

Araştırma Makalesi / Research Article

Toz Metalurjisi ile Üretilen Nano Bor Nitrür Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve İçyapı Özelliklerinin İncelenmesi

Hıdır Sercan ÇUBUK^{1*}, Uğur ÇAVDAR²

^{1*} Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Doktora Programı, İzmir, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6598-351X>, hsercancubuk@gmail.com

² İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3434-6670>, ugur.cavdar@idu.edu.tr

Geliş/ Received: 13.02.2025;

Revize/Revised: 19.03.2025

Kabul / Accepted: 08.05.2025

ÖZET: Alüminyum, düşük yoğunluğu ve yüksek korozyon direnci nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen bir metaldir. Ancak, sınırlı mekanik dayanımı bazı uygulamalarda kısıtlayıcı bir faktör olmaktadır. Bu nedenle, mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla seramik malzemelerle takviye edilebilmektedir. Bu çalışmada, Nano Bor Nitrür (NBN) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler, toz metalurji yöntemi ile üretilmiş ve mekanik ile mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Saf Alüminyum kontrol numunesine ek olarak; kütlece %0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 oranlarında NBN içeren toz karışımları hazırlanmış, ardından 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklıklarında sinterlenerek toplamda 18 farklı kompozit numune elde edilmiştir. Yapılan sertlik testleri, %0.5 NBN katkılı ve 600°C’de sinterlenen numunenin en yüksek sertlik değerine ulaştığını göstermiştir. Ancak, daha yüksek katkı oranları ve sinterleme sıcaklıkları sertlikte düşüşe neden olmuştur. Taramalı elektron mikroskobuyla yapılan analizde, düşük NBN oranlarında homojen dağılım sağlandığını, ancak %2 ve üzeri katkılarda kümelenme oluştuğunu ortaya koymuştur. Yoğunluk ölçümleri, %5 NBN katkılı ve 600°C’de sinterlenen numunenin en yüksek yoğunluğa ulaştığını, ancak 700°C’de gözenek oluşumunun arttığını göstermiştir. Genel olarak, uygun NBN katkı oranı ve sinterleme sıcaklığının belirlenmesinin, NBN takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini optimize etmek için kritik bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Nano, Bor nitrür, Toz metalurji, Sinterleme

*Sorumlu yazar / Corresponding author: hsercancubuk@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Investigation of Mechanical and Microstructure Properties of Nano Boron Nitride Reinforced Aluminum Matrix Composites Produced by Powder Metallurgy

ABSTRACT: Aluminum is a metal widely preferred in engineering applications due to its low density and high corrosion resistance. However, its limited mechanical strength is a limiting factor in some applications. Therefore, it can be reinforced with ceramic materials to improve its mechanical properties. In this study, Nano Boron Nitride (NBN) reinforced aluminum matrix composites were produced by powder metallurgy method and their mechanical and microstructural properties were investigated. In addition to the Pure Aluminum control sample; Powder mixtures containing 0.1%, 0.5%, 1%, 2% and 5% NBN were prepared and then sintered at 600°C, 650°C and 700°C to obtain a total of 18 different composite samples. Hardness tests showed that the sample with 0.5% NBN added and sintered at 600°C reached the highest hardness value. However, higher additive rates and sintering temperatures caused a decrease in hardness. Analysis by scanning electron microscopy revealed that homogeneous distribution was achieved at low NBN ratios, but clustering occurred at 2% and above contributions. Density measurements showed that sample with 5% NBN added and sintered at 600°C reached the highest density, but pore formation increased at 700°C. Overall, it is concluded that determining the appropriate NBN additive ratio and sintering temperature is a critical factor to optimize the mechanical properties of NBN reinforced aluminum composites.

Keywords: Aluminum, Nano, Boron nitride, Powder metallurgy, Sintering

1. GİRİŞ

Alüminyum (Al), hafifliği, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde dünya çapında en yaygın kullanılan metallerden biridir. Bu özellikleri sayesinde, havacılık, otomotiv, inşaat, biyoteknoloji ve ambalajlama gibi çok çeşitli mühendislik alanlarında geniş kullanım alanına sahiptir (Başer ve ark., 2022; Erçetin ve ark., 2022; Arora ve Saxena, 2023). Ancak, saf Al 'un düşük mekanik dayanımı, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı bir faktör olmaktadır. Bu yüzden Al matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesi halen önemli bir araştırma konusudur. Özellikle, seramik esaslı takviyeler eklenerek Al matrisinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha dayanıklı ve fonksiyonel malzemelerin elde edilmesi sağlanabilmektedir (Pariyar ve ark., 2021; Pandey ve ark., 2021; Thomas ve ark., 2024). Nano Bor Nitrür (NBN), altıgen (hegzagonal) kristal yapısı (h-BN) ve grafit benzer özellikleriyle Al matrisli kompozitlerde kullanılan seramik takviyelerden biridir. Yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal kararlılığı ve yağlayıcı özellikleri (Aydın, 2018) sayesinde geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Malzemenin nano boyutta kullanımı ise yüzey alanını artırarak fiziksel ve kimyasal aktivitelerde iyileşmeler sağlamaktadır (Pandey ve ark., 2021; Moustafa ve ark., 2022; Irshad ve ark., 2023). Bu özellikler, NBN'ün Al matrisli kompozitlerde hem mekanik performansı artırmasını hem de termal iletkenliği iyileştirmesini sağlamaktadır (Lahiri ve ark., 2013).

Toz Metalurjisi (TM) yöntemi, NBN takviyeli Al matrisli kompozitlerin ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilir şekilde üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntem sayesinde, belirli sıcaklık ve basınç altında sinterleme yoluyla homojen takviye dağılımına sahip kompozitler elde edilebilmektedir. Homojen dağılım, kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmede kritik rol oynamaktadır. Üretilen metal matrisli kompozitlerin yoğunluk ölçümleri, sertlik değişimleri veya mikro yapıdaki gözenek oranları gibi değişkenler sinterleme işleminin

başarısını belirlemektedir (Pillari ve ark., 2016; Erçetin ve ark., 2020; Monahar ve ark., 2021; Kumar ve Bharti, 2021; Erçetin ve ark. 2023; Thomas ve ark., 2024; Çubuk ve ark., 2025).

Literatürde, farklı NBN oranlarının ve sinterleme sıcaklıklarının Al matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Lahiri ve ark., 2013; Nautiyal ve ark., 2016; Firestein ve ark., 2017; Ghosh ve ark., 2024). Nautiyal ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, %0.5 oranında h-BN takviyeli Al kompozitlerini Kıvılcım Plazma Sinterleme (SPS) yöntemiyle üreterek, bu takviyenin aşınma direncini ve sertliği artırdığını bulmuşlardır. Ayrıca, çalışmada optimum performansın daha düşük takviye oranlarında elde edildiği vurgulamışlardır. Lahiri ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada, BNNT takviyeli Al kompozitlerinde %2 BNNT oranında maksimum mekanik dayanım elde edildiğini rapor etmiş, ancak %2'nin üzerindeki takviye oranlarında aglomerasyon nedeniyle mekanik özelliklerde kayıplar yaşandığını belirtmişlerdir. Firestein ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, Kıvılcım Plazma Sinterleme (SPS) yöntemiyle %0.5, %1.5, %3, %4.5, %7 ve %10 oranlarında Bor Nitrür nano parçacıkları (BNNP) ve mikro parçacıkları (BNMP) ile takviye edilmiş Al kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri %4.5-7 BNMP içeren numunelerde çekme mukavemetinde en yüksek değerlere ulaştığını rapor etmişlerdir. Öte yandan Ghosh ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada ise, h-BN takviyeli Al nano kompozitlerde %3 h-BN oranında en yüksek bağıl yoğunluk elde edildiğini yayımlamışlardır. Bu çalışmaların tümü, takviye oranı ve sinterleme koşullarının mekanik performans üzerindeki kritik etkisini vurgulamaktadır (Lahiri ve ark., 2013; Nautiyal ve ark., 2016; Firestein ve ark., 2017; Ghosh ve ark., 2024).

Bu çalışmada, saf Al ve NBN takviyeli Al kompozitleri TM yöntemiyle üretilmiş, farklı sinterleme sıcaklıkları ve NBN oranlarının mekanik ve mikro yapısal özelliklere etkisi incelenmiştir. Sertlik, mikro yapı, yoğunluk ve enerji verimliliği bulguları değerlendirilmiş ve literatürle karşılaştırılmıştır. Ayrıca burada yapılan optimizasyonların ileride yapılacak farklı sinterleme yöntemlerine ve malzeme seçimine yol gösterici bir nitelik sağlayabileceği düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Materyal

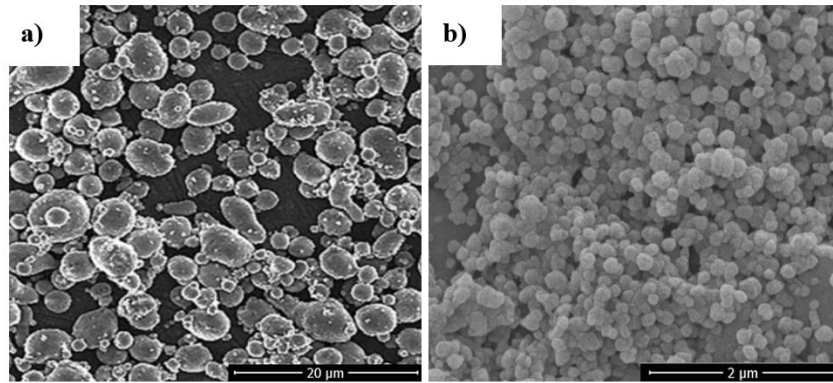
Bu çalışmada kullanılan Al tozları, %98.85 saflığa sahiptir. Ortalama 15 μm parçacık boyutundadır ve gaz atomizasyonu yöntemiyle üretilmiştir (Nanokar Nanoteknoloji, İstanbul). NBN tozları ise %99.85 saflıkta olup, 65–75 nm boyut aralığında dağılım göstermektedir. Hegzagonal (h-BN) yapıya sahiptir ve gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilmiştir (Nanografi Nano Teknoloji, Ankara). Çizelge 1'de saf Al tozunun bazı özellikleri, Çizelge 2'de NBN tozunun bazı özellikleri ve Şekil 1'de Al ve NBN tozlarının SEM görüntüleri verilmektedir.

Çizelge 1. Saf alüminyumun tozunun bazı özellikleri

Alüminyum Parametreleri	Değeri veya Özelliği				
<i>Üretim Şekli</i>	Gaz Atomizasyonu				
<i>Tane Şekli</i>	Düzensiz/ Küresel / Pul				
<i>Tane Boyutu (μm)</i>	15				
<i>Yoğunluk (gr/cm^3)</i>	1.25- 1.45				
<i>Bileşen (%)</i>	Al	Fe	Si	Cu	Diğer
	98.85	0.5	0.35	0.15	0.15

Çizelge 2. Nano bor nitrür tozunun bazı özellikleri

Nano Bor Nitrür Parametreleri	Değeri veya Özelliği
<i>Malzeme Saflığı (%)</i>	99.85
<i>Ortalama Parçacık Boyutu (nm)</i>	65-75
<i>Gerçek Yoğunluk (g/cm³)</i>	2.25
<i>Moleküler Ağırlık (g/mol)</i>	24.82
<i>Kristalite (h-BN)</i>	Hegzagonal (h-BN)
<i>Termal İletkenlik (W/m)</i>	29 ila 60
<i>Termal Genleşme (μm/m)</i>	0.54 ila 18
<i>Gencin Modülü (GPa)</i>	14 ila 60
<i>Tam Kütle (g)</i>	25,0124



Şekil 1. Çalışmada kullanılan a) alüminyum ve b) nano bor nitrür tozlarının SEM görüntüleri

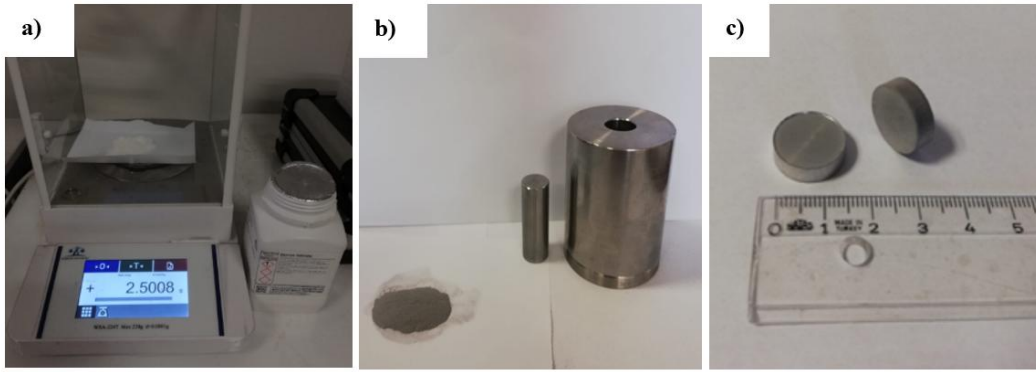
2.2 Numune Hazırlığı

Bu çalışma katkı oranlarının, sinterleme koşullarının ve sinterleme sıcaklıklarının optimizasyonu ile başlamıştır. Katkı oranlarını belirlemek amacıyla, saf Al tozundan üretilen kontrol numunelerine ek olarak, kütlece %0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 NBN içeren metal matrisli kompozitler seçilmiştir. Katkı oranları ve sıcaklıklar, daha önce yapılmış literatür çalışmaları temel alınarak belirlenmiştir. Literatür araştırmalarındaki katkı oranlarının, %0.1–%5 aralığında optimum mekanik özelliklerin elde edilebildiğini; ancak %2'nin üzerindeki değerlerde aglomerasyon nedeniyle beklenen özellikleri olumsuz yönde değiştirebileceğini göstermektedir. (Nautiyal ve ark., 2016; Lahiri ve ark., 2013; Firestein ve ark., 2017; Antillon ve ark., 2018). Bu yüzden %5'in üzerindeki katkı oranlarının mekanik performansı artırmak yerine azaltılabileceği, %0.1'in altındaki oranların ise anlamlı bir değişken sunmayacağı öngörülerek çalışma kapsamına dâhil edilmemiştir. Çalışmanın hiçbir aşamasında oksit giderme veya yüzey modifikasyonu gibi bir ön işlem uygulanmamıştır. Çünkü literatürde Al ve NBN tozlarında oluşan yüzey modifikasyonlarının bağlanmayı zayıflatarak homojen yoğunlaşmayı engelleyebileceği belirtilmektedir (Chen ve ark., 2015; Lv ve ark., 2025).

Bu kapsamda toplamda altı farklı metal matrisli kompozit tozu oluşturulmuştur. Her bir toz numunesinin hassas bir şekilde hazırlanabilmesi için Weightlab Instruments marka WSA-224T model, 0.0001 g hassasiyetli elektronik terazi kullanılmıştır. Daha sonra, tartılan Al ve Al-NBN esaslı tozlar, homojen bir dağılım elde etmek amacıyla sızdırmaz V tipi bir karıştırıcıda, 60 dakika (dak.) boyunca 40 dev/dak. hızında karıştırılmıştır. Karıştırma sonucu elde edilen homojen toz karışımları, tek eksenli ve tek tesirli bir kalıpta soğuk pres yöntemiyle şekillendirilmiştir. Bu bağlamda, “tek eksen” terimi presleme kuvvetinin yalnızca dikey yönde uygulandığını; “tek tesir” ise bu kuvvetin

yalnızca üst zımbadan iletilip alt zımbanın sabit kaldığını ifade etmektedir. Böylece presleme işlemi, eksenel ve yerçekimi yönüyle aynı doğrultuda tek yönlü olarak gerçekleştirilmiştir.

Metal matrisli kompozitlerin sıkıştırılması 20 bar basınçla, Hidropir marka pres kullanılarak uygulanmıştır. Kullanılan sıkıştırma kalıbı, alaşımlı sertleştirilmiş çelikten üretilmiş bir silindirdir. Dış çapı 56 mm ve yüksekliği 61 mm olarak tasarlanmıştır. Kalıba giren zımbanın çapı ise 16 mm olarak belirlenmiştir. Sıkıştırma sonrasında elde edilen bozuk para benzeri silindir ham numunelerin çapı 16 mm (Hata Payı - Error Range: E.R. $\pm 0.5\%$) ve kalınlığı 4.96 mm (E.R. $\pm 0.5\%$) olarak ölçülmüştür. Bu aşamaların her biri, numunelerin mekanik ve mikro yapısal özelliklerinin homojenliğini sağlamak amacıyla hassasiyetle yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 2'de %5 NBN içeriğinin tartılması, metal matrisli kompozitlerinin kalıp içerisine doldurulması ve presleme sonrası elde edilen ham numuneler gösterilmektedir.



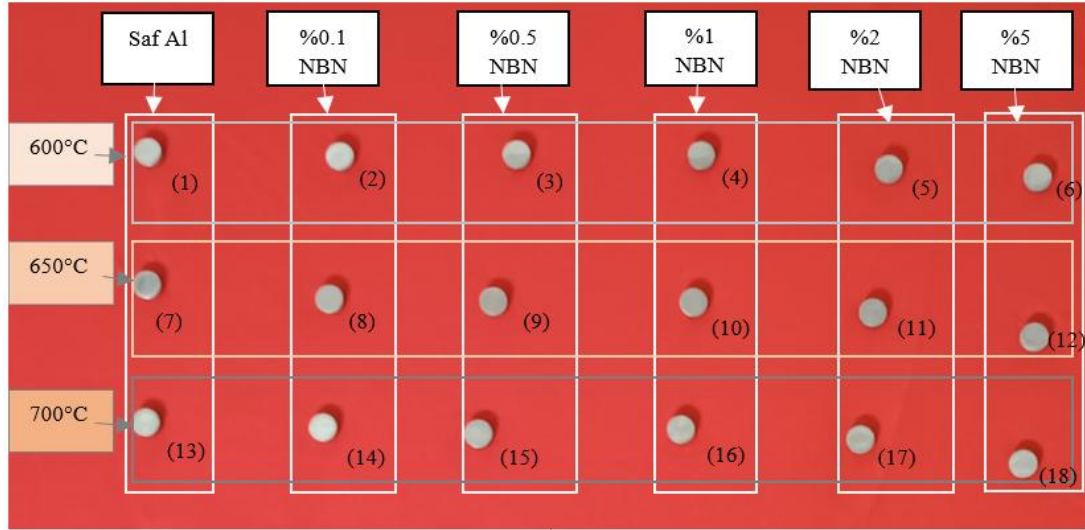
Şekil 2. a) %5 NBN içeriğinin tartılması, b) karışmış ve toz haldeki metal matrisli kompozitlerin kalıp içerisine doldurulması, c) presleme sonrası elde edilen bozuk para benzeri silindir ham numuneler

Sıkıştırma sonrası elde edilen ham numuneler, mekanik ve mikroyapısal özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla fırın içerisine alınmış ve 600°C, 650°C ve 700°C’de atmosfer koşullarında (hava ortamında) sinterlenmiştir. Bu çalışmada fırın kullanılmasının sebebi olarak donanım erişilebilirliği ve süreç kolaylığı verilebilmektedir. Ayrıca numune hazırlamada yüksek üretim hacmine uygunluğu ve basit sinterleme koşulları bu yöntemin uygulama açısından pratikliğini artırmaktadır (Çivi ve Atık, 2025). Alternatif yöntemler arasında yer alan SPS ve İndüksiyon gibi gelişmiş yöntemler; daha hızlı sinterleme süreleri, daha yüksek bağıl yoğunluklar ve tane büyümesini sınırlayan etkileriyle ön plana çıkmaktadır. Ancak bu yöntemler donanım maliyeti ve karmaşık yapısı gibi dezavantajlara sahiptir ve araştırılması gerekir (Firestein ve ark., 2017; Nautiyal ve ark., 2016; Dudina ve ark., 2023; Erçetin ve ark., 2023; Sekar ve Panigrahi, 2024). Dolayısıyla bu çalışma kapsamında kullanılan fırın, basit sinterleme koşulları ve düşük donanım gereksinimiyle laboratuvar ölçeğinde güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar sağlamak açısından uygun bulunmuş ve gelecek çalışmalarda gelişmiş sinterleme teknikleriyle karşılaştırmalı analizlerin yapılmasının ön çalışması olarak tercih edilmiştir.

İşlemin gerçekleştiği fırın, belirlenen sıcaklıklara 0.173°C/saniye ısıtma hızıyla ulaşmıştır. Ardından numuneler ilgili bekleme sıcaklıklarında fırına yerleştirilmiş ve 60 dakika süreyle hava atmosferinde sinterlendikten sonra fırın dışına alınarak normal atmosfer koşullarında soğumaya bırakılmıştır. Süreç sonunda farklı katkı oranları ve sinterleme sıcaklığı parametrelerine uygun olarak toplam 18 farklı özelliğe sahip numune üretilmiştir. Her bir numunenin ortalama ağırlığı 2.5 gram (E.R. $\pm 0.3\%$) olarak ölçülmüştür. Çizelge 3’te numunelerin kütlece takviye oranı ile sıcaklıkları, Şekil 3’te ise üretilen numuneler gösterilmiştir.

Çizelge 3. Numunelerin kütlece takviye oranı ve sinterleme sıcaklıkları

Numune No.	Metal Matris	NBN Kütlece Katkı Oranı (%)	Sıcaklık (°C)
1	Saf Al	0 (Sıfır)-Kontrol Numunesi	600°C
2	Saf Al	0.1	600°C
3	Saf Al	0.5	600°C
4	Saf Al	1	600°C
5	Saf Al	2	600°C
6	Saf Al	5	600°C
7	Saf Al	0 (Sıfır)-Kontrol Numunesi	650°C
8	Saf Al	0.1	650°C
9	Saf Al	0.5	650°C
10	Saf Al	1	650°C
11	Saf Al	2	650°C
12	Saf Al	5	650°C
13	Saf Al	0 (Sıfır)-Kontrol Numunesi	700°C
14	Saf Al	0.1	700°C
15	Saf Al	0.5	700°C
16	Saf Al	1	700°C
17	Saf Al	2	700°C
18	Saf Al	5	700°C

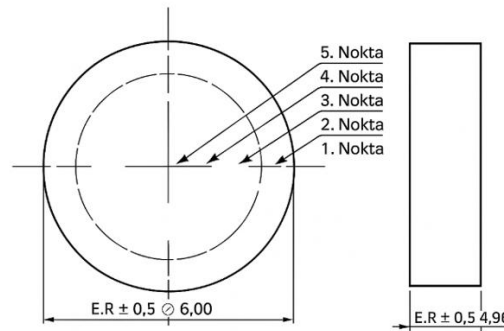


Şekil 3. Farklı katkı oranı ve sıcaklık parametreleriyle hazırlanmış numuneler

Numunelerin analiz ve değerlendirme sürecine geçilmeden önce, mekanik ve mikro yapısal testlerin gerçekleştirilebilmesi için yüzey hazırlık işlemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda tüm numuneler 100-2500 grit aralığında silisyum karbür (SiC) zımpara kullanılarak zımparalanmış, ardından 6 µm ve 1 µm elmas süspansiyonlu çuha ile parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra mikro yapısal detayların daha net bir şekilde incelenebilmesi için, %1 hidroflüorik asit (HF), %1.5 hidroklorik asit (HCl), %2.5 nitrik asit (HNO₃) ve %95 saf su içeren Keller reaktifi ile 4 saniye boyunca dağlanmıştır. Süreç, mikro yapısal analizlerde tane sınırlarının ve faz dağılımının daha iyi gözlemlenmesini sağlamak amacıyla kontrollü bir şekilde yürütülmüştür.

2.3 Analiz ve Değerlendirme

Numunelerin sertlikleri Metkon Duroline-LV Vickers Hardness Tester (HV) sertlik ölçme cihazında ASTM E92 standardına uygun olarak 10 saniye (san.) süre ve 3 kgf yükte gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te gösterildiği üzere, her numune üzerinde dış çaptan merkeze doğru beş adet ölçüm noktası belirlenmiştir. Bu beş ölçüm noktasının her birinden, aynı konumda olmak üzere ardışık beş sertlik ölçümü yapılmış (örneğin Şekil 4'te gösterilen 3. noktadan 5 ölçüm yapılmış) ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak (E.R.i en aza indirmek amacıyla) ilgili noktanın ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri, kütlece farklı katkı oranları (%0.1, %0.5, %1, %2 ve %5) ve sinterleme sıcaklıklarına (600°C, 650°C, 700°C) göre değerlendirilmiştir. Şekil 4'te sertlik ölçüm noktalarının numune üzerindeki şematik konumu verilmektedir.



Şekil 4. Sertlik ölçüm noktalarının numune üzerindeki şematik konumu

Numunelerin mikro yapısal özellikleri ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak değerlendirilmiştir. SEM görüntüleme işlemi FEI marka QUANTA FEG 250 model cihaz kullanılarak yapılmıştır. SEM analizleri, NBN parçacıklarının Al matrisindeki dağılımını ve sinterleme sürecinde oluşan değişiklikleri incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin yoğunluk ölçümleri, ASTM B962-17 standardına uygun olarak Arşimet prensibiyle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, sinterleme işlemi sonrası elde edilen numunelerin tartı üzerindeki ve su içerisinde asılıyken kütleleri ölçülerek deneysel yoğunluklar hesaplanmıştır. Teorik yoğunluk hesaplamaları ise, Eşitlik 1 de verilen formül kullanılarak, Al ve NBN bileşenlerinin yoğunlukları ($\rho_{Al} = 2.70 \text{ g/cm}^3$ ve $\rho_{NBN} = 2.25 \text{ g/cm}^3$) ve kütlece yüzdeleri dikkate alınarak yapılmıştır. Deneysel ve teorik yoğunluk değerleri kullanılarak Eşitlik 2 yardımıyla bağıl yoğunluk (BD) değeri hesaplanmıştır. Aşağıda ilgili bağıntılar sunulmaktadır.

$$\rho_{teorik} = (w_{Al} \cdot \rho_{Al}) + (w_{NBN} \cdot \rho_{NBN}) \quad (1)$$

$$BD(\%) = \left(\frac{\rho_{deneysel \text{ yoğunluk}}}{\rho_{teorik \text{ yoğunluk}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Çalışmada tek bir sıkıştırma basıncı uygulandığı için homojenlik veya gözeneklilik doğrudan ölçülmemiştir. Bağıl yoğunluk değerleri ve SEM görüntüleri değerlendirilerek çıkarımlarda bulunulmuştur.

Son olarak sinterleme sırasında, fırının tükettiği enerji miktarı kWh cinsinden ENTES marka E-M serisi cihaz kullanılarak ölçülmüştür. Bu veriler, enerji tüketimini optimize etmek ve sinterleme maliyetlerini değerlendirmek için kullanılmıştır.

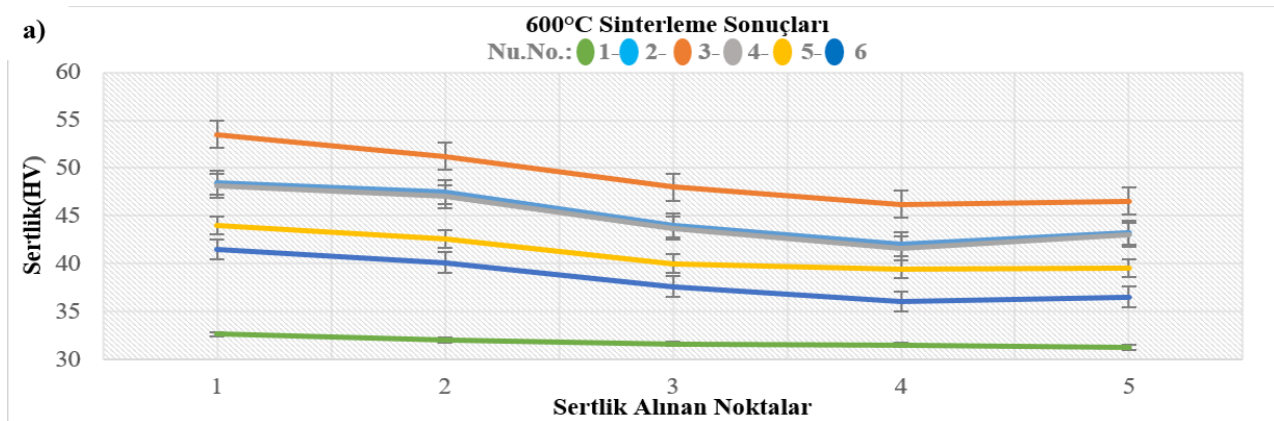
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, saf Al ile kütlece %0.1, %0.5, %1, %2 ve %5 oranlarında NBN takviyesi içeren Al matrisli kompozitlerin sinterlemesi sonrasında elde edilen sertlik sonuçları, SEM görüntüleri, yoğunluk bulguları ve enerji tüketim verilerine yer verilmiştir.

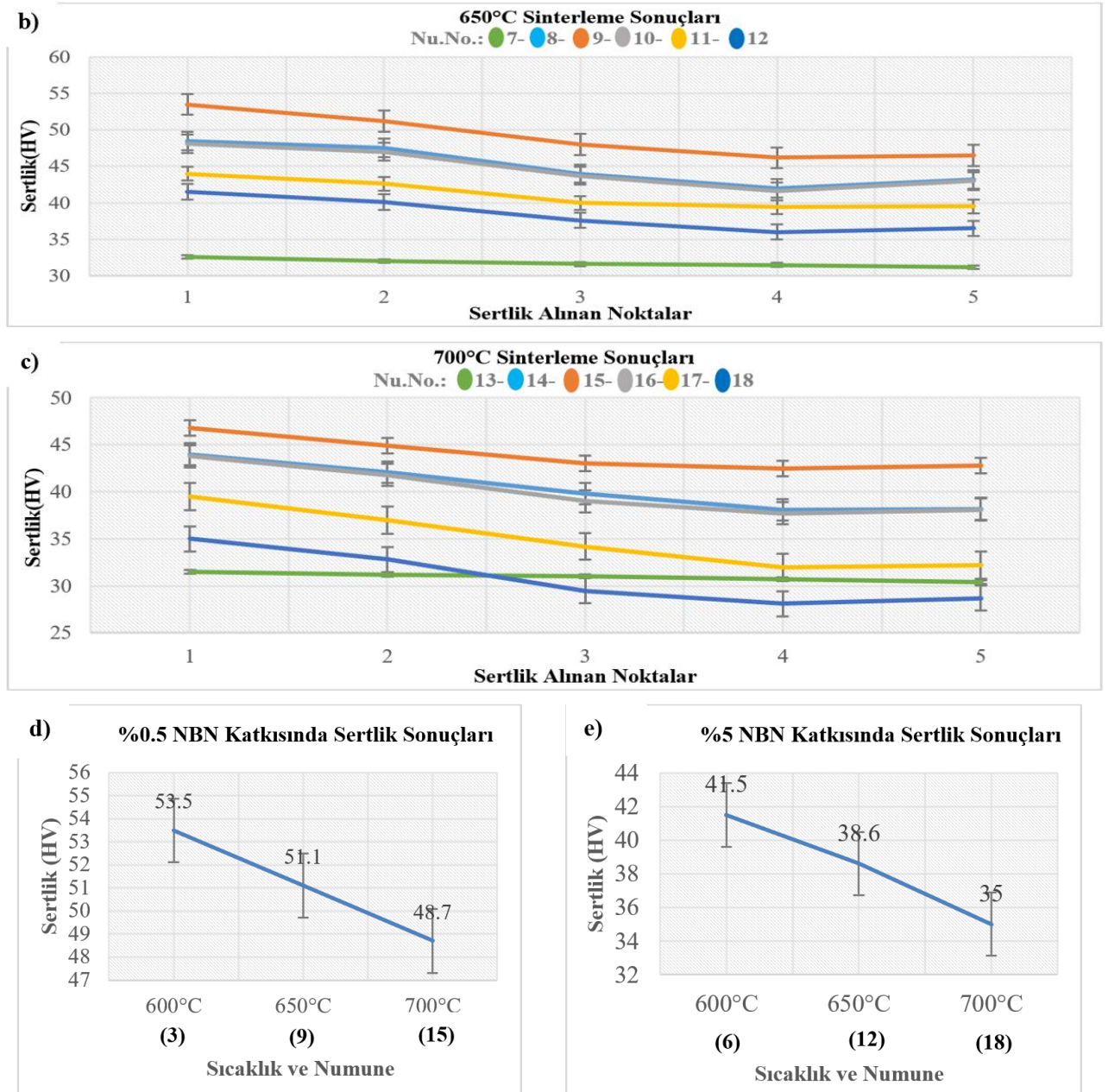
3.1 Sertlik Bulguları

Elde edilen sertlik sonuçları, 600°C’de sinterlenen %0.5 NBN katkılı numunenin (3) en yüksek sertlik değeri olan 53.5 HV’e ulaştığını göstermiştir. Bu katkı oranı sertlik optimizasyonu açısından tepe noktayı oluşturmaktadır. Ancak, %0.5 NBN katkısından sonra, katkı oranındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinde lineer bir azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, aynı kimyasal kompozisyona sahip malzemelerde sinterleme sıcaklığının 600°C’den 700°C’ye yükseltilmesi durumunda da sertlik değerlerinde bir düşüş meydana geldiği anlaşılmıştır. Bunun temel sebebi, yüksek sıcaklıkların mikro yapıda gözenek oluşumunu artırarak mekanik özellikleri olumsuz etkilemesi olabilmektedir (Şenel ve ark., 2018). Öte yandan, 700°C sinterlenen %5 NBN içeren numunede (18) sertlik değeri 28.7 HV’e kadar düşmüştür. Bu durum, yüksek katkı oranlarında NBN partiküllerinin homojen dağılım göstermekte zorlanması ve aglomerasyon eğiliminin artmasıyla açıklanabilmektedir (Aslan ve ark., 2020).

Literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında, %0.5 Bor Nitrür (BN) katkılı Al kompozitlerinin Kıvılcım Plazma Sinterleme (SPS) yöntemiyle üretildiği ve bu katkı oranına kadar sertliğin arttığı, ancak daha yüksek oranlarda aglomerasyon nedeniyle mekanik özelliklerin düştüğü rapor edilmiştir (Nautiyal ve ark., 2016). Bu bulgu, mevcut çalışmada %0.5 NBN katkısının en yüksek sertlik değerini sağlayan katkı oranı olduğu sonucunu desteklemektedir. Başka bir çalışmada ise, BN nano parçacık (BNNT) takviyeli Al kompozitlerinde %2’den daha fazla takviye oranlarında aglomerasyon nedeniyle mekanik özelliklerde düşüş yaşandığı bildirilmiştir (Lahiri ve ark., 2013). Mevcut çalışmada %2 ve %5 NBN katkısında sertlik değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Şekil 5’te sinterleme sonucunda elde edilen sertlik bulguları verilmektedir (E.R. $\pm$ %3.24).



Şekil 5. a) 600°C sinterleme sonucunda numunelerde elde edilen sertlik bulguları, b) 650°C sinterleme sonucunda numunelerde elde edilen sertlik bulguları c) 700°C sinterleme sonucunda numunelerde elde edilen sertlik bulguları d) kütlece %0.5 NBN katkısında HV sertlik sonuçları e) kütlece %5 NBN katkısında HV sertlik sonuçları

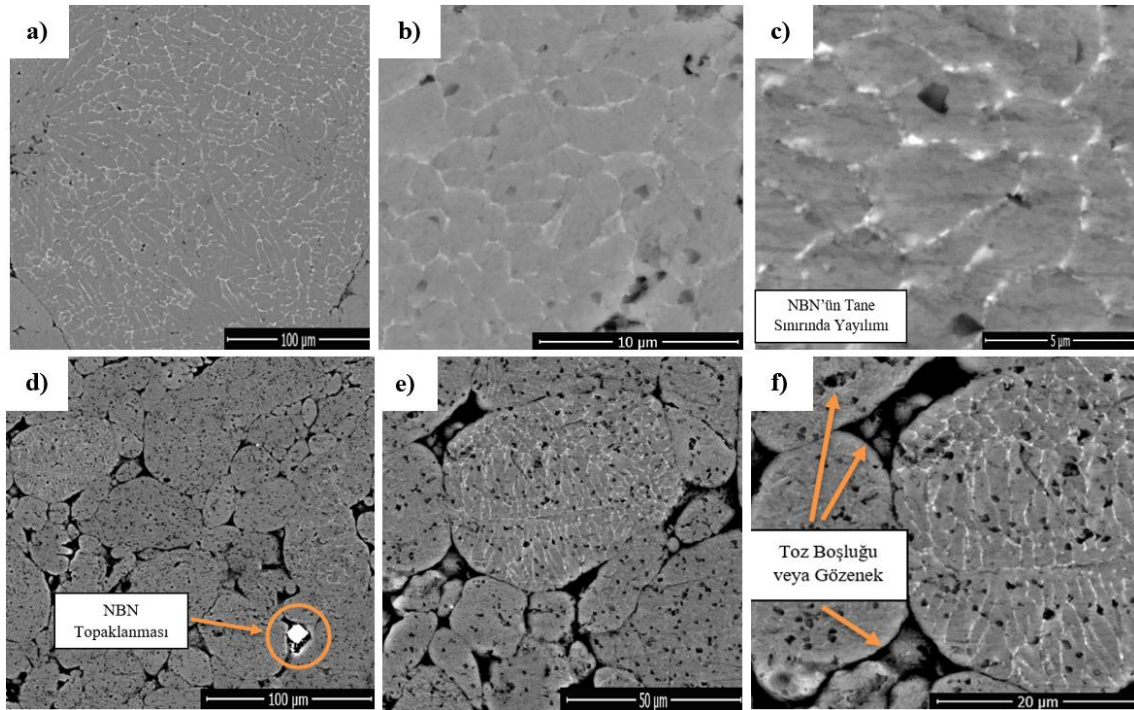


Şekil 5. a) 600°C sinterleme sonucunda numunelerde elde edilen sertlik bulguları, b) 650°C sinterleme sonucunda numunelerde elde edilen sertlik bulguları c) 700°C sinterleme sonucunda numunelerde elde edilen sertlik bulguları d) kütlece %0.5 NBN katkısında HV sertlik sonuçları e) kütlece %5 NBN katkısında HV sertlik sonuçları (devamı)

3.2 Mikro Yapı Bulguları

5 µm – 100 µm büyütme oranlarında gerçekleştirilen SEM analizleri, düşük NBN oranlarında takviyenin Al matrisinde homojen dağıldığını ve iyi bağlandığını ancak %2 ve üzeri katkı oranlarında kümelenme eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, 700°C sinterleme sıcaklığında gözenek oluşumu belirgin hale gelmiştir. Bu gözenekler sinterleme işlemi sırasında oluşan gaz boşalımı ya da yetersiz yoğunlaşmadan kaynaklanmaktadır. Bu gözeneklerin dağılımı ve yoğunluğu, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyebilecek önemli bir faktör olarak değerlendirilmiştir. Burada gözlenen bulgular, sertlik sonuçlarıyla da paralellik taşımaktadır. Çünkü aynı kimyasal kompozisyonda olup farklı sinterleme sıcaklığında işlem gören numunelerde sertlik değerinin değiştiği gözlemlenmektedir. SEM incelemelerine bakılarak, daha yüksek sıcaklıkların mikro yapıda gözeneklerin artması ve buna bağlı olarak sertlik özelliklerin olumsuz etkilendiği söylenebilmektedir.

Bu çalışmada gözlemlenen homojen dağılım ve yüksek katkı oranlarındaki kümelenme eğilimi literatürdeki sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Bor Nitrür (BN) takviyeli Al kompozitleri ile yapılan bir çalışmada; %2 BN katkısına kadar homojen dağılım gözlemlendiği, ancak daha yüksek oranlarda BN partiküllerinin matriste kümelenerek materyaldeki mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Lahiri ve ark., 2013). Bu bulgu, mevcut çalışmada %5 NBN katkısında gözlemlenen kümelenme eğilimi ile örtüşmektedir. Öte yandan yüksek sinterleme sıcaklığının ($>650^{\circ}\text{C}$) gözenek oluşumunu artırarak partiküllerin dağılımını olumsuz etkilediği raporlanmaktadır (Firestein ve ark., 2017). Benzer şekilde BN takviyeli Al kompozit üretiminde, 700°C ve üzerinde gözenekli yapıya dikkat çekilmektedir (Nautiyal ve ark., 2016). Literatürdeki bu bulgular ile mevcut çalışma değerlendirildiğinde; aynı kimyasal kompozisyondaki 600°C 'de sinterlenen numunelerde (1,2,3,4,5,6) daha homojen bir mikro yapı elde edildiği görülürken, 700°C 'de sinterlenen numunelerde (13,14,15,16,17,18) belirgin gözenek ve gaz boşlukları oluşumu tespit edilmiştir. Şekil 6'da bazı numunelere ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6. a)–c) 600°C 'de %0.5 NBN katkısıyla sinterlenen numunede (3) NBN'in tane sınırında bulunması ve yayılımı, d)–f) 700°C 'de %5 NBN katkısıyla sinterlenen numunede (18) gözlenen NBN topaklanması, matris içi dağılım ve belirgin toz boşlukları/gözenek oluşumu

3.3 Yoğunluk Bulguları

Sinterleme sıcaklığı ve NBN katkı oranının yoğunluk değişimi ile bağlı yoğunluk üzerindeki yapılan değerlendirmede, tüm numunelerde sinterleme sonrası yoğunluk değişimi gözlemlenmiştir. 600°C 'de sinterlenen numunelerde görece olarak yoğunluk değişimi daha fazladır. Sinterleme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak bazı numunelerde yoğunluk değişiminde azalmanın olduğu anlaşılmıştır. Özellikle %5 NBN katkılı numune (6) 1.399 g/cm^3 ile en yüksek yoğunluk değişimi tespit edilmiştir. 700°C 'de sinterlenen %0.5 NBN katkılı numune ise (15), 0.581 g/cm^3 ile en düşük yoğunluk değişimi saptanmıştır. Bu bulgu, literatürde belirtilen optimum sinterleme sıcaklıklarının (600°C) gözenek kapanmasını desteklemesiyle uyumludur (Lahiri ve ark., 2013; Nautiyal ve ark., 2016; Firestein ve ark., 2017). Ancak özellikle 700°C 'de sinterlenen numunelerde (13,14,15,16,17,18) gözenek oluşumu ve kısmi ergimeler meydana gelmiştir. Şekil 7'de, 700°C 'de

sinterlenen 15 ve 17 numaralı numunelere ait kısmi ergimeler gösterilmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklığın etkisiyle matris içerisindeki gözeneklerin yeterince kapanmaması, malzemenin ergime sıcaklığına yaklaşması veya mikro çatlak oluşumunun artması ile açıklanabilmektedir (Özçatal ve Başpınar, 2020; Tosun ve Kurt, 2020).



Şekil 7. 700 °C’de sinterlenen ve kısmi olarak ergiyen bazı numuneler

Bunun yanı sıra bağıl yoğunluk değerleri tüm numuneler için %94.7 ile %97.7 aralığında değişmektedir. Ölçülen en yüksek bağıl yoğunluk değeri %97.7 ile 650 °C’deki %5 NBN katkı numuneye (12), en düşük bağıl yoğunluk değeri ise 700 °C’de NBN katkısı olmadan sinterlenen kontrol numunesine (13) aittir. Bu oranlar, sinterleme sonrası numunelerin yoğunlaşabildiğini ve gözenekliliğin azaldığını göstererek literatürle benzer sonuçları vermiştir. Örneğin Bor Nitrür takviyeli Al nanokompozitleriyle yapılan bir çalışmada; %3 katkılı Al kompozitlerinde yüksek bağıl yoğunluk (%94.11) elde edildiği görülmüştür (Ghosh ve ark., 2024). Ancak buradaki bağıl yoğunluk değerlerinde, katkı oranı veya sinterleme sıcaklığına bağlı düzenli bir artış ya da azalış eğilimi gözlenememiştir. Bunun nedeni olarak takviyenin partikül boyutu, dağılım homojenliği, aglomerasyon eğilimi, deneysel belirsizlikler veya farklı kompozisyonlarda farklı mikroyapıların oluşumu verilebilmektedir (Peng ve ark., 2016; Radhika ve Dobbidi, 2023). Çizelge 4’te çalışmada elde edilen yoğunluk bulguları (E.R. $\pm$ %3.94) gösterilmektedir.

Çizelge 4. Numunelerdeki yoğunluk bulguları

No	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	NBN Katkı Oranı (%)	Sinterleme Süresi (dak)	Ham Yoğunluk (g/cm ³)	Sinterleme Sonrası Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk Değişimi (%)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Bağıl Yoğunluk (%)
1	600°C	-	60	2.550	2.575	1.145	2.700	95.370
2	600°C	0.1	60	2.552	2.584	1.253	2.699	95.719
3	600°C	0.5	60	2.568	2.600	1.246	2.697	96.376
4	600°C	1	60	2.531	2.558	1.066	2.695	94.898
5	600°C	2	60	2.560	2.589	1.132	2.691	96.209
6	600°C	5	60	2.573	2.609	1.399	2.671	97.105
7	650°C	-	60	2.551	2.569	1.024	2.700	95.148
8	650°C	0.1	60	2.554	2.584	1.174	2.699	95.719
9	650°C	0.5	60	2.551	2.575	0.940	2.697	95.449
10	650°C	1	60	2.585	2.604	0.735	2.695	96.605
11	650°C	2	60	2.562	2.589	1.053	2.691	96.209
12	650°C	5	60	2.594	2.617	0.886	2.677	97.740

Çizelge 4. Numunelerdeki yoğunluk bulguları (devamı)

No	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	NBN Katkı Oranı (%)	Sinterleme Süresi (dak)	Ham Yoğunluk (g/cm ³)	Sinterleme Sonrası Yoğunluk (g/cm ³)	Yoğunluk Değişimi (%)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Bağlı Yoğunluk (%)
13	700°C	-	60	2.575	2.587	0.694	2.700	94.740
14	700°C	0.1	60	2.584	2.601	0.657	2.699	96.349
15	700°C	0.5	60	2.579	2.594	0.581	2.697	96.376
16	700°C	1	60	2.548	2.564	0.627	2.695	96.123
17	700°C	2	60	2.561	2.583	0.859	2.691	96.915
18	700°C	5	60	2.538	2.559	0.827	2.677	95.574

3.4 Enerji Kullanım Bulguları

Çalışmanın tüm aşamalarında elektrik enerjisi tüketim verileri kaydedilmiştir. Sinterleme sıcaklıklarının enerji tüketimi üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla harcanan toplam enerji miktarı, ENTES marka E-M serisi güç kalitesi ve enerji verimliliği ölçüm cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklıklarında gerçekleştirilen sinterleme işlemlerinde sırasıyla 4894 kWh, 6387 kWh ve 7431 kWh enerji tüketimi bulunmuştur (E.R. $\pm$ %2.29). Bulgular, sinterleme sıcaklığı arttıkça enerji tüketiminin belirgin şekilde yükseldiğini göstermektedir. Özellikle, alternatif sinterleme yöntemlerinin daha düşük enerji tüketimi sağladığı ve geleneksel fırın sinterlemenin daha yüksek enerji maliyetine neden olduğu yönündeki literatür bulguları, mevcut çalışmadaki enerji sonuçlarını desteklemektedir. Bu çalışmalarda gelecekte enerji tüketiminin azaltılması için alternatif sinterleme yöntemlerinin (örneğin, mikrodalga sinterleme, indüksiyon sinterleme veya SPS) kullanılması önerilmiştir (Nautiyal ve ark., 2016; Firestein ve ark., 2017; Erçetin ve ark., 2024; Çubuk ve ark., 2025). Mevcut çalışmada tüketilen enerji miktarı Çizelge 5'te verilmektedir.

Çizelge 5. Elektrik enerjisi kullanım bulguları

Sıcaklık (°C)	Ayarlanan Sinterleme Sıcaklığına Ulaşma Hızı (°C/san.)	Sinterleme Süresi (dak)	Tüketilen Toplam Enerji (kWh)
600 °C	0.173	60	4894
650 °C	0.173	60	6387
700 °C	0.173	60	7431

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Nano Bor Nitrür (NBN) takviyeli alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş ve mekanik ile mikroyapısal özellikleri değerlendirilmiştir. 600 °C'de sinterlenen katkısız kontrol numunesinin (1) sertliği 31.78 HV olarak ölçülürken, aynı sıcaklıkta %0.5 NBN katkısı içeren numune (3) %68.34'lük bir artışla 53.5 HV'ye ulaşarak en yüksek sertlik değerini göstermiştir. Buna karşılık, 700 °C'de sinterlenen %5 NBN katkılı numunede (18) sertlik değeri %7.30 azalarak 28.7 HV'ye düşmüştür. Bu bulgular, maximum sertlik değerinin 600 °C sinterleme sıcaklığı ve %0.5 katkı oranında elde edildiğini göstermektedir. SEM analizleri, düşük katkı oranlarında homojen dağılımın sağlandığını; ancak %2 ve üzeri oranlarda parçacık kümelenmeleri ile birlikte 700 °C'de belirgin gözenek oluşumlarının meydana geldiğini ve kısmi ergimelerin olduğunu ortaya koymuştur. Yoğunluk analizlerinde, sinterleme sonrası tüm numunelerde yoğunluk artışı gözlemlenmiştir. En yüksek değişim %5 NBN katkılı numunede (6) (1.399 g/cm³), en düşük ise %0.5 katkılı numunede (15) (0.581 g/cm³) elde edilmiştir. Bunun yanı sıra bağlı yoğunluklar %94.7–97.7 aralığında değişmiş ve literatürle uyumlu sonuçlar bulunmuştur.

Ancak katkı oranı ve sıcaklığa bağlı düzenli bir eğilim gözlenmemiştir. Bu durum, takviyenin dağılım zorlukları ve mikroyapısal farklılıklarla ilişkilendirilerek mevcut yoğunluk sonuçlarının, 600–650 °C sıcaklıkta ve %0.5–2 katkı oranında daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca sinterleme sıcaklığının artışı, enerji tüketimini artırarak malzemenin yoğunluğu ve sertliği üzerinde olumsuz etkilere yol açmıştır. Genel olarak bu çalışmada yapılan mekanik ve mikroyapısal değerlendirmede, NBN takviyeli Al matrisli kompozitler için optimum katkı oranının %0.1–1 aralığında ve 600 °C sıcaklıkta olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu değerlerin üzerindeki katkı ve sıcaklıklarda mekanik ve mikroyapısal performans olumsuz etkilenmektedir.

İleride yapılacak çalışmalarda, %0.2–%0.9 aralığındaki katkı oranlarının incelenmesi, farklı sinterleme teknikleriyle karşılaştırılması ve Al dışındaki matris malzemelerde NBN takviyesinin performansının değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu kompozitlerin aşınma, korozyon ve işlenebilirlik gibi mühendislik uygulamalarındaki performanslarının test edilmesi, endüstriyel kullanım potansiyelinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu makale, İzmir Demokrasi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Prof. Dr. Uğur ÇAVDAR danışmanlığında yürütülen ve TÜBİTAK BİDEB 2210-C Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenen (Baş. No: 1649B022215401). Hıdır Sercan Çubuk'un "Nano Bor Nitrür Takviyeli Alüminyum Tozlarının Ultra Yüksek Frekanslı İndüksiyon Sistemi ile Sinterlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Araştırmanın kapsamının genişletilmesine sağladığı destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Bu makalede Uğur ÇAVDAR çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri analizi ve yorumlama, fıkırsel içeriğin eleştirel incelemesi, Hıdır Sercan ÇUBUK çalışmanın verilerinin toplanması, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, son onay ve tam sorumluluk konusunda katkı sağlamıştır.

8. KAYNAKLAR

- Antillon M., Nautiyal P., Loganathan A., Boesl B., Agarwal A. Strengthening in boron nitride nanotube reinforced aluminum composites prepared by roll bonding. *Advanced Engineering Materials* 20(8), 1800122, 2018.
- Arora G. S., Saxena K. K., A Review Study on The İnfluence of Hybridization on Mechanical Behaviour of Hybrid Mg Matrix Composites Through Powder Metallurgy, *Mater Today Proceed*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.217>
- Aslan M., Ergöl E., Kaya A., Kurt H. İ., Yılmaz N. F., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-MgO Kompozitlerin Özelliklerine Sinterleme Sıcaklığının Etkisi, *El-Cezeri* 7(3), 1131-1139, 2020.

- Aydın H., Nanoyapılı Hegzagonal Bor Nitrür Üretimi ve Karakterizasyonu, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 30(2), 269-275, 2018.
- Baser T. A., Umay E., Akıncı V., New Trends in Aluminum Die Casting Alloys For Automotive Applications, The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics 21, 79-87, 2022.
- Chen Y., Chen T., Zhang S., Li P., Effect of ball milling on microstructural evolution during partial remelting of 6061 aluminum alloy prepared by cold-pressing of alloy powders, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25, 2113-2121, 2015.
- Çubuk, H. S., Mutlu, A., Çavdar, U., Nano bor nitrür takviyeli alüminyum tozlarının ultra yüksek frekanslı indüksiyon sistemi ile sinterlenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 6(1), 41-51, 2025. <https://doi.org/10.52795/mateca.1588015>
- Çivi C., Atik E., Investigation of Induction Sinterability of Powder Metal Parts of Different Shapes and sizes. Mühendis ve Makina, 66(718), 23-38, 2025. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1460609>
- Dudina D. V., Georgarakis K., Olevsky E. A., Progress in aluminium and magnesium matrix composites obtained by spark plasma, microwave and induction sintering. International Materials Reviews 68(2), 225-246, 2023.
- Ercetin A., Özgün Ö., Aslantaş K., Der O., Yalçın B., Şimşir E., Aamir M., Microstructural and mechanical behavior investigations of Nb-reinforced Mg–Sn–Al–Zn–Mn matrix magnesium composites. Metals 13(6), 1097, 2023.
- Erçetin A., Aslantaş K., Özgün Ö., Micro-End Milling of Biomedical TZ54 Magnesium Alloy Produced Through Powder Metallurgy, Machining Science and Technology 24(6), 924-947, 2020.
- Erçetin A., Özgün Ö., Aslantaş K., Toz Metal Al₂O₃ Takviyeli Mg₅Sn Matrisli Kompozitler: Üretim ve Karakterizasyon, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 38(2), 1003-1012, 2022.
- Firestein K. L., Corthay S., Steinman A. E., Matveev A. T., Kovalskii A. M., Sukhorukova I. V., Golberg D., Shtansky D. V., High-strength aluminum-based composites reinforced with BN, AlB₂ and AlN particles fabricated via reactive spark plasma sintering of Al-BN powder mixtures. Materials Science and Engineering: A 681, 1-9, 2017.
- Ghosh A., Shukla U., Sahoo N., Das B., Kar U. K., Shrivastava P., Alam S. N., Development and mechanical characterization of copper-Hexagonal boron nitride metal matrix nanocomposites using powder metallurgy route. Journal of Materials Engineering and Performance 1-17, 2024.
- Irshad H. M., Farooq A., Hakeem A. S., Azeem M. Z., Ehsan M. A., Electrochemical Study of Aluminum–Cubic Boron Nitride Composites Synthesized via Spark Plasma Sintering for Engineering Applications, Journal of Alloys and Compounds 965, 171210, 2023.
- Kumar N., Bharti A., Review on Powder Metallurgy: A Novel Technique For Recycling and Foaming of Aluminium-Based Materials, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 60, 52-59, 2021.
- Lahiri D., Hadjikhani A., Zhang C., Xing T., Li L. H., Chen Y., Agarwal, A., Boron nitride nanotubes reinforced aluminum composites prepared by spark plasma sintering: Microstructure, mechanical properties and deformation behavior. Materials Science and Engineering: A 574, 149-156, 2013.
- Lv W., Lv J., Liu J., Chen C., Kang, Y., Sintering dynamic evolution and enhancement mechanism of nano-Cu/boron nitride composite matrix with excellent mechanical properties from the atomic perspective. Composite Structures 354, 118756, 2025.

- Manohar G., Pandey K. M., Maity S. R., Effect of Sintering Mechanisms on Mechanical Properties of AA7075/B4C Composite Fabricated by Powder Metallurgy Techniques, *Ceramics International* 47(11), 15147-15154, 2021.
- Moustafa E. B., Mikhaylovskaya A. V., Taha M. A., Mosleh A. O., Improvement of the Microstructure and Mechanical Properties By Hybridizing The Surface of AA7075 by Hexagonal Boron Nitride With Carbide Particles Using The FSP Process, *Journal of Materials Research and Technology* 17, 1986-1999, 2022.
- Nautiyal P., Rudolf C., Loganathan A., Zhang C., Boesl B., Agarwal, A. Directionally aligned ultra-long boron nitride nanotube induced strengthening of aluminum-based sandwich composite. *Advanced Engineering Materials* 18(10), 1747-1754, 2016.
- Özçatal M., Başpınar M. S., SiO₂ Katkısının Al₂TiO₅ Seramiklerinin Fiziksel Özelliklerine Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 26(4), 594-598, 2020.
- Pandey K. K., Singh S., Choudhary S., Zhang C., Agarwal A., Li L. H., Chen Y., Keshri A. K., Microstructural and Mechanical Properties of Plasma Sprayed Boron Nitride Nanotubes Reinforced Alumina Coating, *Ceramics International* 47(7), 9194-9202, 2021.
- Pariyar A., Perugu C. S., Toth L. S., Kailas S. V., Microstructure and Mechanical Behavior of Polymer-Derived In-Situ Ceramic Reinforced Lightweight Aluminum Matrix Composite, *Journal of Alloys and Compounds* 880, 160430, 2021.
- Peng X., Zhu D., Li Y., Zhou J., Lv Z., GUO P., Fabrication and property of AlN-BN composites by hot isostatic pressing. *J. Inorg. Mater*, 31, 535-541, 2016.
- Pillari L. K., Umasankar V., Elamathi P., Chandrasekar G., Synthesis and Characterization of Nano Hexagonal Boron Nitride Powder and Evaluating The Influence on Aluminium Alloy Matrix, *Materials Today Proceedings* 3(6), 2018-2026, 2016.
- Radhika E., Dobbidi P., XPS and dielectric studies of phase pure AlN-BN composite ceramics using powder bed. *Materials Science and Engineering: B* 297, 116783, 2023.
- Sekar P., Panigrahi S. K., Understanding the corrosion and bio-corrosion behaviour of Magnesium composites—a critical review, *Journal of Magnesium and Alloys*, 12, 890-939, 2024.
- Şenel M., Gürbüz M., Koç E., Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Sinterleme Sıcaklığının Kompozitlerin Yoğunluğuna, Gözenekliliğine, Sertliğine ve Mikroyapısına Olan Etkisinin İncelenmesi, *SETSCI-Conference Proceedings*, Vol. 3, 2018.
- Thomas S., Menachery N., Thomas L. P., N S., Kumar P. G. S., Hebbar G. S., Influence of Nano Hexagonal Boron Nitride on The Wear Properties of Aluminium Alloy, *Advances in Materials and Processing Technologies* 10(3), 2483-2499, 2024.
- Tosun G., Kurt M., SiC Takviyeli Al-Mg Kompozitlerin Yoğunluğunun ve Mikro yapısının İncelenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9(1), 589-597, 2020.