol.3, pp. 240-244, 2015.
- [4] T. Varol, A. Canakci, S. Ozsahin, "Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al-Cu-Mg–B<sub>4</sub>C composites produced by powder metallurgy," *Composites: Part B*, vol.54, pp. 224–233, 2013.
- [5] K.H. Min, S.P. Kang, D.G. Kim, Y.D. Kim, "Sintering, characteristic of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced 2xxx series Al composite powders," *Journal of Alloys and Compounds*, vol.400, pp. 150- 153, 2005.
- [6] Ş. Karabulut, "Optimization of surface roughness and cutting force during AA7039/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites milling using neural networks and Taguchi method," *Measurement*, vol.66, pp. 139–149, 2015.
- [7] J. Dinwoodie, "Automotive applications for MMCs based on shortstaple alumina fibres, SAE Technical Paper Series," *International Congress on Exposition*, pp. 23–27, 1987.
- [8] M. Kök, "Abrasive wear of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced 2024 aluminium alloy composites fabricated by vortex method," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 3, pp. 457-464, 2006.



- [9] U. Gökmen, "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al 2024 Esaslı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Parçacık Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Karakterizasyonu," 2. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, Kırıkkale, Türkiye, 2017, ss. 80-86.
- [10] E.Y. Chen, L. Lawson, M. Meshii, "The distribution of fatigue microcracks in an aluminum-matrix silicon carbide whisker composite," *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol.30, pp. 737-742, 1994.
- [11] B. Prabhu, C. Suryanarayana, L. An, R. Vaidyanathan, "Synthesis and characterization of high volume fraction Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite powders by high-energy milling," vol. 425, no. 1-2, pp. 192–200, 2006.
- [12] M. Zabihi, M. R. Toroghinejad, A. Shafyei, "Evaluating the mechanical behavior of hot rolled Al/alumina composite strips using shear punch test," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 618, pp. 490–495, 2014.
- [13] R. Pramod, G.B. Veeresh Kumar, P.S. S. Gouda, A. T. Mathew, "A Study on the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced Al7075 Metal Matrix Composites Wear behavior using Artificial Neural Networks," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 5, pp. 11376–11385, 2018.
- [14] A.Günen, ve E. Kanca, "Investigations on Machinability of Al Reinforced Al6061 Metal Matrix Composites," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* , vol. 20 no. 3, pp.434-441, 2016.
- [15] C. Reddy, "Evaluation of mechanical behavior of Al-alloy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites with respect to their constituents using taguchi technique," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, pp. 26–32, 2011.
- [16] S. Ghanaraja, K. S. Ravikumar, H. P. Raju, B. M. Madhusudan, "Studies on dry sliding wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced Al based metal matrix composites," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 9, pp. 10043-10048, 2017.
- [17] Z. Zhang, F. Liu, E.-H. Han, L. Xu, P. C. Uzoma, "Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the microstructures and corrosion behavior of low-pressure cold gas sprayed Al 2024-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings on AA 2024-T3 substrate," *Surface and Coatings Technology*, 2019.
- [18] T. Varol, A. Çanakçı, S. Özkaya, F. Erdemir, "Determining the effect of flake matrix size and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on microstructure and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforced Al matrix composites," *Particulate Science and Technology*, vol. 36, no.3, pp. 312-323, 2018.
- [19] A. Canakci, F. Arslan "Abrasive wear behaviour of B4C particle reinforced Al-Cu-Mg MMCs," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.63, no.5-8, pp. 785–795, 2012.
- [20] J. M. Wu, Z. Z. Li, "Contributions of the particulate reinforcement to dry sliding wear resistance of rapidly solidified Al–Ti alloys," *Wear*, vol. 244, pp. 147–153, 2000.
- [21] R. L. Deuis, C. Subramaniun, J. M. Yellup, "Abrasive wear of aluminium composites—a review," *Wear*, vol. 201, pp. 132–144, 1996.
- [22] B.J.M. Aikin, T.H. Courtney, "The kinetics of composite particle formation during mechanical alloying," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 24, pp. 647–657, 1993.
- [23] J.S. Benjamin, T.E. Volin, "The mechanism of mechanical alloying," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 5, pp. 1929–1934, 1974.

- [24] J.B. Fogagnolo, F. Velasco, M.H. Robert, J.M. Torralba, "Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 342, no.1-2, pp. 131–143, 2003.
- [25] S. Mamnooni, E. Borhani, D. Bovand, "In-Situ Synthesis of Aluminum Matrix Composite from Al–NiO System by Mechanical Alloying," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 1631–1638, 2021.
- [26] V. Piriyawong, V. Thongpool, P. Asanithi, and P. Limsuwan, "Effect of Laser Pulse Energy on the Formation of Alumina Nanoparticles Synthesized by Laser Ablation in Water," *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 1107–1112, 2012.
- [27] S. Kumar, R. Prakash, and V. Kumar, "A novel yellowish white Dy 3+ activated  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phosphor: Photoluminescence and optical studies," *Functional Materials Letters*, vol. 08, no. 05, p. 1550061, Oct. 2015.
- [28] F. Zoladz et al., "Enhanced magnetic properties of aluminum oxide nanopowder reinforced with carbon nanotubes," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, no. 6, p. 157, 2020.
- [29] M. Danis and M.A. Siddiqui, "Microstructural and Morphological Evolutions of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powder Composite during Ball Milling," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol.1, no.10, 2012.
- [30] D. Jeyasimman, K. Sivaprasad, S. Sivasankaran, R. Ponalagusamy, R. Narayanasamy, and V. Iyer, "Microstructural observation, consolidation and mechanical behaviour of AA 6061 nanocomposites reinforced by  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles," *Advanced Powder Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 139–148, Jan. 2015.
- [31] D. J. Lim, N. A. Marks, and M. R. Rowles, "Universal Scherrer equation for graphene fragments," *Carbon*, vol. 162, pp. 475–480, 2020.
- [32] M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani, "Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of Al matrix composite made by powder metallurgy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 4-5, pp. 1031–1038, 2010.
- [33] H. Ashuri, A. Hassani, "Characterization of severely deformed new composites fabricated by powder metallurgy including a stage of mechanical alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 617, pp. 444–454, 2014.