



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MAGNEZYUM ZK60 MATRİS TiB_2 - WS_2 HİBRİT
TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

HARUN TAŞCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül- 2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Harun TAŞCI tarafından hazırlanan “*Magnezyum ZK60 Matris TiB₂-WS₂ Hibrit Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*” adlı tez çalışması 05/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

.....

Danışman

Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Taha Alper YILMAZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Öğr. Gör. Dr. Ufuk TAŞCI bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Harun TAŞCI

05/09/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAGNEZYUM ZK60 MATRİS TiB_2 - WS_2 HİBRİT TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Harun TAŞCI

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışmanlar: Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

2025, 50 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL

Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

Dr. Öğr. Üyesi Taha Alper YILMAZ

Magnezyum alaşımları, yüksek işlenebilirlik, düşük yoğunlukları ve yüksek özgül mukavemetleri gibi öne çıkan avantajları sayesinde elektronik, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlarından ötürü bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesinin başlıca sebepleri olarak gösterilmektedir. Otomotive ve havacılık gibi önemli uygulama bulan sektörler de sırasıyla yakıt tasarrufu, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik bakımından önem arz etmektedir. Dolayısıyla belirtilen uygulama alanları kapsamında yakıt verimliliğinin artırılması ve aynı zamanda birçok malzemeye kıyasla mekanik özellikleri de değerlendirildiğinde hafif malzemelerin seçilmesi önemli olmaktadır. Malzeme üretim süreçlerinde hafiflik değerlendirildiğinde magnezyum, düşük yoğunluğu bakımından tercih edilen kıymetli bir metal olması aynı zamanda bu özellikleri ile de taşımacılık sektöründe önemli bir rol üstlenmektedir. Belirtilen bu bilgiler kapsamında saf halinde magnezyum, birçok saf metalde olduğu gibi istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesinde yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli üretim yöntemleri ve alaşımlama teknikleri kullanılmaktadır. Bu bağlamda farklı sekteröl uygulamalar kapsamında, malzeme mikroyapı ve aranılan mekanik özellikler kapsamında çeşitli magnezyum alaşımları kullanımı dikkat çekmektedir. Bu çalışmada ise toz metalurjisi yöntemi kullanılarak ZK60 magnezyum alaşım matrisli TiB_2/WS_2 takviyeli kompozit ve hibrit kompozit malzemeleri üretilmiştir. Kompozit ve hibrit kompozit deney numunelerinin üretim süreçlerinde sıcak presleme yöntemi kullanılmıştır. Kompozit hibrit malzemelerinde sırasıyla yoğunluk ölçüm işlemleri, mikro sertlik ölçümleri ve mikroyapısal karakterizasyon değerlendirmeleri kapsamında ise SEM ve EDS incelemeleri yapılmıştır. ZK60 magnezyum alaşım matrisli TiB_2/WS_2 takviyeli kompozit ve hibrit kompozit malzemeleri için ağırlıkça ZK60+%5 TiB_2 e en yüksek yoğunluk değeri olarak %97,5 elde edilirken, sertlik değeri olarak en yüksek sertlik sonucu ise ZK60+%5 TiB_2 +%2 WS_2 numunesinde 109,8 HV olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hibrit, Kompozit, TiB , ZK60, WS_2 ,

ABSTRACT

MS THESIS

**PRODUCTION OF MAGNESIUM ZK60 MATRIX TiB₂-WS₂ HYBRID
REINFORCED COMPOSITE MATERIALS AND INVESTIGATION OF THEIR
MECHANICAL PROPERTIES**

HARUN TAŞCI

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

2025, 50 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Şaban BÜLBÜL

Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

Assist. Prof. Dr. Taha Alper YILMAZ

Magnesium alloys are widely used in electronics, automotive, and aerospace industries thanks to their outstanding properties such as high workability, low temperature performance, and high specific strength. These qualities are cited as central reasons for their popularity in industrial applications. Sectors such as automotive and services, where they find significant applications, are also crucial for fuel economy, growth, and economic sustainability. The use of lightweight materials is crucial for dismantling fuel components within the application areas, as well as for evaluating their mechanical properties compared to many other materials. Being a valuable metal preferred for low density furnaces, where lightness is valued in production quantities, these properties also make it a key player in the service sector. Considering this information, pure magnesium, like many pure metals, can be insufficient to achieve the desired mechanical properties. Therefore, various production methods and modification techniques are used to adjust mechanical properties. In this context, the use of various options within the material's microstructure and modified mechanical properties within different sectors is highlighted. It was produced from ZK60 alloy matrix TiB₂/WS₂ reinforced composite and hybrid composite materials by powder metallurgy method. The production parts of the composite and hybrid composite test samples were hot pressed. SEM and EDS examinations were carried out within the scope of measurement measurements, micro measurements, and microstructural characterization evaluations on the composite hybrid materials, respectively. For the ZK60 alloy matrix TiB₂/WS₂ reinforced composite and hybrid composite materials, the highest density value of 97.5% by weight was obtained for the ZK60+5%TiB₂ e sample, while the highest efficiency result in terms of return value was measured as 109.8 HV for the ZK60+5%TiB₂+2%WS₂ sample.

Keywords: Composite, Hybrid, TiB, ZK60, WS₂,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, tezimin araştırma safhasından deneysel çalışmalarına kadar her aşamasında fazlasıyla destek sağlayan ve her konuda desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE 'ye; yine yüksek lisans eğitimim süresince ders dönemi sonrasında tez aşamamda da her konuda bilgi ve deneyiminden çekinmeden yararlandığım, her konuda bana destek olan ikinci danışmanım değerli hocam Öğr. Gör. Dr. Ufuk TAŞCI ve kıymetli aileme teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Harun TAŞCI

KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. TOZ METALURJİSİ	6
3.1. Toz Metalurjisine Genel Bakış	6
3.2. Toz Metalurjisi, Avantajları ve Dezavantajları	8
3.3. Toz Metalurjisi Kullanım Alanları	9
3.4. Tozların Karakterizasyonu	9
3.4.1. Toz örnekleme si	9
3.4.2. Parçacık boyutu ölçümü.....	10
3.4.3. Tozların karıştırılması.....	11
3.4.4. Tozların preslenmesi	11
3.4.5. Tozların sinterlenmesi.....	12
4. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER	15
4.1. Magnezyum Metal Matrisli Kompozitlerin Özellikleri.....	17
4.2. Magnezyum Matris Kompozitlerinin Üretim Yöntemleri.....	18
4.3. Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	20
5. MATERYAL ve YÖNTEM	23
5.1. Malzeme	23
5.2. Yöntem	24
5.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması	24
5.2.2. Deney numunelerinin sıcak preslenmesi.....	26
5.2.3. Yoğunluk ölçüm işlemleri.....	27

5.2.4. Metalografik işlemler.....	28
5.2.5. Sertlik ölçümleri.....	29
6. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	31
6.1. Genel Değerlendirme.....	31
6.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	31
6.2. Mikroyapı Sonuçları	33
7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	44
7.1. Sonuçlar	44
7.2. Öneriler	44
8. KAYNAKLAR.....	45



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al: Alüminyum

Mg: Magnezyum

TiB₂: Titanyum Diborür

WS₂: Tungsten Disülfür

Kısaltmalar

MMK: Magnezyum Matrisli Kompozit

TM: Toz Metalurjisi

PDS: Potansiyodinamik Polar

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1. Toz Metalurjisinin Aşamaları	7
Şekil 3. 2 Eleme Analizi Test Prosedürü.....	10
Şekil 3. 3. Gözeneğin Yapısal Değişimi	14
Şekil 5. 1. Deneysel çalışma iş akışı	23
Şekil 5. 2. Başlangıç matris (ZK60), takviye TiB2 ve WS2 tozları SEM görüntüleri.....	24
Şekil 5. 3. 3 boyutlu bilyalı karıştırma cihazı (atmosfer kontrollü)	25
Şekil 5. 4. Deney numunelerinin preslenmesinde kullanılan 160 tonluk pres tezgâhı.....	27
Şekil 5. 5. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan hassas terazi	27
Şekil 5. 6. Çalışmada kullanılan SEM cihazları	29
Şekil 5. 7. Sertlik ölçümleri için kullanılan cihaz	30
Şekil 6. 1. Deney numunelerinin yoğunluk değerleri.....	32
Şekil 6. 2. Hibrit kompozit ZK60+%5TiB2+%2WS2 numunesinin karışım SEM görüntüsü	34
Şekil 6. 3. Takviye içermeyen ZK60 numunesinin SEM görüntüsü.....	36
Şekil 6. 4. ZK60+%5TiB2 kompozit numunesinin SEM görüntüsü.....	36
Şekil 6. 5. ZK60+%5TiB2+%0,5WS2 hibrit kompozit numunesinin SEM görüntüsü	38
Şekil 6. 6. ZK60+%5TiB2+%1WS2 hibrit kompozit numunesinin SEM görüntüsü	39
Şekil 6. 7. ZK60+%5TiB2+%2WS2 hibrit kompozit numunesinin SEM görüntüsü	40
Şekil 6. 8. ZK60+%5TiB2+%2WS2 hibrit kompozit numunesinin SEM/MAP görüntüsü.....	41
Şekil 6. 9. Deney numunelerinin sertlik değer grafiği	42

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5. 1. Matris ZK60 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%)	24
Tablo 5. 2. 3 Boyutlu bilyalı karıştırıcı cihazı özellikleri	25
Tablo 5. 3. Matris-takviye cihaz çalışma değerleri	26



1. GİRİŞ

Toz metalurjisi (TM), farklı toz tiplerini karıştırma ve daha sonra bunları tek, homojen bir kütleyle sıkıştırma işlemidir. Daha sonra tozlar, istenen metalurjik özelliklerini kazandırmak için kontrollü bir ortamda sinterlenir. Başka bir deyişle, toz metalurjisi (TM), metal tozlarını ezmeyi ve daha sonra erime noktalarının altındaki sıcaklıklara ısıtmayı içeren metal parçalar üretme yöntemidir. Bir parçanın kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini yönetme yeteneği, üretiminin homojen bir yapıya sahip olmasına bağlıdır (Panda vd., 2018).

M.Ö. 3000'e kadar uzanan toz metalurjisi, insanlar için uzun yıllardır değerli bir araç olmuştur. Eski Mısırlılar, demir oksidi indirgeyerek sünger demir üretmenin yollarını bulmuşlardır. 1826'da Rusya, toz metalurjisi kullanarak dünyanın ilk platin parasını üretmiştir. 6,5 ton ağırlığındaki Delhi Sütunu, M.Ö. 400 civarında toz metalurjisi kullanılarak yapılmıştır. Bu teknoloji, bugün Hindistan'da kullanılan teknolojiye benzer. Toz metalurjisi ile platin üreten ilk kişi 1892'de W.H. Wollaston'dır.

MÖ 3000'den beri var olan toz metalurjisinin gelişimi, imalatta sıcak ve soğuk presleme, geleneksel döküm ve talaş kaldırma pozisyonunu almak için yapıldı. İkinci Dünya Savaşı ile birlikte toz metalurjisi yöntemi bu endüstride yeni bir parça üretim tekniği haline geldi. İkinci Dünya Savaşı'nın başlamasıyla bu konuda yeni bir parça üretim yöntemi olarak ilgili literatürde yerini almıştır.

Çok fazla yüzey alanına ve belirli geometrilere sahip ağır alaşımlı malzemelerden makine parçaları ve bileşenleri yaparken, döküm çok uygun maliyetli bir yaklaşımdır. Ancak, toz metalurjisi (TM) üretim yöntemi, seri üretim hesaba katıldığında işleme ve döküm üretim yöntemlerinden daha üstündür. Bunun nedeni, daha küçük parça boyutları, birim zaman başına üretim sayısındaki artış ve mevcut teknolojinin taleplerini karşılamak için oluşturulan yeni alaşımların kullanılmasıdır (Beddow, 1974). Metal üretme tekniği toz metalurjisinin bir başka yönüdür. Ek olarak, malzeme üretme tekniği toz metalurjisidir. (Akorat, E., 2003)

Toz metalurjisi (TM), tozları eritmeden basınç ve ısı altında iş parçaları üretmek için metalleri ve metal alaşımlarını mekanik ve fiziko-kimyasal olarak çözme işlemidir (*F. Thummler, R. Oberacker, 1993*). Bu işlemde toz halindeki saf metaller, karbon, seramik ve plastik bileşenlerin karıştırılması sonrasında basınç altına alınır. Daha sonra, kullanılan tozların metalin erime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta gerçekleştirdiği ve parçacıkların temas

yüzeyleri arasında sağlam bir bağ oluşturmak ve uygun nitelikleri sunmak için "sinterleme" olarak bilinen bir prosedüre tabi tutulur (James, 2015).

Üretim sürecinde yer alan temel adımlar aşağıda verilmiştir;

- İstenilen içerikte toz veya toz karışımı hazırlamak.
- Toza özel karakteristikleri kazandırmak için tam karıştırma ve harmanlama yapılır.
- Tozların istenilen şekil ve boyutta kalıplanması ve aynı zamanda parçaların güçlendirilmesi.
- Kompaktların mukavemetini artırmak için yüksek sıcaklıkta ısıtılması işlemine sinterleme denir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Toz metalurjisi ve MMK'ler konusunda ilgili literatür incelendiğinde birçok çalışmanın mevcut olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar incelenerek toz metalurjisinin literatür çalışmaları ortaya konulmuştur.

İlk olarak 2005 yılında araştırmacı (Qiao vd., 2018)), "Toz teknolojisi ve mikroskopi ile silisyum karbür ve alümina ile desteklenen bakırın etkilerinin özellikleri" adlı çalışmalarında, alümina ve silisyum karbür molekülleri arttığında kaplama yoğunluğunun azaldığını ve alüminanın yüksek yoğunluğu nedeniyle kaplama Cu-Al₂O₃ yoğunluğunun silisyum karbür yoğunluğundan daha yüksek olduğunu göstermiştir.

2006 yılında araştırmacı Griffin, "Toz teknolojisiyle bakır piston üretimi ve sinterleme işleminin bu pistonların genel özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi" adlı çalışmasında, basınç yükü arttıkça ve sıcaklık arttıkça yoğunluğun arttığını göstermiştir (Griffin, 2006.).

2010 yılında araştırmacı Nazarian-Samani, "Farklı sürelerde öğütme işleminden sonra tavlama işlemi sırasında alaşımlar için %15 NiB için toz fazındaki değişimler incelenmesi" adlı çalışmasında, öğütme işlemi 25 saat içinde gerçekleştiğinde fazlarda değişim meydana geldiğini; kaplamanın Ni₃B'ye değiştiğini; öğütme işlemi 40 saat devam ettiğinde ise fazın O-Ni₄B ve Ni₂B'ye değiştiğini belirtmiştir (Nazarian-Samani vd., 2010)

Araştırmacı Rajendren 2015 yılında yaptığı çalışmada "Al-SiC-Al₂O₃'ün aşınma özellikleri, %5 ağırlıktan %25 ağırlık oranına kadar farklı silisyum karbür içerikleri eklenerek incelenmiş ve ağırlık arttıkça, görünen gözeneklilik %39 artmış, %75 sertlik artmış ve hem %15 şok enerjisi hem de bağıl yoğunluk %1,08 azalmıştır" (Rajendren vd., 2015)

2016 yılında araştırmacılar Venkatesh ve Harish "Üst katman özellikleri hazırlanmıştır ve farklı ağırlık oranlarında silisyum karbür ile incelenmiştir (Al-SiC) %2 ağırlık - %8 ağırlık. Presleme ve karıştırma işleminden sonra, numunelerin 500 °C'de iki saat sinterlenmesi işlemi" adlı çalışmalarında silisyum karbür ağırlık oranları ne kadar yüksekse sertliğin de o kadar yüksek olduğunu, ağırlık oranlarının %19,48'inden %23,94'üne (%2 Sic - %8 Sic) olduğunu göstermiştir (Şanlı ve Gavas, 2021)

2019 yılında "SiC'nin Ni'nin bazı mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi" adlı çalışmasında, numunedeki temel malzeme, belirli bir sabit yüzdede Ni 20% ve SiC'nin farklı oranlarda (4, 6, 8) eklendiği, burada tüm tozlar karıştırılmış ve 700Mp'de preslemiştir ve

ardından sinterlemiştir. 530 °C’de” %8 SiC eklendiğinde sertliğin %52 arttığını ve korozyon oranının %55 azaldığını ortaya konulmuştur (Şimşek vd., 2018).

2020 yılında araştırmacı Gohar, “Toz teknolojisi ile Cu-Al-Ni alaşımlarının sentetik ve mekanik özellikleri ve gümüş ilavesi doğrulandı” adlı çalışmasında, Cu, numunelerin hazırlanmasında temel bir malzeme olarak kabul edildi. Al %10 ve Ni %4’ün bir yüzdesi eklendi ve gümüş, (%0,2-%4,6) arasında değişen farklı içerik ve ağırlık oranlarıyla destekleyici bir malzeme olarak eklenmiştir. Numunelerin karıştırılıp preslenmesinden sonra sinterleme işlemi 850 °C sıcaklıkta gerçekleşti, ardından soğutma işlemi üç şekilde gerçekleştirildi: Fırın, su ve yağ. Daha sonra elektronik SEM tarayıcı mikroskobu, XRD ve HR testi ve Rockwell Sertlik testi gibi testler, numune değerlerinin su içinde fırın ve yağ soğutma işlemine göre daha yüksek olduğunu gösterdi (Gohar vd., 2020, Arık, H. 2019)

Kerti, “B4c Takviyeli Magnezyum (Az91) Matrisli Kompozitlerin Mikroyapısal Karakterizasyonu” başlıklı çalışmasında magnezyum matrisli B4C partikül destekli kompozitlerin üretiminde sıvı faz yöntemini kullanarak kompozitlerin mikroyapısal özelliklerine odaklanmıştır. Bu çalışmada B4C partiküllerinin matriste dağılımlarının homojen olduğu ancak buna karşın küçük oranda da olsa topaklanma ve porozitenin görüldüğünü ortaya koymuştur (Kerti, 2019).

Nikel partiküller ile takviye edilmiş magnezyum matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu başlıklı çalışmada MMK’leri toz metalurjisi yöntemlerinden olan tek eksenli sıcak presleme yöntemi kullanarak üretiminde başarılı olmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında gerçekleştirilen mekanik testlerde kompozitlerin saf magnezyum ile birlikte yüksek dayanım değerlerine ulaştığı ortaya konulmuştur (Kelen, 2023)

İlgili araştırmalar incelendiğinde diğer bir çalışma olan “AZ91 magnezyum matrisli kompozit malzemelerin korozyon özelliklerinin araştırılması” başlıklı araştırma kapsamında AZ91 MMK’lerin NaCl çözeltisinde potansiyodinamik polar (PDS) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında kompozit parçacıklarında kırılmaların meydana geldiği ve bu durumun önemli bir hasar ortaya çıkardığı tespit edilmiştir (Kelen vd., 2022)

“Nikel Partiküller ile Takviye Edilmiş Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”nun incelendiği çalışmada ise MMK’lerin mekanik özelliklerinin ve düşük yoğunlukta olmaları gerekçe gösterilerek geleneksel yöntemlerde kullanılan malzemelere önemli bir alternatif olabileceği ortaya konulmuştur (Fevzi, 2023)

İlgili literatürde yer alan diğer bir çalışma olan “Al Matrisli Kompozitlere ANFIS, ANN ve Taguchi Yaklaşımları Uygulanarak Özelliklerin Karşılaştırılması” başlıklı araştırmada toz metalurjisi yöntemi kullanılarak elde edilen Al-Mg-Al₂O₃ kompozitlerinin yoğunlukları ANN yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada karşılaştırılan her bir değişkenin diğerleri üzerinde etkiye sahip olduğu ayrıca bu değişkenlerin porozite içeriğini de etkilediği tespit edilmiştir (Ergül ve Kurt, 2021).

Seramik ve metalik takviye malzemelerinin magnezyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği diğer bir çalışmada kompozitlerin gevrek kırılma yapısında oldukları, Mg ve seramik takviye malzemelerinin süneklikte düşüklük meydana getirdiği ve bu durumun da kompozitlerin yüzey yapılarında gözeneklerin oluşmasında neden olduğu ortaya konulmuştur. Seramik malzemelerin ortaya çıkardığı bu etki sonucunda alternatiflere yönelme durumu ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda Mg ile benzer yapıda ve fiziksel özelliklere sahip metal malzemelerin kullanımının bir alternatif olabileceği ortaya konulmuştur (Kosedağ ve Aydoğmuş, 2016)

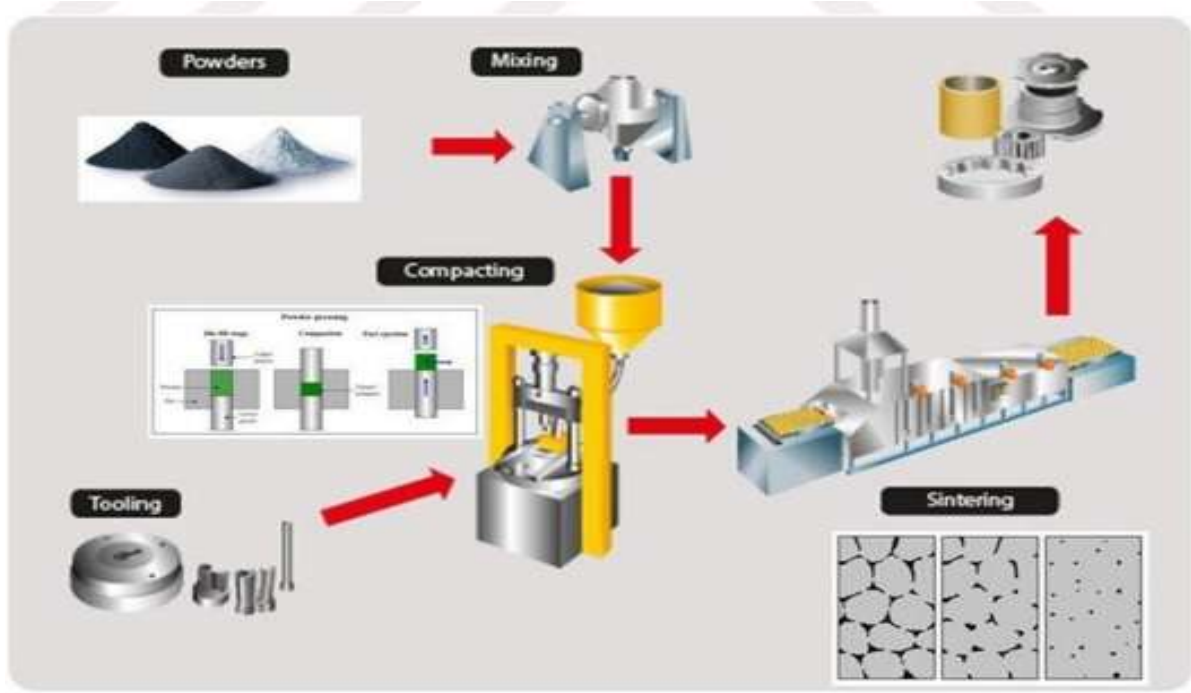
Toz metal Al₂O₃ takviyeli Mg₅Sn matrisli kompozitler: Üretim ve karakterizasyon başlıklı çalışma kapsamında toz metalurjisi yöntemi kullanılarak Mg₅Sn-xAl₂O₃ türünde kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamasında Mg tozlarında bulunan yüksek reaktivitenin ortaya çıkaracağı olumsuz durumlar engellemek amacıyla farklı bir karıştırma tekniği kullanılmıştır. Araştırma sonucunda üretilen malzemelerin tüm örneklerinde %99 oranında bağlı yoğunluğun ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Erçetin vd., 2022)

3. TOZ METALURJİSİ

3.1. Toz Metalurjisine Genel Bakış

Çok sayıda metal işleme teknolojisi arasında en özgün üretim yöntemi toz metalurjisidir (TM). Toz metalurjisinin kullanımı, karmaşık ve yüksek kaliteli bileşenlerin uygun maliyetli bir şekilde üretilmesine olanak sağlaması nedeniyle verimlidir. Toz metalurjisi, çeşitli boyut, şekil ve paketleme özelliklerine sahip metal tozlarının ilk preslenmesi, ardından parçacıkların sinterleme yoluyla birleştirilmesi ve sağlam, hassas ve yüksek performanslı bileşenlerin oluşturulmasıdır. Bu avantajlarla toz metalurjisi, düşük enerji kullanımı, yüksek malzeme kullanımı ve düşük maliyetle otomatik süreçleri etkili bir şekilde kullanır ve verimlilik, enerji ve hammaddeler hakkındaki mevcut endişeleri ortadan kaldırır (Kruzhanov ve Arnhold, 2012). Toz metalurjisi, küçük, karmaşık ve hassas boyutlu nesnelerin üretimi için idealdir. Çok az veya hiç somut kayıp oluşmaz. Elde edilen toleranslar takdir yetkisine bağlı olsa da, bu işlem malzeme kaybı olmadan pürüzsüz yüzeyler üretir (James, 2015).

Toz metalurjisi 'nin çeşitli kullanımları vardır. Metal tozlarından yapılan ürünlere örnek olarak tungsten lamba filamentleri, dişçilik ekipmanları, dişli çarklar, yağlanmamış yataklar, cerrahi cihazlar, işyeri makine parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, elektrik konnektörleri ve nükleer yakıt bileşenleri, pil bileşenleri ve jet motoru parçaları verilebilir. Metal tozları ayrıca patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtı, baskı mürekkepleri, lehimleme aletleri, katalizörler, gözenekli beton, baskılı devre kartları, zenginleştirilmiş buğday ve diğer ürünleri yapmak için kullanılır. Bununla birlikte (James, 2015)'e göre, işleme için kesici takımların, elektronik bileşenlerin, manyetik malzemelerin ve yüksek teknoloji kompozitlerin üretimi uçak sektöründe hızla büyümüştür.



Şekil 3. 1. Toz Metalurjisinin Aşamaları

Toz metalurjisi teknolojisi esas olarak tungsten ve molibden metalleri ve alaşımları, süper sertliğe sahip tungsten karbür ve molibden karbür ve mekanik şekillendirme veya işleme ile oluşturulamayan metaller ve alaşımlar için yüksek erime noktalarına sahiptir.

Toz metalurjisinde kullanılan alaşımların ve malzemelerin kimyasal bileşiminin saflığı ve doğruluğu büyük önem taşır çünkü belirli malzemelerin bir kombinasyonu oldukça saflaştırılmıştır, elde edilebilir ve ürün hazırlama süreci yanma içermez. Bileşikler veya alaşımlar için, çeşitli ürün malzemelerinin üretiminde toz metalurjisi yöntemlerinin kullanılması önemli ölçüde daha fazla tasarruf sağlar ve böylece bitmiş ürünlerin maliyetlerini önemli ölçüde azaltır. Bu yöntem Türkiye'deki yaygın üretim süreçlerinden biridir, ekonomik olarak uygulanabilir ve malzeme biliminin en önemli alanlarından biridir. Toz metalurjisi teknolojisi aşağıdaki adımlarda özetlenmiştir (Eisen vd., 1998);

- Mineral tozları mekanik yöntemlerle (öğütme ve dondurma) veya kimyasal yöntemlerle hazırlama (belirli kimyasal reaksiyonlardan toz) ve su atomizasyon Sistemi. Daha karmaşık yöntemler de vardır, bunlar arasında şunlar yer alır. Yararlanıcı tarafından belirlenen ürünlere özgü olarak, farklı metallerin tozlarını karıştırmak veya harmanlamak, özellikler elde etmek mümkündür.
- İstenilen şekil veya formu veren kalıplar içerisinde pistonlar kullanılarak tozların preslenmesi, yüksek mukavemet ve dayanım ile karakterize edilen briketler olup, tozun

preslenmesi sırasında parçacıklar arasındaki boşluklar azalır, aralarında bir miktar kohezyon oluşur.

- Soğuk preslenmiş ürünlerin nispeten yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla sinterlenmesi, ancak metallerin bu erimeleri her zaman toz metalin erime sıcaklığında veya toz sıcaklığının bileşiminde yer alır. Sinterleme, parçacıkların birleşmesine yol açar ve bunun sonucunda yüksek ürün yoğunluğu ve direnci elde edilir. Uygun bir sıcaklık ve zaman seçimi yapılmalıdır.

3.2. Toz Metalurjisi, Avantajları ve Dezavantajları

Toz metalurjisi yöntemi, kullanılan diğer yöntemler gibi, avantajları ve dezavantajları vardır. Bu bölümde, toz metalurjisinin diğer yöntemlere kıyasla en önemli avantajları ve dezavantajları incelenecektir.

Toz Metalurjisi Avantajları

Toz metalurjisi kullanımının avantajları maddeler halinde şu şekildedir;

- Üretilen malzemeler yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir.
- Birbiri içerisinde çözünmeyen, farklı özelliklere sahip malzemeler birleştirilerek üretilebilir.
- Üretilen parçaların tane boyutu küçük, çekme dayanımı ve işlenebilirliği yüksektir.
- Toz metalurjisi ile üretilen parçalar genellikle talaşlı imalat gibi ek işlemlere ihtiyaç duymazlar.
- Erime kaybı yoktur.
- Yüksek aşınma dayanımına ve yüksek sertliğe sahip malzemeler üretilebilir.
- Sinterleme işlemi sonrasında parça kullanıma hazır hale gelir ve ikincil bir işleme gerek kalmaz.
- Karmaşık formlu ve hassas parçalarda rahatlıkla üretilebilir.

Toz Metalurjisi Dezavantajları

Toz metalurjisi kullanımının dezavantajları maddeler halinde şu şekildedir;

- Metal tozu parçacıklarının maliyeti döküm yöntemlerinde kullanılan malzemelere göre daha pahalıdır.

- Yüksek kalınlık ve çap oranına sahip parçalar üretmek zordur. Homojen yoğunluklar üretmek için parçacık boyutlarında da sınırlamalar vardır. Toz metalurjisi 20 kg'a kadar parçalar üretebilir.
- Diğer yaklaşımlara kıyasla mikro yapıda gözeneklerin varlığı nedeniyle zaman zaman daha dşuk mekanik özellikler ortaya çıkabilir.
- Üretim için gereken kalıpların maliyeti yüksektir.

3.3. Toz Metalurjisi Kullanım Alanları

Toz metalurjisi farklı alanlarda kullanılır. Bunlara takım çelikleri, paslanmaz çelikler, bakır alaşımları, manyetik alaşımlar, alüminyum ve titanyum alaşımları, sermetler ve nükleer malzemeler dahildir. Aşınmaya dayanıklı parçalar, süper alaşımlar ve tungsten ve molibden gibi refrakter malzemeler kullanılarak yapılır. Otomotiv endüstrisi özellikle ön plandadır. Ek olarak, elektrik kontaktarı, uçak fren balataları, kaynak elektrotları, katalizörler, lehimleme aletleri, yüksek sıcaklık filtreleri, nükleer güç yakıt elemanları, devre kartları, tungsten lamba filamentleri, ortopedik ekipmanlar, dişli çarklar, yağlanmamış yataklar ve yüksek sıcaklık filtreleri. Uygulamalar arasında kaynak elektrotları, boyalar, patlayıcılar ve diş hekimliği yer almaktadır (Arık, 2019).

3.4. Tozların Karakterizasyonu

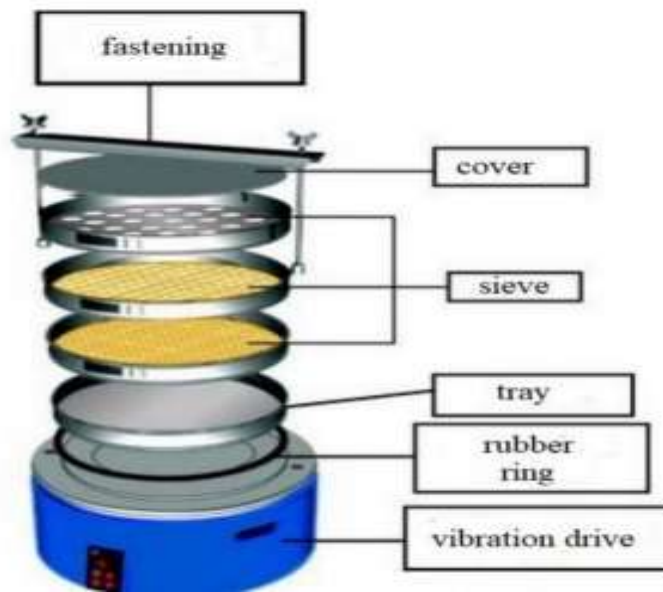
3.4.1. Toz rneklemesi

Toz numune alma işleminin zorlu ve zaman alıcı kısmını tamamlamak için çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Çeşitli yerlerden kk örnekler almak, bunları harmanlamak ve uygulamak popüler bir tekniktir. Parçacıklar genel olarak tutarlı bir yapıya sahiptir ve koşullar nedeniyle birbirlerine tutunma olasılıkları yüksektir. Parçacıkların bir araya gelme olasılığı nihayetinde mevcuttur. Yüzey nemi nedeniyle yüksek oranda agregasyon meydana gelebilir. Ayrıca, tutunan aglomeralar, kk kesme basınçları altında parçalanmaya müsait, zayıf kuvvetlere yapışan parçacıklar topluluğu olarak tanımlanmaktadır. Çoğu zaman parçacıkların dağılımı ve buna bağlı olarak özelliklerinin belirlenmesi mekanik ve ultrasonik karıştırma tekniklerinden etkilenmektedir. Flokülasyon oluşumunun mekanik karıştırma veya ultrasonik çalkalama kullanılarak dağıtılması genellikle tercih edilir (Dogan ve Saritas, 1994).

3.4.2. Parçacık boyutu ölçümü

Gıda, inşaat, biyofarmasötik ve eczacılık gibi çeşitli endüstrilerde parçacıkların incelenmesi ve boyutlarının ve biçimlerinin karakterizasyonu hayati öneme sahiptir. Parçacık boyutu belirleme, parçacık küresel olmadığı sürece kolay bir prosedür değildir. Parçacığın çap karakteristiği ve geometrik yapısı, tek sayıda parçacık boyutunu hesaplamak için kullanılan ana faktörlerdir (Rawle, 2003). Parçacık boyutu çeşitli teknikler kullanılarak belirlenebilir; bunların en popülerleri elek analizi, lazer kırınımı, dinamik ışık saçılması ve doğrudan görüntüleme yaklaşımlarıdır. Aynı örnekler analiz edildiğinde, çeşitli yaklaşımların sonuçları sıklıkla birbirleriyle iyi uyuşmamaktadır. Bu durum, parçacık boyutlarını belirlemeye yönelik her yöntemin farklı temel ölçüm kavramlarını kullanması gerçeğiyle açıklanabilir. Parçacık boyut dağılımlarını tanımlamak için en eski ve en yaygın kullanılan teknik elek analizidir. Malzemeyi çeşitli gözenek boyutlarına sahip birkaç elekten geçirerek, prosedür temel olarak parçacıkları belirli elek kutusu boyutlarında fraksiyonlara ayırarak küçük parçacıkları daha kaba parçacıklardan ayırır (bkz. Görsel 2). Kümülatif bir dağılım oluşturmak için parçacıkların kütle kesri tartılır ve miktarı belirlenir. Eleme tekniği, toz parçacıklarını yalnızca belirli bir değerden daha büyük veya daha küçük olarak kategorize eder; toz parçacıklarının boyutunu gerçekte ölçmez (German ve Park, 2009).

Islak eleme ve kuru eleme, yapılabilecek iki farklı eleme analizi türüdür. Kuru eleme, 30 µm'den 125 mm'ye kadar olan parçacıklar için idealdir, ıslak eleme ise 20 µm'den 3 mm'ye kadar olan parçacık boyutları için uygundur.



Şekil 3. 2. Eleme Analizi Test Prosedürü

3.4.3. Tozların karıştırılması

Toz karışımları tipik olarak toz metalurjisi yönteminde kullanıldığından, tozları sıkıştırma işlemine maruz bırakmadan önce etkili bir şekilde karıştırmak uygun bir yönelimdir. Karıştırma prosedürünün birincil amacı toz parçacıklarının tekdüzeliğini sağlamaktır. Üretilmesi amaçlanan ögenin performansı, çeşitli boyut, şekil ve yoğunluktaki toz parçacıklarının homojen bir şekilde karıştırılmasıyla iyileştirilir.

Toz karışımında geleneksel dispersiyonlar yoksa, karıştırmadan önce karıştırma yapılmalıdır. Presleme ve sinterleme niteliklerini geliştirmek ve tutarlı bir boyut dağılımı sağlamak için karıştırma önerilir. Karıştırma ve karıştırma işlemi birkaç faktörden etkilenir. Bu faktörler şunlardır (Jalota vd., 2008);

- Karıştırıcıdaki toz miktarı
- Tozların fiziksel özellikleri.
- Karıştırma hızı.
- Atmosferik koşullar ve bağıl nem
- Karıştırma süresi
- Karıştırıcının boyutları
- Dönme hızı

3.4.4. Tozların preslenmesi

Kullanılacak metal tozları bir kalıp kullanılarak oluşturulduğunda, metal tozunun kalıp boşluğunu son derece iyi ancak tamamen doldurmaması tercih edilir. Granüllerin kalıpta soğuk preslendiklerinde maksimum teorik yoğunluklarına ulaştıkları düşünülür. Presleme basıncı aynı olsa bile, her metal tozu preslendikten sonra elde edilen yoğunluk, malzemenin teorik yoğunluğuna bağlıdır. Tozun şekli, tanelerin boyutu ve yüzeyi, malzeme türü (üretim teknikleri, belirli yüzey) ve toza verilen ön işlem, gerçek duruma bağlı değişkenlerdir.

Malzemenin yapısı ne kadar yumuşaksa, sıkıştırılabilirlik özelliği de o kadar yüksek olur. Toz tanecikleri ile kalıp arasındaki ve kalıp içindeki sürtünme, preslenebilirlikte önemli bir faktördür. Dikkatlice hazırlanmış çelik kalıplar kullanılarak, presleme genellikle ortam sıcaklığında yapılır. Kalıpları yapmak için sement karbür bileşimi ve ısıyla sertleştirme işlemine sahip takım çeliği kullanılır. Gözenek sayısı basınca bağlı olarak değişir ve gözenek

sayısı basınç oranı arttıkça azalır. Ancak basınç arttıkça daha fazla toz yüzey alanı birbiriyle temas eder (Cai vd., 2010).

Sıkıştırma işlemi sırasında meydana gelen değişimleri üç aşamada incelenmektedir. Bunlar;

- Öncelikle parçacıkların şekil ve boyut gibi fiziksel özelliklerinin dağılımları büyük ölçüde yeniden düzenlenir. Plastik deformasyon ilk uygulanan sıkıştırmada görülmez. Bu bölümde parçacıklar arasındaki boşluk azalır ve sürtünme oluşumları başlar (Kurt, 1992).
- İkinci aşamada, parçacıkların devamlılığı olan küçük ölçekli elastik ve ardından plastik deformasyon gösterilmektedir (Erden ve Taşçı, 2016).
- Son kısımda parçacıklar tamamen kırılır. Plastik deformasyona getirilen parçacıklar arasındaki boşluk yapısı kapatılır. Parçacıklar arasında bu bölümde soğuk kaynaklanma gözlemlenir (Taşlıyan, 2020).

Kalıbın titreşimi, preslemeden önce içine serbestçe düşen parçacıkların yoğunluğunu (ham yoğunluk) artırır. Tozun dağılım deseni ve biçimi, titreşim sırasında ne kadar yoğunluk kazanıldığını etkiler. Örneğin, pürüzsüz ve küresel yüzeyli tozlarla karşılaştırıldığında, bu artış düzensiz biçimli tozlarda önemli ölçüde daha yüksektir. Bu, sınırlı toz boyut dağılımına sahip düzensiz şekilli tozların düşük bağıl yoğunluğu ve küresel şekilli tozlara dayalı yüksek yoğunluk oranlarıyla açıklanabilir. Bağıl yoğunluk, ham yoğunluk değeri ile teorik yoğunluk değeri arasındaki ilişkinin ifadesidir (Kurt vd., 2022).

3.4.5. Tozların sinterlenmesi

Ezilmiş toz parçacıklarına mukavemet kazandırmak için sinterleme teknolojisi, kontrollü bir ortamda yüksek sıcaklıklarda kullanılan bir pişirme prosedürü olarak tanımlanır. Sinterleme işlemi, parçacıklar kalıba bastırıldığında oluşan mekanik bağları metalik bağlara dönüştürerek nesneye ek mukavemet kazandırır. Parçanın mukavemet oranı, sinterleme işleminden önce ve sonra önemli ölçüde değişir. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme işlemi metalin mutlak ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirilir; ancak çok bileşenli sistemlerde ergime sıcaklığı çoğu zaman en düşük ergime noktasına sahip bileşenin ergime noktasının üzerinde gerçekleştirilir.

Bazı refrakter malzemeler, baz malzemenin erime noktasının %70 ila %80'i arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen sinterleme işlemi sırasında erime sıcaklığının %90'ına kadar ısıtılabilir (Ataş, 2003).

Sinterleme işlemi, tozların yüzey alanını azaltan, parçacıklar arasındaki temas noktalarını artıran ve sonuç olarak gözeneklerin şeklini ve hacmini değiştiren termal olarak etkinleştirilen bir malzeme taşıma sistemi olarak tanımlanabilir. Sinterleme fırını, sinterleme döngüsü sırasında zamanı ve sıcaklığı düzenleyen aparatın başka bir adıdır. Bu özelliğe ek olarak, ortamı koruyarak ve yağlayıcıları ve bağlayıcıları ortadan kaldırarak sinterlemeden sonra bileşeni ısıl işleminden geçirme şansı sunar (Randall, 2007).

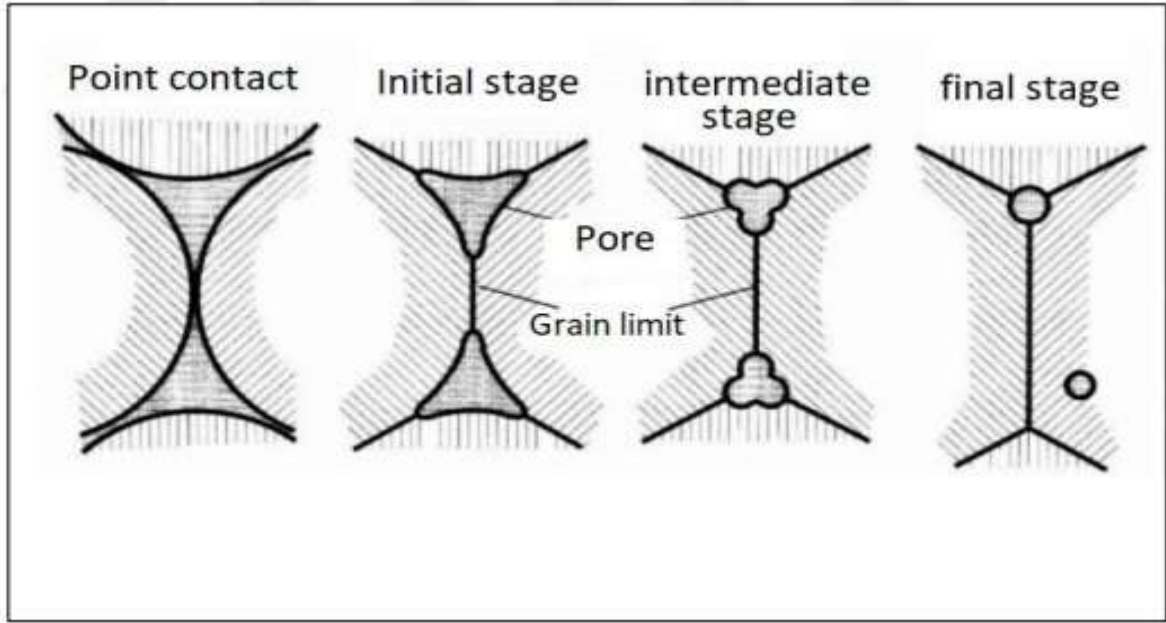
Küresel toz parçacıkları presleme işleminden sonra noktalar halinde birbirine temas eder. Kaynaklar oluşur ve birbirleriyle temas halinde olan parçacıklar arasındaki bağlantılar sinterleme işlemi sırasında güçlendirilir. Parçacıkların boyutu önce artar, ardından sinterleme süresi arttıkça gözenekler büzölmeye başlar. Daha sonra, kapalı gözenek şekli oluşturmak için gözenek kanalı kapanmaları gerçekleşir (Arıcı, 2022).

Toz parçacıklarının yüksek yüzey enerjisi sinterleme süreci boyunca düşer ve parçacıklar kesinlikle ideal bir uzunluk biçimi geliştirir. Bu, iç yapının gözeneklilik değerinin sıfıra düşmesine neden olur. Hacim oranına göre azalan yüzey enerjisinin toz parçacıklarının boyutunun tersine tam olarak orantılı olduğu keşfedildiğinden, küçük toz parçacıkları kolayca sinterlenir. Polimerlerde yoğunluk ve mukavemet artarken seramik malzemelerde şeffaflık, yoğunluk, termal iletkenlik ve mukavemet parametreleri azalır. Diğer yandan metallerin iletkenliği ve mukavemeti artar (Boz, 2003).

Demir grubundaki sinterlenmiş metal alaşımları 1000°C ile 1300°C arasında sinterlenirken, sert alaşımlar 1400°C ile 1600°C arasında sinterlenir. Gözenekli bronzlar ve benzer niteliklere sahip alaşımlar 600°C ile 800°C arasında sinterlenir. Malzemenin türü sinterleme süresini ve sıcaklığını belirler. Elmas alaşımlı malzemeler için yarım saatten az bir süre yeterlidir, ancak sert alaşımlar için bir saatten uzun süren bir sinterleme prosedürü kullanılır. Sinterleme süresi ile sıcaklık arasındaki ilişki terstir. Sinterleme sıcaklığı yüksek olduğunda, süre daha kısadır ve sıcaklık düştükçe uygulanan süre uzar (Goryczka ve Humbeeck, 2006).

Malzemenin mukavemet, elektriksel iletkenlik, yoğunluk ve süneklik gibi nitelikleri, sinterleme sıcaklığı arttıkça artar. Toz parçacıkları, sinterlemenin en erken aşamalarında nokta

temasındadır. Malzemeler, üç sinterleme aşamasından geçer: başlangıç, ara ve son aşamalardır (German, 1996).



Şekil 3. 3. Gözeneğin Yapısal Değişimi

4. MAGNEZYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Günümüzde, yüksek ürün kalitesi ve daha iyi yüzey kalitesi imalat endüstrisinde dikkat çekmektedir. Genellikle hibrit kompozitler olarak adlandırılan birden fazla takviyenin kullanımı, üstün mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır. Hibrit kompozitler, tek takviyeli parçacık kompozitler için iyi bir alternatif olarak kabul edilmektedir (Shoba vd., 2015). Matris ve takviyeler parçacık formundadır ve diğer üretim yöntemlerinden daha üstün üretilebilirlik sağlayan parçacık metal matris kompozitler (PMMC) olarak adlandırılır (Razavykia vd., 2015). Ancak partikül metal matrisli kompozitlerden üretilen ürünler, iyi boyut toleransı ve yüzey kalitesi elde etmek için bazı işleme operasyonlarına ihtiyaç duymaktadır. Tornalama, kesme ve bitirme işlemleri için en önemli işleme operasyonudur. Sert aşındırıcı takviye parçacıklarının varlığı, takım aşınması ve işlemeyle ilişkili maliyet üzerinde büyük etkiye sahiptir. Metal matrisli kompozitlerde (MMK'ler) yüksek kesme performansı elde etmek için optimum işleme parametrelerinin seçimi çok önemlidir. İşlenebilirlik genel olarak kesme kuvvetleri, sürtünme açısı, takım aşınması, talaş oluşumu ve yüzey kalitesi gibi faktörlerle ifade edilir. İyi işlenebilirlik daha az güç tüketir, düşük takım aşınma oranı, mükemmel yüzey kalitesi vb. sert seramik parçacıklarının takviye mekanizmalarının karmaşıklığı nedeniyle işlenebilirliğin iyi bir değerlendirmesini elde etmek zor bir konudur. Havacılık ve otomotiv uygulamalarında alüminyum silisyum karbür kompozitler büyük talep görmektedir çünkü alüminyum hafiflik ve seramik takviye avantajına sahiptir ve mükemmel sertlik sağlamaktadır. Karbon nanotüp (CNT) ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozit, monolitik malzemelere kıyasla mükemmel mukavemet ve geliştirilmiş elastik modül göstermektedir (Jiang ve Zhou, 2013).

Alüminyum, magnezyum ve bakır, yüksek mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle çoğunlukla araştırılan matris malzemeleridir. Alüminyum ve magnezyum, düşük yoğunluk ve işlenebilirliklerinden dolayı MMK'lerde kendilerine yer edinmişlerdir. Silisyum, çinko, magnezyum ve bakır gibi elementler, bunların temel alaşım elementleri olarak kullanılmasını mümkün kılan yeterli çözünürlüğe sahiptir. Parçacık boyutu MMKlerde önemli bir rol oynar. Tanecik inceltme termal genleşmeyi azaltabilir, dolayısıyla matrisin mukavemeti artırmaktadır. Matrisin mukavemeti tane boyutundaki azalmayla artar ancak genel çıktı önemli ölçüde iyileşmez. Takviyenin şekli, boyutu ve hacim kesri de kompozitin mukavemetinde önemli bir role sahiptir (Y. Jiang ve Zhou, 2013).

Hibrit MMK'ler, taban matrisinin farklı özelliklere sahip birden fazla takviye ile güçlendirilmesiyle oluşturulmuştur. İki veya daha fazla takviye parçacığının karışımından oluşan kompozitler, kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirme yeteneğine sahiptir. Hibrit kompozitlerin performansı, bileşenlerinin kendi içlerindeki avantaj ve dezavantajlar arasında daha iyi bir dengeye sahip olduğu kolektif bir etkidir. Silisyum karbür, alüminyum, bor karbür, tungsten karbür, grafit, tek veya çok karbonlu nanotüpler) ve silika kullanılan takviyelerden birkaçıdır, ancak diğer takviye malzemelerine kıyasla genellikle silisyum karbür ve alümina kullanılır.

Geçmişten günümüze kadar yıllar boyunca, özellikle hızlı büyüyen endüstrilerde; otomotiv, havacılık ve kimya endüstrilerinde, hafif yapı malzemelerine olan talebin arttığı görülmektedir. Günümüzde Alüminyum (Al) ve Magnezyum (Mg) alaşımları, hafifliği, iyi işlenebilirliği, boyutsal kararlılığı ve işleme prosesleri sırasında düşük güç tüketimi gibi üstün özellikleri ve karşılaştırmalı avantajları nedeniyle bu uygulamalarda önemini artırmıştır (Rashad, Pan, Tang, Asif, Hussain, Gou, and Mao, 2015). Mg alaşımları çeşitli çekici özelliklere sahip olmalarına rağmen, tribolojik koşullar altında bileşenlerin yüksek mekanik-termal gerilmelere dayanması beklenen uygulama proseslerindeki tüm gereksinimleri tam olarak karşılayamamaktadır. Bu durum, endüstriyel uygulamalarda tam potansiyellerini gerçekleştirebilmek için, bu özelliklerin geliştirilmesi ve ilerletilmesi için fırsat ve ihtiyaç ortaya çıkarmaktadır. Bu avantajlar göz önüne alındığında Magnezyum Matrisli Kompozitlerin (MMK) otomotiv, havacılık, biyomedikal, spor ekipmanları ve tüketici elektroniği gibi çeşitli endüstriyel ve ticari sektörlerde muhteşem potansiyellere sahip olduğu görülmektedir.

Magnezyum matrisli kompozitler (Mg-MC'ler), bileşenlerinden birinin Mg veya alaşımı olduğu ve SiC, TiC, B₄C, Al₂O₃, CNT parçacıkları ve günümüzde GNP'ler ile takviye edildiği MMK türüdür (M. Gupta ve Wong, 2015). Ancak artık Mg matris kompozitlerinin üretilebileceği çok sayıda yaklaşım bulunmaktadır. Mg matris kompozit üretiminin avantajlı yaklaşımları şunlardır; toz metalurjisi, karıştırma döküm işlemi, sıkıştırma dökümü, yerinde işlem, püskürtme şekillendirme ve basınçsız infiltrasyon teknikleri. Bu nedenle; Mg ve alaşımlarının en hafif yapısal metalik malzemeler olduğu ve en yüksek form ve özgül mukavemete sahip olduğu tespit edilmiştir böylece magnezyumun, monolitik alaşımlara kıyasla çekici mekanik özellikleri nedeniyle istenen miktarda ilgi çekebilen metal matris kompozitlerine dayalı olduğu anlamına gelmektedir (Rahmany-Gorji vd., 2016b). MMK son yıllarda düşük yoğunlukları ve oldukça spesifik elementleri nedeniyle havacılık ve otomotiv uygulamaları için çekici malzemelerinin işlenmesi nedeniyle ilgi gördü. Hafif ve yüksek

performanslı malzemelere olan yüksek büyüyen talebin MMK olan talebi teşvik edebileceği düşünülmektedir.

4.1. Magnezyum Metal Matrisli Kompozitlerin Özellikleri

Mg matris kompozit (Mg-MC), temellerini belirleyen üç temel özelliğe sahiptir. Bunlar:

- Matris (Mg),
- Takviye
- Matris-takviye arayüzü

Mg'nin en hafif yapısal metal olduğu bilinmektedir. Mg alaşımlarının; Al'den %33, Ti'den %61 ve paslanmaz çelikten %77 daha hafif olduğu teyit edilmiştir ve bu da onları bu metallere alternatif malzeme olarak potansiyel aday yapmaktadır. Mg, yeryüzünde bulunabilen elementler arasında, yaklaşık %2 oranında bulunan, en bol bulunan altıncı elementtir. Magnezyumun diğer birçok avantajı arasında mükemmel dökülebilirlik, yüksek sönümlenme kapasitesi, iyi elektromanyetik koruma, tüm yapısal metallerin kolay işlenebilirliği ve magnezyum üretiminde daha az enerji gereksinimi yer almaktadır. Ancak Mg'nin sınırlamaları arasında daha düşük elastik modül ve düşük süneklik, azalmış sürünme ve aşınma direnci ve yüksek korozyon yer almaktadır (N. Gupta vd., 2012). Bu sınırlamalar, yeni magnezyum alaşımlarının gelişmesi ve magnezyum kompozitleri üretmek için takviyelerin eklenmesiyle ortadan kaldırılmıştır.

Matris sürekli parçadır (faz) ve özellikleri uygun bir takviyenin sunulmasıyla bir kompozite kaydırılarak doğaçlama yapılır. Matrisin ve takviyenin çeşitliliği büyük ölçüde nihai kullanıma ve üretim işlevine uygunluğa bağlı olabilir. Çok sayıda Mg alaşımı şeması matris olarak uygulanmıştır.

Kompozitin ikincil kısmı (fazı), MMK'lerde takviye fazı olarak kabul edilmektedir. Yükseltilmiş sertliği ve yükseltilmiş mukavemeti nedeniyle, kompozitteki çekirdek ve ana yük taşıyıcı elemandır. Takviye çoğunlukla bıyık, lif ve parçacık şeklindeki seramiktir. Takviyenin özellikleri, MMK'lerin özelliklerinin kontrol edilmesinde çok önemli ve önemlidir, matrisle etkileşim ise kompozitin mikro yapısını, özelliklerini ve performanslarını değiştirebilir. Şu anda, 50 nm'den küçük boyuttaki nano boyutlu takviyeler SiC, Al₂O₃, B₄C vb. kullanılmaktadır. CNT ve GNP'ler de potansiyel takviyeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Nano takviyelerin kullanılmasının ve uygulanmasının başlıca avantajı, özelliklerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesinin çok daha düşük hacim oranlarında (yüzde 2'den az) elde edilebilmesidir. Oysa

mikron ölçekli parçacık takviyeli Mg-MC'lerde hacim oranları daha yüksektir (yüzde 10'dan fazla). Ancak ileri mekanik özelliklere sahip nano kompozitler formüle edebilmek için, nano-takviye fazının matris içerisinde iyi bir şekilde dağılması gerekmektedir; bu da uyumlu üretim tekniğinin seçimi ile güçlü bir şekilde kontrol edilmeli ve yönetilmelidir (Subramanian vd., 2012).

Matris ve takviye fazı arasındaki arayüz, kompozit malzemelerin işleyişinde önemli bir rol oynayarak rekreasyona katılır. Arayüzün başlıca karakterleri kimyasal reaksiyon ve güçlü bağlanmadır. Gözeneklilik, matris ve takviye fazları arasındaki arayüz reaksiyonlarında bir etki yaratır. Arayüz, olağanüstü olan ve takviyelerden veya matristen kaynaklanmayan bir dizi fiziksel ve mekanik özelliğe sahiptir. Matris ile takviye arasındaki arayüzün termodinamik olarak kararsız olması ve kompozitin toplam performansı üzerinde etkili bir varlık seviyesi uygulaması nedeniyle oldukça farklılıklar ortaya koymaktadır. Arayüz, elastiklik modülü ve termal katsayı gibi malzeme parametrelerinde geniş bir süreksizlik düzeyine yol açar. Oldukça yakından, bir kimyasal süreksizlik kapasitesi bir inter-difüzyon bölgesine yol açabilir. Bu, herhangi bir ayrışma ve çökme için bazı tercihli yerler yaratabilir (Karabulut vd., 2016).

Mg matrisindeki takviyelerin düzgün bir şekilde yayılması ve paylaşılması, hem takviye/serbest hem de takviye/zengin yerlerde erken başarısızlığa yol açabilen eşit olmayan dağılım nedeniyle yüksek bir güçlendirme etkisi elde etmek için temeldir. Ancak, takviye/serbest yerler takviye/zengin yerlerden daha zayıf görünmektedir. Normalde çok kırılğan sert parçacıkların ilgili ayrışma veya kümelenme yerinde, malzemede her zaman mekanik özelliklerde düşüşe ve azalmaya neden olan kırılğan bağlar oluşmaktadır.

4.2. Magnezyum Matris Kompozitlerinin Üretim Yöntemleri

MMK'lerin işlenmesinde karşılaşılan temel zorluk ve sıkıntı, kusursuz bir mikro yapı elde etmek için takviyenin homojen bir şekilde dağıtılmasıdır. Karıştırma döküm prosedürü boyunca, takviye fazı (genellikle toz formda) mekanik karıştırma yoluyla erimiş Mg arasında dağıtılır. Bu ısıtma sisteminin ve işlemin temelini oluşturan sisteme mekanik karıştırma adı verilir. Sonuç olarak seramik parçacıklı erimiş Mg, kalıp dökümü, kalıcı kalıp dökümü veya kum kaplama için kullanılır. Döküm kompozit, gözenekliliği azaltmak ve sınırlamak, mikro yapıyı yumuşatmak ve takviye dağılımını homojenleştirmek için ekstrüde edilir. Erimiş matristeki parçacıkların dağılımı, mekanik karıştırıcının geometrisine, karıştırma parametrelerine, mekanik karıştırıcının eriyik içindeki konumuna, erime ısısına ve entegre parçacıkların eylemlerine bağlıdır.

Karıştırma dökümünün başlıca faydaları, geniş miktarda üretimin kullanılmasıdır. Tüm yerleşik MMC üretim tekniklerinin ortasında, karıştırma dökümü daha uygun fiyatlıdır ve seri üretim için daha beceriklidir (Zhang ve Hu, 2010). Bu nedenle, karıştırma dökümü son zamanlarda alüminyum bazlı kompozitlerin üretimi için en çok tercih edilen ve en yaygın ticari teknik olmuştur. Dahası, karıştırma dökümünün MMK'ler hakkında ticari bir uygulaması sunulmamıştır.

MMK'lerin çeşitleri; GNPs/saf Mg (Rashad vd., 2015), SiC/GNPs/saf Mg gibi toz metalurjisi prosedürünün kullanımıyla üretilir. Toz metalurjisi prosedürüyle parçaların üretilmesine yönelik temel adımlar aşağıda listelendiği gibi özetlenmiş ve sunulmuştur:

- Tozların üretim aşamaları ve prosesleri,
- Karıştırma veya harmanlama işlemi,
- Sıkıştırma işlemi,
- Sinterleme işlemi.

Toz metalurjisi prosedürü, parçacık üretmek veya elyaf takviyeli kompozitleri kısaltmak için bir yaklaşım olarak kullanılır. Teknik olarak, bunun; soğuk presleme ve sinterleme veya temel olarak parçacıkları veya bıyık takviyeli MMK'leri üretmek için sıcak presleme ile ilgisi vardır. Ancak matris ve takviye tozları homojen dağıtım sürecini üretmek için harmanlanır. Bu harmanlama aşamasına, yeşil blokları üretmek için kullanılan soğuk presleme eşlik eder. Soğuk preslenmiş yeşil bloklar bu nedenle kaplarda taranır ve parçacık yüzeylerinden emilen tüm nemi ortadan kaldırmak için gazı alınır. Ayrıca, kompozit daha sonra yoğun bir kompozit olarak tam olarak uygulanabilmesi ve ekstrüde edilebilmesi için tek eksenli veya izostatik olarak sıcak preslenir (Q. C. Jiang vd., 2003).

Toz metalurjisi işleminin ilk adımında, matris tozlarının ve takviyelerin ağırlık oranlarında olduğu yüksek enerjili veya planet bilyalı değirmenler aracılığıyla bilyalı değirmen uygulamasıyla karıştırılması işlemi yer almaktadır. Sonraki aşamada baskın konsolidasyon işlemi olarak kabul edilen toz metalurjisi, bir kalıp delgeçlerinden ve muhtemelen mandrellerden oluşan sert bir kalıba preslemeyi içerir. Yaygın olarak kullanılan sıkıştırma yöntemleri eksenel ve izostatik preslemedir. Eksenel sıkıştırmada, metal tozu delgeç yüzeyleri ve kalıp duvarları arasında sıkıştırılır. Geometrik toleransın elde edilebildiği bu yöntemin uygulanmasıyla. Bu, eksenel toz preslemenin seri üretimde metal tozlarını preslemenin becerikli bir yolu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Sırasıyla toz metalurjisi prosedürünün üçüncü aşaması, karışık tozların, parçacıkları karıştırılmış halde erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklık noktasına ısıtılması olarak tanımlanır; bu durum sinterleme olarak adlandırılır. Bu işlem, ana ve temel bileşenin erime noktasını içerir ve onunla ilgilidir. Nadir durumlarda, küçük bir bileşen sinterleme noktası sıcaklığında sıvı bir faz oluşturabilir; bu gibi durumlar sıvı faz sinterlemesi olarak tanımlanabilir. Kompaktın sinterlenmesi, bu hem mukavemet hem de bütünlükten oluşur.

Sırasıyla sinterleme işleminin ardından ikincil işlemler uygulanır:

- İşleme süreci,
- Parlatma işlemi,
- Yüzey oluşturma işlemi.

Tüm işlemler, yalnızca bitmiş bir ürünün hedefine ulaşmak amacıyla sinterlenmiş kompozit malzemeler biçiminde gerçekleştirilir. Toz metalurjisi tekniği, daha önce (yukarıda) listelenen 4 işlemde oluşur. Faydalı olarak, toz metalurjisi tekniği, takviyenin orta derecede yükseltilmiş bir hacim kesrini entegre etme kabiliyetinden oluşur. Dahası, bu teknik, özellikle, toplu malzemeye kıyasla genellikle daha pahalı olan ve malzeme üretilirken karmaşık bir süreci hak eden alaşım tozlarına ihtiyaç duyar.

4.3. Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Bu tür mekanik özelliklerin, densite mukavemeti, elastik modül, sürünme direnci ve yorulma direnci biçiminde geliştirilmesi ve ilerletilmesi, genellikle kompozit malzemelerin temel çekiciliğidir. Dolayısıyla, mekanik özelliklerdeki bu geliştirme seviyelerinin tüm avantajları, diğer özelliklerdeki azalma ile uyumlu olarak tartılması gereken ve dahil edilen maliyetin göz ardı edilmemesi gereken kompozitlerden elde edilir. MMK'lerdeki ikincil fazların sözde sert kısmı iki katlı etkiden oluşur. Başlangıçta, bu fazlar MMK'ler aracılığıyla verildiğinde, plastik deformasyonun önlenmesi yoluyla süreklilikleri azaltılabilir. Oysa parçacıklar, süreklilik seviyesini geliştiren bir tane inceltici etkiyle daha da yaratılabilir.

Ti parçacıklarının monolitik Mg'ye dahil edilmesi, mukavemet ve sürekliliğin artmasına neden olur (Rzychoń vd., 2013). Bununla birlikte, Mg-10Ti alaşımının geliştirilmiş mukavemetinin, termal genişleme katsayısında ve elastik modülde, dislokasyon oluşumu ve yükün matristen takviyeye kaydırılması yoluyla bir uyumsuzluk olduğu kabul edilir. Kandil (Kandil, 2012) matris SiC parçacıklarının eklenmesinin, takviye edilmemiş alaşımın (AZ91) aksine sertlik değerinde ve çekme mukavemetinde bir artışa yol açtığını kanıtlamıştır. Dahası,

uzama, kompozitlerde daha az olarak incelenirken, partikül içindeki SiC fraksiyonunun kapasitesinin artmasıyla azalır. Sert parçacıkların net etkisi her zaman sürekliliği azaltmak içindir. Al₂O₃p hacim yüzdesindeki artış, sertliği ve akma mukavemetini (hem gerilimde hem de basınçta) ilerletir. Tersine, çekme mukavemeti, basınç mukavemeti ve süreklilik, Al₂O₃p içeriği büyütüldüğünde azalır; buna bağlı olarak tokluk da azalır (Rahmany-Gorji vd., 2016a). Ayrıca ikincil sert fazların eklenmesiyle mükemmel mukavemet, süreklilik ve sürünme direncinin bir karışımının elde edilmesi olasılığı vardır.

Parçacıkların güçlendirilmesi, iş sertleşmesi, yük transferi ve takviye fazları tarafından matrisin taneciklerinin incelenmesi, MMK'lerdeki temel güçlendirme mekanizmalarıdır. İş sertleşmesi, kompozit gerilirken bir kez ve sırasında gerçekleşir.

Magnezyum alaşımları, özellikle yüksek sıcaklık seviyelerinde düşük sürünme direncine sahiptir. Mg alaşımlarının yüksek sürünme oranı çoğunlukla tane sınırı kayması ve dislokasyon kaymasından kaynaklanır. Bu nedenle, tane sınırı kaymasının engellenmesi ve tane sınırında veya tanenin içinde sert fazların çökmesi yoluyla kaymanın dislokasyonu, yüksek sıcaklık Mg alaşımlarının iyileştirilmesinde temel bir ilerleme olarak kabul edilir. Lifler ve parçacıklarla güçlendirilmiş malzemeler, aynı matrisin kullanımıyla bile farklı sürünme sonuçlarını sergiler. SiC parçacıklarının AZ91 alaşımına eklenmesi, sürünme direncini de artırır. Oysa, Al₂O₃ kısa liflerinin eklenmesinin sonucu olarak ortaya çıkan sürünme direncindeki artışla karşılaştırıldığında, SiC parçacıkları nadiren iyi bir gelişme yaratır (Svoboda, 2003).

Takviyelerin diğer özellikleri, örneğin; boyut, hacim kesri, profil ve takviyenin matrisle olan arayüz bağı da bir kompozitin sürünme sonucu için kritik derecede önemli ve alakalı olarak ortaya çıkarılmıştır.

Teknik olarak, MMK'lerin, nano veya mikro boyutta parçacıklar veya lifler (metal, metal olmayan, seramik veya organik elementler) olarak etiketlenen diğer elementlerle bir matris görevi gören hafif metal gruplandırmasıyla yapıldığı tanımlanır. Birden fazla element arasında takviye edilmiş tek bir matrisin kullanımı sırasında, bunlara hibrit kompozitler denir.

Temel olarak, MMK'lerin monolitik metallerekinden daha üstün olan temel ve temel faydaları şunlardır:

- Güçlü özgül mukavemetleri.
- Yüksek elastiklik, sertlik ve yorulma kapasiteleri.

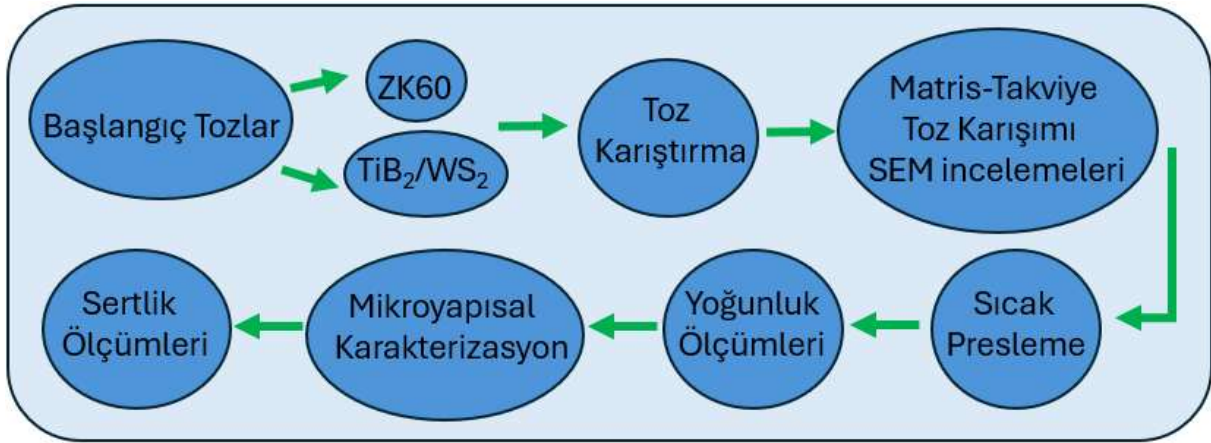
- Son derece üstün aşınma ve korozyon önleme dirençleri.
- Sönümlemedeki iyileştirmeleri.
- Yüksek mukavemet-ağırlık oranları.
- Termal genişlemenin azaltılması ve azaltılması

Belirgin bir şekilde, MMK'ler monolitik Mg veya alaşımlarına kıyasla daha fazla avantaja sahiptir, örneğin yüksek mukavemeti, yüksek elastik modülü, süper sürünme ve sürekli değişen yüksek sıcaklık seviyelerinde mükemmel aşınma korumasıdır (M. Gupta ve Wong, 2015). Öngörülen maddeler, boyutun ve belirli bir takviye parçacık türünün ihtiyatlı bir şekilde seçilmesi ve seçilmesiyle gerçekleştirilebilir.



5. MATERYAL ve YÖNTEM

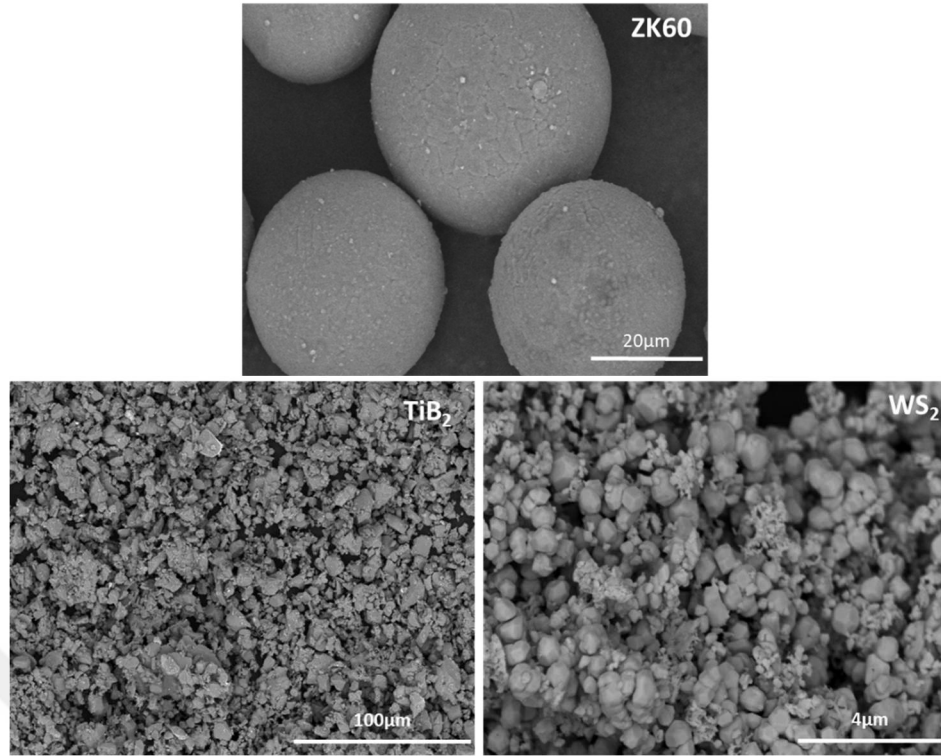
Bu bölümde, matris (ZK60) ve takviye malzemeleri (TiB_2 - WS_2) kullanılarak kompozit ve hibrit kompozit malzemelerinin üretimi odaklı çalışmaların yanı sıra kompozit-hibrit yapıların elementel, morfolojik, mikro yapısal karakterizasyonu bakımından yapılan çalışmalar açıklanacaktır. Aynı zamanda kompozit-hibrit yapıların üretim süreçleri neticesinde yoğunluk ve sertlik özellikleri gibi fiziksel ve mekanik özelliklerinin ortaya çıkarılması kapsamında, yürütülen çalışmalardan bahsedilecektir.



Şekil 5. 1. Deneysel çalışma iş akışı

5.1. Malzeme

Bu tez çalışması kapsamında kompozit ve hibrit kompozit deney numunelerinin üretilmesi noktasında, başlangıç matris ve takviye toz malzemeleri olarak sırasıyla ZK60, TiB_2 - WS_2 deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan ZK60 magnezyum alaşımı matris yapısı ve TiB_2 - WS_2 takviye malzemelerini temsil eden tozların şekil ve morfolojilerinin değerlendirilmesi amacıyla SEM incelemeleri yapılmıştır. Matris ve takviye malzemelerine ait başlangıç toz SEM görüntüleri Şekil 5.2' de gösterilmiştir.



Şekil 5. 2. Başlangıç matris (ZK60), takviye TiB_2 ve WS_2 tozları SEM görüntüleri

Deneyel çalışmalarda kullanılan ZK60 matris tozlarının kimyasal kompozisyonu Tablo 5.1’ de gösterilmiştir. Bu kompozisyon incelendiğinde, Zn (ağırlıkça %4,7), Zr (ağırlıkça% 0,6), Al (ağırlıkça % 0,05) ve eser miktarlarda Fe, N, ve Cu gibi diğer kimyasal elementleri içermektedir.

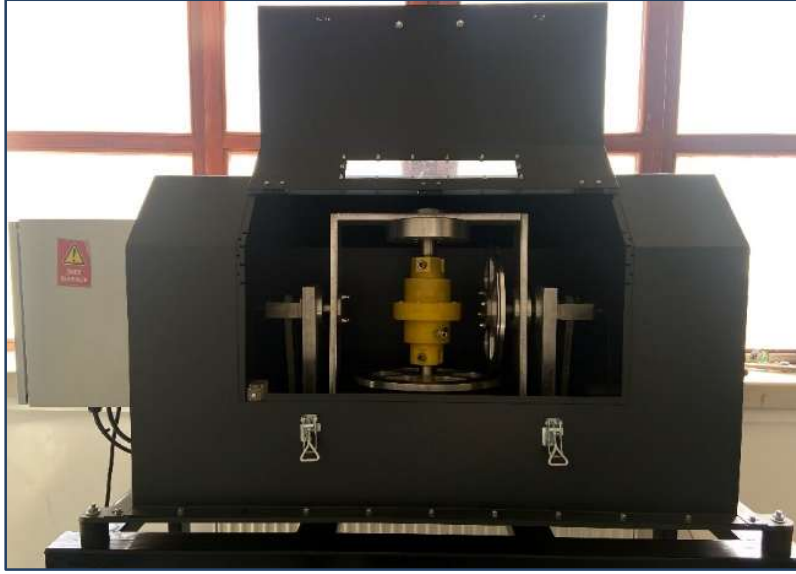
Tablo 5. 1. Matris ZK60 alaşımının kimyasal kompozisyonu (%)

Alaşım	Mg	Al	Zn	Mn	Zr	Fe, Ni, Cu
% ağı.	Kalan	0,05	4,7	0,012	0,6	<0,002

5.2. Yöntem

5.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Deneyel çalışmalarda başlangıç matris (ZK60) ve takviye malzemeleri (TiB_2/WS_2) kullanılarak, kompozit tozların elde edilmesi amacıyla 3 boyutlu bilyalı karıştırma cihazı kullanılmıştır. Kullanılan 3 boyutlu bilyalı karıştırma cihazı Şekil 5.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. 3. 3 boyutlu bilyalı karıştırma cihazı (atmosfer kontrollü)

Tablo 5.2’ de ise deneysel çalışmaların yürütülmesinde önem arz eden özellikle matris-takviye birlikteliği açısından uygun bir toz dağılımı hedeflenen 3 boyutlu bilyalı karıştırma cihazına ait cihaz özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 5. 2. 3 boyutlu bilyalı karıştırıcı cihazı özellikleri (yüksek enerji ve atmosfer kontrollü)

Teknik özellikler	Deney Şartları
Ortam Kontrolü	İnert Gaz,
Öğütme Ortamı	Kuru ve Islak
Hazne Hacmi (cm ³)	500
Dönme Hızı (rpm)	0-650
Güç Aktarma	Kayış-Kasnak
Güç Aktarma Oranı	2/1
Hız Aktarma Oranı	1/2

Literatür kapsamında yapılan çalışmada incelendiğinde, deneysel amaçlı kullanılan pek çok (speks, atritör, gezegen tipi karıştırıcılar gibi) farklı tasarım ve karıştırma ortamına sahip yüksek enerjili bilyalı öğütücü/karıştırıcılar karşımıza çıkmaktadır. Tablo 5.2’ de cihaz özellikleri verilen karıştırıcıda, malzeme türleri dikkate alındığında polimerik esaslı olan PA6-G poliamid esaslı kestamit malzemesi cihazın haznesi olup karıştırma işlemleri bu ortamda gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz içeriği daha öncesinde yapılan çalışmalar incelenerek, farklı devir/dönme hızları ve bilye/toz oranları incelenerek, yapılan ön denemeler sonrası matris ve

takviye tozlarının uygun dağılımları için karıştırma işlemleri optimize edilmiştir. Dolayısıyla yapılan çalışma açısından bilyalı karıştırma cihazında toz bilya oranı kapsamında 1/10 oranı kullanılmıştır. Matris ve takviye tozlarının karıştırma işlemlerinden ise cihazda tozlar, 240 dakika süre ile atmosfer kontrolü altında x:500 rpm, y: 200 rpm olacak şekilde karıştırma işlemleri uygulanmıştır (Tablo 5.3).

Tablo 5. 3. Matris-takviye cihaz çalışma değerleri

Tozlar	Matris-takviye
Toz-bilya oranı	1:10
Dönme hızı	x:500 rpm, y: 200 rpm
Süre	240 dakika

5.2.2. Deney numunelerinin sıcak preslenmesi

Matris ve takviye malzemeleri kullanılarak hazırlanan toz karışım oranları kalıp haznesine yerleştirilerek, sıcak presleme işlemleri için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan toz karışımları kullanılarak deney numunelerinin sıcak preslenmesi işlemleri 550°C sıcaklık altında gerçekleştirilmiştir. Sıcak presleme işlem sürecinde belirtilen sıcaklığa ulaşılabilmesi için, fırın ısıtma hızı 10°C/dakika olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda sıcak presleme ile numune üretim süreci kapsamında, presleme ve soğutma adımları sırasında uygulanan basınç 350Mpa ve 60 dakika olarak deney numunelerine uygulanmıştır. Tam yoğunluklu numunelerin ortaya çıkarabilmesi için Hidroliksan marka 160 ton bir sıcak pres çalışmalarda kullanılmıştır (Şekil 5.4). Tüm sıcak presleme deneyleri, numunelerin oksidasyonunu önlemek için argon gazı akışı altında atmosfer kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Sıcak presleme işlemi neticesinde son aşama olarak, sıcak preslenmiş numuneler kalıp haznesi içinde yavaşça soğutulmuştur. Ortam sıcaklığı 150°C'ye indiğinden numuneler çıkarılmıştır.



Şekil 5. 4. Deney numunelerinin preslenmesinde kullanılan 160 tonluk pres tezgâhı

5.2.3. Yoğunluk ölçüm işlemleri

Toz metal kompozit ve hibrit kompozit numunelerin yoğunluk ölçümleri, Şekil 5.5' de gösterildiği gibi, hassas terazi yardımıyla yoğunluk ölçüm kiti ve Arşimet prensibi kullanılarak damıtılmış su kullanılarak belirlenmiştir. Numune önce havada, sonra suda tartılarak yoğunluğu hesaplanmıştır. Numunenin ağırlığı, yer değiştiren suyun ağırlığına eşittir. Suyu batırılan numunenin hacmi, yer değiştiren suyun hacmine eşittir. Suyun yoğunluğunun yaklaşık 1 gram/cm³ olduğu düşünüldüğünde, numunenin yoğunluğu aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.



Şekil 5. 5. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan hassas terazi

$$\text{Yoğunluk ölçümü} = W_a / W_a - W_w$$

W_a = Numunenin havadaki ağırlığı

W_w = Numunenin suda ağırlığı

Üretilen deney numunelerinin gözenek oranını belirlemek için aşağıda verilen formül kullanılmıştır.

$$\text{Gözeneklilik (\%)} = (\rho \text{ teorik} - \rho \text{ ölçülen}) / \rho \text{ teorik}) \times 100$$

Burada:

ρ teorik, teorik yoğunluktur (g/cm^3)

ρ ölçülen, ölçülen yoğunluktur (g/cm^3)

5.2.4. Metalografik işlemler

Kompozit ve hibrit kompozit deney numunelerin yoğunluk ölçümleri neticesinde mikroyapısal incelemeleri için, metalografik çalışmalar yapılmıştır. Deney numunelerine sırasıyla zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Deney numunelerinin zımparalama işlemleri, 400, 600, 800 ve 120 tane numaralı SiC zımpara kâğıdı kullanılarak, su altında gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemlerini takiben parlatma işlemleri ise 1μ ve 3μ elmas pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama ve parlatma işlemleri tamamlanan deney numunelerine son olarak dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemlerinde %10HF çözeltisi kullanılmıştır. Bu işlem tamamlandıktan sonra, parlatılmış numune yüzeyleri alkolle iyice temizlenerek, kurutma işlemleri sonrası ve mikro yapı incelemeleri için hazır hale getirilmiştir.

5.2.5. Mikroyapısal karakterizasyon

Tez çalışması kapsamında hem başlangıç matris (ZK60) ve takviye malzemeleri (TiB_2/WS_2) hem de karışım tozların mikroyapısal incelemeleri açısından yürütülen çalışmalar, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Taramalı Elektron Mikroskobu Laboratuvarı'nda bulunan "JEOL 6060" EDS entegre marka cihaz (Şekil 5.6) ve Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM' da bulunan "ZEISS Gemini SEM 500" marka taramalı elektron mikroskobu (Şekil 5.6-b) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yine hazırlanan toz karışımlarının yanı sıra bu toz karışımları kullanımı ile üretilen kompozit ve hibrit kompozit deney numuneleri metalografik çalışmalar sonrası; mikroyapısal açıdan fazlar ve dağılımları, yüzey özelliklerin, elementel dağılımları ve seramik faz parçacıklarının belirlenmesi için belirtilen cihazlar mikroyapısal karakterizasyon bakımından kullanılmıştır.



Şekil 5. 6. Çalışmada kullanılan SEM cihazları

5.2.5. Sertlik ölçümleri

Üretimi gerçekleştirilen kompozit ve hibrit kompozit numunelerde oluşması muhtemel veya ortaya çıkan fazlar ve matris elemanına takviye edilen seramik faz parçacık etkilerini belirlemek için ASTM E-384 standardına göre sertlik ölçüm testleri gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin sertlik ölçüm işlemleri, 10 saniyelik yükleme neticesinde 500 g kuvvet altında gerçekleştirilmiştir. Kompozit-hibrit kompozit deney numuneleri yüzeylerinden 3 mm aralıklarla toplam beş farklı sertlik ölçüm değerleri (HV 0,5) alınmış ve ortalama sertlik

sonuçları hesaplanmıştır. Tez alışması kapsamında deney numunelerinin sertlik ölçüm uygulamaları kapsamında, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ait "QNESS" marka bir mikro sertlik cihazı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.



şekil 5. 7. Sertlik lmleri için kullanılan cihaz

6. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

6.1. Genel Değerlendirme

Yapılan tez çalışmasında, ZK60 magnezyum alaşımı matrisli kompozit malzemeler geliştirilmiş ve deney numunelerinin mikro yapı özellikleri ile mekanik davranışları incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı olarak, ZK60 matrisine ağırlıkça %5 oranında TiB_2 (Titanium Diborür) ve değişen oranlarda (%0,5, %1 ve %2) WS_2 (Tungsten Disülfür) partikülleri ilave edilerek elde edilen hibrit takviyeli kompozitlerin yapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

Takviye içermeyen ZK60 alaşımı referans numune olarak değerlendirilmiştir. Kompozit takviye olarak %5 TiB_2 içeren kompozit numune üretilmiştir. Tezin sonraki deney numunelerin de ise %5 TiB_2 ile birlikte sırasıyla %0,5, %1 ve %2 oranlarında WS_2 içeren üç farklı hibrit takviyeli kompozit üretilmiştir. Üretilen tüm numuneler üzerinde yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiş, mikroyapı karakterizasyonları yapılmış ve mikrosertlik değerleri belirlenmiştir.

Yürütülen deneysel çalışmalar neticesinde, takviye fazlarının hem miktarının hem de türünün kompozitlerin genel özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir. Takviye TiB_2 partikülleri, yüksek sertlik ve ısı kararlılığına sahip olmaları nedeniyle matris içinde etkin bir sertlik değeri artışı göstermektedir. Diğer yandan, WS_2 partikülleri ile sertlik değerinde artış doğru orantılı olarak artmıştır.

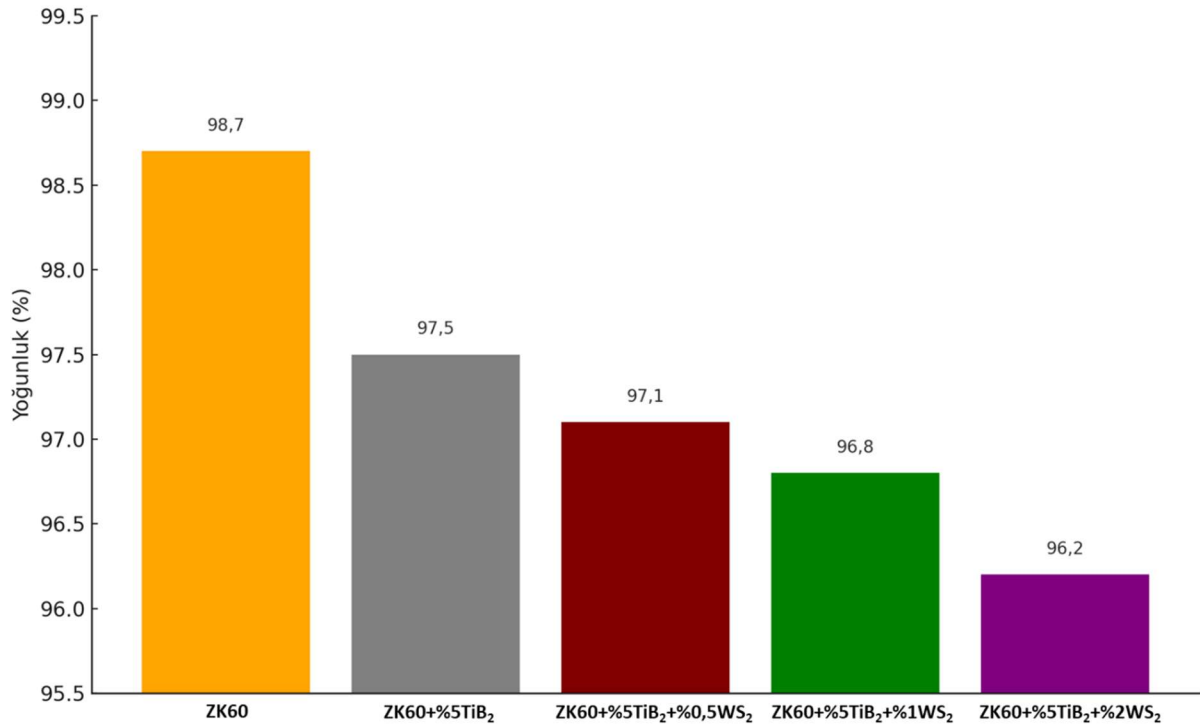
Yoğunluk sonuçları, takviye miktarının artmasıyla birlikte teorik yoğunluk değerlerinde artış olduğunu ortaya koyarken; gerçek yoğunluk verileri ile karşılaştırıldığında, özellikle yüksek WS_2 içeriğine sahip numunelerde gözenekliliğin arttığı tespit edilmiştir. Mikroyapı analizleri, takviye fazlarının homojen dağılımının mekanik özellikler açısından kritik rol oynadığını göstermiştir. Mikrosertlik ölçümleri ise, takviyesiz matris alaşımına kıyasla takviye fazları içeren kompozitlerde belirgin bir sertlik artışı olduğunu ortaya koymuştur.

6.2. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Şekil 6.1’de farklı oranlarda takviye içeren kompozit numunelere ait yoğunluk yüzdesi değerlerini göstermektedir. Grafik incelendiğinde, takviye oranı arttıkça yoğunlukta kademeli bir azalma meydana geldiği açık bir şekilde gözlemlenmektedir.

Takviyesiz ZK60 numunesi %98,7'lik yoğunluk oranıyla en yüksek değerine ulaşırken, %5 TiB₂ içeren numunede bu oran %97,5'e düşmüş, hibrit takviye uygulanan numunelerde ise yoğunluk değerleri sırasıyla %97,1, %96,8 ve %96,2 olarak ölçülmüştür.

Bu durum, takviye fazlarının matris içinde artan oranlarda yer almasının, gözeneklilik oluşumuna neden olduğunu ve bunun da gerçek yoğunluğu olumsuz etkilediğini göstermektedir.



Şekil 6. 1. Deney numunelerinin yoğunluk değerleri

Yoğunluk değerlerindeki bu azalış, kompozit malzemelerin üretim sürecinde ortaya çıkan mikro gözeneklerin varlığını ve bu gözeneklerin artan takviye oranlarına bağlı olarak daha belirgin hale geldiğini işaret etmektedir. Özellikle WS₂ oranının %2'ye ulaştığı numunede, yoğunluk değerinin %96,2'ye kadar düşmesi, bu takviyenin dispersiyon kabiliyetinin sınırlı olduğunu ve matris içinde homojen dağılmakta zorlandığını göstermektedir.

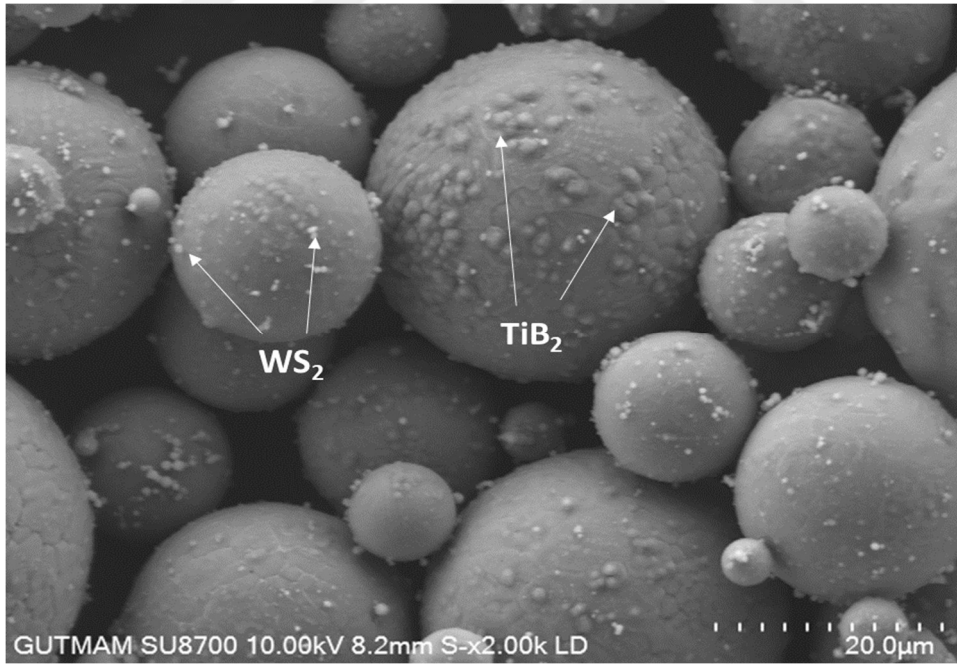
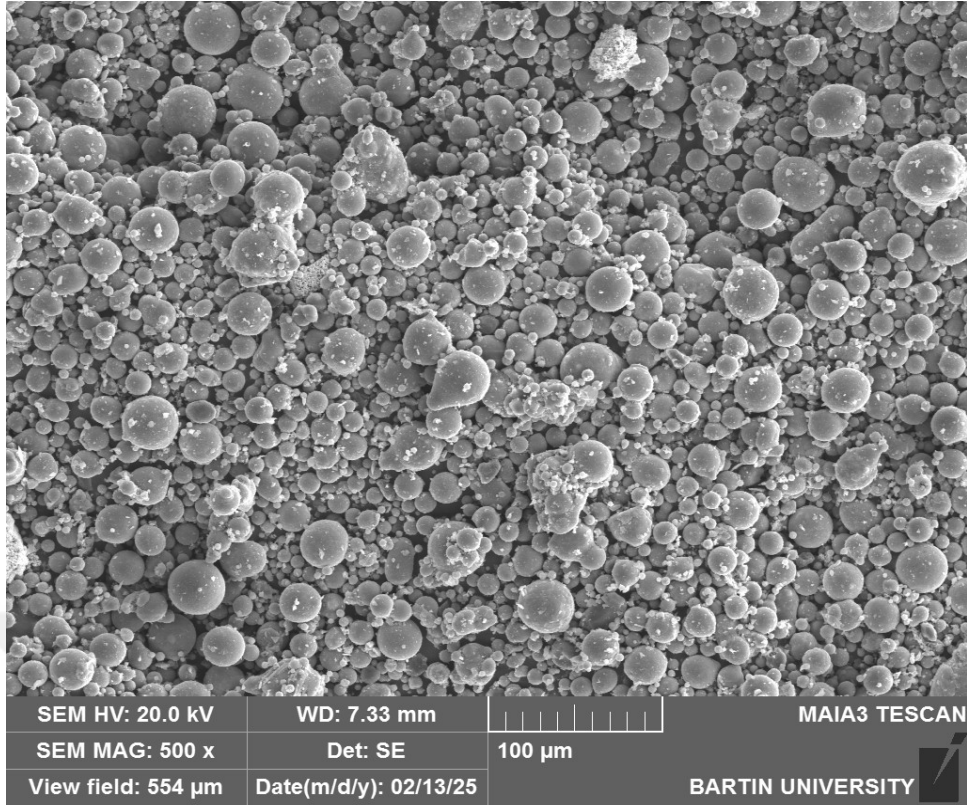
WS₂ partiküllerinin katmanlı ve yumuşak yapısından ötürü, yüksek oranlarda ilave edildiklerinde aglomerasyon eğilimi gösterdikleri ve bu kümelenmelerin lokal boşluklara yol açtığı düşünülmektedir. Ayrıca, seramik esaslı takviye partiküllerinin matris ile tam olarak ıslanamaması da gözenek oluşumunu tetikleyen bir başka faktör olarak değerlendirilebilir.

Bu sonuçlar, yalnızca takviye miktarının değil, aynı zamanda partikül türü ve dağılımının da yoğunluk üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, yüksek miktarda hibrit takviye kullanımı durumunda üretim parametrelerinin optimize edilmesinin, gözenekliliği azaltmak ve malzeme bütünlüğünü korumak açısından büyük önem taşıdığını göstermektedir. Kompozitlerin mekanik performansının doğrudan yoğunluk ve gözeneklilikle ilişkili olduğu dikkate alındığında, bu parametrelerin kontrolü, ileri mühendislik uygulamalarında yüksek güvenilirliğe sahip yapısal malzemelerin tasarımı açısından kritik bir rol oynamaktadır.

6.2. Mikroyapı Sonuçları

Şekil 6.2’de görüldüğü üzere, bilyalı karıştırma işleminden sonra ZK60 matris tozunun özgün küresel veya yarı küresel morfolojisi korunmuş, belirgin plastik yassılaşıma, parçalanma ya da soğuk kaynaklanma izleri tespit edilmemiştir. Ana tane yüzeylerinde yer yer darbe izleri ve hafif yüzey pürüzlenmeleri görülse de tanelerin geometrisi bozulmamış, tane boyutu dağılımında gözle görülür bir genişleme oluşmamıştır. Bu durum, uygulanan karıştırma şiddeti ve süresinin, takviye fazlarının etkin bir şekilde dağılımını sağlarken matris toz morfolojisini olumsuz etkilemeyecek şekilde optimize edildiğini göstermektedir.

Takviye partikülleri olan TiB_2 ve WS_2 , matris tanelerinin yüzeyinde sürekli ve düzgün bir kaplama oluşturarak homojen bir dağılım sergilemiştir. TiB_2 nispeten iri ve köşeli bir morfolojiye sahipken, WS_2 ince ve tabakalı yapısıyla taneler üzerinde birlikte gözlenmiş; her iki faz da büyük ve bağımsız topaklar halinde birikmek yerine çok sayıda ince partikül olarak her bir matris tanesi etrafına bağlanmıştır. Bu düzenli yüzey kaplanması, sıkıştırma ve sinterleme aşamalarında takviye–matris ara yüzey alanını artırarak yük aktarımını kolaylaştırması ve takviye fazlarının makro ölçekte eş dağılımını desteklemesi açısından önemlidir.



Şekil 6. 2. Hibrit kompozit ZK60+%5TiB₂+%2WS₂ numunesinin karışım SEM görüntüsü

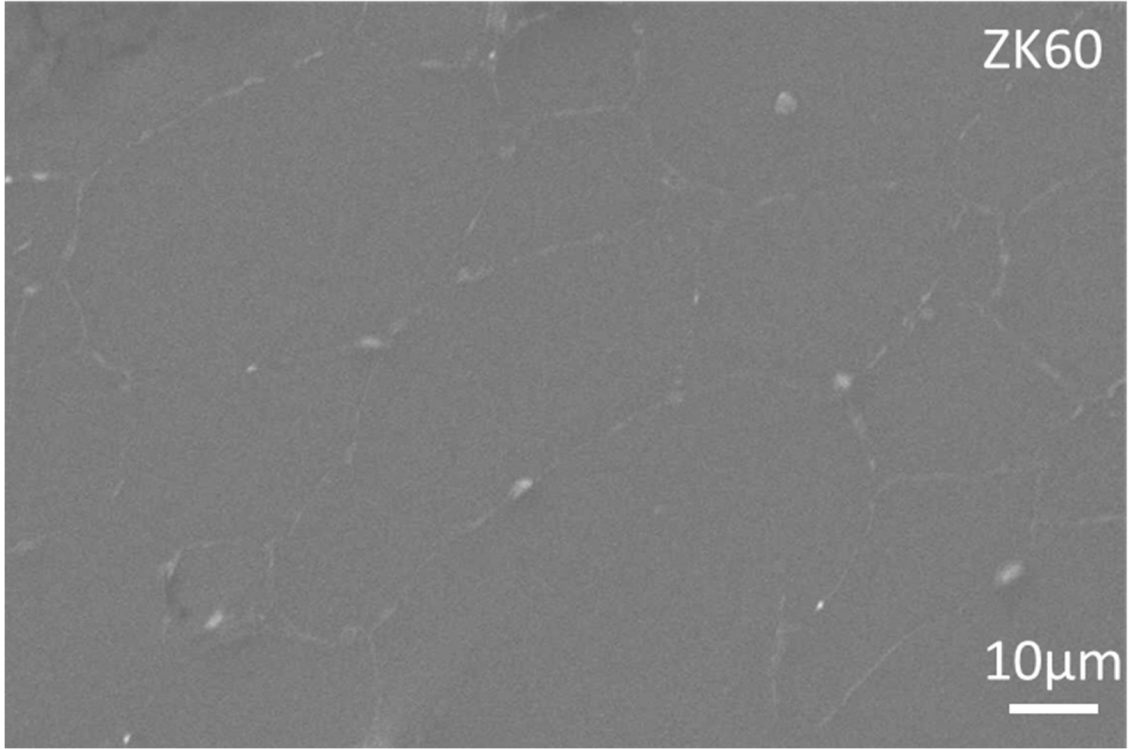
Ayrıca, takviyelerin taneler arası köprü oluşturacak iri kümeler halinde değil, tane başına çoklu ve ince adhezyon noktaları şeklinde bulunması, gözenekliliğin yerel yoğunlaşmasını engelleyerek elde edilen yoğunluk ve sertlik sonuçlarının tutarlılığına katkı sağlamaktadır.

Genel olarak, bilyalı karıştırma sonrası hibrit %2 WS2 içeren karışım tozunda matris morfolojisinin korunması, takviyelerin homojen dağılımı ve topaklanma izlerinin olmaması, nihai kompaktlarda yüksek sertlik ve bütüncül yoğunluk elde edilmesi açısından olumlu bir ön koşul oluşturmuştur.

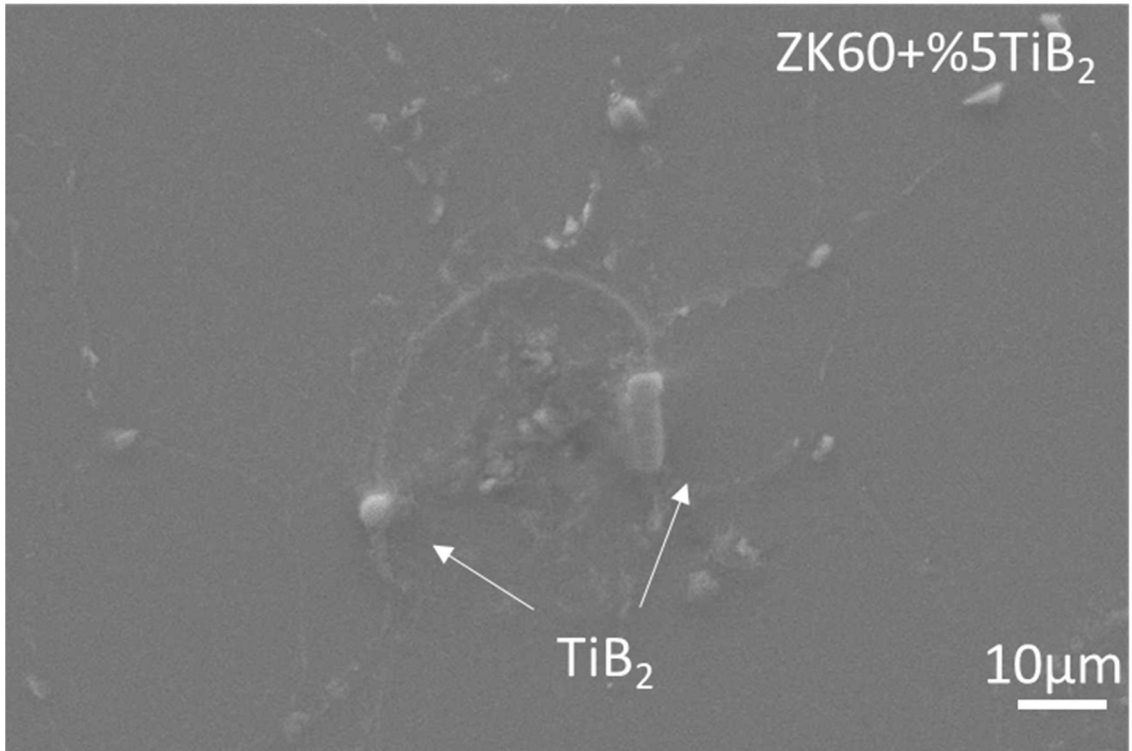
Şekil 6.3'te, takviyesiz ZK60 magnezyum alaşımına ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü sunulmaktadır. Mikroyapı görüntüsünde, tipik magnezyum alaşımı özellikleri sergileyen, belirgin tane sınırlarının yer yer net olarak gözlemlendiği bir yapı mevcuttur. Tane sınırları boyunca ince hat şeklinde görülen faz ayrışmaları ve düşük yoğunluklu kontrast farklılıkları, ZK60 alaşımında mevcut olan alaşım elementlerinin (özellikle Zn ve Zr) tane sınırlarında kısmi segregasyon eğilimine işaret etmektedir. Matris içerisinde homojen olarak dağılmış, az sayıda ve küçük boyutlu ikinci faz parçacıkları dikkat çekmektedir. Bu parçacıklar, üretim sırasında katılma esnasında matris içinde çökelmiş intermetalik bileşikler olarak değerlendirilebilir.

Herhangi bir takviye partikülünün bulunmadığı bu referans numunede, tanelerin nispeten iri olduğu ve tane boyut dağılımının homojen olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, takviye fazlarının olmadığı sistemlerde tane küçültücü mekanizmaların etkin olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, mikroyapıda gözenek ya da çatlak benzeri makro kusurların gözlenmemesi, uygulanan üretim parametrelerinin matris bütünlüğünü korumada yeterli olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.4'te, ağırlıkça %5 oranında TiB_2 partikülleri ile takviye edilmiş ZK60 magnezyum matrisli kompozitin mikroyapısı görülmektedir. Görüntüde, matris içerisinde farklı boyut ve morfolojilerde TiB_2 partiküllerinin yer aldığı net biçimde gözlemlenmektedir. TiB_2 partikülleri yüksek yoğunluk ve sertlikleri nedeniyle parlak kontrastlı bölgeler olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 6. 3. Takviye içermeyen ZK60 numunesinin SEM görüntüsü



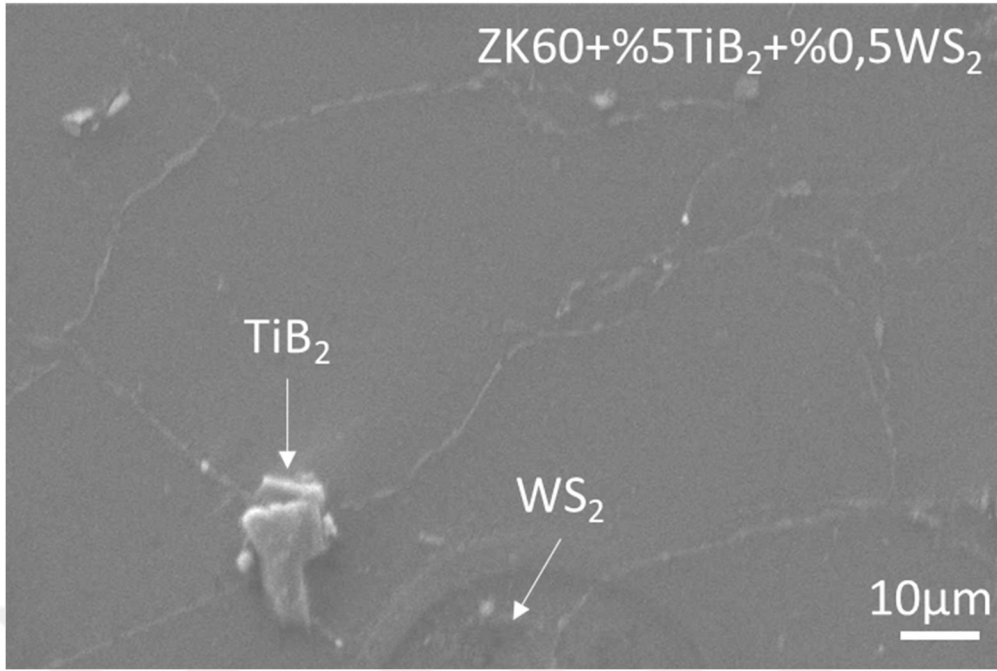
Şekil 6. 4. ZK60+%5TiB₂ kompozit numunesinin SEM görüntüsü

Bu partiküllerin çoğunlukla matris içerisinde homojen şekilde dağıldığı, ancak bazı bölgelerde kümelenme (aglomera) eğilimi gösterdiği dikkat çekmektedir. TiB₂ partiküllerinin varlığı, katılma sırasında tane sınırlarında ve tane içlerinde çekirdeklenme merkezleri

oluşturarak tane büyümesini engellemiştir. Bu durum, takviyesiz ZK60 alaşımına kıyasla daha ince taneli bir mikroyapının oluşmasına katkı sağlamaktadır. İnce taneli yapı, mekanik özellikler açısından özellikle sertlik ve akma dayanımı üzerinde olumlu etki yaratmaktadır. Bununla birlikte, mikroyapıda gözlemlenen bazı lokal partikül kümelenmeleri, üretim sırasında partiküllerin matris içinde tamamen ve eşit şekilde dağılmadığını göstermektedir. Bu tür aglomerasyon bölgeleri, ilerleyen bölümlerde tartışılacağı üzere, mekanik özelliklerde lokal zayıflık noktaları oluşturma potansiyeline sahiptir. Genel olarak, %5 TiB₂ takviyesi, ZK60 matrisinin mikroyapısında belirgin bir tane inceltme etkisi yaratmış, yük taşıma kapasitesini artırabilecek sert faz bölgelerinin oluşmasını sağlamıştır. Bu durum, ilerleyen sertlik testlerinde de gözlemlenen mekanik performans artışının mikroyapısal temellerini ortaya koymaktadır.

Şekil 6.5'te, hibrit takviye yöntemiyle %5 TiB₂ ve %0,5 WS₂ içerecek şekilde üretilmiş ZK60 magnezyum matrisli kompozitin mikroyapısı gösterilmektedir. Görüntüde, TiB₂ partiküllerinin parlak kontrastlı, keskin kenarlı morfolojileriyle ayırt edilebildiği; WS₂ partiküllerinin ise katmanlı yapıları nedeniyle nispeten daha koyu kontrastta ve yassı morfolojiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Takviye fazlarının matris içerisinde büyük ölçüde homojen dağıldığı, partikül boyutlarının mikrometre altı seviyelerde olduğu ve tane sınırlarında lokal birikim eğilimlerinin sınırlı düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. TiB₂ partikülleri, önceki numunede olduğu gibi tane inceltici etki göstermekte, WS₂ partikülleri ise katı yağlayıcı özellikleri sayesinde dislokasyon hareketini zorlaştırarak deformasyon direncine katkı sağlamaktadır. WS₂ ilavesinin düşük seviyede (%0,5) tutulması, partikül aglomerasyonu riskini minimize etmiş ve matris içi dağılımın nispeten daha homojen gerçekleşmesine imkân tanımıştır. Bu homojen dağılım, ilerleyen sertlik ölçümlerinde gözlemlenecek olan mekanik iyileşmenin mikroyapısal temelinin oluşturmaktadır.

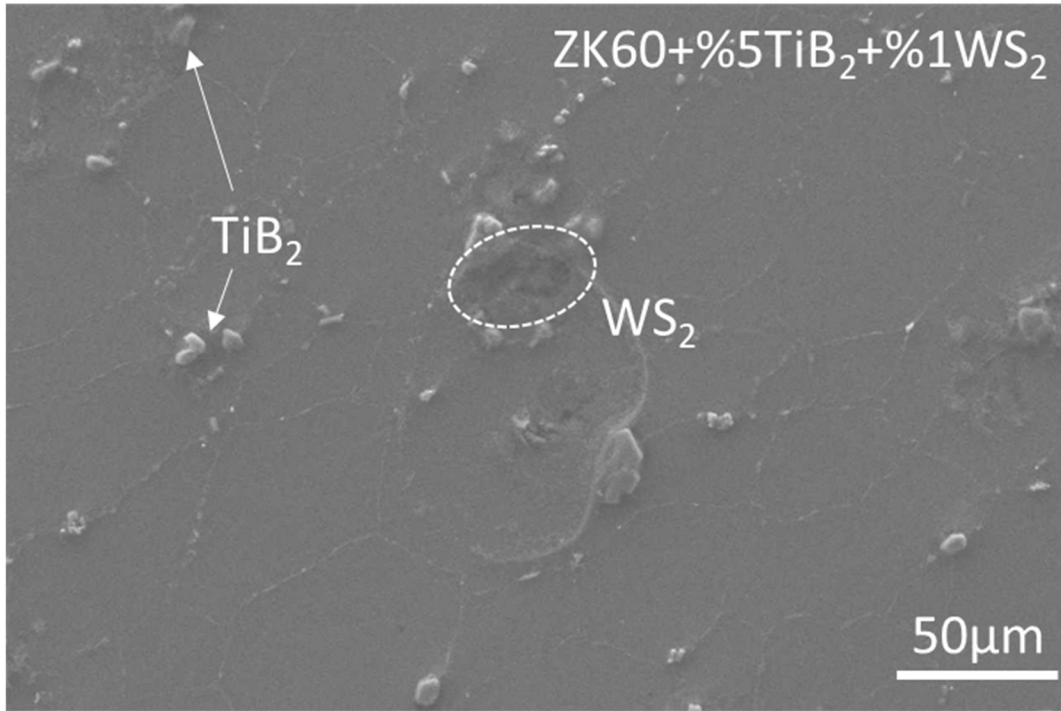
Ayrıca, hibrit takviyenin sağladığı çok fazlı yapı, yük transferinin daha verimli olmasına ve matrisin yüksek sertlik ile dayanım kazanmasına katkıda bulunmaktadır. Genel olarak, %5 TiB₂ + %0,5 WS₂ içeren hibrit kompozitte, matris bütünlüğü korunmuş, gözeneklilik düşük seviyede kalmış ve takviye fazlarının etkin yük taşıyıcı rol üstlendiği bir mikro yapı elde edilmiştir.



Şekil 6. 5. ZK60+5%TiB₂+%0,5WS₂ hibrit kompozit numunesinin SEM görüntüsü

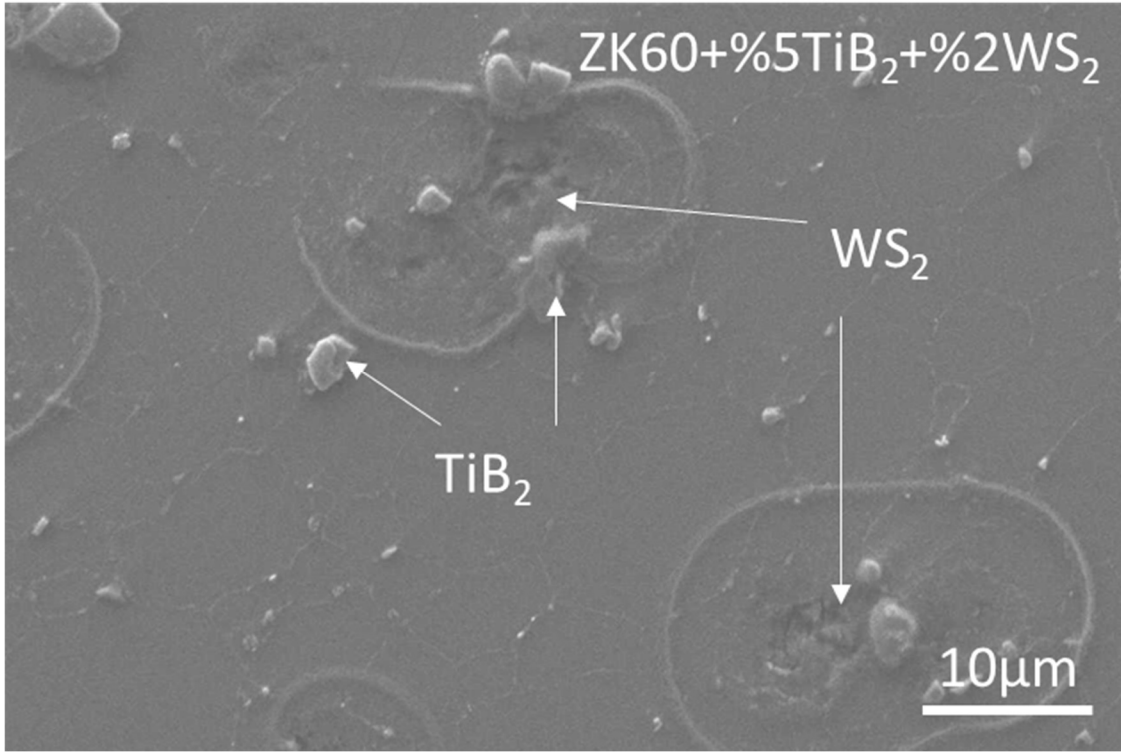
Şekil 6.6'da %5 TiB₂ ve %1 WS₂ hibrit takviyesine sahip ZK60 magnezyum matrisli kompozitin mikroyapısı sunulmaktadır. Görüntüde, TiB₂ partikülleri yüksek yoğunluk ve sertlikleri nedeniyle parlak kontrastta, keskin kenarlı ve genellikle köşeli morfolojileriyle ayırt edilmektedir. WS₂ partikülleri ise daha koyu kontrastta, tabakalı yapılarından ötürü yuvarlak ya da yassı görünümlü olarak gözlemlenmektedir.

Takviye fazlarının matris içerisindeki dağılımı genel olarak homojen olmakla birlikte, WS₂ partiküllerinin bazı bölgelerde bir araya gelerek lokal aglomerasyonlar oluşturduğu dikkat çekmektedir. WS₂ oranının %1 seviyesine çıkarılmasıyla, önceki %0,5 WS₂ içeren numuneye kıyasla bu kümelenmelerin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Bu tür aglomerasyonlar, yoğunluk ölçümlerinde gözlemlenen küçük düşüşün ve sertlik artışındaki sınırlı ivmelenmenin olası nedenlerinden biri olarak değerlendirilebilir. Mikroyapı genelinde TiB₂ partiküllerinin tane inceltici etkisi devam etmekte, bu sayede sertlik testlerinde kaydedilen artış desteklenmektedir. WS₂ katkısı ise matris içinde ikinci bir sert faz olarak rol almakta, yük transferini artırarak sertlik değerlerini yükseltmektedir. Ancak, homojen dağılımın tam olarak sağlanamaması, elde edilen mekanik iyileşmenin maksimum seviyeye ulaşmasını engelleyebilmektedir.



Şekil 6. 6. ZK60+%5TiB₂+%1WS₂ hibrit kompozit numunesinin SEM görüntüsü

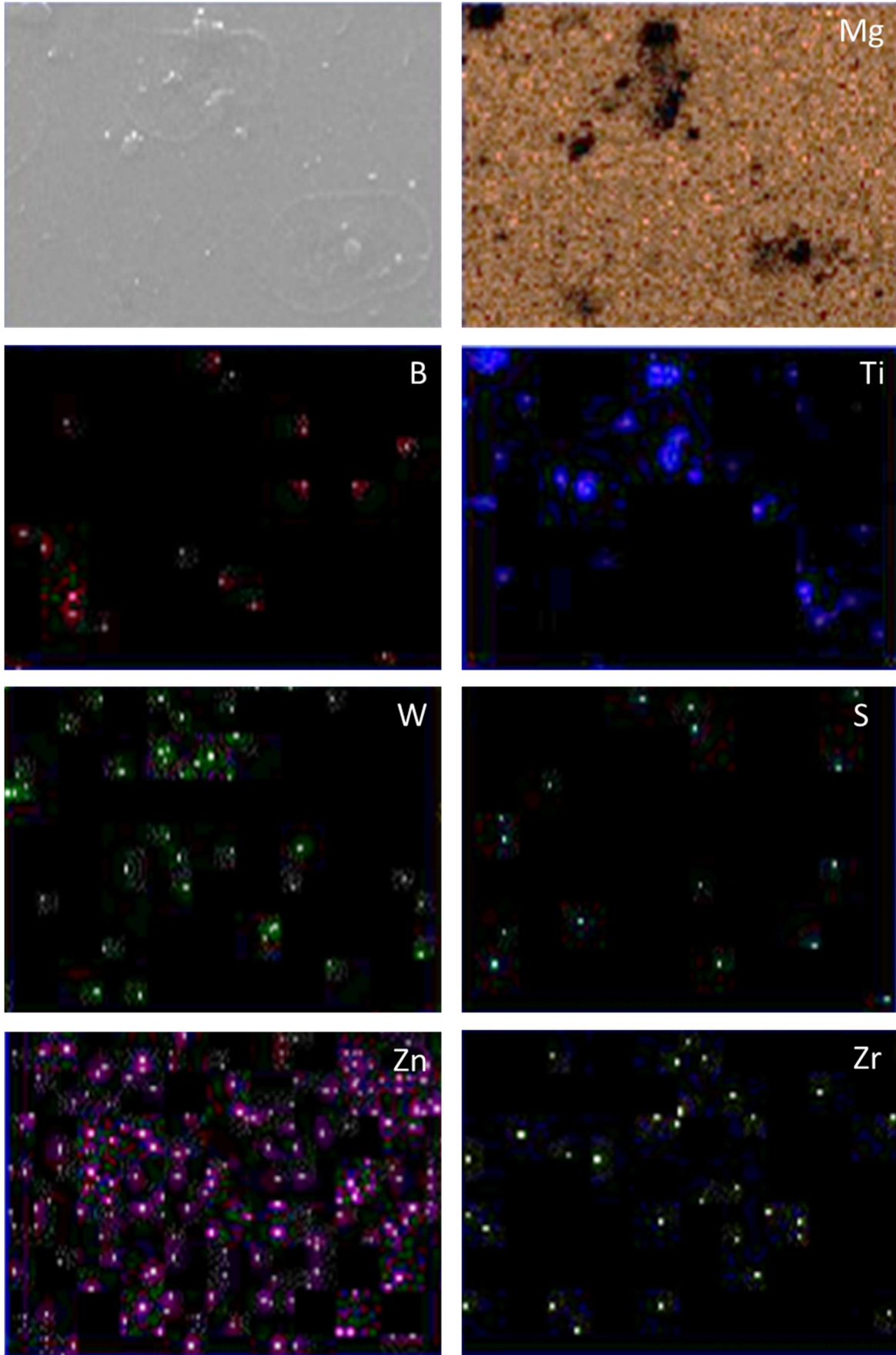
Şekil 6.7’de, %5 TiB₂ ve %2 WS₂ içeren hibrit takviyeli ZK60 magnezyum matrisli kompozitin mikroyapısı gösterilmektedir. Görüntüde, TiB₂ partikülleri parlak kontrastta, köşeli ve sert morfolojileriyle belirgin şekilde seçilebilmektedir. WS₂ partikülleri ise tabakalı yapılarının yansıması olarak daha koyu kontrastta ve yassı/yuvarlak formda gözlemlenmektedir. WS₂ oranının %2’ye yükseltilmesiyle birlikte, mikroyapıda belirgin partikül aglomerasyonlarının ve lokal yoğunlaşma bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Bu aglomerasyonlar, üretim sürecinde partiküllerin matris içinde homojen dağılımının zorlaştığını ve boşluk oluşum riskinin arttığını göstermektedir. Bu durum, yoğunluk ölçümlerinde elde edilen en düşük değer (%96,2) ile doğrudan ilişkilidir. Artan takviye oranına rağmen gözenekliliğin yükselmesi, malzeme bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Sertlik sonuçları açısından bakıldığında, bu numune hibrit takviyeli seride en yüksek değeri göstermiştir. Bunun temel nedeni, yüksek orandaki sert faz içeriğinin matrisin deformasyon direncini artırmasıdır. Ancak, gözlemlenen aglomerasyon ve gözeneklilik, sertlikte daha da yüksek bir artışın önünde sınırlayıcı bir etken olmuştur. Genel olarak, %2 WS₂ ilavesi, sert faz miktarını artırarak sertlik üzerinde pozitif etki yaratmış olsa da partikül dağılımındaki homojenlik sorunları ve gözeneklilik artışı, malzemenin yoğunluğu ve potansiyel mekanik performansı üzerinde olumsuz bir etki oluşturmuştur.



Şekil 6. 7. ZK60+%5TiB₂+%2WS₂ hibrit kompozit numunesinin SEM görüntüsü

Yapılan elementel haritalama (MAP) analizi Şekil 6.8’de, %5 TiB₂ ve %2 WS₂ takviyeli ZK60 magnezyum matrisli kompozitin bileşenlerinin mikroyapı içerisindeki dağılımını ortaya koymaktadır. Analiz sonucunda, Mg matris elementinin tüm yapı boyunca homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir.

TiB₂ takviyesinin varlığı, Ti ve B elementlerinin birlikte ve çoğunlukla aynı bölgelerde yoğunlaşmasıyla doğrulanmıştır. WS₂ takviyesine ait W ve S elementleri, matris içerisinde belirgin partikül bölgelerinde lokalize olmuş ve homojen dağılıma yakın bir görünüm sergilemiştir. Zn ve Zr elementleri, ZK60 alaşımının ana alaşım elementleri olarak matris genelinde yayılmış, yer yer tane sınırlarında veya ikincil faz bölgelerinde yoğunlaşma göstermiştir. Bu sonuçlar, üretim sürecinde kullanılan takviye fazlarının mikroyapı içerisinde başarılı bir şekilde dağıldığını, ancak yüksek WS₂ oranına bağlı olarak bazı bölgelerde lokal kümelenmelerin meydana geldiğini teyit etmektedir.

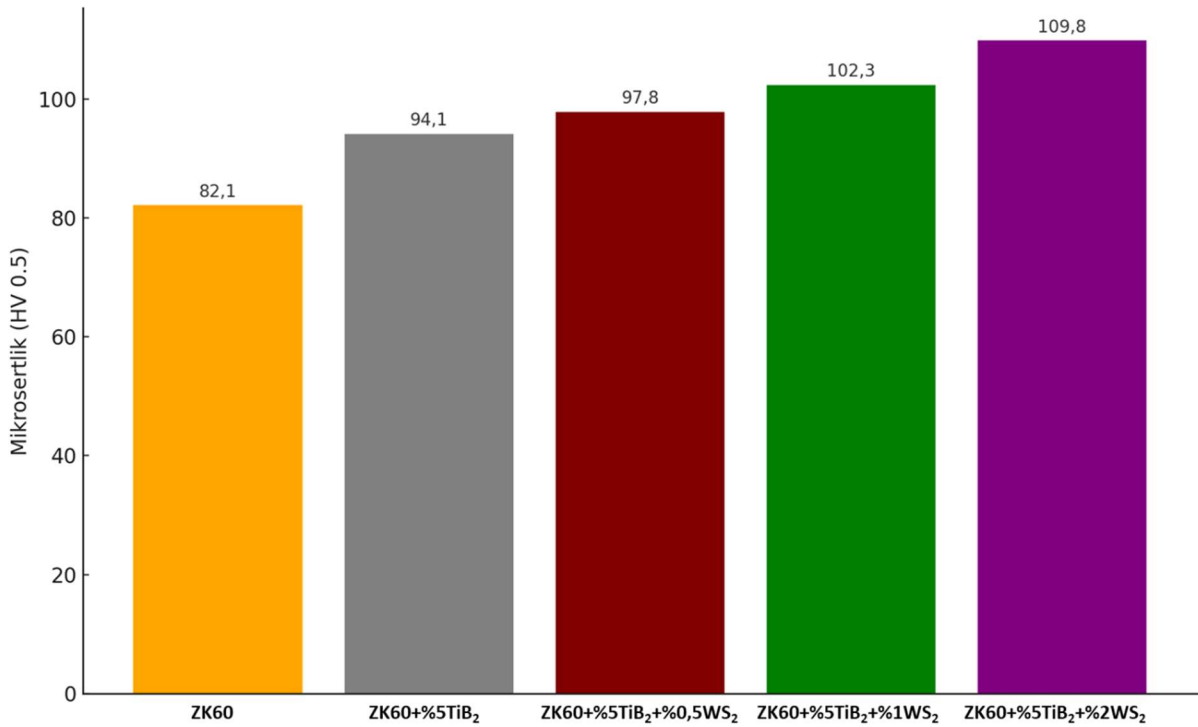


Şekil 6. 8. ZK60+%5TiB₂+%2WS₂ hibrit kompozit numunesinin SEM/MAP görüntüsü

6.3. Sertlik Sonuçları

Şekil 6.9' da üretilen kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Vickers mikrosertlik testi, 0,5 kgf (HV 0,5) yük altında uygulanmış ve her bir numune için beş farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalaması alınarak sonuçlar belirlenmiştir.

Elde edilen ortalama mikrosertlik değerleri aşağıda sunulmakta ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmektedir. Takviyesiz ZK60 alaşımının 82,1 HV mikrosertlik değeri ile en düşük sertlik değerine sahip numune olmuştur. Bu durum, alaşımın kendi iç yapısında herhangi bir seramik partikül bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Yani matrisin deformasyon direnci düşüktür ve yük altında plastik şekil değişimine daha yatkındır. Bu nedenle ZK60 alaşımı, referans numune olarak değerlendirilmiş ve diğer kompozitlerle karşılaştırılmıştır. %5 oranında TiB_2 içeren numune, 94,1 HV sertlik değeri ile önemli bir artış göstermiştir. Bu artış, TiB_2 partiküllerinin yüksek sertlik değerine sahip olması ve matris içinde yük taşıyıcı faz olarak görev yapmasıyla ilişkilidir. Ayrıca, TiB_2 'nin matris ile iyi bir bağ oluşturması, dislokasyon hareketini kısıtlaması ve taneler arası engel oluşturması da sertliğin artmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 6. 9. Deney numunelerinin sertlik değer grafiği

Hibrit takviyeli kompozitlerde WS₂ ilavesinin mikrosertlik üzerindeki etkisi dikkat çekici düzeydedir. %0,5 WS₂ içeren numune 97,8 HV değerine ulaşmış, %1 WS₂ içeren numune ise 102,3 HV ile daha da yüksek bir sertlik göstermiştir. Bu sonuçlar, WS₂'nin TiB₂ ile birlikte sinerjik bir etki yaratarak matris sertliğini artırdığını göstermektedir. WS₂ partikülleri, katı yağlayıcı yapısına rağmen sert ve kayma düzlemleri üzerinde etkili olacak şekilde matris içinde dağılmakta ve deformasyonu sınırlandırmaktadır. Ayrıca, hibrit takviyeli yapı sayesinde yük aktarımı daha verimli hale gelmekte, bu da mikrosertlik artışına doğrudan katkı sunmaktadır. En yüksek mikrosertlik değeri, %5 TiB₂ ve %2 WS₂ içeren kompozit numunede 109,8 HV olarak ölçülmüştür. Bu değer, takviyesiz ZK60'a kıyasla yaklaşık %34 daha yüksek olup, kullanılan takviye fazlarının sertlik artırıcı etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Ancak bu artışa rağmen, mikroyapı analizlerinde gözlenen aglomerasyon eğilimi ve artan gözeneklilik gibi yapısal kusurların, daha yüksek oranlarda takviye kullanımının mekanik dayanım üzerindeki olası olumsuz etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Genel olarak, sertlik değerlerinde gözlemlenen artış, takviye fazlarının uygun oranlarda ilavesiyle kompozitlerin mukavemet ve deformasyon direnci açısından ciddi şekilde geliştirilebileceğini göstermektedir. Özellikle hibrit takviye sistemlerinin, doğru partikül oranları ve uygun üretim parametreleriyle optimize edilmesi durumunda, magnezyum esaslı kompozitlerin daha yüksek performanslı yapısal uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, ZK60 magnezyum alaşımı matrisli kompozit malzemeler, %5 TiB₂ ve farklı oranlarda (%0,5, %1 ve %2) WS₂ takviyeleriyle üretilmiş ve elde edilen numuneler yoğunluk, mikrosertlik ve mikroyapı özellikleri açısından incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Takviyesiz ZK60 numunesi %98,7 ile en yüksek yoğunluk değerine sahip olurken, WS₂ oranının artmasıyla yoğunlukta kademeli azalma görülmüş ve %2 WS₂ içeren numune %96,2 ile en düşük değeri vermiştir. Bu düşüş, yüksek takviye oranlarında artan gözeneklilik ile ilişkilendirilmiştir.
- %5 TiB₂ takviyesi, ZK60 matrisinde belirgin tane incelmeye yol açmış, sert ve köşeli TiB₂ partiküllerinin homojen dağılımı ile yapısal bütünlük güçlenmiştir.
- WS₂ takviyesi, bilyalı karıştırıcı ile hazırlanan numunelerde homojen şekilde dağılmış olup, düşük ve yüksek oranlarda benzer dağılım kalitesi korunmuştur.
- Sertlik değerleri, takviyesiz ZK60'ta 82,1 HV iken %5 TiB₂ ile 94,1 HV'ye yükselmiş; hibrit takviyelerde %0,5 WS₂ ile 97,8 HV, %1 WS₂ ile 102,3 HV ve %2 WS₂ ile 109,8 HV seviyelerine ulaşmıştır.
- Sertlik artışı, sert faz miktarının yükselmesi ve tane incelmesinin sonucu olarak ortaya çıkmıştır.
- Genel olarak hibrit takviye yöntemi, ZK60 magnezyum alaşımının sertlik performansını önemli ölçüde artırmış; üretim sürecinde kullanılan bilyalı karıştırma yöntemi sayesinde takviye fazları matris içerisinde homojen şekilde dağılmıştır.

7.2. Öneriler

- Yoğunluk ve sertlik dengesi açısından hibrit takviyelerde WS₂ oranının %0,5–%1 aralığında tutulması önerilmektedir.
- Elde edilen kompozitlerin mekanik performansının daha kapsamlı belirlenmesi için çekme, basma ve korozyon testleri gibi ek deneyler yapılmalıdır.

8. KAYNAKLAR

- Akorak, E., (2003). “Toz Metalurjisi Yöntemi İle Al-Sic Kompozit Malzeme Üretimi ve İslenebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,10-45.
- Alpugan, Z., (1981). “T/M’de Presleme Tekniği Ve Nükleer Yakıt (UO₂) Üretimine Uygulanması”, Marmara Bilimsel Ve Endüstriyel Araştırma Enstitüsü, TÜBİTAK.
- Arık, H. (2019). Toz Metalurjisi Metoduyla Al-Sic Kompozit Malzeme Üretimi Ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.29109/Gujsc.587637>
- Ataş, A. (2003). “Alaşımli Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., F.B.E, İstanbul. <https://nek.istanbul.edu.tr/ekos/tez/38793.pdf>
- Beddow, J. K. (1974). The Production Of Metal Powders By Atomization. Heyden And Sonc Inc., Philadelphia. Erişim Tarihi: 23 Mart 2025, <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282271513793792>
- Boz, M. (2003). “Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi Ve Sürtünme-Aşınma Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara. <https://avesis.gazi.edu.tr/yonetilen-tez/47112149-0188-4b47-ba0a-d17deead74bd/seramik-takviyeli-bronz-esasli-toz-metal-fren-balata-uretimi-ve-surtunme-asinma-ozelliklerinin-arastirilmasi>
- Cai, B., Liu, Z., Tian, X., Wang, F., Li, H., ve Ji, R. (2010). An Experimental Study Of Crevice Corrosion Behaviour Of 316L Stainless Steel In Artificial Seawater. Corrosion Science - CORROS SCI, 52, 3235-3242. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.05.040>
- Dogan, C., ve Saritas, S. (1994). Metal-Powder Production By Centrifugal Atomization. International Journal Of Powder Metallurgy, 30(4). <https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/5539c2ca-A4a8-4fce-B221-62b357d792aa/Metal-Powder-Production-By-Centrifugal-Atomization>
- Eisen, W. B., Ferguson, B. L., German, R. M., Iacocca, R., Lee, P. W., Madan, D., Moyer, K., Sanderow, H., ve Trudel, Y. (1998). Powder Metal Technologies And Applications. <https://www.osti.gov/biblio/289959>
- Erden, M. A., ve Taşçı, M. T. (2016). Toz Metalürjisi İle Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Ni İlavesinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi. Politeknik Dergisi, 19(4), Article 4.
- Ergül, E., ve Kurt, H. (2021). Comparison Of Properties By Applying ANFIS, ANN And Taguchi Approaches To Al Matrix Composites. Uluslararası Muhendislik Arastirma Ve Gelistirme Dergisi, 13(2), 406-416. <https://doi.org/10.29137/Umagd.833300>

Thummler, F., Oberacker, R. B0490 Introduction To PM | PDF | Sintering | Mill (Grinding). (T.Y.). Geliş Tarihi 23 Mart 2025, Gönderen

<https://www.scribd.com/document/362582567/F-Thummler-R-Oberacker-B0490-Introduction-To-PM>

Fevzi, K. (2023). Nikel Partiküller İle Takviye Edilmiş Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu (No. 5).

<https://search.trdizin.gov.tr/en/yayin/detay/1216237/nikel-partikuller-ile-takviye-edilmis-magnezyum-matrisli-kompozitlerin-uretimi-ve-karakterizasyonu>

German, R. M. (1996). *Sintering theory and practice* (p. 568)

German R. M. And Park S. J. (2009). Handbook Of Mathematical Relations İn Particulate Materials Processing: Ceramics, Powder Metals, Cermets, Carbides, Hard Materials, And Minerals. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470370087.ch24>

Goryczka, T., Humbeeck, J.V., (2008). “Characterization Of A Niticu SMA Produced By Powder Technology”, Journal Of Alloys And Compounds, 456, 194-200.

Griffin, R. B. (2006). An Experiment İn Powder Metallurgy–Sintering Of Cu. Department Of Mechanical Engineering, Texas A. And M. University, College Station, TX 77843: 1-14.

Gohar, G. A., Manzoor, T., Ahmad, A., Raza, H., Farooq, A., Karim, I. And Asad, F. (2020). Synthesis And Investigate The Properties Of Cu–Al–Ni Alloys With Ag Addition Using Powder Metallurgy Technique. Journal Of Alloys And Compounds, 817: 153281. <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85076838409&partnerid=8yflogxk>

Gorji, R. R., Alizadeh, A. And Jafari, H. (2016). Microstructure And Mechanical Properties Of Stir Cast ZX51/Al₂O₃P Magnesium Matrix Composites, Materials Science And Engineering A, 674: 413-418

Goryczka, T., and Humbeeck, J. (2006). Characterization Of A Niticu Shape Memory Alloy Produced By Powder Technology. Journal Of Achievements İn Materials And Manufacturing Engineering, 17.

Grafen Nanoplakacıklarla Güçlendirilmiş Magnezyum Matris Kompozitleri—Grafen Malzemeleri—Wiley Online Kütüphanesi. (T.Y.). Geliş Tarihi 23 Mart 2025, Gönderen <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119131816.ch5>

Gupta, M., and Wong, W. L. E. (2015). Magnesium-Based Nanocomposites: Lightweight Materials Of The Future. Materials Characterization, 105, 30-46. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.04.015>

Gupta, N., Luong, D. D., And Cho, K. (2012). Magnesium Matrix Composite Foams Density, Mechanical Properties And Applications, Metals Journals, 2(3): 238-252 . <https://doi.org/10.3390/Met2030238>

- Jalota, S., Bhaduri, S. B., and Tas, A. C. (2008). "Using A Synthetic Body Fluid (SBF) Solution Of 27 Mm HCO₃⁻ To Make Bone Substitutes More Osteointegrative," *Materials Science And Engineering: C*, Vol. 28, No. 1, Pp. 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.058>
- James, W. B. (2015). *Powder Metallurgy Methods And Applications*. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v07.a0006022>
- Jiang, Q. C., Li, X. L., and Wang, H. Y. (2003). Fabrication Of Tic Particulate Reinforced Magnesium Matrix Composites. *Scripta Materialia*, 48(6), 713-717. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00551-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00551-1)
- Jiang, Y., and Zhou, R. (2013). Wear Performance Of Nano-Al₂O₃ Particles And Cnts Reinforced Magnesium Matrix Composites By Friction Stir Processing. *Wear*, 305, 286-290. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.079>
- Kandil, A. (2012). Microstructure And Mechanical Properties Of Sicp/AZ91 Magnesium Matrix Composites Processed By Stir Casting, *Journal Of Engineering Sciences, Assiut University*, 40(1): 255-270 <https://doi.org/10.21608/jesaun.2012.112726>
- Karabulut, Ş., Gökmen, U., ve Çinici, H. (2016). Al₂O₃ / B₄C / Sic Parçacıklarıyla Takviye Edilmiş AA7039 Kompozitlerinin Mekanik Ve Delme Özelliklerinin İncelenmesi. *Composites Part B: Engineering*, 93, 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.054>
- Kelen, F. (2023). Nikel Partiküller İle Takviye Edilmiş Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu. *Afyon Kocatepe University Journal Of Sciences And Engineering*, 23(5), 1318-1327. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1207488>
- Kelen, F., Aydoğmuş, T., ve Gavgali, M. (2022). Az91 Magnezyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Korozyon Özelliklerinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 10, 84-90. <https://doi.org/10.21923/jesd.970209>
- Kerti, I. (2019). B₄c Takviyeli Magnezyum (Az91) Matrisli Kompozitlerin Mikroyapısal Karakterizasyonu. *Uluslararası Muhendislik Arastirma Ve Gelistirme Dergisi*. <https://doi.org/10.29137/umagd.388600>
- Kosedağ, E., ve Aydoğmuş, T. (2016). The Effect Of Ceramic And Metallic Reinforcement Materials On The Mechanical Properties Of Magnesium Matrix Composites.
- Kruzhanov, V., and Arnhold, V. (2012). Energy Consumption İn Powder Metallurgical Manufacturing. *Powder Metallurgy*, 55, 14-21. <https://doi.org/10.1179/174329012X13318077875722>
- Kurt, E., Aydemir, F., ve Evren, B. (2022). Çeşitli Toz Sıkıştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 45, Article 45. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1219539>

- Kurt, A., (1992). Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerin Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. [https://Tez.Yok.Gov.Tr/Ulusaltezmerkezi/Tezdetay.jsp?İd=Wouqdgsem7jfzabqik0kg&No=Wouqdgsem7jfzabqik0kg](https://tez.yok.gov.tr/Ulusaltezmerkezi/Tezdetay.jsp?İd=Wouqdgsem7jfzabqik0kg&No=Wouqdgsem7jfzabqik0kg)
- Lee, P. W., Trudel, Y., Iacocca, R., German, R. M., Ferguson, B. L., Eisen, W. B. And Moyer, K. (1998). Warm Compaction. Powder Metal Technologies And Applications, 7: 376-381.
- Nazarian-Samani, M., Kamali, A., Mobarra, R. (2010). Phase Transformations Of Ni15 Wt.% B Powders During Mechanical Alloying And Annealing. Materials Letters - MATER LETT, 64, 309-312. Materials Letters, 64(3): 309-312. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.10.070>
- Panda, A., Dobránsky, J., Jančík, M., Pandová, I., and Kačalová, M. (2018). Advantages And Effectiveness Of The Powder Metallurgy In Manufacturing Technologies. Anali Zavoda Za Povijesne Znanosti Hrvatske Akademije Znanosti I Umjetnosti U Dubrovniku, 57(4), 353-356.
- Qiao, Y., Cai, X., Zhou, L., Pan, W., Yang, C., Hu, C., Zhang, X., Wang, Z., Wu, C., and Zhang, S. (2018). Microstructure And Mechanical Properties Of Copper Matrix Composites Synergistically Reinforced By Al₂O₃ And Cnts. Integrated Ferroelectrics, 191, 133-144. <https://doi.org/10.1080/10584587.2018.1457383>
- Rahmany-Gorji, R., Alizadeh, A., ve Jafari, H. (2016a). Karıştırma Döküm ZX51/Al₂O₃P Magnezyum Matrisli Kompozitlerin Mikro Yapısı Ve Mekanik Özellikleri. Materials Science And Engineering: A, 674, 413-418. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.057>
- Rahmany-Gorji, R., Alizadeh, A., and Jafari, H. (2016b). Microstructure And Mechanical Properties Of Stir Cast ZX51/Al₂O₃p Magnesium Matrix Composites. Materials Science And Engineering: A, 674, 413-418. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.057>
- Rajendren, B., S, S., and Arumugam, A. (2015). Wear Behavior Of Hybrid (AL+SIC+AL₂O₃) Metal Matrix Composites.
- Randall, M., G., (2007). Toz Metalurjisi Ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Editörler: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., ISBN: 0-9762057-1-8, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Ankara.
- Rashad, M., Pan, F., Tang, A., Asif, M., Hussain, S., Gou, J. And Mao, J. (2015). Improved Strength And Ductility Of Magnesium With Addition Of Aluminum And Graphene Nanoplatelets (Al+Gnps) Using Semi Powder Metallurgy Method, Journal Of Industrial And Engineering Chemistry, 23: 243-250.
- Rashad, M., Pan, F. And Asif, M. (2015). Magnesium Matrix Composites Reinforced With Graphene Nanoplatelets, Graphene Materials: Fundamentals And Emerging Applications; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 151–189.

- Rawle, A. (2003). The Basic Principles Of Particle Size Analysis. Surface Coatings International Part A: Coatings Journal, 86, 58-65.
- Razavykia, A., Farahany, S., ve Yusof, N. M. (2015). DOE Yaklaşımı Kullanılarak Bizmut İle Aşılammış Al-Mg 2 Si Yerinde Metal Matris Kompozitinin Kuru Tornalama İşleminde Kesme Kuvveti Ve Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi. Measurement, 76, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.032>
- Rzychoń, T., Dyzia, M., and Pikos, I. (2013). Microstructure Of WE43 Magnesium Matrix Composite Reinforced Ceramic Particles. Solid State Phenomena, 211, 101-108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.211.101>
- Rzychon, T., Dybowski, B., Grye, A. And Dudek, M. (2015). Mechanical Properties And Microstructure Of WE43 Magnesium Matrix Composite Reinforced Sic Particles, Archives Of Foundry Engineering, 15(1): 99-102
- Shoba, C., Ramanaiah, N., and Rao, D. (2015). Effect Of Reinforcement On The Cutting Forces While Machining Metal Matrix Composites—An Experimental Approach. Engineering Science And Technology, An International Journal, 3. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.03.013>
- Shuhong Dong, J Zhou, David Hui, Ying Wang, Shu Zhang. (2015). Size Dependent Strengthening Mechanisms In Carbon Nanotube Reinforced Metal Matrix Composites. Compos. Part. A-Appl. S. 68: 356–364.
- Subramanian, J., Loh, Z., Seetharaman, S., Hamouda, A. S., and Gupta, M. (2012). Microstructure And Mechanical Properties Of Mg-5Nb Metal-Metal Composite Reinforced With Nano Sic Ceramic Particles. Metals, 2(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/met2020178>
- Svoboda, M. (2003). Creep Resistance In Magnesium Alloys And Their Composites. International Journal Of Materials and Product Technology. https://www.academia.edu/112769600/Creep_Resistance_In_Magnesium_Alloys_And_Their_Composites
- Şanlı, P., and Gavas, M. (2021). Microstructure, Physical And Mechanical Properties Of Al/Sic And Al/B4C Metal Matrix Composites Produced By Powder Metallurgy. Journal Of Materials And Mechatronics: A, 2(2), Article 2.
- Şimşek, İ., Yıldırım, M., Tunçay, T., Özyürek, D., ve Şimşek, D. (2018). Mekanik Alaşım/Öğütme Yöntemi İle Üretilen Al-Sic Kompozitlerin İncelenmesi. Technological Applied Sciences, 13(2), Article 2.
- Taşlıyan, M.F. (2020). Toz Metalürjisi İle Üretilen Mangan Çeliğine Tic, Tin, Tici İlavasının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Thümmel F. And Oberacker R.(1993). “Introduction To Powder Metallurgy,” Oxford Science Publications, 1993.

Venkatesh, B. And Harish, B. (2015). Mechanical Properties Of Metal Matrix Composites (Al/Sicp) Particles Produced By Powder Metallurgy. International Journal Of Engineering Research And General Science, 3(1): 1277-1284.

Zhang, Q., and Hu, H. (2010). Development Of Hybrid Magnesium-Based Composites. SAE Technical Papers. Master Degree Thesis, University Of Windsor, Faculty Of Graduate Studies And Research, Ontario. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0408>

