



INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al₂O₃ AND SiC REINFORCED AA2024 BASED COMPOSITES

Uğur Çalığülü^{*1}, Aykut Çanakçır², Mustafa Türkmen³, Nida Darcan¹, M. Vahittin Kaçmış¹

¹Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon

³Gebze Teknik Üniversitesi, Ulaşım Teknolojileri Enstitüsü, Gebze/Kocaeli

Abstract

Original scientific paper

Composite materials used in engineering fields such as the automotive and defense industries are produced by many methods due to their superior mechanical and physical properties. In addition to the advantages of forming powder-based composites produced by the powder metallurgy method, the problems that are less in number during production make this method more attractive. AA2024 aluminum alloy, chosen as the matrix, is preferred in the aerospace and automotive industries due to its high strength/weight ratio as it is alloyed with copper. In this study, Silicon Carbide (SiC) was preferred due to its high wear resistance and high heat resistance, and in addition, Aluminum Oxide (Al₂O₃) was preferred due to its suitable interface bonding ability with aluminum alloy (AA2024). The samples were produced by hot pressing method at 560 °C for 120 minutes and under 500 MPa pressure by preparing AA2024/Al₂O₃ and AA2024/SiC powder mixtures with different additive ratios. In order to examine the microstructure and mechanical properties of AA2024 matrix Al₂O₃ and SiC reinforced composites obtained by powder metallurgy method, in addition to SEM images, EDS and XRD analyzes, microhardness, density, tensile, corrosion and impact tests were performed. According to the test results, the best tensile and impact test results of AA2024/Al₂O₃ and AA2024/SiC composite materials were determined in 2% Al₂O₃ and SiC reinforced composite materials; At higher reinforcement ratios, there was a decrease in the impact test values. It has been determined that the increase in the Al₂O₃ and SiC reinforcement ratio causes an increase in the corrosion resistance and positively affects both the hardness and mechanical properties of the AA2024 matrix.

Keywords: AA2024, Al₂O₃, SiC, composites, mechanical properties.

Al₂O₃ ve SiC TAKVİYELİ AA2024 ESASLI KOMPOZİTLERİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Özet

Orijinal bilimsel makale

Üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle, otomotiv ve savunma sanayii gibi mühendislik alanlarında kullanılan kompozit malzemeler bir çok yöntemle üretilmektedirler. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen toz esaslı kompozitlerin şekil verme üstünlükleri yanında, üretim sırasındaki sayıca daha az olan problemler bu yöntemi daha çekici kılmaktadır. Matris olarak seçilen AA2024 alüminyum alaşımı, bakır ile alaşımlandırıldığı için yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olması nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrisinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada, bir çok kullanım alanı olan, yüksek aşınma direncine ve yüksek ısı dayanımına sahip olmasından dolayı Silisyum Karbür (SiC) ve ilave olarak, alüminyum alaşımı (AA2024) ile uygun ara yüzey bağlanma yeteneğine sahip olmasından dolayı Alüminyum Oksit (Al₂O₃) tercih edilmiştir. Numuneler, farklı katkı oranlarında AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC toz karışımları hazırlanarak, 560 °C sıcaklıkta, 120 dakika ve 500 MPa basınç altında sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle elde edilen AA2024 matrisli Al₂O₃ ve SiC takviyeli kompozitlerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemek amacıyla, SEM görüntülerine ilave olarak, EDS ve XRD analizleri, mikrosertlik, yoğunluk, çekme, korozyon ve darbe testleri yapılmıştır. Yapılan test sonuçlarına göre, AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin en iyi çekme ve darbe testi sonuçları, % 2 Al₂O₃ ve SiC takviyeli kompozit malzemelerde tespit edilmiştir; daha yüksek takviye oranlarında ise darbe testi değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Al₂O₃ ve SiC takviye oranındaki artışın korozyon direncinin artmasına sebep olduğu ve AA2024 matrisinin hem sertlik ve hem de mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA2024, Al₂O₃, SiC, kompozitler, mekanik özellikler.

* Corresponding author.

E-mail address: ugurcaligulu@gmail.com (U. Çalığülü)

Received 31 December 2022; Received in revised form 22 March 2023; Accepted 22 March 2023

2587-1943 | © 2023 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1227533>

1 Giriş

Günümüzde savunma, uzay, havacılık ve otomotiv gibi önemli alanlarda hızla gelişen teknoloji dolayısıyla geleneksel malzemeler yetersiz kalmış ve bu malzemelerin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Hızla gelişen teknolojinin doğurduğu bu malzeme ihtiyacı yeni ve üstün özelliklere sahip olan kompozit malzemelerin üretilmesinin temel nedeni oluşturmaktadır [1].

Toz metalürjisi, karmaşık şekilli parçaların yanı sıra metal matrisli kompozit ve metal alaşımları üretimine olanak sağladığından dolayı tungsten lamba teli, zırh delici mermiler, diş dolguları ve otomotiv güç aktarma dişlileri gibi birçok alanda kullanılan önemli bir üretim yöntemidir. Toz metalürjisi üretim yöntemi kısaca; çok küçük parçacıkların birbirine bağlanmasıyla bir parça haline getirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem üstün mikro yapısal özelliklere sahip parça üretimi, belirli derecede gözeneklilik ve geçirgenlik sağlaması gibi avantajlarından dolayı kompozit malzeme üretimi için sıklıkla tercih edilmektedir [2].

Kompozit malzeme, birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan yeni bir malzemedir. Bu malzemeler kendisini oluşturan malzemelerin tek başına sahip olamayacağı birçok özelliği diğer malzemelerle bir araya gelerek tek bir malzemede toplama olanağı sağlarlar. Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanları olmak üzere iki ayrı kısımdan oluşmaktadır. Ayrıca bu malzemeler kendi içlerinde birbirlerinden ayrılmayı sağlayan ara yüzeylere sahip olduğundan dolayı kendilerine has özellikleri muhafaza etmektedirler [3].

Metal matrisli kompozitler, yüksek süneklik ve tokluk özelliklere sahip olan metaller ile yüksek mukavemetli seramik malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşur. Bu çalışmada, matris malzemesi olarak hafif ve sünek olduğu için AA2024 kullanılmıştır. AA2024 matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak genellikle TiC, B₄C, ZrO₂, Al₂O₃ ve SiC kullanılmaktadır [4]. SiC, kompozit imalatında sıklıkla kullanılan takviye elemanı olup yüksek aşınma direncine ve yüksek ısı dayanımına sahiptir ve benzer özellikleri taşıyan Al₂O₃'ün diğer bir avantajı ise AA2024 ile uygun ara yüzey bağlanma yeteneğine sahip olmasıdır [5].

Farklı SiC ve Al₂O₃ katkı oranlarına sahip alüminyum matrisli kompozit malzemeler üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Yüksek dayanıma sahip zırh çeliği ve Al-7017 alaşımının farklı ısı işlem parametreleri ve kalınlıklarda 7.62 mm'lik mermiler karşındaki balistik performanslarını incelenmiştir. Sonuç olarak merminin şekline bakarak hedefin balistik performansı hakkında yorum yapılabileceği, 200 °C 'de menevişleme işlemi görmüş çeliğin en yüksek balistik performans gösterdiği ve iyi dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir [6]. Yüksek mukavemete sahip alüminyum alaşımlarına SiC ilavesi sonucu, aşınma direncinin SiC parçacıkları etkisi ile yükselmiştir [7]. Alüminyum matrisli B₄C, SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit köpük malzemeleri ramor 500 zırh çeliği ile bir araya getirerek 7,62x51 mm çelik zırh delici mermiler karşısındaki balistik performansını incelenmiş ve sonuç olarak SiC parçacıkları matris ile uyumlu ara yüzey oluşturmuş, Al₂O₃ parçacıkları ise kısmen iyi ara yüzey oluşturmuştur [8]. SiC ve B₄C takviyeli alüminyum esaslı

kompozit malzemeler üretilmiş ve kompozit yapı içerisinde takviye miktarının artmasıyla sertlik değerinin artmıştır [9]. Al-Mg/SiC kompozit malzemelerin korozyon davranışları testi sonucuna göre Al-Mg alaşımının SiC takviye malzemeleri arasında oluşan bileşiklerin korozyon dayanımını arttırmıştır [10]. ZA27 matris alaşımının grafen nano levha ile takviyelendirilen nanokompozit malzemeleri toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilmiş ve artan grafen nanolevha miktarı nanokompozitin korozyon direncini arttırmıştır [11]. AA2024 matris malzemesinde B₄C ve TiC takviye malzemesi oranları arttıkça kompozit malzemelerin sertlik, nihai mukavemet ve akma mukavemeti artış gösterirken süneklik değerinde azalmalar olmuştur [12]. Alüminyum tozlarının içerisine farklı oranlarda SiC takviye ederek gerçekleştirilen kompozit malzeme üretimi sonucu takviye malzemesinin boyutu ve oranının artmasıyla üretilmiş olan numunelerin yoğunluklarının arttığını ve sertlik değerlerinde artış olduğunu tespit edilmiştir [13]. Toz metalürjisi yöntemiyle B₄C partikül takviyesi ile Al matrisli kompozit malzemede sertlik değerlerinin B₄C parçacıkları ile artış gösterdiği görülmüştür [14]. Mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen Al+%10 Al₂O₃ kompozit malzemelerin sertlik ve eğme değerlerinde katkısız olan numunelere göre artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır [15]. SiC parçacıklarının dağılımı incelenmiş ve bu inceleme sonucuna göre SiC parçacıklarının düzgün bir şekilde dağıldığı görülmüştür [16].

Literatürde yer alan kompozit malzemelerle alakalı çalışmalar incelendiğinde birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen Al₂O₃ ve SiC katkısı ile ilgili büyük eksiklikler olduğu görülmektedir. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında değişik parametreler kullanılarak gelecekte yapılacak olan çalışmaların önünü açacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, Al₂O₃ ve SiC katkılanmış AA2024 esaslı kompozitlerin toz metalürjisi yöntemiyle üretilmesi ve üretilen malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmanın bir diğer amacı ise otomotiv, savunma, havacılık ve makine imalatı gibi önemli alanlarda kompozitlere alternatif oluşturabilecek yeni bir seramik matrisli kompozit geliştirmektir.

2 Materyal ve Metot

Bu çalışmada, üstün mikro yapısal özelliklere sahip parça üretimine olanak sağlaması, metal alaşımları ve metal matrisli kompozit üretimi için uygun olması gibi birçok avantajından dolayı toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak toz boyutları 63 µm olan AA2024 (2.78 g/cm³) tozları kullanılmıştır. Seramik takviye elemanı olarak, yüksek aşınma direncine ve yüksek ısı dayanımına sahip olmasından dolayı malzemelerinin partikül boyutları 2-3 µm olan SiC tercih edilmiştir. Diğer bir takviye malzemesi olarak ise, AA2024 ile uygun ara yüzey bağlanma yeteneğine sahip olmasından dolayı malzemelerinin partikül boyutları 2-3 µm Al₂O₃ tercih edilmiştir [5]. AA2024, Al₂O₃ ve SiC tozlarının teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Toz karışımları için gezegen tip bilyeli öğütücü (Retsch PM100)'de 400 dv/dk devir hızında ve 4 saat boyunca mekanik alaşımlama yapılmıştır. Öğütme işlemi tungsten karbür değirmen ve bilyeler kullanılarak yapılmıştır. Mekanik öğütme cihazının

hacmi 125 ml, bilye ebatı ise 10 mm ölçülerine sahiptir. Tozlar Tablo 2’de belirlenen oranlarda tartılmış ve homojen bir karışım elde etmek amacıyla mekanik alaşımlama cihazında karıştırılmıştır. Daha sonra 250 MPa basınçta ön sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ön sıkıştırma işleminden sonra belirli bir yoğunluğa ulaşmış toz partiküllerinin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklık olan 560 °C’ye kadar ısıtılıp tozlar arasındaki bağ yapılarının oluşturulması için sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterlemenin asıl amacı malzemede oluşan gözeneklilik oranını azaltmak ve presleme işleminden sonra mekanik olarak birbirine bağlanan toz taneleri, sinterleme işleminden sonra ise kimyasal olarak birbirine bağlanmasını sağlamaktır. Bu bağ ile tozlar iyi bir mekanik dayanım kazanırlar. Daha sonra ise 500 MPa basınçta sıcak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan toz metalürjisi yöntemi işlem akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.

Tablo 1. AA2024, Al₂O₃ ve SiC tozlarının teknik özellikleri.

AA2024			
%Cu	3.8-4.9	Erime noktası °C	637
%Mg	1.2-1.8		
%Mn	0.3-0.9	Sertlik (Brinell)	120
%Fe	0.5		
%Si	0.5	Yoğunluk (g/cm ³)	2.78
%Zn	0.25		
%Cr	0.1	Çekme(MPa)	185
%Ti	0.15		
Al	Kalan		
Al ₂ O ₃			
Erime noktası °C	2072		
Sertlik (Brinell)	1440		
Yoğunluk (g/cm ³)	3.95		
Çekme(MPa)	240		
SiC			
Erime noktası °C	2730		
Sertlik (Brinell)	1800		
Yoğunluk (g/cm ³)	3.21		
Çekme(MPa)	250		

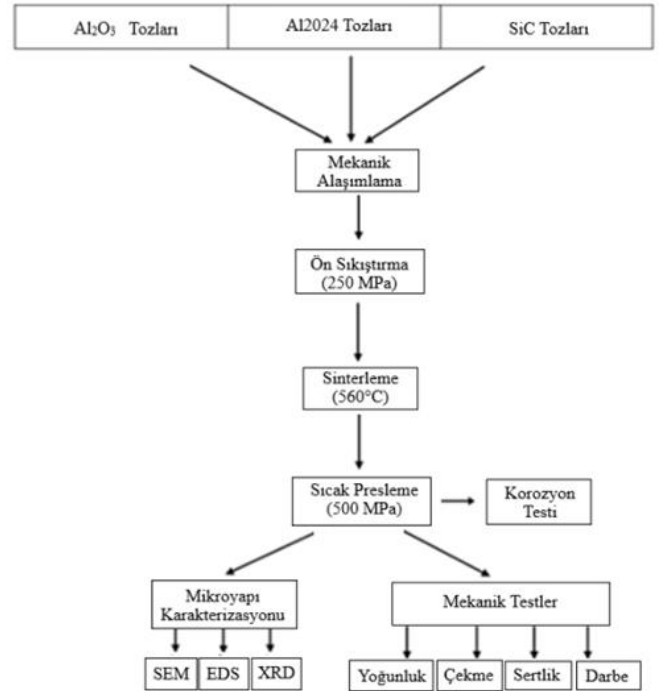
Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler, içyapı incelemelerinin yapılması amacıyla bir dizi işleme tabi tutulmuştur. İlk olarak otomatik kesme makinası ile numuneler yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde kesilmiştir. Kesim işlemi yapılan numuneler pürüzsüz bir yüzey elde etmek amacıyla bakalite alma işlemi uygulanmıştır. Bakalite alınan numuneler otomatik yüzey zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama işleminde 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 numaraya sahip zımpara kağıtları kullanılmıştır.

Yüzey zımparalama işlemi biten numuneler 0,5 µm ve 3 µm boyutları içeren parlatma sıvıları ile parlatılmıştır. Parlatma işleminde ise Eposil F parlatma sıvısı kullanarak yüzey parlatma işlemi yapılmıştır. Son olarak dağlama çözeltisi için Keller ayırıcı (2ml HF + 3ml HCl + 5ml

HNO₃ + 190ml saf su) çözeltisi kullanarak yüzey dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit numune karışım oranları ve sinterlenme süreleri.

Kompozit Numune Kodu	Takviye Oranları (%)	Sinterleme Süresi (min)
A _{0.5}	0.5 Al ₂ O ₃ + 99.50 AA2024	120
A _{1.0}	1 Al ₂ O ₃ + 99 AA2024	120
A _{2.0}	2 Al ₂ O ₃ + 98 AA2024	120
A _{3.0}	3 Al ₂ O ₃ + 97 AA2024	120
A _{5.0}	5 Al ₂ O ₃ + 95 AA2024	120
S _{0.5}	0.5 SiC + 99.50 AA2024	120
S _{1.0}	1 SiC + 99 AA2024	120
S _{2.0}	2 SiC + 98 AA2024	120
S _{3.0}	3 SiC + 97 AA2024	120
S _{5.0}	5 SiC + 95 AA2024	120



Şekil 1. Toz metalürjisi yöntemi işlem akış şeması.

AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri ZEISS marka LS 10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.

Ayrıca takviye malzemelerin, matris malzemesi içerisindeki dağılımları ve gözenek boyutu SEM yardımıyla detaylı şekilde yapılmıştır. Aynı cihaz yardımıyla EDS analizleri yapılarak haritalama metodu ile matris malzemesi ve takviye malzemelerinin dağılımları incelenmiştir. Bunların yanı sıra korozyon testi sonrası SEM ile alınan yüzey görüntülerine bakılarak korozyonun türü

araştırılmıştır. AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin XRD ışınları ile analizi yapılarak sinterleme işlemi sonrasında numunelerde oluşan faz yapılarının tanımı yapılmıştır. Bu araştırmalar ise PANalytical marka XRD cihazıyla gerçekleştirilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin yoğunluk hesapları karışım kuralına göre hesaplanmıştır. Çekme mukavemet testleri MTS 45 model çekme test cihazında ile 0.3 mm/sn çekme hızında yapılmıştır. Test sonuçları değerlerinin ortalaması sonuç olarak yazılmıştır. Çekme testi için üretilen numunelerin boyutları 5*10*80 mm'dir (ASTM E-8 standardına göre yapılmıştır). Sertlik testleri Innovatest Nemesis 9000 sertlik ölçüm test cihazında, Brinell sertlik ölçüm metodu ile yapılmıştır. Bu ölçüm 2.5mm çapına sahip batıcı uç yardımıyla, 31.25 kgf yük ile 10 saniye boyunca otomatik olarak yapılmıştır.

AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin korozyon davranışlarını incelemek amacıyla potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanmıştır. Elektrolitik çözeltisi için %3.5 NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Numuneler korozyon testi öncesi metanol ile yıkandıktan sonra kurutma işlemine tabi tutulmuştur.

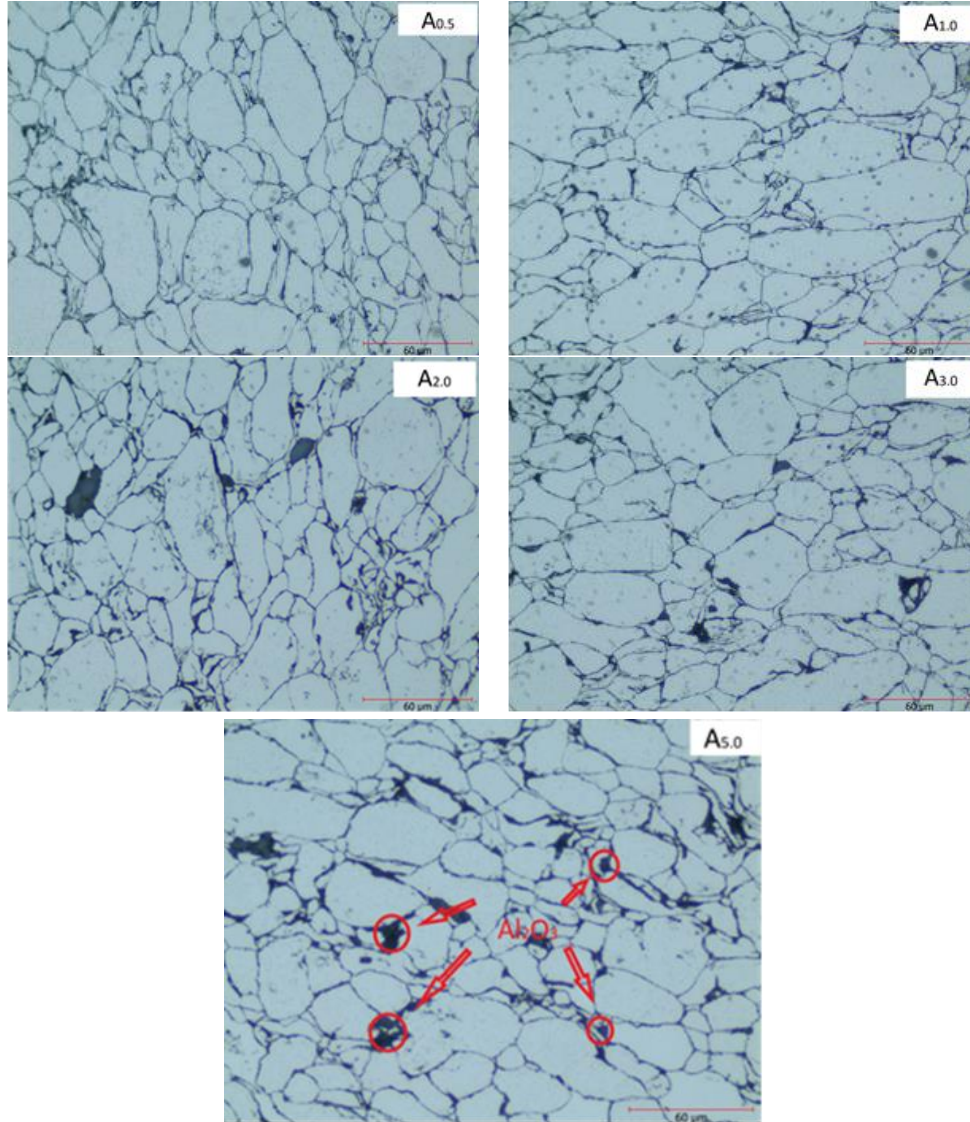
Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri -500 mV potansiyel ile başlayarak ölçümlere 1 mV/s tarama hızında +500 mV anodik potansiyele kadar devam edilerek işlem sonlandırılmıştır. Korozyon davranışı akımın yoğunluğuna ve korozyonun potansiyeline göre değerlendirilmiştir.

Düşen ağırlık darbe testi yönteminde, numune üzerine 6,5 kg yük bindirilmiş 9 mm çapında bir çarpma aleti 30 cm yükseklikten serbest düşme ile kompozit malzemelerin yüzeyine çarptırılmıştır. Çarpma anında 18 joule enerjiye sahiptir. Çarpma sonucu kompozit malzemelerde oluşan hasarlar kontrol edilmiştir. Bu deney için kullanılan numunelerin boyutları ise 10 mm çapında ortalama 5 mm kalınlığında numunelerdir.

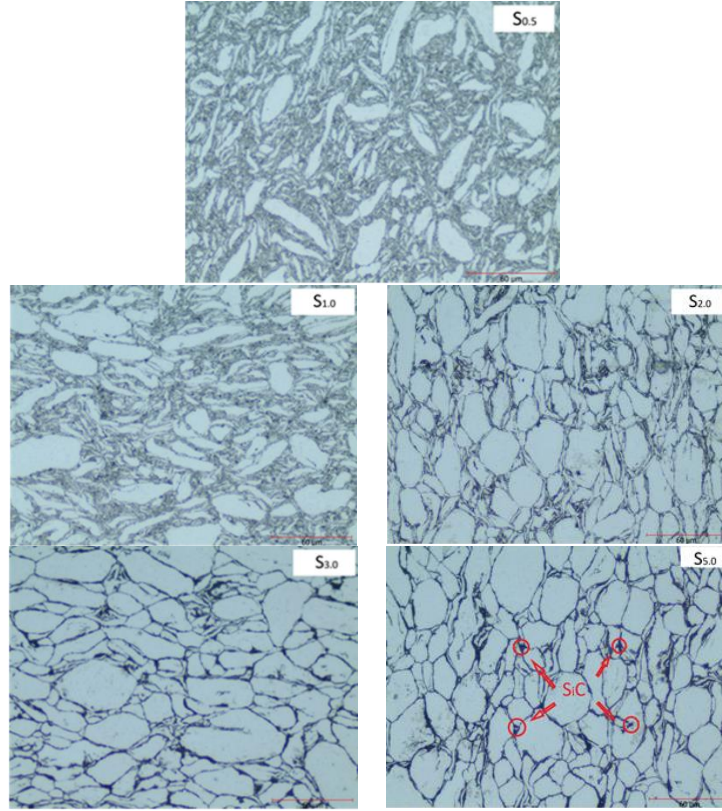
3 Bulgular ve Tartışma

3.1 Optik Mikroskop Görüntüleri

AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozitlerinin mikro yapılarını değerlendirmek amacıyla, farklı takviye oranları ve ortalama değer olan 120 dakika sinterleme sürelerine ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 2'de ve Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. AA2024/Al₂O₃ kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3. AA2024/SiC kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri.

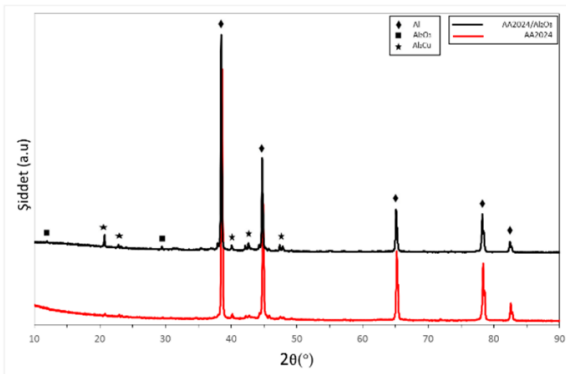
Şekil 2 ve 3'deki görüntüler incelendiğinde, Al₂O₃ ve SiC takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin artış gösterdiği söylenebilir. Ancak takviye oranının artması ile bir miktar takviye topaklanmasının meydana geldiği görülmektedir. Yine aynı şekilde kompozit yapı içerisindeki boşluk miktarı da takviye oranındaki artışına bağlı olarak artmıştır. [13]

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, faz parçacıkların büyük bir çoğunluğunun tane sınırlarında dağılım oluşturduğu görülmektedir. Özellikle toz metalurjisi yöntemiyle kompozit üretim teknolojilerinde, tane ve tane sınırlarına yakın bölgelerde dağılım gösteren takviye elemanları, gözeneklerin küçülmesine karşı

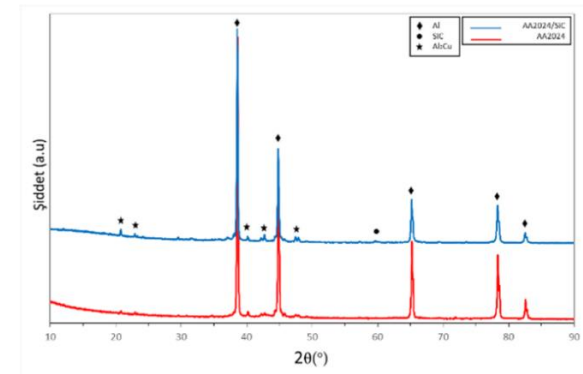
koyabilmektedir. Bu özellik dolayısıyla malzeme mekanik özellikleri ve malzeme performansı üzerinde çok etkili olabilmektedir. Al₂O₃ ve SiC takviyeli kompozitlerin mikroyapılarını değerlendirilirken bu konuyla alakalı benzer birçok çalışma incelenmiş ve bulunan sonuçların bu çalışma ile paralel olduğu görülmüştür [18-21].

3.2 XRD Analizleri

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerinin XRD analizleri Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Şekil 4 ve 5 incelendiğinde yapıda Al, Al₂O₃, SiC, Al₂Cu fazlarına rastlanmıştır. [22].



Şekil 4. AA2024 ve AA2024/Al₂O₃ kompozit numunenin XRD analizi.

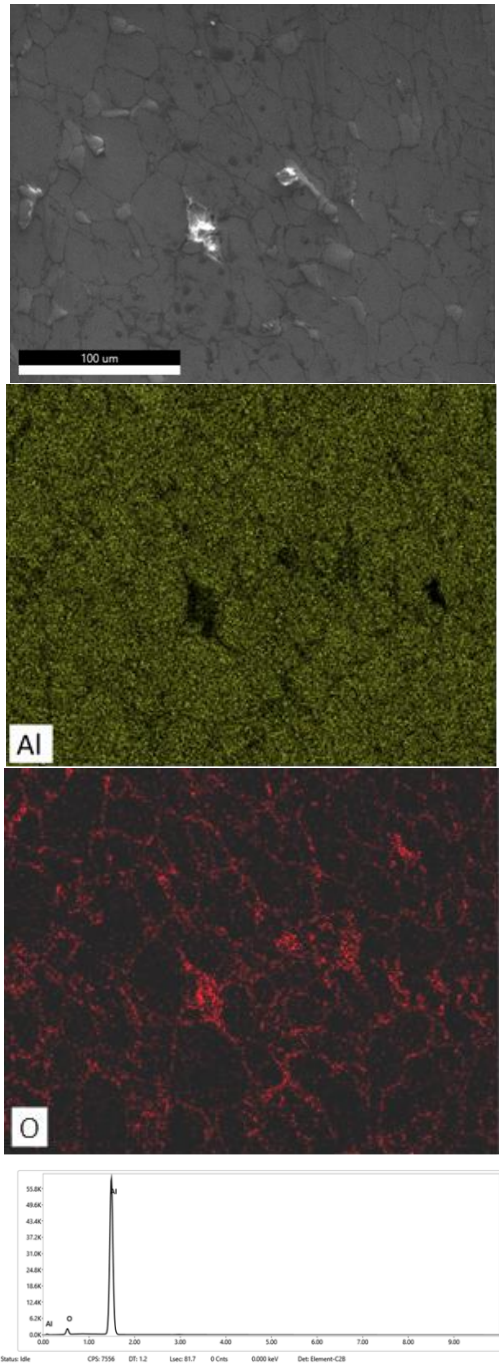


Şekil 5. AA2024 ve AA2024/SiC kompozit numunenin XRD analizi

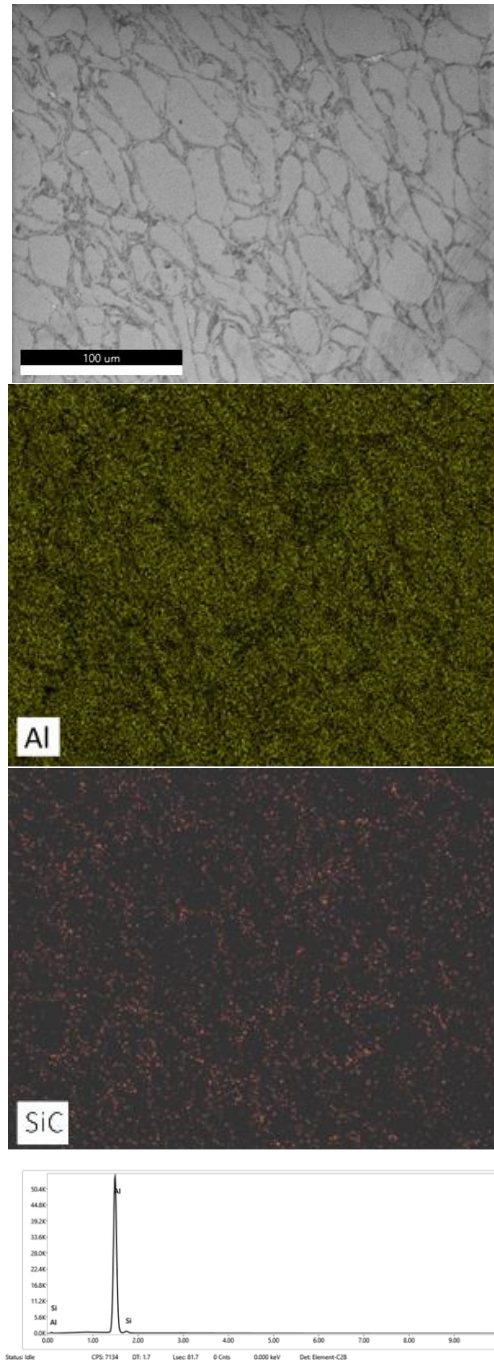
3.3 EDS Analizleri

AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerinin görüntüleri ve elementel dağılımları Şekil 6 ve 7'de verilmiştir. Şekil 6 ve 7 incelendiğinde takviye elemanlarının ana matris içerisinde homojen bir şekilde

dağıldığı görülmektedir. Al₂O₃ ve SiC takviyeli AA2024 kompozitinin barındırdığı tüm elementlerin pikleri de Şekil 6 ve 7'de net bir şekilde görülmektedir. Farklı herhangi bir yapıya rastlanmamış ve üretilen kompozitlerin atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür [23].



Şekil 6. AA2024/Al₂O₃ kompozit malzemelerin EDS analizleri.



Şekil 7. AA2024/SiC kompozit malzemelerin EDS analizleri.

3.4 Yoğunluk ve Porozite İncelemesi

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk hesapları karışım kuralına göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda deneysel yoğunluklarının teorik yoğunluklara bölünmesi sonucu bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$\delta t = [(\%W)1 * \delta 1] + [(\%W)2 * \delta 2] + \dots + [(\%W)n * \delta n] \quad (1)$$

δt : Kompozit malzemelerin teorik yoğunluğu
 $(\%W)$: Her bir takviye malzemesinin karışım içinde ağırlık olarak yüzdesi
 δ : Her bir takviye malzemesinin yoğunluğu

$$\text{Bağıl yoğunluk} = [(\delta t - \delta d) / \delta t] \times 100 \quad (2)$$

δt : Teorik yoğunluk
 δd : Deneysel yoğunluk

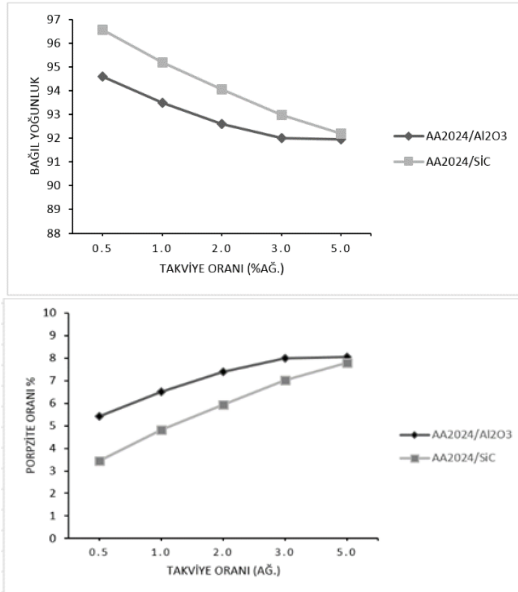
$$\% \text{Porozite} = \left(1 - \frac{\text{Deneysel Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}}\right) \times 100 \quad (3)$$

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerinin % poroziteyi, deneysel yoğunluğu, teorik yoğunluğu ve % bağıl yoğunluğu verilen formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 3'de verilmiştir. Elde edilen verilerden yararlanarak Şekil 8'de verilen bağıl yoğunluk-takviye oranı grafiği ve porozite-takviye oranı grafiği çizilmiştir [22].

Tablo 3. AA2024/Al₂O₃-SiC kompozit malzemelerinin porozite, deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk, bağıl yoğunluk değerleri.

Sıra No	Alaşım Türü	Porozite %	Deneysel Yoğunluk (gr/cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Bağıl Yoğunluk %
1	A _{0.5}	5,41	2,635	2,7858	94,59
2	A _{1.0}	6,51	2,61	2,7917	93,49
3	A _{2.0}	7,4	2,596	2,8034	92,6
4	A _{3.0}	8	2,59	2,8151	92
5	A _{5.0}	8,05	2,61	2,8385	91,95
6	S _{0.5}	3,45	2,686	2,782	96,55
7	S _{1.0}	4,82	2,65	2,7843	95,18
8	S _{2.0}	5,95	2,6228	2,7886	94,05
9	S _{3.0}	7,01	2,597	2,7929	92,99
10	S _{5.0}	7,8	2,583	2,8015	92,2

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait % porozite, deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk ve % bağıl yoğunluk değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Verilen % porozite değerleri incelendiğinde katkı oranındaki artışla orantılı olarak % porozite değerinin giderek arttığı görülmektedir. Şekil 8’de verilen porozite-takviye oranı grafiği de bunu destekler niteliktedir.

**Şekil 8.** AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin bağıl yoğunluk-takviye oranı grafiği ve porozite-takviye oranı grafiği.

Tablo 3’de verilen deneysel yoğunluk değerleri incelendiğinde, katkı oranının artmasıyla deneysel yoğunluk değerinin çok küçük miktarlarda düştüğü görülmektedir. Tablo 3’de verilen teorik yoğunluk değerleri incelendiğinde, katkı oranındaki artışa bağlı olarak teorik yoğunluk değerinin de giderek arttığı görülmektedir. Tablo 3’de verilen % bağıl yoğunluk değerleri incelendiğinde ise takviye oranındaki artışla orantılı olarak % bağıl yoğunluk değerinin giderek azaldığı görülmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin % bağıl yoğunluk değerlerinde ortaya çıkan azalma üzerinde etkili olan durumun, AA2024 matris malzemesi ile Al₂O₃ ve SiC takviye elemanları arasındaki bağlanma ara yüzeylerinde oluşan boşluklardan kaynaklandığı söylenebilir. Katkı oranındaki artışa bağlı olarak ara yüzeyde oluşan boşluk miktarının arttığı ve buna bağlı

olarak yoğunlukta bir azalma meydana geldiği söylenebilir. Bunun yanı sıra AA2024 matris yapısı içerisinde yer alan bakırın, sinterleme sırasında meydana gelen şişme etkisinden dolayı, gözeneklerin küçülmesine karşı koyarak, yoğunluk artışı önüne geçmesi, bir diğer önemli etkileşim olarak gösterilebilir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait % porozite, deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk ve % bağıl yoğunluk değerleri literatürde yapılan diğer benzer bir çalışmayla karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine paralel olduğu tespit edilmiştir [21].

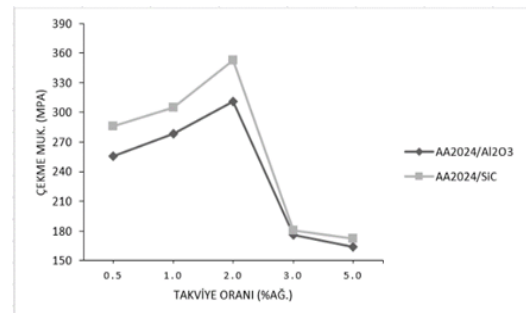
3.5 Çekme Mukavemeti

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait çekme testi sonuçları Tablo 4’te verilmiştir. Kompozit malzemelere ait çekme testi sonuçlarından elde edilen mukavemet değerlerinin takviye oranı ile değişim grafiği ise Şekil 9’ da verilmiştir.

Tablo 4. AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerinin mukavemet değerleri.

Numune Kodu	Çekme Mukavemet Değeri (MPa)
A _{0.5}	255,4
A _{1.0}	278,1
A _{2.0}	310,6
A _{3.0}	175,9
A _{5.0}	163,8
S _{0.5}	285,7
S _{1.0}	304,8
S _{2.0}	352,3
S _{3.0}	180,6
S _{5.0}	171,9

Tablo 4’de verilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait çekme mukavemet değerleri incelendiğinde %2’lik takviye oranına kadar çekme mukavemet değerleri artış gösterirken %2’den sonra çekme mukavemet değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

**Şekil 9.** AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin mukavemet değerlerinin takviye oranı ile değişim grafiği.

Şekil 9’da verilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait çekme mukavemet değerleri incelendiğinde %2’lik takviye oranına kadar çekme mukavemet değerleri artış gösterirken %2’den sonra çekme mukavemet değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. Buradan Al₂O₃ ve SiC takviyesinin %2’ye kadar malzemenin mekanik özelliklerini iyi etkilediğini ancak %2’den sonra malzemeyi gevreklettiği sonucu çıkarılabilir. Tüm değerler arasında en iyi çekme

mukavemeti değerini $A_{2.0}$ ve $S_{2.0}$ numuneleri vermiştir. Tablo 4 ve Şekil 9'a göre, takviye oranının %2'nin üstüne çıkması ve buna bağlı olarak çekme dayanımında bir azalma meydana gelmesinin sebebinin artan takviye miktarıyla topaklanma miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Topaklanma miktarı arttıkça matris ile takviye malzemesinin arasındaki bağ kuvvetleri zayıflamaktadır. Bağların zayıflamasından dolayı çekme mukavemetlerinde sürekli olarak düşmeler meydana gelebilmektedir. Yapılan çekme mukavemeti testlerinden çıkarılan sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu sonuçların literatürdeki sonuçlara paralel olduğu tespit edilmiştir [23-24].

3.6 Sertlik Değerleri

AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerinin Brinell Sertlik Değerleri (BSD) Tablo 5'de, takviye oranı ile sertlik değerlerindeki değişim ise Şekil 10'da verilmiştir.

Tablo 5. AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait Brinell Sertlik Değerleri (BSD).

Numune Kodu	Brinell Sertlik Değeri (BSD)
A _{0.5}	130
A _{1.0}	136
A _{2.0}	144
A _{3.0}	149
A _{5.0}	153
S _{0.5}	136
S _{1.0}	141
S _{2.0}	147
S _{3.0}	155
S _{5.0}	159

Tablo 5'de verilen AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait Brinell Sertlik Değerleri ve Şekil 10'da verilen sertlik-takviye oranı grafiği incelendiğinde, kompozit malzemelerin takviye oranlarının artmasıyla sertlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bunun sebebi takviye malzemesinin matris malzemesinden daha sert bir yapıya sahip olmasıdır. AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemeler içerisinde en yüksek BSD'ye sahip numuneler $A_{5.0}$ ve $S_{5.0}$ kompozitleridir. $A_{5.0}$ ve $S_{5.0}$ kompozit numunelerin takviye miktarının yüksek olması sebebiyle AA2024 matrisinin toz partikülleri daha fazla plastik deformasyona maruz kalmıştır. Bu durum sonucunda matris malzemesi ile takviye malzemeleri arasında gerilmeler meydana gelmiştir. Meydana gelen gerilmeler dislokasyon mekanizması olarak bilinen pekleşme olarak adlandırılmaktadır. Yapılan sertlik ölçümleri değerlendirildiğinde, Al_2O_3 ve SiC takviyesinin AA2024 matrisinin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği söylenebilir. Bulunan BSD sonuçları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu sonuçların literatürdeki sonuçlara paralel olduğu tespit edilmiştir [18-19-22].

3.7 Korozyon Direnci

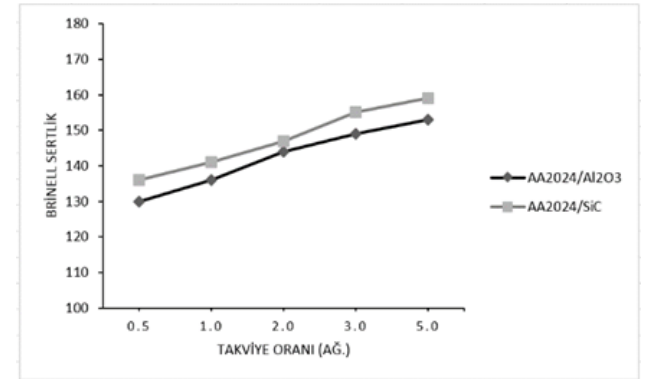
Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait korozyon deneyleri test sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6'da verilen AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC

kompozit malzemelerine ait korozyon testi sonucu Ekor, İkor ve korozyon hızı değerleri incelendiğinde, Al_2O_3 -SiC takviyeli numuneler içerisinde en yüksek İkor ve korozyon hızı değerleri %0.5 takviyeye sahip kompozit numunelerde görülmüştür. Korozyon hızının yüksek olması o numunenin korozyon direncinin düşük olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak en düşük korozyon direncine sahip olan numunelerin $A_{0.5}$ ve $S_{0.5}$ adlı numuneler olduğu söylenebilir. En düşük korozyon hızı değerine sahip numuneler ise $A_{5.0}$ ve $S_{5.0}$ numuneleridir. Bu da $A_{5.0}$ ve $S_{5.0}$ numunelerin en yüksek korozyon direncine sahip numuneler olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerinin korozyon testi sonucu.

Numune Kodu	Ekor (mV)	İkor (μA)	Korozyon Hızı (mpy)
A _{0.5}	-765	10,71	7,92
A _{1.0}	-720	6,32	4,63
A _{2.0}	-804	2,07	1,61
A _{3.0}	-918	1,14	0,83
A _{5.0}	-617	0,97	0,69
S _{0.5}	-1180	26,61	17,12
S _{1.0}	-693	10,11	7,32
S _{2.0}	-955	5,25	3,56
S _{3.0}	-642	2,54	1,87
S _{5.0}	-657	1,88	1,41

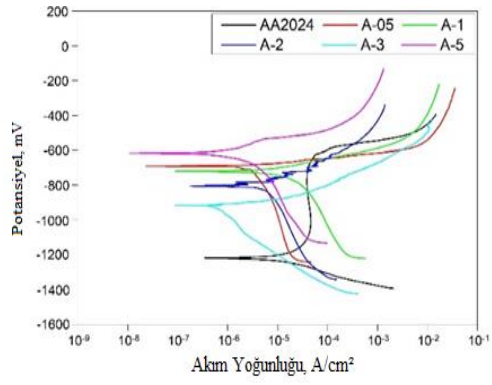


Şekil 10. AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerine ait sertlik-takviye oranı grafiği.

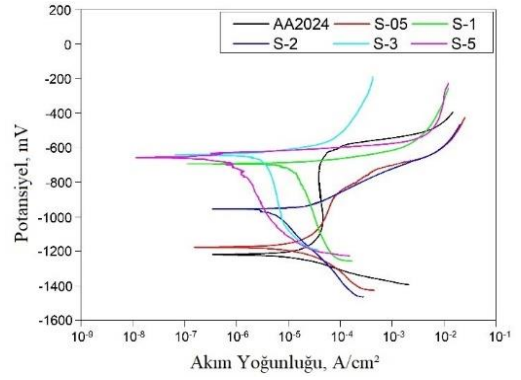
Yapılan değerlendirmeler sonucu Al_2O_3 ve SiC takviye oranındaki artışın korozyon direncinin artmasına sebep olduğu ve AA2024 matrisinin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Karacif K. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, takviyeli alüminyum kompozit malzemelerin korozyon davranışını incelemiş ve benzer sonuçlar bulmuştur [24].

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 11 ve 12'de verilmiştir.

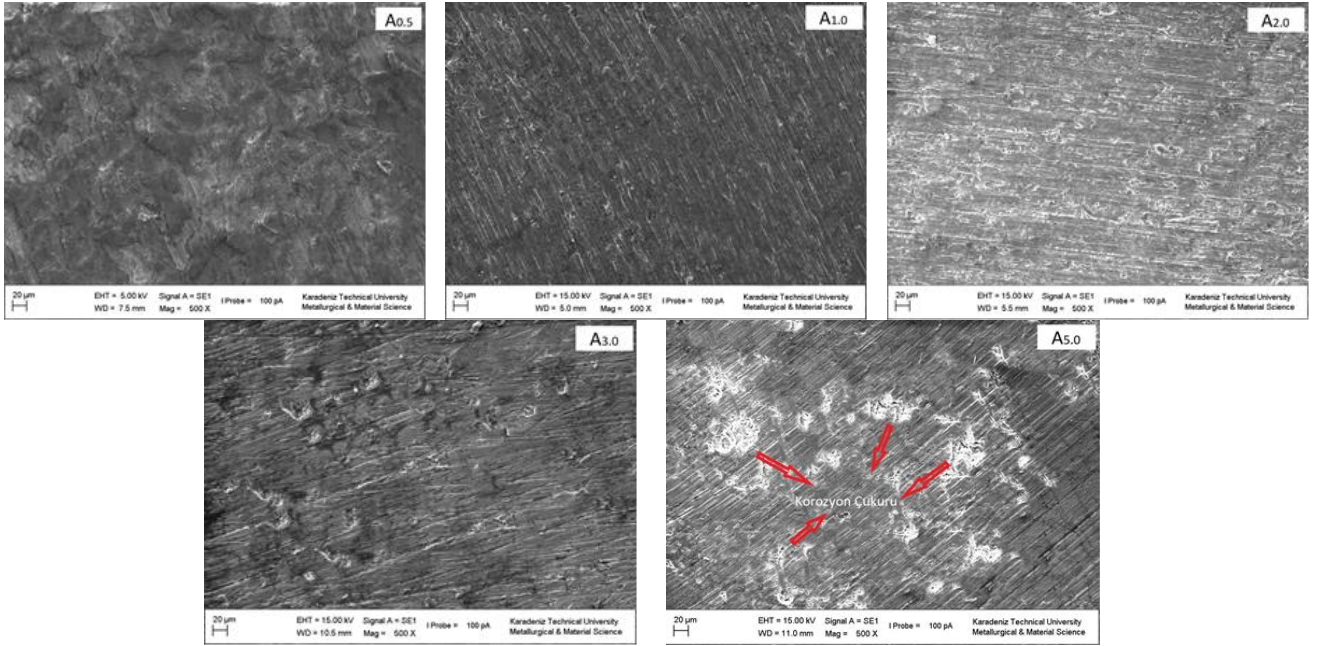
AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin Şekil 11 ve 12'de verilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri incelendiğinde, anodik çözümler sonucu anodik polarizasyon eğrisi oluşurken, katodik çözümler sonucu katodik polarizasyon eğrilerinin oluştuğu görülmektedir. Anodik çözünme oluşması bu kompozit malzemelerin pasif olmasının sonucu olarak potansiyel aralıklar içerisinde olduğunu ifade etmektedir. Bu durum pasif akıma göre daha büyük bir anodik çözünmenin meydana gelmesiyle çukurcuk korozyonunun başladığını ifade etmektedir [26].



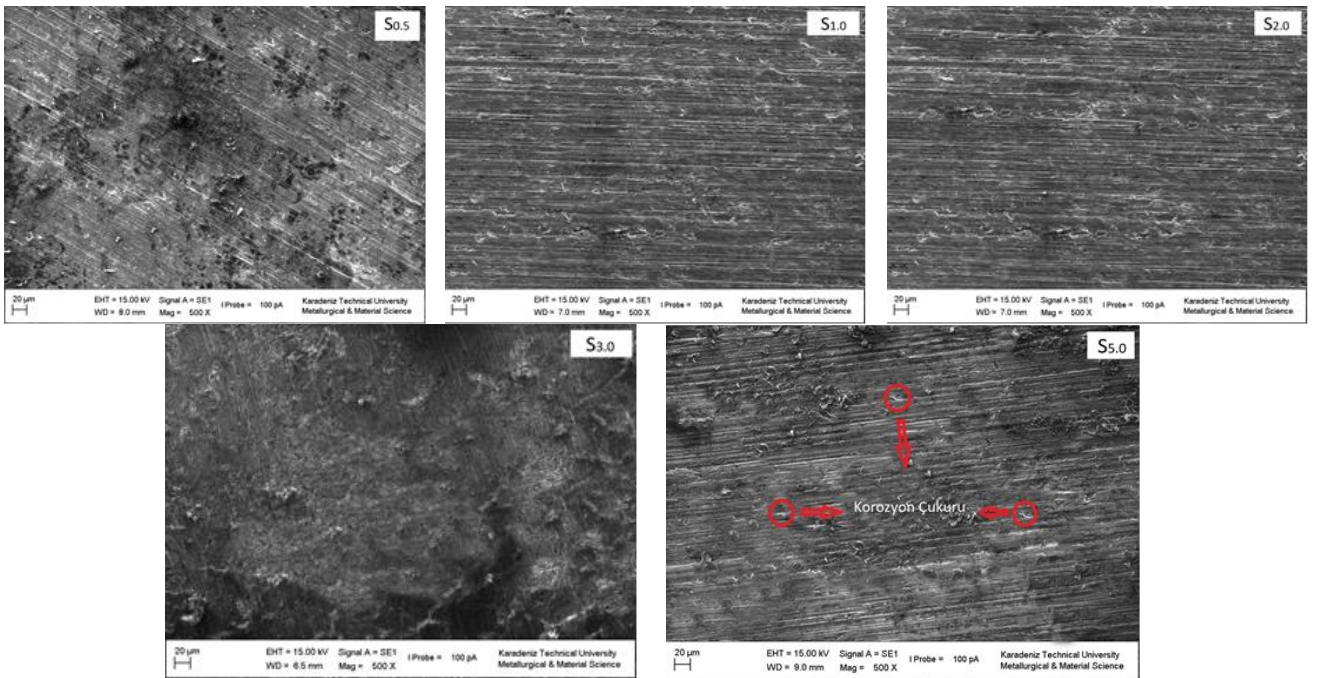
Şekil 11. AA2024/Al₂O₃ kompozit malzemelerin potansiyodinamik polarizasyon grafikleri.



Şekil 12. AA2024/SiC kompozit malzemelerin potansiyodinamik polarizasyon grafikleri.



Şekil 13. AA2024/Al₂O₃ kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri.



Şekil 14. AA2024/SiC kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri Şekil 13 ve 14’de verilmiştir. Şekil 13 ve 14 incelendiğinde korozyonun etkisiyle yüzeyin deformasyona uğradığı ve bir takım oyukların oluştuğu görülmektedir. Bu oyuklar dolayısıyla numunelerde bir takım kütle kayıpları meydana gelmiştir. Ayrıca SEM görüntülerinde farklı şekil ve boyutlarda çukurca korozyonun oluştuğu görülmektedir. Fakat bu çukurcukların yüzeyde rastgele bölgelerde olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin toz metalürjisi ürünü olan malzemenin gözenekli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit numunelerin korozyon testi ve porozite oranı arasındaki ilişkiyi inceleyecek olursak katkı oranındaki artışa bağlı olarak ara yüzeyde oluşan boşluk miktarının arttığı ve korozyon direncinin de arttığı gözlemlenmiştir. Boşluk miktarındaki artışla malzemenin korozyon direncinde bir azalma beklerken artış meydana gelmesinin sebebinin takviye elemanları olduğu düşünülmektedir. Yapılan değerlendirmeler sonucu Al₂O₃ ve SiC takviye oranındaki artışın kompozitler içerisinde matris kanallarını kesintiye uğratarak korozyon direncini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir [25].

3.8 Düşen Ağırlık Darbe Testi

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi sonucu elde edilen darbe dayanım değerleri Tablo 7’de ve numunelere ait darbe dayanım değerlerinin grafiksel kıyaslaması ise Şekil 15’de verilmiştir. Düşen ağırlık darbe testi sonrası numunelerde meydana gelen deformasyon sonucu makro yapı görüntüleri Şekil 16 ve 17’de verilmiştir.

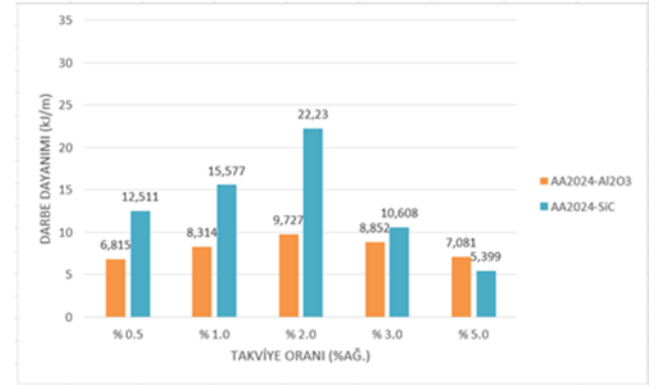
Tablo 7. AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozitlerin darbe dayanım değerleri.

Numune Kodu	Takviye Malzemesi	Darbe Dayanımı (kJ/m)
A _{0.5}	Al ₂ O ₃	6,815
A _{1.0}		8,314
A _{2.0}		9,727
A _{3.0}		8,852
A _{5.0}		7,081
S _{0.5}	SiC	12,511
S _{1.0}		15,577
S _{2.0}		22,23
S _{3.0}		10,608
S _{5.0}		5,399

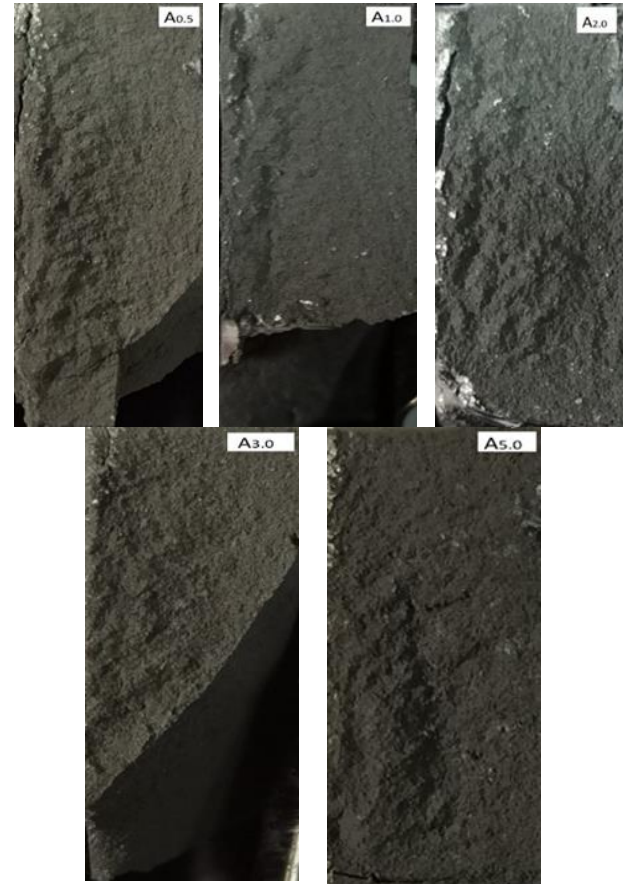
Tablo 7 ve incelendiğinde, Al₂O₃ takviyesinin %2’ye kadar darbe dayanımını arttırdığı, takviye oranının %2’nin üzerine çıktığında ise darbe dayanım değerlerini düşürdüğü görülmektedir. Yine SiC takviyesinin %2’ye kadar darbe dayanımını arttırdığı, takviye oranının %2’nin üzerine çıktığında ise darbe dayanım değerlerini giderek düşürdüğü görülmektedir.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozit malzemelerin düşen ağırlık darbe testi sonuçlarına ait Şekil 15’de verilen grafikteki pik yapan tepe noktalar, çarpma anında elde edilen en yüksek darbe dayanım değerlerini vermektedir. Tablo 7 ve Şekil 15

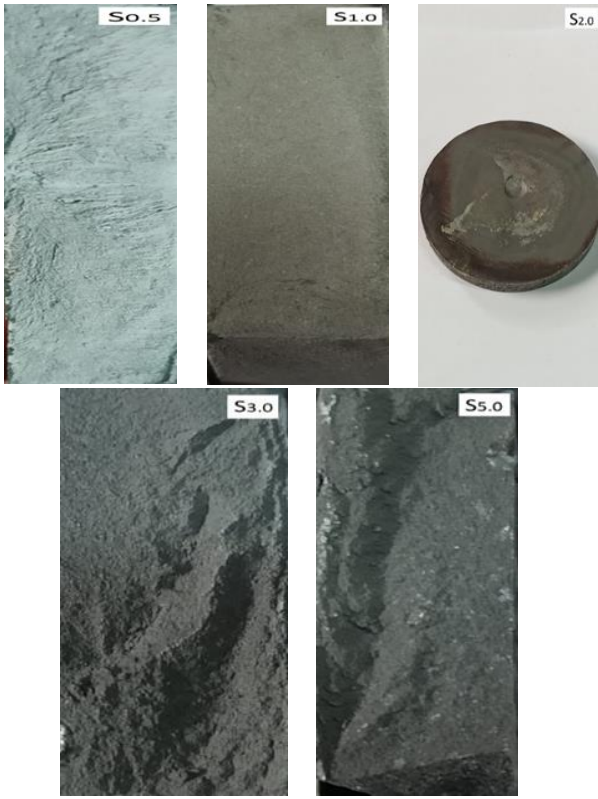
incelendiğinde, Al₂O₃ ve SiC takviyesinin %2’ye kadar sertlik, çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiği, bunun sonucu olarak %2 takviye oranlarında darbe dayanımının arttığı, takviye oranının %2’nin üzerine çıktığında ise darbe dayanım değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu duruma artan takviye oranına bağlı olarak meydana gelmesi muhtemel kırılma intermetalik fazların neden olduğu düşünülmektedir. Yapılan değerlendirmeler sonucu %2 takviye oranına sahip kompozit malzemelerin balistik başarı için zırh malzemesi olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır [27].



Şekil 15. AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozitlerin Darbe Dayanımı (kJ/m)-Takviye Oranı (%A.G.) grafiği.



Şekil 16. AA2024/Al₂O₃ kompozit malzemelerin düşen ağırlık darbe testi sonrası makro yapı görüntüleri.



Şekil 17. AA2024/SiC kompozit malzemelerin balistik test sonrası makro yapı görüntüleri.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozitlerin Şekil 16 ve Şekil 17'deki düşen ağırlık darbe testi sonrası makro yapı görüntüleri incelendiğinde, numuneler içerisinde %2 takviyeli kompozitler hariç diğer kompozitlerin büyük ölçüde dağılmış ve parçalanmıştır olduğu görülmektedir. Bu dağılmalar ve parçalanmalar Tablo 7'de verilen değerleri ve Şekil 15'de çizilen grafiği destekler niteliktedir. Hem Tablo 7'den hem şekil 15,16 ve 17'den en iyi sonucu veren numunelerin A_{2.0} ve S_{2.0} olduğu tespit edilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Farklı katkı oranları kullanılarak mikroyapı ve mekanik özelliklerin nasıl değiştiği incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucu Al₂O₃ ve SiC takviyesinin AA2024 matrisi üzerinde olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda otomotiv, savunma, havacılık ve makine gibi önemli alanlarda kompozit malzemelere alternatif oluşturabilecek Al₂O₃ ve SiC takviyeli bir malzeme geliştirmiştir. Ayrıca bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında farklı katkı oranı ve farklı takviye malzemeleri gibi değişik parametreler kullanılarak gelecekte yapılacak olan çalışmaların önünü açacağı düşünülmektedir.

Toz metalürjisiyle üretilen Al₂O₃ ve SiC takviyeli AA2024 matrisli kompozitlerle ilgili elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde; Al₂O₃ ve SiC takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin artış gösterdiği tespit edilmiştir.

- % Porozite, deneysel yoğunluk, teorik yoğunluk ve % bağıl yoğunluk sonuçları incelendiğinde; katkı oranındaki artışla orantılı olarak % porozite değerinin giderek arttığı, deneysel yoğunluk değerinin çok küçük miktarlarda düştüğü, teorik yoğunluk değerinin giderek arttığı, % bağıl yoğunluk değerinin de giderek azaldığı tespit edilmiştir.

- Çekme mukavemet değerleri incelendiğinde; %2'lik takviye oranına kadar çekme mukavemet değerleri artış gösterirken %2'den sonra çekme mukavemet değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

- Sertlik değerleri incelendiğinde; takviye oranlarının artmasıyla sertlik değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bunun sebebi takviye malzemelerinin matris malzemesinden daha sert bir yapıya sahip olmasıdır.

- Korozyon testi sonuçları incelendiğinde; Al₂O₃ ve SiC takviye oranındaki artışın korozyon direncinin artmasına sebep olduğu ve AA2024 matrisinin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir.

- Düşen ağırlık darbe testi sonuçları incelendiğinde; Al₂O₃ ve SiC takviyesinin %2'ye kadar sertlik, çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiği, bunun sonucu olarak %2 takviye oranlarında darbe dayanımının arttığı, takviye oranı %2'nin üzerine çıktığında ise darbe dayanımı değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucu %2 takviye oranına sahip kompozit malzemelerin balistik başarı için zırh malzemesi olarak kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri yönetim birimi (Proje No: TEKF.20.20) tarafından desteklenmiştir.

Bilgilendirme

Gerçekleştirilen bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek yoktur.

Referanslar

- [1] Safa, H., Güler, H., Aksoy, M., & Şeker, S. (2020). Al/KNT Nanokompozitlerin Toz Metalürjisi Yöntemi ile Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen Bil. Dergisi*, 2020, 32(2), 31-36.
- [2] Şenel, M. C., Üstün, M. (2022). Kuru Sürtünme Altında Al-SiO₂ ve Al-ZrO₂ Nanokompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması, *OMÜ Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, 2022, 2(2): 171-184.
- [3] Şenel, M. C., & Üstün, M. (2022). SiO₂/ZrO₂ Nano Partikül Katkılı Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapılarının Karşılaştırılması, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2022, 27(2), 219-232.
- [4] Karşlıoğlu, R. (2019). MWCNT Oranının MWCNT ile güçlendirilmiş Al₂O₃ Matrisli Nanokompozitlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2019, 7(3), 1922-1930.
- [5] Salur, E., Acarer, M., & Nazik, C. (2021). Mekanik Alaşım Süresinin Toz Metalürjisi ile Üretilen AA7075 Matrisli Nanokompozit Malzemelerinin Sertliklerine Etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2021, 11(3), 2218-2231.

- [6] Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, K.S., & Bhat, T. B. (2010). An experimental study on the ballistic behavior of some metallic armour materials against 7.62mm deformable projectile, *Materials and Design*, 31, 3308-3316, 2010
- [7] Rao, R.N., & Das, S. (2011). Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites. *Mater Des* 2011, 32, 1066–1071.
- [8] Karakoç H. Ulutaş A., & Çinici H. (2020). B4C/SiC/Al₂O₃ Parçacık Takviyelendirilmiş Alüminyum Sandviç Köpük ile Ramor 500 Zırh Çeliğinin bir araya getirilmesi ve Balistik Performansının Araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 2020, 23(2), 297-310.
- [9] Pul M., & Baydaroğlu V. (2020). B4C/SiC Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Balistik Performanslarının Modellenmesi, *Politeknik Dergisi*, 2020, 23(2), 383-392.
- [10] Candan, S. (2009). An investigation on corrosion behaviour of pressure infiltrated Al–Mg alloy/SiCp composites, *Corrosion Science*, 2009, 51, 1398.
- [11] Yalçın E., & Çanakçı A. (2018). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Korozyon Davranışı, *NWSA*, 2018, 13(2), 157-164.
- [12] Muthusamy, S., & Pandi, G. (2018). Investigation of mechanical and corrosion properties of AA2024–B4C–TiC hybrid metal matrix composites, *Surface Review and Letters*, 2018, 25(05).
- [13] Özkan, S. (2007). Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. (Master's dissertation, Gazi University)
- [14] Hasan H., & Ferhat G. (2010). B4C / Al Kompozitlerin Takviye Hacim Oranına Bağlı Olarak Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *SDU International Technologic Science*, 2(1), 15-21, 2010.
- [15] Karabulut H., Çıtak R., & Çinici H. (2014). Mekanik Alaşım Süresinin Al + % 10 Al₂O₃ Kompozitlerde Eğme Dayanımına Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2014, 28(3), 635-643.
- [16] Xiao-min, Z., Jia-kang, Y., & Xin-yu, W. (2012). Microstructure and properties of Al/Si/SiC composites for electronic packaging, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22, 1686-1692.
- [17] Erturun, V. (2018). Bilyeli öğütmenin metal matrisli kompozitlerin sinterlemesine etkilerinin incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 2018, 9(1), 255–267.
- [18] Pul, M. (2019). Alüminyum 7075 Matrisli Kompozitlerde SiC, B 4 C Ve TiB 2 Takviye Elemanlarının Mekanik Özelliklere Etkilerinin Karşılaştırılması, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2019, 7, 180-193.
- [19] Şimşek, İ., Yıldırım, M., Tunçay, T., Özyürek, D., & Şimşek, D. (2018). Mekanik Alaşım/Öğütme Yöntemi İle Üretilen Al-SiC Kompozitlerin İncelenmesi, *NWSA Academic Journals*, 13(2), 165–171.
- [20] Gökmeşe, H., & Karadağ, H. B. (2018). Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2018, 6(2), 385–398.
- [21] Şap, E. (2021). Microstructure and Hardness Properties of Reinforced Copper-Based Composite Materials, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2021, 11(1), 590-598.
- [22] Şenel, M. C., Gürbüz, M., & Koç, E. (2018). Toz Metalurjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Alüminyum-Grafen Kompozit Yapılarda Çekme Dayanımının, Aşınma Direncinin ve Mikroyapının İncelenmesi, *Mühendis ve Makine*, 2018, 59 (693), 33-46.
- [23] Can Şenel, M., Gürbüz, M., & Koç, E. (2018). Alüminyum-Grafen Kompozit Yapılarda Çekme Dayanımının, Aşınma Direncinin ve Mikroyapının İncelenmesi, In *SETSCI Conference Indexing System*, 2018, 3, 144-149.
- [24] M., Bayar, H., Subaşı, M., & Karataş, Ç., (2015). SiC Takviyeli Alüminyum Alaşım Matrisli Kompozit. In *Gazi University Journal of Science GU J Sci Part C*, 2015, 3(4), 603-612.
- [25] Karacif, K., & Karabulut, H. (2020). Alümina Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Polipirol ile Kaplanması ve Korozyon Davranışının İncelenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 2020, 20(1), 118–128.
- [26] Karacif, K., Karabulut, H., & Çıtak, R. (2019). Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerde Mekanik Alaşım Süresinin Korozyon Davranışına Etkilerinin İncelenmesi, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Gelistirme Dergisi*, 2019, 11(2), 576-583.
- [27] Köseadağ, E., & Ekici, R. (2019). Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Darbe Davranışları Üzerine Bir Derleme, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2019, 8 (1), 384-393.