

Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilen Saf Al ve Al-B₄C, Al-Al₂O₃ Kompozitlerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Karşılaştırılması

Comparison of Mechanical and Microstructure Properties of Al-B₄C and Al-Al₂O₃ Composites Fabricated by Powder Metallurgy Method

Mahmut Can ŞENEL*

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun

• Geliş tarihi / Received: 14.02.2020

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 12.06.2020

• Kabul tarihi / Accepted: 15.06.2020

Öz

Bu çalışmada, saf alüminyum, ağırlıkça farklı bor karbür (B₄C) veya alümina (Al₂O₃) katkı oranlarında (ağırlıkça %0, 1, 3, 6, 9, 12, 15, 30) Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Bor karbür veya alümina katkı oranının kompozitlerin gözenekliliğine, yoğunluğuna, Vickers sertliğine, basma dayanımına ve mikroyapısına olan etkisi incelenmiştir. Test sonuçlarına göre; en yüksek deneysel yoğunluk, Vickers sertliği ve basma dayanımı Al-%30B₄C (deneysel yoğunluk: 2.7 g/cm³, bağıl yoğunluk: %96.7, sertlik: 75 HV, basma dayanımı: 178 MPa) ve Al-%30Al₂O₃ (deneysel yoğunluk: 2.56 g/cm³, bağıl yoğunluk: %87.7, sertlik: 52 HV, basma dayanımı: 162 MPa) kompozit yapıda elde edilmiştir. Saf alüminyuma kıyasla Al-%30Al₂O₃ kompozitin sertliği %73.3 ve basma dayanımı %80; saf alüminyuma kıyasla Al-%30B₄C kompozitin sertliği %150 ve basma dayanımı %98 oranında artmıştır. Sonuç olarak, Al-B₄C kompozitlerin Al-Al₂O₃ kompozitlere göre hem mikroyapılarının daha yoğun olduğu hem de mekanik özelliklerinin daha üstün olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Alümina, Alüminyum, Bor Karbür, Mekanik Özellik, Toz Metalürjisi

Abstract

In this study, pure Al and Al-B₄C, Al-Al₂O₃ composites with various boron carbide (B₄C) or alumina (Al₂O₃) content (1, 3, 6, 9, 12, 15, 30wt.%) were fabricated by powder metallurgy method. The effect of the boron carbide or alumina reinforcement ratio on the porosity, density, Vickers hardness, compressive strength and microstructure of the composites was investigated. According to the test results, the highest experimental density, Vickers hardness, and compressive strength were obtained at Al-30%B₄C (experimental density: 2.7 g/cm³, relative density: 96.7%, hardness: 75 HV, compressive strength: 178 MPa) and Al-30%Al₂O₃ (experimental density: 2.56 g/cm³, relative density: 87.7%, hardness: 52 HV, compressive strength: 162 MPa) composite structure. The hardness and compressive strength of Al-30%Al₂O₃ were increased by 73.3% and 80% compared to pure aluminum. On the other hand, the hardness and compressive strength of Al-30%B₄C enhanced by 150% and 98% compared to pure aluminum. As a result, it has been determined that Al-B₄C composites have a denser microstructure and higher mechanical properties than Al-Al₂O₃ composites.

Keywords: Alumina, Aluminum, Boron Carbide, Mechanical Property, Powder Metallurgy

*Mahmut Can ŞENEL; mahmutcan.senel@omu.edu.tr; Tel: (0362) 312 19 19/1315; orcid.org/0000-0001-7897-1366

1. Giriş

Günümüzde yaşanan teknolojik gelişmeler neticesinde, hafif ve dayanımı yüksek kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Kompozit malzemeler, birden fazla malzemenin üstün özelliklerini birarada bulandıran matris ve takviye elemanından oluşan yeni bir malzeme grubudur. Kompozit malzemeler ana (matris) malzemeye göre; seramik, metal veya polimer matrisli kompozitler şeklinde sınıflandırılabilir. Metal matrisli kompozitlerde ana malzeme; metal (magnezyum, titanyum, bakır, alüminyum vb.) veya bir metal alaşımından oluşmaktadır. Takviye elemanı olarak ise; titanyum karbür, titanyum nitrür, alümina, silisyum karbür, silisyum nitrür, bor karbür ve bor nitrür gibi ileri teknoloji seramikler kullanılabilir (Öztop ve Gürbüz, 2018; Şahin, 2006; Şenel, vd. 2015).

Alüminyum, günümüzde yaygın olarak kullanılan demir dışı metallerden biri olup hafiflik, kolay şekillendirilebilirlik, iyi ısı ve elektrik iletkenliği gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu sebeple, otomotiv, imalat sanayi, uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Martinez vd., 2017). Saf alüminyum malzeme; 26.98 g/mol atom ağırlığına, oda sıcaklığında 2.7 g/cm³ teorik yoğunluğa, 237 W/(m²K) ısı iletkenliğe, 30 HV sertliğe ve 660 °C ergime sıcaklığına sahiptir (Şenel vd., 2017).

Seramik malzemeler arasında bor karbür (B₄C); 2400 °C ergime sıcaklığına, 441 GPa elastisite modülüne, 2.52 g/cm³ teorik yoğunluğa ve 3800 HV sertlik değerine sahiptir. Bor karbür; sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek dayanım, yüksek ısı iletkenlik ve iyi sönümleme kapasitesi sayesinde; elektronik-haberleşme ve uzay endüstrisinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Lillo, 2005; Alizadeh vd., 2011; Hu vd., 2001; Ravindranath vd., 2017). Diğer bir takviye elemanı olan alümina (Al₂O₃) sahip olduğu üstün refrakterlik özelliği, yüksek basma dayanımı ve yüksek sertlik sebebiyle; pompalarda, kesici takımlarda, sızdırmazlık elemanlarında, türbin yataklarında, bujilerde ve motor parçalarında tercih edilmektedir. Oda koşullarında alüminanın sertliği yaklaşık 200 HV, ergime sıcaklığı 2050 °C ve teorik yoğunluğu 3.98 g/cm³'tür (Srivastava ve Chaudhari, 2018; Kok, 2005).

Bor karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Yapılan bir çalışmada (Zhang vd., 2017), toz

metalürjisi yöntemiyle üretilen saf Al, Al-%15B₄C, Al-%20B₄C kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Saf alüminyuma kıyasla Al-%15B₄C ve Al-%20B₄C kompozitin çekme dayanımının %47 ve %60 oranında daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Yürütülen bir çalışmada (Ipekoglu vd., 2017), sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen Al-B₄C kompozitlerde bor karbür katkı oranının (ağırlıkça 0, 3, 5, 10%) ve sıkıştırma basıncının (P=0, 75, 150 MPa) kompozitin mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Test sonuçlarına göre; en iyi mekanik özellikler ağırlıkça %5 B₄C katkısında ve P=150 MPa sıkıştırma basıncında elde edilmiştir. Yürütülen diğer çalışmada (Pang vd., 2018), toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al6061 alaşımının ve Al-%12B₄C-%2.5Al₂O₃ kompozitlerin çekme dayanımı incelenmiştir. Al-%12B₄C-%2.5Al₂O₃ kompozitin Al6061 alaşımına oranla akma ve çekme dayanımının sırasıyla; %113 ve %246 oranında arttığı tespit edilmiştir. Yapılan bir çalışmada (Khademian vd., 2017), karıştırma-döküm yöntemiyle üretilen A356-3%B₄C kompozitlerde karıştırma sıcaklığının (700, 850, 950 °C) ve karıştırma süresinin (10, 15, 20 dk) kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. En uygun karıştırma sıcaklığı ve karıştırma süresi sırasıyla; 850 °C ve 15 dk olarak tespit edilmiştir. Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin araştırılması üzerine de literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Yapılan bir çalışmada (Parvin ve Rahimian, 2012), saf alüminyum matrise farklı partikül boyutlarında (3, 12 ve 48 µm) ağırlıkça %10 alümina katkısı yapılarak toz metalürjisi yöntemiyle Al-Al₂O₃ kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlere uygulanan mekanik testler neticesinde partikül boyutundaki azalışla birlikte kompozitin sertliği ve akma dayanımı artmıştır. Yürütülen çalışmada (Şenel ve Gürbüz, 2020), ağırlıkça %0-2.5 arasında mikron altı boyutlu alümina takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde soğuk deformasyon oranının (%1.9, 6.1, 11.8, 13, 23.5) kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. En iyi mekanik özellikler %2 alümina katkısında ve %11.8 soğuk deformasyon oranında elde edilmiştir. Yürütülen bir çalışmada (Ezatpour vd., 2016), toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al7075 matrisli nano alümina katkılı (ağırlıkça %0.4, 0.8, 1.2) kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir. En yüksek mekanik dayanım, Al7075-%0.4Al₂O₃ kompozit yapıda elde edilmiştir. Bu katkı oranından sonra, alümina partiküller topraklanmış olup kompozitlerin mekanik dayanımı düşmüştür. Bir diğer çalışmada (Srivastava ve Chaudhari, 2018), toz metalürjisi yöntemiyle

üretile nano alümina (ağırlıkça %1, 2, 3) takviyeli Al6061 kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Üretilen kompozitler arasında en yüksek mekanik dayanım Al6061-%2Al₂O₃ kompozit yapıda elde edilmiştir. Nano alümina takviyesiyle Vickers sertliği %76 ve akma dayanımı %81 oranında artmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların genel olarak bor karbür veya alümina katkı alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi üzerine olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, literatürde toz metalürjisiyle üretilen Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitlerde bor karbür veya alümina katkı oranının kompozitin mekanik ve mikroyapı özelliklerine olan etkisinin karşılaştırmalı ve kapsamlı bir şekilde incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Üretilen kompozit malzemeler, özellikle otomotiv ve imalat sektöründe kullanılmak üzere üretilmiştir. Bu çalışmayla, daha yüksek basma dayanımına ve daha yoğun bir mikroyapıya sahip alüminyum esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesini amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, saf Al ve ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 30 katkı Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozit yapılarında B₄C veya Al₂O₃ katkı oranının kompozitlerin deneysel yoğunluğuna, bağlı yoğunluğuna, gözeneklilik oranına, Vickers sertliğine, basma dayanımına ve mikroyapısına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

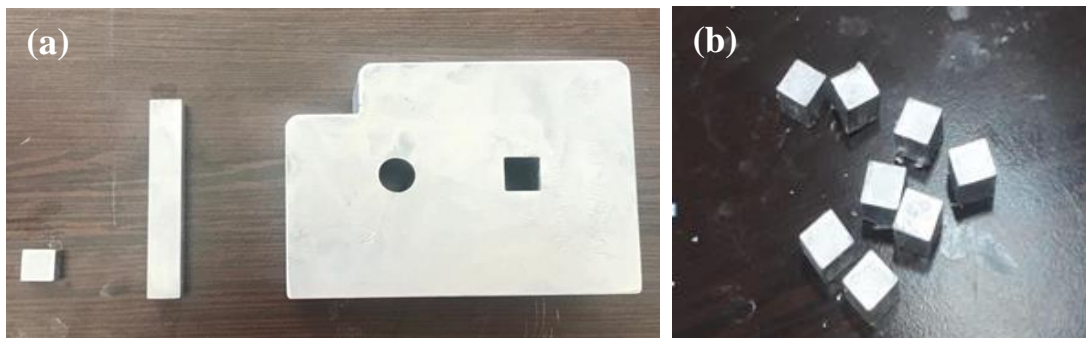
2.1. Materyal

Bu çalışmada, kompozit malzeme üretiminde kullanılan saf Al, B₄C ve Al₂O₃ tozları ticari olarak Alfa Aesar (İngiltere) firmasından temin edilmiştir. Matris (ana) malzeme olarak saf Al tozu, takviye elemanı olarak B₄C veya Al₂O₃ tozları kullanılmıştır. Kullanılan saf alüminyum tozu %99

saflıkta, 8-15 µm partikül boyut aralığına ve 2.7 g/cm³ teorik yoğunluğa sahiptir. Al-B₄C kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak kullanılan B₄C tozu, %98 saflığa, ortalama 20 µm partikül boyutuna ve 2.52 g/cm³ teorik yoğunluğa sahiptir. Benzer şekilde, Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozit malzeme üretiminde, takviye elemanı olarak kullanılan Al₂O₃ tozu %98 saflığa, 1-6 µm partikül boyut aralığına ve 3.97 g/cm³ teorik yoğunluğa sahiptir.

2.2. Yöntem

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle farklı B₄C/Al₂O₃ katkı oranlarında (ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 30) Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitler üretilmiştir. Toz partiküllerinin homojen bir şekilde karıştırılmasında ve dağıtılmasında alkol bazlı bir solüsyon olan etanol kullanılmıştır. İlk aşamada, saf Al ve B₄C/Al₂O₃ tozları ayrı ayrı etanol içerisinde 1 saat süresince ve 500 dev/dk hızda mekanik karıştırıcıyla karıştırılır. B₄C-etanol/Al₂O₃-etanol çözeltileri ayrı ayrı saf Al-etanol çözeltisine katılır. Bu işlem sonrasında, Al-B₄C-etanol veya Al-Al₂O₃-etanol karışımları yüksek enerjili bilyalı değirmende 6 saat süresince ve 500 dev/dk hızda karıştırma işlemine tabi tutulur. Karıştırma işleminde ağırlıkça toz/etanol oranı 1:5, ağırlıkça toz/alümina bilya oranı 1:4 olarak alınmıştır. Karıştırma işlemi sonrası, karışımdan etanolü uzaklaştırmak için karışım filtrelenir ve 12 saat süresince vakuma alınabilen bir etüvde 45-50 °C sıcaklıkta kurutma işlemine tabi tutulur. Kurutma işlemi sonrasında, Al-B₄C veya Al-Al₂O₃ toz karışımları herhangi bir bağlayıcı eleman eklenmeksizin paslanmaz çelik kalıp içerisinde tek eksenli preste 600 MPa basınç altında şekillendirilir. Presleme işlemi sonrasında Şekil 1'den görülebileceği üzere 10x10 mm kare kesitli ~5 mm kalınlığında ham kompozit numuneler üretilir. Şekillendirilen ham kompozit numuneler, 630 °C sıcaklıkta ve 3 saat süresince vakuma alınabilen bir tüp fırında (Protherm PTF 12/50/450) sinterleme işlemine tabi tutulur (Şenel ve Gürbüz, 2020).



Şekil 1. Paslanmaz çelik kalıp (a) ve üretilen ham kompozit numuneler (b)

Sinterlenen kompozitler, zımparalama ve parlatma cihazında 250, 1000, 2000 gritlik zımpara kağıtlarıyla zımparalandıktan sonra 1 µm'lik elmas solüsyon kullanılarak elmas çuha üzerinde parlatma işlemine tabi tutulur. Yüzeyi parlatılan kompozit numunelerin, Arşimet yoğunluk ölçüm cihazıyla deneysel yoğunlukları belirlenir. Yoğunluk değerleri en az beş yoğunluk ölçüm değerinin ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Deneysel yoğunluk (ρ_D), Eşitlik (1)'den faydalanılarak belirlenmektedir (German, 2007; Callister ve Rethwisch, 2014).

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_W \quad (1)$$

Bu eşitlikte, ρ_{su} suyun yoğunluğu (g/cm^3), m_D kompozitin suya doymuş kütlesi (g), m_K kompozitin kuru kütlesi (g) ve m_A ise kompozitin suda asılı kütlesidir (g).

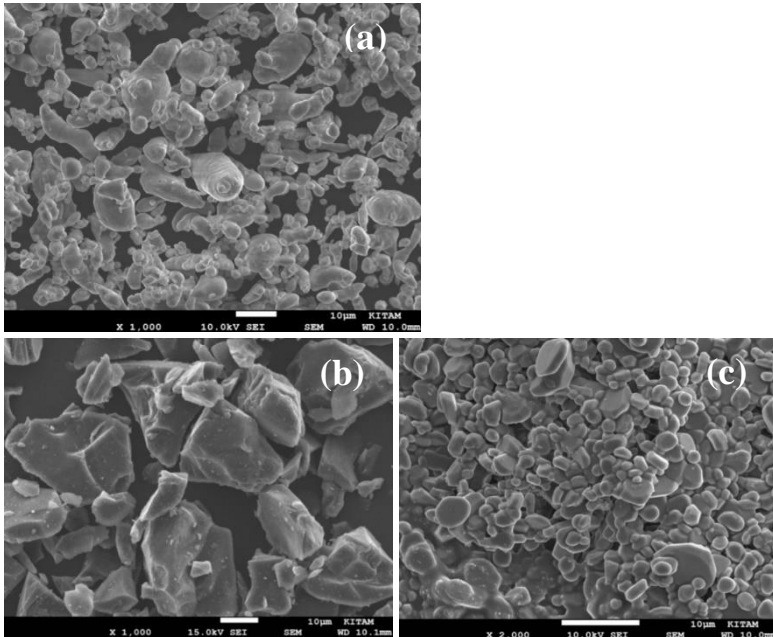
Kompozitlerin teorik yoğunluğu (ρ_T), Eşitlik (2) yardımıyla belirlenebilmektedir.

$$\rho_T = (\%m_{Al} \times \rho_{Al}) + (\%m_{B4C/Al2O3} \times \rho_{B4C/Al2O3}) \quad (2)$$

Bu eşitlikte, $\%m_{Al}$, $\%m_{B4C}$, ve $\%m_{Al2O3}$ sırasıyla; kompozit yapıdaki alüminyum, bor karbür ve alüminanın ağırlıkça %katkı oranıdır. Ayrıca, ρ_{Al} ($2.7 g/cm^3$), ρ_{B4C} ($2.52 g/cm^3$), ve ρ_{Al2O3} ($3.97 g/cm^3$) sırasıyla; alüminyum, bor karbür ve alüminanın teorik yoğunluklarıdır.

Üretilen kompozitlerin bağıl (relatif) yoğunlukları ($\% \rho$) aşağıdaki eşitlik kullanılarak belirlenebilmektedir.

$$\% \rho = (\rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (3)$$



◀ Şekil 2. Tozlara ait SEM görüntüleri: (a) saf alüminyum, (b) bor karbür ve (c) alümina

Kompozitlerdeki gözeneklilik oranı ($\%G$), Eşitlik (4)'den faydalanılarak belirlenebilmektedir.

$$\%G = (1 - \rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (4)$$

Kompozitlerin sertlik değeri, HV1000B mikro Vickers sertlik ölçme cihazıyla parlatılmış numune yüzeyine 15 s. süresince 200 g yük uygulanarak belirlenir. Kompozitlerin sertliği, en az 5 (beş) sertlik verisinin ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Kompozitlerin basma testleri, Mares tst-10t marka universal test makinesinde gerçekleştirilmiştir. Basma testinde; ön yük hızı 2 mm/dk, basma hızı 5 mm/dk ve ön yükleme 5 MPa olarak ayarlanmıştır. Üretilen kompozitlerin faz analizi 20-80° arasındaki kırınım açılarında Rigaku Smartlab model X-ışını kırınımı (XRD) cihazıyla, kırık yüzey içyapı analizi Jeol JSM 7001F model taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin içyapısında, seramik partiküllerin dağılımını gözlemlemek amacıyla SEM-EDX (taramalı elektron mikroskopu-enerji yayımlı X-ışını) analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında kullanılan tozlara ve üretilen kompozitlere ait faz analizleri, literatür çalışmalarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Ghasali vd., 2015; Al-Mosawi vd., 2017).

3. Bulgular ve Tartışma

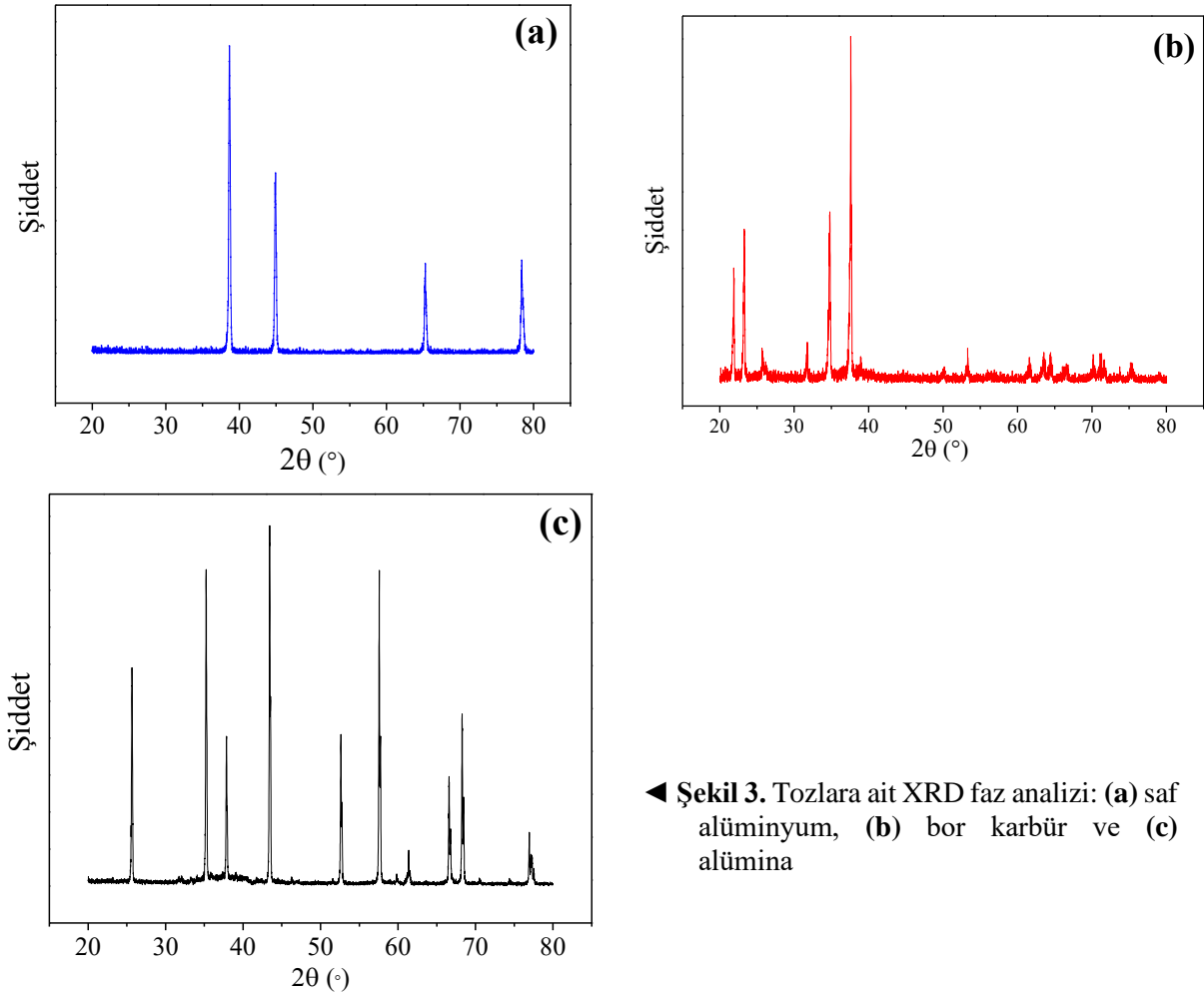
3.1. Tozların Karakterizasyonu

Saf alüminyum, bor karbür ve alümina tozlarına ait SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.

SEM görüntülerinden; saf alüminyum partiküllerin süngerimsi bir morfolojide olduğu, bor karbür partiküllerin keskin köşelere sahip düzensiz bir morfolojide olduğu, alümina partiküllerin ise küresele yakın bir morfolojide olduğu tespit edilmiştir. Saf alüminyum, bor karbür ve alümina partiküllerin, ortalama partikül boyutunun sırasıyla; $\sim 10 \mu\text{m}$, $\sim 20 \mu\text{m}$ ve $\sim 5 \mu\text{m}$ olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3'de saf alüminyum, bor karbür ve alümina tozlarına ait X-ışını kırınımı faz analizleri

verilmiştir. Saf alüminyum, bor karbür ve alümina tozlarına ait kırınım açılarının sırasıyla; $2\theta \sim 38^\circ$, 45° , 65° , 78° ; $2\theta \sim 22^\circ$, 23° , 26° , 32° , 35° , 38° , 39° , 50° , 54° , 62° , 64° , 65° , 67° , 70° , 72° , 74° , 75° , 78° ve $2\theta \sim 25^\circ$, 35° , 38° , 43° , 53° , 58° , 61° , 67° , 68° , 77° olduğu belirlenmiştir. Sinterleme sonrası kompozit malzemelerde oluşabilecek Al_4C_3 ($2\theta = 33, 41, 44, 56, 74^\circ$) gibi arafazların tespiti açısından tozların faz analizi son derece önem arz etmektedir (Ghasali vd., 2015; Al-Mosawi vd., 2017; Sharifi vd., 2012).



◀ Şekil 3. Tozlara ait XRD faz analizi: (a) saf alüminyum, (b) bor karbür ve (c) alümina

3.2. Kompozitlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Alümina (Al_2O_3) veya bor karbür (B_4C) takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin deneysel yoğunluğu (ρ), bağıl yoğunluğu ($\% \rho$), gözeneklilik oranı ($\%G$) ve Vickers sertliği ($\text{HV}0.2$) bu bölümde incelenmiştir. Genel durumu değerlendirmek amacıyla, Saf Al, Al- B_4C ve Al- Al_2O_3 kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo

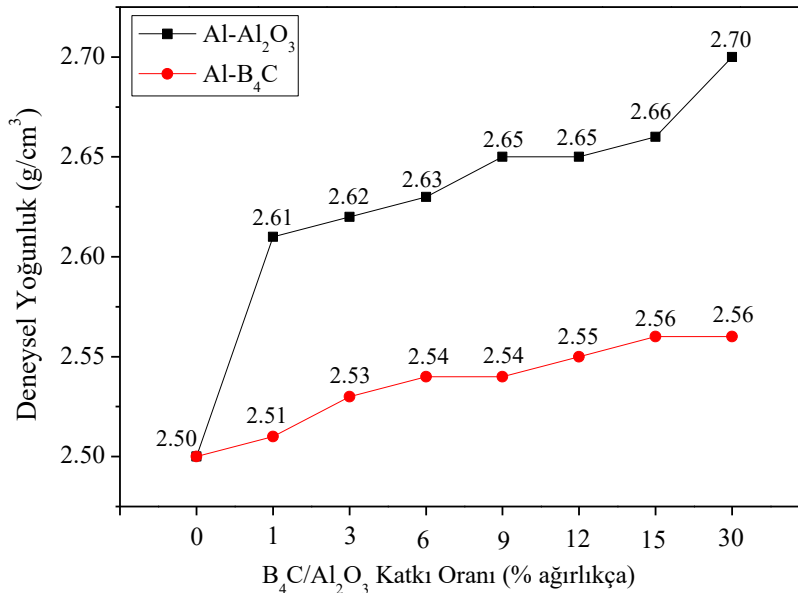
1'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde; artan katkı oranıyla birlikte bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin alümina takviyeli alüminyum esaslı kompozitlere kıyasla sertliğinin daha yüksek, gözeneklilik oranının ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini daha detaylı incelemek amacıyla çeşitli grafikler oluşturularak artış veya azalışlar analiz edilmiştir.

Tablo 1. Saf alüminyum, Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Malzeme	DeneySEL yoğunluk ρ (g/cm ³)	Bağlı (Relatif) yoğunluk (% ρ)	Gözeneklilik oranı (%G)	Vickers sertliği (HV0.2)
Saf Al	2.50	92.6	7.4	30
Al-%1Al ₂ O ₃	2.61	96.2	3.8	38
Al-%3Al ₂ O ₃	2.62	95.7	4.3	40
Al-%6Al ₂ O ₃	2.63	94.7	5.3	41
Al-%9Al ₂ O ₃	2.65	94.2	5.8	42
Al-%12Al ₂ O ₃	2.65	92.9	7.1	42
Al-%15Al ₂ O ₃	2.66	92.1	7.9	43
Al-%30Al ₂ O ₃	2.70	87.7	12.3	52
Al-%1B ₄ C	2.51	93.0	7.0	42
Al-%3B ₄ C	2.53	93.9	6.1	44
Al-%6B ₄ C	2.54	94.5	5.5	46
Al-%9B ₄ C	2.54	94.6	5.4	47
Al-%12B ₄ C	2.55	95.2	4.8	49
Al-%15B ₄ C	2.56	95.7	4.3	65
Al-%30B ₄ C	2.56	96.7	3.3	75

Saf Al, Al-Al₂O₃ ve Al-B₄C kompozitlerde B₄C/Al₂O₃ katkı oranıyla deneySEL yoğunluğun değişimi Şekil 4'de verilmiştir. En yüksek deneySEL yoğunluk, Al-%30Al₂O₃ (2.56 g/cm³) ve Al-%30B₄C (2.7 g/cm³) kompozit yapıda elde edilmiştir. Al-Al₂O₃ kompozitin deneySEL

yoğunluğunun Al-B₄C kompozitin deneySEL yoğunluğundan daha yüksek olması Al₂O₃ partiküllerin (3.97 g/cm³) B₄C partiküllere (2.52 g/cm³) göre daha yüksek teorik yoğunluğa sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

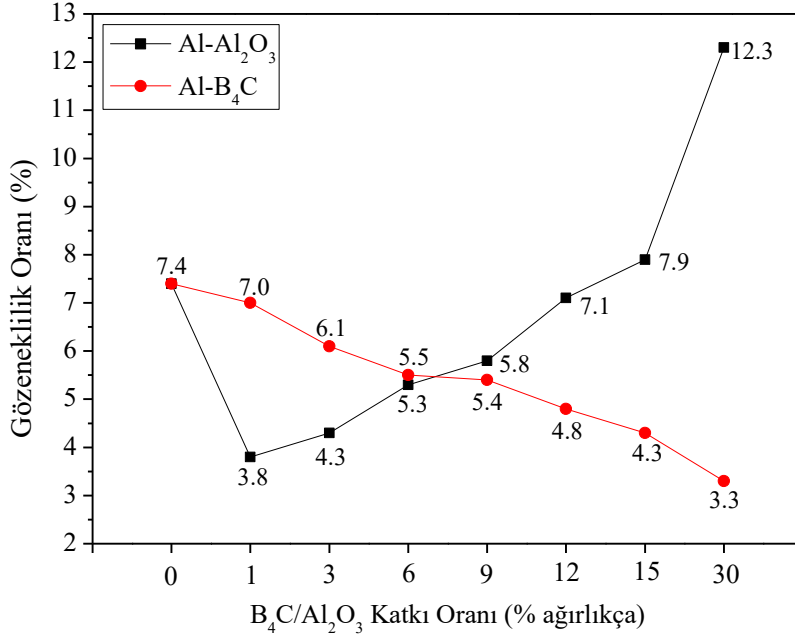
**Şekil 4.** Saf Al, Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitlerin deneySEL yoğunluğundaki değişim

Saf Al, Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitlerin B₄C/Al₂O₃ katkı oranıyla gözeneklilik oranındaki değişim Şekil 5'de verilmiştir. Üretilen kompozit yapılarında en düşük gözeneklilik oranı Al-%30B₄C

(%3.3) kompozit yapıda elde edilmiştir. Al-Al₂O₃ kompozit yapılar içerisinde ise en düşük gözeneklilik oranına Al%1Al₂O₃ (%3.8) kompozit yapıda ulaşılmıştır. Bu durum, takviye elemanı

olarak kullanılan alümina partiküllerin boyutunun oldukça küçük olması ve küçük boyutlu (1-6 µm) alümina partiküllerin topaklanma eğiliminin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Al-Al₂O₃ kompozitlerin deneysel yoğunluğu Al-B₄C kompozitlere göre yüksek olmasına karşın; genel

itibariyle bu kompozit yapıda gözeneklilik oranının daha düşük olduğu görülmüştür. Diğer bir ifadeyle kompozitin deneysel yoğunluğunun yüksek olması gözeneklilik oranının da yüksek olduğu anlamına gelmemektedir.



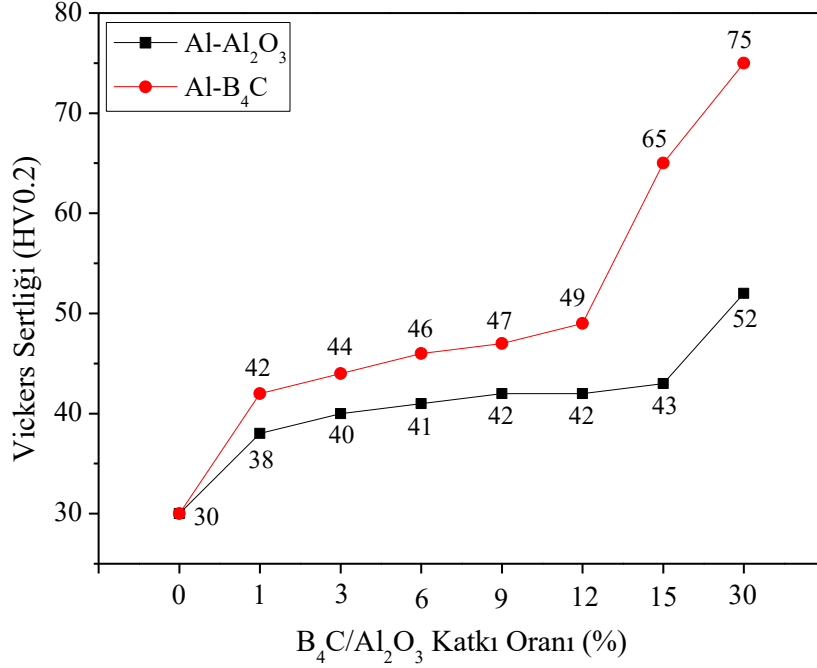
Şekil 5. Saf Al ve Al-B₄C, Al-Al₂O₃ kompozitlerin gözeneklilik oranındaki değişim

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen saf Al, Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitlere ait B₄C/Al₂O₃ katkı oranıyla Vickers sertliğindeki değişim Şekil 6'da verilmiştir. Sertlik sonuçlarına göre; saf alüminyuma (30 HV) oranla Al-%30B₄C (75 HV) kompozitin Vickers sertliği %150; saf alüminyuma (30 HV) oranla Al-%30Al₂O₃(52 HV) kompozitin Vickers sertliğinin %73.3 oranında arttığı tespit edilmiştir. Al-%30B₄C kompozitin sertliğinin Al-%30Al₂O₃ kompozitin sertliğine göre %44 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Alüminyum kompozit yapıya B₄C veya Al₂O₃ katkısıyla kompozitin sertliğinin arttığı görülmüştür. Bu durum, takviye elemanı olarak kullanılan bor karbür ve alümina partiküllerin sert seramik yapısından kaynaklanmaktadır.

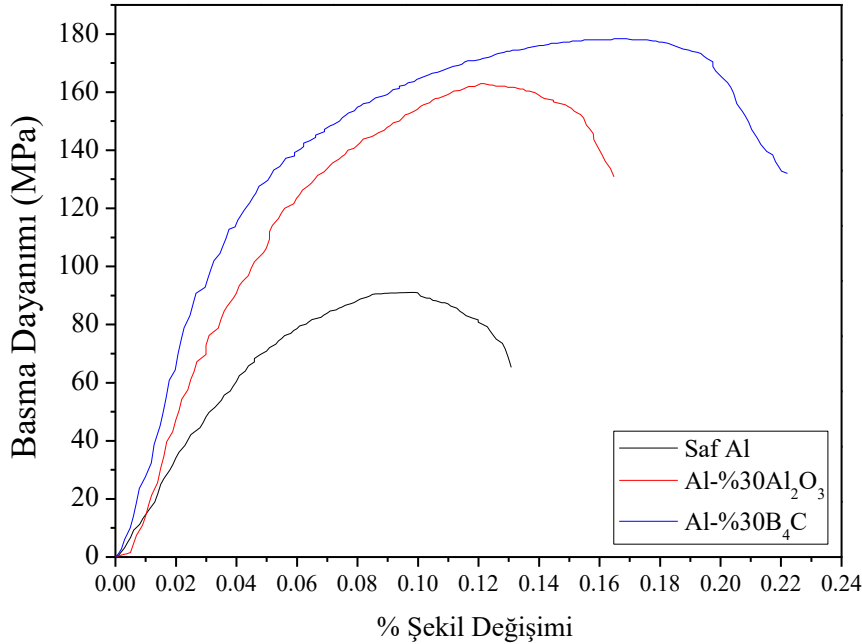
Saf alüminyum, Al-%30B₄C ve Al-%30Al₂O₃ kompozitlere ait basma test sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre; saf alüminyumun basma dayanımı yaklaşık 90 MPa iken; Al-%30Al₂O₃ ve Al-%30B₄C kompozitin basma dayanımı sırasıyla 162 MPa ve 178 MPa olarak belirlenmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-%30Al₂O₃ kompozitin sertliği saf alüminyuma kıyasla %80, Al-%30B₄C kompozitin

sertliği saf alüminyuma kıyasla %98 oranında artmıştır. Ağırlıkça aynı katkı oranında (%30) Al-B₄C kompozitin mekanik özelliklerinin Al-Al₂O₃ kompozitin mekanik özelliklerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, katkı elemanı olarak kullanılan bor karbürün alüminyuma oranla dayanımı daha yüksek bir malzeme olmasından ve mikroyapı içerisinde bor karbür partiküllerin alümina partiküllere oranla daha homojen dağılmasından kaynaklanmaktadır.

Metallerin veya kompozitlerin, plastik deformasyon sınırları içerisinde basma gerilmesi etkisiyle kopana kadar ya da deforme olana kadar depoladığı enerji de üretilen malzemenin tokluğunu ifade etmektedir. Saf Al, Al-%30B₄C ve Al-%30Al₂O₃ kompozitler incelendiğinde; en yüksek tokluğa sahip malzemenin Al-%30B₄C olduğu görülmektedir. Alüminyum matrise alümina veya bor karbür takviyesiyle alüminyum esaslı kompozitlerin hem basma dayanımının hem de tokluğunun arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca alüminyum matrise bor karbür katkısının alümina katkısına kıyasla kompozit malzemenin tokluğunu artırmada daha etkili bir takviye elemanı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Farklı katkı oranlarında Al-B₄C ve Al-Al₂O₃ kompozitlerin Vickers sertliğindeki değişim

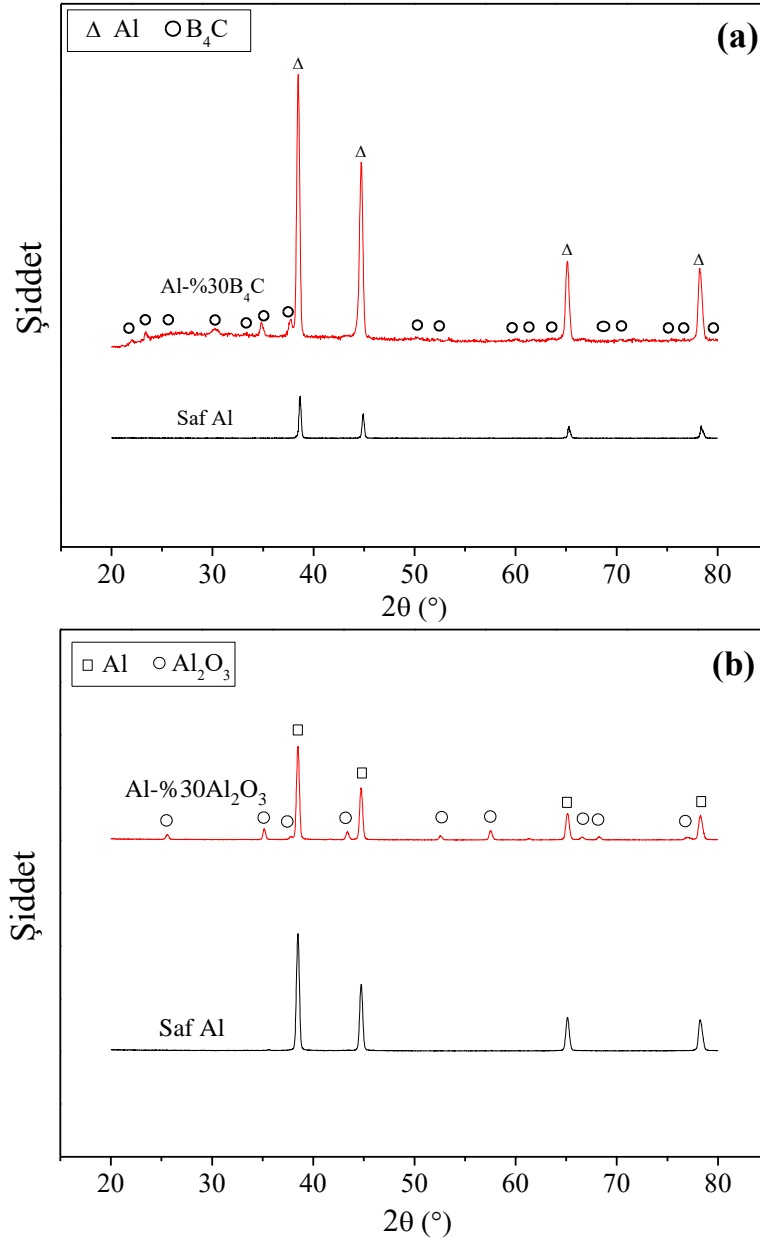


Şekil 7. Saf Al, Al-%30B₄C ve Al-%30Al₂O₃ kompozitlerin basma dayanımı

3.3. Kompozitlerin Faz ve Mikroyapı İncelemeleri

Kompozitlere ait faz analizi X-ışını kırınımı cihazıyla, kırık yüzey mikroyapı incelemeleri ise taramalı elektron mikroskopuyla incelenmiştir. Şekil 8a'da saf Al ve Al-%30B₄C kompozitlere ait XRD faz analizleri verilmiştir. Al-B₄C kompozitlere ait B₄C kırınım açılarının $2\theta \sim 22^\circ$, 23° , 26° , 32° , 35° , 38° , 39° , 50° , 54° , 62° , 64° , 65° , 67° , 70° , 72° , 74° , 75° , 78° olduğu belirlenmiş olup kompozit yapıda bor karbürün varlığı

doğrulanmıştır. Al-%30Al₂O₃ kompozitlere ait faz analizinden alümina kırınım açılarının $2\theta \sim 25^\circ$, 35° , 38° , 43° , 53° , 58° , 61° , 67° , 68° , 77° olduğu tespit edilmiş olup bu sayede mikroyapıda alüminanın yer aldığı doğrulanmıştır (Şekil 8b). Al-%30B₄C kompozitlere ait yürütülen faz analizinde; sinterlemenin etkisiyle alüminyum karbür (Al₄C₃) oluşumu gibi mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyebilecek herhangi bir ikincil faz oluşumuna rastlanmamıştır (Ghasali vd., 2015; Al-Mosawi vd., 2017; Sharifi vd., 2012).

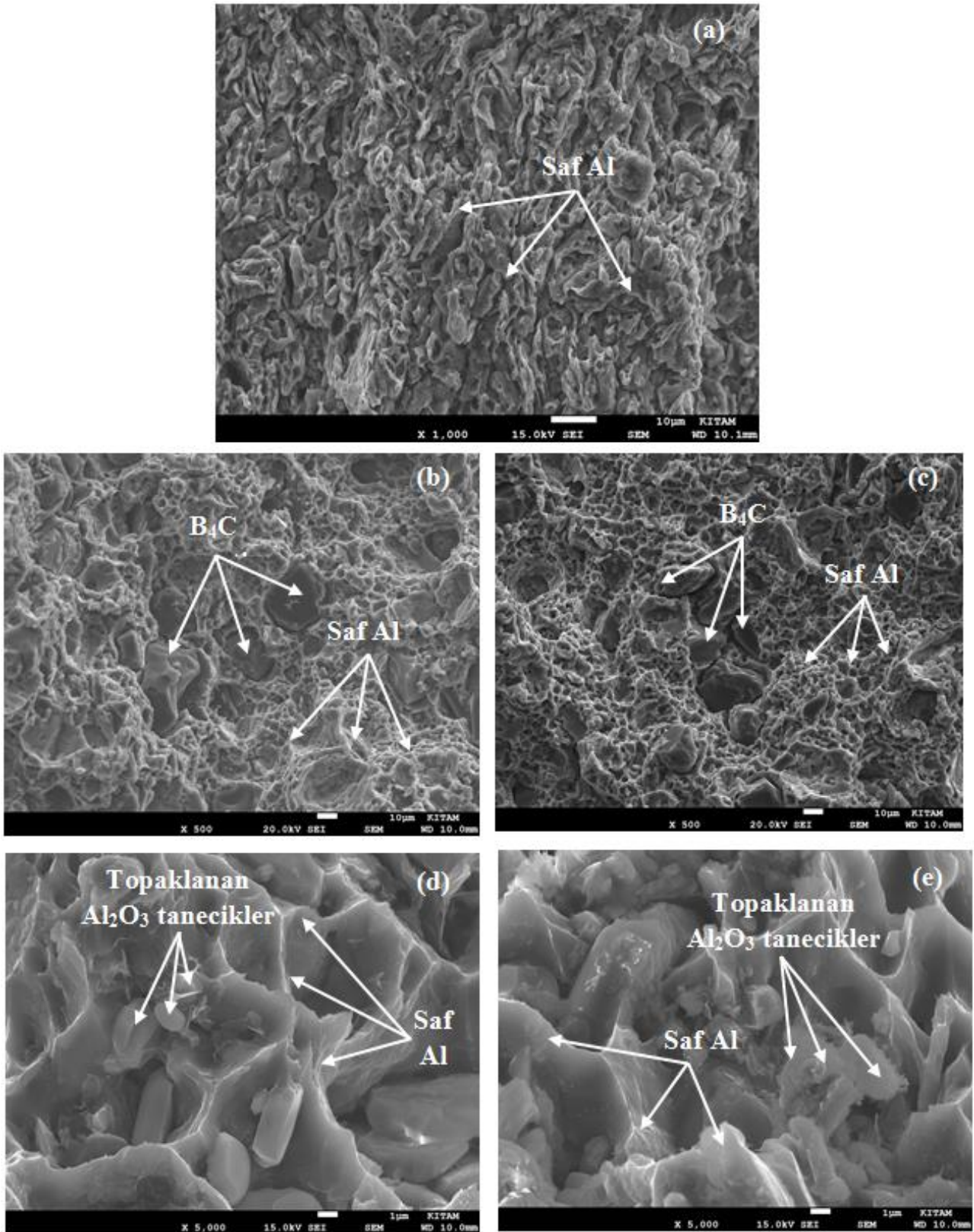


Şekil 8. Kompozitlere ait XRD faz analizleri: (a) saf Al, Al-%30B₄C ve (b) saf Al, Al-%30Al₂O₃

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen saf Al, Al-%15B₄C, Al-%30B₄C, Al-%15Al₂O₃ ve Al-%30Al₂O₃ kompozitlere ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Yapılan SEM incelemelerinden; Al-%15B₄C ve Al-%30B₄C kompozitlerin mikroyapılarının oldukça yoğun olduğu, alüminyum partiküllerin iyi bir şekilde boyun vererek sinterlendiği ve B₄C partiküllerin homojene yakın bir şekilde dağıldığı görülmüştür (Şekil 9(b-c)). Ayrıca kırık yüzey SEM görüntülerinden Al-%15Al₂O₃ ve Al-%30Al₂O₃ kompozitlere ait gözenek miktarının Al-%15B₄C ve Al-%30B₄C kompozitlerdeki gözenek miktarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9(d-e)). Bu durum, 1-6 µm partikül boyut aralığına sahip alümina partiküllerin topaklanmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.

Yürütülen mekanik testlerde, Al-%30Al₂O₃ kompozitlerin mekanik özelliklerinin Al-%30B₄C kompozitlere oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, SEM mikroyapı incelemeleriyle de doğrulanmaktadır.

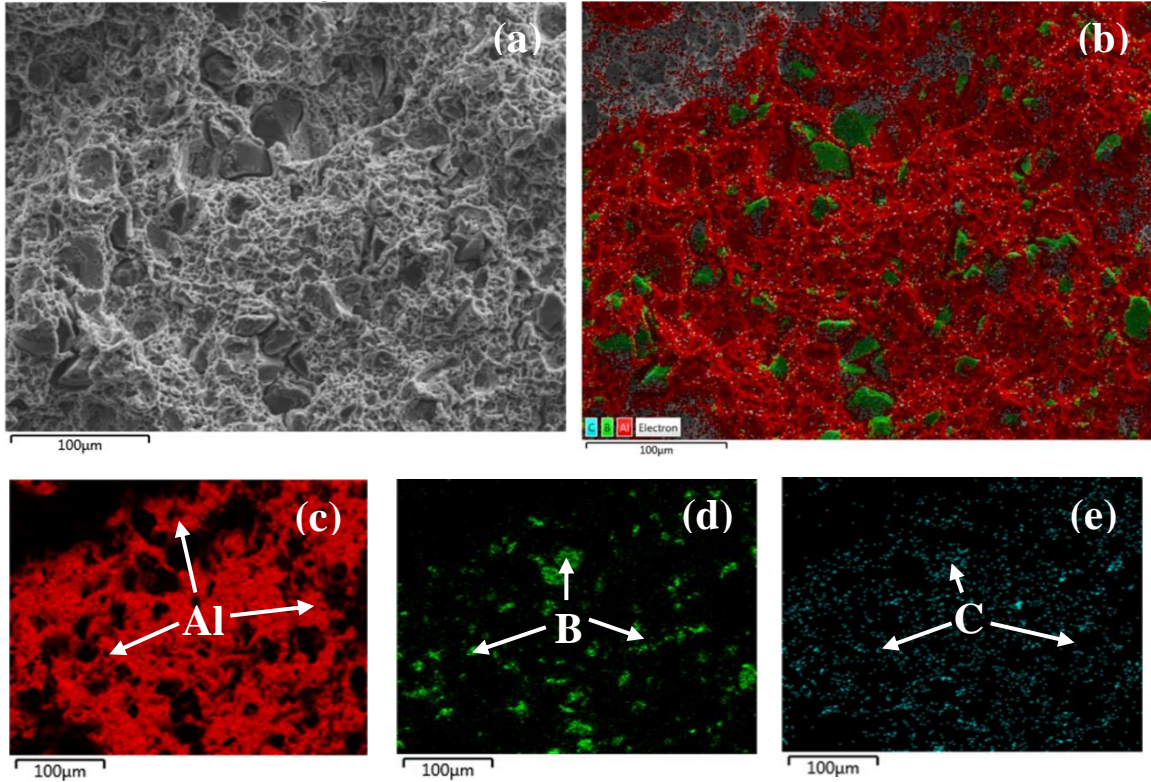
Şekil 10'da Al-%30B₄C kompozite ait SEM ve SEM-EDX haritalama görüntüsü verilmiştir. Şekil 10b'de yeşil renkle gösterilen bölgelerin bor karbür ve kırmızı renkle gösterilen bölgelerin ise alüminyum olduğu rahatlıkla görülebilmektedir. Alüminyum matrisli kompozit yapıda bor karbür partiküllerinin dağılımını göstermek amacıyla alüminyum (Al), bor (B) ve karbon (C) elementlerinin içyapıdaki dağılımı incelenmiştir (Şekil 10(c-e)).



Şekil 9. Kırık yüzey SEM görüntüleri: (a) saf Al, (b) Al-%15B₄C, (c) Al-%30B₄C, (d) Al-%15Al₂O₃ ve (e) Al-%30Al₂O₃

Yürütülen incelemeler neticesinde özellikle ağırlıkça %30 bor karbürün yer aldığı dağılımda herhangi bir şekilde topaklanmış bor karbür partiküllerine rastlanmamıştır. Bu durum da toz

metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-B₄C kompozitlerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.



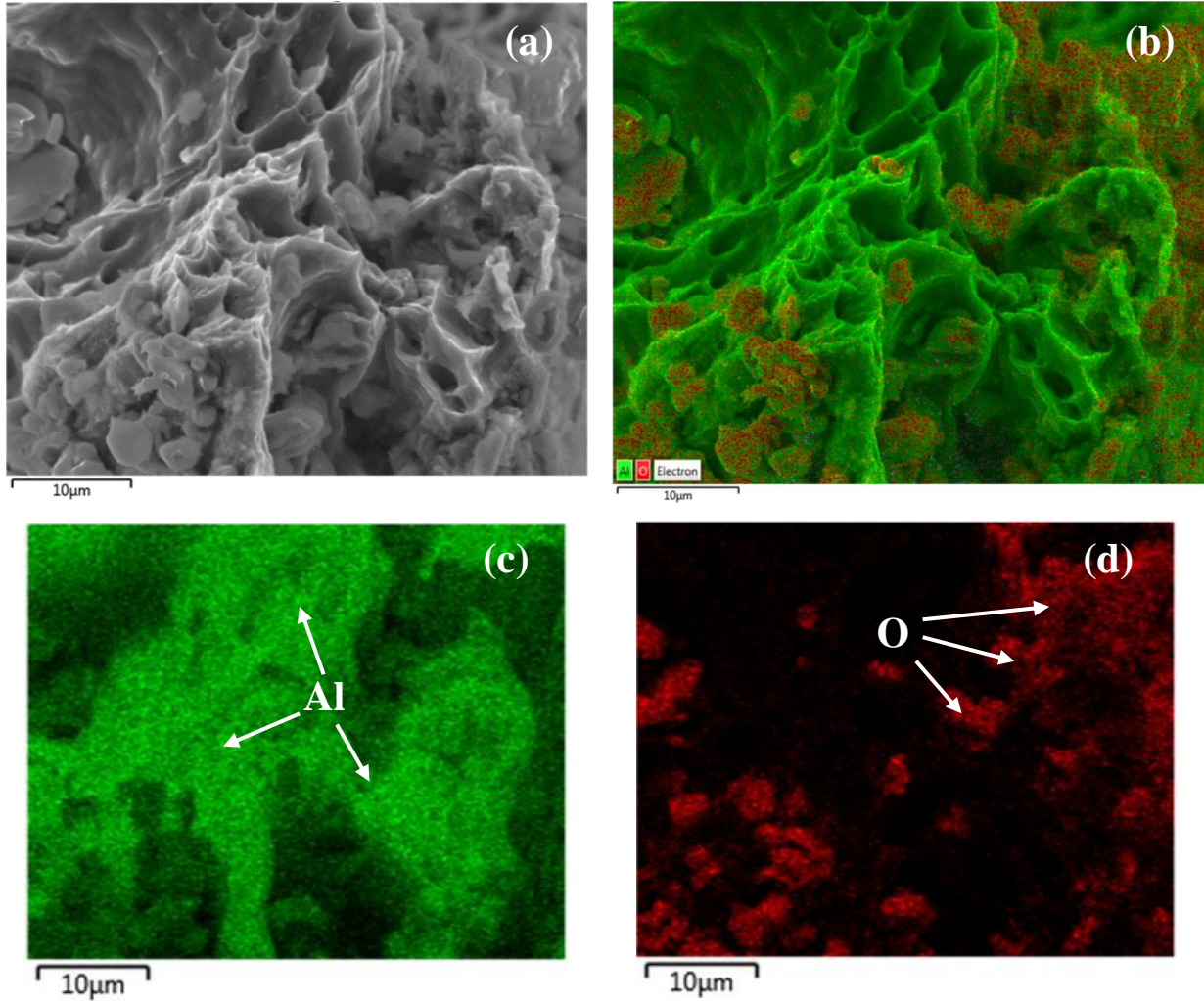
Şekil 10. Al-%30B₄C kompozitlere ait kırık yüzey SEM (a), SEM-EDX haritalama görüntüsü (b), iç yapıda alüminyum (c), bor (d) ve karbon (e) elementleri dağılımı

Al-%30Al₂O₃ kompozite ait kırık yüzey SEM ve SEM-EDX haritalama görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11a'daki SEM görüntüsünden de anlaşılacağı üzere alüminyum partiküllerin boyun vererek iyi bir şekilde sinterlendiği tespit edilmiştir. SEM-EDX görüntüsünden ise kırmızı renkle gösterilen bölgelerde oksijen elementinin yoğunlaştığı görülmüştür (Şekil 11b). Şekilde oksijen elementinin yoğunlaştığı bu bölge, alümina partiküllerinin varlığını işaret etmektedir. Al-%30B₄C kompozite ait kırık yüzey SEM-EDX haritalama analizi incelendiğinde ise alümina partiküllerinin belli bir bölgede topaklandığı görülmüştür (Şekil 11(c-d)). Bu yoğun topaklanma ise iç yapıda gözenek miktarının artmasına neden olmuştur. Yürütülen mekanik testler neticesinde, Al-%30Al₂O₃ kompozit yapıdaki gözeneklilik oranının bu derece yüksek olmasının sebebi de alümina partiküllerinin muhtemel topaklanması olarak görülmektedir. Ayrıca bu durum Al-Al₂O₃ kompozitlerin mekanik özelliklerinin Al-B₄C kompozitlerin mekanik özelliklerinden daha düşük olmasına sebep olmuştur.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, saf Al ve ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 30 katkı oranlarında Al-B₄C, Al-Al₂O₃ kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozit yapılar içerisinde en yüksek

deneysel yoğunluk, Vickers sertliği ve basma dayanımı Al-%30Al₂O₃ (deneysel yoğunluk: 2.56 g/cm³, bağıl yoğunluk: %87.7, sertlik: 52 HV, basma dayanımı: 162 MPa) ve Al-%30B₄C (deneysel yoğunluk: 2.70 g/cm³, bağıl yoğunluk: %96.7, sertlik: 75 HV, basma dayanımı: 178 MPa) kompozit yapılarda elde edilmiştir. Saf alüminyuma kıyasla Al-%30B₄C kompozitin sertliği %150, basma dayanımı %98; saf alüminyuma kıyasla Al-%30Al₂O₃ kompozitin sertliği %73.3 ve basma dayanımı %80 oranında artmıştır. SEM ve SEM-EDX mikroyapı incelemelerinden; alüminyum partiküllerin boyun vererek iyi bir şekilde sinterlendiği tespit edilmiştir. XRD faz analizi incelemelerinden ise; sinterlemenin etkisiyle mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyebilecek bir ikincil faz (Al₄C₃) oluşumuna rastlanmamıştır. Karşılaştırmalı mekanik testler neticesinde, Al-B₄C kompozitlerin sertliğinin, gözeneklilik oranının ve basma dayanımının Al-Al₂O₃ kompozitlerin sertliğinden, gözeneklilik oranından ve basma dayanımından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kompozitler plastik deformasyon sınırları içerisinde depoladığı enerji olan toklukları incelendiğinde; en yüksek tokluğa Al-%30B₄C kompozit yapıda ulaşılmıştır. Bu durum, Al-Al₂O₃ kompozit yapılarda 1-6 µm partikül boyut aralığına sahip alümina partiküllerin topaklanmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.



Şekil 11. Al-%30Al₂O₃ kompozitlere ait kırık yüzey SEM (a), SEM-EDX haritalama görüntüsü (b), içyapıda alüminyum (c) ve oksijen (d) elementleri dağılımı

Bu durumun aksine, Al-B₄C kompozit yapıda bor karbür partiküllerin homojene yakın bir şekilde dağıldığı ve bu dağılımın Al-B₄C kompozitlerin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

Al-Mosawi, B.T., Wexler, D. ve Calka, A., 2017. Characterization and Mechanical Properties of α -Al₂O₃ Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites, Synthesized via Uniball Magneto-Milling and Uniaxial Hot Pressing. *Advanced Powder Technology*, 28, 3, 1054-1064.

Alizadeh, A., Taheri-Nassaj, E. ve Baharvandi, H.R., 2011. Preparation and Investigation of Al-4wt.%B₄C Nanocomposite Powders using Mechanical Milling. *Bulletin of Materials Science*, 34, 1039-1048.

Callister, W.D. ve Rethwisch, D.G., 2014. *Materials Science and Engineering*, John Wiley&Sons, Inc., USA, 215p.

Ezatpour, H.R., Torabi Parizi, M., Sajjai, S.A., Ebrahimi, G.R. ve Chaichi, A., 2016. Microstructure, Mechanical Analysis and Optimal Selection of 7075 Aluminum Alloy Based Composite Reinforced with Alumina Nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 178, 119-127.

German, R.M., 2007. *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri* (Çev. Türk Toz Metalurjisi Derneği), Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, ISBN: 975-924-632-5, Ankara, 574s.

Ghasali, E., Alizadeh, M., Ebadzadeh, T., Pakseresh, A.H. ve Rahbar, A., 2015. Investigation on Microstructural and Mechanical Properties of B₄C-Aluminum Matrix Composites Prepared by Microwave Sintering. *Journal of Materials Research and Technology*, 4, 4, 411-415.

Hu, H.M., Lavernia, E.J., Harrigan, W.C., Kajuch, J. ve Nutt, S.R., 2001. Microstructural Investigation on B₄C/Al-7093 Composite. *Materials Science and Engineering: A*, 297, 1-2, 94-104.

- Ipekoglu, M., Nekouyan, A., Albayrak, O. ve Altintas, S., 2017. Mechanical Characterization of B₄C Reinforced Aluminum Matrix Composites Produced by Squeeze Casting. *Journal of Materials Research*, 32, 599-605.
- Khademian, M., Alizadeh, A. ve Abdollahi, A., 2017. Fabrication and Characterization of Hot Rolled and Hot Extruded Boron Carbide (B₄C) Reinforced A356 Aluminum Alloy Matrix Composites Produced by Stir Casting Method. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70, 6, 1635-1646.
- Kok, M., 2005. Production and Mechanical Properties of Al₂O₃ Particle-Reinforced 2024 Aluminium Alloy Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 161, 381–387.
- Lillo, T.M., 2005. Enhancing Ductility of Al6061+10wt.%B₄C through Equal-Channel Angular Extrusion Processing. *Materials Science and Engineering: A*, 410-411, 443-446.
- Martinez, V.P, Torres, J.T. ve Valdes, A.F., 2017. Recycling of Aluminum Beverage Cans for Metallic Foams Manufacturing. *Journal of Porous Materials*, 24, 707–712.
- Öztop, B. ve Gürbüz, M., 2018. Investigation of Properties of Composites Produced from Waste Aluminum with Si₃N₄ Reinforcement. *Technological Applied Sciences*, 13, 1, 57-66.
- Pang, X., Xian, Y., Wang, W. ve Zhang, P., 2018. Tensile Properties and Strengthening Effects of 6061 Al/12wt%B₄C Composite Reinforced with Nano-Al₂O₃ Particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 768, 476-484.
- Parvin, N. ve Rahimian, M., 2012. The Characteristics of Alumina Particle Reinforced Pure Al Matrix Composite. *Acta Physica Polonica A*, 121, 1, 108-110.
- Ravindranath, V.M., Shiva Shankar, G.S., Basavarajappa, S. ve Siddesh Kumar, N.G., 2017. Dry Sliding Wear Behavior of Hybrid Aluminum Metal Matrix Composite Reinforced with Boron Carbide and Graphite Particles. *Materials Today: Proceedings*, 4, 10, 11163-11167.
- Sharifi, E.M., Enayati, M.H. ve Karimzadeh, F., 2012. Fabrication and Characterization of Al-Al₄C₃ Nanocomposite by Mechanical Alloying. 2nd International Conference on Ultrafine Grained&Nanostructured Materials (UFGNSM) *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, 5, 480–487.
- Srivastava, N. ve Chaudhari, G.P., 2018. Microstructural Evolution and Mechanical Behavior of Ultrasonically Synthesized Al6061-Nano Alumina Composites. *Materials Science&Engineering A*, 724, 199-207.
- Şahin, Y., 2006. *Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayınevi, Ankara*, 436s.
- Şenel, M.C., Gürbüz, M. ve Koç, E., 2015. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 56, 669, 36-47.
- Şenel, M.C, Gürbüz, M. ve Koç, E., 2017. Grafen Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 8, 974-978.
- Şenel, M.C. ve Gürbüz, M., 2020. Mikron Altı Boyutlu Alümina Katkısının ve Soğuk Deformasyon İşleminin Üretilen Alüminyum Kompozit Yapının Mekanik Özellikleri ve Mikroyapısına etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10, 1, 76-85.
- Zhang, L., Shi, J., Shen, C. ve Zhou, X., 2017. B₄C-Al Composites Fabricated by the Powder Metallurgy Method. *Applied Sciences*, 7, 1009, 1-14.