Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 1003-1011

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University
Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

# Powder metal $Al_2O_3$ reinforced Mg5Sn matrix composites: Production and characterization

Ali Erçetin[1], Özgür Özgün[2*], Kubilay Aslantaş[3]

[1]Department of Naval Architecture and Ship Machines Engineering, Faculty of Maritime, Bandırma Onyedi Eylul University, 10200, Bandırma, Balıkesir, Türkiye
[2]Department of Occupational Health and Safety, Faculty of Health Sciences, Bingöl University, 12000, Bingöl, Türkiye
[3]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, Afyon Kocatepe University, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

**Highlights:**

- Mg5Sn matrix $Al_2O_3$ reinforced composites produced trough powder metallurgy.
- Relative density values above 99% were obtained.
- Superior mechanical properties were obtained compared to pure magnesium and Mg5Sn alloy.

**Keywords:**

- Magnesium-tin matrix
- $Al_2O_3$ reinforcement
- Composite material
- Microstructure
- Mechanical properties

**Article Info:**

Research Article
Received:02.06.2021
Accepted:01.05.2022

**DOI:**

10.17341/gazimmfd.947051

**Acknowledgement:**

This study was supported by Bingol University Scientific Research Projects Coordination Unit with BAP-MMF.2017.00.007 project number.

**Correspondence:**

Author: Özgür Özgün
e-mail: oozgun@bingol.edu.tr
phone: +90 426 216 0012 / 1773

**Graphical/Tabular Abstract**

Mg5Sn-x$Al_2O_3$ composite materials were produced by powder metallurgy (PM) method by adding different weight proportions of alumina into the magnesium-tin (Mg-Sn) matrix containing 5% tin (Sn) by weight. New powder mixing technique including paraffin coating process, production of Mg matrix composite samples, microstructural analysis and mechanical tests are presented schematically in Figure A. The negative effect of the high reactivity of Mg powders is prevented by paraffin coating process. The powders are mixed homogeneously in a volatile substance (hexane) that does not contain oxygen element in its composition. Prepared powder mixtures are hot pressed under 40 MPa pressure for 30 min at 665 °C temperature and Mg matrix composites are produced successfully. The produced samples were characterized by microstructure examinations and mechanical tests.




**Figure A.** Production process, applied analysis and tests

**Purpose:** The aim of this study is to make the production of Mg matrix composites safe and easy by PM method and to obtain composites with superior mechanical properties.

**Theory and Methods:** A novel mixing and paraffin coating technique were applied in production process. The samples were sintered through hot pressing technique. The microstructure properties were determined by density measurements, XRD and SEM examinations. Hardness and tensile strength tests were used to determine the mechanical properties.

**Results:** Relative density values of samples were obtained over 99%. The microstructure of composite samples consists of coaxial grains. The increase in the ratio of the reinforcement phase, that prevents grain coarsening by settling at the grain boundaries, provided a finer grained microstructure. Microstructure investigations showed that the alumina reinforcement was homogeneously distributed in the microstructure. With the increasing $Al_2O_3$ ratio, the hardness, yield and tensile strength values increased.

**Conclusion:** The production of Mg matrix composites by the PM method has been successfully achieved. Paraffin coating technique on Mg powders prevented oxidation during production stages. Composite samples could be produced at high relative density ratios. Alumina reinforcement significantly improved the mechanical properties.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 1003-1011

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

# Toz metal $Al_2O_3$ takviyeli Mg5Sn matrisli kompozitler: Üretim ve karakterizasyon

Ali Erçetin[1], Özgür Özgün[2]*, Kubilay Aslantaş[3]

[1]Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, 10200, Bandırma, Balıkesir, Türkiye
[2]Bingöl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 12000, Bingöl, Türkiye
[3]Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

## ÖNEÇIKANLAR

- Mg5Sn matris $Al_2O_3$ takviyeli kompozitler toz metalurjisi ile üretilmiştir
- %99'un üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir
- Saf magnezyum ve Mg5Sn alaşımına kıyasla üstün mekanik özellikler elde edildi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 02.06.2021
Kabul: 01.05.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.947051

Anahtar Kelimeler:
Magnezyum-kalay matrisi, $Al_2O_3$ takviyesi, kompozit malzeme, mikroyapı, mekanik özellikler

ÖZ

Bu çalışmada, ağırlıkça %5 kalay (Sn) içeren magnezyum-kalay (Mg-Sn) matris içerisine ağırlıkça farklı oranlarda Alümina ($Al_2O_3$) ilave edilerek toz metalurjisi (TM) yöntemiyle Mg5Sn-x$Al_2O_3$ kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretimde Mg tozlarının sahip olduğu yüksek reaktivitenin yol açacağı olumsuzlukları önlemek amacıyla yeni bir karıştırma tekniği kullanılmıştır. Bu yeni karıştırma tekniğinde, bileşiminde oksijen elementi bulunmayan bir uçucu madde (hegzan) içerisinde, karıştırılmak istenen tozlar bir yandan homojen bir şekilde karışmakta; bir yandan da parafinle kaplanmaktadır. Hazırlanan toz karışımlarından bulk numune üretimi, sıcak presleme tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler, yoğunluk ölçümleri, mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler ile karakterize edilmiştir. Üretilen tüm numunelerde %99'un üzerinde bağıl yoğunluğa ulaşılmıştır. Mikroyapı incelemeleri, alümina takviyesinin mikroyapıda homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Artan $Al_2O_3$ takviye oranı, sertlik ve çekme dayanımı değerlerinde önemli artışlar sağlamıştır. Mg5Sn alaşımının sertliği 59 HV iken ağırlıkça %8 $Al_2O_3$ takviye edilmiş kompozitin ortalama sertliği 78,64 HV olmuştur. Takviyesiz Mg5Sn alaşımında çekme dayanımı 145 MPa iken bu değer artan $Al_2O_3$ oranıyla birlikte artmış ve ağırlıkça %8 $Al_2O_3$ takviye edilmiş kompozitte ortalama 222 MPa'a ulaşmıştır.

# Powder metal $Al_2O_3$ reinforced Mg5Sn matrix composites: Production and characterization

## HIGHLIGHTS

- Mg5Sn matrix $Al_2O_3$ reinforced composites produced through powder metallurgy
- Relative density values above 99% were obtained
- Superior mechanical properties were obtained compared to pure magnesium and Mg5Sn alloy

Article Info

Research Article
Received:02.06.2021
Accepted:01.05.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.947051

Keywords:
Magnesium-tin matrix, $Al_2O_3$ reinforcement, composite material, microstructure, mechanical properties

ABSTRACT

In this study, Mg5Sn-x$Al_2O_3$ composite materials were produced by powder metallurgy (PM) method by adding different weight proportions of alumina ($Al_2O_3$) into the magnesium-tin (Mg-Sn) matrix containing 5% tin (Sn) by weight. A new mixing technique was used to prevent the negative effects of the high reactivity of Mg powders in production. In this new mixing technique, the powders to be mixed are mixed homogeneously in a volatile substance (hexane) that does not contain oxygen element in its composition, and on the other hand, they are coated with paraffin. The production of samples from the prepared powder mixtures was carried out by hot pressing technique. The produced samples were characterized by density measurements, microstructure examinations and mechanical tests. A relative density of over 99% was achieved in all samples produced. Microstructure investigations showed that the alumina reinforcement was homogeneously distributed in the microstructure. Increasing $Al_2O_3$ reinforcement ratio provided significant increases in hardness and tensile strength values. While the hardness of the Mg5Sn alloy was 59 HV, the average hardness of the 8% by weight $Al_2O_3$ reinforced composite was 78.64 HV. While the tensile strength of the unreinforced Mg5Sn alloy was 145 MPa, this value increased with the increasing $Al_2O_3$ ratio and reached an average of 222 MPa in the 8% by weight $Al_2O_3$ reinforced composite.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *aercetin03@gmail.com, *oozgun@bingol.edu.tr, aslantas@bingol.edu.tr / Tel: +90 426 216 0012 / 1773

## 1. Giriş (Introduction)

Son zamanlarda, yakıt tüketimi ve $CO_2$ salınımını azaltmaya yönelik çalışmalarda hafif malzemelere olan ilgi artmaktadır [1, 2]. Özellikle, 1,74 g/cm$^3$ yoğunluğa sahip en hafif yapısal metal olan Mg ve alaşımları en çok gelecek vadeden malzemelerdendir [3]. Mg alaşımları hafifliği nedeniyle son yıllarda otomotiv endüstrisinde giderek daha fazla kullanılmaktadır [4]. Bununla birlikte, mekanik özellikleri, alüminyum (Al) ve titanyum (Ti) alaşımları gibi diğer yapısal metallere kıyasla zayıftır [5]. Hafif malzemelerin kullanım talebine rağmen, düşük mekanik özellikleri, günümüzde Mg ve alaşımlarının uygulama alanlarının genişlemesindeki en önemli engeldir [1, 6]. Bu nedenle, literatürde Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiş çok sayıda bilimsel çalışma mevcuttur [1, 7]. Bunlardan bazıları tane düzenlemesi için ciddi plastik şekil değiştirme işlemi ve takviye elemanlarının ilavesi ile kompozit malzeme üretimidir [8].

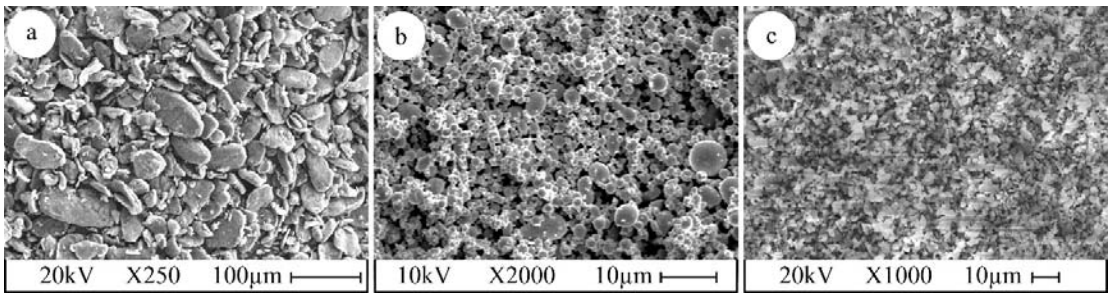
Çok çeşitli takviye elemanlarının varlığı ve yeni işleme tekniklerinin geliştirilmesi, kompozit malzemelere duyulan ilgiyi artırmaktadır. Kompozit oluşturma, bazı Mg alaşımlarını güçlendirmek için etkili bir yaklaşım olabileceğinden yüksek performanslı Mg malzemelerinin elde edilmesi için özellikle önemlidir [9–11]. Mg matrisli kompozitlerin otomotiv endüstrisindeki uygulamalarına örnek olarak disk rotorları, piston segman olukları, dişliler, dişli kutusu yatakları, bağlantı çubukları ve vites çatalları verilebilir [12, 13]. Hafif ve yüksek performanslı malzemeler için artan talep Mg matrisli kompozitlere olan ihtiyacı da artıracaktır [11, 14]. Metal matrisli kompozitlerin en büyük dezavantajı genellikle imalatın ve takviye malzemelerinin maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu nedenle, kompozit malzemelerin maliyet açısından verimli bir şekilde işlenmesi, uygulamalarını genişletmek için önemli bir gelişme olacaktır [11]. Toz metalurjisi, metalik malzemeleri mikroyapıları homojen ve ince taneli olacak şekilde üretmeyi sağlayan bir üretim yöntemidir [15, 16]. Herhangi bir parçanın üretiminde mümkün olan diğer tüm üretim tekniklerinden en ekonomik olanı toz metalurjisidir [17, 18]. Bu çalışmada, yüksek saflıkta Mg ve Sn tozlarının karıştırılması ile elde edilen Mg5Sn matris alaşımı içerisine, ağırlıkça farklı oranlarda $Al_2O_3$ ilave edilerek toz metalurjisi yöntemi ile Mg-Sn alaşım matrisli $Al_2O_3$ takviyeli kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı oranlarda $Al_2O_3$ takviyesinin yoğunluk, mikroyapı ve mekanik özelliklere (sertlik ve çekme mukavemeti) etkileri incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

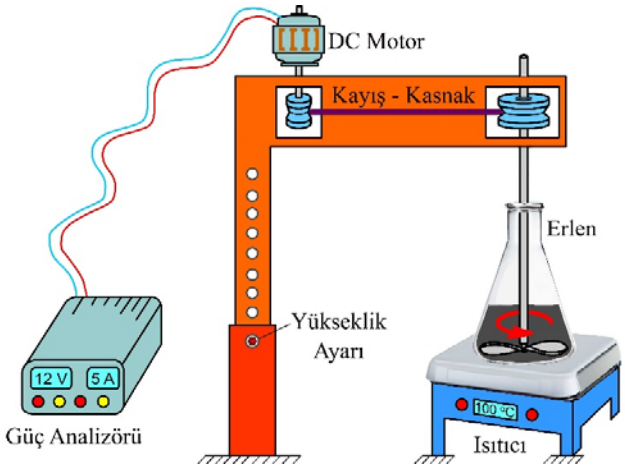
Çalışmalarda, Nanografi firmasından temin edilen ve parçacık boyutu 100 µm'den küçük olan %99,5 saflığa sahip Mg tozu kullanılmıştır. Sn tozu Sigma Aldrich firmasından temin edilmiş olup, %99 saflığa ve 10 µm parçacık boyutuna sahiptir. Takviye fazı olarak Nanografi firmasından temin edilmiş %99 saflığa ve 5 µm'den küçük parçacık boyutuna sahip $Al_2O_3$ tozu kullanılmıştır. Şekil 1'de tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri veilmiştir. SEM görüntülerinden Mg ve $Al_2O_3$ tozlarının düzensiz şekilli, Sn tozunun ise küresel şekilli olduğu görülmektedir.

Tozların karıştırılması Mg'un hava ile temasını kesme fikrine dayanan farklı bir teknikle gerçekleştirilmiştir. Bu karıştırma tekniğinde Mg tozunun oksijenle temasının kesilmesi için formülünde oksijen bulunmayan bir uçucu madde (hegzan) içerisinde eritilen parafin ile kaplanması sağlanmıştır. Bu işlem için hem yükseklik ayarı yapılabilecek hem de pervanesi katlanarak erlenin dar ağzından içeri girebilecek şekilde tasarlanmış ve özel olarak üretilmiş pervaneli dikey bir karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 2). Beher, içerisine 200 mL hegzan ve Mg tozunun hacimsel olarak %20'si kadar parafin mum (10,34 g) ilave edilerek 60°C'ye (parafinin ergime sıcaklığının üzerine) ısıtılmış ısıtıcı tabla üzerinde, parafin mum eriyene kadar beklenmiştir. Daha sonra ambalaj ağırlığı belli olan (100 g) Mg tozu atmosfer ve basınç kontrollü özel olarak tasarlanmış bir eldivenli kabin (glove box) içerisinde açılmıştır. Kabin iç hacmi 125 L olup, sistemde kabin içi vakum basıncını $2x10^{-3}$ mbar değerine kadar düşürebilecek 2 adet vakum pompası bulunmaktadır. Ambalajı açılan Mg tozu beher içerisine dökülerek hava ile teması engellenmiştir. Beher içerisine Mg5Sn oranını sağlayacak miktardaSn ilave edildikten sonra ısıtıcı tablanın sıcaklığı hegzanın kaynama sıcaklığının üzerine çıkarılarak (100°C) tüm hegzan uçana kadar karıştırma işlemi yapılmıştır. Hegzanın uçması sonucu geriye parafin mum ile kaplanmış Mg-Sn toz karışımı kalmıştır. Bu toz ağırlıkça 4 kısıma bölünmüş; bu kısımlara ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 olmak üzere farklı oranlarda $Al_2O_3$ ilavesi yapılmıştır. $Al_2O_3$ takviyesinin homojen dağılımını sağlamak amacıyla, tozlar erlen içerisine yerleştirildikten sonra 150 ml hegzan ilave edilerek tekrar 100°C'ye ısıtılmış ısıtıcı tabla üzerinde tüm hegzan uçana kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma esnasında yükseklik ayarı, karıştırıcının pervanesi ile erlenin tabanı arasında yaklaşık 1 mm mesafe kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede kompozitleri oluşturacak tüm toz parçacıklarının karıştırma işlemi boyunca hegzan-parafin mum çözeltisi içerisinde sürekli hareket etmeleri sağlanmış ve tüm hegzan uçana kadar askıda kalarak dibe çökmeleri önlenmiştir. Hegzan tamamen uçtuktan sonra geriye parafinle kaplı homojen toz karışımları kalmıştır.

Elde edilen karışımlar grafit kalıplar kullanılarak 40 MPa sabit basınç altında sıcak presleme işlemi ile kompozit numunelere dönüştürülmüştür. Sıcak presleme işleminde, işlem parametrelerinin numunelerin bağıl yoğunluğuna etkilerini incelemek amacıyla farklı sıcaklık (640°C, 655°C ve 665°C) ve farklı bekletme süreleri (15 min ve 30 min) uygulanmıştır. 665°C'nin üzerinde gerçekleşleştirilen denemelerde kısmi ergimelere bağlı olarak numune kalınlığında incelme ve grafit kalıba yapışma gibi problemlerle karşılaşılmıştır. En yüksek bağıl yoğunluğa 665°C'de 30 min ile ulaşıldığından deneysel çalışmalarda kullanılacak kompozit numuneler bu parametreler ile üretilmiştir.




**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri; a) Mg tozu, b) Sn tozu, c) $Al_2O_3$ tozu
(SEM images of the powders used in the study; a) Mg powder, b) Sn powder, c) $Al_2O_3$ powder)




**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan karıştırıcıcının şematik resmi
(Schematic picture of the mixer used in the study)

Üretilen numunelerin Arşimet prensibine göre yoğunlukları Eş. 1'e, teorik yoğunlukları Eş. 2'ye ve bağıl yoğunluk yüzdeleri Eş. 3'e göre ölçülüp hesaplanmıştır [19].

$$\text{Ölçülen Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{Havadaki\ ağırlık}{(Havadaki\ ağırlık)-(Sudaki\ ağırlık)} \quad (1)$$

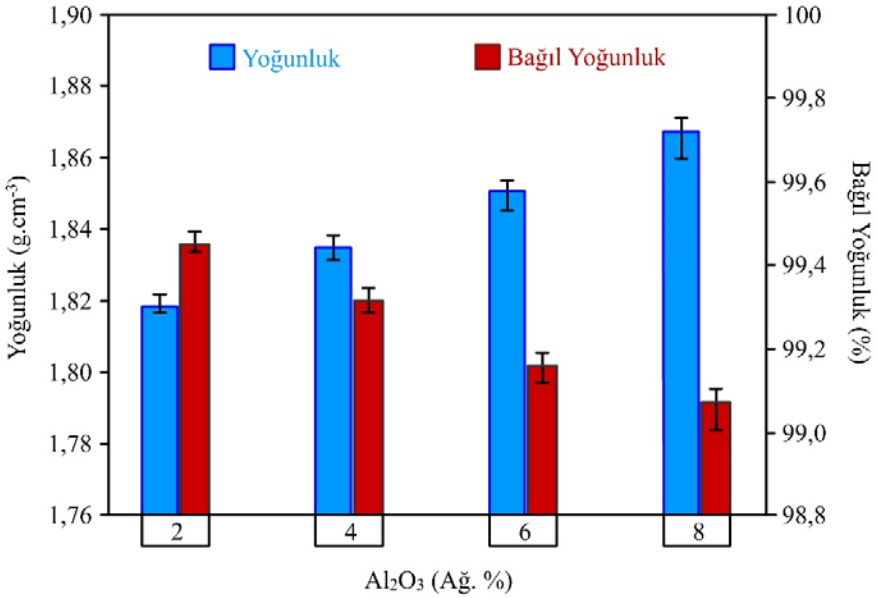
$$\text{Teorik Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{Toplam\ Kütle}{Toplam\ Hacim} = \frac{(Mg\ kütlesi)+(Sn\ kütlesi)+(Zn\ kütlesi)}{\left[\frac{Mg\ kütlesi}{Mg\ özkütlesi}\right]+\left[\frac{Sn\ kütlesi}{Sn\ özkütlesi}\right]+\left[\frac{Zn\ kütlesi}{Zn\ özkütlesi}\right]} \quad (2)$$

$$\text{Bağıl yoğunluk (\%)} = \frac{Ölçülen\ yoğunluk}{Teorik\ yoğunluk} \text{ x } 100 \quad (3)$$

Sıcak presleme yöntemiyle üretilen numuneleri metalografik incelemelere hazır hale getirmek için, sırasıyla 100, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 1500 grit zımparalama aşamaları uygulanmıştır. Literatür uygulaması dikkate alınarak [20, 21], zımparalama işleminden sonra numunelerin temizlenmesi için önce distile edilmiş su, ardından saf etil alkol kullanılmış ve desikatör içerisinde kurumaya bırakılmıştır. Oluşan fazların tayini için XRD analizleri Rigaku Ultima IV X-Ray Difractometer cihazında Cu X-ışını tüpü (λ=1,5405) kullanılarak 0,02/0,4 degree/sec tarama hızı ile yapılmıştır. Numuneleri parlatma işlemi, parlatma çuhasında 1 mikronluk elmas süspansiyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin dağlama işlemi gerçekleştirilirken, literatürde benzer Mg esaslı alaşımlarda kullanılan dağlayıcı karışımından (hacimce %95 etil alkol+%5 nitrik asit ($HNO_3$)) yararlanılmıştır [22, 23]. Dağlanan numunelerin SEM/EDS analizleri ile mikroyapıları incelenmiştir. SEM ve EDS incelemeleri JEOL JSM 6510 taramalı elektron mikroskobu ve bu cihaza bağlı IXRF 550 marka EDS sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri AOB &LABTT Jiashan Lab Instruments marka ve THV-1D model cihazda Vickers yöntemi ile 300 g yük 15 saniye uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi MPIF-10 standardına uygun olarak hazırlanmış numunelerin Shimadzu marka 10 kN kapasiteli cihaz kullanılarak 0,5 mm/min sabit hızla çekilmesi şeklinde yapılmıştır. Çekme testleri her kompozit grubu için 3'er numuneye uygulanmıştır.

## 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

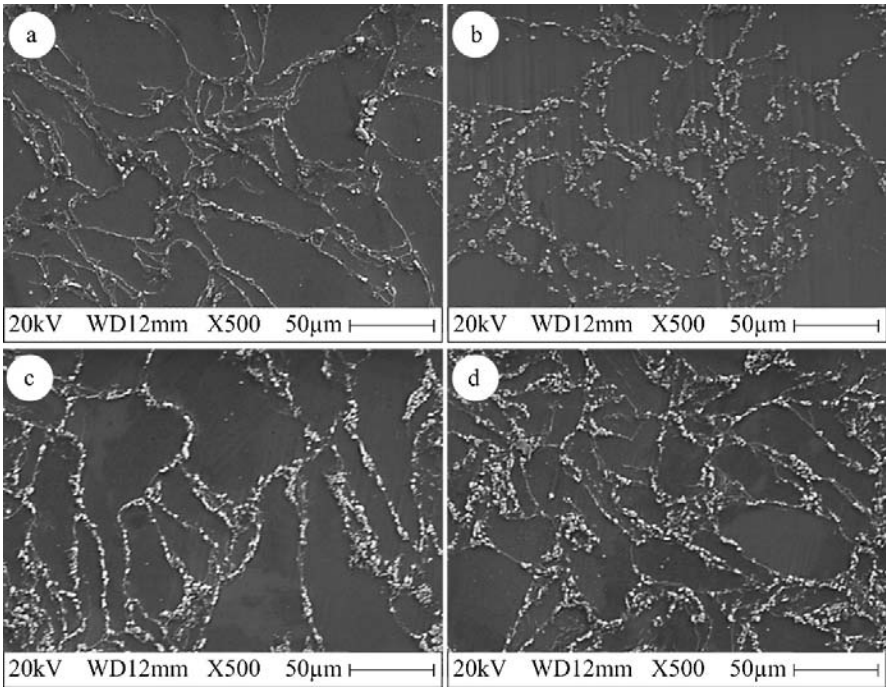
Şekil 3'de ağırlıkça farklı oranlarda $Al_2O_3$ takviye içeren kompozit numunelere ait yoğunluk ve bağıl yoğunluk değerleri verilmiştir. Yoğunluğu 3,95 g.cm$^{-3}$ olan $Al_2O_3$ takviye fazının artan oranıyla birlikte yoğunluk değerleri de doğal olarak artış göstermiştir. $Al_2O_3$ oranındaki artışa bağlı olarak ölçülen yoğunluk değerleri sırasıyla 1,819, 1,835, 1,850 ve 1,867 g.cm$^{-3}$ olmuştur. Erçetin vd. tarafından daha önce gerçekleştirilmiş bir çalışmada, sıcak presleme metodu ile ağırlıkça %5 Sn içeren Mg5Sn alaşımı bu çalışmadaki aynı toz ve paremetreler kullanılarak üretilmiştir. Söz konusu çalışmada Mg5Sn alaşımının yoğunluğu 1,803 g.cm$^{-3}$, bağıl yoğunluk değeri ise %99,72 olarak rapor edilmiştir [19]. Şekil 3 incelendiğinde $Al_2O_3$ takviye edilmiş kompozitlerin bağıl yoğunluk değerlerinin Mg5Sn alaşımına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Artan $Al_2O_3$ takviye oranıyla birlikte elde edilen bağıl yoğunluk değerleri azalmıştır. Ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında $Al_2O_3$ takviyesi yapılmış kompozitlerde sırasıyla %99,45, %99,31, %99,15 ve %99,07 bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Takviye elemanının oranındaki artışla bağıl yoğunluk değerlerinin azalması, takviye fazı ile matris fazı ara yüzey



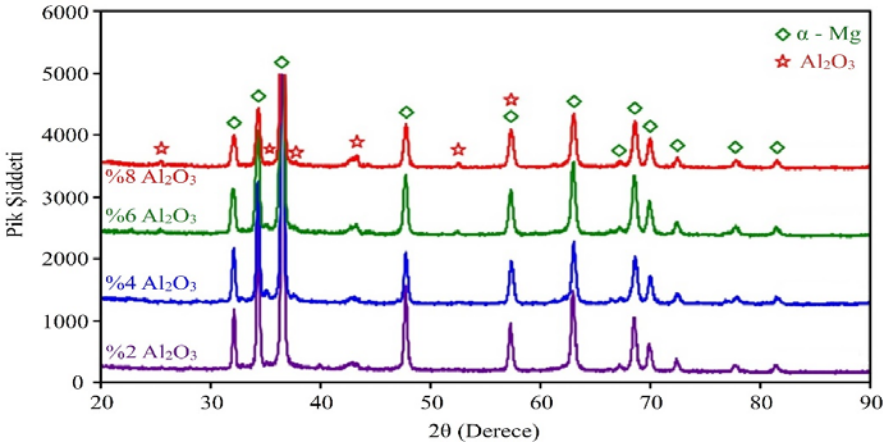

**Şekil 3.** Üretilen kompozitlerde $Al_2O_3$ takviye oranına göre elde edilen bağıl yoğunluk değerleri
(Relative density values obtained according to the $Al_2O_3$ reinforcement ratio in the produced composites)

alanının artmasına bağlanmaktadır. Toz metalurjisi teknikleri ile üretilen birçok kompozit sisteminde artan takviye fazı miktarıyla birlikte ulaşılabilen bağıl yoğunluk değerlerinin düştüğü ve bu düşüşte ara yüzeydeki bağlanmanın önemli bir rolü olduğu rapor edilmektedir [24–26]. Bununla birlikte kompozit malzemelerin performanslarının büyük ölçüde matris-takviye fazı ara yüzeyindeki bağlanma tarafından belirlendiği bildirilmektedir [27, 28]. Ara yüzeydeki yeterli bağlanma matris ile takviye fazı arasındaki yük iletimini geliştirerek özellikleri iyileştirmektedir [28]. Her ne kadar artan takviye fazı oranıyla birlikte bağıl yoğunluk değerleri azalmış olsa da üretilen bütün numunelerin bağıl yoğunluk değerlerinin %99'un üzerinde olması, sıcak presleme işleminin başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir. Bağıl yoğunluk değerlerinin %99'un üzerinde olması, matris-takviye fazı ara yüzeyinde iyi bir bağlanmanın da elde edildiğini dolaylı olarak göstermektedir. Bu, mekanik özellikler açısından önemlidir.

Şekil 4'de üretilen kompozitlerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, tüm kompozitlerin neredeyse gözenek içermeyen yoğun bir mikroyapıya sahip oldukları görülmektedir. Bu durum, tüm kompozitlerde %99'un üzerinde bağıl yoğunluk elde edildiğini doğrulamaktadır. SEM görüntülerinde, artan $Al_2O_3$ takviye oranıyla birlikte beyaz renkte görülen $Al_2O_3$ parçacıklarının miktarının da arttığı görülmektedir. Dikkat çeken bir detay, $Al_2O_3$ takviye fazının tane içlerinden çok tane sınırlarına yerleşmiş olmasıdır. Artan $Al_2O_3$ oranıyla birlikte daha ince taneli bir mikroyapı elde edildiği görülmektedir. Cheng ve arkadaşları, döküm yöntemi ile ürettikleri ağırlıkça farklı oranlarda Sn içeriğine sahip Mg-Sn alaşımlarında artan $Mg_2Sn$ oranıyla birlikte daha ince taneli bir mikroyapı elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu durumu $Mg_2Sn$ çökeltilerinin tane irileşmesini engelleyen bariyerler gibi davranmalarına bağlamışlardır [29]. Benzer bulguya farklı oranlarda Sn ilavesi yaparak Mg-Sn alaşımları üretilen farklı çalışmalarda da ulaşılmıştır [30, 31]. Literatürde farklı alaşım sistemlerinde de buna benzer açıklamalar bulunmaktadır. Örneğin süperalaşımlarda tane sınırlarında oluşan sert fazların etkileyici bir şekilde tane büyümesine engel oldukları bildirilmektedir [32, 33]. Bu çalışmada, artan $Al_2O_3$ oranıyla birlikte tane sınırlarına yerleşen daha yüksek miktardaki $Al_2O_3$ parçacıkları sayesinde daha ince taneli bir mikroyapı elde edilmiştir. Malzemelerde daha ince tane boyutunun düşük sıcaklık servis şartlarında malzemenin daha üstün mekanik özelliklere sahip olmasını sağladığı bilinmektedir [32, 33]. Özellikle Mg alaşımlarında Al alaşımlarına kıyasla tane boyutunun mukavemete etkisi daha belirgindir [34]. Bu açıklamalar ışığında Mg5Sn alaşımına yapılan $Al_2O_3$ takviyesinin mikroyapı ve dolayısıyla mekanik özellikler açısından faydalı olduğu söylenebilir. Artan takviye fazı oranı, tane boyutunu inceltmenin yanında mikroyapıda bulunan α-Mg tanelerinin boyutları arasındaki farkı da azaltmıştır. Özellikle %8 $Al_2O_3$ ilave edilmiş numunenin SEM görüntüsünde diğer numunelere nazaran tanelerin boyutları arasındaki farkın belirgin biçimde düşük olduğu görülmektedir. Şekil 5'te kompozit numunelerin XRD analizine ait kırınım desenleri verilmiştir. Tüm numunelerin kırınım desenlerinde sadece α-Mg (JCPDS 89-5003) ve $Al_2O_3$ (JCPDS 71-1123) pikleri bulunduğu görülmektedir. Takviye fazının oranındaki artışla birlikte; $Al_2O_3$ piklerinin daha belirgin olduğu ve şiddetlerinin arttığı görülürken, α-Mg piklerinin şiddeti azalmaktadır. Mg-Sn faz diyagramına göre oda sıcaklığında Mg içerisinde hiç Sn çözünememektedir. Bu nedenle, ilave edilen Sn, katı çözelti yerine $Mg_2Sn$ intermetaliğini oluşturmaktadır. Erçetin vd. [19] tarafından sıcak presleme yöntemi ile üretilen Mg5Sn alaşımının XRD paternlerinde α-Mg ve intermetalik $Mg_2Sn$ fazlarına ait pikler bulunduğu rapor edilmiştir. Ancak şimdiki çalışmanın XRD paternlerinde $Mg_2Sn$ intermetalik fazına ait pikler görülmemektedir. Hort vd. [35], döküm yöntemiyle ağırlıkça %3 ve %5 Sn içeren Mg alaşımları ürettikleri bir çalışmada, artan Sn oranıyla birlikte daha yüksek oranda $Mg_2Sn$ çökeltisi oluştuğunu bildirmişlerdir. Buna bağlı olarak XRD kırınım desenlerinde %5 Sn içeren numune için $Mg_2Sn$ piklerini tespit edebildiklerini, ancak %3 Sn içeren numunede $Mg_2Sn$ piklerinin görülemediğini belirtmişlerdir [35]. Yukarıda, takviye fazındaki artışın $Al_2O_3$ piklerinin daha belirgin olmasına ve şiddetlerinin artmasına, buna karşılık α-Mg piklerinin şiddetinin azalmasına neden olduğu vurgulandı. Bu durum, artan takviye fazının malzeme içerisindeki Mg oranını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Aynı durum Sn oranı için de geçerlidir. Artan $Al_2O_3$ oranıyla birlikte malzeme içerisindeki Sn oranının azalması, daha düşük miktarda $Mg_2Sn$ oluşmasına ve dolayısıyla kırınım desenlerinde $Mg_2Sn$ piklerinin görülememesine neden olmuştur. XRD analizine ait

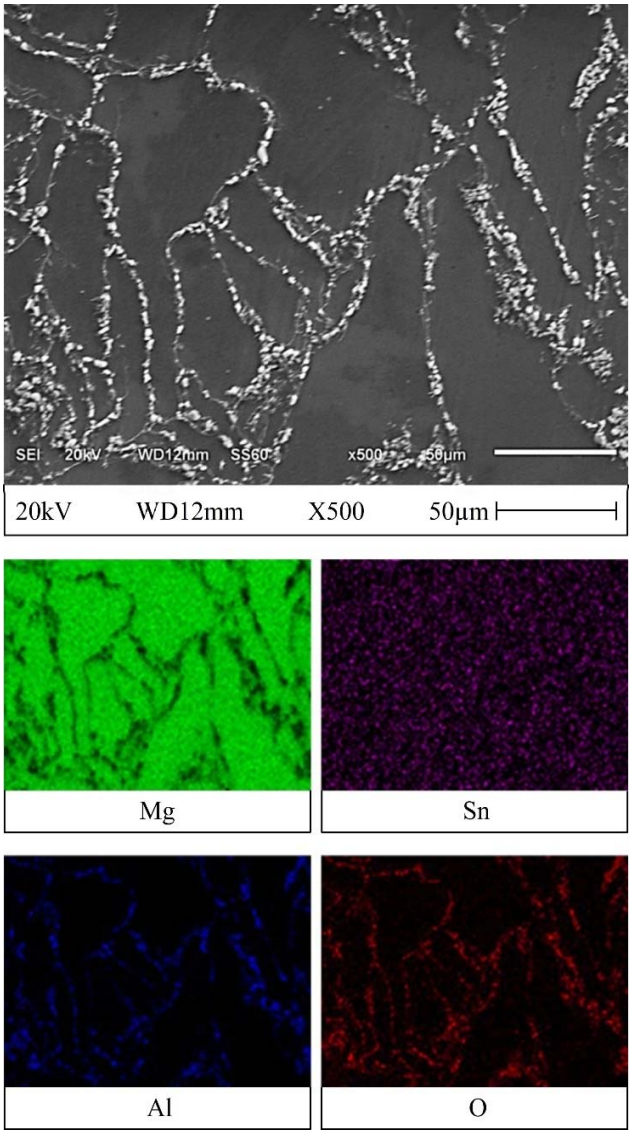



**Şekil 4.** Üretilen $Al_2O_3$ takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri; a) %2 $Al_2O_3$, b) %4 $Al_2O_3$, c) %6 $Al_2O_3$, d) %8 $Al_2O_3$
(SEM images of $Al_2O_3$ reinforced composites produced; a) 2% $Al_2O_3$, b) 4% $Al_2O_3$, c) 6% $Al_2O_3$, d) 8% $Al_2O_3$)

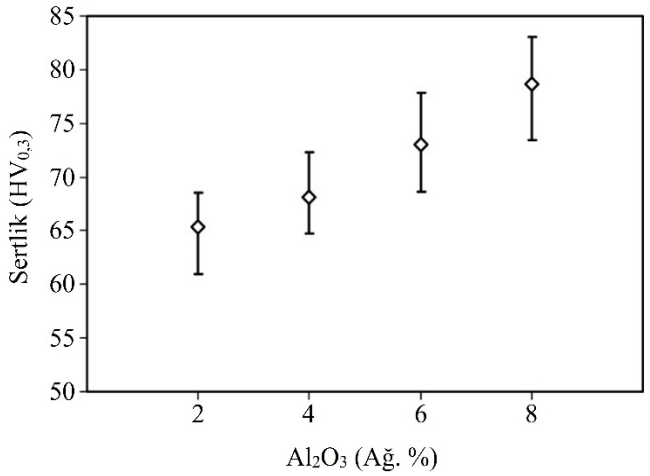



**Şekil 5.** Farklı oranlarda $Al_2O_3$ takviyesi içeren kompozit numunelerin XRD desenleri
(XRD patterns of composite samples containing different proportions of $Al_2O_3$ reinforcement)

desenlerde karıştırma işlemi için kullanılan parafinden dolayı üretilmiş numunelerde bulunması muhtemel kalıntı karbona ait bir pike de rastlanmamıştır. Bununla birlikte elde edilen kırınım desenlerinde sıcak presleme işlemi esnasında Mg matrisin oksidasyona uğradığına dair herhangi bir emare de bulunmamaktadır. Hem kalıntı karbon hem de matrisin oksidasyonu gibi olumsuzlukların bulunmaması kullanılan karıştırma yönteminin ve üretim sürecinin başarısına işaret etmektedir. Şekil 6'da ağırlıkça %6 $Al_2O_3$ takviye edilmiş kompozitten alınmış SEM/EDS haritalama analizine ait görüntüler verilmiştir. SEM görüntüleri ile ilgili yapılan açıklamalarda, $Al_2O_3$ takviye fazının daha çok tane sınırlarına yerleşmiş olduğu ifade edilmiştir. Haritalama analizinin alüminyum ve oksijene ait görüntülerinde, alüminyum ve oksijen elementlerinin tane sınırlarındaki aynı noktalarda kümelendiği görülmektedir. Bu durum, SEM görüntüleri ile ilgili açıklamaları desteklemektedir. Burada dikkat çeken önemli bir detay, oksijenin tane içlerinde bulunmamasıdır. Bu, magnezyumun yüksek rektivitesine rağmen uygulanan karıştırma tekniğinin başarısına işaret etmektedir. Bununla birlikte, Sn elementine ait görüntüde, Sn'ın miktarının da tane sınırlarında artış sergilediği görülmektedir. Şekil 7'de üretilen kompozit numunelerden ölçülen sertlik değerleri verilmiştir. Mg alaşımlarının artan $Al_2O_3$ takviye oranının elde edilen sertlik değerlerini artırdığı ve en yüksek sertliğe %8 $Al_2O_3$ ilave edilen numunede ulaşıldığı görülmektedir. $Al_2O_3$ ilavesinin Mg alaşımlarının sertliğini arttırdığı benzer çalışmalarda da belirtilmiştir [36, 37]. Turan ve arkadaşları sıcak presleme ile ürettikleri %99,76 bağıl yoğunluğa sahip saf magnezyumun ortalama 40,2 HV sertliğe sahip olduğunu bildirmişlerdir [38]. Erçetin ve arkadaşları, bu çalışmadaki üretim parametrelerini kullanarak sıcak presleme ile ürettikleri Mg5Sn alaşımında 59 HV sertlik değeri elde etmiştir [19]. Şimdiki çalışmada %2 $Al_2O_3$ takviye edilmiş numunenin sertliği ortalama 65,4 $HV_{(0.3)}$ olup hem saf magnezyuma hem de sıcak presleme yöntemi ile üretilen Mg5Sn alaşımına göre oldukça yüksektir. $Al_2O_3$ takviye oranının ağırlıkça %8'e çıkması ile elde edilen ortalama sertlik değeri 78,64 $HV_{(0.3)}$'e çıkmıştır. Elde edilen bu sertlik değeri, literatürdeki birçok magnezyum matrisli kompozit için belirtilen sertlik değerlerinin oldukça üstündedir. Vahid ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada saf Mg içerisine hacimsel olarak farklı oranlarda Nb ve Ta ilavesi yapılarak toz metalürjisi tekniği ile kompozit malzemeler üretilmiştir. Söz konusu çalışmada en yüksek sertlik değerine hacimsel olarak %4 Nb ilavesi ile ulaşıldığı ve bu artışın saf Mg'un sertliğine göre %21 olduğu bildirilmiştir [39]. Jiang ve arkadaşları Mg'nin içerisine hacimsel olarak %10 $B_4C$ ilave ederek 44 HB sertliğe ulaşmışlardır [40]. Sertlik dönüşüm tablosuna göre bu değer yaklaşık 49 HV değerine karşılık gelmektedir. Şimdiki çalışmada en düşük $Al_2O_3$ takviyesi (ağırlıkça %2) ile Jiang ve arkadaşlarının %10 $B_4C$ ilavesi yaptıkları malzemeden çok daha yüksek bir sertliğe ulaşılmıştır.




**Şekil 6.** Ağırlıkça %6 $Al_2O_3$ takviye edilmiş numuneden alınmış SEM/EDS haritalama analizi (SEM/EDS mapping analysis taken from 6% by weight $Al_2O_3$ reinforced sample)



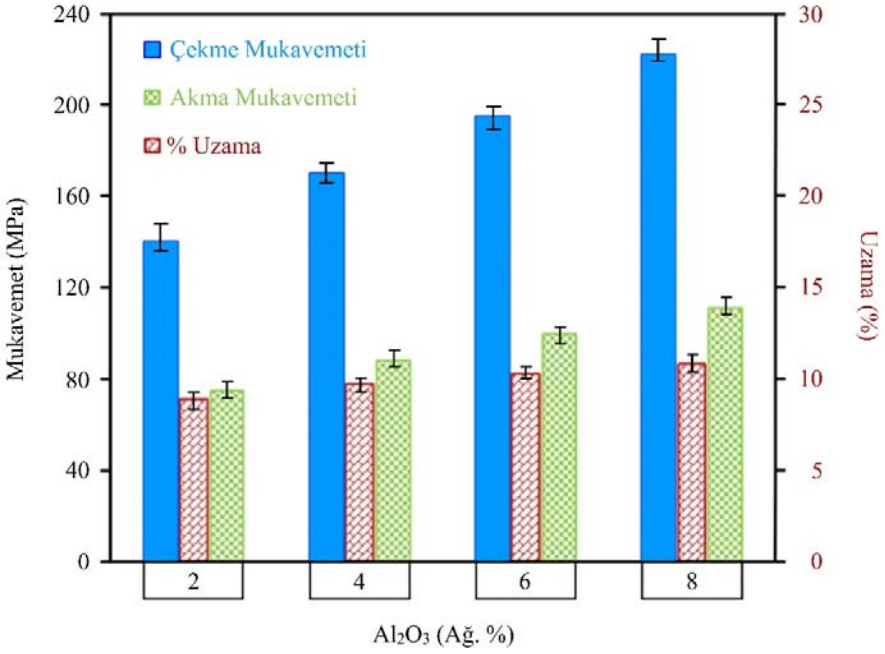

**Şekil 7.** Üretilen Mg5Sn-x$Al_2O_3$ kompozit numunelere ait sertlik değerleri
(Hardness values of Mg5Sn-x$Al_2O_3$ composite samples produced)

Farklı oranlarda $Al_2O_3$ takviyesi içeren Mg5Sn matrisli kompozitlere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Artan $Al_2O_3$ takviye oranıyla birlikte mukavemet ve ortalama % uzama değerlerinin de arttığı görülmektedir. En yüksek akma ve çekme mukavemeti %8 oranında $Al_2O_3$ takviye edilen numuneden elde edilmiştir. SEM görüntüleri ile ilgili açıklamalarda $Al_2O_3$ parçacıklarının tane sınırlarına yerleşmiş olduğu belirtilmişti. Takviye oranındaki artışla birlikte tane sınırlarına yerleşmiş olan $Al_2O_3$ parçacıklarının hacim oranı da artmış ve buna bağlı olarak daha ince taneli mikroyapı elde edilmiştir. Hem daha ince taneli mikroyapı hem de tane sınırlarında daha yüksek miktarda $Al_2O_3$ bulunması artan takviye oranıyla birlikte daha yüksek akma ve çekme mukavemeti elde edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, en yüksek % uzama (%10,8) değeri de aynı numuneden elde edilmiştir. Paramsothy ve arkadaşları benzer bir çalışmasında [41], AZ81 alaşımına hacimsel olarak %1,5 $Al_2O_3$ takviyesi yaparak döküm yöntemiyle üretimini gerçekleştirmiş ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre, $Al_2O_3$ takviyesinin hem mukavemet değerlerini hem de % uzama değerlerini arttırdığını tespit etmişlerdir [41]. Çalışmalarda farklı magnezyum alaşım matrisi kullanılmış olsa da, $Al_2O_3$ takviyesinin mukavemet ve % uzama değerlerini arttırdığını söylemek mümkündür. Jiang ve arkadaşlarına ait başka bir çalışmada ise [42], AZ91 magnezyum alaşımına hacimce %10 oranında TiC takviyesi yapılarak döküm yöntemiyle kompozitlerin üretimi sağlanmıştır. Elde ettikleri sonuca göre; AZ91 matris alaşımının çekme mukavemeti 160 MPa iken ilave edilen TiC takviyesi ile 214 MPa değerine ulaşmıştır [42]. Erçetin vd. [19] tarafından sıcak presleme yöntemi kullanılarak aynı parametreler ile üretilmiş Mg5Sn alaşımının akma ve çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 75,7 ve 145 MPa olarak bildirilmiştir. Şimdiki çalışmada, $Al_2O_3$ takviye oranındaki artışla akma ve çekme mukavemetleri de artmış ve en yüksek değerlere ağırlıkça %8 $Al_2O_3$ içeren kompozitte ulaşılmıştır. Bu kompozitte elde edilen akma ve çekme mukavemetleri sırasıyla 111 ve 222 MPa olmuştur. Bu değer, Jiang ve arkadaşlarının elde ettiği çekme mukavemeti değerinden [42], yaklaşık %3,7 daha fazladır. Dolayısıyla, şimdiki çalışmada, Mg5Sn matrisine ilave edilen $Al_2O_3$ takviye oranındaki artışın, üretilen kompozit numunelerinin dayanım ve süneklik özelliklerini geliştirdiğini söylemek mümkündür.

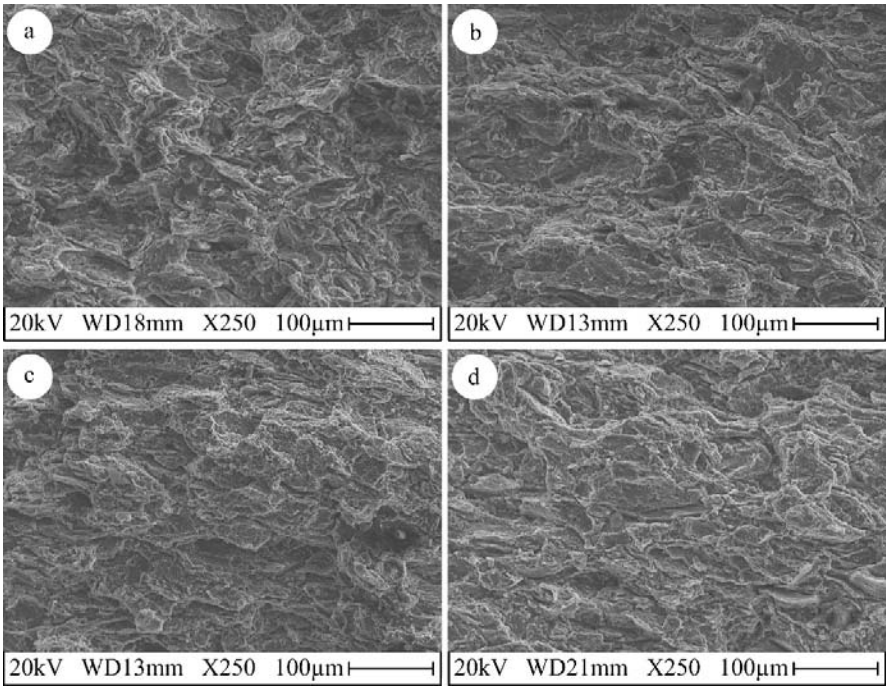
Çekme deneyi sonrası numunelerin kırılma yüzeyinden alınmış SEM görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. Numunelerin mikroyapısına ait SEM görüntüleri gibi kırılma yüzeylerinde de gözeneğe rastlanmamaktadır. Kırılma yüzeyleri karşılaştırıldığında, çekme deneyleri ile belirlenen süneklik değerleri ile uyumlu olarak artan takviye oranıyla daha sünek bir kırılma yüzeyi elde edilmiştir. Bununla birlikte tüm numunelerde kırılmanın tane içlerinden gerçekleşmiş olduğu görülmektedir.

## 4. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Bu çalışmada Mg'un yüksek reaktivitesinin yol açacağı olumsuzlukların önüne geçmek amacıyla yeni bir karıştırma tekniği kullanılarak TM metodu ile farklı $Al_2O_3$ takviye içeriğine sahip




**Şekil 8.** Mg5Sn-x$Al_2O_3$ kompozit numunelerine ait çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerleri
(Tensile strength, yield strength and % elongation values of Mg5Sn-x$Al_2O_3$ composite samples)




**Şekil 9.** Çekme deneyi sonrası kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri; a) %2 $Al_2O_3$, b) %4 $Al_2O_3$, c) %6 $Al_2O_3$, d) %8 $Al_2O_3$
(SEM images taken from the fracture surfaces after the tensile test; a) 2% $Al_2O_3$, b) 4% $Al_2O_3$, c) 6% $Al_2O_3$, d) 8% $Al_2O_3$)

Mg5Sn matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonundan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Uygulanan karıştırma yöntemi sayesinde Mg tozlarının hem karıştırma hem de sıcak presleme işlemi esnasında oksitlenmesinin önüne geçilmesi, üretilen kompozitlerde %99'un üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmesini sağlamıştır.
- SEM incelemelerinde takviye fazının tane sınırlarına yerleşmiş olduğu görülmüştür. Tane sınırlarına yerleşen $Al_2O_3$ parçacıkları tane irileşmesini engellemiş; dolayısıyla artan takviye fazı oranıyla birlikte daha ince taneli bir mikroyapı elde edilmiştir.
- Artan $Al_2O_3$ takviye oranıyla birlikte sertlik değerlerinde ciddi artış gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %8 $Al_2O_3$ içeren kompozitin ortalama sertlik değeri 78,64 $Hv_{0.3}$ olarak elde edilmiştir.
- $Al_2O_3$ takviyesi, hem saf magnezyuma hem de Mg5Sn alaşımına göre daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Artan $Al_2O_3$ takviye oranına bağlı olarak kompozit numunelerin ortalama çekme mukavemetleri sırasıyla 140 MPa, 170 MPa, 195 MPa ve 222 MPa; ortlama % uzama değerleri ise sırasıyla %8,9, %9,7, %10,3 ve %10,8 olmuştur.
- TM, döküm tekniklerine nazaran alaşım sisteminin esnekliğini artırmanın yanında ince ve eşeksenli tanelerden oluşan mikroyapı ve dolayısıyla daha üstün mekanik özellikler gibi birçok avantaj sunmaktadır. Bu avantajlarına rağmen, Mg tozlarının yüksek reaktiviteleri nedeniyle Mg ve alaşımı parçaların üretimi için şimdiye kadar zor bir yöntem olarak kabul görmüştür. Şimdiki çalışmada uygulanan karıştırma tekniği, Mg tozlarının yüksek reaktivitelerinin yol açabileceği zorluk ve problemlerin önlenmesini sağlamıştır. Üretilen kompozit numunelerin sahip oldukları üstün özellikler göz önünde bulundurulduğunda şimdiki çalışmadakine benzer yenilik veya modifikasyonlarla TM'nin Mg alaşımı ve Mg matrisli kompozitlerin üretiminde ihtiyaç duyulan ve gelecek vadeden bir yöntem olduğu düşünülmektedir.

**Teşekkür (Acknowledgement)**

Bu çalışmaya, BAP-MMF.2017.00.007 nolu proje ile sağladığı destekten dolayı Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

**Kaynaklar (References)**

1. Kulekci M.K., Magnesium and its alloys applications in automotive industry, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 39, 851–865, 2008.
2. Kumar D., Phanden R.K., Thakur L., A review on environment friendly and lightweight magnesium-based metal matrix composites and alloys, Mater. Today Proc., 38, 359–364, 2021.
3. Çetin T., Akkaş M., Boz M., Investigation of the effect of gas pressure on powder characterization of AM60 magnesium alloy powder produced by gas atomization method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 967–977, 2020.
4. Yin S., Duan W., Liu W., et al., Influence of specific second phases on corrosion behaviors of Mg-Zn-Gd-Zr alloys, Corros. Sci., 166, 108419, 2020.
5. Hekimoğlu A.P., Çalış M., Effect of grain refinement with titanium on the microstructure, mechanical and corrosion properties of Al-25Zn alloy, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35, 311–322, 2020.
6. Erçetin A., Sıcak presleme yöntemi ile TZ72-xMn magnezyum alaşımlarının üretimi: Karakterizasyon ve mekanik özellikler, Turkish Journal of Nature and Science, 10 (1), 96-102, 2021.
7. Ramalingam V.V., Ramasamy P., Kovukkal M., Das, Myilsamy G., Research and development in magnesium alloys for industrial and biomedical applications: A review, Metals and Materials International, 26, 409–430, 2020.
8. Saravanan R.A., Surappa M.K., Fabrication and characterisation of pure magnesium-30 vol. % SiCp particle composite, Mater. Sci. Eng. A., 276, 108–116, 2000.
9. Suresh S., Gowd G.H., Kumar M.L.S.D., Mechanical and wear behavior of Al 7075/Al2O3/SiC/mg metal matrix nanocomposite by liquid state process, Adv. Compos. Hybrid Mater., 2, 530–539, 2019.
10. Kandemir S., Development of graphene nanoplatelet-reinforced AZ91

magnesium alloy by solidification processing, J. Mater. Eng. Perform., 27, 3014–3023, 2018.
11. Ye H.Z., Liu X.Y., Review of recent studies in magnesium matrix composites, J. Mater. Sci., 39, 6153–6171, 2004.
12. Patel M., Pardhi B., Chopara S., Pal M., Lightweight composite materials for automotive-A review, Int. Res. J. Eng. Technol., 5, 41–47, 2018.
13. Luo A., Renaud J., Nakatsugawa I., Plourde J., Magnesium castings for automotive applications, JOM., 47, 28–31, 1995.
14. Zhao Z., Bai P., Du W., et al., An overview of graphene and its derivatives reinforced metal matrix composites: Preparation, properties and applications, Carbon, 170, 302–326, 2020.
15. Özgün Ö., Erçetin A., Microstructural and mechanical properties of Cr-C reinforced Cu matrix composites produced through powder metallurgy method, Turkish Journal of Nature and Science, 6, 1–6, 2017.
16. Gökçe A., Toz metalurjisi yöntemiyle Mg-Sn alaşımı üretimi ve karakterizasyonu, Acad. Platf. J. Eng. Sci., 8, 112–119, 2020.
17. Bendikiene R., Ciuplys A., Kavaliauskiene L., Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings, J. Clean. Prod., 229, 1225–1232, 2019.
18. Erden M.A., Yaşar N., Korkmaz M.E., Ayvacı B., Nimel Sworna Ross K., Mia M., Investigation of microstructure, mechanical and machinability properties of Mo-added steel produced by powder metallurgy method, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 1–17, 2021.
19. Ercetin A., Özgün Ö., Aslantas K., Investigation of mechanical properties of Mg5Sn-xZn alloys produced through new method in powder metallurgy, J. Test. Eval., 49, 3506-3518, 2021.
20. Shuai C., Zhou Y., Lin X., et al., Preparation and characterization of laser-melted Mg–Sn–Zn alloys for biomedical application, J. Mater. Sci. Mater. Med., 28, 13, 2017.
21. Zong Y., Yuan G., Zhang X., Mao L., Niu J., Ding W., Comparison of biodegradable behaviors of AZ31 and Mg-Nd-Zn-Zr alloys in Hank's physiological solution, Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol., 177, 395–401, 2012.
22. Wahba M., Katayama S., Laser welding of AZ31B magnesium alloy to Zn-coated steel, Mater. Des., 35, 701–706, 2012.
23. Nayyeri G., Mahmudi R., Enhanced creep properties of a cast Mg-5Sn alloy subjected to aging-treatment, Mater. Sci. Eng. A., 527, 4613–4618, 2010.
24. Uddin S.M., Mahmud T., Wolf C., et al., Effect of size and shape of metal particles to improve hardness and electrical properties of carbon nanotube reinforced copper and copper alloy composites, Compos. Sci. Technol., 70, 2253–2257, 2010.
25. Balalan Z., Ozgun O., Effect of production route on the microstructure and mechanical properties of Cu–SiCp composites, Arab. J. Sci. Eng., 43, 4889–4897, 2018.
26. Özgün Ö., Bulut C., A novel mixing method for powder metallurgy copper-carbon nanotube composites, Mater. Sci. Eng. Technol., 51, 982–991, 2020.
27. Erçetin A., Aslantaş K., Perçin M., Micro milling of tungsten-copper composite materials produced through powder metallurgy method: Effect of composition and sintering temperature, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1369–1381, 2018.
28. Zhan Y., Zhang G., The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiCp/Cu composites, Mater. Lett., 57, 4583–4591, 2003.
29. Cheng W.L., Park S.S., You B.S., Koo B.H., Microstructure and mechanical properties of binary Mg-Sn alloys subjected to indirect extrusion, Mater. Sci. Eng. A., 527, 4650–4653, 2010.
30. Özgün Ö., Aslantaş K., Erçetin A., Powder metallurgy Mg-Sn alloys: Production and characterization, Scientia Iranica, 27, 1255–1265, 2020.
31. Liu H., Chen Y., Tang Y., Wei S., Niu G., The microstructure, tensile properties, and creep behavior of as-cast Mg-(1-10)%Sn alloys, J. Alloys Compd., 440, 122–126, 2007.
32. Gülsoy H.Ö., Özgün Ö., Bilketay S., Powder injection molding of Stellite 6 powder: Sintering, microstructural and mechanical properties, Mater. Sci. Eng. A., 651, 914–924, 2016.
33. Özgün Ö., Gülsoy H.Ö., Yilmaz R., Findik F., Injection molding of nickel based 625 superalloy: Sintering, heat treatment, microstructure and mechanical properties, J. Alloys Compd., 546, 192–207, 2013.
34. Chen D., Ren Y.P., Guo Y., Pei W.L., Zhao H.Da, Qln G.W., Microstructures and tensile properties of as-extruded Mg-Sn binary alloys, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 20, 1321–1325, 2010.
35. Hort N., Huang Y., Leil T.A., Maier P., Kainer K.U., Microstructural investigations of the Mg-Sn-xCa system, Adv. Eng. Mater., 8, 359–364, 2006.
36. Nguyen Q.B., Gupta M., Microstructure and mechanical characteristics of AZ31B/Al2O3 nanocomposite with addition of Ca, J. Compos. Mater., 43, 5–17, 2009.
37. Radi Y., Mahmudi R., Effect of Al2O3 nano-particles on the microstructural stability of AZ31 Mg alloy after equal channel angular pressing, Mater. Sci. Eng. A., 527, 2764–2771, 2010.
38. Turan M.E., Sun Y., Akgul Y., Turen Y., Ahlatci H., The effect of GNPs on wear and corrosion behaviors of pure magnesium, J. Alloys Compd., 724, 14–23, 2017.
39. Vahid A., Hodgson P., Li Y., Reinforced magnesium composites by metallic particles for biomedical applications, Mater. Sci. Eng. A., 685, 349–357, 2017.
40. Jiang Q.C., Wang H.Y., Ma B.X., Wang Y., Zhao F., Fabrication of B4C participate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy, J. Alloys Compd., 386, 177–181, 2005.
41. Paramsothy M., Tan X.H., Chan J., Kwok R., Gupta M., Al2O3 nanoparticle addition to concentrated magnesium alloy AZ81: Enhanced ductility, J. Alloys Compd., 545, 12–18, 2012.
42. Jiang Q.C., Li X.L., Wang H.Y., Fabrication of TiC particulate reinforced magnesium matrix composites, Scr. Mater., 48, 713–717, 2003.