

İndüksiyonla sıcak preslemenin ve SiC katkısının Al6061 matrisli kompozitlerin mikroyapısına ve mekanik özelliklerine olan etkisinin araştırılması

Investigation of the effects of induction hot-pressing and SiC addition on the microstructure and mechanical properties of Al6061 matrix composites

Mahmut Can ŞENEL^{*1} , Canberk SÖVÜT¹ , Ali Rıza DOĞAN² 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55210, Samsun

²Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., Fethiye Mah. Havacılık Bulvarı, No:17, 06980, Ankara

• Geliş tarihi / Received: 17.09.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 30.01.2026

Öz

Bu çalışmada, toz metalurjisi ve indüksiyonla sıcak presleme teknikleri kullanılarak Al6061-SiC kompozit malzemeler üretilmiştir. Al6061 matrisine ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 25 ve 30 oranlarında SiC eklenmiştir. Katkı oranının ve indüksiyonla sıcak preslemenin kompozitlerin mikroyapılarına ve mekanik özelliklerine (yoğunluk, gözeneklilik oranı, basma dayanımı, Vickers sertliği) olan etkisi araştırılmıştır. Mekanik test sonuçlarına göre; maksimum yoğunluk ($2.73 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$), minimum gözeneklilik oranı (%4.45), en yüksek Vickers sertliği ($201 \pm 4 \text{ HV}$) ve basma dayanımı ($380 \pm 3 \text{ MPa}$) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozitinde elde edilmiştir. İndüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozit ile sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımı karşılaştırıldığında, deneysel yoğunlukta %8.76'lık bir artış, gözeneklilik oranında %39.7'lik bir düşüş, Vickers sertlik değerinde %111.58'lik bir artış ve basma dayanımında %80.9'luk bir artış tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Al6061 matrisine SiC eklenmesiyle numunenin mekanik özelliklerinin geliştiği saptanmıştır. Ayrıca, sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işleminin, yalnızca sinterleme işlemine kıyasla mikroyapıdaki gözenekliliği azalttığı ve bu durumun kompozitin mekanik dayanımını iyileştirdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Al6061 alaşımı, Silisyum karbür, Kompozit, Sıcak presleme

Abstract

In this work, Al6061-SiC composite structures were produced by the powder metallurgy and induction hot-pressing techniques. SiC was added to the Al6061 matrix at rates of 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 25, and 30wt.%. The effects of the reinforcement ratio and induction hot-pressing on the microstructures and mechanical properties (density, porosity ratio, compressive strength, Vickers hardness) of the composites were examined. According to the mechanical test results, maximum density ($2.73 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$), minimum porosity ratio (4.45%), the highest Vickers hardness ($201 \pm 4 \text{ HV}$) and compressive strength ($380 \pm 3 \text{ MPa}$) were obtained in the induction hot-pressed Al6061-30%SiC composite. When the induction hot-pressed Al6061-30%SiC composite was compared with only sintered Al6061 alloy, an 8.76% increase in experimental density, a 39.7% decrease in porosity, a 111.58% increase in Vickers hardness, and an 80.9% increase in compressive strength were detected. Consequently, SiC addition to the Al6061 matrix enhanced the mechanical properties of the specimen. Furthermore, it was determined that the induction hot-pressing process, which followed sintering, reduced microstructural porosity compared to sintering alone, thereby improving the mechanical strength of the composite.

Keywords: Al6061 alloy, Silicon carbide, Composite, Hot-pressing

1. Giriş

1. Introduction

Endüstriyel dünyanın sürekli evrim geçiren yapısında, sektörlerin ve artan taleplerin etkisiyle malzeme teknolojilerinde hızlı bir ilerleme yaşanmaktadır. Tarihsel olarak insanlığın vazgeçilmez unsurlarından biri olan metalik malzemelerin yanı sıra, çeşitli ihtiyaçların ortaya çıkmasıyla birlikte farklı malzeme türleri üzerine yapılan araştırmalar da önemli bir hız kazanmıştır. Özellikle düşük maliyet, çevre ve insan sağlığına uygunluk, dayanıklılık, geri dönüşüm olanakları, uzun ömür, yüksek sertlik, korozyon direnci, ses ve ısı

*Mahmut Can ŞENEL; mahmutcan.senel@omu.edu.tr

yalıtımı gibi özelliklerin talep edilmesi geleneksel malzemelerin bu beklentilere tam olarak yanıt verememesi sebebiyle kompozit malzemeler üzerindeki araştırmalar önemli bir yer edinmiştir (Özdemir, 2023).

Günümüzde, yüksek mukavemetli, hafif ve ekonomik malzemelere olan talep sürekli olarak artmaktadır. Bu özelliklere sahip malzemeler, çeşitli üretim yöntemleriyle (difüzyonla bağlama, yerinde üretim, infiltrasyon vb.) imal edilebilmektedir. Bu yöntemlerden biri de toz metalurjisi yöntemidir. Toz metalurjisi yöntemi, düşük üretim maliyetleri ve üretilen parçaların mükemmel performansı nedeniyle birçok endüstride tercih edilmektedir. Bu yöntem özellikle kompozit malzemelerin üretiminde sıkça kullanılmaktadır (Şenel & Üstün, 2022). Kompozit malzemeler, farklı üstün özelliklere sahip çeşitli malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapıları ifade eder. Metal, seramik veya polimer matrisli kompozitler gibi çeşitli sınıflandırmalara tabi tutulabilirler. Metal matrisli kompozitler, yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluk gibi avantajlar sunabilir. Bu nedenle bu tür kompozitlerin savunma, havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi çeşitli sektörlerde kullanımı giderek artmaktadır. Genellikle magnezyum (Mg), titanyum (Ti), alüminyum (Al) gibi metaller ve alaşımları metal esaslı kompozitlerde tercih edilen ana malzemeler arasında yer almaktadır (Şenel vd., 2015; Taşkın & Şenel, 2023).

Alüminyum alaşımları, düşük ağırlıkları ve olağanüstü ısı iletkenlikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve maden işleme gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde tercih edilen mühendislik uygulamalarından biridir. Bu kompozitler, seramik parçacıklarının eklenmesiyle güçlendirildiğinde, yüksek sıcaklık uygulamaları için doğası gereği üstündür. Al6061 alaşımı korozyona karşı oldukça dirençli olup makul bir dayanıma sahiptir. Bu sebeple de inşaat ve otomotiv sektörlerinde çok sayıda uygulama alanı bulur. Genel olarak alüminyum alaşımları daha yüksek mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve kırılma tokluğu nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Demir, 2021).

Metal matrisli kompozitlerde kullanılan takviyelerin türü, boyutu ve ağırlık oranı gibi fiziksel faktörler (lifler veya granüler parçacıklar) metal matrisli kompozitlere daha iyi özellikler kazandırır. Ayrıca takviye elemanının kimyasal yapısını, mikroyapısını ve fiziksel özelliklerini etkileyerek matris malzemesiyle reaksiyona girer. Alüminyum matrisli kompozitlerde; Al_2O_3 , TiB_2 , TiO_2 , SiC, TiC, B_4C gibi karbürler, oksitler veya borürler olmak üzere seramik bazlı takviyeler kullanılmaktadır (Saikrupa vd., 2021).

Literatürde SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırıldığı birtakım çalışmaların bulunduğu görülmüştür. Surya (2022) çalışmasında toz metalurjisi yöntemi ile Al6061-SiC kompozitleri, farklı SiC katkı oranlarında SiC (%5, 10, 15) ve farklı sinterleme sürelerinde (1, 2 ve 3 saat) üretmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine SiC katkı oranının ve sinterleme süresinin önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. 530°C'de 3 saat sinterlenen %5 ve %15 SiC katkılı kompozitlerde sertlik değeri sırasıyla 73 HRB ve 81 HRB olarak gerçekleşmiştir. %15 SiC katkılı kompozit için sinterleme süresi 1 saatten 3 saate çıkarıldığında sertlik değerinin 70 HRB'den 81 HRB'ye yükseldiğini ifade etmiştir. Melik vd. (2022), yaptıkları çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ağırlıkça %7.5 SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerde, sinterleme sıcaklıklarının (585°C, 600°C, 615°C ve 630°C) kompozitlerin mikroyapılarına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Sinterleme sıcaklığının 600°C'ye kadar artmasıyla sertliğin 31 HV'den 32.2 HV'ye arttığını daha sonra sıcaklığın 630°C'ye yükselmesiyle 19.4 HV'ye düştüğünü belirtmişlerdir. Wasik vd. (2024) yaptıkları çalışmada alüminyum matrise ağırlıkça %5 ve 10 oranlarında SiC katkısı yaparak katkı oranının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. En yüksek basma dayanımı (305 MPa) %5 SiC katkısında ve en yüksek sertlik (78 HV) ile eğme dayanımı (889 MPa) %10 SiC katkısında elde edilmiştir. Bharathi ve Kumar (2023) çalışmalarında ağırlıkça farklı oranlarda SiC (%2, 3, 4, 5, 6) ve B_4C (%2) katkısının alüminyum esaslı kompozitin mekanik dayanımına olan etkisini araştırmıştır. En yüksek bağl yoğunluk (%94) ve sertlik (59 HV) Al-%4SiC-%2 B_4C kompozitte, en yüksek basma dayanımı (350 MPa) ise Al-%3SiC kompozitte elde edilmiştir. Al-%6SiC ve Al-%4SiC-%2 B_4C kompozitlerin sertlik değerlerinin saf alüminyuma kıyasla %20.6 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Laxmi vd. (2017) yaptıkları çalışmada ağırlıkça %10, %15 ve %20 SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozitleri karıştırmalı döküm tekniğiyle üretmişlerdir. Yapılan mikroyapı incelemesi sonucu SiC takviye oranının %15'e kadar artmasıyla sertliğin arttığını, SiC takviye oranının %15'ten %20'ye çıkarıldığında ise sertliğin düştüğünü belirtmişlerdir. En yüksek sertliği %15 SiC katkılı kompozitte 64 BHN olarak elde etmişlerdir. Kumar Maurya vd. (2020) yaptıkları çalışmada SiC takviyesinin Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak farklı ağırlık yüzdelerinde (%1, %2, %3, %5) SiC katkılı kompozitleri üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda %5 SiC takviyesine kadar sertlik değerinin %12.5 oranında arttığını ve çekme

mukavemetinin maksimum 288 MPa'ya kadar çıktığını belirlemişlerdir. [Pal vd. \(2019\)](#) yürüttükleri çalışmada karıştırmalı döküm yöntemini kullanarak Al6061 alaşımının ve %5, %10, %15, %20 ve %25 SiC takviyeli alüminyum esaslı kompozitin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. SiC katkı oranı arttıkça çekme mukavemetinde ve sertlikte iyileşme gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik (47.3 HV) ve çekme mukavemeti (145 MPa) değerlerini %25 SiC takviyeli kompozitte elde etmişlerdir. Mikro yapılarda SiC parçacıklarının homojen dağılımının gerçekleştiğini, takviye parçacıkların eklenmesiyle basma dayanımının arttığını bildirmişlerdir. [Sivananthan vd. \(2020\)](#) yaptıkları çalışmada karıştırmalı döküm yöntemi ile üretilen ağırlıkça %2 ve %4 SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin sertlik, çekme mukavemeti ve basma mukavemeti gibi özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan testler sonucunda Al6061 alaşımına kıyasla Al6061-%4SiC takviyeli kompozitte sertliğin %25, çekme mukavemetinin %25.6 ve basma mukavemetinin %12 oranında arttığını ifade etmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Al6061-SiC kompozit malzemelerin özellikleri üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, toz metalurjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle üretilen Al6061-SiC kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısının incelendiği herhangi bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Bu çalışma sayesinde hem indüksiyonla sıcak preslemenin hem de SiC katkısının kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisi analiz edilebilmiştir.

Bu çalışmada, toz metalurjisi ve indüksiyon altında sıcak presleme metotlarıyla Al6061-SiC kompozitler üretilerek Al6061 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin (sertlik, yoğunluk, gözeneklilik oranı, basma dayanımı) araştırılması amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve metot

2. Material and method

2.1. Materyal

2.1.1. Material

Alüminyum esaslı kompozit malzeme üretiminde, ana malzeme olarak Al6061 alaşımı ve takviye malzemesi olarak silisyum karbür (SiC) kullanılmıştır. Al6061 alaşımı, en yaygın kullanılan 6xxx serisi alüminyum alaşımıdır. İyi mekanik özelliklere, iyi yüzey kalitesine, mükemmel korozyon direncine ve büyük uygulama kolaylığına sahiptir. Bu çalışmada kullanılan Al6061 alaşım tozu, Nanografi firmasından (Türkiye) temin edilmiştir. Ticari olarak temin edilen Al6061 alaşımı; küresel bir morfolojiye, %99 saflığa ve ortalama ~10 µm partikül boyutuna sahiptir. Al6061 alaşımı; alüminyum (~%97.9), silisyum (~%0.8), magnezyum (~%1.2), bakır (~%0.25) ve diğer iz elementlerden oluşmaktadır. Ergime noktası 660°C ve teorik yoğunluğu ~2.71 g/cm³ olan Al6061 alaşımının özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Al6061 alaşımının özellikleri ([Sövüt, 2024](#))

Table 1. Properties of Al6061 alloy ([Sövüt, 2024](#))

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2.71
Elastisite modülü (GPa)	68.9 GPa
Ergime sıcaklığı (°C)	660
Çekme dayanımı (MPa)	310 MPa
Vickers sertliği (HV)	75
Akma dayanımı (MPa)	276 MPa
Poisson oranı	0.33

Diğer takviye elemanı olan silisyum karbür (SiC) ise; düşük termal genleşme katsayısı, yüksek ergime noktası, yüksek basma dayanımı, oksidasyona ve termal şoklara karşı yüksek direnç gibi özelliklere sahiptir. Ticari olarak Alfa Aesar firmasından (İngiltere) temin edilen SiC tozları %99 saflığa, keskin köşeli morfolojiye ve ~66 µm ortalama partikül boyutuna sahiptir. Tablo 2'de silisyum karbürün özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Silisyum karbürün özellikleri (Ranjith Kumar vd., 2018)**Table 2.** Properties of silicon carbide (Ranjith Kumar vd., 2018)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	3.2
Basma dayanımı (MPa)	1395
Çekme dayanımı (MPa)	240
Ergime sıcaklığı (°C)	2200
Sertlik (Moh's)	9-9.5
Kırılma tokluğu (MPa-m ^{1/2})	4.6
Kristal yapı	Altıgen (Hegzagonal)

2.2. Yöntem

2.1. Method

Bu araştırmada, Al6061-SiC kompozitleri toz metalurjisi ve sıcak presleme yöntemiyle üretilerek mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Üretim süreci; mekanik karıştırma, yüksek enerjili bilyalı değirmende karıştırma, filtrasyon, kurutma, eleme, presleme, sinterleme, indüksiyon altında sıcak presleme, zımparalama ve parlatma gibi işlemleri içermektedir (Şekil 1). Öncelikle SiC takviye tozu ve Al6061 tozu belirli oranlarda etanol içerisinde mekanik olarak 20 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar filtre kağıtları yardımıyla süzölmüştür. Daha sonra 50°C sıcaklıktaki etüv fırında 18 saat süresince kurutulmuştur. Topaklanmanın önlenmesi için toz karışımı elenmiştir. Üretilen tozlara şekil vermek için tozlar tek eksenli hidrolik pres yardımıyla yaklaşık 750 MPa basınçta 15 s süresince sıkıştırılmıştır. Böylece, 10×10×5 mm boyutlarında numuneler üretilebilmiştir. Üretilen numuneler sürekli vakum altında 60 dakika boyunca 600°C'de sinterlenmiştir. Sinterleme sonrasında malzemelerin mekanik özelliklerinin daha da iyileştirilmesi amacıyla numunelere indüksiyon altında sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Sıcak presleme işlemi, 500 °C sıcaklıkta 25 MPa basınç altında uygulanmıştır. İndüksiyon ocağında çalışma şartları ise 6 A çalışma akımı, 30 s ısıtma süresi, 30 s bekleme süresi ve 10 s soğutma süresidir. Bu işlemle mikroyapıda gözenekliliğin azaltılıp mekanik dayanımın artırılması hedeflenmektedir.

Üretilen numuneler üzerinde çeşitli mekanik testler ve mikroyapısal analizlerin yapılabilmesi için numuneler sırasıyla 600, 1200, 2000 gritlik SiC su zımparaları kullanılarak 15 dakika boyunca zımparalanmış ve ardından elmas çuha kullanılarak parlatılmıştır. Son aşamada ise üretilen kompozit malzemelere gerekli mekanik testler ve mikroyapısal analizler uygulanmıştır. Üretilen numunelerin deneysel yoğunluğu, Arşimet prensibine göre çalışan hassas terazi kullanılarak tespit edilmiştir. Aynı kompozisyona sahip en az üç farklı numunenin yoğunluğu ölçülüp ortalaması alınarak ortalama yoğunluk değeri belirlenmiştir. Deneysel yoğunluk (ρ_D), Eşitlik (1)'deki formül kullanılarak belirlenebilmektedir. Burada m_K numunelerin kuru ağırlıkları, m_a su içerisindeki asılı ağırlıkları, m_D suya doygun ağırlıkları ve ρ_{su} suyun yoğunluğudur (Şenel, 2018).

$$\rho_D = (m_K / (m_D - m_a)) \times \rho_{su} \quad (1)$$

Numunelerin teorik yoğunlukları (ρ_T), kullanılan tozların teorik yoğunlukları ve ağırlık yüzdeleri alınarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (2)'de $\%m_t$ ve $\%m_m$ sırasıyla takviye ve matris malzemelerin ağırlık yüzdelerini ifade etmektedir. ρ_t ve ρ_m ise takviye ve matris malzemelerin yoğunluklarını belirtmektedir (Şenel, 2018).

$$\rho_T = (\%m_m \times \rho_m) + (\%m_t \times \rho_t) \quad (2)$$

Bağıl yoğunluk ($\% \rho_R$) değeri, Eşitlik (3)'den faydalanılarak hesaplanmaktadır (Şenel, 2018).

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

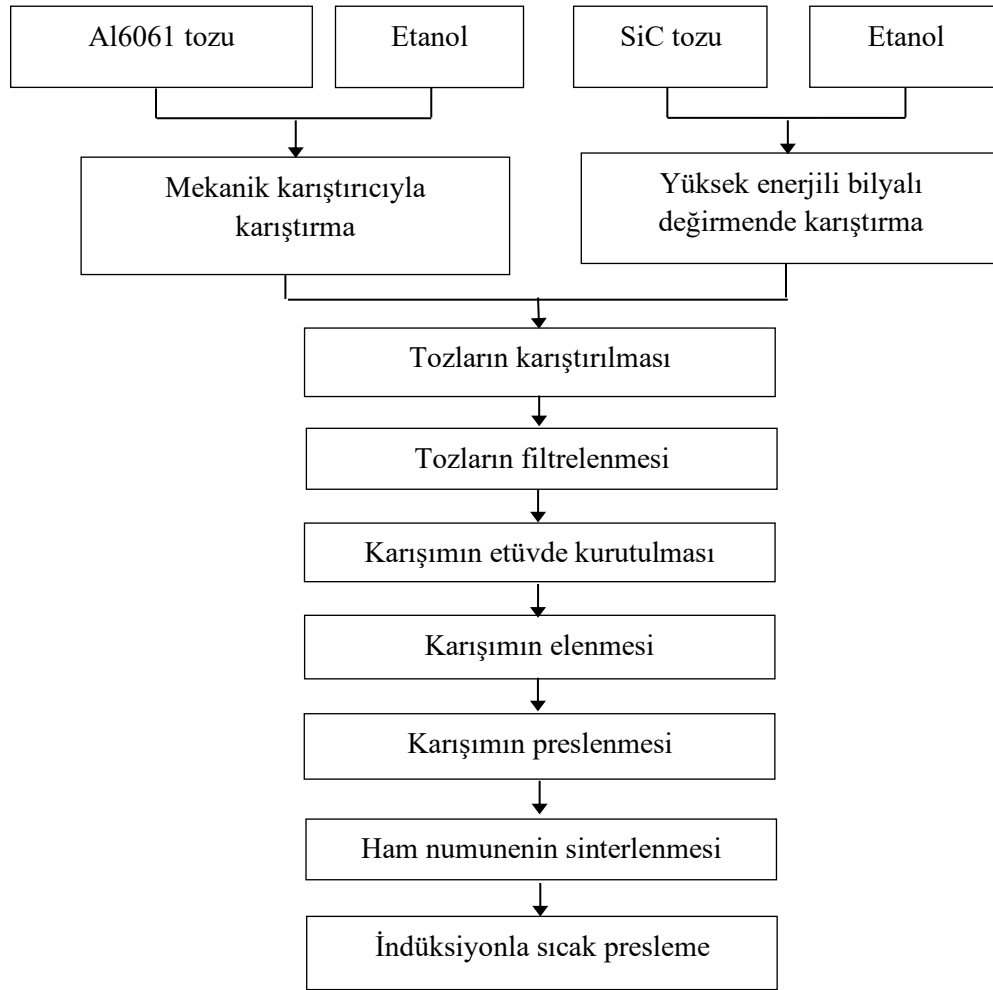
Kompozit malzeme üretiminde gözeneklilik oranının ($\%G$) belirlenmesi amacıyla Eşitlik (4) kullanılmaktadır (Şenel, 2018).

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

Sertlik değerlerini belirlemek amacıyla numunelere Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik testleri, TMTeck marka, HV-1000B model mikro Vickers sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, yüzeyleri parlatılmış numunelere 1.961 N'luk yük ve 15 saniye süreyle batıcı uç yardımıyla

uygulanmıştır. Numune yüzeyinin en az beş farklı noktasından ölçüm alınarak ortalama yüzey sertliği hesaplanmıştır. Numunelerin basma dayanımı, üniversal test cihazı (Mares tst-10t) ile belirlenmiştir. Test öncesinde numunelere 5 MPa'lık bir ön yük 1 mm/dk hızda uygulanmış ardından 3 mm/dk hızda basma testi gerçekleştirilmiştir. Aynı seriden en az üç numunenin basma dayanımı belirlenip ortalaması alınarak ortalama basma dayanımı tespit edilmiştir.

Numunelerin içyapı analizi, X-ışını kırınımı (XRD) cihazı ve taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) gerçekleştirilmiştir. XRD analizi, Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi (KİTAM)'nde bulunan Rigaku marka Smartlab model XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında SEM analiziyle tozların morfolojik yapısı ve kompozit malzemelerin kırık yüzey analizleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin elementel dağılım haritaları SEM cihazında yer alan Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopuyla (EDX) elde edilmiştir. Söz konusu analizler, Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi (KİTAM)'nde bulunan Jeol JSM7001-F model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozitlerin üretim aşamaları
Figure 1. Production stages of SiC-reinforced Al6061 matrix composites

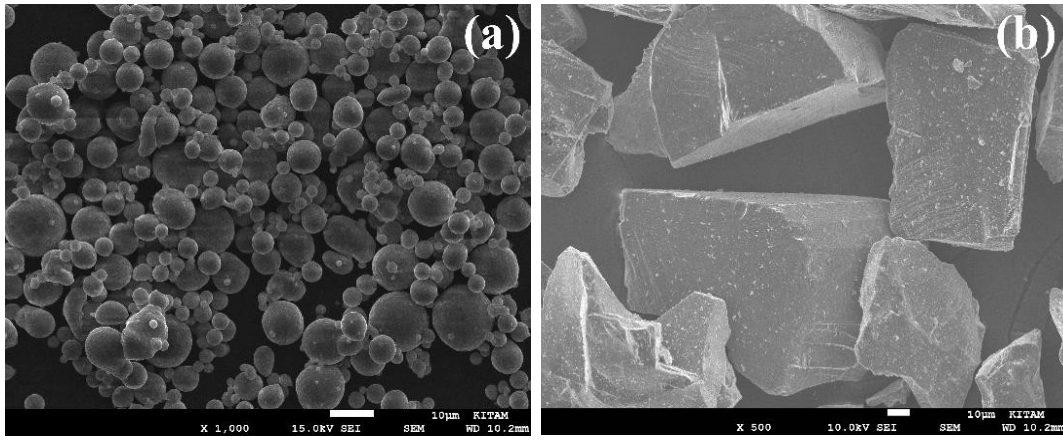
3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Toz Karakterizasyonu

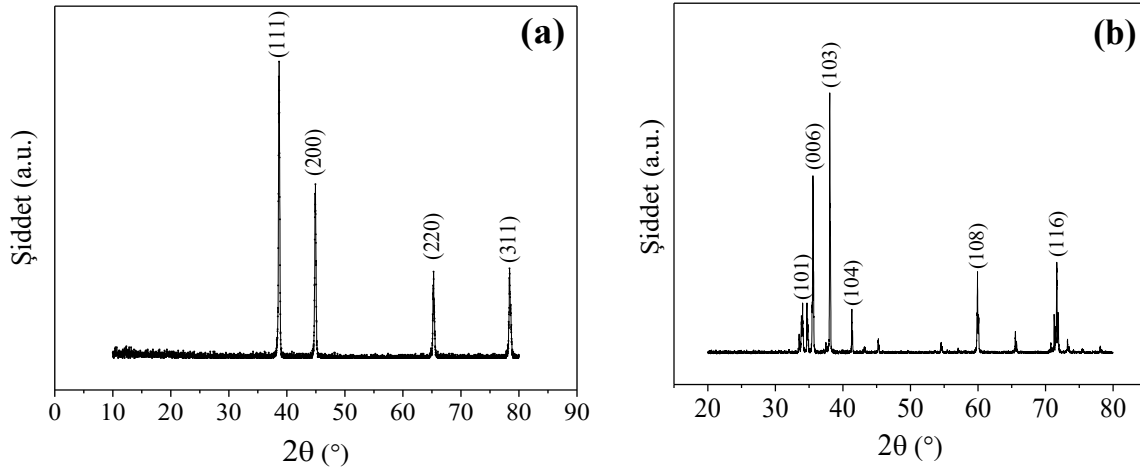
3.1. Powder characterization

Bu bölümde, malzeme üretiminde kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) faz incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Al6061 tozunun SEM görüntüleri incelendiğinde, toz boyutunun ~10 µm ve küresel morfolojik bir yapıda olduğu belirlenmiştir (Şekil 2a). Takviye edilen SiC tozu ise keskin köşeli bir formda olup ortalama toz boyutu ~66 µm'dir (Şekil 2b).



Şekil 2. Al6061 alaşım (a) ve SiC (b) tozlarının SEM resimleri
Figure 2. SEM pictures of Al6061 alloy (a) and SiC powders (b)

Al6061 alaşımı ve SiC tozlarının XRD faz analizleri, tozları ve kompozit yapı içerisindeki alüminyum ve SiC'nin varlığını doğrulamak amacıyla yapılmıştır. XRD örgü desenleri incelendiğinde, matris malzemesi olarak kullanılan Al6061 alaşımının kırınım açılarının $2\theta \sim 38^\circ$, 45° , 66° ve 78° ve bu kırınımlara karşılık gelen düzlemlerin (111), (200), (220), (311) olduğu belirlenmiştir (Şekil 3a). Takviye malzemesi olarak kullanılan SiC'nin kırınım açılarının ise $2\theta \sim 34^\circ$, 36° , 38° , 41° , 60° ve 72° ve bu kırınımlara karşılık gelen düzlemlerin (101), (006), (103), (104), (108), (116) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3b). Bu analiz, kompozit yapıda oluşan fazların ve ikincil fazların tespiti açısından da önem arz etmektedir.

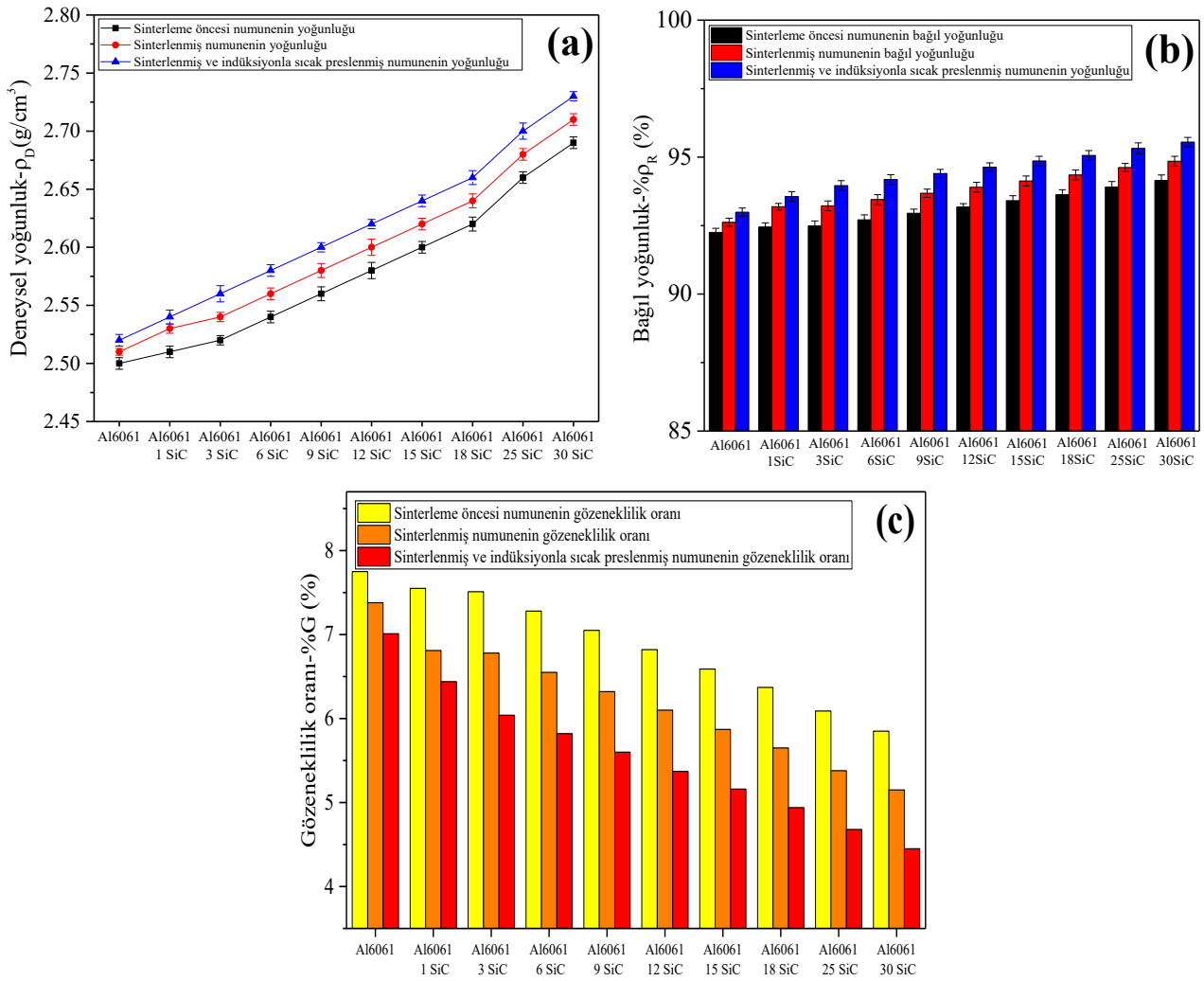


Şekil 3. XRD faz analizleri: Al6061 alaşım (a) ve SiC tozu (b)
Figure 3. XRD phase analyses: Al6061 alloy (a) and SiC powder (b)

3.2. Gözeneklilik ve yoğunluk ölçüm sonuçları

3.2. Porosity and density measurement results

Al6061 matrisli SiC takviyeli kompozitlerin takviye oranı ve indüksiyonla sıcak presleme etkisine bağlı olarak yoğunluk değerleri, bağıl yoğunluk değerleri ve gözeneklilik oranları Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil 4a ve 4b incelendiğinde, sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinin etkisiyle kompozitlerin yoğunluk ve deneysel yoğunluk değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Maksimum deneysel yoğunluk ($2.73 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$), maksimum bağıl yoğunluk (%95.55) ve minimum gözeneklilik oranı (%4.45) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozitte gözlemlenmiştir (Şekil 4a-c). Yoğunluk değerlerinin artması Al6061 alaşımının teorik yoğunluğu olan 2.71 g/cm^3 'e kıyasla daha yüksek teorik yoğunluğa sahip olan SiC partiküllerinin (3.21 g/cm^3) mikro yapıya eklenmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda; SiC katkısıyla bağıl yoğunluğun %90-93 ve gözeneklilik oranının %7-10 seviyelerinde rapor edilmesine karşın; mevcut çalışmada %95.55'lik bağıl yoğunluğa ve %4.45'lik gözeneklilik oranına ulaşılmıştır. Bu durum, SiC partiküllerinin içyapıda homojene yakın bir şekilde dağılmasından ve matris-takviye eleman arasındaki iyi ıslatma davranışından kaynaklandığı düşünülmektedir (Bharathi & Kumar, 2023; Wasik vd., 2024; Mercan, 2024).



Şekil 4. Al6061 alaşımı ile Al6061-SiC kompozitlerin deneysel yoğunluk (a), bağlı yoğunluk (b) ve gözeneklilik oranı (c) değerleri

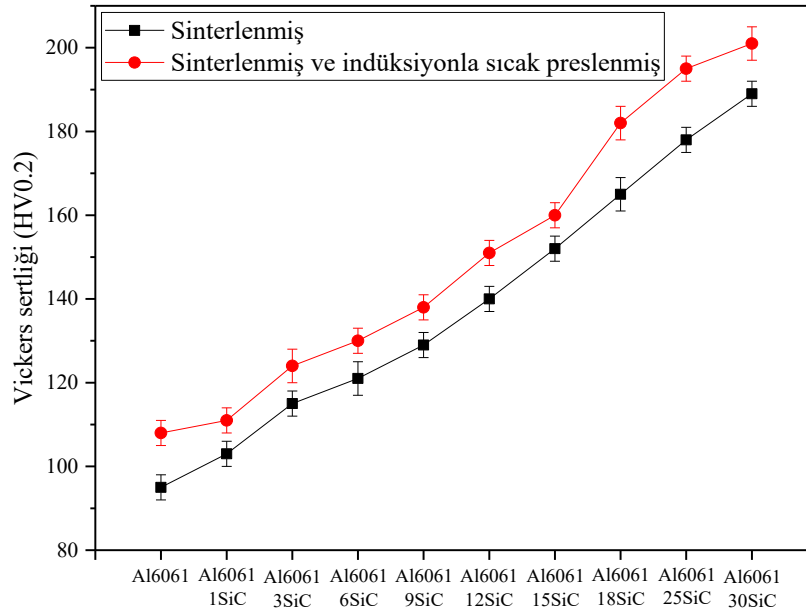
Figure 4. Experimental density (a), relative density (b) and porosity ratio (c) values of Al6061 alloy and Al6061-SiC composites

3.3. Sertlik ölçüm sonuçları

3.3. Hardness measurement results

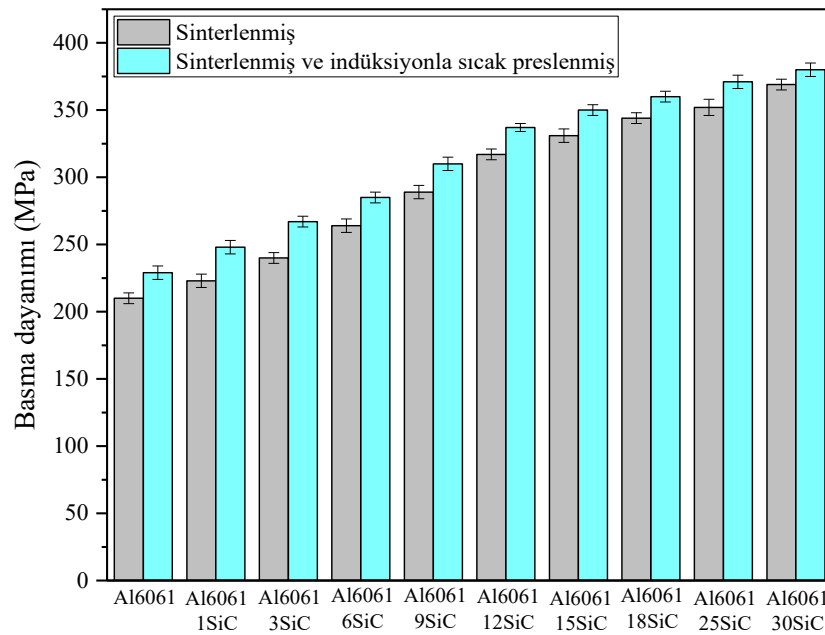
Al6061 matrisli kompozitlerin Vickers sertlik değerleri, indüksiyonla sıcak presleme etkisine ve SiC katkısına göre Şekil 5'te sunulmuştur. Maksimum Vickers sertliğine (201 ± 4 HV) indüksiyonla sıcak preslenen Al6061-%30SiC kompozitte ulaşılmıştır. Sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozitte sertlik değeri, sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımına (95 ± 3 HV) kıyasla %211.6 oranında artmıştır. Hem sinterleme hem de indüksiyonla sıcak presleme işlemlerinde SiC ilavesiyle sertlik değerlerinde artış görülmüştür. SiC, yüksek sertlik ve mukavemete sahip bir malzeme olduğundan kompozitlerin sertliğini arttırmıştır. Ayrıca indüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerin sertlik değerleri, sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Bu artışın nedeni, sıcaklık ve basıncın etkisiyle yapı içindeki gözeneklerin azalması ve yumuşak matris bölgelerine takviye elemanının yerleşmesidir. Literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında; ağırlıkça %10 SiC katkısında kompozitin sertlik değerinin 179 HV'ye kadar yükseldiği rapor edilmesine karşın; mevcut çalışmada sertlik değeri 201 HV'ye kadar çıkmıştır. Bu durum, indüksiyonla sıcak preslemenin etkisiyle sertliğin ciddi oranda arttığını ortaya koymaktadır (Mercan, 2024; Hassan vd., 2025).

Şekil 6'da Al6061-SiC kompozitlerde takviye oranının ve indüksiyonla sıcak preslemenin basma dayanımı üzerine olan etkisi gösterilmektedir. Elde edilen veriler, silisyum karbürün yüksek sertliğe sahip yapısı nedeniyle takviye miktarındaki artışın kompozitlerin basma dayanımını genel olarak artırdığını ortaya koymuştur.



Şekil 5. Al6061 alaşımı ile Al6061-SiC kompozitlerin Vickers sertlikleri
Figure 5. Vickers hardness of Al6061 alloy and Al6061-SiC composites

En yüksek basma dayanımı (380 ± 3 MPa) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061%30SiC kompozitte tespit edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımına (210 ± 5 MPa) kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozitte basma dayanımı %80.9 oranında artmıştır. Kompozit malzemelere sinterleme sonrası uygulanan indüksiyon altında sıcak presleme işleminin kompozitin dayanımını ~%5 oranında arttırdığı sonucuna varılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda SiC katkısıyla kompozitin basma dayanımı değerinin 350 MPa'a kadar yükseldiği rapor edilmiştir (Şenel vd., 2018; Bharathi & Kumar, 2024). Mevcut çalışmada ise basma dayanımı 380 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu artışta indüksiyonla sıcak preslemenin etkisiyle tane temas alanının artmasının ve gözenekliliğin azalmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Kompozitin dayanımının artmasında etkili olan mekanizmanın yük transfer mekanizması olduğu öngörülmektedir. Çünkü bu mekanizma sayesinde yük arayüzey bağı aracılığıyla takviye elemanına aktarılmakta ve bu durum da kompozitin taşıyabileceği basma yükünün artmasını sağlamaktadır.

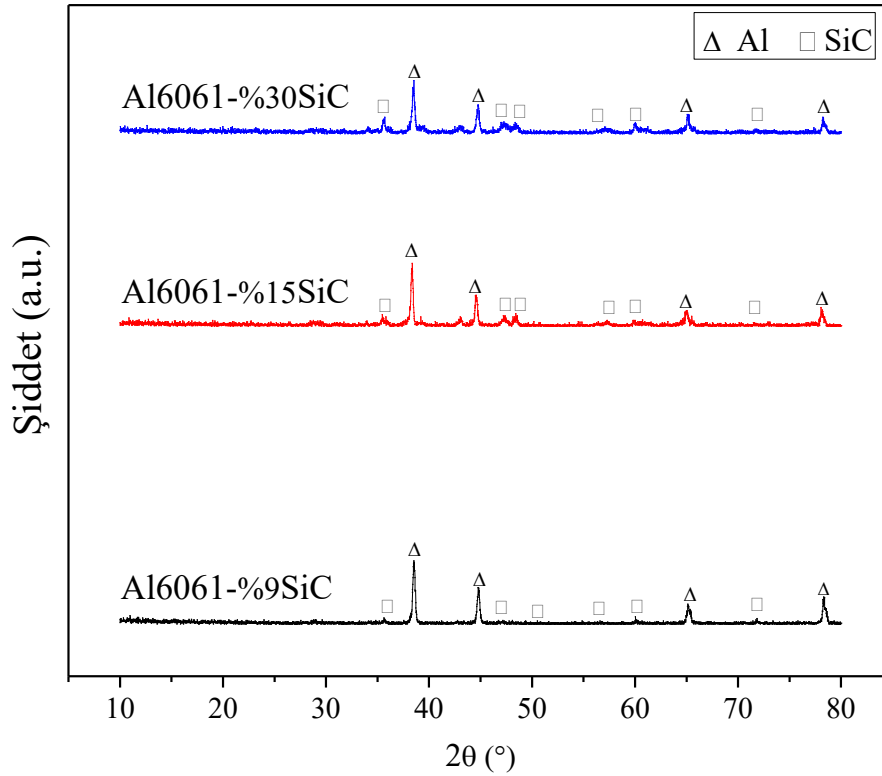


Şekil 6. Al6061 alaşımı ile Al6061-SiC kompozitlerin basma dayanımı
Figure 6. Compressive strength of Al6061 alloy and Al6061-SiC composites

3.4. Kompozitlerin XRD ve SEM Analizleri

3.4. XRD and SEM Analyses of Composites

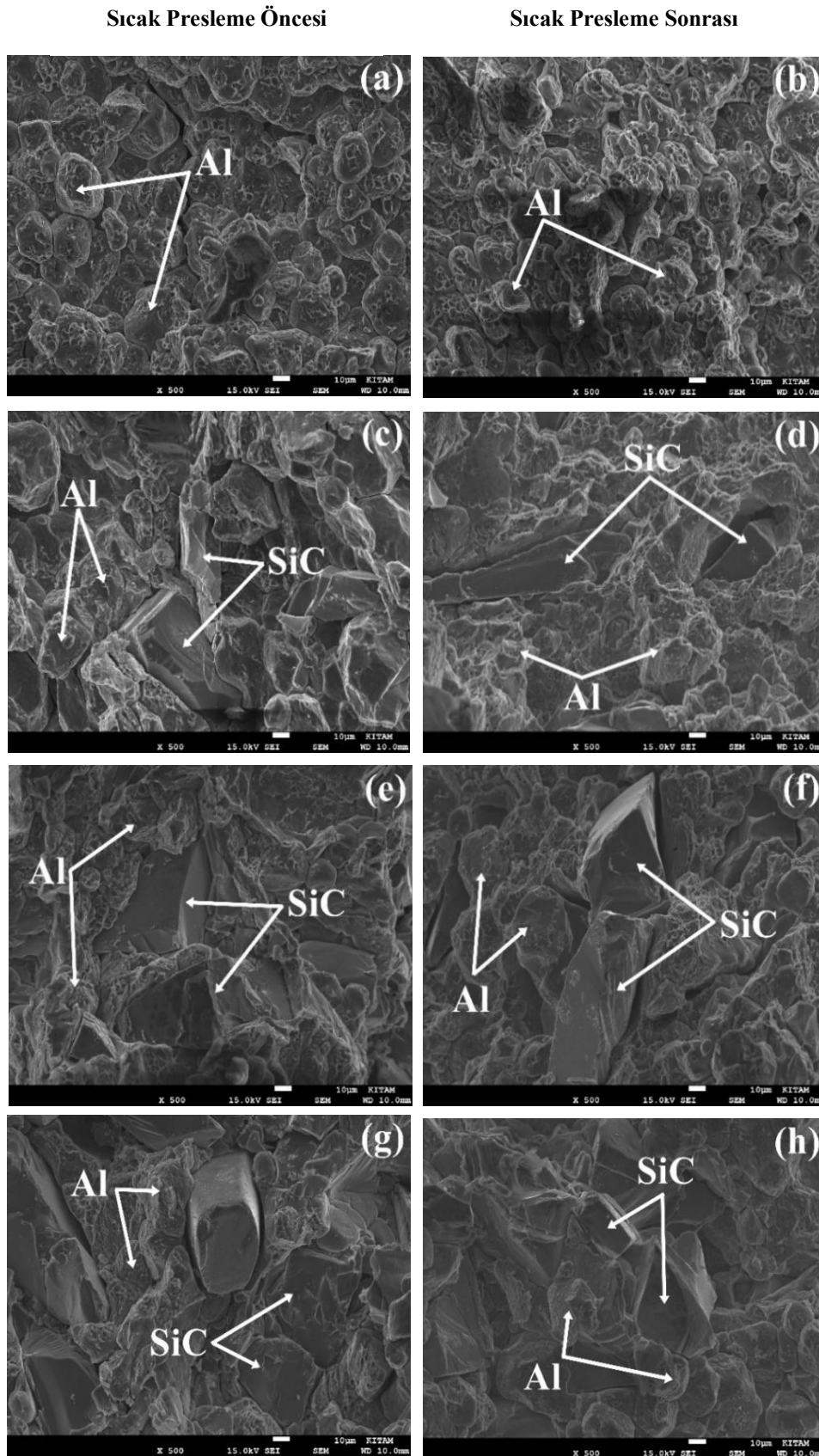
Bu bölümde, Al6061-%9SiC, Al6061-%15SiC ve Al6061-%30SiC kompozitlerin içyapısındaki fazları belirlemek için Şekil 7’de gösterildiği gibi XRD faz analizleri incelenmiştir. Faz analizlerinde, alüminyum alaşımı " Δ " sembolü ile, SiC ise " $\square$ " sembolü ile temsil edilmiştir. Şekil analiz edildiğinde; tüm kırınımın SiC ve alüminyum fazlarına ait olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, sinterleme işlemi yaklaşık 600°C’de gerçekleştiğinden ve ikincil faz oluşumu da yaklaşık 900 °C’de gerçekleşebildiğinden içyapıda Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazlara rastlanmamıştır. Bu durum, kompozitin mekanik dayanımını olumlu etkilemiştir.



Şekil 7. Al6061-%9SiC, Al6061-%15SiC ve Al6061-%30SiC kompozitlere ait XRD faz analizleri
Figure 7. XRD phase analyses of Al6061-9%SiC, Al6061-15%SiC ve Al6061-30%SiC composites

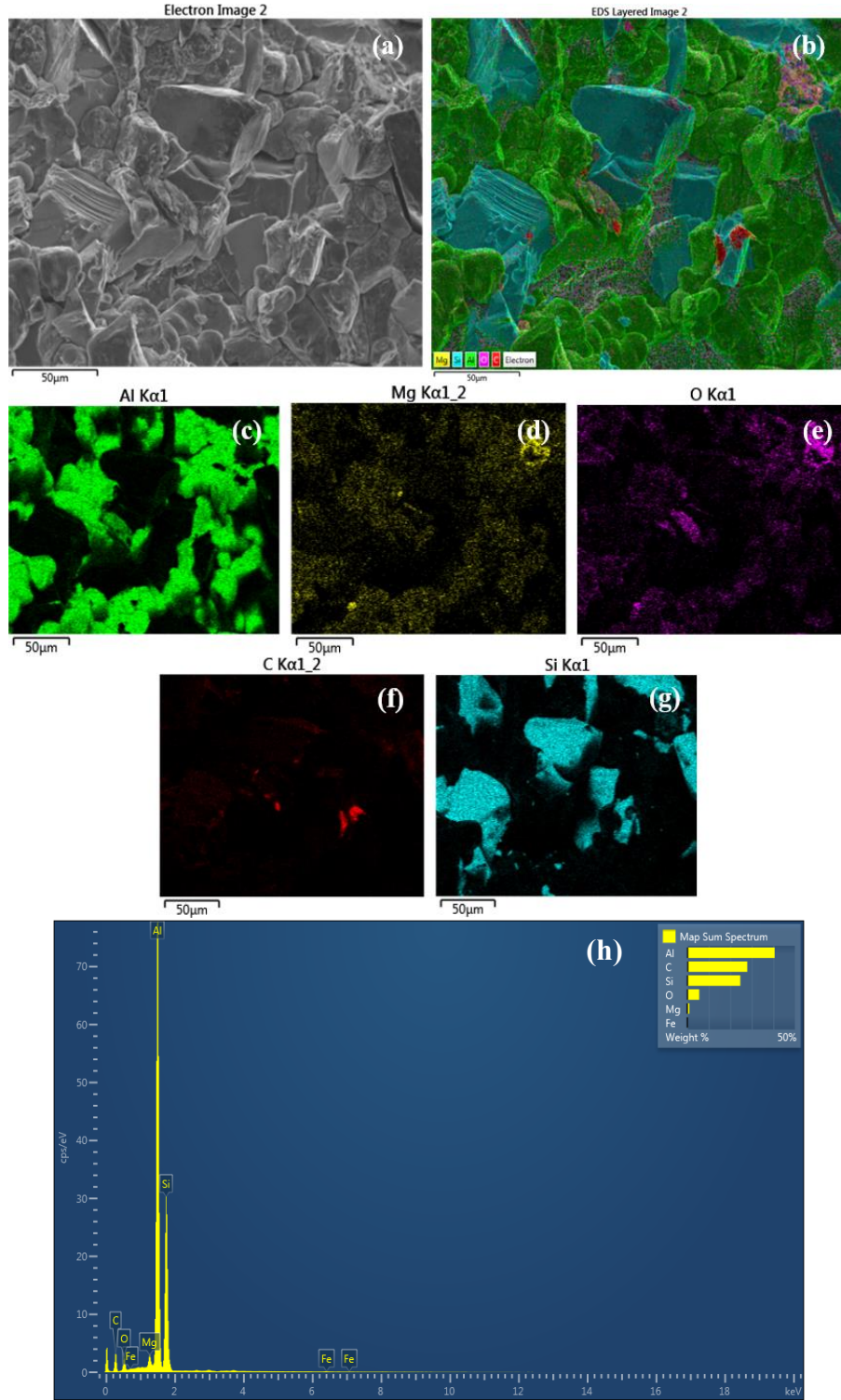
Al6061 alaşımı ile Al6061-%9SiC, Al6061-%15SiC, Al6061-%30SiC kompozitlerin sıcak presleme sonrası ve öncesi kırık yüzeylerine ait SEM resimleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde SiC tozlarının kompozit yapı içinde homojene yakın bir şekilde dağıldığı görülmüştür (Şekil 8c-h). SiC takviye oranının artmasıyla gözenekliliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı kompozit yapı için indüksiyonla sıcak preslemenin etkisiyle matris ve takviye eleman arasındaki bağlanmanın güçlendiği, ıslatmanın iyileştiği, partiküller arası temas yüzey alanının arttığı şekil üzerinden görülebilmektedir. Ayrıca sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde, sıcaklıkla birlikte uygulanan basınç etkisiyle daha yoğun bir mikroyapı tespit edilmiştir (Şekil 8b, d, f, h).

Şekil 9’da sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozitlerin kırık yüzeyine ait SEM-EDX görüntüleri ve element dağılım haritaları verilmiştir. Al ve Mg elementleri Al6061 alaşımının dağılımını yansıtmaktadır (Şekil 9c, d). Kompozit yapı içerisindeki elementlerin (Al, Si, Mg, C, O) her biri farklı renk ile gösterilmiştir. Si ve C elementleri yapı içerisindeki SiC varlığını doğrulamaktadır (Şekil 9f, g). Görüntüler incelendiğinde, SiC partiküllerin homojene yakın bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durumun da kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Al6061-%30SiC kompozite ait nicel (kantitatif) görüntü analizi, incelenen bölgedeki elementlerin (Al, Si, Mg, C) ağırlıkça dağılım oranlarını vermektedir (Şekil 9h). Bu analize göre; Si ve C elementlerinin ağırlıkça yaklaşık %30 oranında mikroyapıda yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 9h). Bu durum, katkı malzemesi olarak mikroyapıya eklenen SiC partikülleriyle tutarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. İndüksiyonla sıcak presleme öncesi Al6061 alaşımına (a), Al6061-%9SiC (c), Al6061-%15SiC (e), Al6061-%30SiC (g) ve indüksiyonla sıcak presleme sonrası Al6061 alaşımına (b), Al6061-%9SiC (d), Al6061-%15SiC (f), Al6061-%30SiC (h) kompozitlere ait SEM resimleri

Figure 8. SEM pictures of the composites of Al6061 alloy (a), Al6061-9%SiC (c), Al6061-15%SiC (e), Al6061-30%SiC (g) before induction hot-pressing; Al6061 alloy (b), Al6061-9%SiC (d), Al6061-15%SiC (f), Al6061-30%SiC (h) after induction hot-pressing



Şekil 9. İndüksiyonla sıcak presleme sonrası Al6061-%30SiC kompozite ait SEM (a), SEM-EDX (b), element dağılım haritaları (c-g) ve kantitatif element dağılım oranları (h)

Figure 9. SEM (a), SEM-EDX (b), element distribution maps (c-g) and quantitative element distribution ratios (h) of Al6061-30%SiC composite after induction hot-pressing

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışma kapsamında, Al6061 alaşımına ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 25 ve 30 oranlarında SiC takviyesi yapılarak Al6061-SiC kompozitleri üretilmiştir. Bu kompozitlerin sıcak presleme öncesi ve sonrası deneysel yoğunlukları, bağıl yoğunlukları, gözeneklilik oranları, Vickers sertlikleri, basma dayanımları ve mikro yapıları incelenmiş olup sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- SiC ile takviye edilmiş Al6061 matrisli kompozitler arasında, maksimum deneysel yoğunluk ($2.73 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$), maksimum bağıl yoğunluk (%95.55), minimum gözeneklilik oranı (%4.45), en yüksek Vickers sertliği ($201 \pm 4 \text{ HV}$) ve basma dayanımı ($380 \pm 3 \text{ MPa}$) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozitinde elde edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al6061-%30SiC kompozit ile sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımı karşılaştırıldığında, deneysel yoğunlukta %7.96'lık bir artış, gözeneklilik oranında %30.2'lik bir azalma, Vickers sertlik değerinde %98.95'lik bir artış ve basma dayanımında %75.7'lik bir artış tespit edilmiştir. İndüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%30SiC kompozit sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımıyla karşılaştırıldığında, deneysel yoğunlukta %8.76'lık bir artış, gözeneklilik oranında %39.7'lik bir azalma, Vickers sertlik değerinde %111.58'lik bir artış ve basma dayanımında %80.9'luk bir artış tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerin iyileşmesinde, sert silisyum karbür partiküllerinin iç yapıda homojene yakın dağılımı etkili olmuştur.
- Hem sinterlemenin hem de indüksiyonla sıcak preslemenin etkisiyle kompozitin sertlik ve basma dayanımı değerlerinde artış görülmüştür. İndüksiyonla sıcak preslenmiş kompozitlerin sertlik ve basma dayanımı değerlerinin, sadece sinterlenmiş kompozitlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu artışın nedeni, sıcaklık ve basıncın etkisiyle yapı içindeki gözeneklerin azalması ve yumuşak matris bölgelerine takviye elemanın yerleşmesidir. Ayrıca bu işlem, matris-takviye eleman arasındaki temas yüzeyi alanının artmasını sağlamaktadır. Böylece, taneler arası mesafe azalarak kompozitin mekanik dayanımı artmaktadır.
- SEM analizleri, SiC partiküllerinin Al6061-%30SiC kompozit yapıda homojene yakın bir şekilde dağıldığını ortaya koymuştur. Ayrıca ağırlıkça %30 oranında SiC takviyesi yapılan silisyum karbürün varlığı ve mikroyapıdaki ağırlıkça katkı oranı SEM-EDX analizleriyle doğrulanmıştır.
- XRD faz analizlerinde, mevcut fazların tamamının Al6061 alaşımı ve SiC partikülleri ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Alüminyum ile SiC arasında reaksiyon sonucu oluşabilecek Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazlara rastlanmamıştır. İndüksiyonla sıcak presleme işlemi uygulanan kompozitlerde sadece sinterlenmiş kompozitlere kıyasla, mikroyapının daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen ölçüm ve analizlerin sonucunda, Al6061-SiC kompozitlerde en ideal SiC takviye oranının ağırlıkça %30 olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası uygulanan indüksiyon altında sıcak presleme işleminin kompozitlerin mekanik dayanımını olumlu etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca elde edilen bulgular ışığında; üretilen Al6061-SiC kompozitlerin havacılık ve uzay, denizcilik, yapı ve inşaat, elektronik ve otomotiv endüstrilerinde kullanılabileceği öngörülmektedir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAPKOB) tarafından PYO.MUH.1901.22.008 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz. Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Bharathi, P. & Kumar, T. S. (2023). Mechanical characteristics and wear behaviour of Al/SiC and Al/SiC/ B₄C hybrid metal matrix composites fabricated through powder metallurgy route. *Silicon*, 15, 4259-4275. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02347-0>
- Demir, M. (2021). *İndüksiyonla sıcak işlemin grafen ve/veya Si₃N₄/B₄C takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerine ve mikroyapısına olan etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Hassan, A.E. S.M., Elmashad, A. M., El-Sheikh, M. N., Mohammed, M. M., Abu-Okail, M., Irfan, O. M. & Abu-Oqail, A. M. I. (2025). Effect of SiC content and hot compaction on the microstructure, thermal, mechanical, and tribological characteristics of aluminum matrix nanocomposites produced via powder metallurgy. *Journal of Engineering Sciences*, 53(6), 211-236. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2025.382488.1503>
- Kumar Maurya, N., Maurya, M., Srivastava, A. K., Dwivedi, S. P., Kumar, A. & Chauhan, S. (2020). Investigation of mechanical properties of Al6061/SiC composite prepared through stir casting technique. *Materials Today: Proceedings*, 25, 755–758. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.003>
- Laxmi M. & Sunil Kumar, Mr. (2017). Fabrication and testing of aluminium 6061 alloy & silicon carbide metal matrix composites. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(6), 2207-2211.
- Melik W., Boumerzoug, Z. & Delaunois F. (2022). Characterization of the Al6061 alloy reinforced with SiC nanoparticles and prepared via powder metallurgy. *Malaysian Journal on Composites Science & Manufacturing*, 9(1), 22–34.
- Mercan, A. (2024). *Hurda alüminyumdan grafen ve SiC takviyeli alüminyum hibrit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Özdemir, B. (2023). *Polimer matrisli kompozit malzeme imalatı için vakum destekli mekanizmaların geliştirilmesi ve performanslarının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Pal, M. K., Vikram, A. & Bajaj, V. (2019). Enhanced microstructure and mechanical properties of sic particle reinforced aluminium alloy composite materials. *Acta Metallurgica Slovaca*, 25(4), 253–258. <https://doi.org/10.12776/ams.v25i4.1359>
- Ranjith Kumar, G., Rajyalakshmi, G. & Kumar Manupati, V. (2018). Surface micro patterning of aluminium reinforced composite for aerospace applications through high energy pulse laser peening. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6963–6972. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.359>
- Saikrupa, C., Chandra Mohan Reddy, G. & Venkatesh, S. (2021). Aluminium metal matrix composites and effect of reinforcements – a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1057(1), 012098, 2-3. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1057/1/012098>
- Sivananthan, S., Ravi, K. & Samson Jerold Samuel, C. (2020). Effect of SiC particles reinforcement on mechanical properties of aluminium 6061 alloy processed using stir casting route. *Materials Today: Proceedings*, 21, 968–970. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01053-z>
- Sövüt, C. (2024). *SiC ve grafen takviyeli Al6061 matrisli hibrit kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Surya, M.S. (2022). Effect of SiC weight percentage and sintering duration on microstructural and mechanical behaviour of Al6061/SiC composites produced by powder metallurgy technique. *Silicon*, 14, 2731–2739. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01053-z>
- Şenel, M.C. (2018). *Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi* [Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Şenel, M. C. & Üstün, M. (2022). Dry sliding wear and friction behavior of graphene/ZrO₂ binary nanoparticles reinforced aluminum hybrid composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 9253-9269. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06661-4>

- Şenel, M. C., Gürbüz, M. & Koç, E. (2018). Fabrication and characterization of synergistic Al-SiC-GNPs hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 154, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.035>
- Şenel, M. C., Gürbüz, M. & Koç, E. (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36-47.
- Taşkın, A. & Şenel, M. C. (2023). Tribological properties and microstructures of tungsten carbide and few-layer graphene-reinforced aluminum-based composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77, 445. <https://doi.org/10.1007/s12666-023-03114-w>
- Wasik, A., Leszczyńska-Madej, B. & Noga, P. (2024). Hot extrusion of SiCp/Al-Cu composites: optimizing mechanical properties through microstructural control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 134, 3611-3620. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14329-6>