

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**AA2024 MATRİSLİ AL₂O₃-SİC TAKVİYELİ HİBRİT
NANOKOMPOZİTLERİN T/M YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE
BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Muhammet Vahittin KAÇMIŞ

Yüksek Lisans Tezi

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ TEKNOLOJİLERİ

OCAK 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Yüksek Lisans Tezi

**AA2024 MATRİSLİ AL_2O_3 -SİC TAKVİYELİ HİBRİT
NANOKOMPOZİTLERİN T/M YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE
BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Tez Yazarı

Muhammet Vahittin KAÇMIŞ

Danışman

Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

OCAK 2022

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	AA2024 Matrisli Al ₂ O ₃ -SiC Takviyeli Hibrit Nanokompozitlerin T/M Yöntemi ile Üretilmesi ve Balistik Performansının İncelenmesi
Yazarı:	Muhammet Vahittin KAÇMIŞ
İlk Teslim Tarihi:	06.12.2021
Savunma Tarihi:	21.01.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	İmza Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. AYKUT ÇANAKÇI Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. ALİ KAYA GÜR Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “AA2024 Matrisli Al_2O_3 -SiC Takviyeli Hibrit Nanokompozitlerin T/M Yöntemi İle Üretilmesi Ve Balistik Performansının İncelenmesi” Başlıklı Yüksek Lisans tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

21.01.2022

Muhammet Vahittin KAÇMIŞ



ÖNSÖZ

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler, tane boyutları çok küçük olmasından dolayı, yüksek mukavemet ve tokluk, yüksek sıcaklıklarda kendi özelliklerini koruyabilme, düşük termal genleşme ve aşınma direncinin yüksek olması gibi özelliklere sahip malzemelerdir. Bu özellikler; yüksek mukavemet, tokluk, süneklik difüzyon hızının yüksek olması, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirlik, ısı iletkenliğinin düşük olması, termal genleşme özelliğinin yüksek olması ve üstün manyetik özelliklere sahip olması gibi farklı özellikler örnek olarak verilebilir.

Bu tez çalışmasında AA2024 alaşım malzemesine nano boyutta Al_2O_3 ve SiC tozlarını ayrı ayrı ve birlikte olacak şekilde ilave ederek mekanik alaşımlama yöntemi ile sabit bir sürede nano kompozitler ve hibrit kompozit malzemeler hazırlanarak, sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numunelere mekanik testler olarak; yoğunluk ölçümü, çekme testi, sertlik testi, korozyon ve balistik testleri uygulanmıştır. Ayrıca, üretilen numunelerin SEM-EDS ve XRD analizleri ile mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Bu veriler sonucunda takviye oranlarının malzemelerin mekaniksel ve korozyon davranışlarına etkisi incelenmiştir.

Uzun soluklu tez çalışmam sırasında katkısını, değerli zamanını ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ ve bana her zaman destek olup ve tecrübelerini paylaşıp yönlendiren hocam Prof. Dr. Aykut ÇANAKCI ve Dr. Serdar ÖZKAYA 'ya teşekkür ederim.

Bu uzun ve meşakkatli süreç boyunca, her zaman yanımda olup beni destekleyen, vazgeçmeyi düşündüğümde devam etmem için beni yüreklendiren, eşim Merve KAÇMIŞ'a ve her ihtiyacımda yardımını esirgemeyen çok değerli AR&GE Müdürüm Sn. Ali Celaleddin GEMCİ 'ye en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından desteklenen 'AA2024 Matrisli Al_2O_3 -SiC Takviyeli Hibrit Nanokompozitlerin T/M Yöntemi İle Üretilmesi Ve Balistik Performansının İncelenmesi' başlıklı TEKF.20.20 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Muhammet Vahittin KAÇMIŞ

ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
BEYAN	iv
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	7
3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Genel Özellikleri	7
3.2. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)	7
3.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları	8
3.2.2. MMK Malzemelerin Uygulama Alanları	9
3.2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	12
3.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)	27
3.3.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Özellikleri.....	27
3.3.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemenin (FDM) Uygulama Alanları	27
3.4. Hibrit Nano Kompozit Malzemeler	27
4. BALİSTİK	29
4.1. İç Balistik	29
4.2. Dış Balistik.....	29
4.3. Hedef (Nüfuziyet) Balistiği	29
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
5.1. Malzeme Türleri.....	32
5.2. Malzeme Karışım Oranları.....	32
5.3. Mekanik Alaşımlama	34
5.4. Presleme	34
5.5. Metalografik İşlemler	35
5.6. Mekanik ve Fiziksel Testler	37
5.6.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik Tayini	37
5.6.2. Çekme Mukavemeti Testleri	37
5.6.3. Sertlik Testleri	38
5.6.4. Korozyon Testleri.....	38
5.6.5. Balistik Testler	39
6. DENEYSEL SONUÇLAR	40
6.1. Toz Karakterizasyonu	40
6.1.1. Toz Morfolojisi.....	40
6.2. Öğütme ve EDS Görüntüleri	40
6.2.1. AA2024/Al ₂ O ₃ Nano Kompozit Malzemelerin İç Yapı Görüntüleri	44
6.2.2. AA2024/SiC Nano Kompozit Malzemelerin İç Yapı Görüntüleri	45

6.2.3. AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC Hibrit Nano Kompozit Malzemelerin İç Yapı Görüntüleri	46
6.3. Üretilen Kompozit Malzemelerin XRD Analizleri.....	47
6.4. Üretilen Kompozit Malzemelerin Özellikleri	47
6.4.1 Yoğunluk ve Gözeneklilik.....	47
6.4.2. Çekme Mukavemeti Testleri	49
6.4.3. Sertlik Değerleri	50
6.5. Korozyon Testleri.....	51
6.5.1. AA2024 Numunesinin Korozyon Yüzey İncelemesi	54
6.5.2. AA2024/Al ₂ O ₃ Nano Kompozit Malzemelerin Korozyon Yüzey İncelemesi	55
6.5.3. AA2024/SiC Nano Kompozit Malzemelerin Korozyon Yüzey İncelemesi	56
6.5.4. AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC Hibrit Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi	57
6.6. Balistik Testleri	58
7. SONUÇLAR.....	64
8. ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

AA2024 Matrisli Al₂O₃-SiC Takviyeli Hibrit Nanokompozitlerin T/M Yöntemi İle Üretilmesi ve Balistik Performansının İncelenmesi

Muhammet Vahittin KAÇMIŞ

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Ocak 2022, Sayfa: xiii+70

Bu tez çalışmasında, üretim yöntemlerinden biri olan Toz Metalurjisi (T/M) yöntemi kullanarak elde edilen 63µm partikül boyuta sahip AA2024 matrisli Al₂O₃ ve SiC takviyeli hibrit nanokompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı oranlarda AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC ve AA2024/Al₂O₃-SiC toz karışımları hazırlanarak 560 °C sıcaklıkta 120 dk. Sürede 500 MPa basınçta sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir.

Üretilen numunelerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla; SEM, EDX ve XRD görüntüleri ile mikrosertlik, yoğunluk, çekme, korozyon ve balistik testleri yapılmıştır.

Yapılan test sonuçlarına göre; AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC ve AA2024/Al₂O₃-SiC nano kompozit malzemelerin tümünde en iyi çekme testi sonucu % 2 takviyeli kompozit malzemelerde tespit edilmiştir. Çekme mukavemetinin artmasını etkileyen en önemli parametrenin, oluşan Al₂Cu ara faz miktarı olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerleri, artan takviye oranı ile artış göstermiştir. Malzemelerin artan takviye oranı ile korozyon hızları artmış, fakat % 2 takviye oranından sonra korozyon hızları sürekli düşüş göstermiştir. En düşük korozyon hızları ise % 5 takviyeli kompozit malzemelerde tespit edilmiştir. Balistik test sonucunda ise en yüksek değeri % 2 takviyeli kompozit malzemeler vermiş olup, daha yüksek takviye oranlarında ise balistik test değerlerinde düşüşler meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA2024, Al₂O₃, SiC, Hibrit Nanokompozit Malzemeler, Balistik Performans.

ABSTRACT

Production of AA2024 Matrix Al_2O_3 -SiC Reinforced Hybrid Nanocomposites Using T/M Method and Investigation of Ballistic Performance

Muhammet Vahittin KAÇMIŞ

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defense Technologies

January 2022, Page: xiii+70

In this thesis, the microstructures and mechanical properties of AA2024 matrix Al_2O_3 and SiC reinforced hybrid nanocomposites with 63 μm particle size obtained using Powder Metallurgy (T/M) method, which is one of the production methods, were investigated. Powder mixtures of AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC and AA2024/ Al_2O_3 -SiC were prepared in different proportions and kept at 560 °C for 120 minutes. It was produced by hot pressing method at 500 MPa pressure in time.

In order to determine the microstructure and mechanical properties of the produced samples, microhardness, density, tensile, corrosion and ballistic tests were performed using SEM, EDX and XRD images.

The results revealed that the best tensile test result in all AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC and AA2024/ Al_2O_3 -SiC nano composite materials was obtained from 2% reinforced composite materials. It was determined that one of the most important parameters affecting the tensile strength was the amount of Al_2Cu interphase formed. The hardness values increased with the increasing reinforcement ratio. Corrosion rates increased with increasing reinforcement ratio of materials, but corrosion rates decreased continuously after 2% reinforcement ratio. The lowest corrosion rates were found in 5% reinforced composite materials. As a result of ballistic test, 2% reinforced composite materials provided the highest value. After 2% reinforcement rate, ballistic test values decreased.

Keywords: AA2024, Al_2O_3 , SiC, Hibrid Nano Composite Materials, Ballistic Performance.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1.	Basınçlı İnfiltrasyon Düzeneği a) Argon gaz girişi b) Argon gaz çıkışı, c) Azot gaz girişi d) Azot gaz çıkışı, e) Kapak, f) Preform, g) Sıvı metal, h) Isıtıcı eleman	13
Şekil 3.2.	Sprey çökeltme deney düzeneği	14
Şekil 3.3.	Vortex deney düzeneği	14
Şekil 3.4.	Karıştırmalı döküm düzeneği ve kullanılan donanımlar	15
Şekil 3.5.	Kompozit döküm işleminin işlem basamakları	15
Şekil 3.6.	Sıkıştırırmalı döküm yöntemini işlem basamakları	16
Şekil 3.7.	Difüzyonla bağlama yöntemi	17
Şekil 3.8.	Toz Metalurjisi yöntemi ile malzeme üretim şeması	18
Şekil 3.9.	a) Su atomizasyon yönteminin üretim şeması, b) Gaz atomizasyon yönteminin üretim şeması	19
Şekil 3.10.	TM kullanılan parçacık şekilleri	20
Şekil 3.11.	Presleme yönteminin işlem basamakları	21
Şekil 3.12.	Toz partiküllerinin presleme esnasındaki görünümü	21
Şekil 3.13.	Sinterleme işleminin şematik gösterimi	22
Şekil 3.14.	Sinterleme işleminde meydana gelen boyun oluşumu	23
Şekil 3.15.	Tozların bilyeler ile çarpışmasının şematik gösterimi	24
Şekil 3.16.	Mekanik alaşımlama esnasında toz taneciklerinde meydana gelen deformasyon	24
Şekil 3.17.	MA sonucu meydana gelen yapı	25
Şekil 4.1.	Farklı darbelerde olası kırılma şekilleri	30
Şekil 5.1.	Deneysel çalışmanın iş akış şeması	33
Şekil 5.2.	Mekanik öğütme cihazı	34
Şekil 5.3.	Sıcak presleme cihazı	34
Şekil 5.4.	(a) Kesme cihazı (b) Bakalit cihazı (c) Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı	35
Şekil 5.5.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	36
Şekil 5.6.	XRD analiz cihazı	36
Şekil 5.7.	MTS 45 model universal tip çekme cihazı	37
Şekil 5.8.	Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı	38
Şekil 5.9.	Gamry marka korozyon test cihazı	38
Şekil 5.10.	Balistik test düzeneği	39
Şekil 6.1.	Kullanılan toz parçacıklarının morfolojileri, (a) AA2024, (b) Al ₂ O ₃ , (c) SiC	40
Şekil 6.2.	AA2024/%2 Al ₂ O ₃ nano kompozit malzemelerinin 4 saat öğütme işlemi sonrası; (a) Yüzey morfolojisi, (b) AA2024-Al ₂ O ₃ element dağılımı, (c) O ₂ dağılımı, (d) Al dağılımı	41
Şekil 6.3.	AA2024/%2 SiC nano kompozit malzemelerinin 4 saat öğütme işlemi sonrası; (a) Yüzey morfolojisi, (b) AA2024-SiC element dağılımı, (c) SiC dağılımı, (d) Al dağılımı	42

Şekil 6.4.	AA2024/%1 Al ₂ O ₃ -%1 SiC hibrit nano kompozit tozlarının 4 saat öğütme işlemi sonrası; (a) Yüzey morfolojisi, (b) AA2024-Al ₂ O ₃ /SiC element dağılımı, (c) O ₂ dağılımı, (d) Al dağılımı, (e) SiC dağılımı	43
Şekil 6.5.	AA2024/ Al ₂ O ₃ 560 °C’de sinterleme işlemi yapılmış nano kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (a)A _{0.5} , (b)A _{1.0} , (c)A _{2.0} , (d)A _{3.0} , (e)A _{5.0}	44
Şekil 6.6.	AA2024/SiC 560 °C’de sinterleme işlemi yapılmış nano kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (a)S _{0.5} , (b)S _{1.0} , (c)S _{2.0} , (d)S _{3.0} , (e)S _{5.0}	45
Şekil 6.7.	AA2024/ Al ₂ O ₃ -SiC 560 °C’de sinterleme işlemi yapılmış hibrit nano kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (a)H _{0.5} , (b)H _{1.0} , (c)H _{2.0} , (d)H _{3.0} , (e)H _{5.0}	46
Şekil 6.8.	AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC nano kompozit ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit numunelerin XRD analizi	47
Şekil 6.9.	AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerin takviye oranı ile yoğunluklarının değişimi.....	48
Şekil 6.10.	AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerin takviye oranı ile gözeneklilik değerlerinin değişimi	49
Şekil 6.11.	AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerin çekme testi sonucu mukavemet değerlerinin takviye oranı ile değişimi.....	50
Şekil 6.12.	AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerin takviye oranı ile sertlik değerlerindeki değişim	51
Şekil 6.13.	AA2024/Al ₂ O ₃ nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrisi	53
Şekil 6.14.	AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrisi	53
Şekil 6.15.	AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrisi	53
Şekil 6.16.	Saf AA2024 numunesinin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyi.....	54
Şekil 6.17.	AA2024/Al ₂ O ₃ nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri (a)A _{0.5} , (b)A _{1.0} , (c)A _{2.0} , (d)A _{3.0} , (e)A _{5.0}	55
Şekil 6.18.	AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri (a)S _{0.50} , (b)S _{1.0} , (c)S _{2.0} , (d)S _{3.0} , (e)S _{5.0}	56
Şekil 6.19.	AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri (a)H _{0.50} , (b)H _{1.0} , (c)H _{2.0} , (d)H _{3.0} , (e)H _{5.0}	57
Şekil 6.20.	Balistik uca sahip test cihazının numune yüzeyine çarpma anı	58
Şekil 6.21.	AA2024/Al ₂ O ₃ nano kompozit malzemelerin balistik test sonrası makro yapı görüntüleri (a)A _{0.5} , (b)A _{1.0} , (c)A _{2.0} , (d)A _{3.0} , (e)A _{5.0}	59
Şekil 6.22.	AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin balistik test sonrası makro yapı görüntüleri (a)S _{0.50} , (b)S _{1.0} , (c)S _{2.0} , (d)S _{3.0} , (e)S _{5.0}	60
Şekil 6.23.	AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin balistik test sonrası makro yapı görüntüleri (a)H _{0.50} , (b)H _{1.0} , (c)H _{2.0} , (d)H _{3.0} , (e)H _{5.0}	61
Şekil 6.24.	AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozitlerin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozitlerin balistik testleri sonucu darbe dayanım değerlerinin grafik değerleri	62

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Havacılık uygulamaları için kullanılan metal matris uygulamaları	10
Tablo 3.2. Alüminyum matris kompozitleri üreten üreticiler.....	11
Tablo 5.1. AA2024 matris alaşım malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağı.)	32
Tablo 5.2. Kompozit malzemelerin bileşimleri ve adlandırılmaları.....	32
Tablo 6.1. AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri	48
Tablo 6.2. AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit malzemelerinin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerinin çekme testi sonucu mukavemet değerleri	50
Tablo 6.3. AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerin Brinell Sertlik Değerleri (BSD).....	51
Tablo 6.4. AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozit malzemelerinin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozit malzemelerinin korozyon testi sonucu Ekor, Ikor ve korozyon hızı değerleri.....	52
Tablo 6.5. AA2024/Al ₂ O ₃ , AA2024/SiC kompozitlerin ve AA2024/Al ₂ O ₃ -SiC hibrit kompozitlerin balistik testleri sonucu darbe dayanım değerleri	62

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Abbreviations

Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
BSD	: Brinell sertlik değeri
HV	: Vickers sertlik değeri
MA	: Mekanik alaşımlama
MMK	: Metal Matris Kompozit
MPa	: Mega Paskal
Nm	: Nanometre
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SiC	: Silisyum Karbür
TM	: Toz Metalurjisi
XRD	: X-ışınları difraktometresi
µm	: Mikrometre

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanmakta olduğumuz malzemeler, sürekli gelişmekte olan teknolojinin ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Kompozit malzemelerin en belirgin özelliklerinde biri metal gibi klasik malzemelere göre hafif ve sağlam olmasıdır. Kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda çekme, darbe dayanımının artması, kimyasal direncinin ve yorulma dayanımlarının yüksek olması gibi birçok özellik bu malzemelerin havacılık, otomotiv, inşaat, makine ve uzay teknolojileri alanında kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Özellikle askeri alanlarda zırh malzemelerinin üretiminde metal ve seramik matrise sahip kompozit malzemelerin kullanımı her geçen gün artış göstermektedir. Sürekli gelişmekte olan silah sistemlerine karşı direnç gösterebilecek yeni balistik özellikler kazandırılmış zırh üretimi çalışmaları son zamanlarda hız kazanmıştır. Seramik kompozit malzemelerin monolitik yapıya sahip malzemelere göre balistik performansının yüksek olması ve yeni özellikler kazandırılmış zırh yapımında kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Alüminyum esaslı kompozit malzemelerde genel olarak Bor karbür (B_4C), Silisyum karbür (SiC) ve Alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi seramik esaslı farklı takviye malzemeleri katılarak kompozit malzemelerin yapıları güçlendirilmiş olur. Kompozit malzeme türü içerisinde en çok kullanılan malzeme türü olarak MMK (Metal Matrisli Kompozitler) ilk sırada yer almaktadır.

Sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından Alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanımı dikkat çekmektedir. Ayrıca alüminyum esaslı, SiC takviyeli kompozit malzeme kullanımı da son zamanlarda sıkça kullanılmaktadır. MMK'lerin istenilen üstün özelliklere sahip olabilmesi için, matris malzemesi ile takviye elemanının arasındaki bağ ve kompozit malzemelerin üretim yöntemine dikkat edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra matris malzemesi ile takviye elemanı sınırlarında bulunan ara yüzey bağlantı noktalarının istenilen düzeyde olması gerekmektedir. Matris malzemesinin ıslatılabilirlik özelliğinin ve takviye elemanı ile uyumunun yüksek olması ara yüzey bağlantısının iyi olmasına bağlıdır. MMK'lerin üretiminde farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bu üretim yöntemleri katı, sıvı ve buhar faz üretim yöntemleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bu üç yöntem kendilerine ait farklı özellikleri barındırmasının yanı sıra takviye elemanının matris içerisine, mekanik alaşımlama yöntemi kullanarak homojen dağılması sonucu MMK'ler üretilmektedir. MMK'lerin üretiminde en çok katı faz üretim yönteminin kullanılmaktadır. Yüksek sertliğe sahip ve aşınmaya karşı dirençli bilyelere sahip değirmen içerisinde tozlar ve bilyeler çarpışmalara maruz kalarak sürekli kırılmalar ve soğuk kaynaklama işlemlerini içeren katı faz olayıdır [1].

Ortak bir matris malzemeye sahip olan, iki ya da daha fazla takviye malzemesini içeren kompozit malzemelere hibrit kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Bu tür malzemelerin daha iyi sonuç verebilmesi için uygun duruma getirilmesi gerekmektedir. Örneğin; yüksek

sıcaklıkta kullanılacak bir malzeme ilk olarak yüksek sıcaklıklarda kullanılması ve kullanım ömrünün uzun olması gerekmektedir. Bu kapsamda ilk olarak yüksek mukavemet kazandırmak sonrasında ise bu özelliğinin kaybetmemesi beklenir. Hibrit kompozit malzemelerin üretim amacı, malzemelerin mevcut özelliklerini arttırmak için bir bileşimin olumsuz veya yetersiz yönlerini farklı bileşenlerle dengeleme işlemidir [2].

Yapılan bu çalışma ile, AA2024 matris malzemesine farklı takviye oranlarıyla Al_2O_3 ve SiC takviye malzemelerinin kompozit malzeme üzerindeki mekanik etkileri ve üretilen kompozit malzemelerin balistik performansları incelenmiştir. AA2024 matrise sahip kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemi kullanarak, %0.5, %1, %2, %3 ve %5 takviye oranlarıyla üretilmiştir. Kompozit malzemeler öncelikle 250 MPa yük ile ön presleme işlemi uygulanmış, daha sonra 500 MPa yük uygulanarak sıcak presleme yöntemi ile 120 dakikada 560 °C sabit sıcaklıkta üretilmiştir. Üretilmiş olan kompozit malzemelere yoğunluk, çekme, sertlik, korozyon ve balistik testler ile mikroyapı görüntüleri değerlendirilmiştir.

2. KONUNUN LİTERATÜRDEKİ YERİ

Jena ve diğ. (2010), yaptıkları çalışmada, Yüksek dayanıma sahip zırh çeliği ve Al-7017 farklı ısıtım işlem parametreleri ve kalınlıklarda 7.62 mm'lik mermiler karşındaki balistik performanslarını incelemişlerdir. Test sonuçları incelendiğinde merminin şekline bakarak hedefin balistik performansı hakkında yorum yapılabileceği, 200 °C 'de menevişleme işlemi görmüş çeliğin en yüksek balistik performans gösterdiği, yüksek dayanıma sahip olduğu, sertlik ve uzama sertleşmesi oranının balistik performansı arttırdığı tespit edilmiştir [3].

Rao ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada, AA7010, AA7009 ve AA2024 yüksek mukavemete sahip alüminyum alaşımlarının kompozit sürtünme aşınma özelliklerine matris alaşımı olarak SiC etkisini değişik basınçlarda ve sabit 3,35 m/s hız ile kuru kayma yöntemiyle incelemiştir. Aşınma direncinin SiC parçacıklar etkisi ile yükseldiği görülmüştür [4].

Özkan (2007), yaptığı çalışmada, Alüminyum tozlarının içerisine ağırlık olarak %5, %10 ve %15 oranında SiC seramik takviyeleri ile kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirmiştir. Takviye malzemesinin boyutu ve oranının artmasıyla üretilmiş olan numunelerin yoğunluklarının arttığını, SiC takviye malzemesinin oranının artması ve tane boyutlarının azalmasıyla gözeneklilik oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde, SiC takviye malzemesinin oranı ve boyutunun artmasıyla sertlik değerlerinde artış görüldüğü tespit edilmiştir [5].

Hasırıcı ve Gül (2010), yaptıkları çalışmada, B₄C partikül takviyesi ile Al matrisli kompozit malzeme üretimini toz metalürjisi ile gerçekleştirerek, ürettiği oldukları numuneleri aşınma davranışlarını ve mekaniksel özelliklerini incelemişlerdir. Sertlik değerlerinin B₄C parçacıkları ile artış gösterdiği, %20 B₄C takviyeye sahip kompozit malzemenin en yüksek sertlik değere sahip olduğu, %10 B₄C takviye oranına sahip kompozit malzemenin ise en yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir [6].

Topçu ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmada, B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemeleri toz metalürjisi yöntemi ile üreterek farklı B₄C oranları ile sinterleme sıcaklığının parçalar üzerinde sertlik, yoğunluk, darbe direnci ve sürtünme değerlerine olan etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde; sinter sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık arttıkça yoğunluk değerlerinin teorik yoğunluğuna yaklaştığı, sertlik değerlerinde ise B₄C oranı ve sinterleme sıcaklığı ile doğru orantılı olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir [7].

Karakoç ve diğ. (2019), yaptıkları çalışmada, Toz metalürjisi yöntemi kullanarak hazırlanan alüminyum alaşımlı (Al7Si0,6Mg0,8TiH₂) sandviç köpük malzemeler ve B₄C, SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit sandviç köpük malzemeler üretilmiştir. Üretilen parçacık takviyeli Al esaslı sandviç köpükler Ramor 500 zırh çeliği ile bir araya getirilerek 7,62x51 mm çelik çekirdek

zırh delici mermiler karşısındaki balistik performansı incelenmiştir. Balistik test sonrası malzeme yüzeyinde meydana gelen hasar mekanizmaları incelenmiştir [8].

Pul ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada, SiC ve B4C takviyeli 7075 kalite alüminyum esaslı kompozitler, toz metalürjisi yöntemi kullanarak, %40, %20 ve %10 takviye oranlarında üretilmiştir. İlk aşamada deneylerde üretilen kompozit numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, üretimi yapılan kompozit numuneler modellenerek sonlu elemanlar methodu ile balistik performansları incelenmiştir [9].

Karabacak ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada, Ağırlıkça %10 B4C ve %5 grafit içeren alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin mikro yapı ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Aşınma testi pin-on-disk cihazı kullanılarak, farklı hızlarda ve farklı kayma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yükün artmasıyla aşınma miktarının arttığı ancak kayma hızının artmasıyla da azaldığı görülmüştür. B4C ve grafit takviyesi aşınma miktarındaki düşüşün temel nedeni olduğu belirtilmiştir [10].

Rahimian ve diğ. (2010), yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile Al_2O_3 partikül takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler üreterek, kompozit malzeme üzerinde Al_2O_3 partikül takviyesinin boyutunun, sinterleme süresi ve sıcaklık gibi farklı parametrelerle birlikte etkilerini incelemişlerdir. Kompozit malzemeye bu şartlarda takviye ilavesinin kompozit mikroyapısına, aşınma direncine, sertliğine olan etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Takviye boyutunun artması ile sertlik dayanım değerlerinde dikkate değer düşmeler gözlemlenmiş, ancak sinterleme sıcaklığı artışı ile sertlik ve dayanım artış göstermiştir [11].

Zhang ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, B4C takviyeli Al matrise sahip kompozit malzemelerin vakum ortamında sıcak pres sinterleme ile imal edilen çeşitli hacim oranlarının etkisidir. Araştırma sonucuna göre B4C takviye oranının artmasıyla Al-B4C kompozit malzemelerin bağıl yoğunluk değerleri azalmış ve % 0.78 gibi minimum görünür gözenekliliğe neden olmuş; Bu da, Al ve B4C ıslanabilirliğe ve kristal yapıların artmasına bağlı olmuştur. Ayrıca B4C parçacıkları ve Al₃BC etkiyi güçlü yaptığından, sertlik ve B4C miktarındaki artışla birlikte büyük ölçüde artış göstermiştir [12].

Candan ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmada, Al-Mg/SiC kompozit malzemelerin %3.5 NaCl çözelti ortamda korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Test sonucuna göre Al-Mg alaşımı SiC takviye malzemeleri arasında oluşan bileşiklerin korozyon dayanımlarını arttırdığını tespit etmişlerdir [13].

Mubiayi ve diğ. (2017), yaptıkları çalışmada, alüminyum ve bakır sürtünme karıştırma kaynaklarında intermetalik bileşik yapıların karakterizasyonu çalışması esnasında oluşan Cu içerikli intermetaliklerin (Al_4Cu_9 , $AlCu_3$, Al_2Cu_3 ve Al_2Cu) sertlik değerlerinde artış olduğunu tespit etmişlerdir [14].

Xiao-min ve diğ. (2012), yaptıkları çalışmada, Al-SiC Kompozitlerin SiC parçacıkları dağılımının ve miktarlarının mekaniksel özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Bu inceleme sonucuna göre SiC miktarının %4' den %12' ye kadar artması sonucu alüminyum matrise sahip kompozit malzemelerin eğme mukavemetini 230 MPa' dan 250 MPa' a arttığı gözlemlenmiştir [15].

Plonka ve diğ. (2015), yaptıkları çalışmada, zırh paketlerinde sürekli olarak kullanılan seramik yapıların arka kısmında bulunan destek plakalar için farklı alaşımlandırmalar yapılarak balistik testler yapılmıştır. Çalışma esnasında seramik malzeme olarak alümina, silisyum karbür, ve bor karbür kullanılmıştır. Destek plakalar ise alüminyum, çinko, silisyum, nikel ve magnezyumdan oluşan alaşım malzemelerdir. 7.62 mm ve 12.7 mm mermiler kullanarak yapılan atışlarda en iyi sonucu alüminyum, silisyum ve nikel alaşımlı malzemelerin ortaya koyduğu tespit edilmiştir [16].

Yalçın ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada, ZA27 matris alaşımının grafen nano levha ile takviyelendirilen nano kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemi kullanarak üretilmiştir. Grafen nano takviye malzemeleri ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranlarda kullanarak kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Kompozit toz karışımları bilyeli mekanik öğütücü kullanarak alaşımlandırma işlemi yapılmıştır. Alaşımlandırma işlemine tabi tutulan toz karışımları 435°C' de 500 MPa basınç uygulayarak sıcak presleme yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan nano kompozit malzemeler içyapı ve korozyon davranışları incelenmiştir [17].

Karabulut ve diğ. (2014), yaptıkları çalışmada, Al+%10 Al₂O₃ kompozit malzemeleri mekanik alaşımlandırma yöntemi kullanarak eğme dayanım özelliklerinin tespit edilmiştir. Al ve Al₂O₃ toz tanecikleri 2, 4, 6, 8 ve 10 saat süre ile mekanik alaşımlandırma işlemi uygulanmıştır. Mekanik öğütme sonrası toz tane boyutlarını ölçmek amacıyla SEM analizi yapılmıştır. Tozlar 700 MPa basınç uygulanarak sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Sıkıştırılan numuneler 600 °C sıcaklıkta 1 saat boyunca sinterlenmiştir. Yapılan test sonucuna göre mekanik alaşımlama süresinin artmasıyla toz boyutlarında ve yoğunluk değerlerinde azalma yaşanırken, sertlik ve eğme değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir [18].

Güven ve diğ. (2012), yaptıkları çalışmada, AA2024 alaşıma sahip levhalara, 510 °C, 520 °C ve 530 °C sıcaklıklarda solüsyona alma işlemi uygulayarak 190 °C' de 4 ve 6 saat boyunca suni yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Numuneler kendi aralarında ve ısıtma işlemi uygulanmamış malzemelere göre karşılaştırma yapılmış ve faz yapılarındaki değişikliklerin mekaniksel özellikleri incelenmiştir. Çökelme sertleşmesi uygulanan malzemelerin Brinell sertlik değerleri ölçülmüş ve çekme testi yapılmıştır. Çözündürme bölgesinde, çözündürme sıcaklığının artması ile birlikte yaşlandırma işlemi sonunda sertlik ve mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. AA2024 alaşım malzemesi için en uygun ısıtma işlem parametresi belirlenmiştir [19].

Varma ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada, AA2024 alaşım malzemesine TiC takviye malzemesi ekleyerek karıştırmalı döküm yöntemiyle MMK üretmişlerdir. Kompozit malzemede takviye oranı %2'lik adımlarla, ağırlıkça %0 ve %6 arasındaki oranlar ile değiştirmişlerdir. Üretilen numuneler ASTM standartlarına göre yoğunluk, çekme ve sertlik testleri uygulamışlardır. Deneysel sonuçlara göre, %6 TiC ilaveli AA2024-TiC malzeme ve döküm yöntemi ile üretilmiş olan AA2024 malzemesi ile alaşımlandırma işlemi sonucu kompozit malzemelerde sertlik değeri %9 ve çekme dayanımı %8 oranında artış gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca takviye oranı arttıkça kompozit malzemelerde süneklilik değerinde azalma olduğu tespit edilmiştir [20].

Muthusamy ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada, takviye oranı %5, %10, %15 ve %20 miktarlarında TiC ve B4C takviyeli AA2024-B4C-TiC kompozit malzemeler üreterek mekanik ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. AA2024 matris malzemesinde B4C ve TiC takviye malzemesi oranları arttıkça kompozit malzemelerin sertlik, nihai mukavemet ve akma mukavemeti artış gösterirken süneklilik değerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte homojen olarak dağılım gösteren takviye elemanları üretilmiş olan kompozit malzemelerin korozyon direncini arttırmıştır [21].

Nazik (2013), yaptığı çalışmada, AA7075 matrise sahip, B4C takviyeli kompozit tozların mekanik alaşımlandıma ve sinterleme işlemi ile üretmiş olduğu kompozit malzemelerin yoğunluk, sertlik ve çekme dayanımlarını incelemiştir. Yapmış olduğu deneylerde ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarına sahip B4C takviyesi ile %3 metanol kullanmıştır. Tozları gezegen tip öğütücüde, 400rpm öğütme hızıyla ve 10 mm çapa sahip tungsten karbür bilyeler ile öğütme işlemi gerçekleştirmiştir. 650 MPa ön presleme işlemi uyguladıktan sonra 550 °C sıcaklıkta ve 500 MPa basınç altında sıcak presleme yöntemi ile üretimi gerçekleştirmiştir. SEM incelemelerinde takviye malzemesinin matris malzeme içerisinde homojen olarak dağıldığını tespit etmiştir. Ağırlık olarak %10 takviye malzemesi içeren ve 1 saatlik mekanik alaşımlama işlemi yapılmış numunelerde 325 MPa çekme mukavemeti elde etmiştir. Ayrıca ağırlık olarak %20 takviye oranına sahip ve 8 saatlik mekanik alaşımlama işlemi uygulanmış kompozit malzemelerde 350 Brinell sertlik değerine ulaşmıştır [22].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Genel Özellikleri

Kompozit malzemeler, şekil ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı, birbiri içerisinde çözünmeyen, iki ya da daha fazla malzemelerin karıştırılması ile oluşan malzemelere kompozit malzeme denir [23]. Başka bir anlamıyla aynı veya farklı yapıdaki malzemelerin özelliklerini bir arada toplamak amacıyla, birbiri içerisinde çözünmeyen iki ya da daha fazla malzemelerin oluşturdukları yapılara denilmektedir [24].

- a) Yoğunluğunun düşük olmasına rağmen yüksek mukavemete sahip olması,
- b) Kendisinin oluşturduğu malzemelerin yük dağılımına sahip olması,
- c) İstenilen özelliğe sahip çeşitli türde üretilebilmesidir.

Matris malzemesine göre kompozit malzemeler;

- 1) Metal matrisli kompozitler
- 2) Polimer matrisli kompozitler
- 3) Seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç farklı yapıda oluşmaktadır.

Takviye elemanının şekline göre ise;

- 1) Tek filament
- 2) Laminant (Katmerli)
- 3) Parçacık
- 4) Kısa ve uzun elyaf (Fiber) kompozit olmak üzere dört gruba ayrılır.

Seramik malzemeler erime sıcaklığı yüksek, yoğunluğu ve termal genleşme düzeyleri düşük, sert ve yalıtkan malzemelerdir. Bunun yanında aşırı gevrek malzemelerdir. Isıl ve kimyasal etkilere karşı dirençli malzemelerdir. Metal malzemeler saf durumda iken dayanımları düşük ve yumuşak malzemelerdir. Ancak alaşımlandırma işleminden sonra istenilen yapıda ve özelliklere sahip malzemeler elde edilmektedir.

3.2. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, gerekli olan ve istenilen özellikleri karşılamak amacıyla en az birinin metal yapıya sahip olması, birbirinden farklı iki ya da daha fazla malzemelerin sistematik bir biçimde birleştirilmesi ile oluşan malzemelerdir. MMK'lerin kullanım alanları, havacılık-uzay araçları uygulama alanları, balistik uygulamalar, spor ekipmanları, gemicilik uygulamaları, otomotiv uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

MMK malzemeler, yüksek mukavemet dayanımı, düşük yoğunluk oranı, mekanik ve ısıl özelliklerinin yüksek olması ve şekillenebilirliğinin yüksek olması sayesinde farklı alanlarda kullanılmaktadır [25].

MMK'lerin ana matrisi daima metal malzemelerden oluşması gerekmektedir. Ana matrisler genellikle saf olarak değil alaşımlı şekilde bulunmaktadır. Ana yapı malzemesi olarak çelik, magnezyum, nikel, alüminyum ve bakır gibi elementler kullanılabilir.

Ana matrisin kompozit malzeme içerisindeki görevi üzerine gelen yük miktarını takviye malzemesine iletmektir. Ana matris olabilmenin ilk şartı takviye malzemesi ile iyi bir bağ yapabilmesi ve takviye malzemesi ile arasında ısıl genleşme değerlerinin birbirine yakın olması gerekmektedir.

3.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları

Takviye malzemesinin, matris malzemesi ile rijitlik, mukavemet, yoğunluk ve uyumluluk bakımından mükemmel bir birleşim oluşturan seramik esaslı malzemeler olarak adlandırılır. Seramik malzemeler; partikül fiber ve visker formda olup, oksit, karbür, borür ve nitrür olarak kullanılabilir [56]. MMK'lerde takviye elemanı olarak Bor Karbür (B₄C), Silisyum karbür (SiC), Titanyum diborür (TiB₂), Alüminyum oksit (Al₂O₃), Titanyum karbür (TiC) ve Magnezyum oksit (MgO) kullanılabilir.

Alümina (Al₂O₃)

Metal matrisli kompozit malzemelerde istenilen özellik belirlenen malzemenin yoğunluğu düşük ve yüksek mukavemete sahip malzemeler üretmektir. İstenilen özellik anamatris içerisinde katılan seramik takviye malzemeleri ile sağlanabilmektedir. Alüminanın kullanılmasının sebebi yüksek sıcaklıklar karşı dayanımın yüksek olması, yüksek modül değeri ve rijit bir yapıya sahip olmasından dolayı alümina malzemesinin kullanılması kaçınılmazdır. Ancak alümina ile silisyum karbür takviye elemanları kıyaslandığında silisyum karbürün dayanımın alüminadan yüksek olmasından dolayı kullanımı silisyum karbüre göre daha azdır. Ancak maliyet konusunda alümina malzemesi silisyum karbüre daha uygun maliyete sahiptir [25].

Silisyum Karbür (SiC)

MMK'larda kullanılan bir diğer takviye elemanı ise silisyum karbürdür. Silisyum karbür malzemeler arasında kovalent bağlar bulunmaktadır. Oluşan bu bağ silisyum karbür malzemeye yüksek elastite modülü sağlamaktadır. 1400°C derece gibi yüksek sıcaklıklarda kullanmaya elverişli malzemelerdir. Bu yüksek sıcaklıklarda kendi özelliğini koruyabilme gibi özelliği bulunmaktadır. Silisyum karbür malzemeler, alümina malzemelerine göre daha düşük termal genleşme özelliğine sahiptirler. Partikül şeklindeki silisyum karbür takviyeleri malzemeleri plastik şekil verme yöntemlerinden ekstrüzyon ve haddeleme gibi işlemleri yapabilmesi gibi olanaklar sağlamaktadır [25].

Bor Karbür (B₄C)

Bor karbür malzemesi elmas'tan sonra en sert malzeme olarak bilinmektedir. Seramik malzemeler içersinde en hafif malzemedir. Bu sebepten ötürü kompozit malzemenin ağırlığını etkilemeden mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Bor karbür malzemesinin en büyük dezavantajı ise, aşırı sert bir yapıya sahip olmasından dolayı kompozit malzemenin ekstrüzyon yapabilmesini zorlaştırmaktadır. Yoğun mikroyapıların üretimi esnasında karşılaşılan problemler, ve gevrek kırılmaya karşı bor karbür, aşırı derecede hassasiyeti bu takviye malzemesinin sahip olduğu sınırlardır [26].

Karbon (C)

Karbon fiber malzemeler, yoğunlu düşük, çekme dayanımlarının ve elastik modülü yüksek olan malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybetmeyen karbon fiberler, üretimi esnasında son sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Karbon fiber malzemelerde ana malzeme olarak poliakronitril, zift ve selüloz kullanılmaktadır. Karbon fiberlerin ısı genleşme katsayıları çok düşük olduğundan 1500 °C' ye kadar kendi özelliklerini koruyabilmektedir. Karbon fiberlerin sürünme sıcaklığı 2000 °C'dir. Bu malzemeler azot atmosferinde kararlı bir yapıya sahip olmalarına rağmen 450°C üzerinde havada artan oranda oksitlenme meydana gelir. Silisyum karbür (SiC) ve Bor karbür (B₄C) kaplı malzemeler karbon fiber malzemelerin oksitlenmesine karşı mukavemetini arttırmaktadır [25].

Titanyum Karbür (TiC)

TiC, çok yüksek sıcaklıklarda kendi mekaniksel özelliklerini muhafaza edebilmektedir. Bu nedenler birçok kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklara sahip uygulamalarında, mukavemet ve sürünme dayanımının yüksek olduğu yerlerde özeliğini koruyabilmektedir. Titanyum karbür (TiC) malzemelerin diğer takviye malzemelerine göre olumsuz yönü ise yoğunluğunun yüksek olmasıdır. Bu dezavantajdan dolayı yaygın kullanımı yoktur. Alüminyum matris malzemesine TiC malzemesi takveye edilmesi ile biyel kolu be piston imal edilmiştir. Bu yöntem ile aşınma direncine karşı malzemeler üretilmiştir [25].

3.2.2. MMK Malzemelerin Uygulama Alanları

Metal matrisli kompozit malzemler, matris alaşımlarından daha pahalıdır. Dolayısıyla yalnızca malzeme özelliklerinin birinci derecede önemli olduğu alanlarda kullanılmaktadır. Bir MMK malzeme türbin motoru maksadıyla kullanılması düşünülüyorsa diğer yüksek sıcaklık gerektiren motor malzemesine göre özellikleri en uygun olaak şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Kompozit performansları geliştirmek için önemli olan parametleri, mukavemet/ağırlık oranı veya

spesifik mukavemettir [29]. MMK'lerin endüstriyel uygulama alanları; Havacılık, Otomotiv uygulamaları ve diğer mühendis uygulamaları aşağıda belirtilmiştir.

Havacılık Uygulamaları

Havacılık uygulamalarında MMK kullanılmıştır. Kullanım alanları Tablo 3.1 'de verilmiştir [30].

Tablo 3.1. Havacılık uygulamaları için kullanılan metal matris uygulamaları [30]

Kompozit	Kullanım Alanı	Avantajları
Al-SiC partikül	Uçak omurga ve iskeleti	Aşınma direnci
Al-karbon fiber	Uçak motorları	Termal kararlılık, Sürtünmeye karşı direnç
Mg-Al ₂ O ₃	Uçak motorları	Termal kararlılık, Sürtünmeye karşı direnç
Al-Ti/Be şerit	Helikopter pervane şaftı	Mukavemet
Ti-Al/karbon fiber	Roket motorları	Termal kararlılık
Ti /Mo fiberler	Ses üstü uçak roketi fırlatıcısı	Yüksek servis sıcaklığı
Al-Ti-V/bor fiber	Türbin kanatları	Yüksek mukavemet, Sürünme direnci
Ti-Al/SiC	Turbo jet motor aksamaları	Yüksek mukavemet, Sürünme direnci

Havacılık uygulamaları üretimi için performans gereksinimleri maliyeti ikinci planda yer almaktadır. Bununla birlikte fonksiyonel maliyet teriminin oluşmasına sebep olmuştur. Uzayda yaşanan olumsuz hava koşulları ve diğer nedenlerden ötürü maliyeti daha yüksek olan seramik takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin kullanılması kaçınılmazdır. Örnek olarak füze yapımı için silisyum karbür (SiC) takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler hafif olmasından ötürü berilyum malzemesi yerine kullanılmaktadır. Bir başka örnek verilecek olursa, sürekli kullanılan titanyum malzemesi ile yaklaşık aynı değerlere sahip alüminyum matrisli silisyum karbür takviyeli malzemeler füze kanatları için kullanılmaktadır. Bu tip kompozit malzeme kullanımı sayesinde daha hafif yapıya sahip uçak aynı miktarda yakıt ile daha fazla mesafe alabilmektedir. Hipersonik uçuşlar esnasında oluşan ısınmalar sebebiyle meydana gelen deformasyonların önüne geçmek amacıyla yüksek sıcaklık direncine sahip kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Uçak gövdelerinin kargo bölümünde kullanılmakta olunan kompozit malzemeler sayesinde uçak ağırlığı %35 oranında azalmaktadır [31]. Ayrıca uçağın elektronik raflarında kullanılan karbon/epoksinin yerini SiC partikül takviyeli alüminyum matris kompozitler almıştır.

Ülkemizde devam eden havacılık ve uzay sanayindeki çalışmalar ve gelişmeler Türk havacılık ve Uzay sanayi A.Ş. öncülüğünde devam etmektedir. Helikopterlerin "Glass Cockpit" uygulamalarıyla ASELSAN'ın bünyesinde yazılım ve seyrüsefer sistemler tasarımları, üretimi ve montajı amacıyla projelere başlanmıştır. Böylelikle ürün hattı oluşturulmuş, ilk başlarda lisans

altında modeller üretilmeye başlanırken, bugün yurt içinde geçerli tasarımlar yapılarak bir üretim hattı oluşturulmuştur [32].

ANKA uçak yapısının %90'lık kısmı karbon epoksi prepreg malzemesinden oluşmuştur. Proje kapsamında birçok firma akredite olarak alt tedarikçi olmuşlardır. Bu durum kompozit malzeme tedariki sağlayan firmalar, başarılı performanslar göstermekte ve uluslararası projelerde alt tedarikçi görevini üstlenmektedir [32].

Otomotiv Uygulamaları

Toyata firması tarafından otomotiv sektöründe ilk defa 1980 yılında kullanılan alüminyum matrisli seramik takviyeli kompozit malzemeler dizel motorların pistonlarında kullanılmıştır. Daha güçlü yapılara ve daha ucuz maliyetlere sahip kompozit malzemelerin kullanımı 2000'li yıllardan sonra başlaması ile partikül yapılar, kılcal kristal yapılar ve kısa fiber yapılar gibi metal matrisli kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmıştır [30]. Alüminyum matrisli kompozitler üreten üreticiler Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2. Alüminyum matris kompozitleri üreten üreticiler

Takviye	Parça	Özellik	Avantajları	Üretici
SiC(p)	Piston	Aşınma direnci, Yüksek mukavemet	Ağırlık azalması	Marietta, Lanxide Dural, Martin
Al ₂ O ₃ (f)	Piston ring kanalı	Aştırma direnci	Daha yüksek çalışma sıcaklığı	Toyota
Al ₂ O ₃ (f)	Piston dişi	Yorulma direnci Sürünme	Al kullanma fırsatı	T&N JPL, Mahle vd.
SiC(p)	Silindir Fren çarkı, gömleği	Aştırma direnci	Ağırlık azalması	Dural. Lanxide
SiC(p)	Kardan mili	Özel dirençlilik	Ağırlık azalması	GKN Dural
SiC(w)	Biyel	Özel dirençlilik, Mukavemet Termal genleşme	Ağırlık azalması	Nissan
Al ₂ O ₃ (f)	Biyel	Özel dirençlilik. Mukavemet Termal genleşme	Ağırlık azalması	Dupont, Chrysler
Al ₂ O ₃ SiO ₂	Silindir gömleği	Aşınma direnci, genleşme	Azalan boyut Artan ömür.	Honda
TiC(p)	Piston, biyel	Aşınma, yorulma	Azalan ağırlık aşınma	Martin Marietta
Al ₂ O ₃	Valf yayı, kam	Aşınma, Mukavemet	Azalan ağırlık aşınma	Lanxide

Toyota ve Ford firmaları fren diski üretiminde Al-Si matrisli SiC partikül takviyeli kompozit kullanmaya başladılar. Bu sayede karşılaşılan biyel başı krank mili açıklık problemleri, seramik takviyeli alüminyum matrisli kompozitin termal genleşmesi çeliğe yakın olduğundan dolayı azaltılmış oldu [33].

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler, otomotiv parçaları, piston, silindir gömlekleri ve biyel kollarının yapımında kullanılmaktadır [34].

Diğer Mühendislik Uygulamaları

Uygun şekilde düşük veya yüksek termal genleşme katsayısına, yüksek ısıl iletkenliğe, düşük maliyete ve yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle seramik takviyeli metal matrisli kompozitler, elektronikte paketleme malzemeleri olarak kullanılan geleneksel paketleme malzemelerinin yerine geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır [33].

3.2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Matris ve takviye malzemelerin farklılık gösterdiği metal matrisli kompozit malzemes, üretimi esnasından birçok farklı üretim yöntemiyle üretilmesi ve farklı üretim yöntemlerinin bulunmasına olanak sağlamıştır. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri katı, sıvı veya buhar fazı olarak üç farklı üretim methodu ile üretilmektedir.

1) Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

- a) Sıvı Metal Emdirme
- b) Sprey Yöntemi
- c) Karıştırmalı döküm
- d) Kompozit Döküm
- e) In-situ Yöntemi
- f) Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi

2) Buhar-Faz Üretim Yöntemleri

- a) Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD)

3) Katı-Faz Üretim Yöntemleri

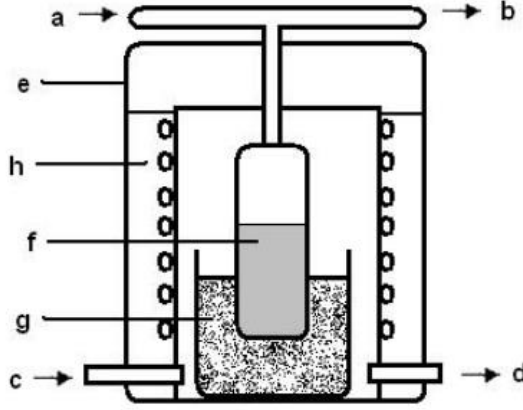
- a) Difüzyonla Bağlama
- b) Toz Metalurjisi (TM)

Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Sıvı Metal Emdirme

Kılçak kristal yapılar ve sürekli elyaf takviyeli Metal Matrisli Kompozit malzemelerin üretiminde bu yöntem sıkça kullanılmaktadır. İstenilen şekilde uygun bağlayıcı ilave edilerek ön şekil verme işlemi hazırlanmaktadır. Hazırlanan elyaf malzemeleri model kalıp içerisine koyulduktan sonra erimiş metal ilave edilir. Sıvı emdirme işlemi yapılarak mastarın ısıtılması sağlanır. Preform malzemesinin mevcut şeklini koruyabilmesi için kullanılan bağlayıcılar yanar ve malzemenin katılaşması için beklenir. Yapılan bu yöntem hem basınçlı, hemde basınçsız şekilde yapılabilmektedir [35].

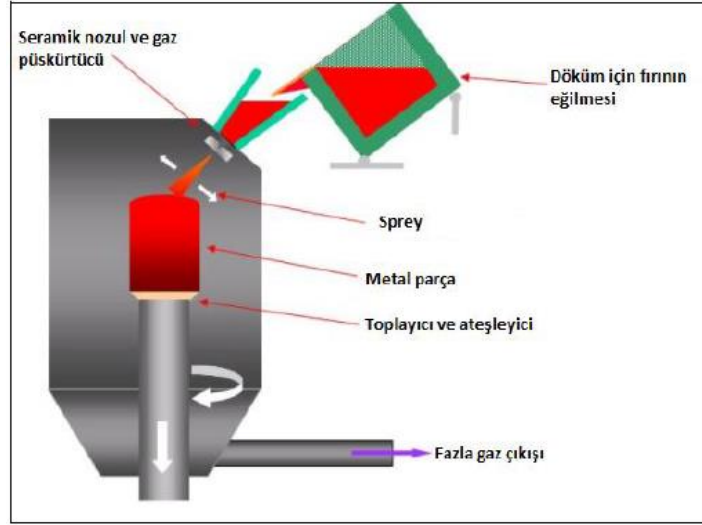
Basınçlı İnfiltrasyon düzeneyi şeması Şekil 3.1’ deki gibidir [35].



Şekil 3.1. Basınçlı İnfiltrasyon Düzeneyi a) Argon gaz girişi b) Argon gaz çıkışı, c) Azot gaz girişi d) Azot gaz çıkışı, e) Kapak, f) Preform, g) Sıvı metal, h) Isıtıcı eleman [35]

Sprey Yöntemi

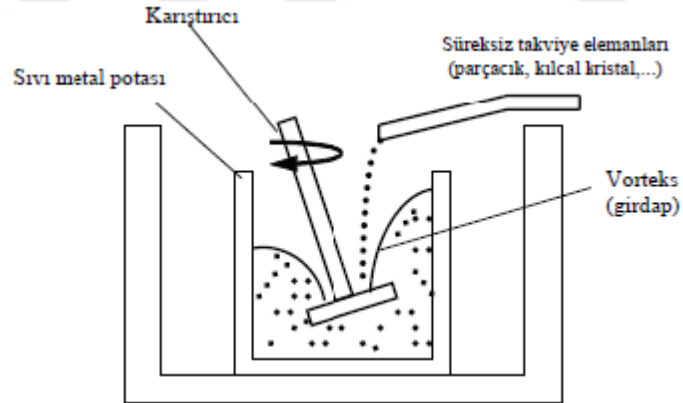
Sprey yöntemi, sıvı metal malzemenin takviye malzemesi ile atlık üzerine püskürtülmesi ile metal malzemenin katılaşmasıyla oluşmaktadır. Küçük parçacıklı seramik tozlarının spreya içersine takviye edilmesiyle parçacık takviyeli MMK’ların üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile seramik takviyeli kompozit malzemenin homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Yöntemin en büyük avantajı ince taneli yapıların üretilmesidir. Dezavantajlarından birisi ise üretilen kompozit malzemenin yoğunluğu matris alaşımının %95 ile %98 arasında olmasıdır. Bundan dolayı dövme yada ekstrüzyon gibi ikinci bir işlem gerekmektedir [36]. Şekil 3.2’ de spreya çökeltme düzeneyinin şematik resmi verilmiştir [36].



Şekil 3.2. Sprey çökeltme deney düzeneği [36]

Karıştırmalı Döküm

Bu yöntem ile sıvı metal ile takviye malzemesinin karıştırılarak katılaşmaya bırakılmasıyla oluşmaktadır. Yöntemler arasında en uygun maliyete sahip malzemelerdir. En basit şekli ise vortex (girdap) şeklindedir. Bu yönteme ait düzenek Şekil 3.3' de verilmektedir.

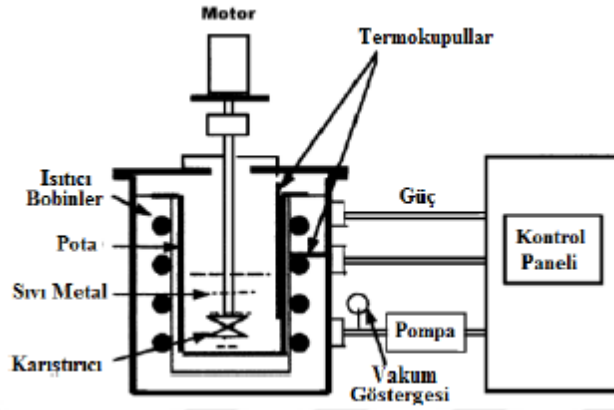


Şekil 3.3. Vortex deney düzeneği

Parçacık takviyeli Metal Matrisli Kompozit malzemelerin karıştırılarak yapılan döküm yönteminde bazı zor durumlar bulunmaktadır. Bunlar;

- Matris malzemesinin seramik takviye malzemesini düşük seviyede ıslatması,
- Erimiş metal malzemesinin uzun süreli temasından dolayı istenmeyen kimyasal reaksiyonlar oluşması,
- Katılma sırasında gaz boşluklarının ortamı terk etmemesi ile malzemenin iç yapısında gözenekler oluşması,

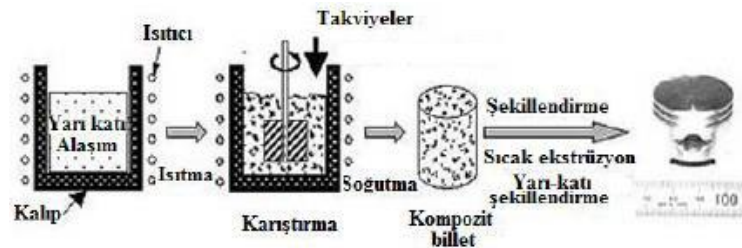
- d) Karışım işlemi esnasında vakum ortamının yapılmamasından dolayı malzemenin iç yapısında inküzyonların oluşması gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Vakum ortamında karıştırılmalı deney düzeneği Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Karıştırılmalı döküm düzeneği ve kullanılan donanımlar

Kompozit Döküm

Kompozit döküm yöntemi iyi bir karıştırma işlemi yapılırken katılaşma fazına giren malzeme içerisine takviye malzemesinin eklenmesi işlemidir. Matris taneciklerinin takviye malzemesini kendi içerisine hapseder ve böylece takviye malzemesi matris malzemesinde ayrılmaz ve kendi içerisinde bölgesel topaklanmanın önüne geçilmiş olur. Böylelikle takviye malzemesinin matris malzeme içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlar. Kompozit malzeme dökümü son derece ekonomik olmasının yanı sıra üretimi gayet kolay olmasından dolayı magnezyum matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanabilmektedir [37,38]. Kompozit döküm yönteminin işlem basamakları Şekil 3.5’ de verilmiştir [37].



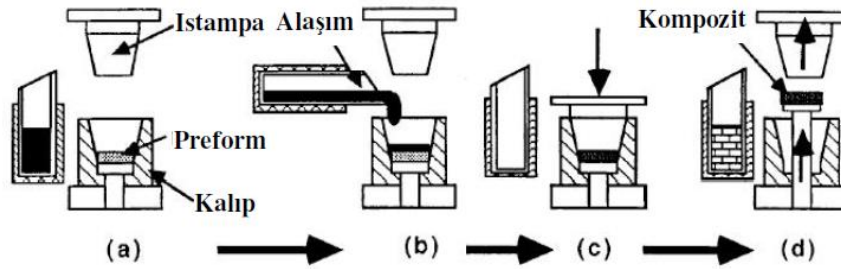
Şekil 3.5. Kompozit döküm işleminin işlem basamakları [37]

In-situ Yöntemi

Dışarıdan takviye parçacıklarının matris malzemesine ilave edilmesiyle üretimi yapılan MMK'ler takviye fazlarının sıvı metal tarafından tam anlamıyla ıslatılmaması sonucu ara yüzeyde problemler çıkabilmektedir. Isıl girdilerin eksik olarak yapılması kimysala reaksiyonların oluşmasına ve buna bağlı olarak gözenek oluşmasına yol açmaktadır. Bu durumu önlemek için takviye malzemelerin sıvıya sonradan ilave etmek yerine sıvı eriyik içerisinde yerinde (in-situ) reaksiyon oluşması sağlanmaktadır [39,40].

Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi

Tüm takviye çeşitleri kullanılarak metal matrisli kompozit üretimi yapılabilen bu yöntem metal malzemenin belirli bir basınç altında karıştırılması işlemi olarak bilinmektedir. Metal kalıba yerleştirilmiş, döküm sıcaklığına ulaşmış ve belirli bir sıcaklığa kadar çıkarılmış takviye malzemesi üzerine döküm işlemi yapılır. Sıvı metal malzeme üzerine yüksek basınç uygulanarak, katılaşma işlemi bitene kadar yük uygulanmaktadır [41]. Sıkıştırılmalı döküm yönteminin işlem basamakları Şekil 3.6' da verilmiştir [42].



Şekil 3.6. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi işlem basamakları [42]

Buhar Faz Üretim Yöntemleri

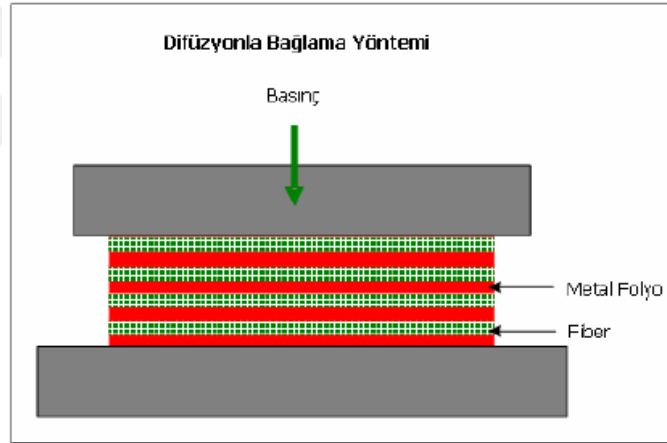
Fiziksel Buhar Çökeltme

Katı fazdaki malzemelerin buharlaştırılmasıyla, ya da sıçratılmasıyla başka bir malzemenin üzerine biriktirilmesi işlemidir. Bu işlemin ilk defa uygulanması, Faraday'ın metal telin vakumlu ortam altında buharlaştırılarak yaptığı kaplama işlemidir [43].

Katı Faz Üretim Yöntemleri

Difüzyonla Bağlama

Difüzyonla bağlama işlemi yüksek sıcaklık ve basınç ortamında yapılmaktadır. Silisyum karbür (SiC), Bor karbür (B₄C) ve Alüminyum oksit (Al₂O₃) gibi tek tabakaya sahip fiberler ile titanyum veya alüminyum matris gibi matris malzemeleri yüksek sıcaklık ve basınç altında birbirine bağlanmasıyla kompozit malzemeler oluşur. Yöntemde matris malzemesinin alaşımları ve fiber haldeki takviye fazına etkili bir difüzyon elde etmek için kimyasal yüzey işlemleri uygulanmaktadır. İstenilen özelliklere sahip belirlenerek fiber malzemenin yönü, aralık ve açılı ölçütleri belirlenerek fiber malzemeler tabakalar üzerine konumlandırılır. Bu yapı matris alaşım malzemesinin ergime sıcaklığına yaklaşık bir sıcaklıkta ısı verilerek difüzyon ile bağlamanın oluşması için presleme işlemi ve haddeleme işlemi yapılır. Şekil 3.7’ de difüzyonla bağlama işlemi verilmiştir [44].

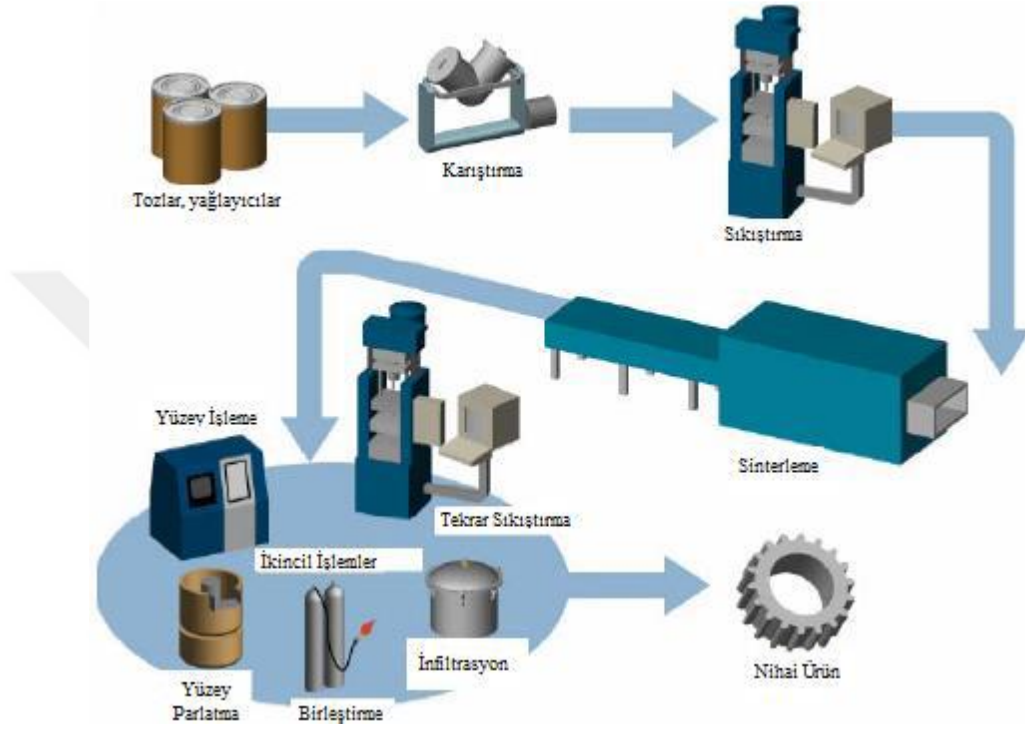


Şekil 3.7. Difüzyonla bağlama yöntemi [44]

Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi yöntemi, çok küçük tanecik boyutlara sahip toz partiküllerinin belirli bir basınç altında preslenmesi ve daha sonra belirli bir sıcaklıkta sinterlenmesi ile şekillendirilmiş malzemelerin üretilmesidir. Toz metalurjisi ile üretim yöntemi işlem basamakları, tozların üretilmesi, tozların homojen olarak karışımının sağlanması, homojenliği sağlanmış tozların belirli bir kalıpta preslenmesi ve atmosfer kontrollü fırında toz partiküllerinin birbiri ile bağlanması ve gerek duyulan süre ve sıcaklıkta sinterleme işlemini kapsamaktadır (Şekil 3.8). Bu yöntemin avantajlı yönleri, sağlam bir yapıya sahip, hassas ve mükemmel performans özellikler gösteren ürünlere dönüştürülmesi ve ekonomik olması gibi birçok özellikleri mevcuttur [45,46].

MMK ve nanokompozit malzemelerin üretiminde toz metalurjisi yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntem sıvı metal malzemelerin ıslatılabilirliğinin zor olmasından dolayı kompozit malzeme üretmek için uygulanan yöntemlerden biridir. Toz halde bulunan matris malzemesi ve parçacık şekline sahip takviye elemanlarını kullanarak metal matrisli kompozit malzemeler elde edilmektedir. Bu yöntemdeki avantajlardan biriside eritme işlemi olmadığı ve istenilen boyuta sahip malzeme üretilmesidir [47].



Şekil 3.8. Toz Metalurjisi yöntemi ile malzeme üretim şeması

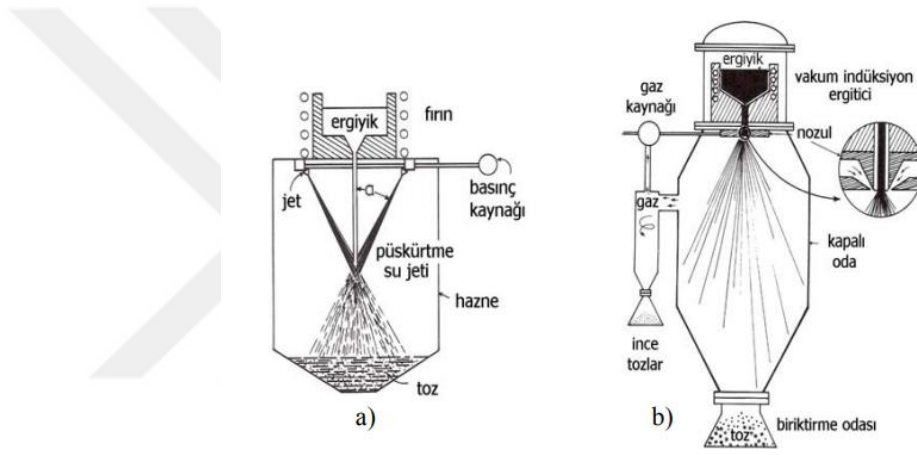
Toz metalurjisi ile üretim yaparken ilk önce toz partiküllerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Bu durumda dikket edilmesi gereken hususlardan bazıları, tozların saflık durumu parçacıkların şekil ve yapısı, parçacıkların boyusal özellikleri ve yüzey yapılarıdır.

Toz partiküllerini üretmek için farklı yöntemler mevcuttur.

Bunlar;:

- Değirmende öğütme işlemi
- Atomizasyon yöntemi,
- Kimyasal yöntemler,
- Elektrolitik ayrıştırma yöntemleri,
- Talaş kaldırma işlemi
- Mekanik yöntemler gibi yöntemlerdir.

Bu yöntemler içerisinde en yaygın kullanılan yöntem atomizasyon yöntemidir. Yöntemde eriyik sıvı metal sprey yardımıyla ani bir soğuma ile toz haline gelir. Atomizasyon işlemi içinde farklı yöntemlerde kullanılmaktadır. Bunlardan biriside su atomizasyonu yöntemidir. Bu yöntemde sıvı metal akarken aniden su püskürtülerek ani soğuma sonucu küçük tozların elde edilmesi işlemidir. Ani soğumaya maruz kalan tozların şekilleri birbirinden farklı ve düzensiz yapıdadır. Yöntemin dezavantajlarından biri ani soğumadan ötürü bazı metal parçalarının oksitlenmesidir. Bunun önüne geçmek için malzemeleri soğutmada su yerine inert gaz püskürtülerek yavaş soğutulması sağlanır. Yavaş soğumaya maruz kaldığı için tozlar yuvarlak şekilli tozlar elde edilir. (Şekil 3.9). Bir diğer yöntemle ise sıvı metal, dairesel hareket eden bir tabla üzerine dökülmesi ile kabın duvarlarına yapışması sonucu tozlar elde edilmektedir [48].



Şekil 3.9. a) Su atomizasyon yönteminin üretim şeması, b) Gaz atomizasyon yönteminin üretim şeması [48]

Metal tozlarının üretilmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise kimyasal indirgeme işlemidir. Bu yöntem ile farklı kimyasal reaksiyonlar içermekle beraber metal elementler toz haline gelmektedir. Yüksek saflığa sahip tozların elde edildiği elektroliz yönteminde elektrik akımı kullanılır ve metallerin çözünmesiyle ince yapıli tozlar elde edilir. Elektirik akımı yardımıyla malzemeler anot bölgesiden katot bölgesine geçiş yapar ve film tabakası üzerine birikir. Biriken toz taneleri yıkanıp temizlenmesinden sonra kurutma işlemine tabi tutularak toz taneleri alınır ve toz üretimi gerçekleşmiş olur [49]. TM’ de kullanılmakta olan parçacık şekilleri Şekil 3.10’da verilmiştir.



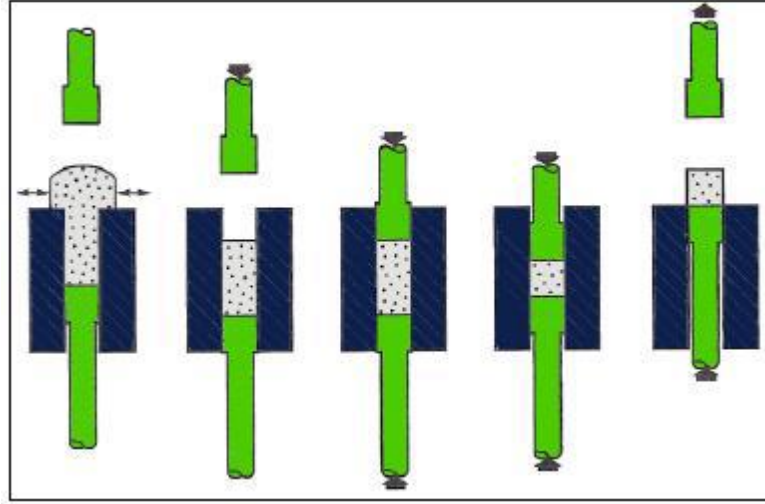
Şekil 3.10. TM kullanılan parçacık şekilleri

Tozların Karıştırılması

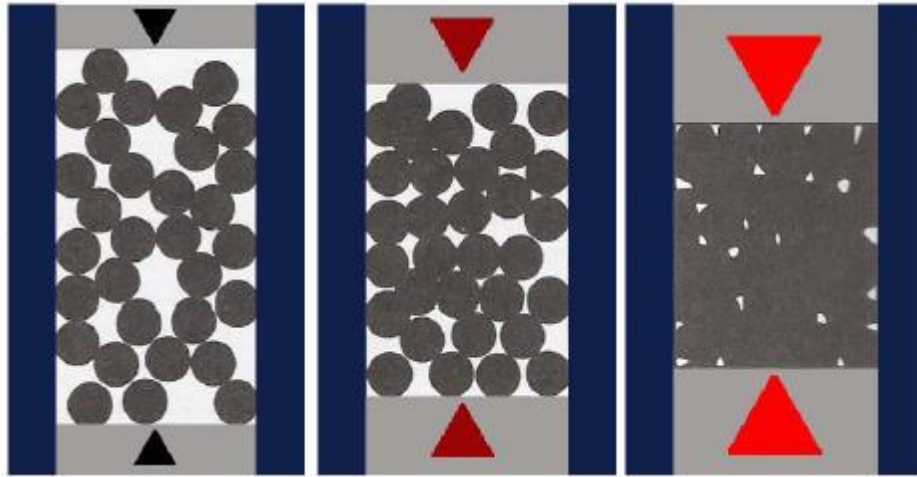
Tek tane boyutlu tozlar elde etmek amacıyla ve sıkıştırma işleminin kolaylaştırılması ve yağlayıcı ilave etmek için karıştırma işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemle toz partikülleri ile yağlayıcılar arasında homojen bir yapı elde edilmiş olur. Yağlayıcılar, tozlar ile kalıp çeperleri arasında oluşan sürtünmeleri azaltmak için kullanılmaktadır [50]. Yağlayıcı ilave edilmesi, toz partiküllerinin kolay şekil alabilmesi ve kalıptan kolayca çıkmasına yardımcı olur. Tozların karıştırması için genellikle bilyeli değirmen kullanılmaktadır. Kullanılacak olan karıştırıcı türü ve karıştırma süreleri karıştırma kalitesini etkilemekle birlikte homojen bir karışım sağlaması için önemli bir işlemdir [51].

Tozların Preslenmesi

Tozların presleme işlemi ile serbest halde bulunan toz partiküllerine istenilen özellikler kazandırılır ve toz tanelerini yoğunluk kazanır. Bu işlemin asıl amacı yoğunluk ve dayanım özelliği kazandırmaktır. Şekil 3.11’ de tek eksene sahip presleme yönteminin işlem basamakları verilmiştir [54]. Toz parçaları kalıba rastgele doldurulduğu için toz parçaları arasında boşluklar meydana gelmektedir. Titrasyon işlemi ile tozlar arasında belirli bir düzen meydana gelir ve bu durum paketlenme olarak adlandırılmaktadır. Bu işlemde sonra kalıp ve presin doğrusal olarak birbirine hareket ederek tozların sıkıştırılması işlemi Şekil 3.12’ deki gibi gerçekleşmektedir [54]. Presin uyguladığı basınç kuvveti arttıkça ilk önce elastik daha sonra plastik şekil değişimine uğrar [52].



Şekil 3.11. Presleme yönteminin işlem basamakları [54]



Şekil 3.12. Toz partiküllerinin presleme esnasındaki görünümü [54]

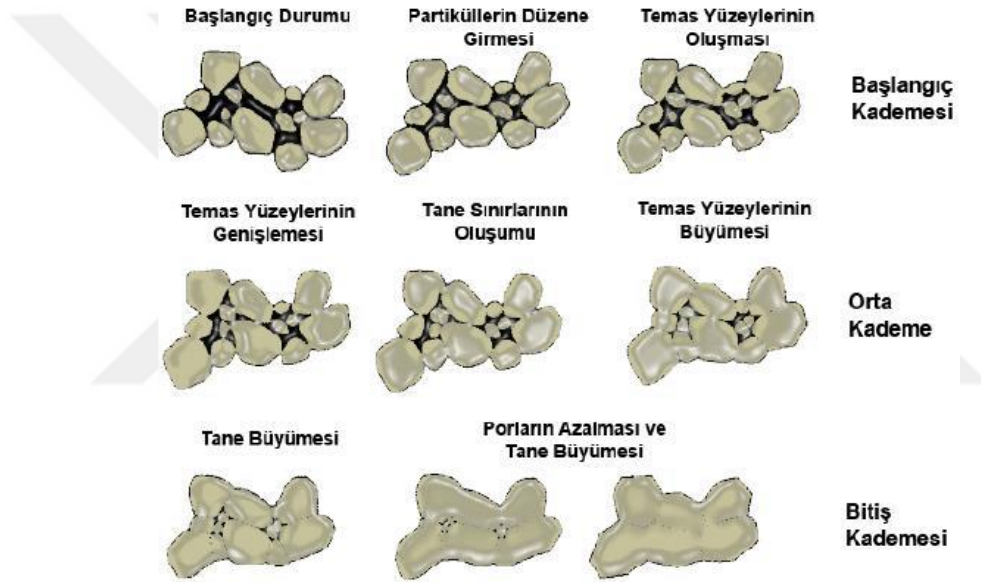
Sinterleme

Sıkıştırma işleminden sonra belirli bir yoğunluğa ulaşmış toz partiküllerinin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtmak ve tozlar arasındaki bağ yapılarının oluşturulması işlemine sinterleme olarak adlandırılır. Sinterleme sıcaklığı malzemelerde, ergime sıcaklığının $1/3'$ ü kadar olarak hesaplanmaktadır. Sinterlemenin asıl amacı malzemede oluşan gözeneklilik oranını azaltmaktır. Presleme işleminden sonra mekanik olarak birbirine bağlanan toz taneleri, sinterleme işleminden sonra ise kimyasal olarak birbirine bağlanırlar. Bu bağ ile tozlar iyi bir mekanik dayanım kazanırlar [53]. Sinterleme işlemi hem atmosfer ortamından korumalı hemde atmosfer

ortamından korumasız olarak iki şekilde yapılabilir. Sinterleme işlemi esnasında malzemede istenen veya istenmeyen değişimler meydana gelmektedir. Bunlar;

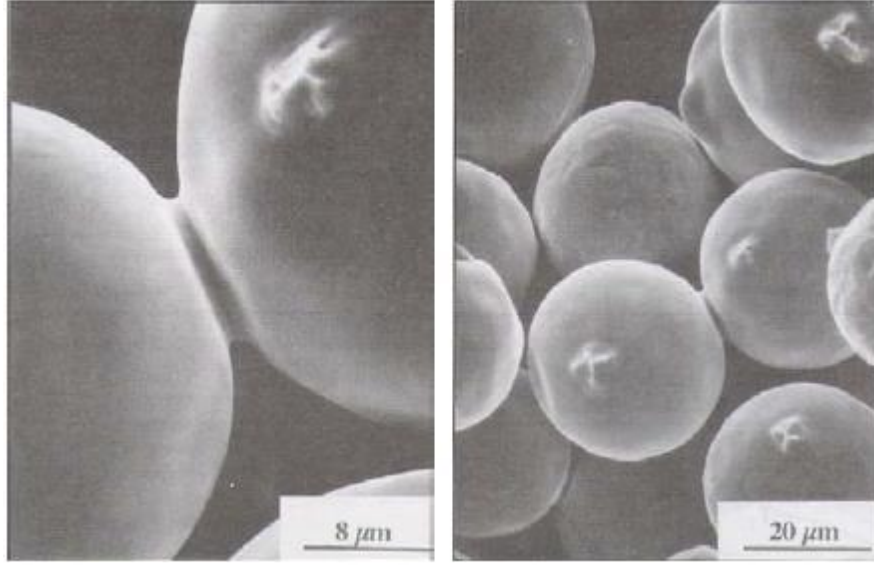
- a) Sertlik ve kırılma tokluğu,
- b) Sıvı ve gaz geçirgenliği,
- c) Tane sınırları ve şekli,
- d) Dayanımı ve elastik modülü,
- e) Ortalama tane sayısı, boyutu ve şekli
- f) Kimyasal bileşimi ve kristal yapısıdır.

Şekil 3.13’ de sinterleme işleminin şematik gösterimi verilmiştir [53].



Şekil 3.13. Sinterleme işleminin şematik gösterimi [53]

Şekil 3.14’ de sinterleme esnasında boyun oluşumunun SEM resimleri verilmiştir [54].



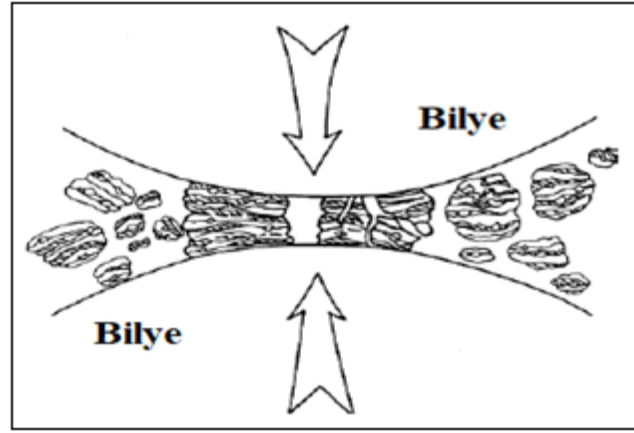
Şekil 3.14. Sinterleme işleminde meydana gelen boyun oluşumu [54]

Mekanik Alaşımlama

Toz metalurjisi yöntemi, döküm işlemi ve plastik şekil verme gibi yöntemler ile üretilmeyen malzemelerin üretimi için kullanılan bir yöntemdir. Toz metalurjisi ile üretim yöntemi son zamanlarda sıkça kullanılmaktadır. Nano malzemeler ile malzeme üretimi gün geçtikçe artmaktadır. Oluşan bu ilgi beraberinde nano teknolojinin hızla gelişmesinin önünü açmakta ve toz metalurjisi ile yeni teknolojik ürünler gelişmektedir. Bu gelişim beraberinde toz metalurjisinde kullanılan mekanik alaşımla yöntemini yaygın bir biçimde kullanmaya yöneltmiştir.

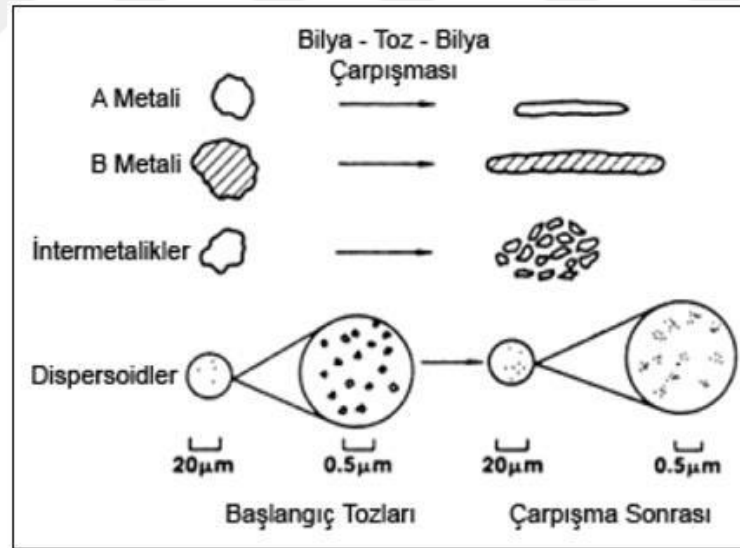
Bu işlemde, bilyelerin değirmen içinde tozları sürekli kırması ve soğuk kaynak işlemini tekrar etmesini sağlayan bir katı fazdır. Yöntemde toz taneciklerinin boyutları küçülmekte ve homojen bir yapı elde edilir [55].

Mekanik alaşımlama işlemi sırasında fiziksel değişim üç aşamada incelenmektedir. Toz taneleri çok yumuşak olmakla beraber topaklanma meydana gelebilir. Bu topaklanma ile başlangıçtaki toz boyutları yaklaşık üç katı kadar büyüyeabilmektedir. Bilyelerin toz taneciklerine çarpması Şekil 3.15’ de verilmiştir [55].



Şekil 3.15. Tozların bilyeler ile çarpışmasının şematik gösterimi [55]

Metal fazlar bilye ve tozların çarpışması ile düz bir hal alır. Tozlar üst üste gelir. Temiz olan yüzeyler birbiri ile temas eder ve soğuk kaynak işlemi oluşur. Böylelikle birbirine kayanayan toz tanecikleri arasında oluşan kırılgen fazlar kapanır ve yapıyla bütünleşir. Mekanik alaşımlama sırasında toz tanelerinde meydana gelen deformasyonlar Şekil 3.16’ da verilmiştir [57].

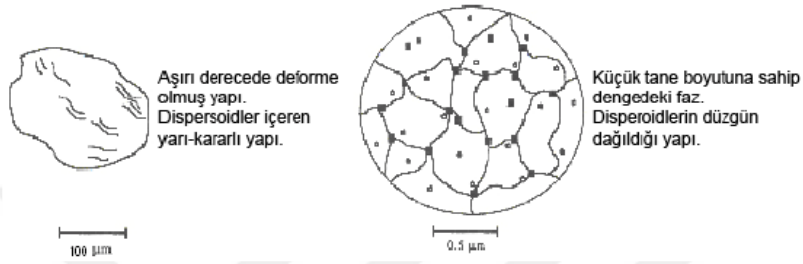


Şekil 3.16. Mekanik alaşımlama esnasında toz taneciklerinde meydana gelen deformasyon [57]

Mekanik alaşımlama işleminde orta kademede sürekli olarak devam eden kırılmalar ve kaynamalar sonucu toz taneleri deformasyon sonucu sertleşmeye maruz kalmış, pekiştiren fazlar süreklilik göstermektedir. Tozlardaki tane küçülmesi, mikro yapıdaki karışımları hızlandırmaktadır. Mekanik alaşımlamada malzemelerin birbirine sürmesi sonucu açığa çıkan ısı

enerjisi matris malzemesinde çözünmelere yol açmaktadır. Bu durum atomik boyutta oluşan difüzyonların artmasıyla yeni fazlar oluşmaktadır [55].

Mekanik alaşımlama sonucunda düzenli bir yapı meydana gelmiş, parçacıkların boyutlarında büyütme etkisine sahip kaynama ve parçacıklar boyutlarında küçülme kırılma mekanizmaları arasında dengeler sağlamaktadır. Sonuç itibariyle boyut farklılıkları olan toz partikülleri birbiriyle karışımı yapılarak homojen yapı elde edilmiş olunur [57]. Şekil 3.17’ de mekanik alaşımlamanın son evresinde meydana gelen yapılar verilmiştir [55].



Şekil 3.17. MA sonucu meydana gelen yapı [55]

Mekanik Alaşımlamanın Avantajları

MA işlemleri, metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi için kullanımı için en uygun yöntemdir. Yöntemin en büyük avantajı partiküllerin topaklanmasını engelleyerek homojenliği sağlamış olur.

Bu yöntemin avantajlarını şu şekilde sıralanmaktadır;

- Mekanik alaşımlama işlemi bir katı hal yöntemi olduğu için üretimi çok zor olan alaşımlar üretilmektedir.
- Yeni malzemelerin tasarlanması için olanak sağlayan yeni bir tekniktir.
- Ergime sıcaklıkları farklı olan malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır.
- Birbiri içerisinde çözünemeyen malzemelerin alaşımlandırma işlemi yapılarak üretilmesi işlemidir.
- Matris içerisinde homojen dağılım sağlamış oksit parçaları dayanım için büyük rol oynamaktadır.
- Nano kristal yapısına sahip malzemelerin üretiminde kullanılan bir yöntemdir.
- Dış etmenlere karşı mükemmel dayanıma sahip malzemeler üretmeyi mümkün kılmaktadır.
- Tamamiyle homojen bir yapı elde edilmesiyle segregasyon problemlerini ortadan kaldırabilmektedir.
- Toz üretmek ve alaşımlandırmak için uygun bir yöntemdir [49].

İşlem Parametreleri

Mekanik alaşımlama işlemi ile nihai ürünlerin özelliklerini etkileyen parametreler mevcuttur. Bu parametreler birbiriyle bağlantılı olup bu parametreler;

- a) Öğütücü türü,
- b) Konulan kabın doluluk miktarı,
- c) Bilye ve toz miktarı,
- d) Öğütme kabı,
- e) Öğütücü malzemenin cinsi ve türü
- f) Öğütme işleminin sıcaklığı,
- g) Öğütme işleminin hızı,
- h) Öğütme işleminin süresi,
- i) İşlem kimyasallarıdır.

Öğütme işlemi sırasında öğütücüler bulunduğu kabın çeperine çarparak kopmalar, kırılmalar ve çatlaklar meydana gelebilme ihtimalinden dolayı öğütücü hazne türü oldukça önemlidir. Kırılan ve kopan hazne parçaları karışımın kimyasal analizini etkileyerek kirlenmelere neden olabilmektedir. Bu tür problemlerin önüne geçmek için yüksek dayanıma sahip hazne seçimi yapmak gerekmektedir [58].

Alaşımla işleminde kullanılan bilye-toz miktarı oranı değişken parametrelerden oluşmaktadır. Bu değer 1:1 ile 1:200 arasında değişkenlik göstermektedir. Homojen bir yapı elde etmek için bilye-toz oranı, gereken süreyi etkileyebilmektedir. Ayrıca bilye ve toz miktarının artması homojen bir yapı için gereken süreyi kısaltmaktadır [58].

Öğütme işleminde, öğütme işleminin yapıldığı kapda bilye ve toz parçalarının rahat hareket edebilmesi ve kab içerisindeki bilye ve öğütücülerin kab miktarının %50'sini geçmemesi gerekmektedir. Önemli değişkenlerden birisi ise öğütme işleminin yapıldığı atmosferdir. Öğütme işlemi vakumlu yada argon gazı gibi inert gazlar içerisinde yapılması korozyonun ve oksitlenmenin önüne geçilmiş olunur.

Kristal tanecik boyutu, öğütme süreleri ile ilişkili olup, öğütme süreleri önemli parametreler arasında gösterilmektedir. Bu işlem ile toz taneleri plastik deformasyona uğrarken, tozlar arasında soğuk kaynaklama işlemi oluşur. Bu tozlar aglomera'ya dönüşebilmektedir. Oluşumu engellemek amacıyla işlem kimyasalları ilave edilebilmektedir [58].

Mekanik alaşımlamada, farklı toz kapasitesi, değirmenin öğütme üzerine etkisi, ısıtma ve soğutma işlemleri gibi birçok ayarlanabilir parametreleri mevcut olan planeter (düzlemsel) tip, speks ve artritör tipi değirmen çeşitleri mevcuttur [58].

3.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM), bir bölgeden başka bir bölgeye düzenli şekilde ve sürekli olarak değişen heterojen özel mikro yapılar olarak adlandırılmaktadır. FDM'ler farklı malzemelerden oluşup, bazıları ana malzemelerinden farklı oldukları için benzersizlerdir. FDM'ler havacılık, uçak ve uzay sanayi olmak üzere birçok alanlarda kullanılmaktadır. FDM'ler çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. FDM'ler ana malzeme maliyeti, malzeme üretiminde kullanılacak işlem türü ve üretim yöntemleri sebebiyle bu malzemelerin bazılarının üretim maliyeti çok yüksektir.

3.3.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Özellikleri

FDM bileşenleri, endüstride kullanılmak üzere imal edilen özel yapıların karakteristik özelliklerini iyileştirmeye yönelik farklı ve faydalı yapılardır. Bu sebepten ötürü süregelmış kompozit malzelerin yerine daha etkili bir sonuç ortaya çıkaran malzeme türleri olarak da bilinmektedir. FDM'lerin diğer kompozit malzemelere göre avantajları aşağıdaki gibidir [27].

- 1) FDM'ler birbirinden farklı malzemedan üretilmiş olup, farklı malzemeleri birbirine birleştirme özelliğine sahip bir ara yüzey tabakasına sahiptir. Bu durum bağ yapma özelliklerini büyük ölçüde arttırmaktadır.
- 2) FDM kaplamaları ısıl gerilimleri azaltmada kullanılmaktadır.
- 3) FDM kaplamaları bağ mukavemetlerini arttırmakta ve çatlakların yayılma kuvvetini azaltmaktadır.

3.3.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemenin (FDM) Uygulama Alanları

FDM'ler çoğu girişimde büyük önem kazanmıştır. FDM'ler birçok sektörde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bunlar; uzay ve havacılık sanayisi, biyomedikal ürünler, savunma sanayisi, enerji üretim sektörü ve denizcilik sektörleri gibi gelişmiş endüstrilerde kullanılmaktadır.

3.4. Hibrit Nano Kompozit Malzemeler

Hibrit malzeme ifadesi, farklı tür malzemelerin birbiri ile karıştırılması olarak adlandırılmaktadır. Yamamoto ve arkadaşları tarafından hibrit malzemeler, organik ve inorganik hibrit malzemelerdeki polimer ve sional moleküller aasındali kovalent bağ gibi, her malzeme arasında oluşan yeni elektron orbitalleri tarafından oluşturan yeni özelliklere sahip iki yada daha fazla malzemenin karıştırılması olarak adlandırılmaktadır [28]. Hibrit kompozit malzemelerin sınıflandırılması aşağıdaki gibidir;

- 1) Kompozitler; ana matris ve mikron boyutunda takviye elemanlarının dağılması ile oluşan malzemelerdir.
- 2) Nano kompozit malzemeler; kompozit malzemelere benzerlik gösterir. Tek fark takviye elemanları mikron boyutunun altında oluşurlar.
- 3) Hibrit malzemeler; Farklı türe sahip malzemelerin mikron altında oluşan malzemelerdir.
- 4) Nano hibrit malzemeler; Farklı türdeki malzemeler arasında oluşan kimyasal bağlara sahip farklı malzemelerin molekül düzeyde olması ile oluşan malzemelerdir.

Bir mikrometreden daha az ölçeklerde olan nanokompozitler, makroskopik kompozit malzemelere kıyasla mükemmel özelliklere sahiptir. Mikroyapıları ve tane sınır etkileri nanokompozitlerin mükemmel özelliğe sahip olduğunun kanıtıdır. Hibrit kompoziti malzemeler üretilirken uyumlu lif malzemesinin seçimi ve büyümesinde barındırdığı genel özelliklerin derecesi çok önemlidir.

4. BALİSTİK

Balistik kelime anlamıyla, merminin ateşlenerek, çekirdeğin namlu ucundan çıkarak hedef bölgesine kadar olan hareketini ve hedef bölgesinde oluşturduğu deformasyonu incelen bilim dalı olarak adlandırılmaktadır [59,60].

Balistik, merminin namlu içine konumlandırılmasında, hedef noktaya ulaşmasına kadar içerisinde bulunduğu ortama göre adlandırılmaktadır. Bunlar;

1. İç balistik,
2. Dış balistik,
3. Hedef balistiği (nufuziyet balistiği)'dir.

4.1. İç Balistik

İç balistik, merminin ateşlenmesiyle merminin çekirdek kısmının namluyu terk etmesine kadar olan ve bu hareketlere etki eden faktörleri incelemektedir. Silahtan mermi çekirdeğine maksimum gaz basıncı ile mümkün olan en yüksek hız verilmesi istenmektedir. İlk hızlanma, ateşlemenin başlamasıyla mermi içerisinde oluşan gaz basıncının artması sonucu bir miktar hız kazanarak hareket etmesine denilmektedir. Çekirdek namluyu terk edene kadar ilk kıza birçok faktör etki etmektedir [59].

4.2. Dış Balistik

Dış balistik, mermi çekirdeğinin namludan çıktıktan sonra hedef noktaya ulaşmaya kadar olan hareketleri ve bu hareketleri etkileyen faktörleri incelemektedir. Merminin namludan çıktıktan sonra hedef noktaya kadar takip ettiği düzleme mermi yolu denilmektedir. Namlunun ağız kısmından çıkan mermileri üç kuvvet ile hareketini devam ettirir.

Bunlar;

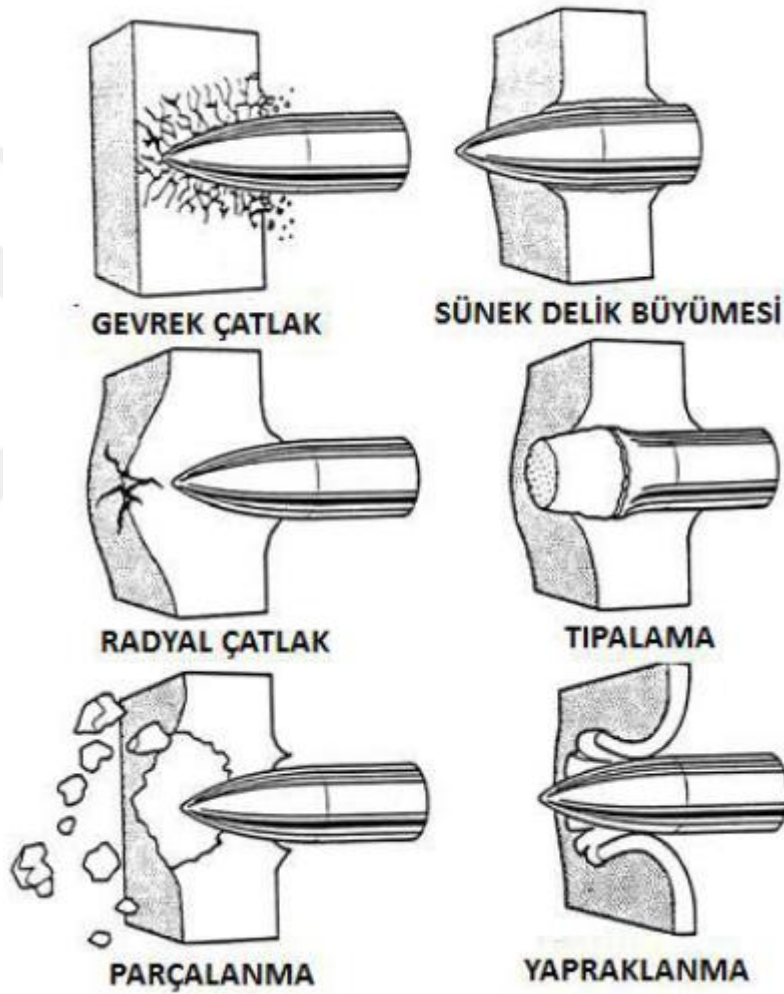
1. Barutta bulunan gazın itme kuvvetiyle mermiye vermiş olduğu ilk hız,
2. Merminin kendi kütlesi ile çekirdeği aşağı yöne doğru düşürmeye çalışan yerçekimi kuvveti,
3. Merminin ilerleme yönüne ters hareket eden hava direncidir. Mermi hızı hava direncinden dolayı namlu ağzından uzaklaştıkça azalmaktadır [61].

4.3. Hedef (Nufuziyet) Balistiği

Mermi çekirdeğinin hedef noktadaki temas ettiği noktadan merminin durma noktasına kadar hedef üzerindeki delme gücü, enerjisini hedef noktaya iletmek gibi etkileri incelemektedir. Nufuzi

balistik denilince ilk akla hedef noktanın imhası gelmektedir. Mermi çekirdeğinin hedef noktada meydana getirdiği deformasyona hedef balistiği denilmektedir [62].

Muhtemel kırılma mekanizmaları hedef noktası ile mermi arasındaki etkileşme sonucunda oluşabilecek mekanizmalar Şekil 4.1’ de verilmiştir. İnce kalınlığa sahip zırh malzemelerinde mermi hedefi delip geçer. Bu durumda hedef noktasının mermi üzerindeki etkileri incelenmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre hedef noktasının mermi üzerindeki deformasyonları iyi tanımlanırsa, gerçek bir zırh malzemesi yapımı için çok büyük avantajlar sağlamaktadır [62].



Şekil 4.1. Farklı darbelerde olası kırılma şekilleri [62]

Yapılan çalışmamızda takviye malzemesi olarak kullanmış olduğumuz Al_2O_3 ve SiC aşınmaya karşı dirençli ve sert malzemelerdir. Seramik ve kompozit malzemeler son yıllarda zırh malzemesi olarak kullanılması yaygınlaşmıştır. Ana matris malzemesi olarak kullanmış olduğumuz AA2024 malzemesi yüksek mukavemet değerine sahip olması , düşük yoğunluk ve yüksek gerilmelere karşı dayanıklı olmasından dolayı zırh malzemesi yapımlarında sıkça kullanılmaktadır.

Zırh malzemelerinin seçimlerinde ve tasarımlarında sadece koruma değil aynı zamanda hafif olması istenilen özellikler arasında yer almaktadır. Zırh malzemeleri seçilirken maliyet, kullanım alanı, balistik performans gibi parametreler etkin rol oynamaktadır. Al_2O_3 ve SiC gibi aşınma direnci yüksek malzemeler ile alüminyum alaşımlarının oluşturduğu kompozit zırh malzemeler homojen bir yapı elde edildiği takdirde istenilen değerlere sahip mükemmel bir zırh malzemesi oluşturmaktadırlar.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme Türleri

Bu çalışmamızda, kullanılan matris malzemesi düzensiz şekle sahip ve toz boyutları 63 µm olan AA2024 (2.78 g/cm³) tozları kullanılmıştır. Tablo 5.1’de AA2024 matris alaşım malzemesinin kimyasal analiz sonuçları verilmiştir. Seramik takviye malzemesi olarak Al₂O₃ ve SiC toz partikülleri kullanılmıştır. Kullanılan Al₂O₃ ve SiC takviye malzemelerinin partikül boyutları 63 µm’dir

Tablo 5.1. AA2024 matris alaşım malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağı.)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
3.8-4,9	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.5	0.25	0.1	0.15	Kalan

5.2. Malzeme Karışım Oranları

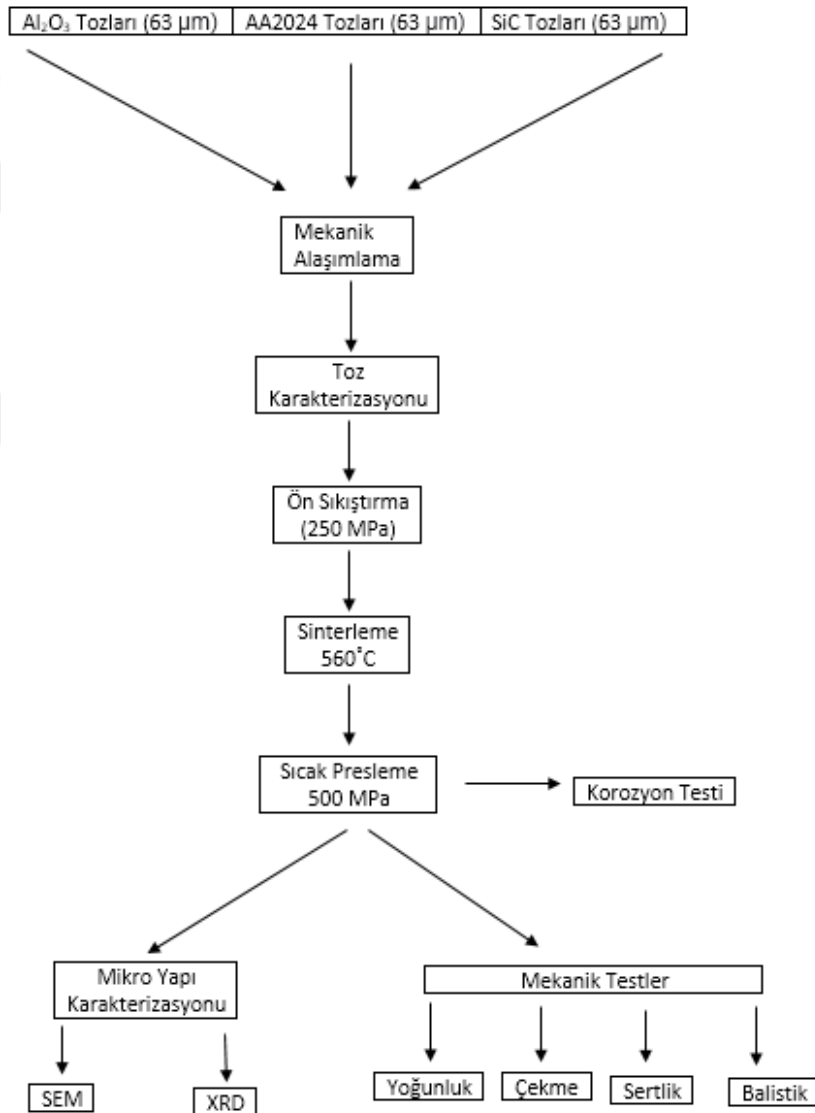
Bu çalışma için kullanılan toz miktarları kompozit malzemelerin ve hibrit kompozit malzemelerin bileşim miktarları ve tüm numunelerin adlandırılması Tablo 5.2 ‘de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kompozit malzemelerin bileşimleri ve adlandırılmaları

Numune Kodu	Takviye Malzemesi	Takviye Oranı (%ağı.)
AA2024	-	0
A _{0.5}	Al ₂ O ₃	0.5
A _{1.0}		1.0
A _{2.0}		2.0
A _{3.0}		3.0
A _{5.0}		5.0
S _{0.5}	SiC	0.5
S _{1.0}		1.0
S _{2.0}		2.0
S _{3.0}		3.0
S _{5.0}		5.0
H _{0.5}	Al ₂ O ₃ - SiC	0.5
H _{1.0}		1.0
H _{2.0}		2.0
H _{3.0}		3.0
H _{5.0}		5.0

Çalışmaya başlamadan önce toz kompozisyonları ve malzemelerin tasarımı yapılmıştır. AA2024 matris malzemesi içerisine, takviye malzemesi olarak Al_2O_3 , SiC ve Al_2O_3 -SiC takviye malzemeleri ağırlık olarak % 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 ve 5.0 oranında eklenmiş ve üretimi yapılmıştır.

AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC kompozit malzemeler ve AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit kompozit malzemeler ağırlıkça % 0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 ve 5.0 oranlarında takviye malzemesi ilave edilerek 15 farklı kompozit malzeme üretilerek Tablo 5.2' deki gibi kodlama işlemi yapılmıştır. Hibrit nano kompozit malzeme üretiminde takviye malzemeleri olarak Al_2O_3 ve SiC aynı miktarda yani %50 oranında Al_2O_3 , %50 oranında SiC malzemeler eklenmiştir. Üretilmesi planlanan numunelerin iş akış şeması Şekil 5.1' de belirtilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmanın iş akış şeması

5.3. Mekanik Alaşımlama

Bu çalışma için toz karışımları için gezegen tip bilyeli öğütücü (Retsch PM100)'de 400dv/dk devir hızında ve 4 saat boyunca mekanik alaşımlama yapılmıştır (Şekil 5.2). Öğütme işlemi tungsten karbür değirmen ve bilyeler kullanılarak yapılmıştır. Mekanik öğütme cihazının hacmi 125 ml, bilye ebatı ise 10mm ölçülerine sahiptir. Hazneye katılan toz miktarı 60 gr ve bilye:toz ağırlık oranı 10:1 miktarındadır. AA2024 matris malzemesi içerisinde Al_2O_3 ve SiC takviye elemanların homojen olarak dağılması hedeflenmiştir.



Şekil 5.2. Mekanik öğütme cihazı

5.4. Presleme

Üretilen toz karışım malzemeleri 250 MPa basınçta ön presleme yöntemi ile üretilmiştir. Bu işlemden sonra 500 MPa basınç altında ve 560°C 'de 120 dakika boyunca sıcak presleme yöntemi ile numuneler üretilmiştir. Sıcak presleme cihazı Şekil 5.3' de verilmiştir.



Şekil 5.3. Sıcak presleme cihazı

5.5. Metalografik İşlemler

Üretilen kompozit ve hibrit kompozit malzemeler içyapı incelemek amacıyla hazır hale getirilmiştir. İlk olarak otomatik kesme makinası (a) ile numuneler yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde kesilmiştir. Kesim işlemi yapılan numuneler pürüzsüz bir yüzey elde etmek amacıyla bakalite alma (b) işlemi uygulanmıştır. Bakalite alınan numuneler otomatik yüzey zımparalama ve parlatma (c) işlemleri yapılmıştır. Zımparalama işleminde 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 numaraya sahip zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Yüzey zımparalama işlemi biten numuneler 0,5 µm ve 3 µm boyutları içeren parlatma sıvıları ile parlatılmıştır. Parlatma işleminde ise Eposil F parlatma sıvısı kullanarak yüzey parlatma işlemi yapılmıştır. Son olarak dağlama çözeltisi için Keller ayıracı (2ml HF + 3ml HCl + 5ml HNO₃ + 190ml saf su) çözeltisi kullanarak yüzey dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. (Şekil 5.4.)



(a) Kesme Cihazı



(b) Bakalit Cihazı



(c) Otomatik Zımparalama ve Parlatma Cihazı

Şekil 5.4. (a) Kesme cihazı (b) Bakalit cihazı (c) Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı

AA2024/Al₂O₃ ve AA2024/SiC nano takviyeli kompozit malzemeler ile AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozit malzemelerin mikro yapı incelemeleri ZEISS marka LS 10 (Şekil 5.5) model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Takviye malzemelerin, matris malzemesi

içerisindeki dağılımları, gözenek boyutu ve dağılımları taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla detaylı şekilde yapılmıştır. Aynı cihaz yardımıyla EDS analizleri de haritalama methodu ile matris malzemesi ve takviye malzemeleri dağılımları incelenmiştir. Bunların yanı sıra taramalı elektron mikroskobunda (SEM) korozyon testi sonrası yüzey görüntüleri ve korozyonun türü araştırılmıştır.



Şekil 5.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/ SiC kompozit malzemeler ve AA2024/SiC- Al_2O_3 hibrit nano kompozit malzemelerin XRD ışınları ile analizi yapılarak sinterleme işlemi sonrasında numunelerde oluşan faz yapıların tanımı yapılmıştır. Bu araştırmalar ise PANalytical marka XRD cihazında (Şekil 5.6) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6. XRD analiz cihazı

5.6. Mekanik ve Fiziksel Testler

Üretimi yapılan numunelerin mekaniksel ve fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla farklı mekaniksel test yöntemleri uygulanmıştır. Bu mekanik testler; yoğunluk ve gözeneklilik tayini, çekme mukavemet testleri ve sertlik testleridir.

5.6.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik Tayini

Üretimi yapılan kompozit malzemelerin yoğunluk hesapları karışım kuralına göre hesaplanmış, deneysel yoğunluklarının hesabı ise geometrik şekline göre ve piknometre ile ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda deneysel yoğunluklarının teorik yoğunluklara bölünmesi sonucu bağıl yoğunluk değerlerini vermiştir.

$$\delta t = [(\%W)_1 * \delta_1] + [(\%W)_2 * \delta_2] + \dots + [(\%W)_n * \delta_n]$$

Burada;

δt : Kompozit malzemelerin teorik yoğunluğu

$(\%W)_n$: Her bir takviye malzemesi için karışım içindeki ağırlık olarak yüzdesi

δn : Her bir takviye malzemesinin yoğunluğu

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

Burada; δd : Deneysel yoğunluk

$$\% \text{Gözenek} = \left(1 - \frac{\text{Deneysel Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}}\right) \times 100 \text{ Formülü ile bulunur.}$$

5.6.2. Çekme Mukavemeti Testleri

Çekme mukavemet testleri MTS 45 (Şekil 5.7) model çekme test cihazında ile 0.3 mm/sn çekme hızında yapılmıştır. Yapılan test sonuçları değerlerinin ortalaması sonuç olarak yazılmıştır.



Şekil 5.7. MTS 45 model universal tip çekme cihazı

5.6.3. Sertlik Testleri

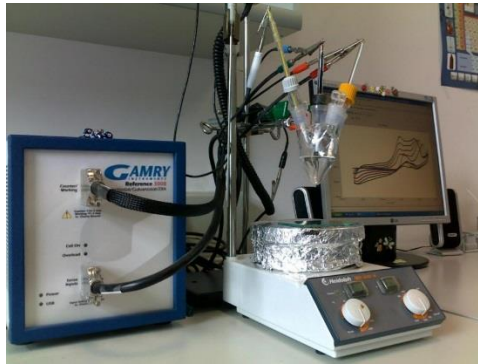
Üretimi yapılan kompozit malzemeler Innovatest Nemesis 9000 (Şekil 5.8) sertlik ölçüm test cihazında, Brinell sertlik ölçüm metodu ile ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçüm 2.5mm çapına sahip batıcı uç yardımıyla, 31.25 kgf yük ile 10 saniye boyunca otomatik olarak yapılmıştır.



Şekil 5.8. Innovatest Nemesis 9000 model sertlik cihazı

5.6.4. Korozyon Testleri

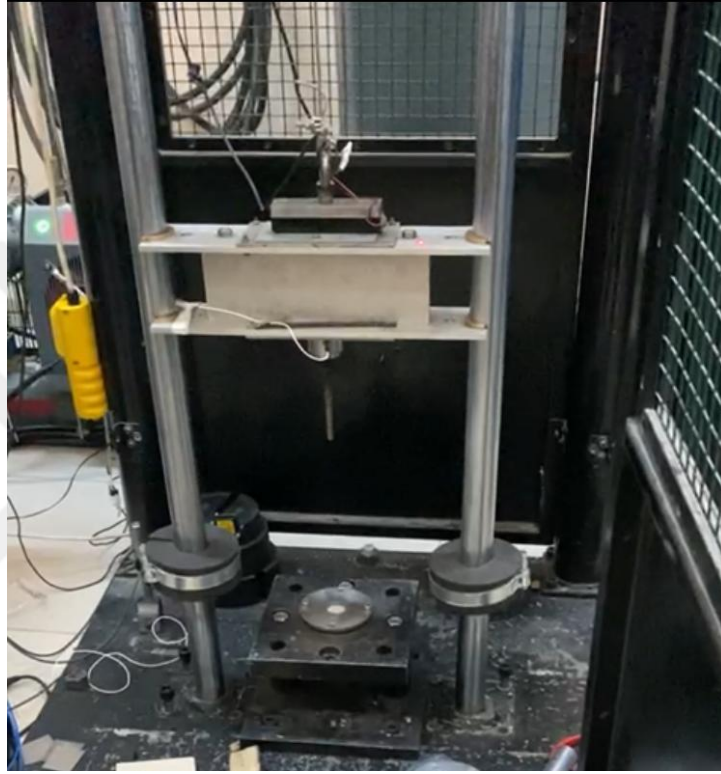
Kompozit ve hibrit kompozit malzemelerin korozyon davranışlarını incelemek amacıyla potansiyodinamik polarizasyon testi uygulanmıştır (Şekil 5.9). Elektrolitik çözeltisi için %3.5 NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Numuneler korozyon testi öncesi metanol ile yıkandıktan sonra kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri -500 mV potansiyel ile başlayarak ölçümlere 1 mV/s tarama hızında +500 mV anodik potansiyele kadar devam edilerek işlem sonlandırılmıştır. Korozyon davranışı akımın yoğunluğuna ve korozyonun potansiyeline göre değerlendirilmiştir.



Şekil 5.9. Gamry marka korozyon test cihazı

5.6.5. Balistik Testler

Bu test yönteminde numune üzerine 6.5 kg'lık yük ile 9 mm çapa sahip balistik uç 30 cm yükseklikten serbest düşme yaparak nano kompozit malzemelerin yüzeyine çarptırılmıştır. Çarpma anında 18 joule' lik enerjiye sahiptir. Çarpma sonucu kompozit malzemelerde meydana gelen hasarlar kontrol edilmiştir (Şekil 5.10).



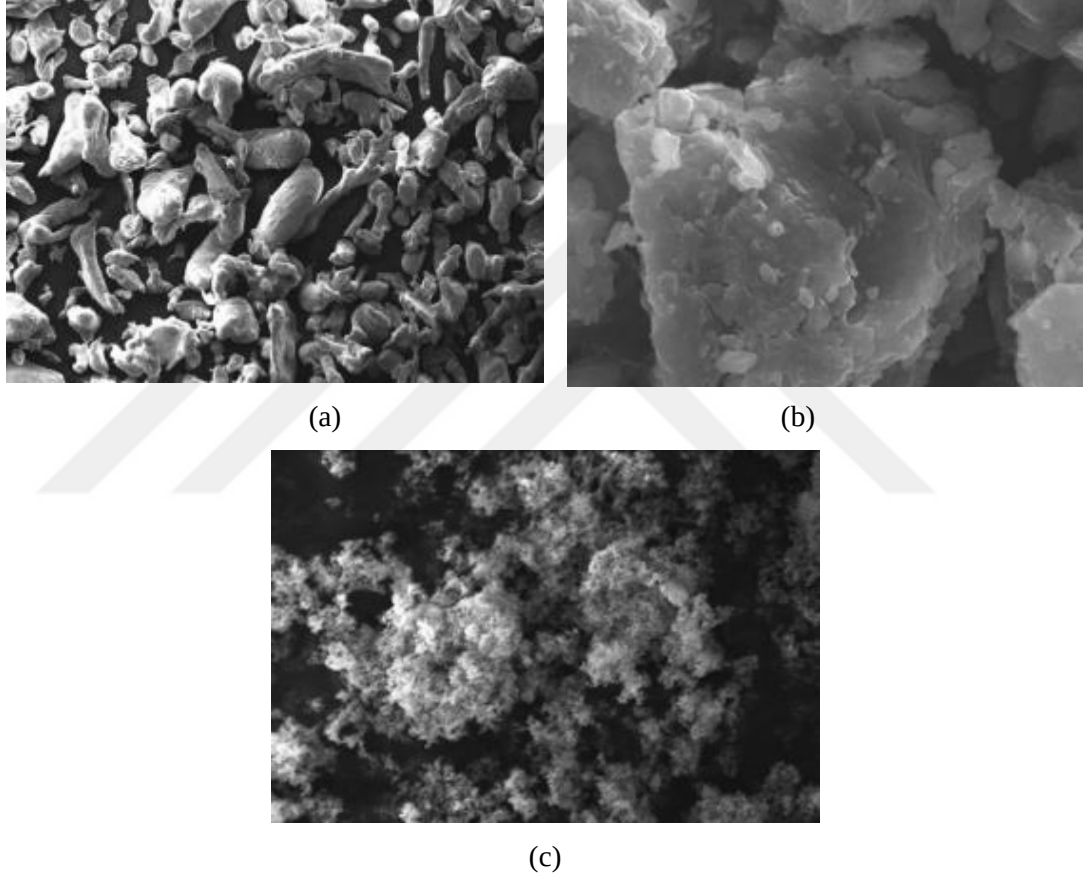
Şekil 5.10. Balistik test düzeneği

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Toz Karakterizasyonu

6.1.1. Toz Morfolojisi

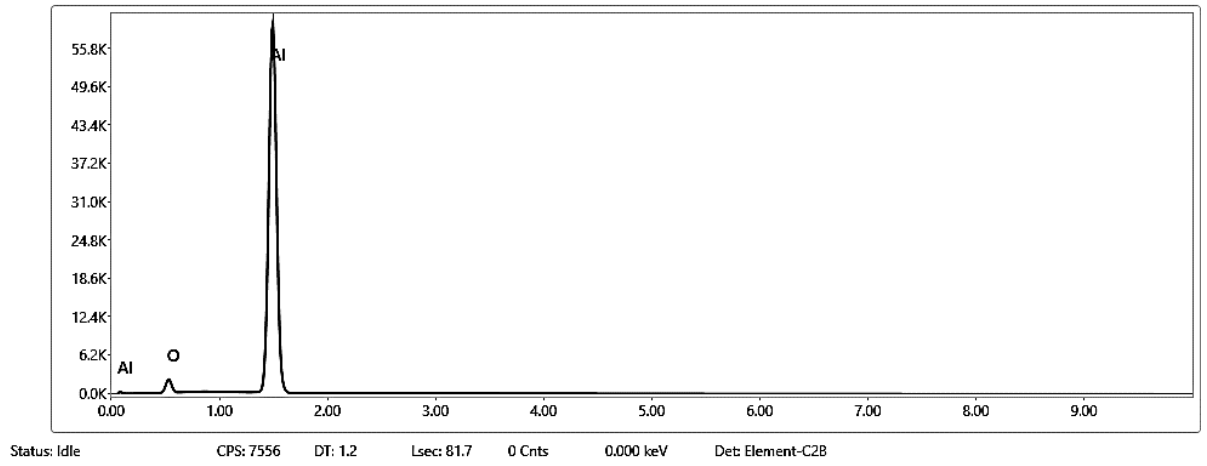
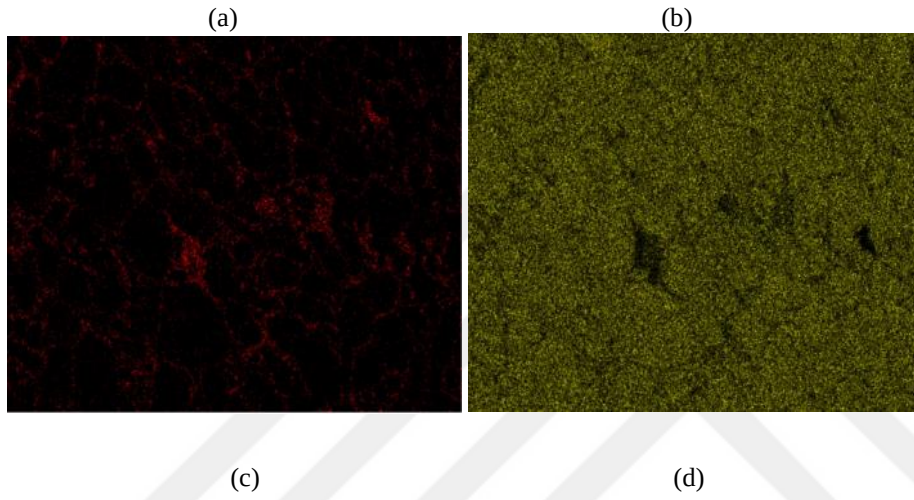
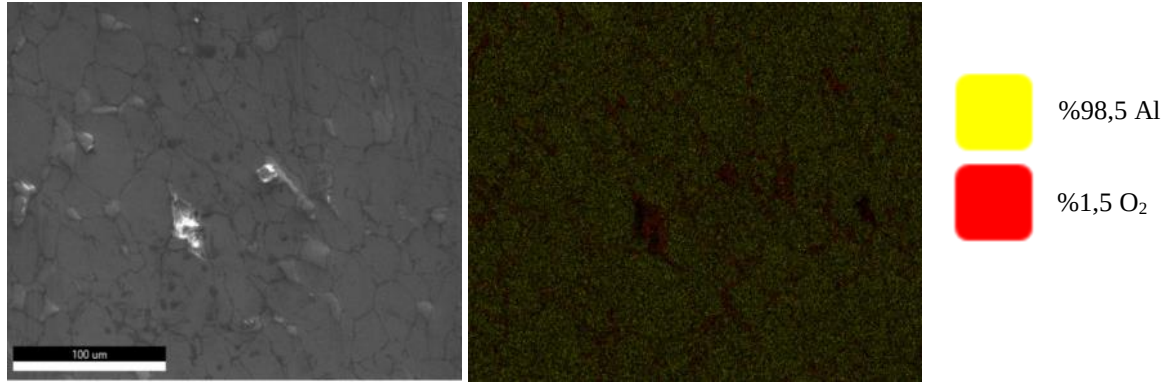
Yapılan araştırmalar sonucu alınan görüntülerde görüldüğü üzere kullanılan AA2024 toz parçacıklarının düzensiz şekilde olduğı gözlemlenmiştir. AA2024 ve takviye malzemesi olarak kullanılan Al_2O_3 ve SiC toz parçacıklarının başlangıç morfolojileri Şekil 6.1’ deki gösterilmiştir.



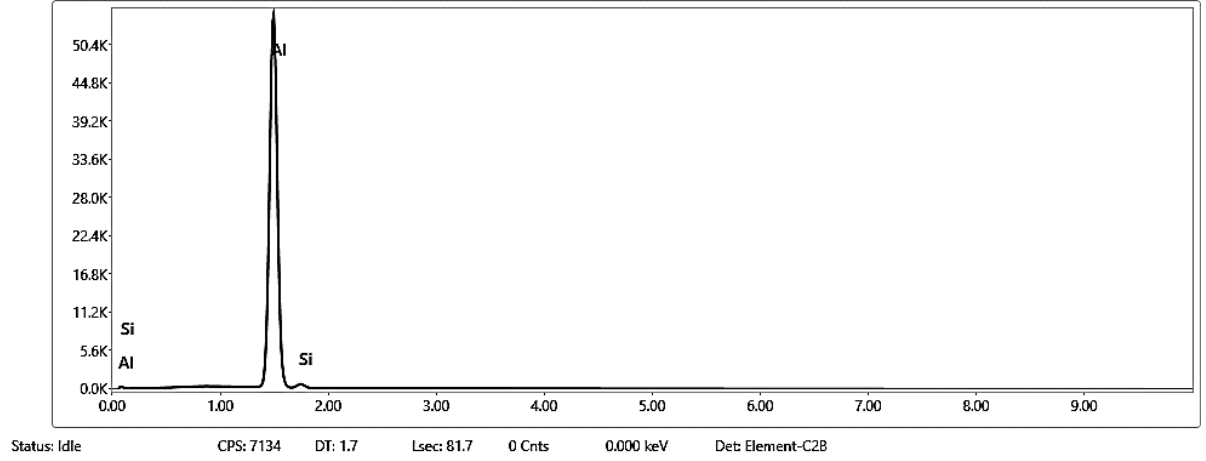
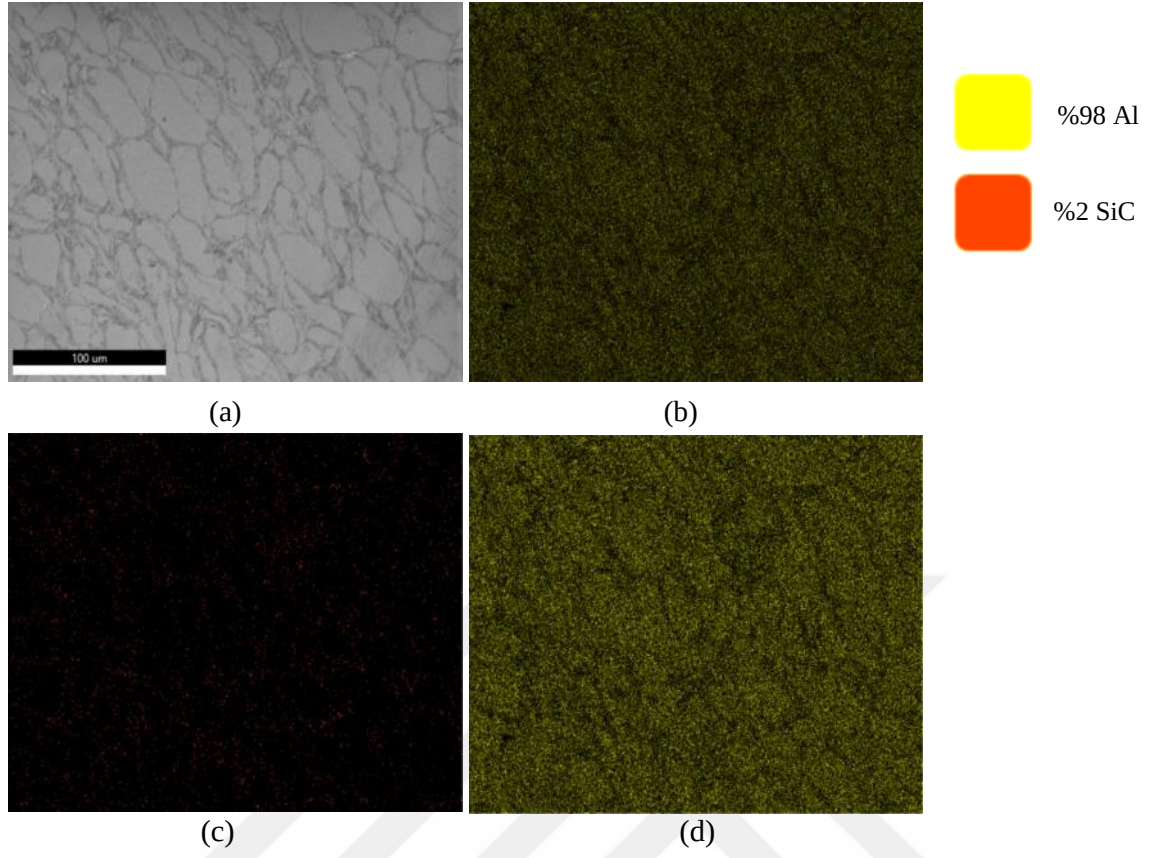
Şekil 6.1. Kullanılan toz parçacıklarının morfolojileri, (a) AA2024, (b) Al_2O_3 , (c) SiC

6.2. Öğütme ve EDS Görüntüleri

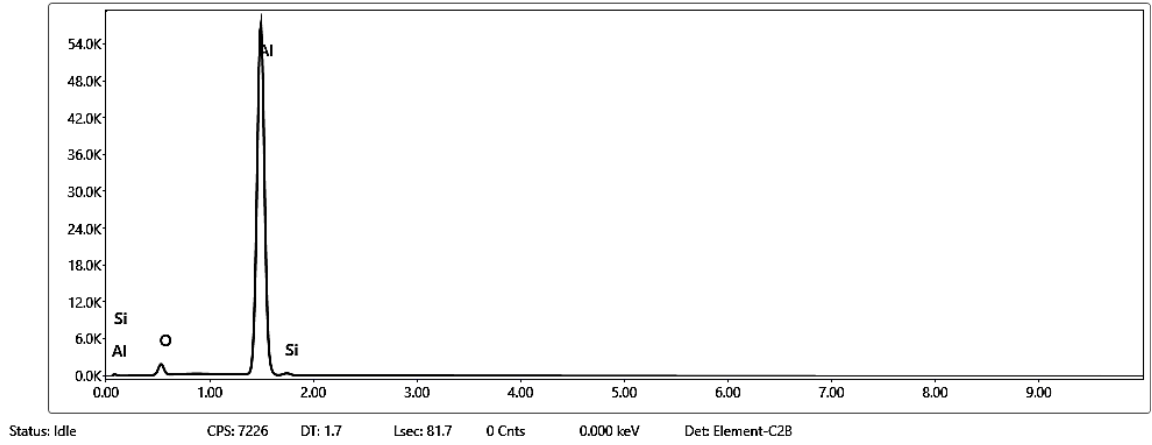
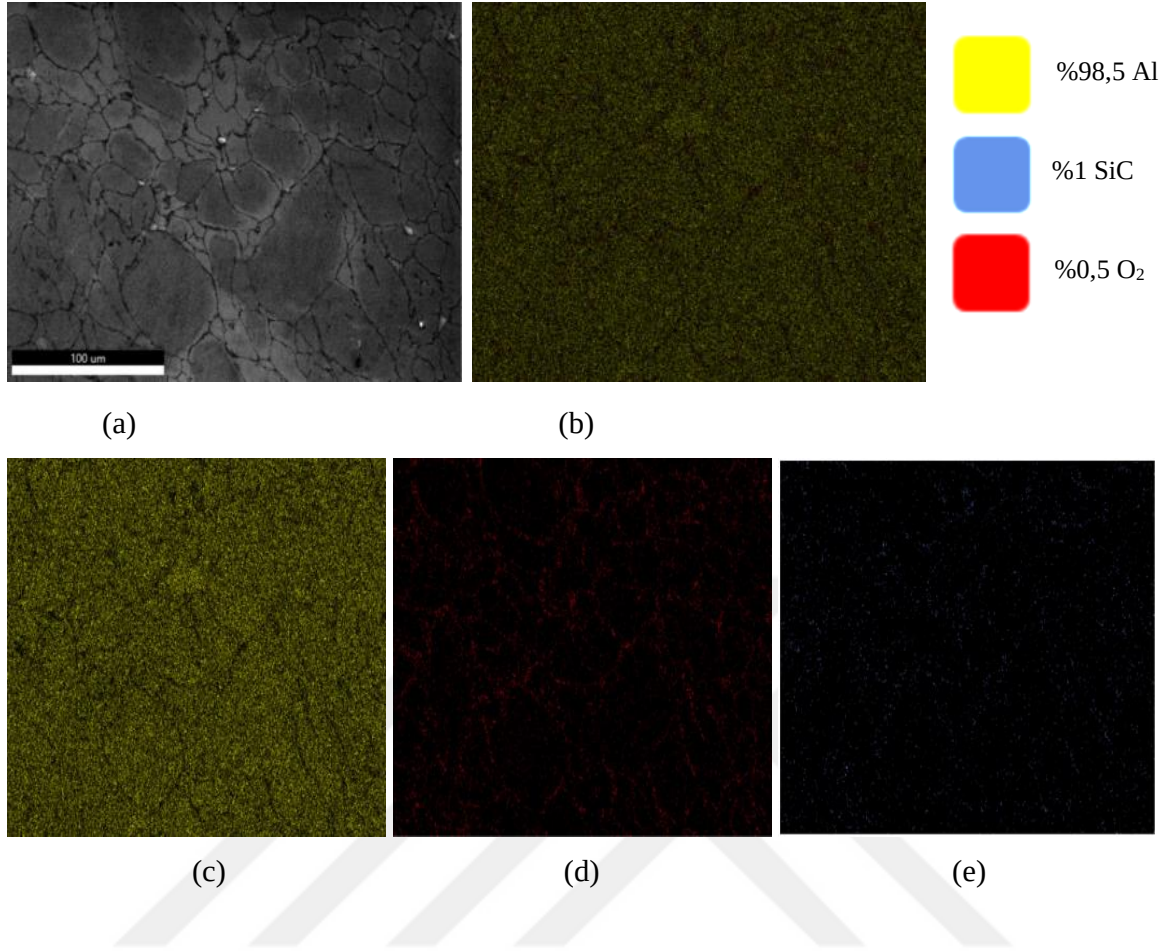
Kullanılan takviye elemanları (Al_2O_3 ve SiC) matris malzemesinde daha sert yapıda yapıya sahip olduğı için, matris malzemesi içerisine takviye elemanlarının yerleşmesi ve homojen bir dağılım sağlamak amacıyla 4 saatlik öğütme süresi uygulanmıştır. Hibrit kompozit malzemelerin %2 Al_2O_3 ve SiC barındıran görüntüleri ve elementel dağılımları Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’ de verilirken, Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de iç yapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.2. AA2024/%2 Al₂O₃ nano kompozit malzemelerinin 4 saat öğütme işlemi sonrası; (a) Yüzey morfolojisi, (b) AA2024-Al₂O₃ element dağılımı, (c) O₂ dağılımı, (d) Al dağılımı

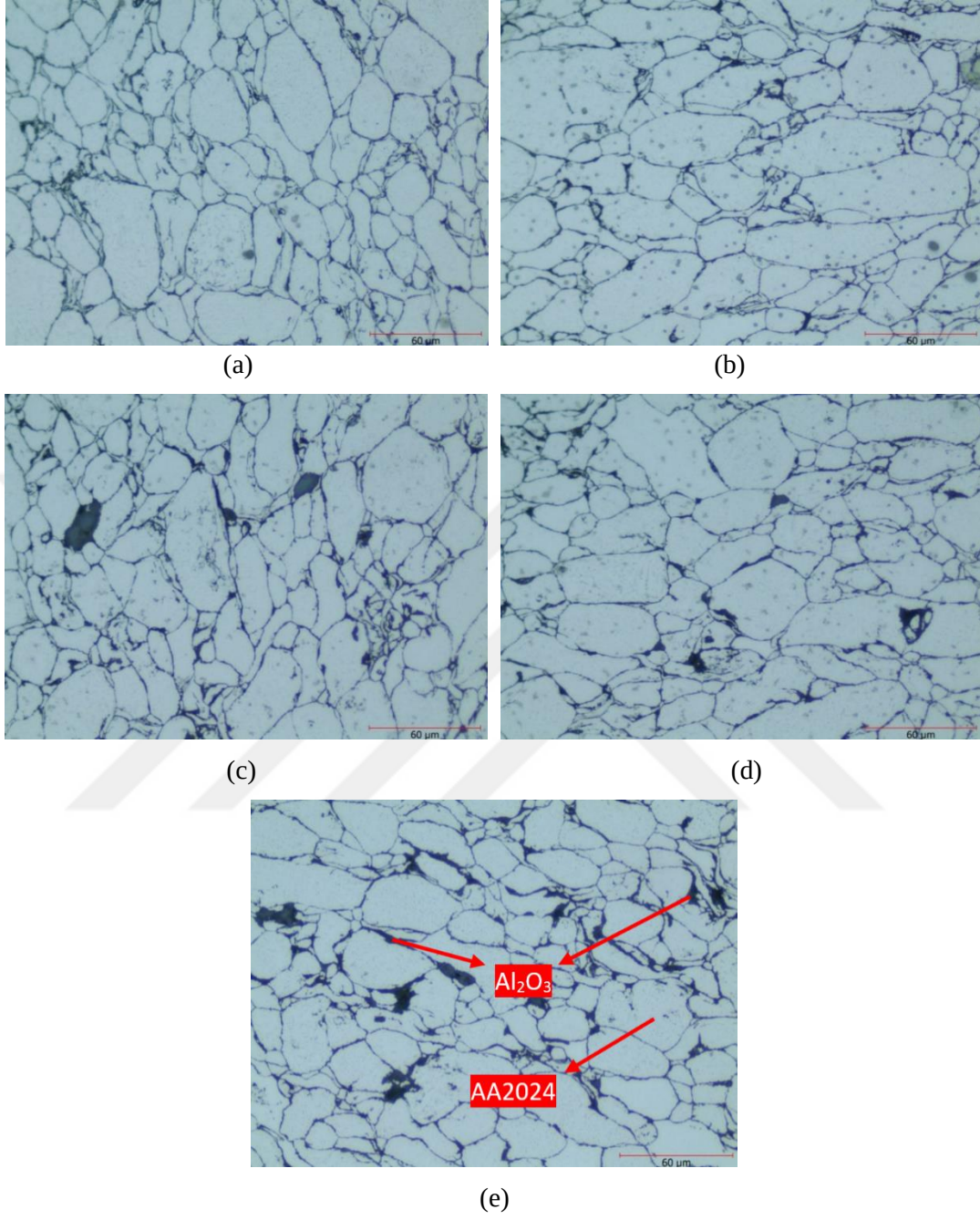


Şekil 6.3. AA2024/%2 SiC nano kompozit malzemelerinin 4 saat öğütme işlemi sonrası; (a) Yüzey morfolojisi, (b) AA2024-SiC element dağılımı, (c) SiC dağılımı, (d) Al dağılımı



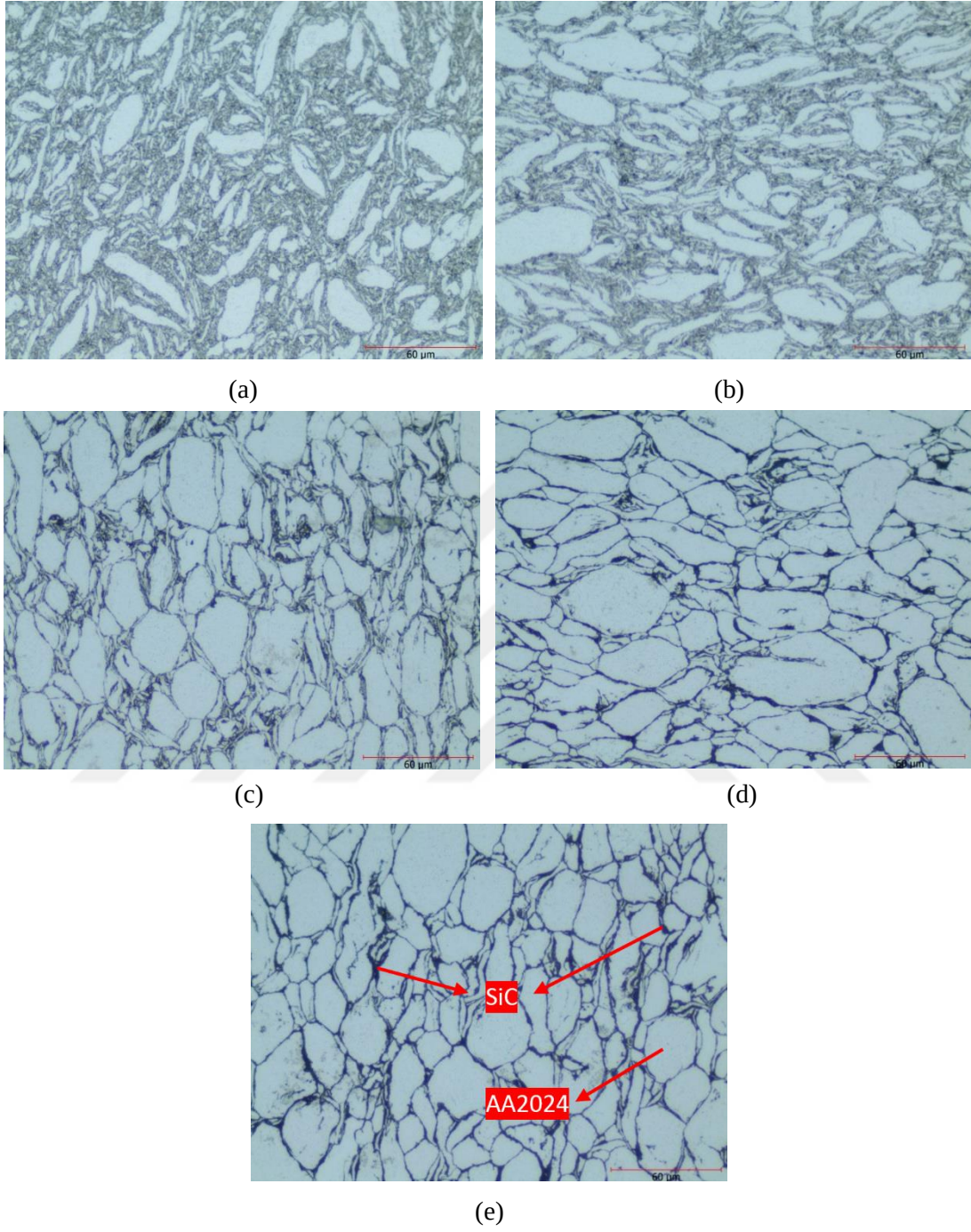
Şekil 6.4. AA2024/%1 Al_2O_3 -%1 SiC hibrit nano kompozit tozlarının 4 saat öğütme işlemi sonrası; (a) Yüzey morfolojisi, (b) AA2024- Al_2O_3 /SiC element dağılımı, (c) O_2 dağılımı, (d) Al dağılımı, (e) SiC dağılımı

6.2.1. AA2024/ Al_2O_3 Nano Kompozit Malzemelerin İç Yapı Görüntüleri



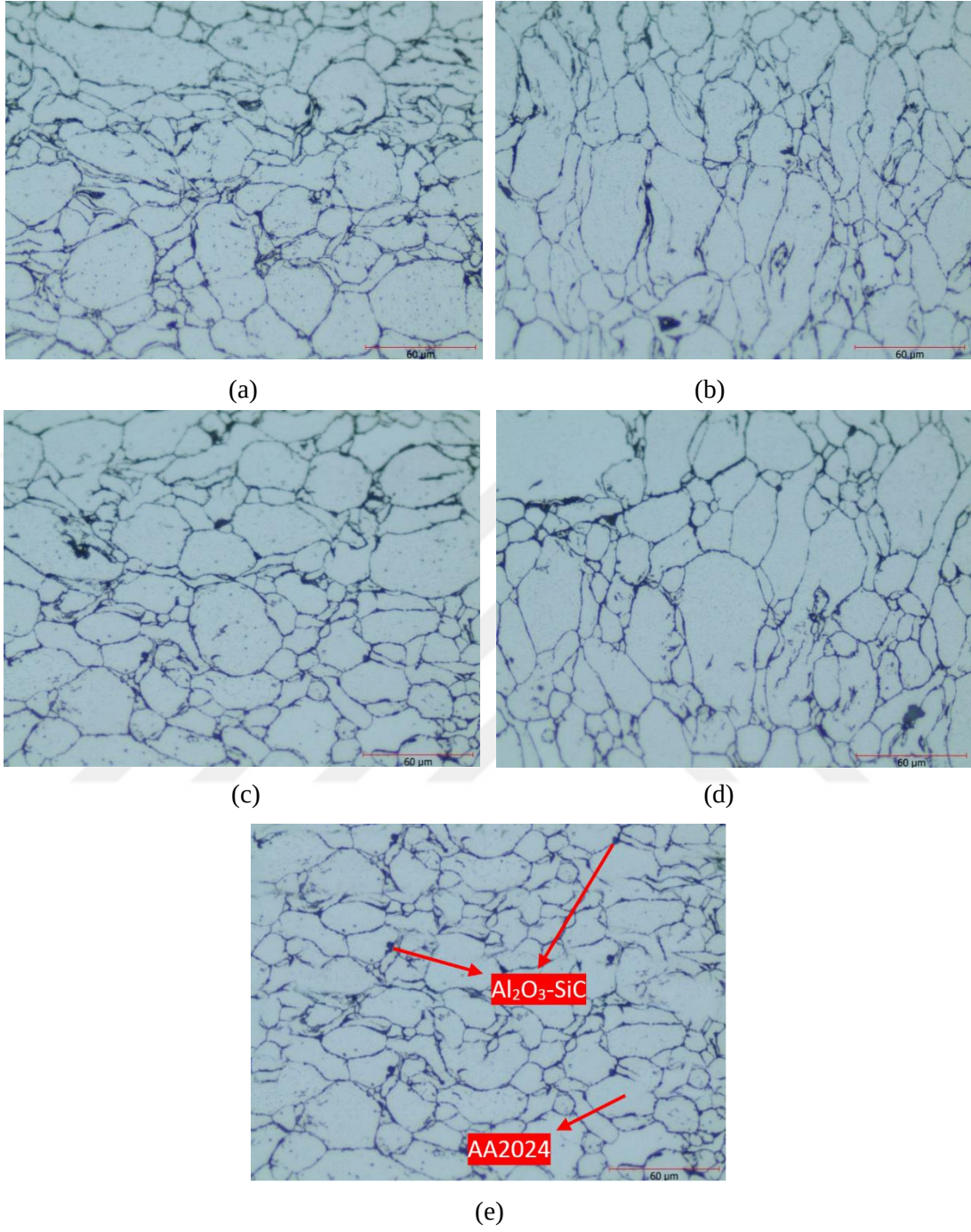
Şekil 6.5. AA2024/ Al_2O_3 560 °C’de sinterleme işlemi yapılmış nano kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (a) $\text{A}_{0.5}$, (b) $\text{A}_{1.0}$, (c) $\text{A}_{2.0}$, (d) $\text{A}_{3.0}$, (e) $\text{A}_{5.0}$

6.2.2. AA2024/SiC Nano Kompozit Malzemelerin İç Yapı Görüntüleri



Şekil 6.6. AA2024/SiC 560 °C’de sinterleme işlemi yapılmış nano kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (a)S_{0.5}, (b)S_{1.0}, (c)S_{2.0}, (d)S_{3.0}, (e)S_{5.0}

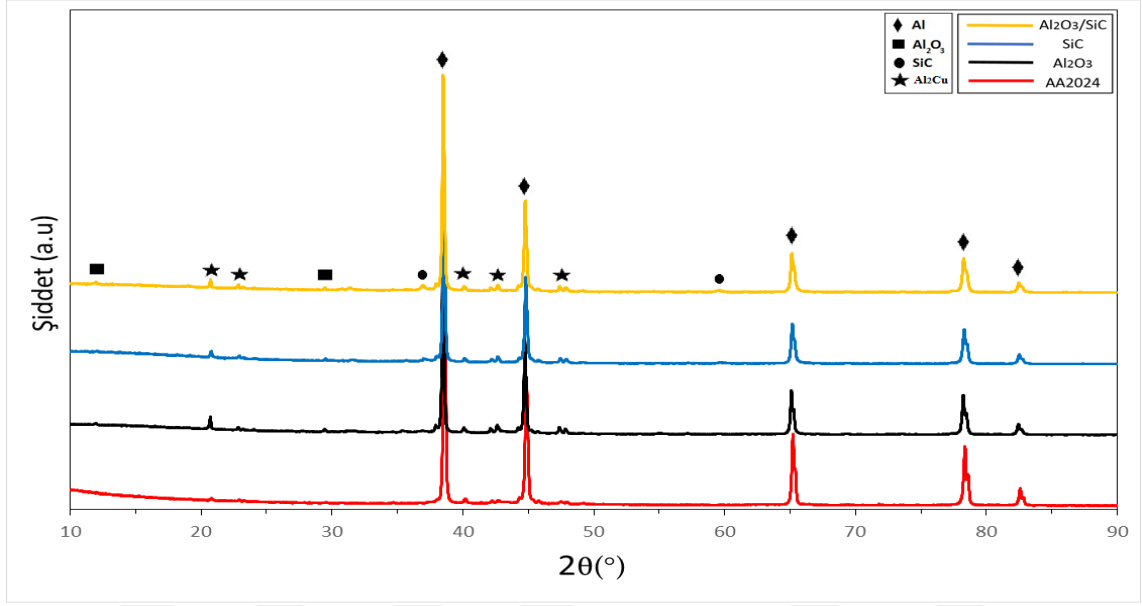
6.2.3. AA2024/ Al_2O_3 -SiC Hibrit Nano Kompozit Malzemelerin İç Yapı Görüntüleri



Şekil 6.7. AA2024/ Al_2O_3 -SiC 560 °C’de sinterleme işlemi yapılmış hibrit nano kompozit malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (a) $\text{H}_{0.5}$, (b) $\text{H}_{1.0}$, (c) $\text{H}_{2.0}$, (d) $\text{H}_{3.0}$, (e) $\text{H}_{5.0}$

6.3. Üretilen Kompozit Malzemelerin XRD Analizleri

AA2024 / Al₂O₃, AA2024 / SiC nano kompozit malzemeler ve AA2024 / Al₂O₃-SiC hibrit nano kompozit malzemelerin XRD analizi sonucu Al, Al₂O₃, SiC, Al₂Cu fazlarına rastlanmıştır (Şekil 6.8). Oluşan Al₂Cu fazı bütün nano kompozit ve hibrit kompozit malzemelerde rastlanmaktadır.



Şekil 6.8. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC nano kompozit ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozit numunelerin XRD analizi

6.4. Üretilen Kompozit Malzemelerin Özellikleri

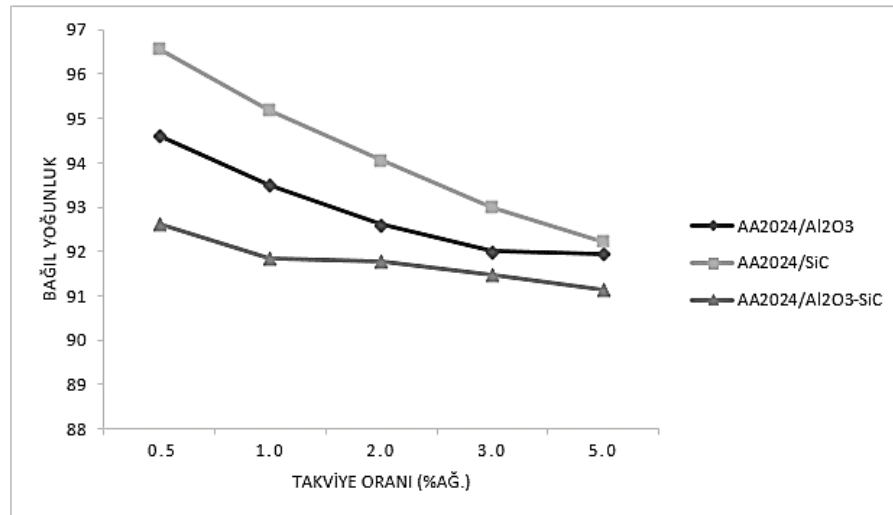
6.4.1 Yoğunluk ve Gözeneklilik

Kullanılan matris malzemesi ve takviye malzemelerine ait yoğunluk değerleri sırasıyla; AA2024: 2.78 gr/cm³, Al₂O₃: 3.95 gr/cm³ ve SiC: 3.21 gr/cm³ şeklindedir. Tozları sıkıştırılması amacıyla yapılan presleme yöntemi şu aşamalardan oluşmaktadır; Sıkıştırılan tozlar birbiri içerisinde tanecik boyutundan dolayı birbiri içerisinde hareket ederken yer değiştirirler. Bu yöntemde en önemli etkenler tane boyutu, kullanılan tozun tane yapısı ve tozlar arasında sürtünme gelmektedir. İkinci aşamada toz partiküllerinin sıkıştırılması ile elastik ve plastik deformasyonlar oluşarak gözenekler arasındaki boşluklar azalır ve parçacıklar arasında mekanik bağlar oluşmaktadır. Son işlem olarak toz partiküllerinin kırılması ve plastik deformasyon işlemi ile gözenek sayısı azalır, toz partiküllerinin sıcaklık ve basıncın etkisiyle birbirlerine soğuk kaynaklanmaktadır. Tozların preslenme ve sıkıştırma kabiliyetlerini azaltan bir diğer neden ise, artmakta olan takviye oranı ile yapıda oluşan sert partikül oranının artması ve bunun sonucunda

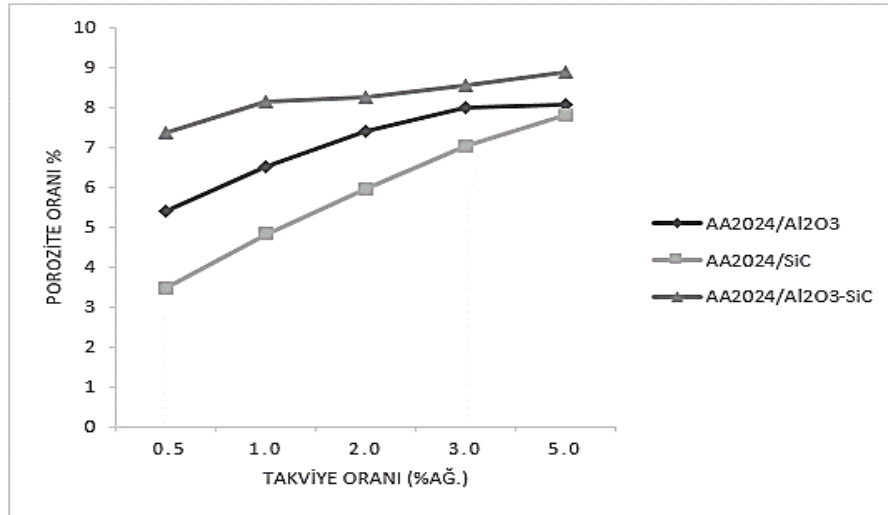
kompozit tozlarının sertliğinde artış olmaktadır. Bununla birlikte artan takviye oranı ile malzemelerin yoğunluklarında azalma görülmüştür (Şekil 6.9). Artan takviye oranı ile gözeneklilik değerlerinde artış olduğu görülmüştür (Şekil 6.10). Numunelere ait bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri Tablo 6.1’ de verilmiştir.

Tablo 6.1. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozit malzemelerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

Sıra No	Alaşım Türü	Gözeneklilik %	DeneySEL Yoğunluk (gr/cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Bağıl Yoğunluk (%)
1	A _{0.5}	5,41	2,6350	2,7858	94,59
2	A _{1.0}	6,51	2,6100	2,7917	93,49
3	A _{2.0}	7,40	2,5960	2,8034	92,60
4	A _{3.0}	8,00	2,5900	2,8151	92,00
5	A _{5.0}	8,05	2,6100	2,8385	91,95
6	S _{0.5}	3,45	2,6860	2,7820	96,55
7	S _{1.0}	4,82	2,6500	2,7843	95,18
8	S _{2.0}	5,95	2,6228	2,7886	94,05
9	S _{3.0}	7,01	2,5970	2,7929	92,99
10	S _{5.0}	7,80	2,5830	2,8015	92,20
11	H _{0.5}	7,37	2,5780	2,7830	92,63
12	H _{1.0}	8,15	2,5600	2,7872	91,85
13	H _{2.0}	8,24	2,5650	2,7954	91,76
14	H _{3.0}	8,54	2,5643	2,8036	91,46
15	H _{5.0}	8,87	2,5700	2,8200	91,13



Şekil 6.9. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozit malzemelerin takviye oranı ile yoğunluklarının değişimi



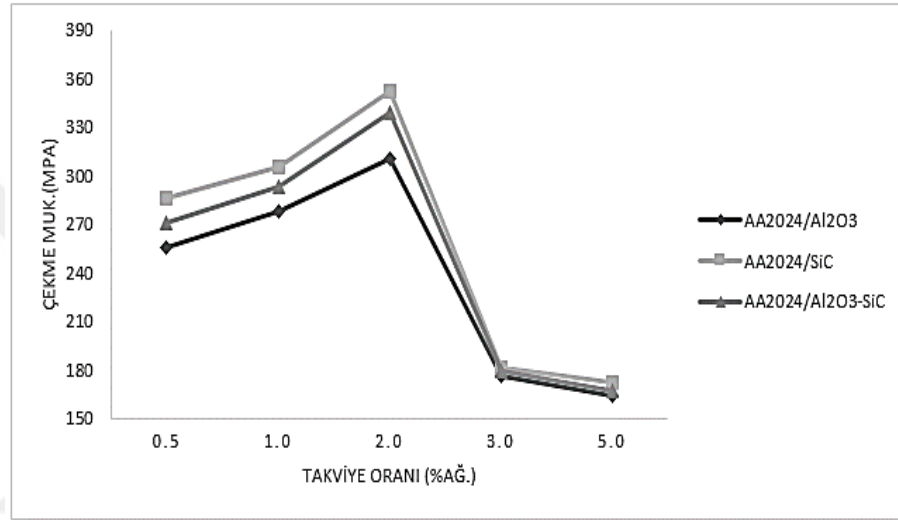
Şekil 6.10. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozit malzemelerin takviye oranı ile gözeneklilik değerlerinin değişimi

6.4.2. Çekme Mukavemeti Testleri

Kullanılan matris ve takviye malzemelerinin çekme mukavemetleri sırasıyla AA2024: 185 MPa, Al₂O₃: 240 MPa, ve SiC: 250 MPa şeklindedir. Ayrıca sinterleme işlemi uygulanmış nano kompozit malzemelere yapılan çekme testi sonuçları Tablo 6.2’ de verilmiştir. Nano kompozit malzemeler ve hibrit nano kompozit malzemeler artan takviye miktarı ile çekme mukavemet değeri artış göstermiştir. Tüm değerler arasında en iyi çekme kuvveti değerini %2’lik takviye oranına sahip malzemeler vermiştir. Bunun nedeni ise takviye malzemelerinin %2 oranında daha homojen bir yapı elde edilmesi ve matris malzeme içerisinde daha çok çözünmesi sonucudur. AA2024 / Al₂O₃ nano kompozit malzemeler içerisinde en iyi çekme mukavemeti 310.6 MPa değerine sahip olan A_{2.0} numunesidir. AA2024 / SiC nano kompozit malzemeler içerisinde en iyi çekme mukavemeti ise 352.3 MPa ile S_{2.0} malzemedir. AA2024 / Al₂O₃-SiC hibrit nano kompozit malzemeler içerisinde ise en iyi çekme mukavemeti 339.2 MPa ile H_{2.0} malzemesidir. Tabloya göre takviye miktarının %2’nin üstüne çıkması ve buna bağlı olarak çekme dayanımlarındaki düşme sebebinin artan takviye malzemesi ile topaklanma miktarının artması ve matris ile takviye malzemesinin arasındaki bağ kuvvetlerinin zayıflaması olarak tespit edilmiştir. Bağların zayıflamasından dolayı çekme mukavemetlerinde sürekli olarak düşmeler meydana gelebilmektedir. Nano kompozit ve hibrit kompozit malzemelere ait çekme testi sonucu mukavemet değerlerinin takviye oranı ile değişim grafiği Şekil 6.11’ de verilmiştir.

Tablo 6.2. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC kompozit malzemelerinin ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozit malzemelerinin çekme testi sonucu mukavemet değerleri

Numune Kodu	Çekme Mukavemet Değeri (MPa)	Numune Kodu	Çekme Mukavemet Değeri (MPa)	Numune Kodu	Çekme Mukavemet Değeri (MPa)
Al ₂ O ₃	240	SiC	250	AA2024	185
A _{0.5}	255,4	S _{0.5}	285,7	H _{0.5}	270,9
A _{1.0}	278,1	S _{1.0}	304,8	H _{1.0}	292,6
A _{2.0}	310,6	S _{2.0}	352,3	H _{2.0}	339,2
A _{3.0}	175,9	S _{3.0}	180,6	H _{3.0}	178,6
A _{5.0}	163,8	S _{5.0}	171,9	H _{5.0}	167,3



Şekil 6.11. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozit malzemelerin çekme testi sonucu mukavemet değerlerinin takviye oranı ile değişimi

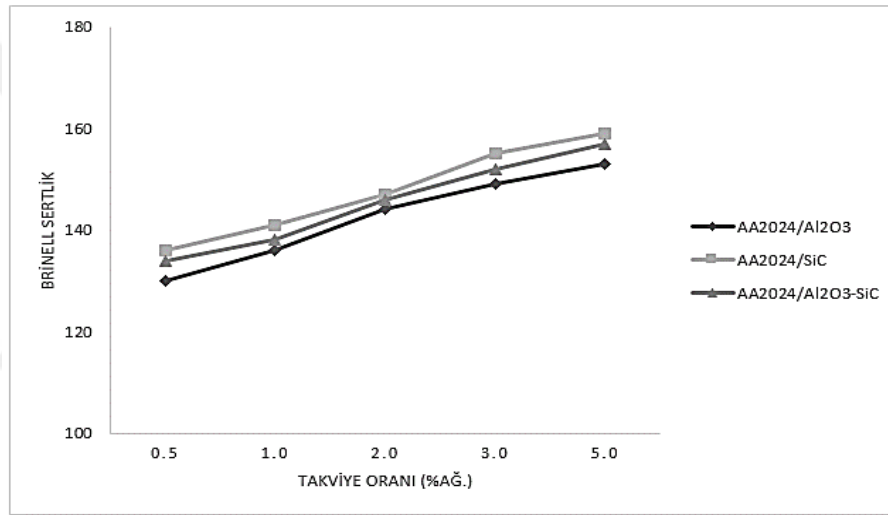
6.4.3. Sertlik Değerleri

Yapılan sertlik testleri sonucunda kullanılan matris ve takviye malzemelerin sertlik değerleri sırasıyla; AA2024: 120 BSD, Al₂O₃: 1440 BSD ve SiC: 1800 BSD şeklindedir. Test sonucu Tablo 6.3 'e göre, nano kompozit malzemeler ve hibrit nano kompozit malzemelerin takviye oranlarının artmasıyla sertlik değerlerinde arttığı görülmüştür. Bunun sebebi takviye malzemelerinin matris malzemesinden daha sert bir yapıya sahip olmasıdır. Kompozit malzemeler içerisinde en yüksek BSD değerine sahip malzemeler AA2024 / SiC nano kompozit grubu olmuştur. AA2024 / SiC nano kompozitler içerisinde en yüksek BDS değerine sahip kompozit malzeme S5 kompozittir. Presleme esnasında yüksek takviye miktarına sahip A5 ve S5 nano kompozit malzemeler ve H5 hibrit nano kompozit malzemeler takviye miktarlarının yüksek olması sebebiyle AA2024 alaşıma sahip matris toz partikülleri daha fazla plastik deformasyona maruz kalmışlardır. Bu durum sonucunda matris malzemesi ile takviye malzemeleri arasında gerilmeler meydana gelmiştir. Meydana gelen gerilmeler dislakasyon mekanizması olarak bilinen pekleşme olarak adlandırılmaktadır. Şekil 6.12'

de nano kompozit ve hibrit kompozit malzemelerin takviye oranı ile sertlik değerlerindeki değişimin grafiği verilmiştir.

Tablo 6.3. AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC kompozit malzemelerin ve AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit kompozit malzemelerin Brinell Sertlik Değerleri (BSD)

Numune Kodu	Brinell Sertlik Değeri (BSD)	Numune Kodu	Brinell Sertlik Değeri (BSD)	Numune Kodu	Brinell Sertlik Değeri (BSD)
Al_2O_3	1440	SiC	1800	AA2024	120
A _{0,5}	130	S _{0,5}	136	H _{0,5}	134
A _{1,0}	136	S _{1,0}	141	H _{1,0}	138
A _{2,0}	144	S _{2,0}	147	H _{2,0}	146
A _{3,0}	149	S _{3,0}	155	H _{3,0}	152
A _{5,0}	153	S _{5,0}	159	H _{5,0}	157



Şekil 6.12. AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC kompozit ve AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit kompozit malzemelerin takviye oranı ile sertlik değerlerindeki değişim

6.5. Korozyon Testleri

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin ve Al_2O_3 , SiC takviyeli kompozit malzemelerin korozyon davranışlarını etkileyen parametreler; takviye partikül miktarı, takviye malzemelerinin matris malzemesi içerisindeki dağılımı ve matris alaşımlarının mikroyapıları olarak sınıflandırılmaktadır.

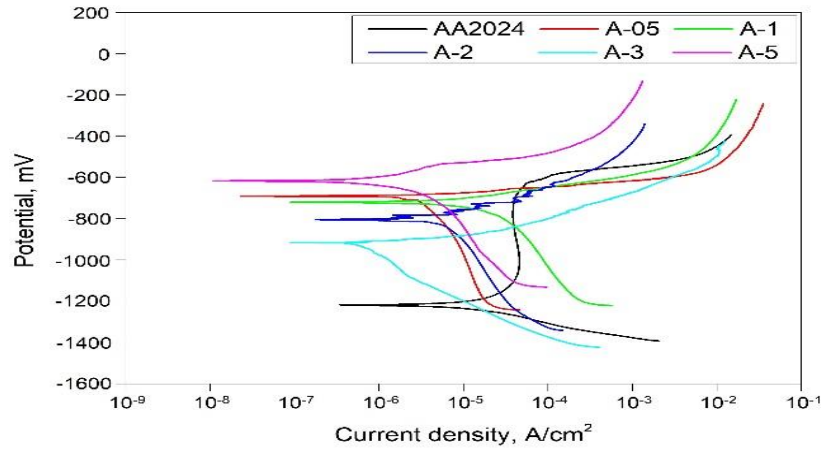
AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin ve AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin korozyon deneyleri test sonuçları (E_{kor} , I_{kor} , korozyon hızı) Tablo 6.4’ da verilmiştir. Tablo 6.4’ de belirtildiği gibi hem alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum karbür (SiC) takviyeli nano kompozit malzemeler, hem de Al_2O_3 -SiC takviyeli hibrit nano kompozit malzemeler içerisinde en yüksek I_{kor} ve korozyon hızı değerleri %0.5 takviyeye sahip numunelerde görülmektedir. Alüminyum oksit (Al_2O_3) takviyeli nano kompozit malzemeler içinde korozyon hız

değeri 0.69 mpy ile en yüksek korozyon direncine sahip nano kompozit malzeme A5'dir. Silisyum karbür (SiC) takviyeli nano kompozit malzemeler içinde korozyon hız değeri 1.41 mpy ile en yüksek korozyon direncine sahip nano kompozit malzeme S5'dir. Hibrit nano malzemelerde ise 0.61 mpy korozyon hız değeri ile H5 malzemesi en yüksek korozyon direncine sahiptir. Yapılan test sonuçlarına göre tüm nano kompozit malzemelerin ve hibrit nano kompozit malzemelerin korozyon dayanımlarının AA2024 alaşım malzemesinden daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Üretimi yapılan nano kompozit malzemeler içerisinde en düşük korozyon dayanımı SiC takviyeli nano kompozit malzemelerdir. Korozyon dayanımının düşük olmasının sebebi oluşan Al_2Cu ara fazının bulunması ve miktarıdır.

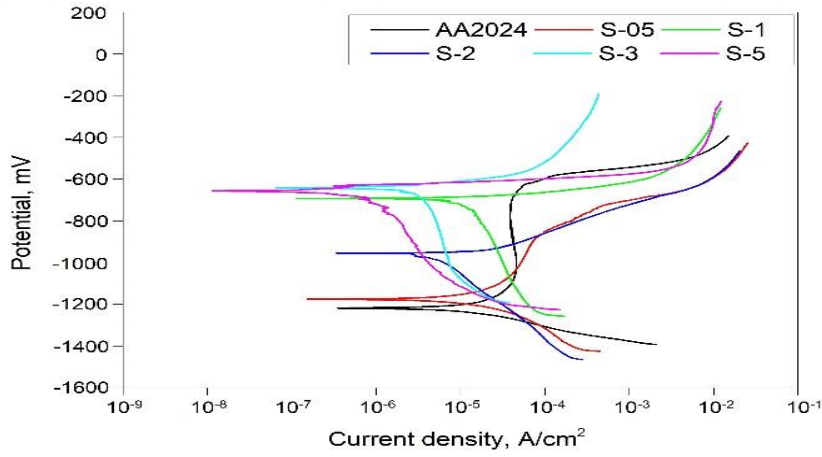
Tablo 6.4. AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC kompozit malzemelerinin ve AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit kompozit malzemelerinin korozyon testi sonucu E_{kor} , I_{kor} ve korozyon hızı değerleri

Sample Code	E_{kor} (mV)	I_{kor} (μA)	Korozyon Hızı (mpy)
AA2024	-1220	46,12	31,87
A _{0.5}	-765	10,71	7,92
A _{1.0}	-720	6,32	4,63
A _{2.0}	-804	2,07	1,61
A _{3.0}	-918	1,14	0,83
A _{5.0}	-617	0,97	0,69
S _{0.5}	-1180	26,61	17,12
S _{1.0}	-693	10,11	7,32
S _{2.0}	-955	5,25	3,56
S _{3.0}	-642	2,54	1,87
S _{5.0}	-657	1,88	1,41
H _{0.5}	-891	21,81	16,55
H _{1.0}	-732	7,72	6,59
H _{2.0}	-709	1,88	1,23
H _{3.0}	-806	1,08	0,80
H _{5.0}	-816	0,83	0,61

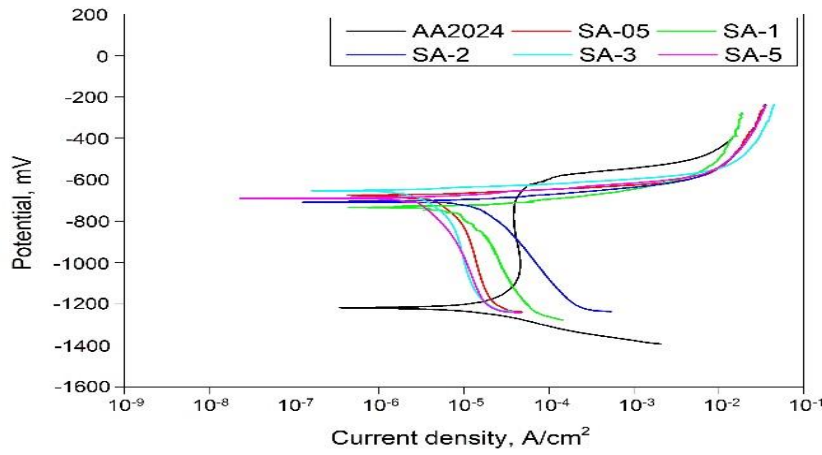
AA2024 / Al_2O_3 , AA2024 / SiC nano kompozit malzemelerin ve AA2024 / Al_2O_3 -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15' de verilmiştir. Anodik çözünmeler sonucu anodik polarizasyon eğrisi oluşurken, katodik çözünmeler sonucu katodik polarizasyon eğrilerini göstermektedir. Üretimi yapılan nano kompozit malzemeler ve hibrit nano kompozit malzemelerin anodik ve katodik polarizasyon eğrileri AA2024 alaşımındaki eğriler ile aynı doğrultuya sahip olduğu tespit edilmiştir. Anodik çözünme oluşması bu nano kompozit malzemelerin pasif olmasının sonucu olarak potansiyel aralıklar içerisinde olduğunu ifade etmektedir. Bu durum pasif akıma göre daha büyük bir anodik çözünmelerin meydana gelmesi çukurcuk korozyonun başladığını ifade etmektedir.



Şekil 6.13. AA2024/ Al_2O_3 nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrisi



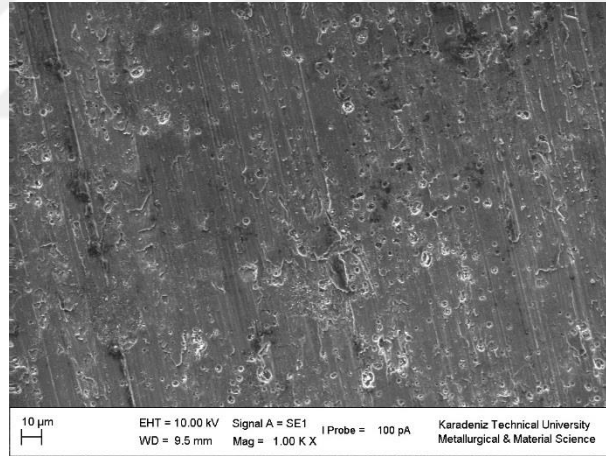
Şekil 6.14. AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrisi



Şekil 6.15. AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonucunda oluşan tafel eğrisi

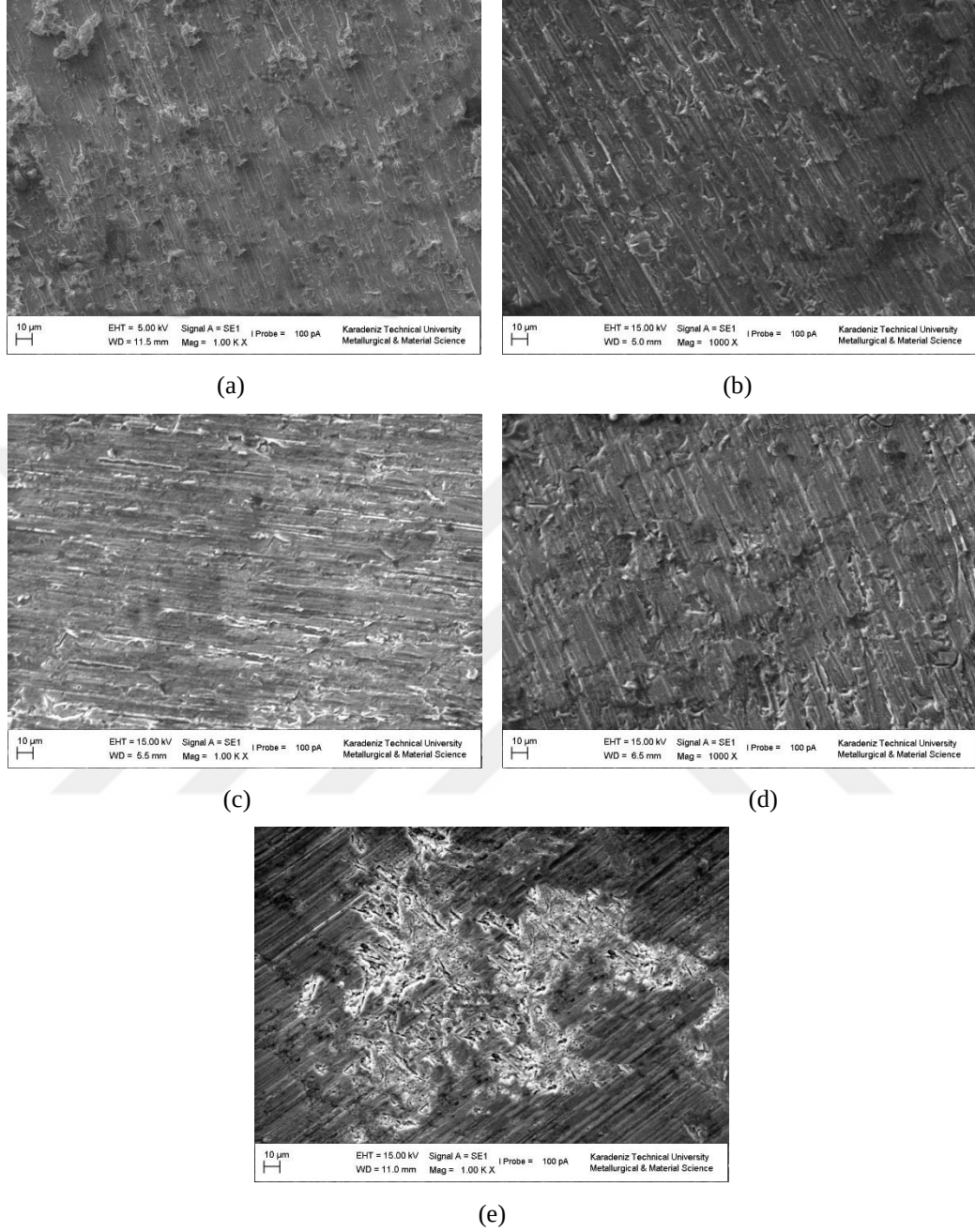
AA2024/ Al_2O_3 ve AA2024/SiC nano kompozit malzemeler ile AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin korozyona uğramış yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’de verilmiştir. Verilen SEM görüntüleri incelendiğinde AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin yüzeyde oluşan çukurcuk yapılar daha büyük alanlarda ve derinliklerde oluşmuştur. Ayrıca AA2024/ Al_2O_3 nano kompozit malzemelerin ve AA2024/ Al_2O_3 -SiC hibrit kompozit malzemelerin içerisinde bulunan Al_2O_3 takviye malzemesi korozyon oluşumunda bariyer görevi görerek numunelerin korozyon dayanımı arttırmaktadır. Diğer parametrelerde ise nano kompozit ve hibrit kompozit malzemelerde ara faz olarak oluşan Al_2Cu ’ dir. Bu faz numunelerin korozyon dayanımlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Genel olarak üretilmiş nano kompozit malzemelerde takviye miktarındaki artış korozyon dayanımlarının da artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte çukurcuk oluşan yüzey bölgeleri sonuç kısmında belirtildiği gibi %1 takviye miktarı içeren kompozit malzemelerde artış göstermiş, takviye miktarı %1’in üzerine çıktıktan sonra çukurcuk yapılarda sürekli azalmalar görülmektedir.

6.5.1. AA2024 Numunesinin Korozyon Yüzey İncelemesi



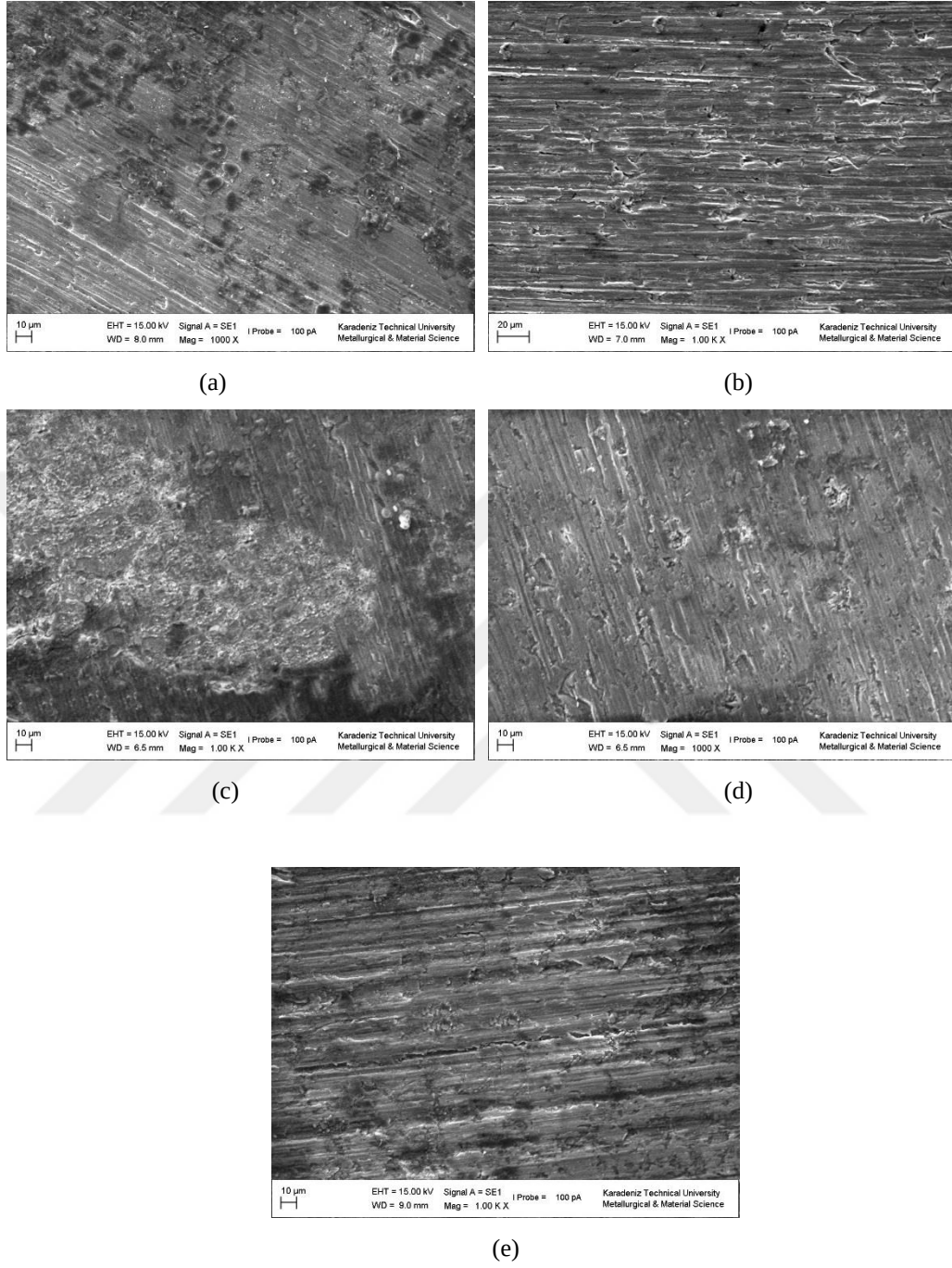
Şekil 6.16. Saf AA2024 numunesinin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyi

6.5.2. AA2024/Al₂O₃ Nano Kompozit Malzemelerin Korozyon Yüzey İncelemesi



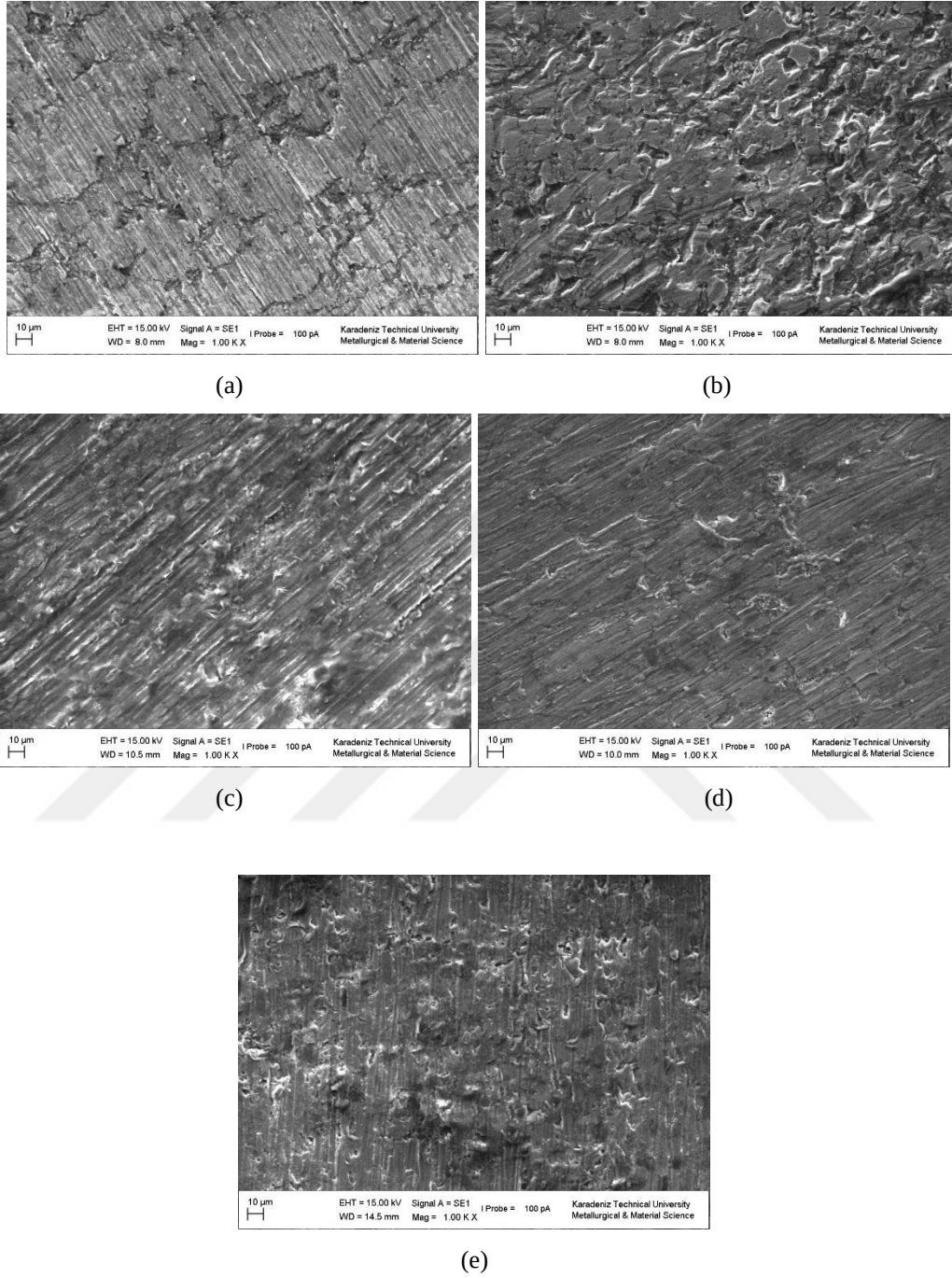
Şekil 6.17. AA2024/Al₂O₃ nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri (a)A_{0.5}, (b)A_{1.0}, (c)A_{2.0}, (d)A_{3.0}, (e)A_{5.0}

6.5.3. AA2024/SiC Nano Kompozit Malzemelerin Korozyon Yüzey İncelemesi



Şekil 6.18. AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri
(a)S_{0.50}, (b)S_{1.0}, (c)S_{2.0}, (d)S_{3.0}, (e)S_{5.0}

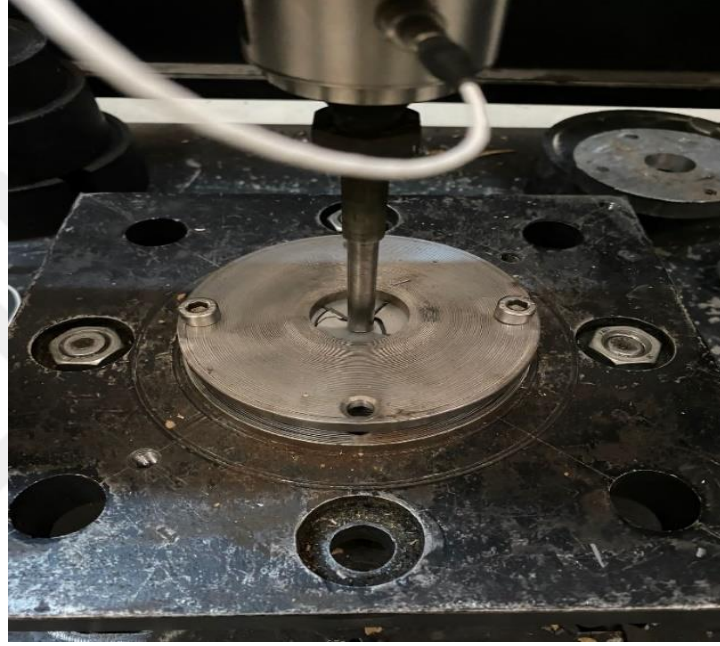
6.5.4. AA2024/Al₂O₃-SiC Hibrit Nano Kompozitlerin Korozyon Yüzey İncelemesi



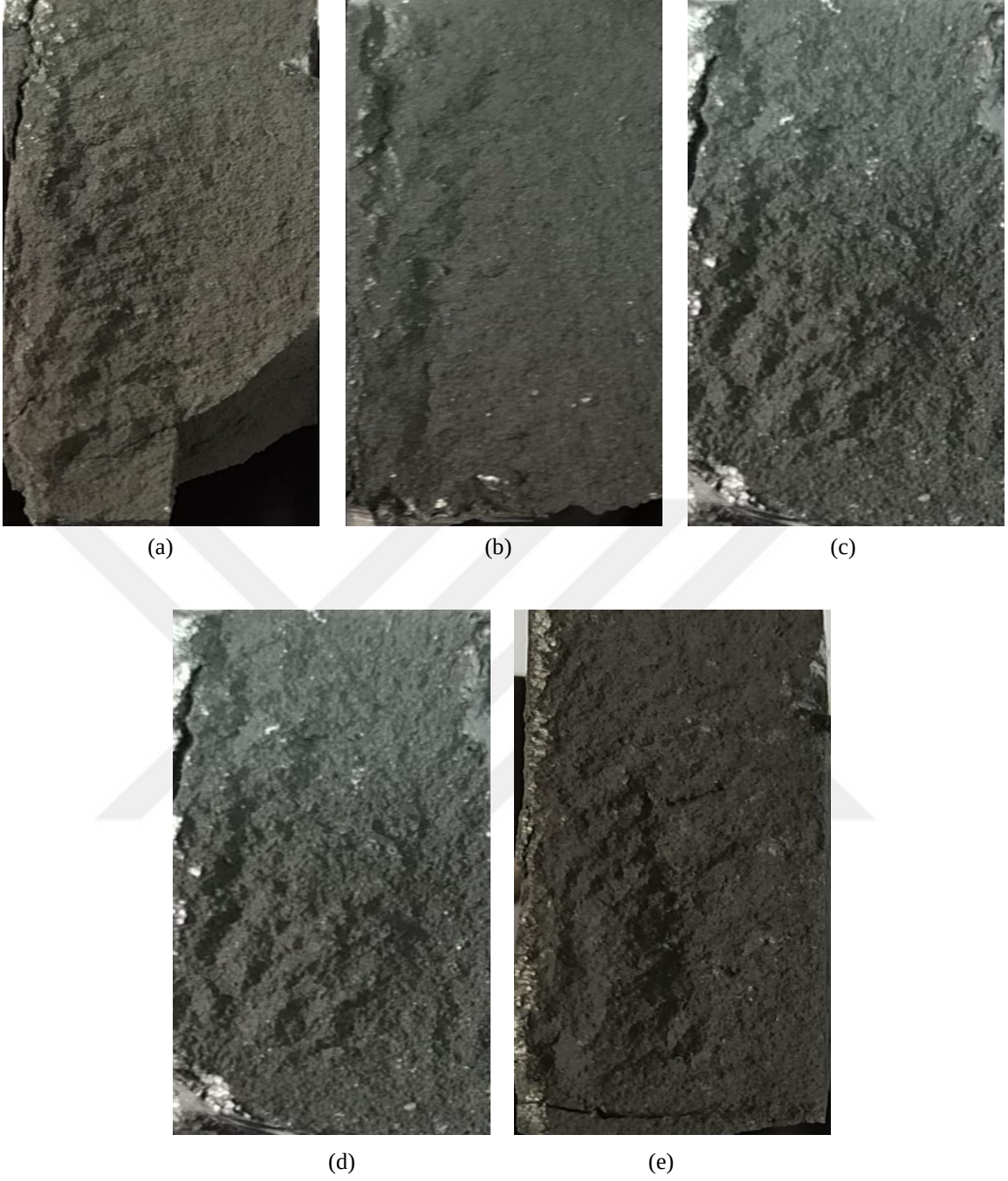
Şekil 6.19. AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit nano kompozit malzemelerin korozyon testi sonrası korozyona uğrayan yüzeyleri (a)H_{0.50}, (b)H_{1.0}, (c)H_{2.0}, (d)H_{3.0}, (e)H_{5.0}

6.6. Balistik Testleri

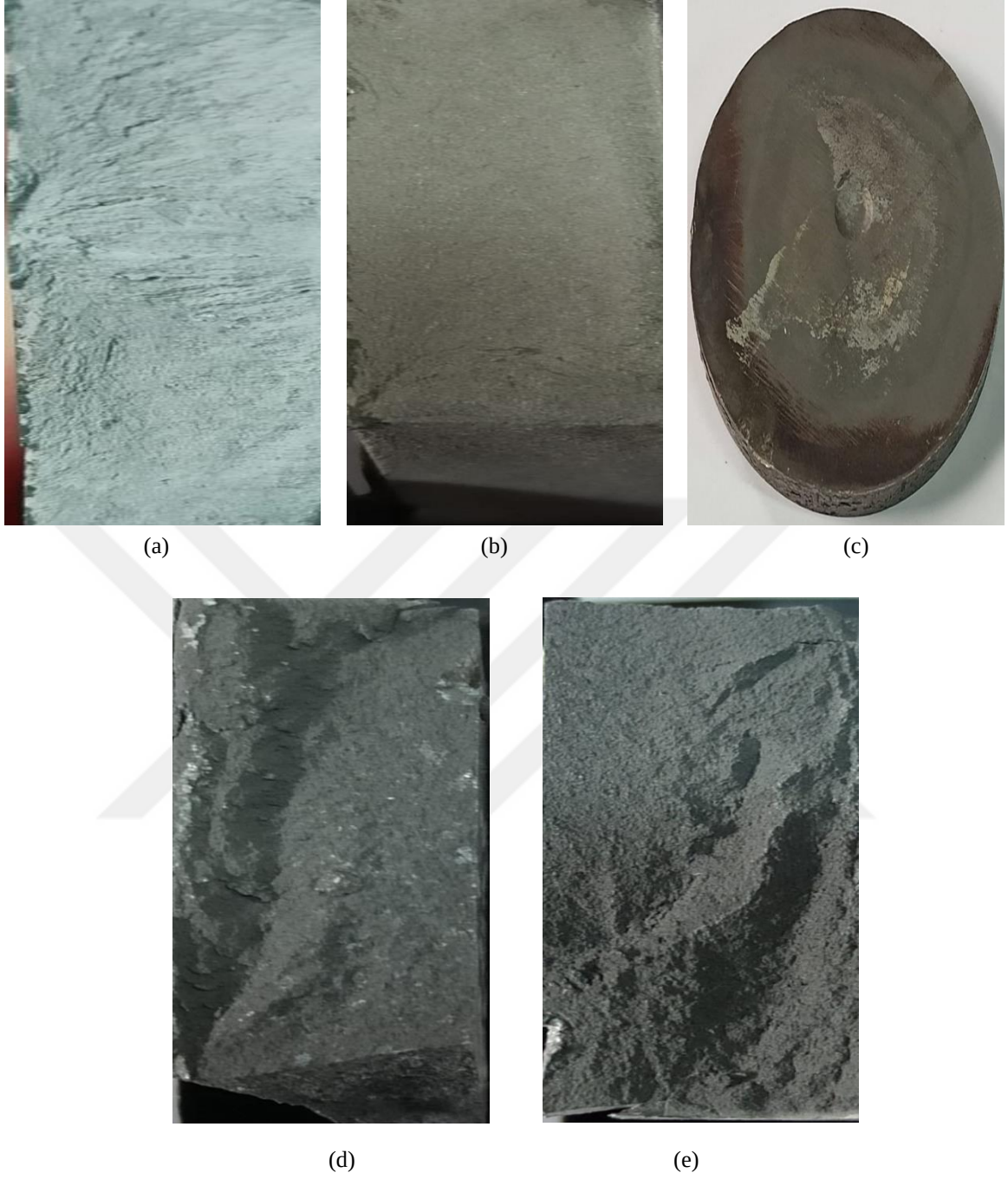
AA2024 / Al₂O₃, AA2024 / SiC nano kompozitlerin ve AA2024 / Al₂O₃-SiC hibrit nano kompozit numunelerin balistik testi sonucu darbe dayanım değerleri Tablo 6.5' de verilmiştir. Balistik uca sahip test cihazının numune yzeyine çarpmasına ait görüntüsü şekil 6.20' de verilmiştir. Balistik test sonrası numunelerde meydana gelen deformasyon sonucu makro yapı görüntüleri şekil 6.21, şekil 6.22 ve şekil 6.23' de verilmiştir. Bunun yanı sıra numunelere ait balistik test sonrası darbe dayanım değerlerinin grafiksel kıyaslaması ise şekil 6.24' de verilmiştir.



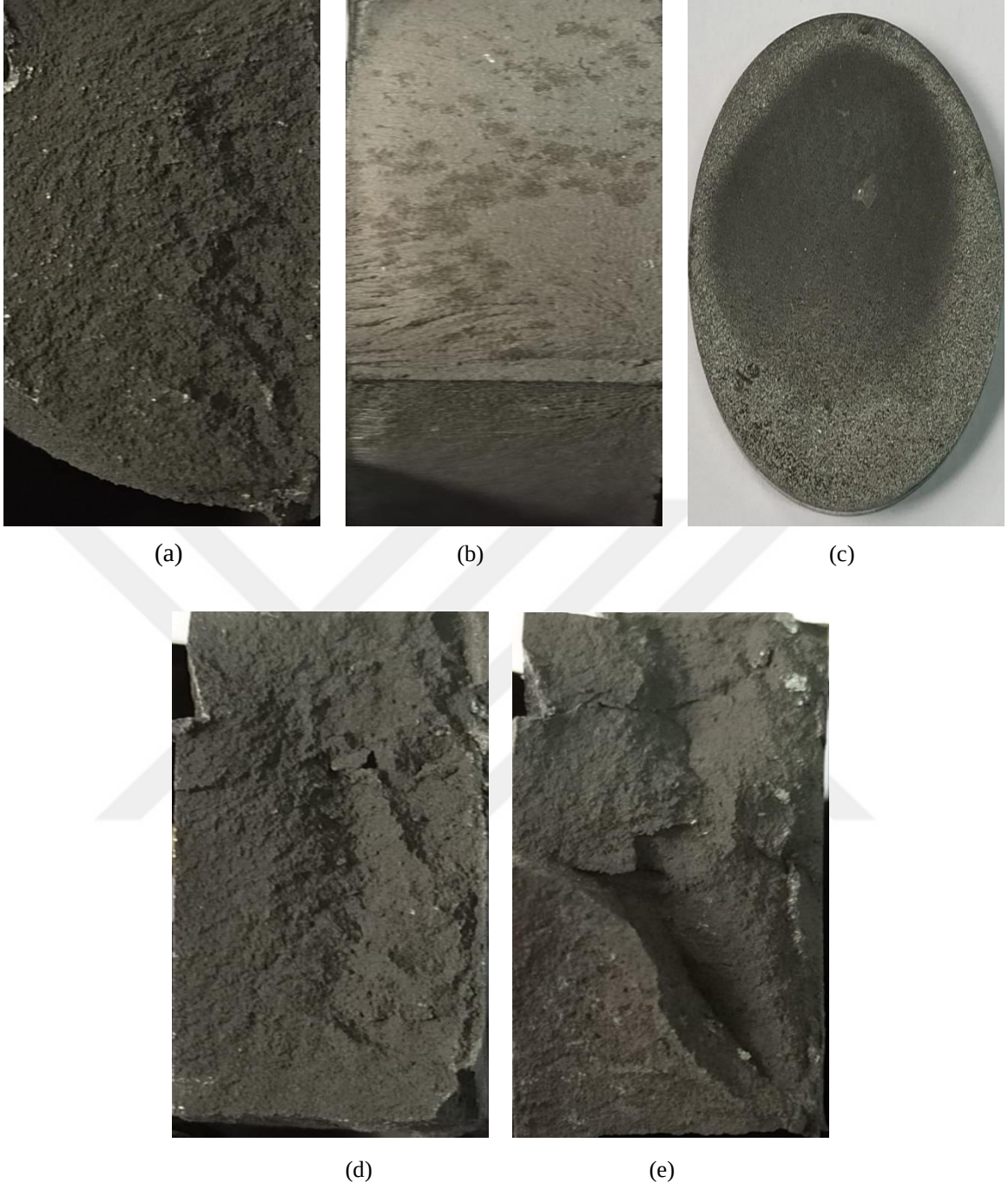
şekil 6.20. Balistik uca sahip test cihazının numune yzeyine çarpma anı



Şekil 6.21. AA2024/Al₂O₃ nano kompozit malzemelerin balistik test sonrası makro yapı görüntüleri (a)A_{0.5}, (b)A_{1.0}, (c)A_{2.0}, (d)A_{3.0}, (e)A_{5.0}



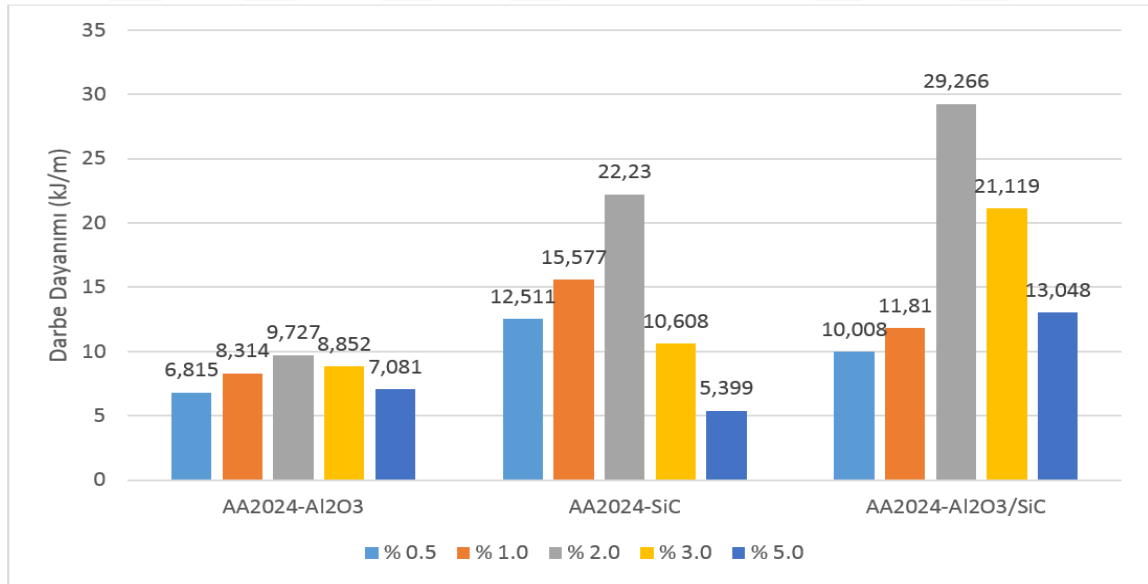
Şekil 6.22. AA2024/SiC nano kompozit malzemelerin balistik test sonrası makro yapı görüntüleri (a)S_{0.50}, (b)S_{1.0}, (c)S_{2.0}, (d)S_{3.0}, (e)S_{5.0}



Şekil 6.23. AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit nano kompozit malzemelerin balistik test sonrası makro yapı görüntüleri (a)H_{0,50}, (b)H_{1,0}, (c)H_{2,0}, (d)H_{3,0}, (e)H_{5,0}

Tablo 6.5. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC kompozitlerin ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozitlerin balistik testleri sonucu darbe dayanım değerleri

Numune Kodu	Takviye Malzemesi	Darbe Dayanımı (kJ/m)
AA2024	-	5,004
A _{0.5}	Al ₂ O ₃	6,815
A _{1.0}		8,314
A _{2.0}		9,727
A _{3.0}		8,852
A _{5.0}		7,081
S _{0.5}	SiC	12,511
S _{1.0}		15,577
S _{2.0}		22,230
S _{3.0}		10,608
S _{5.0}		5,399
H _{0.5}	Al ₂ O ₃ - SiC	10,008
H _{1.0}		11,810
H _{2.0}		29,266
H _{3.0}		21,119
H _{5.0}		13,048



Şekil 6.24. AA2024/Al₂O₃, AA2024/SiC kompozitlerin ve AA2024/Al₂O₃-SiC hibrit kompozitlerin balistik testleri sonucu darbe dayanım değerlerinin grafik değerleri

Yapılan balistik test sonuçları incelendiğinde; grafiklerdeki pik yapan tepe noktalar, çarpma anında elde edilen en yüksek darbe dayanım değerlerini vermektedir. Numuneler içerisinde %2 SiC ve %2 Hibrit kompozit malzemeler hariç diğer kompozit malzemeler büyük ölçüde dağılmış ve parçalanmıştır. Al_2O_3 ve SiC takviyelerinin yapının %2 takviyeye kadar sertlik, çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiği, bunun sonucu olarak %2 takviye oranlarında hedeflerin balistik performanslarının arttığı, takviye oranının %2' nin üzerine çıktığında ise balistik performans değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu duruma artan takviye oranına bağlı olarak meydana gelmesi muhtemel kırılma intermetalik fazların neden olduğu düşünülmektedir.

Bu takviye oranında özellikle %2 SiC ve %2 Al_2O_3 /SiC takviye oranına sahip nano kompozit malzemelerin hem toz metalürjisi ile üretim hem de balistik başatım için zırh malzemesi olarak kullanılabildiği sonucuna varılmıştır.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Toz Metalurjisi (T/M) yöntemi kullanarak üretilen AA2024 matrisli Al_2O_3 ve SiC takviyeli hibrit nanokompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı oranlarda AA2024/ Al_2O_3 , AA2024/SiC ve AA2024/ Al_2O_3 -SiC toz karışımları hazırlanarak 560 °C sıcaklıkta 120 dk. Sürede 500 MPa basınçta sıcak presleme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

1. AA2024 matrisli Al_2O_3 ve SiC takviyeli hibrit nanokompozitlerin malzemeler toz metalurjisi yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir.
2. Kompozit tozlarının öğütme süresi olarak 4 saat olarak belirlenmiştir. Yapılan mekanik alaşımlama sonucunda Al_2O_3 ve SiC takviye malzemeleri matris içerisinde iyi bir homojen dağılım gösterdiği ve mikroyapı açısından en iyi homojen dağılımın %2 takviye içeren malzemelerde olduğu görülmüştür.
3. Mikrosertlik analizleri incelendiğinde; takviye oranının artmasıyla birlikte üretilen numunelerin sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Nano kompozit malzemeler arasında en yüksek sertlik değerini SiC takviyeli S_{5.0} koduna sahip (159 BSD) kompozit malzeme göstermiştir.
4. Nano kompozit ve hibrit kompozit malzemelerde yoğunluk değerleri, artan takviye miktarı ile azalmıştır. Bunun yanı sıra artan takviye oranı ile birlikte gözeneklilik değerleri artış göstermiştir.
5. Çekme testleri incelendiğinde; nano kompozit malzemeler içerisinde en iyi çekme mukavemeti değerini %2 takviye oranına sahip kompozit malzemelerin verdiği tespit edilmiştir. Ancak %2' den sonraki artan takviye oranıyla birlikte artan topaklanma miktarıyla malzemelerin çekme mukavemetinde azalmalar meydana gelmiştir. Çekme deneyleri sonucu AA2024 / Al_2O_3 , AA2024 / SiC nano kompozit malzemelerin ve AA2024 / Al_2O_3 -SiC hibrit nano kompozit malzemelerin çekme deneyleri sonucu sırasıyla; 310.6 MPa, 352.3 MPa ve 339.2 MPa 'dır.
6. Nano kompozit ve hibrit kompozit malzemelerin XRD grafiklerine bakıldığında; Al, Al_2O_3 , SiC ve Al_2Cu fazları tespit edilmiştir.
7. Korozyon testleri incelendiğinde, bütün kompozit malzemeler arasında en iyi korozyon direncine sahip H_{5.0} hibrit kompozit malzemesi olarak tespit edilmiştir. H_{5.0} Korozyon hızı 0.61 mpy olarak ölçülmüştür. Korozyon dayanımının en düşük olduğu kompozitler ise SiC takviyeli kompozitler olduğu tespit edilmiştir. Korozyon dayanımının yüksek olmasının sebebi olarak Al_2Cu faz miktarının yüksek olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Genel itibariyle takviye oranı arttıkça korozyon dayanımlarında düşmeler

meydana gelmektedir. Ancak %2 takviye oranıyla beraber korozyon dayanımlarında sürekli olarak artış olduğu gözlemlenmiştir.

8. Balistik test sonuçları incelendiğinde; bütün kompozit malzemeler arasındaki en iyi mukavemet değerini %2 takviye oranıyla 29,266 kJ/m değeri ile H_{2,0} hibrit nano kompozit malzemesinin verdiği tespit edilmiştir.



8. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Toz Metalurjisi (T/M) yöntemi kullanarak üretilen AA2024 matrisli Al_2O_3 ve SiC takviyeli hibrit nanokompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilmek istenen fakat imkânsızlıklardan dolayı gerçekleştirilemeyen bazı çalışmalar yapılamamıştır. Bundan sonraki aşamada aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilebilir.

1. Nano kompozit malzemelerin NaCl dışında farklı ortamlarda korozyon davranışları incelenebilir.
2. Hibrit nanokompozitlerin soğuk ya da sıcak deformasyon yöntemleri ile gözeneklilik miktarlarını minimize ederek fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirilebilir.
3. Nano kompozit ve hibrit kompozit malzemelere yaşlandırma işlemi uygulanarak mekaniksel özellikleri iyileştirilebilir.
4. Üretilen nano kompozit malzemelerin mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinde geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çanakçı, A. ve Varol, T., 2011. Aşamalı İşlem Kontrol Katkısı Tekniğinin Yüksek Enerjili Öğütme İşlemi Üzerine Etkisi, 1. Ulusal Nanoteknoloji Kongresi, Haziran 2011, İstanbul Bildiriler Kitabı: 8-16.
- [2] Azaklı, M. A., Aslan, S., Akbulut, H. ve Bindal, C., 2003. Etial 171-SiC-Grafit Hibrit Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi Ve Mikroyapısı, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 2, 2003.
- [3] Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, K.S., Bhat, T.B., An experimental study on the ballistic behavior of some metallic armour materials against 7.62mm deformable projectile, Materials and Design, 31, 3308-3316, 2010
- [4] Rao, R.N., Das, S., Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites. Mater Des 2011, 32, 1066–1071, 2011
- [5] Özkan, S., Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007
- [6] Hasan H., Ferhat G., B4C / Al Kompozitlerin Takviye Hacim Oranına Bağlı Olarak Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, SDU International Technologic Science 2(1), 15-21, 2010
- [7] Topçu, I., Gülsoy, H.O., Kadioğlu, N., Güllüoğlu, A.N., Processing and Mechanical Properties of B4C Reinforced Al Matrix Composites, Journal of Alloys and Compounds, 482(1-2), 516-521, 2009
- [8] Karakoç H. Ulutaş A., Çınici H., B4C/SiC/Al₂O₃ Parçacık Takviyelendirilmiş Alüminyum Sandviç Köpük ile Ramor 500 Zırh Çeliğinin bir araya getirilmesi ve Balistik Performansının Araştırılması, Politeknik Dergisi. 2020; 23(2): 297-310.
- [9] Pul M., Baydaroğlu V., B4C/SiC Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Balistik Performanslarının Modellenmesi, Politeknik Dergisi, 2020; 23(2): 383-392.
- [10] Karabacak A.H., Çanakçı A., Özkaya S., Çelebi M., Yalçın E.D., Production And Properties Of AL2024-2 WT.% (SiC-B4C) Hybrid Nanocomposite , Technological Applied Sciences, cilt.13, ss.29-33, 2018.
- [11] Rahamian, M., Parvin, N. ve Ehsani, N., Investigation of Particle Size and Amount of Alumina on Microstructure and Mechanical Properties of Al Matrix Composite Made by Powder Metallurgy, Materials Science and Engineering, 527(4-5), 1031-1038, 2010
- [12] Zhang, L., Wang, Z., Li, Q., Wu, J., Shi, G., Qi, F. ve Zhou, X., Microtopography and mechanical properties of vacuum hot pressing Al/B4C composites, Ceramics International, In Press , 2017.
- [13] Candan, S., An investigation on corrosion behaviour of pressure infiltrated Al–Mg alloy/SiCp composites, Corrosion Science , 51 (2009) 1398.
- [14] Mubiayi, M.P. ve Akinlabi, E.T., Characterization of the intermetallic compounds in aluminium and copper friction stir spot welds, Materials Today: Proceedings, 4 (2017) 533–540.
- [15] Xiao-min, Z., Jia-kang, Y., ve Xin-yu, W., Microstructure and properties of Al/Si/SiC composites for electronic packaging, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22 (2012) 1686-1692.

- [16] B. Plonka, K. Remsak, M. Rajda ve J. Wilczewski, "Light Metal Alloys in Multilayer Passive Armours For Military Vehicles," *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*, p. 38, 2015.
- [17] Yalçın E., Çanakçı A., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen ZA27/Grafen Nanokompozitlerin Korozyon Davranışı, *NWSA*. 2018; 13(2): 157-164.
- [18] Karabulut H., Çıtak R., Çinici H., Mekanik Alaşımlama Süresinin Al + % 10 Al₂O₃ Kompozitlerde Eğme Dayanımına Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2014; 28(3): 0-.
- [19] Güven Ş., Delikanlı Y., AA 2024 Alüminyum Alaşımında Çökelme Sertleşmesinin Mekanik Özelliklere Etkisi, *Teknik Bilimler Dergisi*, 2012; 2(2): 13-20.
- [20] Varma, G. S., Reddy, K. S., Reddy, S., Sai, K. V., & Kumar, S. M., 2018, The effect of TiC on microstructure and mechanical properties of AA2024 MMCS. In *IOP 60 Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 376, No. 1, p. 012085). IOP Publishing.
- [21] Muthusamy, S., Pandi, G., 2018, Investigation of mechanical and corrosion properties of AA2024–B4C–TiC hybrid metal matrix composites, *Surface Review and Letters*, 25(05), 1850109.
- [22] Nazik, C., 2013, Alüminyum matrisli B4C parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 45-70.
- [23] Smith, W.F., *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Çeviri Kınıkoğlu, N.G., 3. Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2001.
- [24] Chavla, N., ve Chavla, K.K., *Metal Matrix Composites*, Springer Science Business Media, Inc., Boston, 5-102, 2006.
- [25] Hiçyılmaz N., Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerinin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Uni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [26] Taşçı, U., AA2014-B4C Metal Matrisli Kompozitinin Toz Metalurjisi Ve İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilirliği, Karakterizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [27] Udupa G., Rao S. S., Gangadharan K. V. Functionally graded composite materials: an overview, *Procedia Materials Science*, 5, 1291-1299 (2014).
- [28] Yamada A., Sasabe H., Osada Y., Shiroda Y., & Yamamoto I. Concepts of Hybrid Materials, *Hybrid Materials –Concept and Case Studies*, ASM International, OH, USA (1989).
- [29] Akbulut, H.(2000), Sakarya Üniversitesi Kompozit Malzemeler Ders Notları.
- [30] Akın, G. (2006), Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [31] Taha M.A., Practicalization of cast metal matrix composites (MMCs), *Materials & Design*, 22 (6), 431-441, (2001).

- [32] Bulut M., Türkiye’de Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara (2014).
- [33] Bengal M.O.M. and Shivanand H.K., Effects of reinforcements content and ageing durations on wear characteristics of Al (6061) based hybrid composites, *Wear*, Volume 262, Issue 5-6, Pages 759-763, (2007).
- [34] Hassan S.B. ve Aigbodion V.S. Effects of Eggshell on the Microstructures and Properties of Al–Cu–Mg/Eggshell Particulate Composites. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 27 (2015).
- [35] Bilici İ., Ti-Fe Alaşımlarından Basıncsız İnfiltrasyon Yöntemiyle Seramik Metalik Kompozit Malzeme Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [36] Lambourne, A. (2007). Spray forming of Si-Al alloys for thermal management applications.
- [37] Abbasipour B., Niroumand B. ve Monir, Vaghefi S. M., Compocasting of A356- CNT Composite, *Trans Nonferrous Met. Soc.*, 20 (2010) 1561-1566.
- [38] Sasaki G., Yoshida M., Fuyama N. ve Fujii T., Modeling of Compocasting Process and Fabrication of AZ91D Magnezyum Alloy Matrix Composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131 (2002) 151-155.
- [39] Dikici B., Bedir F. ve Gavgalı M., Al-TiC In-Situ Nano Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretilmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), Mayıs 2009, Karabük, Bildiriler Kitabı: 13-15.
- [40] Hongming W., Guirong L., Yutao Z. ve Gang C., In-Situ Fabrication and Microstructure of Al₂O₃ Particles Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Materials Science and Engineering A*, 527 (2010) 2881-2885.
- [41] Goh C. S., Soh K. S., Oon P. H. ve Chua B. W., Effect of Squeeze Casting Parameters On The Mechanical Properties of AZ91-Ca Mg Alloys, *Materials And Design*, 31 (2010) 50-53.
- [42] Coupard, D., Goni, J. ve Sylvain, J. F. (1999). Fabrication and squeeze casting infiltration of graphite/alumina preforms. *Journal of Materials Science* 34 5307 –5313.
- [43] Gündüz O., Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle ZrN Kaplamaların Farklı Bias Voltajlarında Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
- [44] Kopeliovich, D., *Materials Engineering*, www.substech.com, Substances & Technologies, 2007.
- [45] Jacobs A. J., ve Kilduff T.F., *Engineering Materials Technology: Structure, Processing, Properties and Selection*, 645, 5. Edition, 357-397, Prentice-Hall Inc., USA, 2003.
- [46] Moustafa S. F., Abdel-Hamid Z. ve Abd-Elhay A. M., Copper Matrix SiC and Al₂O₃ Particulate Composites by Powder Metallurgy Technique, *Materials Letters*, 53 (2002) 244-249.
- [47] Özkaya S., Alüminyum-B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretimi, İç Yapı, Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
- [48] German, R.M., 1984. *Powder metallurgy science*. MPIF, 278. 133-136 s, USA.

- [49] Newkirk J. W. ve Kosher R. A., Designing with Powder Metallurgy Alloys, Handbook of Mechanical Alloy Design, (2004).
- [50] Hale R., Powder Metallurgy Process and Applications, AE 510 Research Project, University of Kansas, Lawrence, 2003.
- [51] Sağırılı A., Mekanik Eksantrik Toz Metal Presi ve Toz Metal Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1990.
- [52] Palacı Y., Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [53] Kang, S.J.L., 2005. Sintering: Densification, Grain Growth, and Microstructure, Elsevier, Butterworth-Heinemann, Amsterdam.
- [54] German, R.M., 1994. Powder Metallurgy Science, Princeton, New Jersey.
- [55] Suryanarayana, C. (2004). Mechanical Alloying and Milling. Marcel Dekker, New York.
- [56] Hunt, J.W., ve Herling, D.R., Aluminum Metal Matrix Composites, Advanced Materials & Processes, 162 (2004) 39.
- [57] Suryanarayana C., Ivanov E. ve Boldyrev V., The Science and Technology of Mechanical Alloying, Materials Science and Engineering A, 304-306 (2001) 151-158.
- [58] Özyürek D., Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Titanyum Bazlı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [59] Lowry E.D., Interior Ballistics, Doubleday & Company, New York, 1968
- [60] Öztürk A. R. Dış balistik, Ankara: Makine Kimya Endüstrisi Kütüphanesi, 174-178 (1988).
- [61] Thomas J.H., Elements of Ordnance, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1938
- [62] Rosenberg Z. and Dekel, E. Terminal ballistics. Berlin: Springer Heidelberg, 267-291 (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Vahittin KAÇMIŞ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

© 2006 The Authors
Journal compilation © 2006 Blackwell Publishing Ltd


 Türkiye Cumhuriyeti
 Millî Eğitim Bakanlığı
 Türkiye Cumhuriyeti
 Gençlik ve Spor Bakanlığı

© 2006 The Authors
