



Makale / Research Paper

**Bor Karbür Takviyeli Al Esaslı Kompozitlerin Özellikleri Üzerine
Bor Karbür Takviye Miktarının Etkisi**

Serhatcan Berk Akçay^{1a}, Temel Varol^{*1b}, Onur Güler^{1c}, Hüseyin Can Aksa^{1d}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.

Trabzon/TÜRKİYE

tvarol@ktu.edu.tr

Received/Geliş: 16.11.2021

Accepted/Kabul: 04.01.2021

Öz: Bu çalışmada, ağırlıkça %10, %20 ve %40 Bor Karbür (B₄C) içerikli Al matris partiküllerin ve kompakt malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. B₄C takviyeli Al matris kompakt malzemelerin elektriksel iletkenlik değerleri en düşük 6,97 %IACS ve en yüksek 20,73 %IACS olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, mikro yapıda ağırlıkça artan B₄C takviyesinin yapının yoğunluğunu azaltma ve sertliğini artırma noktasında etkisi olduğu anlaşılmıştır. Yapısında ağırlıkça %10, %20 ve %40 B₄C içeren Al matris kompakt malzemelerin yoğunluk değerleri sırasıyla 2,622 gr/cm³, 2,598 gr/cm³ ve 2,568 gr/cm³ olarak, sertlik değerleri sırasıyla 244.34 HV(0.5), 270.16 HV(0.5) ve 290.70 HV(0.5) olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Matris, Bor karbür, Mekanik Öğütme, Metal Matris Kompozit, Toz Metalurjisi

**Effect of Boron Carbide Reinforcement Amount on the Properties of
Boron Carbide Reinforced Al Based Composites**

Abstract: In this study, the production and characterization of Al matrix particles and compact materials containing 10%, 20% and 40% by weight Boron Carbide (B₄C) were carried out. The electrical conductivity values of B₄C reinforced Al matrix compact materials were determined as the lowest 6.97% IACS and the highest 20.73% IACS. As a result of experimental studies, it has been understood that B₄C reinforcement, which increases in weight in the microstructure, has an effect on reducing the density of the structure and increasing its hardness. Density values of Al matrix compact materials containing 10%, 20% and 40% B₄C by weight in their structure were measured as 2.622 gr/cm³, 2.598 gr/cm³ and 2.568 gr/cm³. Hardness values were measured as 244.34 HV(0.5), 270.16 HV(0.5) and 290.70 HV(0.5), respectively.

Keywords: Aluminum Matrix, Boron Carbide, Mechanical Milling, Metal Matrix Composite, Powder Metallurgy

1. Giriş

Alüminyum (Al) ve alaşımları inşaat, havacılık, otomotiv ve savunma endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan metalik malzemelerdir. Saf Al için yoğunluk, ergime sıcaklığı, sertlik, elektriksel direnç ve termal iletkenlik özellikleri sırasıyla 2.70 gr/cm³, 660,32 °C, 167 MPa, 26.50 nΩm, 237 W/mK olarak literatürde yer almaktadır. Al ve alaşımları, düşük maliyetli olmaları, yüksek korozyon direnci, yüksek spesifik mukavemet, yüksek şekillendirilebilirlik, düşük yoğunluk ve nispeten düşük ergime sıcaklığına sahip olmaları nedeniyle birçok sektör için kullanımı yaygın olan metallerdir. Al alaşımlarının bilinen 8 farklı temel alaşımı bulunmaktadır, bu alaşımlar 1XXX-

Bu makaleye atıf yapmak için

Akçay, S. B., Varol, T., Güler, O., Aksa, H. C., "Bor Karbür Takviyeli Al Esaslı Kompozitlerin Özellikleri Üzerine Bor Karbür Takviye Miktarının Etkisi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (2); 869-881.

How to cite this article

Akçay, S. B., Varol, T., Güler, O., Aksa, H. C., "Effect of Boron Carbide Reinforcement Amount on the Properties of Boron Carbide Reinforced Al Based Composites" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2022, 9 (2); 869-881.

ORCID ID: ^a0000-0002-7492-4287; ^b0000-0002-1159-5383; ^c0000-0002-9696-3287; ^d0000-0001-9086-6526

8XXX olarak isimlendirilmektedirler. 2XXX Al alaşımı temelde Al ve bakır (Cu) alaşım elementlerini ihtiva eden bir alaşımdır. Bakır, alaşımın korozyon direncini düşürme eğilimindedir ancak alaşımın sahip olduğu düşük yoğunluğa bağlı yüksek spesifik mukavemet nedeniyle havacılık endüstrisi başta olmak üzere birçok farklı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [1-4].

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, günümüzde kullanımı giderek artan ileri mühendislik malzemeleridir. Özellikle düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılmakta olan MMK malzemeler, matris olarak metal veya metal alaşımı takviye olarak ise seramik partiküller gibi farklı fazlar kullanılarak üretilmektedirler [5,6]. Seramik partikül takviyeli MMK malzemelerin sahip oldukları yüksek mukavemet ve sertlik özellikleri, kullanım alanlarını arttırmaktadır. Bor karbür (B_4C), sahip olduğu düşük yoğunluk ($2,52 \text{ gr/cm}^3$) ve yüksek ergime sıcaklığı ($2400 \text{ }^\circ\text{C}$) özellikleri ile seramik malzemeler arasında takviye malzemesi olarak kullanılmaya en uygun malzemelerden biri olarak görülmektedir [7].

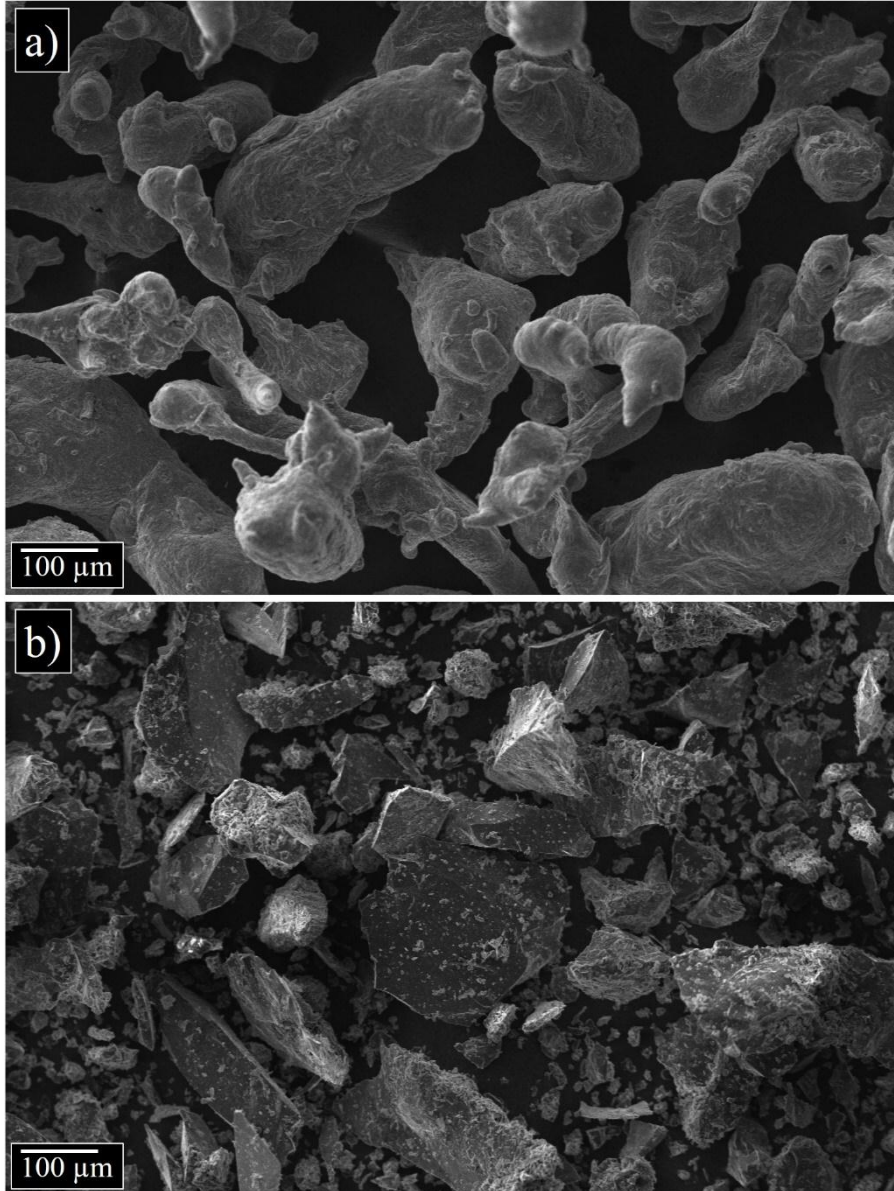
Literatür çalışmaları incelendiğinde, Al/ B_4C MMK malzemeler ile ilgili yapılmış çalışmalar mevcuttur. Şenel [7] yapmış olduğu çalışmada, ağırlıkça %1-30 oranında B_4C içeren saf Al 'un matris olarak kullanıldığı MMK malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışmasında kullandığı Al ve B_4C partiküllerine ait ortalama partikül boyutlarının sırasıyla $10 \mu\text{m}$ ve $20 \mu\text{m}$ olduğunu raporlamıştır. Çalışmasında 6 saat süre ve 500 dev/dk hız parametreleri içeren mekanik öğütme (MÖ) yöntemi kullanmıştır. Yoğunlaştırma deneylerinde ise 600 MPa basınç ile presleme ve sonrasında 3 saat $630 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta sinterleme işlemleri uygulamıştır. Yapmış olduğu çalışmalar neticesinde yapı içerisinde artan B_4C takviye oranı ile sertlik değerlerinin arttığını ve ağırlıkça %30 B_4C takviyesi ile yaklaşık olarak 75 HV sertlik değerinin elde edildiğini ortaya koymuştur. İpek [8] yapmış olduğu çalışmada, ortalama partikül boyutu 85-130 μm olan B_4C partiküllerin ergitme yöntemiyle Al 4147 alaşımına ağırlıkça %10, 15 ve 20 oranında takviye edilmesi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışma sonucunda artan B_4C takviyesi ile aşınma mekanizmasının yapışkan-aşındırıcı rejimden yumuşak-hafif yapışkan rejime dönüştüğünü raporlamıştır. Khakbiz ve Akhlaghi [9] yapmış oldukları çalışmada, farklı partikül boyutlarına sahip (90nm , $0,7 \mu\text{m}$ ve $1,2 \mu\text{m}$) ağırlıkça %5 ve %10 B_4C takviyesi içeren Al6061 alaşımlarının matris olarak kullanıldığı MMK malzemelerin mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmalarda 110 saat gibi yüksek alaşımlama süreleri sonrasında nano boyutta B_4C partikülleri elde ettiklerini tespit etmişlerdir. Zhang vd. [10] yapmış oldukları çalışmada, MÖ yöntemi kullanarak Al/ B_4C kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları Al ve B_4C partiküllere ait ortalama partikül boyutu değerleri sırasıyla $50 \mu\text{m}$ ve $1-3 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde yapı içerisinde artan B_4C takviyesi ile çekme mukavemeti değerinin yükseldiğini ve bu değerlerin %25 B_4C takviyeli Al/ B_4C kompozit için yaklaşık 196 MPa olduğunu raporlamışlardır. Boopathi vd. [11], 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada hacimce %5-15 arasında B_4C takviyesi içeren Al6061 MMK'lerin sürtünme ile karıştırma prosesi kullanarak üretimi ve ardından karakterizasyonu çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde yapı içerisinde B_4C partiküllerin bütün hacimce takviye oranlarında homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Yapmış oldukları çalışma neticesinde hacimce artan B_4C miktarı ile çekme mukavemetinin arttığını raporlamışlardır. Ayrıca çalışmalarında hacimce %15 B_4C takviyesi içeren ve 1200 devir/dakika ile 40 mm/dk ilerleme hızı üretim parametreleri kullanılarak üretilen kompozit yapının 347 MPa çekme mukavemetine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Hadi ve Paydar [12], 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada yüksek basınç burulma yöntemi kullanarak ağırlıkça %0-20 B_4C takviyesi içeren Al matrisli MMK'lerin üretimi ve karakterizasyonu çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde artan B_4C takviye miktarı ile sertlik değerlerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Özay vd. [13], 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada hacimce %0-8 B_4C takviyesi içeren AA2024- B_4C kompozit yapıları sıcak presleme yöntemiyle üretmiş ve karakterize etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde yapı içerisinde hacimce

artan B_4C miktarı ile sertlik ve aşınma dayanımı özelliklerinin arttığını ortaya koymuşlardır. Özay ve Karlıdağ [14], 2021 yılında yapmış oldukları çalışmada AA-2024 ve B_4C kompozitlerin üretimini farklı presleme basınçlarında sıcak pres yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde artan presleme basıncı ile taneler arası gözeneklerin azaldığı ve buna bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışmada, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak yüksek B_4C (ağırlıkça %10, %20 ve %40 B_4C) partikül takviyesi içeren Al-Cu-Mg matrisli MMK'lerin yüksek öğütme hızı (400 dev/dk) kullanılan MÖ yöntemi ve 500 MPa basınç ve 560 °C sıcaklık parametreleri kullanılarak sıcak presleme yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma kapsamında kullanılan Al2024 alaşımı (ortalama partikül boyutu 212 μm) ve B_4C (ortalama partikül boyutu 126 μm) partiküller sırasıyla ABD'den Alfa Aesar ve Türkiye'den Nanografi isimli firmalardan temin edilmiştir. Şekil 1, Al (Şekil 1a) ve B_4C (Şekil 1b) partiküllere ait başlangıç morfolojilerini içermektedir.



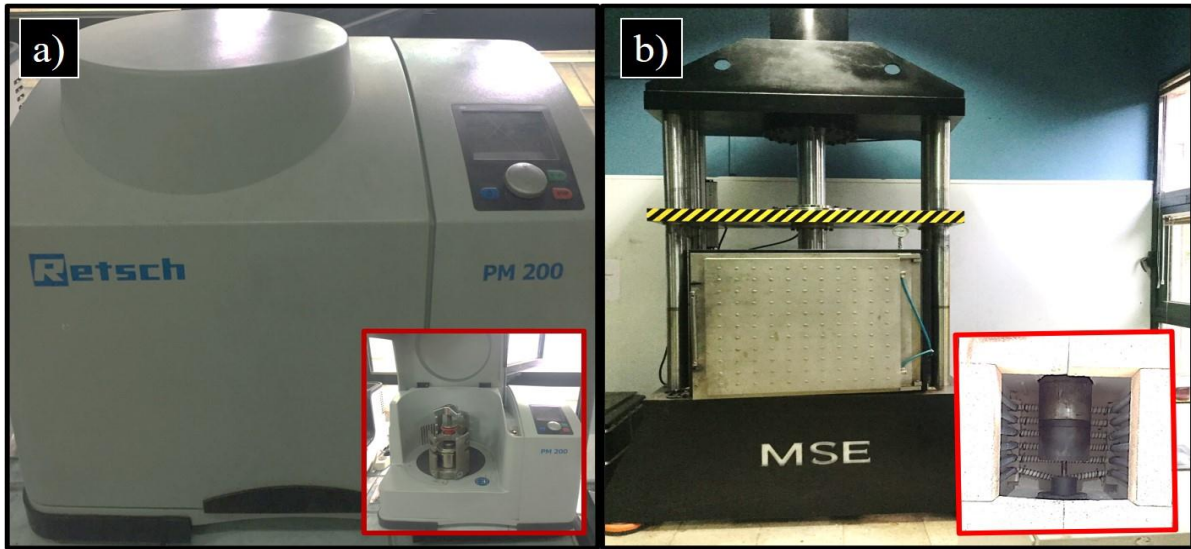
Şekil 1. Başlangıç morfolojilerine ait SEM görüntüleri; (a) Al ve (b) B_4C .

Şekil 1 incelendiğinde Al partiküllerin çubuk benzeri, B₄C partiküllerin ise düzensiz morfolojiye sahip oldukları açık bir şekilde anlaşılmaktadır. MÖ ve sıcak presleme (SP) yöntemleri kullanılarak üretilecek olan Al/B₄C kompozitlere ait üretim parametreleri Tablo 1’de yer almaktadır. MÖ işlemleri Retsch marka PM200 model bilyeli öğütücüde atmosfer koşullarında 5 saat süre ile gerçekleştirilmiştir.

MÖ işleminde tungsten karbür (WC) bilye, WC hazne ve proses kontrol ajanı olarak ağırlıkça %2 oranında metil alkol kullanılmıştır. SP işlemleri vakum atmosferinde gerçekleştirilmiştir. SP işlemleri için MSE marka zaman ayarlı ve vakumlu SP makinesi kullanılmıştır. MÖ ve SP işlemlerinin gerçekleştirildiği cihazlara ait görseller Şekil 2a ve b’de yer almaktadır. Kompozit numuneler 30 mm çapa sahip silindirik bir kalıp kullanılarak üretilmişlerdir. Üretilen kompozit ürünlerin nihai kalınlıkları 15 mm’dir. SP işlemi sonrasında üretimi tamamlanan nihai ürünlere ait makro görüntüler Şekil 3’te gösterilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, artan B₄C takviye oranı ile kompozit yapının daha koyu bir renk aldığı anlaşılmaktadır.

Tablo 1. Üretim parametreleri

Deney Kodu	MÖ			SP			
	Al (%ağ.)	B ₄ C (%ağ.)	Bilye:Toz Oranı (ağırlıkça)	Hız (dev/dk)	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Süre (saat)
Al/10B ₄ C	90	10					
Al/20B ₄ C	80	20	10:1	400	560	500	3
Al/40B ₄ C	60	40					



Şekil 2. (a) MÖ işlemlerinin gerçekleştirildiği MÖ makinesi ve (b) SP makinesi.



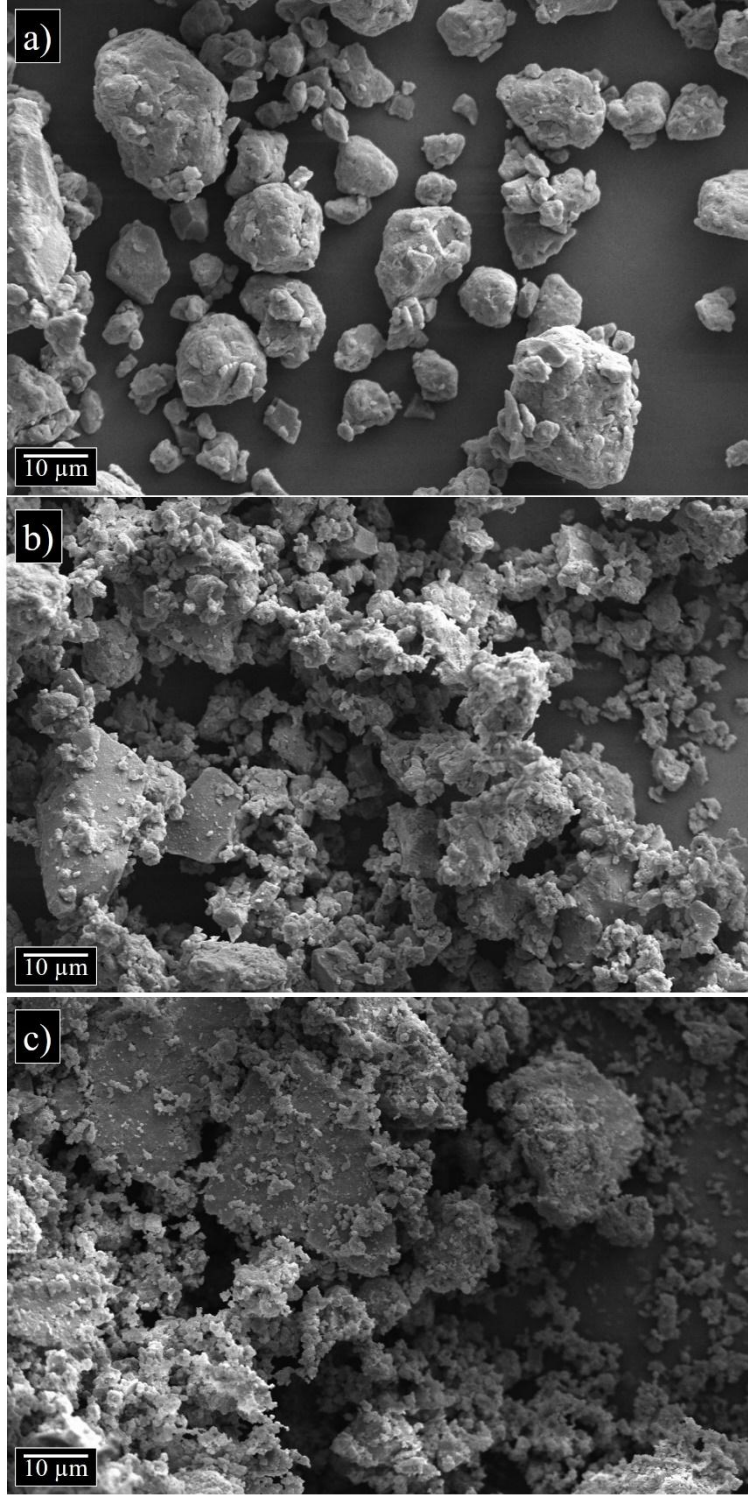
Şekil 3. Üretimi tamamlanan numunelere ait görseller; 30 mm çap ve 15 mm yükseklik.

MÖ yöntemi ile üretilen ve ağırlıkça farklı oranlarda B₄C içeriğine sahip Al/B₄C partiküllere ait morfoloji incelemeleri ile kompakt malzemelere ait mikroyapı incelemeleri Zeiss Evo LS10 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Partikül boyutu ölçümleri Malvern, MasterSizer 2000 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elementel analiz için X-ışını kırınımı desenleri PANalytical marka ve X'Pert³ Pro model X Işını kırınım cihazı kullanılarak, elementel haritalama görüntüleri ise Edax ApexTM Octane Elite EDS System kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri metalik malzemelerin Vickers sertlik testini tanımlayan ISO 6507-1:2018 [15] standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü deneyleri için Nemesis 9000 marka-model sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Her bir numune için doğrusal bir hat üzerinden üç farklı bölgeden sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümü yapılacak alan ile malzemenin kenarı arasındaki mesafe standarda uygun olarak en az 2,5 iz mesafesi uzaklık bırakılmıştır. Ayrıca yapılan ölçümlere ait ölçüm izleri aralarındaki mesafe en az 3 iz mesafesi uzaklık bırakılmıştır. Bu mesafeler ISO 6507-1:2018 standardında tanımlanan minimum ölçüm mesafelerine göre belirlenmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonrasında elde edilen deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmış ve ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Elektriksel iletkenlik ölçümü deneyleri Fischer marka, Sigmascope® model taşınabilir elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney numunesi için sertlik ölçümlerine benzer olarak elektriksel iletkenlik ölçümleri de üç farklı noktadan iletkenlik ölçümü yapılması ve aritmetik ortalamalarının alınması ile %IACS (Uluslararası tavlı bakır standardı) değeri olarak hesaplanmıştır. Yoğunluk ölçümleri Arşimet yoğunluk ölçümü prensibi doğrultusunda çözelti olarak saf su (yoğunluk: 1 gr/cm³) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Morfoloji ve Partikül Boyutu İncelemeleri

MÖ yöntemiyle üretilen ağırlıkça farklı B₄C takviye oranlarına (%10, 20, 40) sahip Al/B₄C partiküllere ait morfoloji incelemeleri Şekil 4'te yer almaktadır. Şekil 4.a incelendiğinde, başlangıç morfolojileri ve partikül boyutlarına göre matris ve takviye morfolojisinin değiştiği ve daha küçük boyutlu kompozit partiküllerin elde edildiği açık bir şekilde görülmektedir. Yapı içerisinde ağırlıkça artan B₄C partikül takviye oranı ile gerçekleştirilen MÖ işlemleri sonrasında (Şekil 4b-c) partikül boyutunun giderek azaldığı anlaşılmaktadır. Partikül boyutu ölçümü deneylerine ait partikül boyutu dağılım grafikleri Şekil 5'de gösterilmektedir. Morfoloji incelemeleriyle benzer olarak partikül boyutu dağılım grafikleri incelendiğinde de yapı içerisinde ağırlıkça artan B₄C takviye oranı ile üretilen kompozit partiküllere ait ortalama partikül boyutunun azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum sünek-gevrek öğütme işlemlerinde olağan olarak karşılaşılan bir durumdur. Sünek-gevrek öğütme sisteminde ilk olarak sünek parçacıklar deformasyona uğrar, kırılğan parçacıklar ise parçalanırlar. Ardından sünek parçacıklar kaynak yapmaya başlar ve öğütme sırasında meydana gelen çarpışmaların etkisiyle kırılğan parçacıklar sünek parçacıkların arasına girerler. Bu işlemin sonucunda kırılğan parçacıklar kaynaklanmış metal parçacıkların ara yüzey sınırlarına yerleşirler ve kompozit bir parçacık yapı oluştururlar. Öğütme işleminin devam etmesiyle bu işlemler tekrar tekrar gerçekleşir. Artan öğütme süreleri ile kırılğan parçacıklar sahip oldukları yüksek sertlik nedeniyle kesme etkisi ile sünek parçacıkların parçalanmasına da yol açarlar ve böylece artan öğütme süreleri ile incelmis ve küçülmüş yeni kompozit partiküllerin oluşumu sonucu ortaya çıkar [16,17]. Guo vd. 2019 yılında yapmış oldukları çalışmada [18] ağırlıkça %10, 30 ve 40 B₄C partikül takviyesi içeren Al/B₄C nano kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada farklı MÖ süreleri kullanmışlar ve deneyleri sonucunda artan takviye oranı ve artan MÖ süreleri ile elde edilen kompozit partiküllere ait ortalama partikül boyutlarının giderek azaldığını tespit etmişlerdir. Alihosseini vd. 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada [19], yüksek enerjili MÖ yöntemi ile ağırlıkça farklı B₄C takviyesi içeren (%1, 3 ve 5) Al/B₄C nano kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmanın sonucu olarak artan B₄C takviye oranı ve öğütme süresi ile partikül boyutunun azaldığını tespit etmişlerdir.

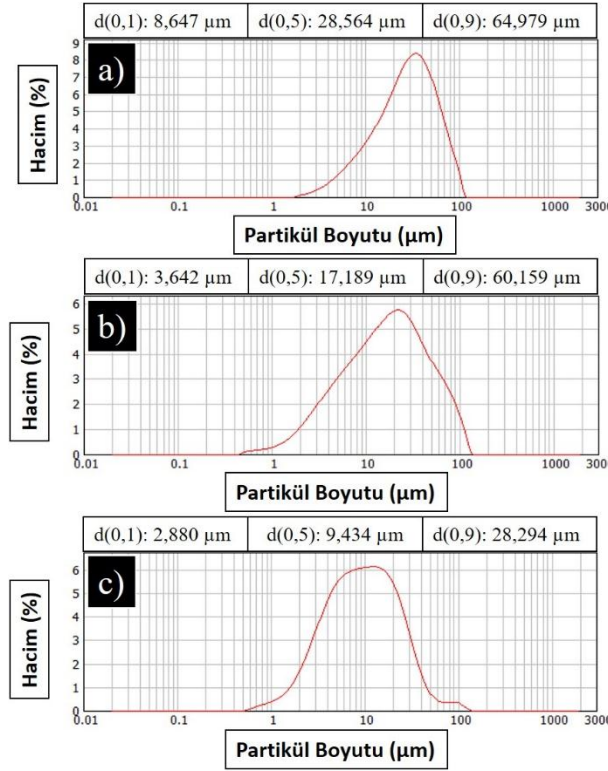


Şekil 4. MÖ sonrası elde edilen partiküllerin morfoloji incelemelerine ait SEM görüntüleri; (a) %10 B₄C, (b) %20 B₄C ve (c) %40 B₄C.

3.2. Mikroyapı ve Elementel Analiz

Şekil 6a-c, ağırlıkça farklı oranlarda (%10, 20, 40) B₄C takviyesi içeren ve SP yöntemi ile yoğunlaştırılma işlemine tabi tutulmuş kompakt numunelere ait mikro yapı görüntülerini içermektedir. Şekil 7a-c, kompakt malzemelere ait elementel haritalama görüntülerini içermektedir. Şekil 7a-c'de görüldüğü üzere elementel haritalama görüntülerinde de B₄C partiküllerinin yapı içerisinde homojen olarak dağılımı söz konusudur. Mikro yapı ve elementel haritalama

görüntülerinden anlaşılacağı üzere B₄C partiküller MÖ işleminin sağlamış olduğu homojen partikül elde etme üstünlüğü sayesinde yapı içerisinde homojen bir dağılıma sahiptir.

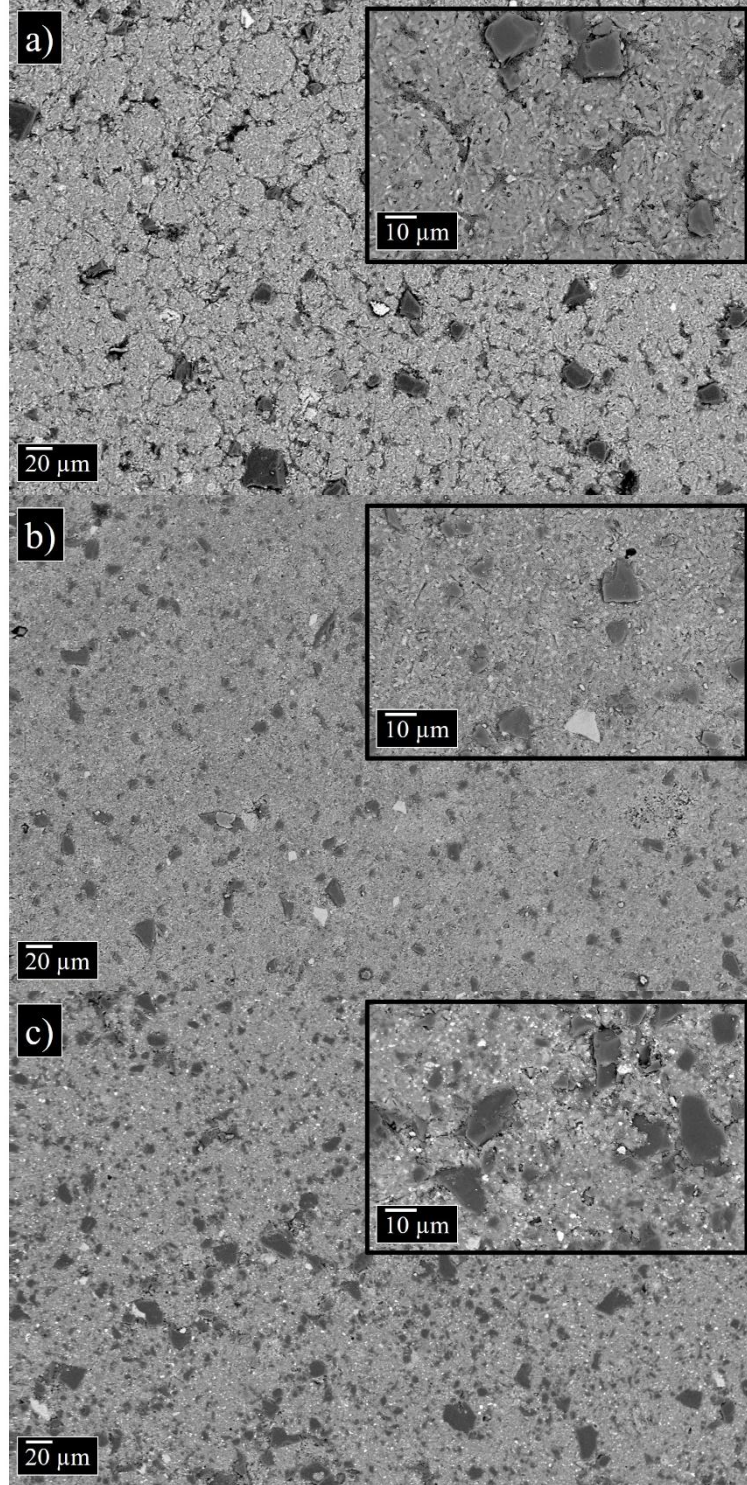


Şekil 5. MÖ işlemi sonrasında elde edilen farklı B₄C içeriğine sahip partiküllerin partikül boyutu dağılım grafikleri; (a) %10 B₄C, (b) %20 B₄C ve (c) %40 B₄C.

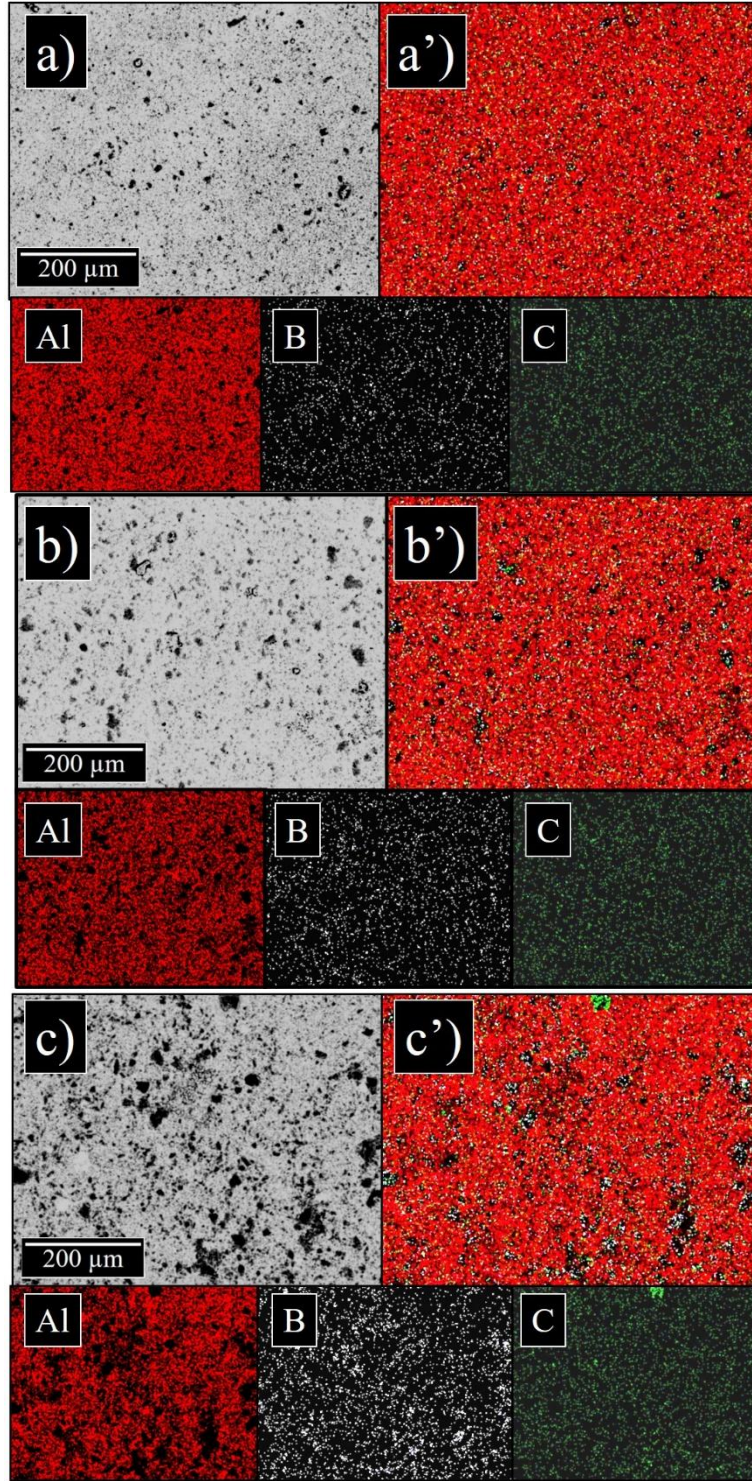
3.3. Yoğunluk

Şekil 8, Arşimet yoğunluk ölçüm prensibi doğrultusunda gerçekleşen deneysel yoğunluk ölçümü deney sonuçlarını göstermektedir. Matris (Al: 2,7 gr/cm³) ve takviye (B₄C: 2,52 gr/cm³) malzemelerine ait teorik yoğunluk değerleri dikkate alındığında yapı içerisinde ağırlıkça artan B₄C takviye oranı ile deneysel yoğunluğun azalması beklenmektedir. Yapılan ölçümler de bu şekilde sonuçlanmıştır ve deneysel yoğunluklar yapı içerisinde artan B₄C takviyesi ile azalmıştır. Yoğunluktaki azalmanın sebebi hem B₄C partiküllerin Al ile kıyaslandığında daha düşük yoğunluğa sahip olmaları hem de yapı içerisinde artan seramik takviye oranı ile yapı içerisinde gözenek oluşumunun artmasıdır. Şenel ve Gürbüz [20] yapmış oldukları çalışmada farklı partikül boyutlarına sahip (3,5 µm ve 20 µm) B₄C takviyesi ihtiva eden Al-B₄C kompozit malzemelerin etil alkol içerisinde bir çözelti haline getirilmesi ve daha sonra filtreleme ve kurutma işlemlerini takiben 650 MPa basınç altında 630 °C sinterleme sıcaklığında yoğunlaştırılması çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda artan takviye oranları ile yoğunluğun arttığını ve gözenek miktarının azaldığını raporlamışlardır. Ancak bu çalışmada bu durumun tam tersi bir durum söz konusudur. Bunun sebebi üretim yönteminin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. MÖ işleminde meydana gelen deformasyonlar sonucu ortalama partikül boyutu artan takviye oranıyla azalmaktadır fakat bu azalmayla birlikte uygulanan deformasyonun başka bir sonucu olarak hem matris hem de takviye malzemelerin sertlik değerleri artmaktadır. Artan sertlik değerleri de malzemelerin yoğunlaştırılabilirlik kabiliyetlerini azaltmaktadır. Benzer durumlar ile literatürde yer alan farklı çalışmalarda da karşılaşılmıştır. Hadi ve Paydar 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada [12], saf Al matris ile ağırlıkça farklı oranlarda B₄C partikül takviyesi kullanarak MMK üretimi çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde yapı içerisinde artan B₄C partikül takviyesi ile MMK yapıların yoğunluk ve bağıl yoğunluk değerlerinin oldukça azaldığını ortaya koymuşlardır. Sharma vd. 2019 yılında yapmış oldukları

çalışmada [21] hacimce %0, %0,5 ve %1 B₄C içeren AA6061-B₄C MMK malzemelerin yoğunluk değerlerinin artan B₄C takviye miktarı ile azaldığını ve porozite miktarının arttığını ortaya koymuşlardır. Nazık vd. 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada [22] Al7075-B₄C kompozitlerin MÖ yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde ağırlıkça %10 B₄C takviyeli yapıların yoğunluk değerlerinin 1 saate kadar yapılan MÖ işlemi ile arttığını ancak 2 saat ve üzeri öğütme süreleri sonrasında azaldığını ortaya koymuşlardır.



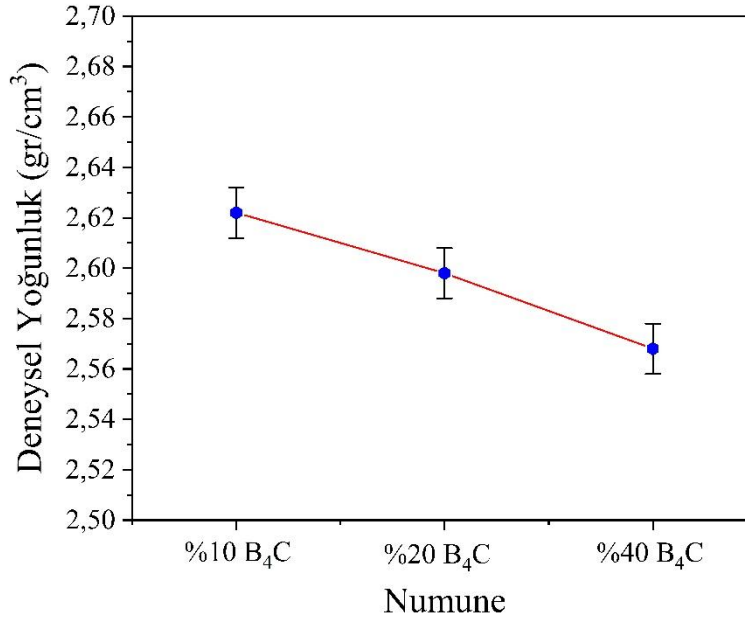
Şekil 6. Ağırlıkça farklı B₄C takviyesi içeren kompakt malzemelere ait mikroyapı görüntüleri; (a) %10 B₄C, (b) %20 B₄C ve (c) %40 B₄C.



Şekil 7. Ağırlıkça farklı B_4C takviyesi içeren kompakt malzemelere ait elementel haritalama görüntüleri; (a) %10 B_4C , (b) %20 B_4C ve (c) %40 B_4C .

Yine aynı çalışmada bu durumun açıklaması 1 saatlik öğütme süresine kadar küçük ve sünek partiküllerin boşlukları doldurabilmesi ile yoğunluğu arttırdığını ancak artan öğütme süreleri ile iş sertleşmesine maruz kalan partiküllerin sıkıştırılabilme kabiliyetlerinin azalması ve buna bağlı olarak sıkıştırma işleminin zorlaşması sonucunda yoğunluğun azalması şeklinde yapılmıştır. Sunil Ratna Kumar vd. 2019 yılında yapmış oldukları çalışmalarında [23] $Al_{20}B_{4}C-Gr$ MMK üretimi gerçekleştirmiş ve karakterizasyon çalışmalarını yürütmüşlerdir. Yapmış oldukları çalışma neticesinde B_4C takviyesi ile yoğunluk değerlerinin azaldığını ortaya koymuşlardır ve bu durumun

B₄C partiküllerin Al2024 ile kıyaslandığında daha düşük yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 8. Ağırlıkça farklı B₄C takviyesi içeren kompakt malzemelere ait deneysel yoğunluk ölçümü sonuçları.

3.4. Sertlik ve Elektriksel İletkenlik

Tablo 2 ve Tablo 3 sırasıyla ağırlıkça farklı B₄C içeriğine sahip kompakt numunelere ait sertlik ve elektriksel iletkenlik deneylerine ait deney sonuçlarını içermektedir. Tablo 2 incelendiğinde, artan B₄C takviyesi ile sertlik değerinin de arttığı açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Ayrıca üç farklı noktadan elde edilen sertlik değerleri incelendiğinde yapının farklı bölgelerinde birbirine çok yakın sertlik değerlerinin ölçüldüğü anlaşılmaktadır.

Tablo 2. Sertlik ölçümü deney sonuçları.

Malzeme	Deney-1 (HV/0,5)	Deney-2 (HV/0,5)	Deney-3 (HV/0,5)	Ortalama (HV/0,5)
Al2024+ %10 B ₄ C	242,47	248,17	242,37	244,34
Al2024+ %20 B ₄ C	266,19	271,83	272,45	270,16
Al2024+ %40 B ₄ C	287,01	292,69	292,40	290,70

Tablo 3. Elektriksel iletkenlik ölçümü deney sonuçları.

Malzeme	Deney-1 (% IACS)	Deney-2 (% IACS)	Deney-3 (% IACS)	Ortalama (% IACS)
Al2024+ %10 B ₄ C	20,4	20,6	21,2	20,73
Al2024+ %20 B ₄ C	13,6	13,4	14,1	13,7
Al2024+ %40 B ₄ C	7,1	6,8	7	6,97

Bu durum mikroyapı ve elementel analiz deneylerinde açıklandığı üzere yapı içerisinde homojen bir matris/takviye dağılımının olduğunu kanıtlamaktadır. Tablo 3 incelendiğinde, artan B₄C takviyesi ile elektriksel iletkenliğin düşmekte olduğu görülmektedir. Elektriksel iletkenlikteki düşüş seramik partiküllerin Al matrise göre düşük elektriksel iletkenliğe sahip olmaları ve yapı içerisinde ağırlıkça oranlarının artmasıyla doğal olarak elektriksel iletkenlik değerinin düşüşe uğraması şeklinde açıklanabilir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, MÖ işlemi ile Al/B₄C kompozit partiküller elde edilmiştir. Elde edilen kompozit partiküllerin morfolojileri ve partikül boyutları üzerine yapılan incelemeler başlangıç morfolojisinden farklı bir morfolojiye sahip olduklarını ve partikül boyutunun oldukça azaldığını göstermektedir. Partikül boyutu ölçümleri sonucunda elde edilen değerler ile MÖ yöntemi ile üretilen ağırlıkça farklı B₄C içeriğine sahip kompozit tozların ortalama partikül boyutlarının ağırlıkça artan B₄C takviye oranı ile azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yapı içerisinde artan B₄C takviyesi ile MÖ işleminin ardından gerçekleştirilen yoğunlaşma deneyleri sonucunda, artan B₄C takviyesi ile deneysel yoğunlukların azaldığı tespit edilmiştir. Yoğunluk değerlerinde meydana gelen bu azalmanın hem takviye malzemesinin düşük yoğunluğa sahip olması hem de takviye malzemenin yüksek sertliği sebebiyle artan takviye miktarı ile elde edilen kompozit numunenin şekillendirilebilme kabiliyetinin azalması ile açıklanabilir. Sertlik ölçümleri sonucunda yapı içerisinde ağırlıkça artan B₄C takviyesi ile sertlik değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. Bu durum beklenen bir durumdur ve B₄C takviye malzemenin sahip olduğu yüksek sertlik özelliği neticesinde ortaya çıkmıştır. Elektriksel iletkenlik ölçümleri sonucunda yapı içerisinde ağırlıkça artan B₄C takviyesi ile elektriksel iletkenlik özelliklerinin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. Elektriksel iletkenlik özelliğinin azalması hem seramik esaslı B₄C takviyenin yüksek elektriksel direnç göstermesi hem de yapı içerisinde yoğunlaşma kabiliyetinin azalması ile açıklanabilir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlara ek olarak üretilen malzemelere ait aşınma, çekme ve basma dayanımı özelliklerinin gelecek çalışmalarda incelenmesi ve yorumlanması da literatüre katkı sağlayacak bir öneri olarak sunulabilir. Ayrıca yapılan bu çalışma daha uzun öğütme süreleri ve farklı öğütme parametreleri kullanılarak elde edilebilecek sonuçlar için de bir referans teşkil etmekte ve bu çalışmaların yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü, FBA-2020-8478 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Bu çalışmanın yazarları, vermiş oldukları desteklerden ötürü KTÜ-BAP'a teşekkürlerini sunar.

Yazar(lar)ın Katkıları

SBA, deneysel çalışmalar, literatür çalışması ve makalenin yazımının gerçekleştirilmesine katkıda bulundu. TV, konu ve kapsamın belirlenmesi, özgün değer belirlenmesi, deneysel çalışmaların gerçekleştirilme yönergeleri ve makale metninin yazılması işlemlerinin gerçekleştirilmesine katkıda bulundu. OG, makalenin yazılması ve deney sonuçlarının yorumlanması işlemlerinin gerçekleştirilmesine katkıda bulundu. HCA, deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesine katkıda bulundu.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Mazzolani, F., Structural Applications of Aluminium in Civil Engineering, Structural Engineering International, 2006, 16, 280-285. <https://doi.org/10.2749/101686606778995128>.
- [2]. Akid, R., Gobara, M., Wang, H., Corrosion protection performance of novel hybrid polyaniline/sol-gel coatings on an aluminium 2024 alloy in neutral, alkaline and acidic

- solutions, *Electrochimica Acta*, 2011, 56, 2483-2492. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.12.032>.
- [3]. Zawawi, N., Azmi, W., Redhwan, A., Mohd Zaki, S., Coefficient of friction and wear rate effects of different composite nanolubricant concentrations on Aluminium 2024 plate, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 257. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/257/1/012065>.
- [4]. Chernyatin, A., Lopez-Crespo, P., Moreno, B., Matvienko, Y., Multi-approach study of crack-tip mechanics on aluminium 2024 alloy, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, 98. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.09.007>.
- [5]. Alizadeh, A., Taheri-Nassaj, E. and Baharvandi, H.R., Preparation and Investigation of Al4wt.%B4C Nanocomposite Powders using Mechanical Milling, *Bulletin of Materials Science*, 2011, 34, 1039-1048.
- [6]. Ravindranath, V.M., Shiva Shankar, G.S., Basavarajappa, S. and Siddesh Kumar, N.G., Dry Sliding Wear Behavior of Hybrid Aluminum Metal Matrix Composite Reinforced with Boron Carbide and Graphite Particles, *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(10), 11163- 11167.
- [7]. Şenel, M. C., Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilen Saf Al ve Al-B4C, Al-Al2O3 Kompozitlerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Karşılaştırılması, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2020, 10 (3) , 783-795 . <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.689359>
- [8]. İpek, R., Adhesive wear behaviour of B4C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/B4C–Al/SiC), *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162–163, 71-75. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.207>.
- [9]. Khakbiz, M. and Akhlaghi, F., Synthesis and structural characterization of Al–B4C nanocomposite powders by mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 479(1–2), 334-341. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.12.076>.
- [10]. Zhang, L., Wang, Z., Li, Q., Wu, J., Shi, G., Qi, F. and Zhou, X., Microtopography and mechanical properties of vacuum hot pressing Al/B4C composites. *Ceramics International*, 2018, 44 (3), 3048-3055. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.065>.
- [11]. Boopathi, S., Thillaivanan, A., Pandian, M., Subbiah, R., & Shanmugam, P, Friction stir processing of boron carbide reinforced aluminium surface (Al-B4C) composite: Mechanical characteristics analysis, *Materials Today: Proceedings*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.261>.
- [12]. Hadi, S., Paydar, M, Investigation on the properties of high pressure torsion (HPT) processed Al/B4C composite. *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, 2020, 53(2), 146-157, <https://doi.org/10.22059/jufgnsm.2020.02.06>
- [13]. Ozay, C., Ballikaya, H., Dagdelen, F. et al., Microstructural and wear properties of the Al-B4C composite coating produced by hot-press sintering on AA-2024 alloy, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35, 2895–2901, <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0613-1>
- [14]. Ozay C, Karlıdag O. Hot press sintering effects and wear resistance of the Al-B4C composite coatings of an AA-2024 alloy. *Materials Testing*. 2021, 63(12), 1150-1156, <https://doi.org/10.1515/mt-2021-0057>
- [15]. Designation, ISO, *Metallic Materials-Vickers Hardness Test-Part 1: Test Method*, 2018, Brussels: International Organization for Standardization.
- [16]. Wagih, A., Effect of milling time on morphology and microstructure of Al-Mg/Al2O3 nanocomposite powder produced by mechanical alloying, *International Journal of Advances in Engineering Sciences*, 2014, 4(2).
- [17]. Zhang, X., Yan, Q., Yang, C., Wang, T., Ge, C., Microstructure, mechanical properties and bonding characteristic of deformed tungsten, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, 43, 302–308.
- [18]. Guo, H., Zhao, Y., Xu, S., Li, J., Liu, N., Zhang, Y., Zhang, Z., Influence of high B4C contents on structural evolution of Al-B4C nanocomposite powders produced by high energy

- ball milling, *Ceramics International*, 2019, 45(5), 5436-5447, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.247>.
- [19]. Alihosseini, H., Dehghani, K., Kamali, J. Microstructure characterization, mechanical properties, compressibility and sintering behavior of Al-B4C nanocomposite powders, *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(9), 2126-2134. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.05.019>.
- [20]. Şenel, M. C. and Gürbüz, M., The Influence of Particle Size and Reinforcement Rate of B4C on Mechanical and Microstructure Properties of Al-B4C Composites, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2020, 8(3), 1864-1876 . <https://doi.org/10.29130/dubited.683876>
- [21]. Sharma, D., Sharma, M., Upadhyay, G., Boron Carbide (B4C) Reinforced Aluminum Matrix Composites (AMCs), *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, 9, 2194-2203, <https://doi.org/10.35940/ijitee.A4766.119119>.
- [22]. Nazik, C., Tarakçioğlu, N., Özkaya, S., Erdemir, F., Çanakçı, A., Determination of Effect of B4C Content on Density and Tensile Strength of AA7075/ B4C Composite Produced via Powder Technology, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2015, 251-254, <https://doi.org/10.18178/ijmmm.2016.4.4.266>.
- [23]. K. Sunil Ratna Kumar, Ch. Ratnam, B. Nagababu, Fabrication and Mechanical Behavior of Al 2024-B4C MMCs And Al 2024- B4C -Gr Hybrid Mmcs through Powder Metallurgy Technique, *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18(1), 219-229, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.295>.