

Al7075-Al₂O₃ Kompozitlerin Toz Metalürjisi ve Sıcak Preslemeyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Elif Işık¹ , Aleyna Taşkın² , Mahmut Can Şenel² 

¹Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Sivas

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Samsun

Geliş Tarihi / Received Date: 22.02.2024

Kabul Tarihi / Accepted Date: 30.09.2024

Öz

Bu çalışmada, ağırlıkça farklı oranlarda (%1, 3, 6, 9, 12, 15) alümina (Al₂O₃) içeren Al7075 alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen numunelerin mikroyapısı, yoğunluğu, gözeneklilik oranı, sertliği ve basma dayanımı incelenmiştir. Çalışma sonucunda artan alümina takviyesinin belli bir orana kadar (ağırlıkça %12) kompozitin mekanik özelliklerini arttırdığı görülmüştür. En yüksek yoğunluğa (2.7 g cm⁻³), sertliğe (170±2 HV), basma dayanımına (471±6 MPa) ve en düşük gözeneklilik oranına (%8.2) Al7075-%12Al₂O₃ kompozitte erişilmiştir. Ancak ağırlıkça %15 alümina takviye oranında alümina partiküllerinin topaklanmasından kaynaklı olarak mekanik özelliklerde düşüş görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Al7075 alaşımı, alümina, toz metalürjisi, kompozit, mekanik özellik

Investigation of the Mechanical Properties and Fabrication of Al7075-Al₂O₃ Composites by Powder Metallurgy and Hot Pressing

Abstract

In this work, the fabrication and characterization of Al7075 aluminum matrix composites with different weight ratios (1, 3, 6, 9, 12, 15wt.%) of alumina (Al₂O₃) contents were carried out. The microstructure, density, porosity rate, hardness, and compressive strength of the samples were examined which were fabricated via the powder metallurgy and induction hot pressing methods. As a result of the study, it was seen that an increase in alumina reinforcement positively affected the microstructure and mechanical properties of the composite up to a certain rate (12% by weight). The highest density (2.7 g cm⁻³), hardness (170±2 HV), compressive strength (471±6 MPa), and lowest porosity rate (8.2%) were achieved in the Al7075-12%Al₂O₃ composite. However, a decrease in mechanical properties was observed at 15wt.% alumina reinforcement due to the agglomeration of alumina particles.

Keywords: Al7075 alloy, alumina, powder metallurgy, composite, mechanical property

Giriş

Alüminyum ve alaşımları, düşük ağırlık, yüksek özgül dayanım, düşük maliyet, kolay şekillendirilebilme, yüksek termal ve ısı iletkenlik gibi özellikleri sayesinde en çok tercih edilen malzeme gruplarından birini oluşturmaktadır (Li vd., 2023). Özellikle Al7075 alüminyum alaşımı, yüksek mukavemet ve tokluk değerleriyle araştırmacıların ilgisini çekmekte olup metal matrisli kompozit malzemelerde sıklıkla matris elemanı olarak tercih edilmektedir (Devaganesh vd., 2020). Aynı zamanda hafif bir malzeme olan bu alaşım, başta yapısal parçalar olmak üzere füze parçaları, motor gövdesi, uçak bağlantı parçaları, savunma ekipmanları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır (Mandal vd., 2018).

Al7075 alüminyum alaşımının yapısına ilave edilen seramik (alüminyum oksit (Al_2O_3), zirkonyum dioksit (ZrO_2), silisyum nitrür (Si_3N_4), bor karbür (B_4C), titanyum karbür (TiC), tungsten karbür (WC), silisyum karbür (SiC)) ve karbon bazlı malzemeler (grafit, grafen ve karbon nanotüp) sayesinde kompozitlerin mekanik, tribolojik, termal, elektriksel ve kimyasal özellikleri arttırabilmektedir. (Menachery vd., 2023). Bu malzemeler arasında alümina; yüksek aşınma dayanımı, yüksek sertlik, yüksek korozyon dayanımı, yüksek ergime sıcaklığı gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca alümina, kolay temin edilebilen düşük maliyetli bir malzemedir (Heimann, 2010; Matori vd., 2012).

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde sürtünme karıştırma (Dressler vd., 2009), karıştırmalı döküm (Mohan vd., 2023), toz metalürjisi (Wang vd., 2024), sıkıştırılmalı döküm (Pragathi ve Elansehian, 2023), infiltrasyon (Yang vd., 2024) ve plazma püskürtme (Xu vd., 2023) gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Karmaşık geometrilerin nihai şekle yakın olarak üretilmesini sağlayan toz metalürjisi yöntemi metal matrisli kompozit üretiminde oldukça sık tercih edilmektedir (Sheraf ve Darius Gnanaraj, 2023). Toz metalürjisi yöntemi, toz formundaki malzemelerin çeşitli işlem basamaklarından (karıştırma, şekillendirme ve sinterleme) geçirilmesiyle parça üretimini amaçlamaktadır. Özellikle küçük boyutlu, yüksek maliyetli ve karmaşık şekilli parçalarda yüksek yüzey kalitesiyle üretim yapılabilmesini sağlamaktadır (Reza Akbarpour vd., 2023). İndüksiyonla sıcak presleme ise, yüksek sıcaklık ve basıncın eş zamanlı olarak uygulandığı oldukça hızlı bir işlemdir. Bu işlemin kısa sürede gerçekleşmesinden dolayı tane büyümesi ve oksidasyonun önüne geçilebilmektedir (Fomin vd., 2019; Şenel ve Demir, 2023).

Literatürde Al7075- Al_2O_3 kompozitlerin üretimine ve karakterizasyonuna yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır. Aghajani ve ark., çalışmalarında Al7075- Al_2O_3 kompozitlerde takviye oranının (hacimce %40, 50 ve 60), şekillendirme basıncının (50 ve 100 MPa) ve karıştırma süresinin (10 dk ve 5 saat) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda en yüksek bağıl yoğunluk (%96.6) ve sertlik (198.2 HV) 100 MPa basınçta şekillendirilen 5 saat karıştırma süresine sahip Al7075-40 Al_2O_3 kompozitte elde edilmiştir (Aghajani vd., 2023). Bharath ve ark., Al2014- Al_2O_3 (ağırlıkça %9, 12 ve 15) kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mekanik testler sonucunda, Al2014-%15 Al_2O_3 kompozitte sertlik, çekme ve akma dayanımında sırasıyla %19.2, %29.6 ve %29.5 oranlarında artış elde edilmiştir (Bharath vd., 2021). Liu ve ark., ağırlıkça %5 Al_2O_3 içeren numunelerde farklı öğütme sürelerinin (5, 10, 15 ve 20 saat) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Mikroyapı analizleri sonucunda, 20 saatlik öğütme sonrasında yapıdaki düzensiz fazın önemli ölçüde azaldığı ve küçük ve düzgün parçacıkların elde edildiği görülmüştür. En yüksek çekme dayanımına da (610 MPa) 20 saat öğütme sonrasında erişilmiştir (Liu vd., 2020). Hallem ve ark., karıştırmalı döküm yöntemiyle ağırlıkça farklı oranlarda (%4, 6, 8 ve 10) Al_2O_3 içeren Al7075- Al_2O_3 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda Al7075-%10 Al_2O_3 kompozitin Brinell sertliğinde ve basma dayanımında sırasıyla %172 ve %129 oranlarında artış sağlanmıştır. Aşınma oranında ise %66 oranında bir azalma görülmüştür (Hallem vd., 2018). Srivastava ve ark., Al7075 alüminyum matrise ağırlıkça %0.5, 1.5, 2 ve 2.5 Al_2O_3 takviyesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Toz metalürjisi yönteminin kullanıldığı çalışmada, en yüksek relatif yoğunluk (%94.3), sertlik (90.7 HV) ve basma dayanımı (246 MPa) Al7075-%2 Al_2O_3 kompozitte tespit edilmiştir (Srivastava vd., 2020).

Al-Al₂O₃ kompozitlerle ilgili çalışmalar incelendiğinde, bu konu hakkında birçok çalışmanın bulunduğu görülmüştür. Ancak toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmada da toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle ağırlıkça farklı oranlarda (%3, 6, 9, 12 ve 15) alümina içeren Al7075-Al₂O₃ kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri (yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı) incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Materyal

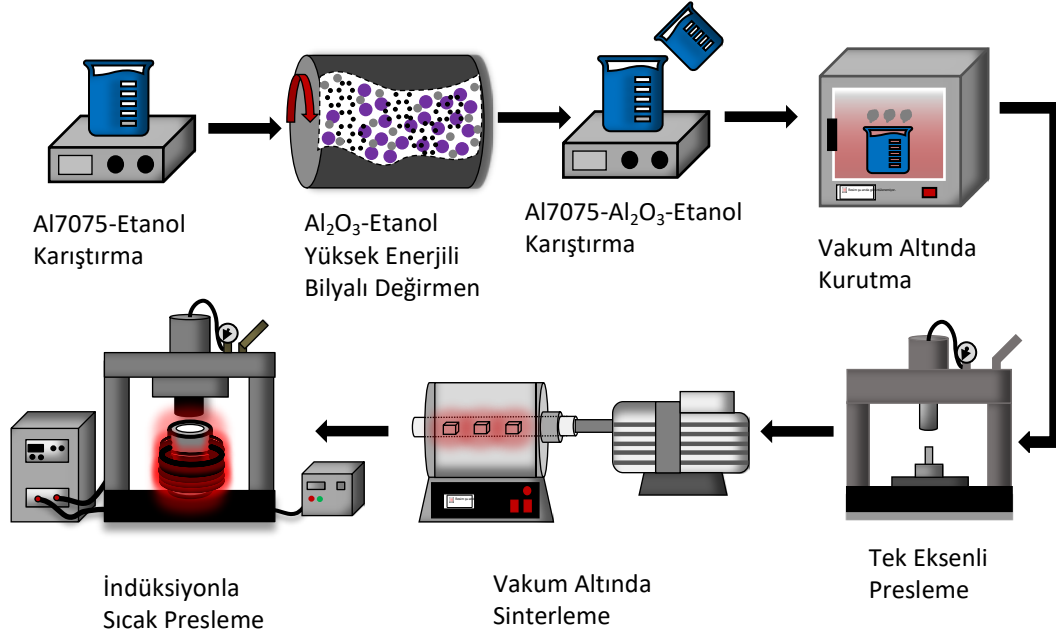
Çalışmada matris ve takviye elemanı olarak sırasıyla Al7075 alüminyum alaşımı ve Al₂O₃ tercih edilmiştir. Al7075 alüminyum alaşımı tozu Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilen alüminyum alaşımı 2.81 g cm⁻³ teorik yoğunluğa ve 10 µm ortalama tane boyutuna sahiptir. Al₂O₃ tozu ise Hindalco (Hindistan) firmasından tedarik edilmiştir. Al₂O₃ tozları 3.98 g cm⁻³ yoğunluğa ve 4 µm ortalama tane boyutuna sahiptir. Al7075 alaşımı içerisindeki alaşım elementlerinin yüzdesi Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. %Ağırlıkça Al7075 Alaşımı İçerisindeki Alaşım Elementleri (Bai vd., 2019)

Al	Cu	Mg	Si	Zn	Fe	Mn	Cr	Ti
90.02-87.3	1.2-2.0	2.1-2.9	0.4	5.1-6.1	0.5	0.3	0.18-0.28	0.2

Yöntem

Çalışmada Al7075-Al₂O₃ kompozitler toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilmiş, mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Öncelikle Al7075 alüminyum alaşımı tozu ısıtıcı manyetik karıştırıcıda etanol içerisinde 60 dk boyunca karıştırılmıştır. Aynı süreçte Al₂O₃ tozu da etanol içerisinde yüksek enerjili bilyalı değirmende 600 dev dk⁻¹ hızda karıştırılmıştır. Ardından iki toz karışımı matris-takviye elemanı etkileşimini arttırmak amacıyla birbiri içerisine eklenerek 20 dk boyunca ısıtıcı manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Hazırlanan toz karışımı etanolün uzaklaştırılması için filtrelenmiş ve sürekli vakum altındaki etüvde 50°C'de 16 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutulan tozlar agat havanda ezilip 200 µm'lik elekten geçirilmiştir. Hazırlanan tozlar paslanmaz çelik kalıba dökülerek tek eksenli hidrolik preste 700 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Ardından hazırlanan numuneler 600°C sıcaklıkta 1 saat boyunca sürekli vakum altında sinterlenmiştir. Sinterleme işleminin ardından indüksiyonla sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Grafit kalıba yerleştirilen numunelere 500°C sıcaklıkta 25 MPa basınç uygulanmıştır. Bu işlem için optimum parametreler deneme-yanılma yöntemiyle 41 s ısıtma, 30 saniye bekleme ve 10 s soğutma süresi olarak belirlenmiştir. Üretilen numunelerin yüzeyleri zımparalanıp (600, 1200 ve 2500'lük SiC su zımparası) parlatılarak (1 µm elmas solüsyon) mikroyapı analizlerine ve mekanik testlere hazır hale getirilmiştir. Çalışmada kullanılan proses parametrelerine yürütülen önceki çalışmalar ışığında karar verilmiştir (Şenel vd., 2024; Taşkin ve Şenel, 2024). Çalışmada kullanılan üretim süreci Şekil 1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Üretim Sürecinin Şematik Gösterimi

Mikroyapı Analizleri

Çalışmada kullanılan Al7075 alüminyum alaşımı ve Al₂O₃ tozlarının tane boyutlarını doğrulamak amacıyla tane boyut ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Malvern marka Mastersizer 3000 model tane boyut ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan tozların morfolojisini ve üretilen kompozitlerin kırık yüzeylerini incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM, Jeol-JSM7001F) analizleri yapılmıştır. Ayrıca Al₂O₃ partiküllerinin matris içerisindeki element dağılım haritasını belirlemek amacıyla SEM ile Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) analizleri kullanılmıştır. Kullanılan tozların ve üretilen kompozitlerin kristal yapılarını ve barındırdıkları fazları belirlemek için X-ışını kırınım (XRD, Rigaku Smartlab) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Fiziksel ve Mekanik Testler

Çalışmada deneysel yoğunluk değerleri Arşimet metodu kullanılarak belirlenmiştir. Her kompozisyon için 5 farklı yoğunluk ölçümü alınmış olup ölçümlerin ortalaması deneysel yoğunluk değeri (ρ_D) olarak kabul edilmiştir. Numunelerin kuru (m_K), asılı (m_A) ve suya doymuş ağırlıkları (m_D) alınmış ve Eşitlik 1'deki Arşimet yoğunluk denklemi yardımıyla deneysel yoğunlukları hesaplanmıştır. Eşitlikte suyun yoğunluk değeri (ρ_S) 1 g cm⁻³ olarak alınmıştır (Bai vd., 2019).

$$\rho_D = [m_K / (m_D - m_A)] \rho_{Su} \quad (1)$$

Üretilen numunelerin gözeneklilik oranı (%G) Eşitlik 2 ile hesaplanmaktadır (Bai vd., 2019).

$$\rho_D = (1 - \rho_D / \rho_T) \times 100 \quad (2)$$

Burada (ρ_T) kompozitin teorik yoğunluğudur. Kompozit malzemelerde teorik yoğunluk değeri, Al7075 alüminyum alaşımı ve alüminanın yoğunlukları ($\rho_{Al7075} = 2.81 \text{ g cm}^{-3}$, $\rho_{Al_2O_3} = 3.98 \text{ g cm}^{-3}$) ile ağırlıkça katkı oranları ($\%m_{Al7075}$, $\%m_{Al_2O_3}$) kullanılarak Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2018).

$$\rho_T = (\%m_{Al7075} \times \rho_{Al7075}) + (\%m_{Al_2O_3} \times \rho_{Al_2O_3}) \quad (3)$$

Numunelerin sertlik değerlerini belirlemek amacıyla Vickers sertlik testi yapılmıştır. Vickers sertlik testleri elmas uç ile zımparalanıp parlatılan numune yüzeyine 15 saniye boyunca 200 gf yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeyinde oluşan izin köşegen uzunlukları ölçülerek Eşitlik 4'de yerine yazılıp Vickers sertlik değeri (HV) hesaplanmıştır (Şenel ve Üstün, 2023).

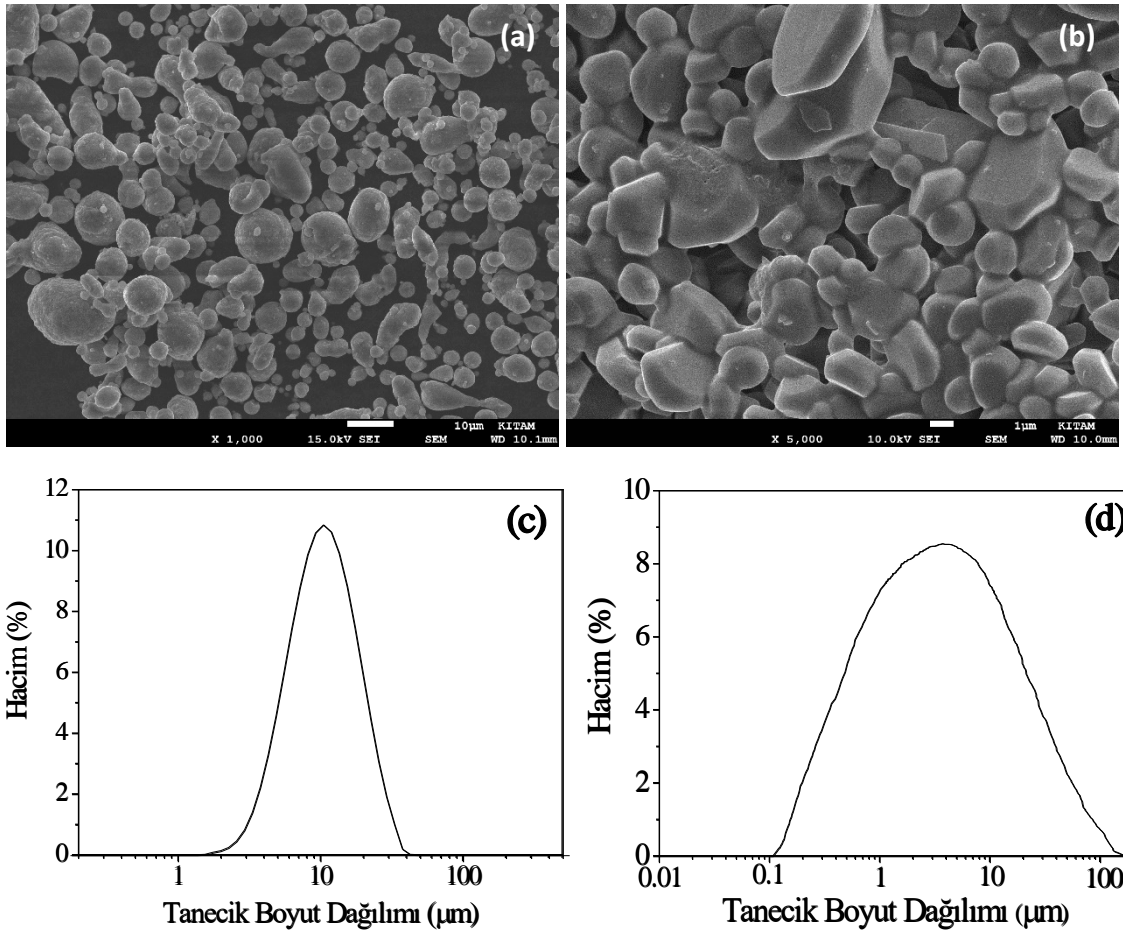
$$HV = 1.8544 \times \left(\frac{F}{d^2}\right) \quad (4)$$

Burada F uygulanan yükü (daN), d ise yüzeyde oluşan izin köşegen uzunluklarının ortalamasını ifade etmektedir. Basma testleri (ASTM E9) ise 5 MPa ön yük, 1 mm dk⁻¹ ön yük hızı ve 3 mm dk⁻¹ basma hızında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ve basma testlerinde her kompozisyon için en az 5 ölçüm alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Tozların Mikroyapı Analiz Sonuçları

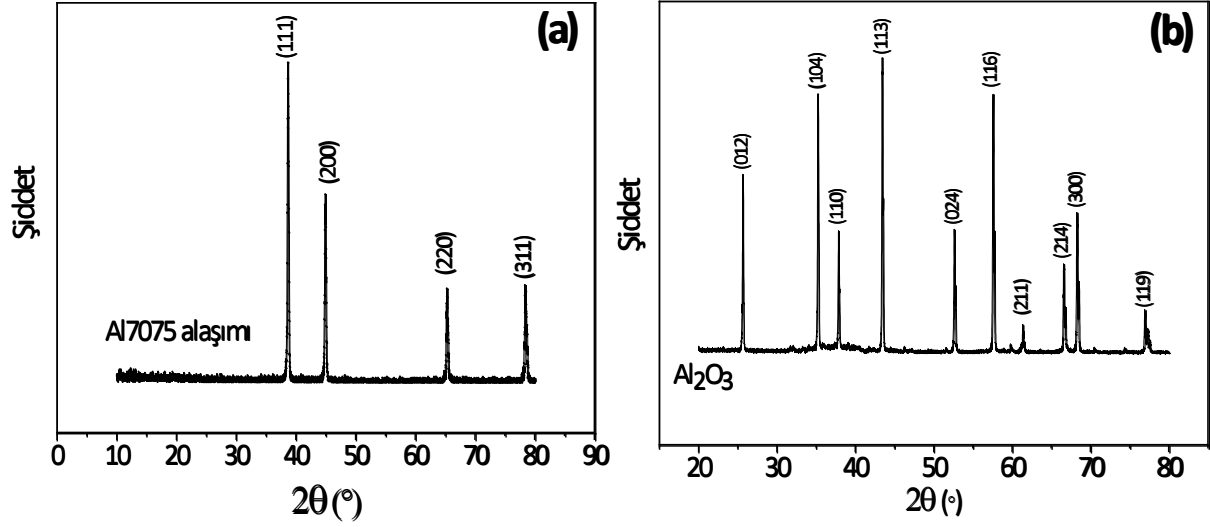
Şekil 2’de Al7075 alüminyum alaşımı ve Al₂O₃ tozlarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 2’den Al7075 alüminyum alaşımı ve Al₂O₃ tozlarının düzensiz ve küresele yakın bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Al7075 alüminyum alaşımı ve alüminanın yaklaşık 10 µm ve altı ortalama tane boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Al₂O₃ ve Al7075 alüminyum alaşımına ait parçacık boyut dağılımı Şekil 2(c) ve 2(d)’de verilmiştir. Parçacık boyut dağılımı grafiklerinden, kullanılan tozların ortalama tane boyutları doğrulanmıştır.



Şekil 2. Al7075 Alüminyum Alaşımı Tozuna ait SEM Görüntüleri (a), Alümina Tozuna ait SEM Görüntüleri (b), Al7075 Alüminyum Alaşımına ait Parçacık Boyut Dağılımı (c) ve Alüminaya ait Parçacık Boyut Dağılımı (d)

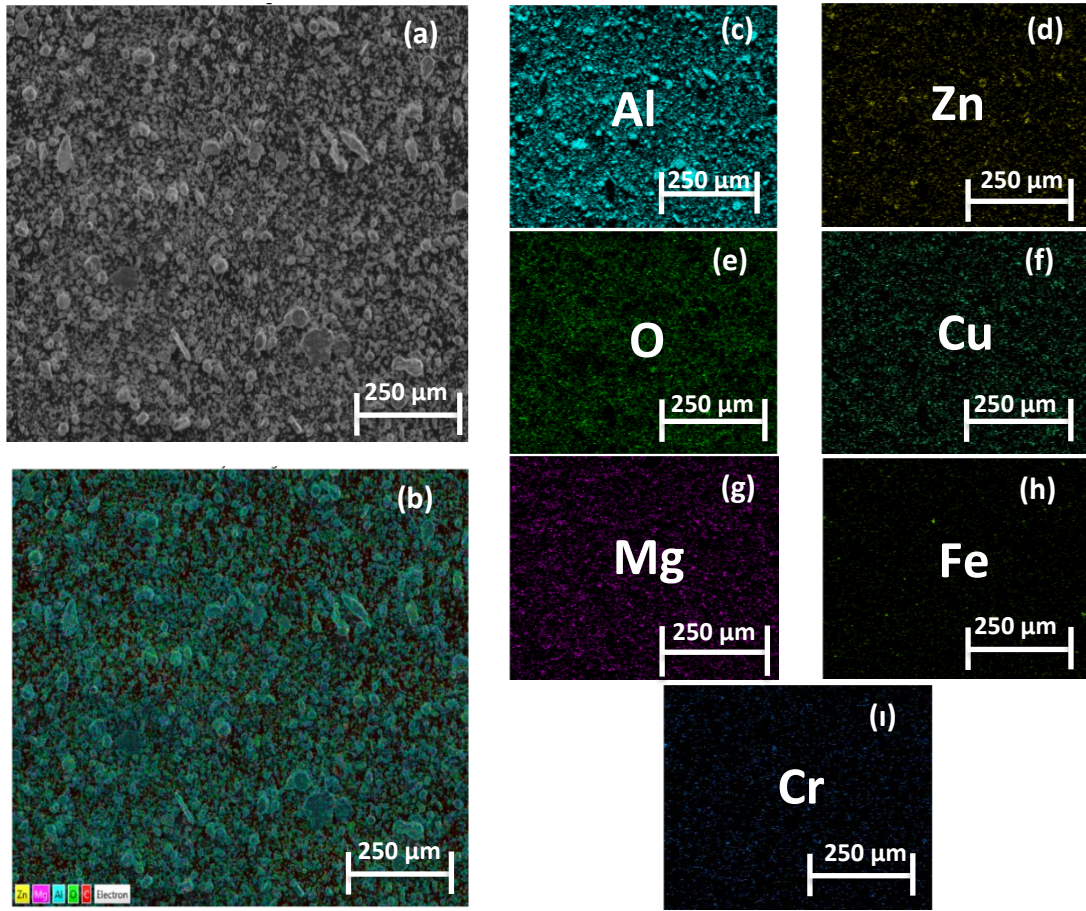
Çalışmada kullanılan tozlara ait XRD örgü desenleri Şekil 3’de verilmiştir. Şekil 3(a)’dan Al7075 alüminyum alaşımı piklerinin $2\theta = \sim 38^\circ, 45^\circ, 66^\circ$ ve 78° ’de (111), (200), (220) ve (311) düzlemlerine karşılık geldiği tespit edilmiştir. Şekil 3(b)’deki Al₂O₃’e ait XRD örgü desenlerinden piklerin $2\theta = \sim 25^\circ, 35^\circ, 38^\circ, 43^\circ, 53^\circ, 58^\circ, 61^\circ, 67^\circ, 68^\circ$ ve 77° ’de (012), (104), (110), (113), (024), (116), (211), (214),

(300) ve (119) düzlemlerine karşılık geldiği belirlenmiştir. Bu analizler, kompozit yapılarda Al ve Al_2O_3 'ün varlığını göstermek bakımından önem arz etmektedir.



Şekil 3. Al7075 Alüminyum Alaşımı (a) ve Alümina (b) Tozlarına ait XRD Örgü Desenleri

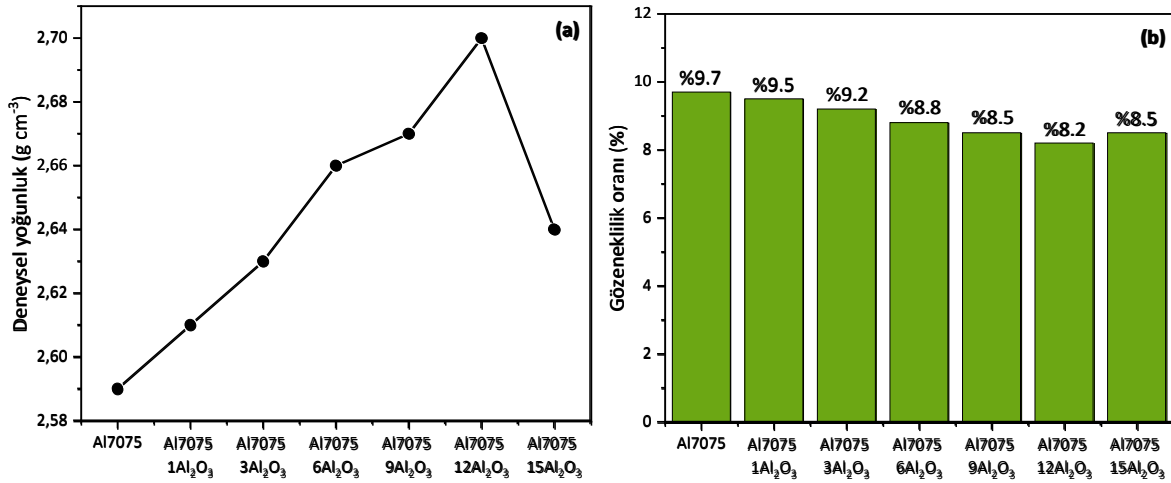
Al7075-%12 Al_2O_3 toz karışımına ait SEM-EDX görüntüleri Şekil 4'de verilmiştir. Görüntülerde, turkuaz renk Al elementini, yeşil renk O elementini, koyu yeşil renk Cu elementini, mor renk Mg elementini, sarı renk Zn elementini, koyu mavi renk Cr elementini, açık yeşil renk Fe elementini ve dağılımını göstermektedir. Alüminyum ve oksijen elementinin kesiştiği noktalarda alüminanın dağılımı gözlenmektedir. SEM-EDX görüntüleri değerlendirildiğinde, Al_2O_3 partiküllerinin homojene yakın bir dağılım sergilediği görülmüştür. Bu durum, üretim sürecinde karıştırma işleminin ve karıştırma işlem parametrelerinin uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Al7075-%12Al₂O₃ Toz Karışımına ait SEM (b) ve SEM-EDX Görüntüleri (b-i)

Fiziksel ve Mekanik Test Sonuçları

Şekil 5’de Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik oranının alümina takviye oranına göre değişimi verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, en düşük gözeneklilik oranı (%8.2) ve maksimum yoğunluk (2.7 g cm⁻³) değerlerine Al7075-%12Al₂O₃ kompozitte erişilmiştir. Al7075-%12Al₂O₃ kompozitin yoğunluğunda Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla %4.2 artış elde edilmiştir. Bu durumun yüksek yoğunluğa (3.98 g cm⁻³) sahip Al₂O₃ partiküllerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak Al₂O₃ partiküllerinin muhtemel topaklanmasından dolayı ağırlıkça %15 takviye oranında yoğunluk düşerken gözeneklilik oranı artmıştır.

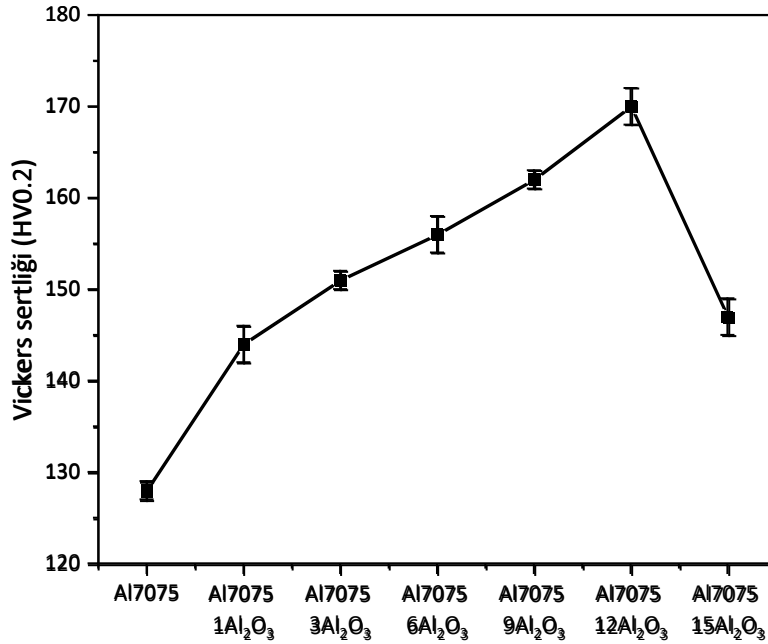


Şekil 5. Al7075-Al₂O₃ Kompozitlerde Yoğunluk (a) ve Gözeneklilik Oranının (b) Takviye Oranına Bağlı Olarak Değişimi

Al7075-Al₂O₃ kompozitlere ait Vickers sertlik değişimi Şekil 6'da görülmektedir. Sertlik sonuçları incelendiğinde, Al₂O₃ takviyesiyle birlikte sertlik değerlerinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Sertlik değeri 128±1 HV olan Al7075 alüminyum alaşımının ağırlıkça %12 Al₂O₃ takviyesiyle birlikte sertliği 170±2 HV değerine yükselmiştir. Sertlik değerindeki bu artışın sebebi yüksek sertlik değerine sahip Al₂O₃ partiküllerinin mikroyapıya ilave edilmesidir. Ayrıca Al₂O₃ takviyesiyle birlikte mikroyapıdaki dislokasyon yoğunluğu artmaktadır. Dislokasyon yoğunluğundaki artış ve sertlik arasındaki ilişki Eşitlik 5 ile ifade edilmektedir (Taşkin ve Şenel, 2024).

$$H = h\sqrt{Dt} + \alpha Gb\sqrt{\rho} \quad (5)$$

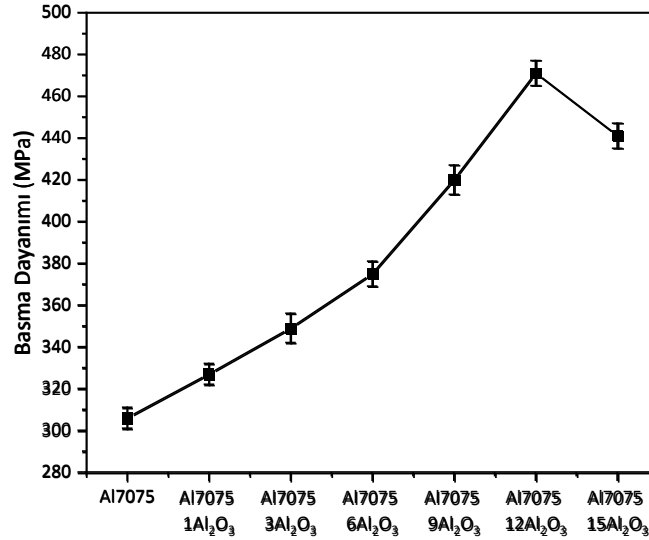
Bu eşitlikte H sertlik, ρ dislokasyon yoğunluğu, b Burgers vektörü, α ve G malzeme sabitleridir. Ancak yüksek oranlardaki (ağırlıkça %15) takviye oranlarında ise muhtemel topaklanan Al₂O₃ partiküllerinden dolayı sertlik değerinde düşüş görülmüştür.



Şekil 6. Al7075-Al₂O₃ Kompozitlerde Vickers Sertliğinin Takviye Oranına Bağlı Olarak Değişimi

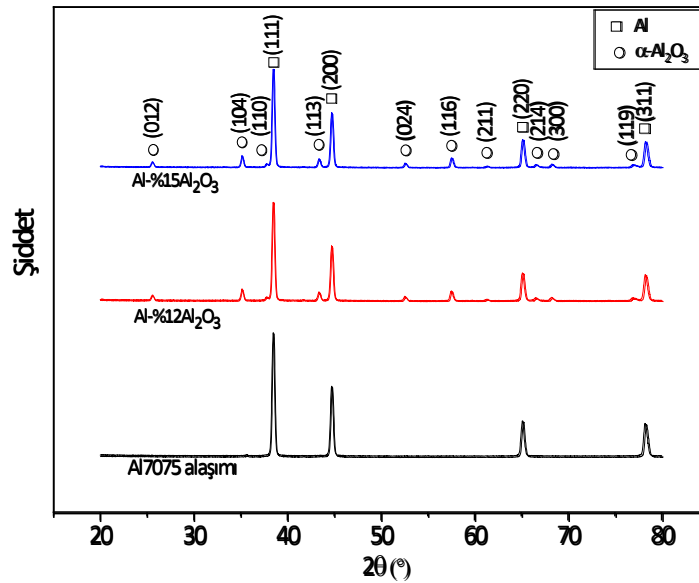
Al7075-Al₂O₃ kompozitlerde takviye oranına göre basma dayanımı değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, en yüksek basma dayanımına (471±6 MPa) Al7075-%12Al₂O₃ kompozitte erişilmiş olup Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla %53.9 artış sağlanmıştır. Al₂O₃ takviyesiyle basma

dayanımındaki artış yük transfer mekanizmasının etkin olmasından kaynaklanmaktadır. Bu mekanizma sayesinde mikroyapıya ilave edilen Al_2O_3 partikülleri malzeme üzerine uygulanan yükün büyük bir kısmını taşımaktadır (Chen vd., 2020; Luo vd., 2022). Bundan dolayı da malzeme daha yüksek yüklerle dayanabilmekte ve basma dayanımında artış görülmektedir. Ancak Al7075-%15 Al_2O_3 kompozitte kümelenen Al_2O_3 partiküllerinden dolayı arayüzey bağının zayıflaması sebebiyle basma dayanımında düşüş gözlenmiştir.



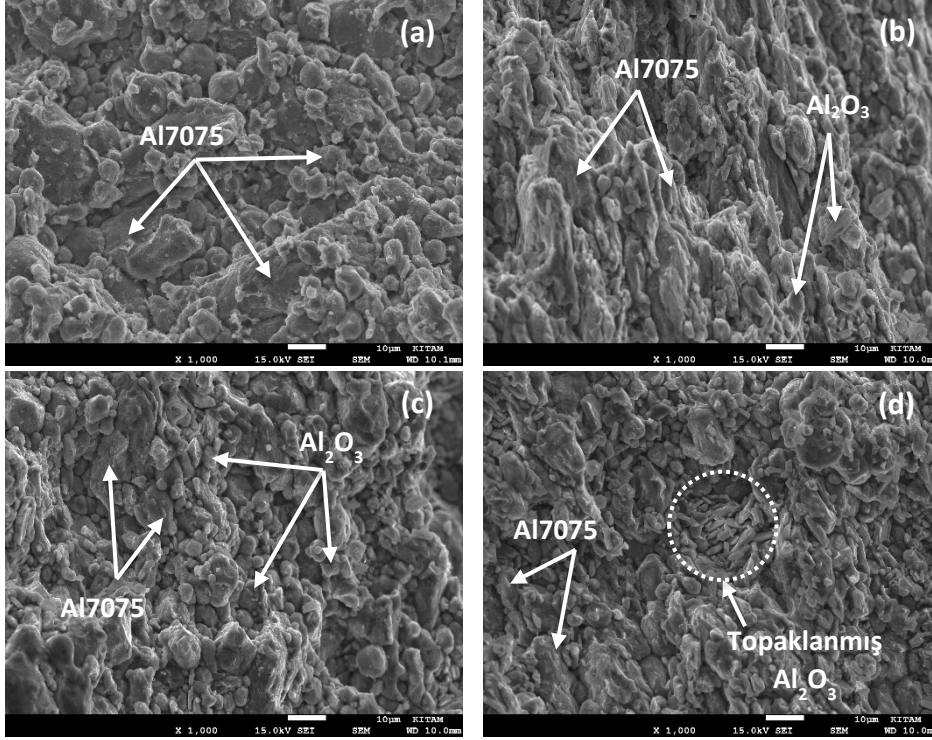
Şekil 7. Al7075- Al_2O_3 Kompozitlerde Basma Dayanımının Takviye Oranına Bağlı Olarak Değişimi

Al7075 alaşımı ve Al7075-%12 Al_2O_3 , Al7075-%15 Al_2O_3 kompozitlere ait XRD grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Burada, alüminyum " \square " sembolüyle ve α - Al_2O_3 ise " \circ " sembolüyle gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, Al7075-%12 Al_2O_3 ve Al7075-%15 Al_2O_3 kompozitlerde α - Al_2O_3 pikleri net bir şekilde görülmektedir. Bunun dışında sıcaklık etkisiyle (sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme aşamalarında) istenmeyen ikincil fazlara (Al_4C_3 vb.) ait piklerin oluşmadığı görülmüştür. Bunun nedeninin çalışmada kullanılan sıcaklıkların (sinterleme sıcaklığı: 600°C, sıcak presleme sıcaklığı: 500°C) alüminyum karbür (Al_4C_3) oluşumu için gerekli olan kritik sıcaklığın ($\sim 830^\circ\text{C}$) altında olmasından kaynaklanmaktadır (Sidhu vd., 2014).



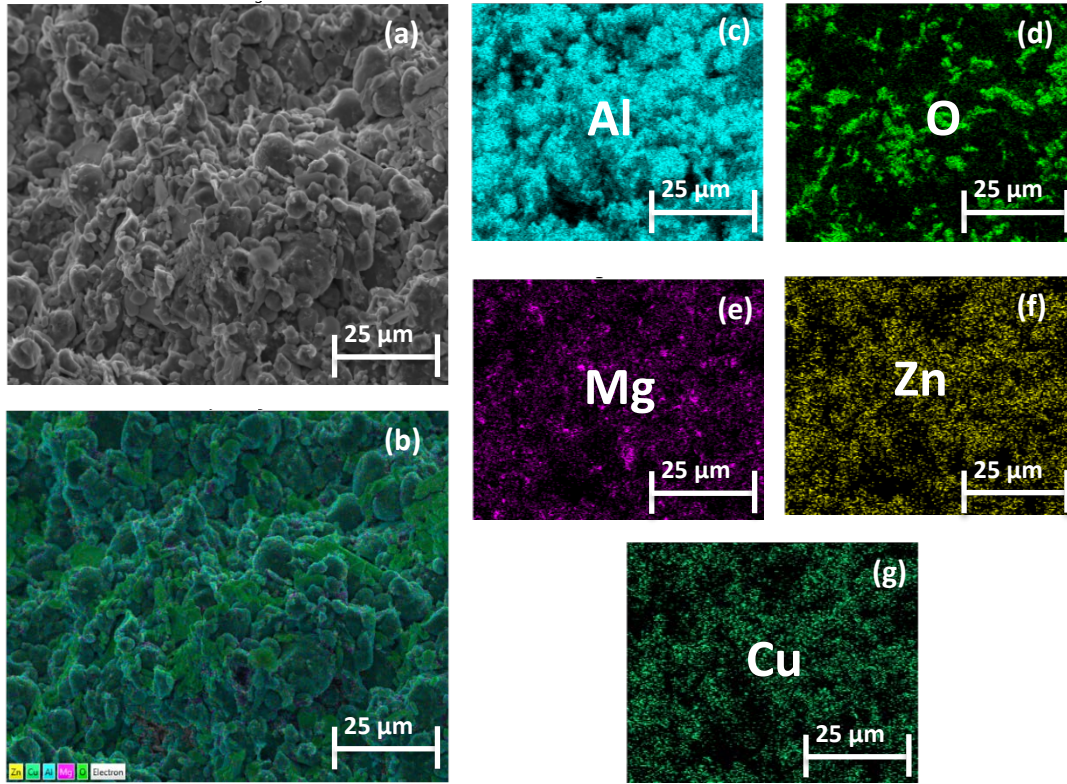
Şekil 8. Al7075 Alaşımı ve Al7075- Al_2O_3 Kompozitlere ait XRD Örgü Desenleri

Şekil 9'da Al7075 alüminyum alaşımı, Al7075-12Al₂O₃ ve Al7075-15Al₂O₃ kompozitlerin SEM resimleri sunulmuştur. Bu görüntüler incelendiğinde, ağırlıkça %12 Al₂O₃ içeren kompozitte takviye elemanlarının homojene yakın bir şekilde dağıldığı ve matris-takviye elemanı arasında güçlü bir arayüzey bağının olduğu görülmüştür. Ayrıca Al₂O₃ partiküllerinin tane sınırlarına yerleştiği görülmektedir. Tane sınırlarındaki takviye elemanları yapıda sabitleme etkisi oluşturduğundan sıcaklık artışıyla aşırı tane büyümesinin önüne geçilebilmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde, tane sınırlarındaki Al₂O₃ partiküllerinden dolayı mikroyapıda aşırı tane büyümesi görülmemektedir. Ayrıca numunelerin taneler arası kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Ancak Al7075-%15Al₂O₃ kompozitte ise topaklanan Al₂O₃ partikülleri net bir şekilde görülmektedir. SEM görüntüleri ve mekanik test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, sonuçların tutarlı olduğu ve topaklanan Al₂O₃ partiküllerinden dolayı mekanik özelliklerin düştüğü görülmüştür.



Şekil 9. Al7075 Alaşımı (a), Al7075-%6Al₂O₃ (b), Al7075-%12Al₂O₃ (c), Al7075-%15Al₂O₃ (d) ait SEM Görüntüleri

Al7075-%15Al₂O₃ kompozite ait SEM ve SEM-EDX görüntüleri Şekil 10'da görülmektedir. Element dağılım haritası incelendiğinde, turkuaz renk Al, açık yeşil renk O, mor renk Mg, sarı renk Zn ve koyu yeşil renk Cu elementi dağılımını ifade etmektedir. Al, Mg, Zn, Cu elementleri Al7075 alaşımının; Al ve O elementleri alüminanın dağılımını göstermektedir. Bu analizden, Al7075-%15Al₂O₃ kompozitte takviye elemanına ait elementlerin (Al ve O) belirli bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum, takviye elemanının (Al₂O₃) bölgesel olarak topaklandığını göstermektedir. Bu topaklanmaların da kompozitin mekanik özelliklerinde azalmaya neden olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma sonuçları literatür ile karşılaştırıldığında, toz metalürjisi veya farklı yöntemlerle üretim yapılmış diğer çalışmalara (Aghajani vd., 2023; Al-Salihi and Kadhim, 2020; Muraliraja vd., 2018; Shrivastva vd., 2022) kıyasla bu çalışmada daha yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir. Sinterleme sonrası yapılan indüksiyonla sıcak presleme işlemi, literatürdeki değerlerden daha yüksek değerlere ulaşılmasını sağlamıştır.



Şekil 10. Al7075-%15Al₂O₃ Kompozite ait SEM (a) ve SEM-EDX (b) Görüntüleri

Sonuç ve Öneriler

Çalışmada toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen Al7075-Al₂O₃ kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Mekanik test sonuçlarına göre, artan Al₂O₃ ilavesinin mekanik özelliklerde artışa neden olduğu görülmüştür. Maksimum yoğunluk (2.7 g cm⁻³), basma dayanımı (471±6 MPa) ve sertlik değerlerine (170±2 HV) ağırlıkça %12 Al₂O₃ takviyesinde ulaşılmıştır. Aynı kompozisyonda en düşük gözeneklilik oranı da (%8.2) elde edilmiştir. Al7075-%12Al₂O₃ kompozitte Al7075 alüminyum alaşımına kıyasla yoğunluk, sertlik ve basma dayanımı değerlerinde sırasıyla %4.2, %32.8 ve %53.9 artış sağlanmıştır.
- Mikroyapı analizleri sonucunda, mikroyapıdaki Al₂O₃ varlığı doğrulanmıştır. Ayrıca XRD incelemelerinde, istenmeyen ikincil fazlara rastlanılmamıştır. SEM analizlerinde ise, Al₂O₃ partiküllerinin mikroyapıda homojen bir şekilde dağıldığı ve genellikle tane sınırlarına yerleştiği görülmüştür. Bunun dışında yüksek Al₂O₃ takviye oranında (ağırlıkça %15) mikroyapıda topaklanmalar gözlenmiştir. Bu durum bu takviye oranında mekanik özelliklerde gerçekleşen düşüşün sebebini açıklamaktadır.

Sonuç olarak, Al₂O₃ takviyesinin ve indüksiyonla sıcak preslemenin Al7075 alüminyum mekanik özelliklerini arttırdığı tespit edilmiştir.

Destek ve Teşekkür

Bu çalışma, Mahmut Can Şenel danışmanlığında Elif Işık tarafından tamamlanan "Al7075-Al₂O₃-Grafen ve Al7075-ZrO₂-Grafen Hibrit Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik Özelliklerinin ve Mikroyapısının İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir (Tez No. 811583).

Yazar Katkısı

Elif Işık, deneysel süreci gerçekleştirdi ve verileri toplayıp istatistiksel analizleri gerçekleştirdi. *Aleyna Taşkın*, deneysel süreci gerçekleştirdi ve verileri toplayıp istatistiksel analizleri gerçekleştirdi. *Mahmut Can Şenel*, deneysel ortamını hazırlandı ve deneysel süreci takip etti. Yazarlar makaleyi birlikte yazdı, okudu ve onayladı.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

ORCID

Elif Işık  <https://orcid.org/0000-0001-8289-9512>

Aleyna Taşkın  <https://orcid.org/0000-0002-8308-9957>

Mahmut Can Şenel  <https://orcid.org/0000-0001-7897-1366>

Kaynaklar

- Aghajani, S., Pouyafar, V., Meshkabi, R., Volinsky, A. A. ve Bolouri, A. (2023). Mechanical characterization of high volume fraction Al7075-Al₂O₃ composite fabricated by semisolid powder processing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(5–6), 2569–2580. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10881-9>
- Al-Salihi, H. A. ve Judran, H. K. (2020). Effect of Al₂O₃ reinforcement nanoparticles on the tribological behaviour and mechanical properties of Al6061 alloy. *Materials Science*, 7(4), 486–498. <https://doi.org/10.3934/matersci.2020.4.486>
- Bai, S., Perevoshchikova, N., Sha, Y. ve Wu, X. (2019). The effects of selective laser melting process parameters on relative density of the AlSi10Mg parts and suitable procedures of the archimedes method. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/app9030583>
- Bharath, V., Auradi, V. ve Nagaral, M. (2021). Fractographic characterization of Al₂O₃p particulates reinforced Al2014 alloy composites subjected to tensile loading. *Frattura Ed Integrita Strutturale*, 15(57), 14–23. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.57.02>
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering* (10th ed.). Wiley.
- Chen, W., Yang, T., Dong, L., Elmasry, A., Song, J., Deng, N., Elmarakbi, A., Liu, T., Lv, H. B. ve Fu, Y. Q. (2020). Advances in graphene reinforced metal matrix nanocomposites: Mechanisms, processing, modelling, properties and applications. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 3(4), 189–210. <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.12.003>
- Devaganesh, S., Kumar, P. K. D., Venkatesh, N. ve Balaji, R. (2020). Study on the mechanical and tribological performances of hybrid SiC-Al7075 metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3759–3766. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.002>
- Dressler, U., Biallas, G. ve Alfaro Mercado, U. (2009). Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3. *Materials Science and Engineering: A*, 526(1–2), 113–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.07.006>
- Fomin, A., Fomina, M., Koshuro, V. ve Rodionov, I. (2019). Composite metal oxide coatings on chromium-nickel stainless steel produced by induction heat treatment. *Composite Structures*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111451>

- Hallem, A. H., Jasim, T. A. ve Radhi, N. S. (2018). Effect of alumina reinforcement on some mechanical properties of aluminum matrix composites produced by stir casting process. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(10), 1271–1280. <http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp1271http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=10http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=10>
- Heimann, R. B. (2010). *Classic and Advanced Ceramics: From Fundamentals to Applications (1st edition)*. Wiley.
- Li, S. S., Yue, X., Li, Q. Y., Peng, H. L., Dong, B. X., Liu, T. S., Yang, H. Y., Fan, J., Shu, S. L., Qiu, F. ve Jiang, Q. C. (2023). Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 27, pp. 944–983). Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.274>
- Liu, J., Cao, G., Zhu, X., Zhao, K. ve An, L. (2020). Optimization of the microstructure and mechanical properties of heterogeneous Al-Al₂O₃ nanocomposites. *Materials Today Communications*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101199>
- Luo, K., Liu, S., Xiong, H., Zhang, Y., Kong, C. ve Yu, H. (2022). Mechanical properties and strengthening mechanism of aluminum matrix composites reinforced by high-entropy alloy particles. *Metals and Materials International*, 28(11), 2811–2821. <https://doi.org/10.1007/s12540-021-01159-4>
- Mandal, K. K., Kuar, A. S. ve Mitra, S. (2018). Experimental investigation on laser micro-machining of Al7075 alloy. *Optics and Laser Technology*, 107, 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.017>
- Matori, K. A., Wah, L. C., Hashim, M., Ismail, I. ve Mohd Zaid, M. H. (2012). Phase transformations of α -alumina made from waste aluminum via a precipitation technique. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(12), 16812–16821. <https://doi.org/10.3390/ijms131216812>
- Menachery, N., Thomas, S., Deepanraj, B. ve Senthilkumar, N. (2023). Processing of nanoreinforced aluminium hybrid metal matrix composites and the effect of post-heat treatment: a review. In *Applied Nanoscience (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 6, pp. 4075–4099). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02704-2>
- Mohan, E., Anbuhezhiyan, G., Pugazhenthir, R. ve Prakash, F. P. (2023). Wear behavior of brass based composite reinforced with SiC and produced by stir casting process. *Materials Research*, 26. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0196>
- Muraliraja, R., Arunachalam, R., Al-Fori, I., Al-Maharbi, M. ve Piya, S. (2018). Development of alumina reinforced aluminum metal matrix composite with enhanced compressive strength through squeeze casting process. *Journal of Materials: Design and Applications*, 233(3), 1-8. <https://doi.org/10.1177/1464420718809516>
- Pragathi, P. ve Elansezhian, R. (2023). Mechanical and microstructure behaviour of aluminum nanocomposite fabricated by squeeze casting and ultrasonic aided squeeze casting: A comparative study. *Journal of Alloys and Compounds*, 956. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170203>
- Reza Akbarpour, M., Gazani, F., Mousa Mirabad, H., Khezri, I., Moeini, A., Sohrabi, N. ve Seop Kim, H. (2023). Recent advances in processing, and mechanical, thermal and electrical properties of Cu-SiC metal matrix composites prepared by powder metallurgy. *Progress in Materials Science*, 101191. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101191>

- Sheraf, J. ve Darius Gnanaraj, S. (2023). Synthesis of functionally graded aluminium metal matrix composites-a mini review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.251>
- Sidhu, M. S., Bishop, C. M. ve Kral, M. V. (2014). Formation of aluminium carbide by cast iron and liquid aluminium interaction. *International Journal of Cast Metals Research*, 27(6), 321–328. <https://doi.org/10.1179/1743133614Y.0000000110>
- Srivastava, A. K., Sharma, B., Saju, B. R., Shukla, A., Saxena, A. ve Maurya, N. K. (2020). Effect of Graphene nanoparticles on microstructural and mechanical properties of aluminum based nanocomposites fabricated by stir casting. *World Journal of Engineering*, 17(6), 859–866. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2020-0128>
- Şenel, M. C. ve Demir, M. (2023). Effect of induction heat treatment process and graphene/B₄C amount on the tribological and mechanical properties of Al6061 hybrid composites. *JOM*, 75(7), 2554–2568. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05790-x>
- Şenel, M. C. ve Üstün, M. (2023). Effect of silicon dioxide-graphene content on the microstructure, sliding wear behavior, and compressive strength of aluminum hybrid composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(3), 1248–1260. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07194-5>
- Şenel, M. C., Taşkın, A., Demir, M. ve Gürbüz, M. (2024). İndüksiyonla sıcak işlemin Si₃N₄ ve grafen takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39, 1567-1581. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1226420>
- Taşkın, A. ve Şenel, M. C. (2024). Tribological properties and microstructures of tungsten carbide and few-layer graphene-reinforced aluminum-based composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77, 445-456. <https://doi.org/10.1007/s12666-023-03114-w>
- Wang, S., Zheng, Z., Long, J., Wang, J., Zheng, K., Ke, Z., Luo, Z., Pokrovsky, A. I. ve Khina, B. B. (2024). Recent advances in wear-resistant steel matrix composites: A review of reinforcement particle selection and preparation processes. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 1779–1797. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.195>
- Xu, H., Fu, T., Wang, P., Zhou, Y., Guo, W., Su, F., Li, G., Xing, Z. ve Ma, G. (2023). Microstructure and properties of plasma sprayed copper-matrix composite coatings with Ti₃SiC₂ addition. *Surface and Coatings Technology*, 460. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129434>
- Yang, X., Zhang, Y., Huang, J., Liu, J., Chen, J. ve Li, T. (2024). Interfacial microstructure evolution and mechanical properties of carbon fiber reinforced Al-matrix composites fabricated by a pressureless infiltration process. *Materials Science and Engineering: A*, 891. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145968>