

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**TiC, KARBON NANOTÜP VE GRAFEN TAKVİYELİ 6061 ALÜMİNYUM
ESASLI HİBRİT KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE
ÜRETİMİ, ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ**

TÜRKER TÜRKÖĞLU

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sare ÇELİK (Tez Danışmanı)**
 Prof. Dr. Ali ORAL
 Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ
 Doç. Dr. Uğur ÇAVDAR
 Dr. Öğr. Üyesi Ege Anıl DİLER

BALIKESİR, EYLÜL - 2022

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**TiC, Karbon Nanotüp ve Grafen Takviyeli 6061 Alüminyum Esaslı Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi, Özelliklerinin İncelenmesi ve Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Türker TÜRKOĞLU

(imza)

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından
(2020/038) nolu proje ile desteklenmiştir.**

ÖZET

TİC, KARBON NANOTÜP VE GRAFEN TAKVİYELİ 6061 ALÜMİNYUM ESASLI HİBRİT KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

TÜRKER TÜRKÖĞLU

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SARE ÇELİK)

BALIKESİR, EYLÜL - 2022

Bu çalışmada, farklı üretim parametrelerinin mikro ve nano boyuttaki çeşitli takviyelerle kuvvetlendirilerek üretilen alüminyum esaslı kompozitlerin (Al6061/TiC, Al6061/MWCNT, Al6061/GNP, Al6061/TiC/MWCNT, Al6061/TiC/GNP, Al6061/MWCNT/GNP) özelliklerine olan etkileri makine öğrenmesi metodu kullanılarak deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Kompozitler toz metalurjisi yöntemi kullanılarak sıcak pres cihazıyla üretilmiştir. Üretim işlemlerini takiben metalografik işlemler, SEM-EDS, Micro-CT, Raman spektroskopisi, yoğunluk, sertlik, basma ve aşınma testlerine ek olarak elektriksel iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS incelemeleri neticesinde takviye gruplarının alüminyum içerisinde genellikle uygun şekilde dağıldığı belirlenmiştir. SEM-EDS incelemelerinde elde edilen sonuçlar Micro-CT analizleriyle de doğrulanmıştır. Sertlik testleri sonrasında kompozit grupları içerisinde en yüksek sertlik Al6061/TiC/GNP kompozitte 98 HV olarak saptanmıştır. Aşınma testleri neticesinde Al6061/TiC/GNP kompozit grubunda takviyesiz Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında maksimum 33.33 kat aşınma direnci artışı elde edilmiştir. Üretim parametrelerine bağlı olarak kompozitlerin aşınma direnci ve basma dayanımı sonuçları yapay sinir ağı yöntemiyle optimize edilmiştir. Deneysel sonuçlar ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen tahmini değerler karşılaştırılmış ve modelin yüksek oranda tahmin doğruluğuna sahip olduğu saptanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Metal matrisli kompozitler, toz metalurjisi, makine öğrenimi

Bilim Kod / Kodları : 91417, 91421, 91437

Sayfa Sayısı : 144

ABSTRACT

PRODUCTION OF TiC, CARBON NANOTUBES AND GRAPHENE REINFORCED 6061 ALUMINUM BASED HYBRID COMPOSITES BY POWDER METALLURGY, INVESTIGATION AND ANALYSIS OF PROPERTIES

PH.D THESIS

TÜRKER TÜRKOĞLU

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. SARE ÇELİK)

BALIKESİR, SEPTEMBER - 2022

In this study, the effects of different production parameters on the properties of aluminum-based composites (Al6061/TiC, Al6061/MWCNT, Al6061/GNP, Al6061/TiC/MWCNT, Al6061/TiC/GNP, Al6061/MWCNT/GNP) produced by strengthening with various reinforcements in micro and nano size were investigated experimentally and statistically by using machine learning method. Composites were produced by using the powder metallurgy. Following the manufacturing processes; metallographic processes, SEM-EDS, Micro-CT, Raman spectroscopy, density, hardness, compression and wear tests, and electrical conductivity measurement were carried out. SEM-EDS examinations revealed that it was determined that the reinforcement groups were generally properly distributed in aluminum. The results were also confirmed by Micro-CT. After hardness tests, the highest hardness among composite groups was determined as 98 HV in Al6061/TiC/GNP composite. As a result of the wear tests, a maximum of 33.33 times increase in wear resistance was obtained in the Al6061/TiC/GNP composite group when compared to the unreinforced Al6061 material. The wear resistance and compressive strength values of the composites were optimized using artificial neural network depending on the production factors. The artificial neural network model's predicted values and the experimental results were compared, and it was found that the model had a high level of prediction accuracy.

KEYWORDS: Metal matrix composite, powder metallurgy, machine learning

Science Code / Codes : 91417, 91421, 91437

Page Number : 144

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	viii
SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı.....	2
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	5
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	5
2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler ve Özellikleri	6
2.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler ve Özellikleri.....	7
2.1.3 Metal Matrisli Kompozitler ve Üretim Yöntemleri	7
2.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri.....	11
2.2.1 Karıştırma Döküm Yöntemi.....	11
2.2.2 Sıkıştırma Döküm	12
2.2.3 Püskürtme Yöntemi.....	13
2.3 Katı Hal Üretim Yöntemleri	13
2.3.1 Sürtünme Karıştırma Yöntemi	13
2.3.2 Toz Metalurjisi	14
2.4 Metal Toz Üretim Teknikleri	15
2.5 Mekanik Alaşımlama	16
2.6 Sinterleme	17
2.7 Karıştırma Prosesleri.....	21
3. YAPAY SİNİR AĞLARI	24
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	28
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
5.1 Materyal	38
5.2 Yöntem.....	39
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	49
6.1 Tane Boyut Analizi Sonuçları.....	51
6.2 Tozların SEM Görüntüleri	51
6.3 Raman Analizi	52
6.4 Kompozitlerin SEM/EDS İncelemesi	57
6.5 Kompozitlerin Yoğunluk Hesapları	62
6.6 Kompozitlerin Sertlik Testi Sonuçları	67
6.7 Kompozitlerin Micro-CT Analizleri	72
6.8 Aşınma Test Sonuçları ve Optimizasyonu.....	75
6.9 Aşınma İzleri SEM İncelemesi	91

6.10	Basma Test Sonuçları ve Optimizasyonu	103
6.11	Elektriksel İletkenlik Sonuçları	118
7.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	122
8.	KAYNAKLAR	127
	ÖZGEÇMİŞ	142



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Tez çalışma prosesi adımları.....	4
Şekil 2.1: Metal matrisli kompozitlerin sınıflandırılması.	10
Şekil 2.2: Karıştırma döküm prosesi.	12
Şekil 2.3: Sıkıştırma döküm yöntemi.....	13
Şekil 2.4: Sürtünme karıştırma yöntemi.	14
Şekil 2.5: Mekanik alaşımlama prosesi.....	17
Şekil 2.6: İki parçacık sinterleme geometrisi.	18
Şekil 2.7: Sinterleme kademeleri.	19
Şekil 2.8: Sıcak pres cihazı şematik gösterim.	20
Şekil 2.9: Spark plazma sinterleme prosesi şeması.....	21
Şekil 3.1: Yapay sinir ağı temsili şeması.	25
Şekil 3.2: Yapay sinir ağlarında kullanılan bazı aktivasyon fonksiyonları.....	26
Şekil 5.1: Tez prosesinin işlem adımları.	39
Şekil 5.2: Çalışmada uygulanan ultrasonikasyon işlemi.....	40
Şekil 5.3: Mekanik alaşımla cihazı.	40
Şekil 5.4: Çalışmada kullanılan sıcak pres cihazı.	41
Şekil 5.5: Zımparalama ve parlatma işleminin yapıldığı cihaz.....	42
Şekil 5.6: Deneyde kullanılan Arşimet terazisi.....	43
Şekil 5.7: Çalışmada kullanılan parçacık boyut analiz cihazı.....	43
Şekil 5.8: Çalışma kapsamında kullanılan SEM cihazı.	44
Şekil 5.9: Raman spektroskopisi cihazı.	45
Şekil 5.10: Çalışmada kullanılan Micro-CT cihazı.....	45
Şekil 5.11: Çalışmada elektriksel iletkenlik ölçümlerinde kullanılan cihaz.	46
Şekil 5.12: Çalışmada kullanılan univarsal aşınma test cihazı.	46
Şekil 5.13: Sertliklerin testlerinin gerçekleştirildiği mikro sertlik cihazı.	47
Şekil 5.14: Çalışmada kullanılan universal basma test cihazı.	48
Şekil 6.1: Çalışmada kullanılan tozların parçacık boyut analizleri a) Al6061 b) TiC c) GNP d) MWCNT.....	51
Şekil 6.2: Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri a) Al6061 b)TiC c)GNP d)MWCNT.....	52
Şekil 6.3: Raman spektroskopisi sonuçları a)GNP b)MWCNT c)Al/GNP d)Al/MWCNT.....	53
Şekil 6.4: Raman analiz sonuçları a) Analiz haritalaması b) Al6061/GNP/MWCNT c) Al6061/TiC/GNP d) Al6061/TiC/MWCNT.....	54
Şekil 6.5: Al6061/4 TiC/1GNP kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri a) Elementel analiz b) kompozit haritalama c) Karbon d) Alüminyum e) Ti.....	57
Şekil 6.6: Al6061/4 TiC/1.5 GNP kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri a) Elementel analiz b) kompozit haritalama c) Karbon d) Alüminyum e) Ti... ..	58
Şekil 6.7: Al6061/4 TiC/1MWCNT kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri a) Elementel analiz b) kompozit haritalama c) Karbon d) Alüminyum e) Ti... ..	59
Şekil 6.8: Al6061/4 TiC/1.5 MWCNT kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri.	60
Şekil 6.9: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.	63
Şekil 6.10: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.	64

Şekil 6.11: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri	
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.	65
Şekil 6.12: Al6061 malzemesinden alınan örnek sertlik ölçümü.....	67
Şekil 6.13: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin vickers sertlik değişimleri	
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.	68
Şekil 6.14: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin vickers sertlik değişimleri	
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.	69
Şekil 6.15: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin vickers sertlik değişimleri	
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.	70
Şekil 6.16: Micro-CT analizi temsili şeması.....	72
Şekil 6.17: Al6061/4 TiC kompozitin Micro-CT analizi.	73
Şekil 6.18: Al6061/8 TiC kompozitin Micro-CT analizi.	73
Şekil 6.19: Al6061/12 TiC kompozitin Micro-CT analizi.	74
Şekil 6.20: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri.....	84
Şekil 6.21: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri.	85
Şekil 6.22: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri.....	85
Şekil 6.23: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen aşınma kaybı sonuçlarının karşılaştırılması.	87
Şekil 6.24: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin aşınma kaybı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.	87
Şekil 6.25: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen aşınma kaybı sonuçlarının karşılaştırılması.	88
Şekil 6.26: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.	88
Şekil 6.27: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen aşınma kaybı sonuçlarının karşılaştırılması.	89
Şekil 6.28: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.	89
Şekil 6.29: Çalışmada kullanılan hibrit kompozit gruplarının istatistiksel modelden elde edilen aşınma kaybı etki oranları a) Al6061/TiC/GNP b) Al6061/TiC/MWCNT c) Al6061/GNP/MWCNT.	90
Şekil 6.30: Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü.	91
Şekil 6.31: Al6061/GNP kompozitin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri.....	92
Şekil 6.32: Al6061/MWCNT kompozitin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri.	92
Şekil 6.33: Al6061/TiC/0.5 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri	
a) Al6061/4 TiC/0.5 GNP b) Al6061/8 TiC/0.5 GNP c) Al6061/12 TiC/0.5 GNP.....	93
Şekil 6.34: Al6061/TiC/1 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri	
a) Al6061/4 TiC/1 GNP b) Al6061/8 TiC/1 GNP c) Al6061/12 TiC/1 GNP. .	94
Şekil 6.35: Al6061/TiC/1.5 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri	
a) Al6061/4 TiC/1.5 GNP b) Al6061/8 TiC/1.5 GNP c) Al6061/12 TiC/1.5 GNP.....	95
Şekil 6.36: Al6061/TiC/0.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) Al6061/4 TiC/0.5 MWCNT b) Al6061/8 TiC/0.5 MWCNT c) Al6061/12 TiC/0.5 MWCNT.	96
Şekil 6.37: Al6061/TiC/1 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) Al6061/4 TiC/1 MWCNT b) Al6061/8 TiC/1 MWCNT c) Al6061/12 TiC/1 MWCNT.	97

Şekil 6.38: Al6061/TiC/1.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) Al6061/4 TiC/1.5 MWCNT b) Al6061/8 TiC/1.5 MWCNT c) Al6061/12 TiC/1.5 MWCNT.	98
Şekil 6.39: Al6061/GNP/0.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) Al6061/0.5 GNP/0.5 MWCNT b) Al6061/1 GNP /0.5 MWCNT c) Al6061/1.5 GNP /0.5 MWCNT.....	99
Şekil 6.40: Al6061/GNP/1 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) Al6061/0.5 GNP/1 MWCNT b) Al6061/1 GNP /1 MWCNT c) Al6061/1.5 GNP /1 MWCNT.....	100
Şekil 6.41: Al6061/GNP/1.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) Al6061/0.5 GNP/1.5 MWCNT b) Al6061/1 GNP /1.5 MWCNT c) Al6061/1.5 GNP /1.5 MWCNT.....	101
Şekil 6.42: Al6061/TiC/1.5 GNP kompozitin aşınma sonrası EDS spektrumu.....	102
Şekil 6.43: Al6061/TiC/1.5 MWCNT kompozitin aşınma sonrası EDS spektrumu.	102
Şekil 6.44: Basma test cihazı kompozit yerleşimi.	103
Şekil 6.45: Al6061/TiC/GNP Kompozitlerin basma testi sonuçlar.	111
Şekil 6.46: Al6061/TiC/MWCNT Kompozitlerin basma testi sonuçlar.	112
Şekil 6.47: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma testi sonuçlar.	113
Şekil 6.48: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen basma dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.	114
Şekil 6.49: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.	114
Şekil 6.50: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen basma dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.....	115
Şekil 6.51: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.	115
Şekil 6.52: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen basma dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.....	116
Şekil 6.53: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.	116
Şekil 6.54: Çalışmada kullanılan hibrit kompozit gruplarının istatistiksel modelden elde edilen basma dayanımı etki oranları a) Al6061/TiC/GNP b) Al6061/TiC/MWCNT c) Al6061/GNP/MWCNT.	117
Şekil 6.55: Elektriksel iletkenlik ölçüm sistemi.....	118
Şekil 6.56: Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin akım-voltaj değişimi.....	119
Şekil 6.57: Al6061/GNP ve Al6061/MWCNT kompozitlerin akım-voltaj değişim eğrileri.....	120
Şekil 6.58: Al6061, Al6061/GNP ve Al6061/MWCNT malzemelerinin elektriksel iletkenlik karşılaştırılması.....	120

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1: Çalışmada kullanılan Al6061 malzemesinin elemental analizi.	38
Tablo 6.1: Çalışmada deney tasarımı yapılan birinci seri üretim grubu.	49
Tablo 6.2: Çalışmada deney tasarımı yapılan ikinci seri üretim grubu.	50
Tablo 6.3: ID/IG oranlarının diğer çalışmalarla kıyaslanması.	56
Tablo 6.4: Al/1 MWCNT kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.	76
Tablo 6.5: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.	78
Tablo 6.6: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.	80
Tablo 6.7: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.	82
Tablo 6.8: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin basma dayanımı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.	105
Tablo 6.9: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.	107
Tablo 6.10: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.	109

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

MPa	: Megapaskal
°C	: Derece santigrat
μ	: Mikron
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
GNP	: Grafen nano plaka
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
TiC	: Titanyum karbür
B₄C	: Bor karbür
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
SiC	: Silisyum karbür
ZrO₂	: Zirkonyum oksit

ÖNSÖZ

Gerek akademik hayatımda gerekse tez çalışmamın her adımında bana yol gösteren, kıymetli bilgilerini ve zamanını benden hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Sare ÇELİK'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Çalışmam süresince değerli önerileri ve bilgileriyle bana her zaman yardımcı olan değerli hocalarım Prof. Dr. Ali ORAL ve Dr. Öğr. Üyesi Ege Anıl DİLER'e gönülden teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam esnasında göstermiş olduğu yardımlardan dolayı Makine Müh. Ömer Furkan ERSÖZ'e ayrıca teşekkür ederim.

Nefes almaya başladığım ilk günden bugüne kadar her zaman ve her koşulda yanımda olan, beni bu günlere getiren sevgili Aileme gönülden minnettarlığımı ve sonsuz şükranlarımı bir borç bilirim.

Balıkesir, 2022

Türker TÜRKOĞLU

1. GİRİŞ

Enerji verimliliğinin artırılmasının zaruri hale gelmesiyle birlikte malzeme biliminin önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde malzeme bilimi geliştirilebilen benzersiz özellikleri sayesinde havacılık, uzay, otomotiv, medikal, sensör, elektronik gibi alanlarda önemli rol oynamaktadır. Kompozit malzemeler olarak tanımlanan iki veya daha fazla bileşenin bir araya gelerek üstün özellikli malzeme grubu olarak bilinen malzemelerin her geçen gün kullanımı artmaktadır [1, 2]. Metal matrisli kompozitler üzerinde son zamanlarda özellikle üretim maliyeti, malzeme tasarımı, karakterizasyon, matris-takviye ara yüzey kontrolü konularında birçok çalışmak yapılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin çeşitli alanlarda artan kullanımı bu malzeme gruplarında iyileştirmeyi zaruri hale getirmiştir. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde literatürde matris fazı olarak Al, Mg, Ti gibi metal ve alaşımları kullanırken, takviye fazı olarak ise genellikle B_4C , Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 gibi takviyeler kullanılmaktadır [3–7]. Katı hal ve sıvı hal olmak üzere metal matrisli kompozitler farklı üretim teknikleriyle üretilmektedir [8, 9]. Global ölçekte üretilen metal matrisli kompozitlerin yarısından fazlası otomotiv sanayisinde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde performans artışı, yakıt tasarrufu, çevresel etkiler ve güvenlik gibi etmenler sebebiyle önemli avantajlar sağlanmaktadır. Bir çok otomobil parçası bu malzeme grubundan imal edilmektedir. Örnek olarak; pistonlar ve bağlantı elemanları, fren aparatları, kardan şaftlarında metal matrisli kompozitlerin kullanımı mevcuttur [10, 11]. Toz metalurjisi bu gelişmelerin odağında hem mevcut bileşenlerin geliştirilmesinde hem de yeni bileşenlerin imalatında önemli bir rol oynadığı açıktır [12].

Metaller ve alaşımları endüstriyel alanda kullanılan en önemli malzeme çeşitleridir. Bu malzemelerin monolitik olarak zorlu şartlar altında kullanımı bazı sorunları beraberinde getirmektedir. Düşük mukavemet, düşük aşınma direnci, sıcaklık altında yapı bozulması gibi durumlar sonucunda yeni nesil metal matrisli kompozitler keşfedilmiştir. Ancak metal matrisli kompozitlerin üretiminde genellikle mikron boyutlu seramik takviyelerin kullanılmasıyla özellikler geliştirilebilse de seramik esaslı takviyelerin yapıya getirmiş oldukları gevreklik durumu bu tür kompozitlerin kullanılmasında çekinceler doğurduğu açıktır. Hibritizasyon metal matrisli kompozitler için bir diğer yeni ve önemli stratejik tasarım ve üretim şeklidir. Bu yöntemin amacı metal matris içerisine bir dizi hibrit takviyelerin ilave edilerek malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi esasına dayanmaktadır [13, 14]. Takviye gruplarının sinerjik etkileri benzersiz özelliklerin elde edilmesine olanak

sağlamaktadır. Son zamanlarda monolitik malzemelere alternatif oluşturarak yeni nesil malzemelere hibrit kompozitlerin öncülük edeceği düşünülmektedir. Üretim yöntemlerinin uygun seçilmesi nihai ürünün özelliklerini doğrudan etkilediği bilinmektedir [15, 16].

Bir makine öğrenmesi metodu olan yapay sinir ağları yönteminin de hem zamandan hem de maliyetten tasarruf oluşturabildiği düşünülerek hibrit kompozitlerin üretim parametreleri yapay sinir ağları yöntemiyle optimize edilmiştir. En uygun parametreler belirlenerek deneysel ve tahmini değerlerin korelasyonu incelenmiştir. Çalışma içeriği ve çıktıları ele alındığında, çalışmanın gerek akademik gerek endüstriyel çalışmalara ışık tutacağı, literatüre katkı sunacağı düşünülmektedir.

1.1 Çalışmanın Amacı

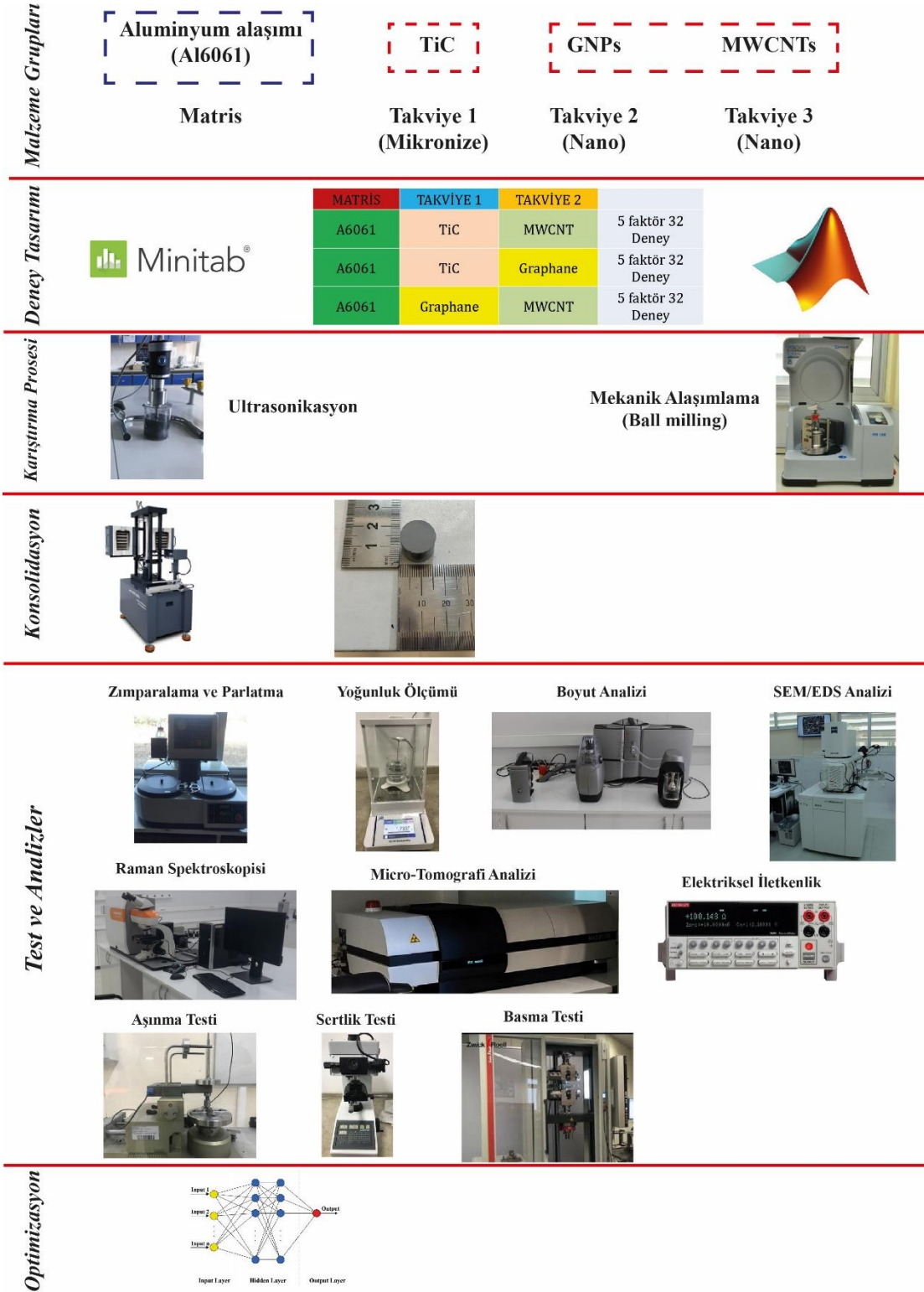
Tez çalışması kapsamında; Al6061 alaşımı matris faz, mikron boyutlu TiC (Titanyum Karbür) ve nano boyutlu GNP (Grafen Nano Plaka) ve MWCNT (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp) malzemeler takviye faz olarak seçilmiş olup, Al6061/TiC, Al6061/MWCNT, Al6061/GNP, Al6061/TiC/MWCNT, Al6061/TiC/GNP, Al6061/MWCNT/GNP kompozitler sıcak pres yoluyla başarıyla üretilmiştir. Ham malzeme diğer bir ifadeyle matris faz, Al6061'in takviyesiz özellikleriyle 2'li ve 3'lü kombinasyonların deney tasarımı yapılarak belirlenen üretim parametrelerinin kompozit malzemelerin özelliklerine etkileri kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Üretilen kompozitlerin yoğunluk, sertlik, basma dayanımı, aşınma gibi testlerin yanı sıra elektriksel iletkenlik, SEM/EDS görüntülemesi, Micro-CT incelemeleri gibi analizler de yapılmıştır. Tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulama adımları Şekil 1.1'de şema halinde sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan mikron ve nano boyutlu takviyelerin sahip olduğu bireysel özelliklerin hibrit yapı oluşturularak kompozit malzemede daha üstün özelliklerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Aşınma gibi endüstriyel alanda karşılaşılan problemlerin en önemlilerinden birisi olan sorun, farklı oranlarda kombine edilen takviyelendirme ve prosesleme işlemleriyle minimize edilmek hedeflenmiştir. Zor çalışma koşulları ve yüksek dış yükler altında çalışabilen malzeme üretimini sağlamak, çalışma kapsamında hedeflerden bir diğeri olarak öne çıkmaktadır.

Yeni nesil malzeme gruplarından ikisi olan MWCNT (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp) ve GNP (Grafen Nanoplaka) malzemelerinin sahip oldukları istisnai özelliklerin toz

metalürjik süreçlerde kullanılması, bu grupların farklı metallerle kombine edilerek kompozit yapı oluşturulması literatürde sınırlı olarak kalmıştır. Üretim prosesinin popüler makine öğrenmesi metodu olan yapay sinir ağı yöntemiyle optimize edilerek, maliyeti ve işlem süresini minimize etmenin yanı sıra üretilen malzemelerin özelliklerini iletirmek amaçlanmaktadır. Geleneksel monolitik malzemelerin sahip olmadığı özelliklerin yukarıda bahsedilen malzeme kombinasyonlarıyla elde edilmesi çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır.





Şekil 1.1: Tez çalışma prosesi adımları.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Son yıllarda yeni nesil malzeme olarak öne çıkan kompozit malzemeler; kimyasal açıdan birbirinden farklı iki veya daha fazla bileşenden oluşturulan malzeme grubudur. Kompozit malzemelerde matris ve takviye bileşenleri mevcuttur [8]. Takviye olarak ifade edilen bileşenden beklenen özellik taşıyıcı görev üstlenmesiyle, matris bileşen ise takviyeleri bir arada tutmaya ve desteklemeye yaramaktadır [17]. Kompozit malzeme üretimindeki amaç çok fonksiyonlu malzeme üretmektedir. Monolitik malzemelerin tek başına endüstriyel alanda zorlu çalışma ortamlarında gerek kimyasal açıdan gerekse mekanik özelliklerin sürdürülebilirliği açısından yetersiz kaldığı durumlar olmaktadır. Bu zorlu şartların minimize edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple kompozit malzemeler ve üretim yöntemlerine olan ilgi her geçen gün artarak devam etmektedir. Özellikle otomotiv, havacılık gibi düşük ağırlık ve maksimum dayanım isteyen sektörlerde kompozit malzeme gruplarının kullanımı artmaktadır [18–21].

Kompozit malzemeler genellikle; yüksek spesifik mukavemet, yüksek çekme dayanımı, yüksek basma dayanımı, yüksek aşınma direnci, kararlı kimyasal stabilite, hafiflik, yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik, yüksek korozyon direnci gibi özellikleri açısından tercih edilmektedir.

2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler bir ara yüzey yapısıyla birbirine bağlanan, kendi özelliklerini koruyan farklı fazların kombine edilmesiyle üretilmektedir. Farklı tiplerdeki bileşenler bir araya gelerek kompozit malzemelerin yeni özelliklerini belirlemektedir. Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan matrisin çeşidine göre genel olarak üç gruba ayrılmaktadır. Polimer matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler [22–24].

Takviye çeşidine göre ise kompozitlerin sınıflandırılması üç ana başlık altında toplanmaktadır; partikül takviyeli kompozitler, fiber takviyeli kompozitler (sürekli fiberli kompozitler ve süreksiz fiberli kompozitler) ve pul takviyeli kompozitler [25–28].

2.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler ve Özellikleri

Matris bileşen olarak polimer esaslı malzemelerin kullanıldığı kompozit türüne polimer esaslı kompozitler adı verilmiştir. Polimer adı verilen plastik malzemeler organik gruba sahip makro moleküllerden bir araya gelen ve bir dizi kimyasal reaksiyonlar sonucu elde edilen malzemelerdir. Polimer matrisli kompozitler düşük ağırlık, yüksek mekanik özellikler, yalıtkan özellikleri gibi sebeplerle birçok alanda tercih edilmektedir [29].

Polimerik kompozitlerde plastik matris fazı olarak genellikle termoplastik ve termoset esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Termosetler belirli bir ergime noktası mevcut olmayıp yüksek sıcaklıklarda bozunma gösteren gruplardır. Termoset plastikler bir kez üretildikten sonra şekil verilemeyen, tekrarlı bir üretim prosesine sahip olmayan malzemelerdir. Termoplastikler ise yumuşama ve ergime noktası gösteren plastikler olup, geri dönüştürülebilen birçok kez ısıtma ve soğutma çevrimleri sonucunda tekrarlı olarak şekillendirilme yeteneğine sahiptir [27, 30].

Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde birçok üretim metodu bulunmaktadır. Yaş laminasyon yöntemi olarak bilinen, ilk polimer esaslı kompozit üretim metodlarından birisidir. Bu yöntem ucuz olmasına karşın takviye olarak tanımlanan fiberlerin oryantasyonun zor olması sebebiyle birtakım çekinceler barındırmaktadır. İlerleyen gelişmelerle birlikte polimer esaslı kompozitlerin üretim yöntemleri de çeşitlenmiştir. Reçine transfer kalıplama adı verilen yöntem polimer esaslı kompozitlerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde, genel anlamda reaktif bir reçine karışımının kapalı bir kalıp içinde ön şekillendirilmiş ve kurutulmuş bir takviye formuna enjeksiyonu gerçekleştirilmektedir. Düşük viskoziteye sahip özel reçine bileşenleri matris olarak kullanılmaktadır. Prepreg otoklav yönteminde ise, tek bir sertleştirme adımında son derece karmaşık şekilli parçaların üretimi mümkündür. Bu yöntemde, iki boyutlu prepreglerin belirli kontrol parametreleri altında sıcaklık artışıyla beraber basınçlı tank içinde sertleştirilmesi esasına dayanmaktadır [30, 31].

Polimer matrisli kompozitlerin genellikle havacılık endüstrisinde kanat gövde parçalarında, otomotiv sektöründe taşıyıcı ve destekleyici eleman olarak, denizcilik alanında ise yüksek rijitliğe sahip gövde parçası olarak fonksiyonel alanlarda kullanıldığı görülmektedir. Endüstriyel alana ek olarak akademik alanda da birçok çalışmanın konusunu oluşturmaktadır [31].

2.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler ve Özellikleri

Kimyasal bağ yapıları genellikle iyonik ve kovalent hibrit olan seramik malzemeler bu bağ yapıları sayesinde kimyasal kararlılıkları yüksek, ergime noktaları yüksek, atomik hareketlilikleri düşüktür. Bu özelliklerine ek olarak seramik esaslı malzemeler yüksek sıcaklık koşullarında bozulmadan kullanılabilen, sert ve kırılğan özellik gösteren malzemelerdir. Kompozit üretim yöntemlerinde seramik malzemeler matris faz olarak kullanılarak mevcut olan özellikleri geliştirilerek yeni özelliklere kazanabilmektedir. Seramik matrisli kompozitlerde takviye fazından beklenen özellikler, seramik malzemenin doğası gereği gevrek kırılma davranışını önlemek, hasar toleransını arttırmak. Az miktarda bulunan iç yapı kusurları sebebiyle düşük hasar riski sağlamak gibi nedenler gösterilmektedir. Takviye olarak belirlenen fazların prosese eklenmesiyle birlikte maliyetlerin ciddi şekilde artması, yüksek şekil faktörüne sahip takviye bileşenlerinin sinterleme esnasında büzülme yavaşlatması sebebiyle bazı üretim metotlarında oldukça yüksek sıcaklık gerektirmesi seramik esaslı kompozitlerin dezavantajları olarak sıralanabilir [32, 33]. Uygulama alanlarına göre seramik malzemeler geleneksel seramikler, yüksek performans seramikleri olarak ayrılabilir. Yüksek performans seramikleri ileri mühendislik gereksinimlerini karşılayan malzeme tiplerinden birisidir. Bileşimlerine göre ise seramik malzemeler; silikat seramikler (porselen, magnezyum silikatlar, mullit) karbid seramikler (SiC, WC, BC), nitrid seramikler (silikon nitrid, alüminyum nitrid) ve oksit seramikler (alüminyum oksit, aliminyum titanat, magnezyum oksit) olarak sınıflandırılabilir [34–36].

Seramik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri genellikle iki ana başlık altında ayrıştırılmıştır. Birinci toz konsolidasyon metotları, ikincisi ise kimyasal bazlı metotlardır. Toz metotları üç başlık altında gruplandırılmıştır; partikül takviyeli seramik matrisli kompozitler, whisker ve kısa fiber takviyeli seramik matrisli kompozitler, alternatif prosesler. Kimyasal bazlı yöntemler tanımlanırken ise gaz faz, sıvı faz, kombine veya hibrid rota olarak tanımlanmaktadır [32, 33, 35].

2.1.3 Metal Matrisli Kompozitler ve Üretim Yöntemleri

Metal bileşenin matris olarak belirlendiği kompozit malzeme gruplarına metal matrisli kompozitler denmektedir. Kompozit malzemeler, bir ara yüzle ayrılmış iki veya daha fazla fiziksel ve/veya kimyasal olarak farklı bileşenden oluşur ve bileşen malzemelerinkinden daha üstün özelliklere sahiptir. Kompozit malzemenin büyük kısmı matris fazı veya sürekli

faz, diğerk kısmı ise takviye fazı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, matris fazının özellikleri, takviye malzemeleri tarafından geliştirilir. Takviye, matris fazın mekanik özelliklerini veya diğerk fonksiyonel özelliklerini (takviye malzemesinin tipine bağılı olarak) iletir. Takviyeler matris fazından daha yüksek dayanıma sahip ve daha serttir. Takviyelendirilmemiş metal veya alaşım ile karşılaştırıldığında, metal matrisli kompozitler daha yüksek özgül mukavemet, sertlik, daha iyi aşınma ve korozyon dayanımına sahiptir. Metal matrisli kompozitlerin sınıflandırılmasında takviye tipine göre metal matrisli kompozitler 3 ana hatta sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.1). i) Fiber takviyeli metal matrisli kompozitler, ii) Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler, iii) Çok tabakalı laminatlar [37]

Fiber takviyeli metal matrisli kompozitler genellikle ya uzun ya da kısa fiber takviyeli metal matrisli kompozitler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Uzun fiber takviyeli kompozitler disperse olmuş fazdan oluşmaktadır. sürekli fiber yapısı içerisinde (uzunluk>100*çap), kısa fiber takviyeli kompozitlerde ise fiber uzunlukları çok kısadır (<100* çap) [38, 39].

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler ise matris faz içerisinde rastgele dağılmış parçacıklardan oluşan kompozit yapının tanımlandığı malzeme grubudur. Bu grup malzemelerin modellenmesi fiber takviyeli kompozitlerin modellenmesine göre daha karmaşıktır. Son olarak çok tabakalı laminatlar ise birçok katman yapısından oluşan farklı oryantasyonda da bulunabilen hafif yapı özelliğı gösteren kompozit türü olarak öne çıkmaktadır. Bu tipteki kompozitlerin neredeyse tamamında takviye fazı matristen daha sert yapıdadır, her bir partikül yapısı çevresindeki matris fazın hareketini engeller. Matris faz uygulanan yükün bir kısmını takviye fazına iletir. Kompozitin mekanik davranışlarını belirleyen en önemli parametrelerden birisi matris-takviye arayüzey bağlanma kuvvetinin seviyesidir. Güçlü bir matris takviye ara yüzeyi mekanik özelliklere pozitif katkı yapmaktadır. Bir metal matrisli kompozitin optimum arayüzey özellikleri; zaman, sıcaklık, basınç gibi farklı parametrelere bağılı olarak değişmektedir. Bu tez çalışmasında farklı üretim parametrelerinin kullanılma nedenlerinden birisi de arayüzey oluşumunun seviyesini belirleyebilmektir [24, 40, 41].

Çok tabakalı kompozitler; fiber tabakalı olarak üretilmiş bir kompozit farklı fiber oryantasyonlarında birkaç tabaka içerirse çok tabakalı yapı oluşur. Çok tabakalı

kompozitler yüksek modül ve tekrarlanan takviye grupları şekillendirilmesi yüksek metal matrise yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır [12, 42].

Takviye tiplerinde ise farklı malzeme grupları metal matrisli kompozit üretiminde tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerde, matris fazı metal veya alaşımken, takviye fazı ise genellikle seramik veya karbon bazlı malzemelerdir. Titanyum, alüminyum, magnezyum metalleri endüstriyel uygulamalarda ağır metallere göre daha fazla tercih edildiği bilinmektedir. Havacılık, savunma sanayi, otomotiv gibi alanlarda en çok kullanılan matris malzemeleri olarak öne çıkmaktadır. Metal matrisli kompozit için yaygın olarak kullanılan takviye fazı ZrO_2 , Al_2O_3 , SiC, TiC, B_4C vb. seramik malzemelerdir. Bu seramik esaslı takviye malzemelerinin dışında metal matrisi takviye etmek amacıyla çeşitli karbon esaslı malzemeler grafit, uçucu kül vb.de kullanılmaktadır. Alüminyum, magnezyum, titanyum ve bakır metalleri matris faz olarak yaygın olarak metal matrisli kompozit üretiminde kullanılmaktadır. Metal malzeme grupları ve metalik alaşım yapıları metalik bağlanma sebebiyle yüksek mekanik özelliklere ve fonksiyonel özelliklere sahiptir. Bu malzeme gruplarında temel deformasyon mekanizması kayma hareketidir. İkincil fazlar eklenerek kayma hareketi düzenlenmektedir [43, 44].

Nanokompozit malzemeler, en az bir boyutu 100 nm'ye kadar olan en az bir takviye fazından oluşmaktadır. Metal matrisli nanokompozitler için matris fazı olarak kullanılan metallere bazıları alüminyum, magnezyum, bakır, çinko veya bunların alaşımlarıdır. Metal matrisli nanokompozitlerin üretimi için yaygın olarak kullanılan nano takviye malzemeleri karbon nanotüp, grafen, karbon nanofiber, nano Al_2O_3 , nano SiO_2 , nano SiC, nano TiO_2 'dir. Mikron takviyeli metal matrisli kompozit ile karşılaştırıldığında, nano takviyeli metal matrisli kompozit, takviye edici nano takviyelerin tipine bağlı olarak üstün mukavemet, süneklik, aşınma direnci ve diğer fonksiyonel özelliklere sahiptir. Bu nedenle, gelişmiş özelliklere sahip nano malzemelerle güçlendirilmiş metal matrisli nanokompozit, birçok gelişmiş malzeme alanında uygulama bulabilmektedir. Bilinen üstün özelliklere rağmen seramik takviyelerin kullanıldığı uygulamalarda görülen en önemli sorun gevrek yapı göstermeleridir ve üretim esnasında sıvı metaller tarafından ıslatmalarının son derece kötü olmasıdır [45, 46].

Ancak alüminyum alaşımlarının yüksek termal genleşme katsayısı ve yetersiz tribolojik özellikler gibi bazı kusurları vardır. Metal matrisli kompozit malzemelerde karşılaşılan en

büyük problemlerden bir diğeri, kuvvetlendirici/matris ara yüzeylerinde yetersiz adhezyon ve kuvvetlendirici fazların yapıya uygun olarak dağıtılamaması olduğu bilinmektedir. Yetersiz ıslanabilirlik sebebiyle ara yüzeylerde oluşan boşluk yapıları kompozitin özelliklerinde bozulmalar meydana gelmesine sebep olabilecektir. Daha yüksek sertlik ve mukavemet, yorulmaya karşı direnç ve ayrıca tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi, uygun takviye ve iyileştirme malzemelerinin eklenmesi ve bununla birlikte metal matrisli kompozitlerin modellenmesi ile elde edilir [37].



Şekil 2.1: Metal matrisli kompozitlerin sınıflandırılması.

Otomotiv sektöründe araç yapımında çelik yerine alüminyum metal matris kompozitlerin uygulanmasıyla, kullanılan her kilogram alüminyum için toplam araba kütlesinin azaltılması sağlanmaktadır. Öte yandan, küresel dünya pazarında akaryakıt fiyatlarının artması, çelik yerine alüminyum ve metal matrisli kompozitlerinin uygulanmasının da artmasına sebep olmaktadır. Araç ağırlıklarının azaltılması, yakıt tüketiminin de %5 ila %7 oranında azalmasıyla sonuçlanmaktadır. Hem sahip oldukları istisnai mekanik özellikler hem de hafiflik özellikleri sebebiyle metal matrisli kompozitlerin endüstriyel kullanımı her geçen sene giderek artmaktadır [10, 33].

Monolitik metaller endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan malzemelerdir. Hafiflik, yüksek plastik deformasyon oranı gibi özelliklerinin yanı sıra görece düşük dayanım özelliklerine sahip olmaları sebebiyle ikincil takviye gruplarıyla kompozit üretimi son yıllarda rağbet gören bir üretim yöntemidir. Seramik gibi yüksek aşınma direnci, sertlik özelliklerini kompozit yapıda uygulayabilmek prosesin genel amaçlarından birisidir. Sahip oldukları sayısız özellik sebebiyle alüminyum ve alaşımları metal matris olarak seçilmektedir. Düşük yoğunluk değeri de malzeme seçimi olarak alüminyumun avantajını gösteren önemli bir özellik olarak öne çıkmaktadır. Düşük ağırlık sebebiyle uzay ve otomotiv

sektörlerinde kendisine önemli bir yer bulmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde bir diğer önemli malzeme seçim kriteri takviye fazının cinsinin seçilmesidir. Al_2O_3 , SiC, B_4C gibi takviyeler en fazla kullanılan takviye grupları olarak öne çıkmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerini iki ana başlık altında inceleyebilmekteyiz [38, 47].

- 1- Sıvı hal üretim yöntemleri
- 2- Katı hal üretim yöntemleri

Katı hal ve sıvı hal üretim yöntemleri kendisine ait avantajları ve dezavantajları da söz konusudur. Örneğin döküm yöntemi düşük maliyet, basitlik gibi olumlu yönlerinin yanında ergimiş metal içerisinde takviye fazının düşük ıslanma göstermesi sebebiyle bazı dezavantajları da mevcuttur [8]. Katı hal üretim yöntemlerinin en önemlilerinden biri olan toz metalürjisi yönteminde ise, ıslanabilirlik gibi bir problemle karşılaşılmasa da yüksek maliyet gerektiren bir proses olması sebebiyle ciddi yatırım maliyetleri gerektirmektedir.

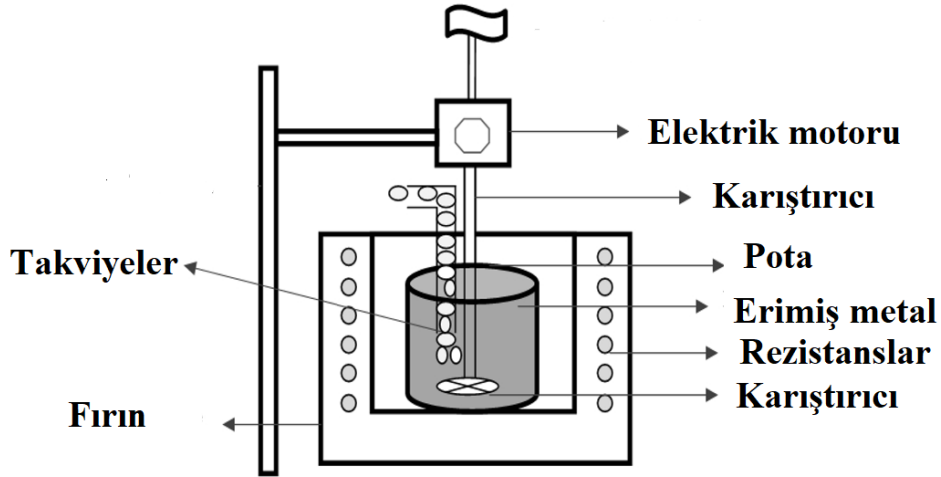
2.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri

Bu üretim yönteminde matris faz metal öncelikle eritilir ve daha sonra takviye fazı erimiş metale ilave edilmektedir. Ucuz bir yöntem olmasının yanı sıra takviyelerin uygun şekilde dağılımı topaklanma sebebiyle ciddi zorluklar göstermektedir [8, 48].

2.2.1 Karıştırma Döküm Yöntemi

Sıvı faz üretim yöntemlerinde en fazla kullanılan yöntemlerin başında karıştırmalı döküm yöntemi gelmektedir. Düşük maliyetli ve ucuz bir proses olmasının yanı sıra döküm esnasında kalıp gerektirmesi gibi ekstra maliyetler de söz konusudur. Büyük hacimde metallerin ergitilmesi ve dökülebilmesinin mümkün olması sebebiyle büyük boyutlu parçaların üretilebilmesi bu yöntemle mümkündür. Öncelikle matris faz metal ergime sıcaklığında bir pota içerisinde ergitildikten sonra ön ısıtma yapılmış takviye grupları ergimiş metal içerisine eklenmektedir. Takviye gruplarına ön ısıtma yapılmasının sebebi ergimiş metale soğuk takviyelerin eklenmesiyle topaklanma oluşma riski olduğu bilinmektedir [21]. Bu topaklanma sıkıntısının önüne geçmek adına takviyeler matris malzemenin folyolarına sarılarak da ergimiş metal içerisine eklenebildiği literatürde görülmektedir. Takviye fazı olarak genellikle B_4C , SiC, Al_2O_3 gibi seramik esaslı takviyeler kullanılmaktadır [49]. Ergimiş metal içerisinde bulunan takviyeler bir karıştırıcı vasıtasıyla belirli bir dönme hızında belirli süre karıştırılmaktadır. İstenen karışım sağlandıktan sonra döküm işlemi gerçekleştirilmektedir. Ergimiş metal içerisine genellikle

inert gaz beslenmektedir. Döküm yönteminin getirdiği bazı sıkıntılarla üretimde karşılaşmak mümkündür. Porozite bunlardan en önemli sıkıntılardan birisidir. Uygun olmayan kalıp tasarım veya parçanın kalıp içerisinde optimum şekilde soğuyamaması bunun sebeplerinden bazılarıdır [39]. Şekil 2.2’de karıştırma döküm yöntemi resmedilmiştir.

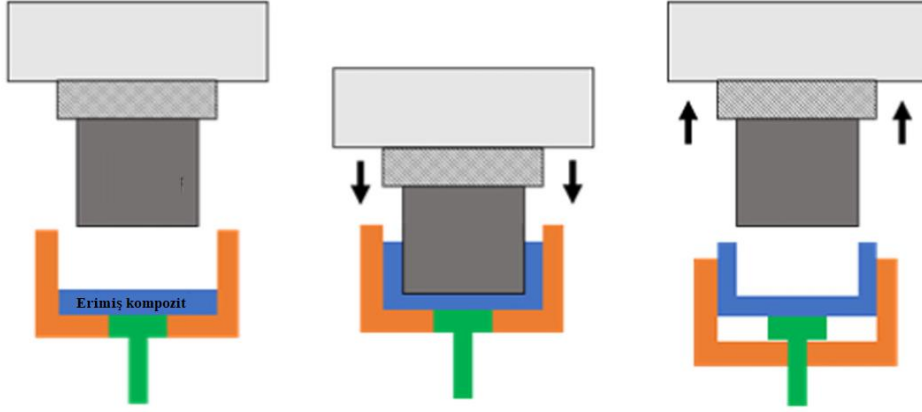


Şekil 2.2: Karıştırma döküm prosesi [8].

Bu üretim yönteminin karıştırıcı tertibatında değişiklik yapılarak ultrasonik prob vasıtasıyla takviyelerin ergimiş metal matris içerisinde karıştırıldığı ultrasonik döküm yöntemi de mevcuttur [50].

2.2.2 Sıkıştırma Döküm

Sıkıştırırmalı döküm prosesi metal matrisli kompozitlerin nihai şekillendirme proseslerinden birisidir. Bu yöntemde üretim yöntemleri, kimyası, hacim oranı ve takviye dağılımları iyi bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Ergimiş metal bir preform içerisine basınç uygulanarak yönlendirilmektedir. Katılaşma tamamlandığında ise proses sonuçlanmaktadır. Bu metot hem fiber hem de parçacık takviyeli kompozitlere uygulanabilmektedir. Preforma zarar vermektan kaçınmak amacıyla düşük basınçlar tercih edilmektedir. Gerekli durumlarda katılaşma esnasında basınç arttırılmalıdır. Ergiyik basınç altında katılaşığı için porozite ve büzülme gibi durumların görülmesi düşük olasılıklıdır. İnfiltrasyon süresinin düşük tutulması tavsiye edilmektedir. Bu yöntem üretimi zor olarak bilinen magnezyum ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir [32, 51]. Şekil 2.3’de sıkıştırma döküm prosesi gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Sıkıştırma döküm yöntemi [52].

2.2.3 Püskürtme Yöntemi

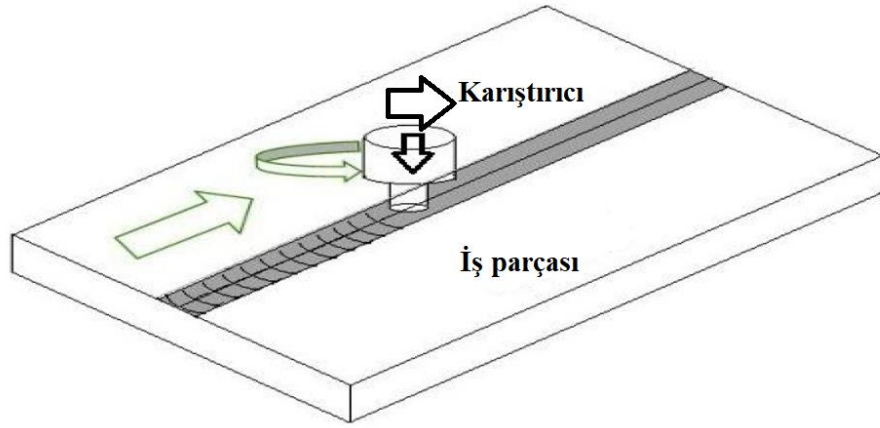
Püskürtme yöntemi ile metal matrisli kompozit üretiminde ergimiş metal yüksek seviyede hızlarla püskürtülerek ince tabaka oluşturulması amaçlanmaktadır. Tabakanın katılaşması, birleşmesi ve biriken yapının yoğunlaşmasıyla proses sonlanır. Ergiyik metal parçacıkları, püskürtme işlemi sayesinde takviye gruplarına bağlanmakta ve katılaşarak kompozit yapıyı oluşturmaktadır. Alüminyum malzemesi bu üretim yönteminde tercih edilen malzeme gruplarından birisi olarak öne çıkmaktadır [8].

2.3 Katı Hal Üretim Yöntemleri

Katı hal üretim yöntemleri genel anlamda matris fazın ergime sıcaklığının altında gerçekleşmekte ve yüksek mekanik özelliklere sahip metal matrisli kompozit malzemeler bu yöntemle başarıyla üretilmektedir. Bu üretim yönteminin en bilinen tipleri. Toz metalürjisi ve sürtünme karıştırma yöntemidir [53, 54].

2.3.1 Sürtünme Karıştırma Yöntemi

Sürtünme karıştırma yöntemi plastik deformasyon prensibinden faydalanmaktadır. Bu metod sürtünme karıştırma kaynağında esinlenerek uygulanmaktadır. Yüksek hızlarda dönen karıştırıcı aparat sayesinde matris metal malzeme birleştirme noktalarında sürtünme kaynaklı sıcaklığın etkisiyle birleşme gerçekleşmektedir. Takviye yapıları birleşme noktalarında bir dizi delik içerisine eklenerek sürtünme esnasında doğan ısıyla beraber kompozit bir yapı oluşmaktadır [55, 56]. Şekil 2.4' de sürtünme karıştırma prosesi gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Sürtünme karıştırma yöntemi.

2.3.2 Toz Metalurjisi

Toz metalürjisi prosesinde karıştırılmış bir dizi matris ve takviye tozları soğuk veya sıcak konsolidasyon bir kalıp içerisinde bu yöntemle şekillendirilmektedir. Matris alaşımının solidüs sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta sinterleme adı verilen işlem uygulanarak bu proses tamamlanır. Bu yöntem birçok metal ve alaşımına başarıyla uygulanmaktadır. Prosesin detayları tez çalışmasının Toz Metalurjisi bölümünde detaylıca açıklanmaktadır.

Toz metalürjisi modern metal şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Nihai özellikler ve proses maliyeti doğrudan ham tozun maliyetine, üretim çeşidine, parçacık şekline, boyutuna ve dağılımına bağlı olarak değişmektedir. Toz metalürjisi yöntemi döküm gibi geleneksel yöntemlere alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem sayesinde imalatı zor ve karmaşık parçaların üretilmesi mümkün olabilmektedir. Üretim yanı sıra elde edilen parçanın mekanik özelliklere de yüksektir. Döküm yönteminde karşılaşılan segregasyonlar, oksitlenmeler ve istenmeyen intermetaliklerin oluşması toz metalürjisi yönteminde engellenmektedir. Toz metalürjisi yöntemiyle istenilen gözenek oranında parça üretimi de mümkündür [42, 57].

Toz metalürjisi yönteminin birçok avantajı ve dezavantajı mevcuttur. Sırasıyla prosesin avantajları ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir [45, 58–60].

Avantajları:

- Düşük boyut toleransında üretim yapılabilmesi

- Elde edilen ürünlerin yüksek yüzey kalitesine sahip olması
- Üretim prosesi esnasında ham malzemenin %99'unu kullanarak hammadde kaybının azaltılması
- Arzu edilen özelliklerde malzeme üretiminin mümkün olması
- İstisnai özelliklere sahip malzeme üretilebilmesi
- Geleneksel yöntemlerle üretilemeyecek karmaşık parçaların üretimine imkan vermesi
- Yüksek üretim hızında şekillendirme
- Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin şekillendirilmesinde yüksek performans göstermesi
- Kompozitlerin üretiminde efektif olarak kullanılabilmesi

Dezavantajları:

- İlk yatırım maliyetlerinin yüksek olması
- Toz haldeki metal tozlarının maliyetlerinin çok yüksek olması
- Çok büyük ebatlarda parça üretiminin mümkün ve efektif olmaması

2.4 Metal Toz Üretim Teknikleri

Toz üretim teknikleri kimyasal ve mekanik olarak ikiye ayrılmaktadır. Birleştirilmeden önce tozların hangi yöntemle üretildiğinin bilinmesi prosesin üretim parametreleri üzerinde etkin rol oynamaktadır. İstenilen toz morfolojileri ve boyutları toz üretim yöntemine göre farklılık gösterebilmektedir. Toz boyut aralığı da toz karakteristiğini etkileyen bir diğer parametredir. Uzay ve havacılık sanayisinde genellikle dar boyut aralığına sahip tozlar tercih edilmektedir [42, 53].

Atomizasyon yönteminde ergimiş metal sıvısının damlacıklar halinde parçalanması esasına dayanmaktadır. Sıvı metal öncelikle ligament yapısına daha sonra da droplet adı verilen küresel formlara parçalanmaktadır. Ticari üretimde kullanılan atomizasyon prosesleri 400 kg/dk seviyelerinde üretime sahiptir. En fazla metallere uygulanan bir işlem olmasının yanı sıra polimer ve seramiklere de uygulanabilmektedir [60, 61].

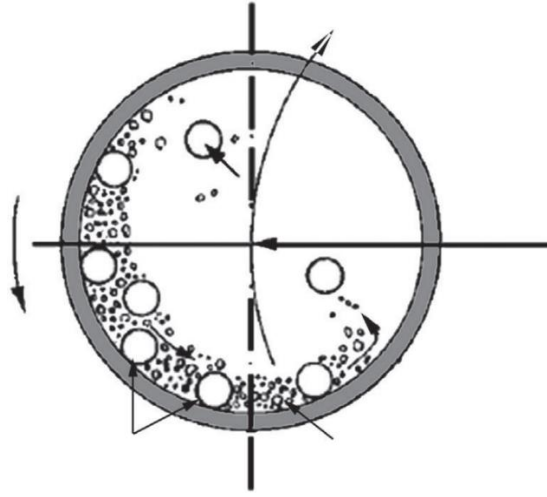
En fazla kullanılan atomizasyon yöntemleri su atomizasyonu ve gaz/hava atomizasyonudur. Su atomizasyonunda ergimiş halde bulunan metal su jetleri kullanılarak katılaştırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Elde edilen parçalar 1 mm'den küçük ise

toz, 1 mm'den büyük ise granül olarak isimlendirilmektedir. Boyutsal açıdan değerlendirildiğinde, granül ve toz formasyonu malzemenin içeriğine ve sistemde kullanılan sıvının basıncına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir [12].

Gaz atomizasyon yöntemiyle toz üretim prosesinde küresel halde 1 μ m ve 1 mm arasında tozların üretiminde kullanılan en tercih edilen yöntemden birisidir. Parçalayıcı gaz olarak azot, hava, helyum ve argon sıklıkla kullanılmaktadır. Gaz atomizasyon yönteminin prensibi ergimiş haldeki metalin yüksek seviyede gaz basıncı kullanılarak parçalanması işlemidir. Bu proses 5 adımda gerçekleşmektedir. Öncelikle ergimiş metal yüzeyine atomizasyonda kullanılan gazın çarpmasını takiben stabil durumda olmayan ergiyik bölge bulutu oluşmaktadır. İkinci adımda, birinci adım sonrası yeni partikül formasyonu ortaya ligament şekilli olarak çıkacaktır. Daha sonrasında oluşan ligamentlerin dropletlere parçalanması gerçekleşecektir. Dördüncü adımda, dropletler daha küçük partikül boyutlarına indirgenecektir. Son olarak ise uydu adı verilen yapılar oluşarak proses tamamlanmaktadır. Kullanılan basınç genellikle 3 MPa'dan büyüktür. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken diğer husus parçacıkların soğuma hızıdır. Bu yöntemle süper alaşımlar gibi yeni nesil malzemelerin toz formlarının üretilmesi mümkündür. Proses sayesinde elde edilen yüksek soğuma hızları tozların mekanik özelliklerine olumlu yönde etki etmektedir [60, 62, 63].

2.5 Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama yöntemi toz karışımları kullanılarak homojen malzeme üretimine imkan sağlayan toz üretim yöntemidir (Şekil 2.5). Bu yöntemde bir dizi aşındırıcılar birbiri üzerinde hareket ederek tozların parçacık boyutlarını düşürmektedir. John Benjamin tarafından 1966 yılında mekanik alaşımlama yöntemi geliştirilmiştir. Bu teknik ilk olarak nikel esaslı süper alaşımların geliştirilmesi çalışmalarında kullanılmıştır. Öncelikle ham tozların seçimi gerçekleştirilmelidir. Genellikle 1-200 μ m boyutunda tozlar bu yöntemde kullanılmaktadır. Toz parçacık boyutları kritik değildir çünkü bir kap içerisinde bilya ile yüksek hızlarda dönen ve aşınan tozlar bir süre sonra çok küçük boyutlara indirgenecektir. Mekanik alaşımlama yöntemi sayesinde Nb-Sn ve Cu-Fe gibi sistemlerde birbirine karışmayan elementlerden alaşım yapıları oluşturulabilmektedir. Bir başka yöntemle özellikle bu nitelikli yapılar oluşturulamamaktadır [60, 64].



Şekil 2.5: Mekanik alaşımlama prosesi.

Mekanik alaşımlama prosesi karmaşık parametrelerin etkin olduğu katı hal prosesidir. Optimum çıktılar için parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Nihai toz özellikleri üzerinde etkin parametreler; öğütme gerçekleştirilen sistemin cinsi, aşındırıcının cinsi, kullanılan kabın türü, aşındırıcıların boyutu, bilya/toz oranı, öğütme prosesinin süresi, hızı gibi parametreler en önemli parametreler olarak gösterilmektedir. Mekanik alaşımla yönteminde aşırı dönme hızları aşındırıcı bilyaların kaba yapışmasına sebep olabilmektedir. Bu durum proses içerisinde istenmeyen bir sorun olarak gösterilmektedir. Her bir toz türü için optimum dönme hızı ve süresi bulunmalıdır. Çinko sterat gibi proses kontrol ajanları da mekanik alaşımlama işleminde kullanılmaktadır. Aşırı ısınma durumu da ayrıca proseste karşılaşılan muhtemel sorunlardan birisidir. Aşırı ısınmanın önüne geçmek adına öğütme esnasında bekleme süreleri belirlenerek proses sürdürülmelidir [65, 66].

2.6 Sinterleme

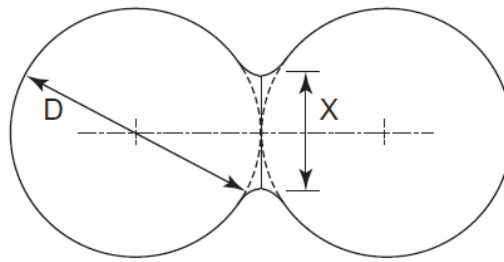
Toz metalürjisi süreçleri iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birincisi; tozların uygun şekillerde üretilmesi. İkincisi ise; üretilen tozların yoğunlaştırılması işlemleridir. Sinterleme prosesi, genellikle kütle taşınım mekanizmaları sayesinde bağ oluşturan parçacıkların ağırlıklı olarak katı morfolojiye dönüştürüldüğü ısı işlem yöntemidir. İşlem sıcaklığı genellikle ergime sıcaklığının %80'ine tekabül eden bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Yukarıda bahsedilen bu bağlanma mukavemeti artarken sistemin enerjisini düşürmektedir. Tozlar ham halde bir kabı yaklaşık %60 yoğunlukla doldurmaktadır. Titreşim hareketi uygulanmasının bile bu değeri %64'e kadar çıkardığı bildirilmiştir. Gözeneklilik bu durumu oluşturan temel etmendir. Genellikle tozun başlangıç fazını ifade eden isim “ham”

kelimesidir. Bununla bağılı olarak, şekillendirme işlemi yapılmış fakat sinterlenmemiş parça “ham parça” olarak ifade edilmektedir. Ham parçalar düşük mukavemete sahiptir. Bu parçaların gözenekliliğini azaltmak ve mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla sinterleme kaçınılmaz bir proses olarak öne çıkmaktadır. Sinterleme proseslerinde en önemli parametrenin yoğunluk olduğu bildirilmiştir [62, 64].

Bir toz metalürjisi sisteminde tozlar yüksek sıcaklık altında birbirleriyle temas halinde iseler, temas halinde bulunan partikül yapıları difüzyonla kütle transferi ile toplam yüzey enerjilerini ve tane sınırı enerji değerlerini indirgemek amacıyla birleşme formasyonuna geçmeye diğer bir deyişle tek bir partikül formuna geçmeye çalışırlar [64].

Sinterleme ölçütlerinden birisi de X/D nispi boyut oranıdır. Burada ifade edilen oran boyun çapının parçacık çapına bölünmesidir. Boyun bölgesi kristalin yapıların bir araya geldiği bozulmuş atomik bağları içeren bir bölgedir. Diğer bir ifadeyle bu durum tane sınırı olarak da belirtilmektedir [67]. Sinterleme prosesi, atomları boyun oluşumunu sağlamak için hangi şekilde hareket ettiğine bağlıdır. Şekil 2.6’da iki parçacık sinterleme geometrisi resmedilmiştir.

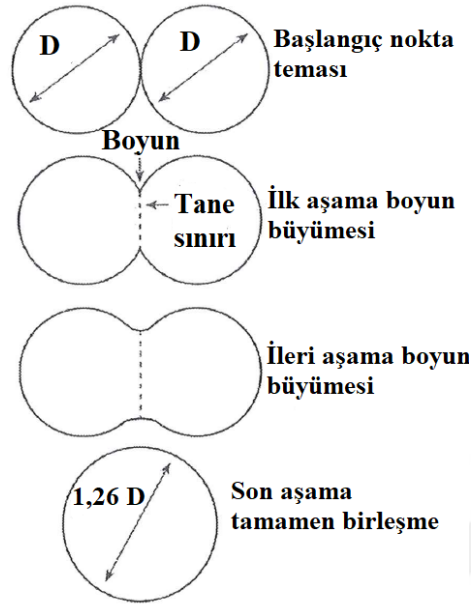
Şişme boyutlarda artış oluşmasını belirtirken, çekme doğrusal boyutlarda küçülme olarak ifade edilmektedir. Sinterleme prosesinin ölçümü genellikle doğrusal boyuttaki değişimler ile gerçekleşmektedir. Boyutsal yapı değişimi parça boyutundaki değişimin başlangıç ham parça boyutuna bölünmesidir [60].



Şekil 2.6: İki parçacık sinterleme geometrisi.

Sinterleme işleminde taşınım mekanizmaları, sinterleme için gereken itici gücün sağladığı güce tepki olarak kütlelerin nasıl aktığını belirler. Üstteki şekilde gösterilmiş haliyle yüzey taşınımı ve hacimsel taşınım şeklinde iki tür taşınım mevcuttur. Yüzey taşınım prosesleri, parçacığın yüzeyinde başlayan ve biten kütle akışı sebebiyle, parçacık aralarında herhangi

bir değişim olmadan boyun büyümesine sebep olmaktadır. Şekil 2.7’de toz metalürjisi prosesleri esnasında gerçekleşen sinterleme kademeleri adımları görselleştirilmiştir.

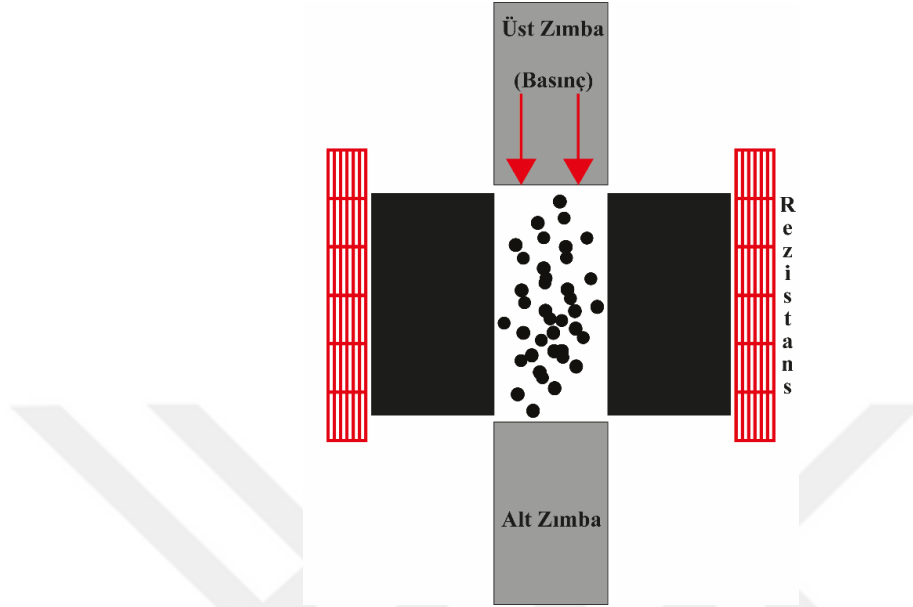


Şekil 2.7: Sinterleme kademeleri.

Sinterleme prosesi düşünüldüğünde birçok parametrenin etkin olduğu kompleks bir proses olduğu görülmektedir. Basınç etkisi de malzeme özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Sinterleme prosesi esnasında icra edilen basınç yoğunlaştırma işlemi açısından etkilidir. Uygulanan basınçla sinterleme prosesinde sıcaklığın ve sürenin azaltılabildiği bildirilmiştir. T. Türkoğlu ve S. Çelik çalışmalarında uygulanan basınç değerinin artmasıyla birlikte mekanik özelliklerde ilerleme kaydedildiğini bildirmiştir. Sıcak presleme, sıcak izostatik presleme ve spark plazma sinterleme yöntemleri konsolidasyon proseslerinde sıklıkla kullanılan üretim yöntemlerinden en önemlileridir [42].

Sıcak presleme tekniğinde ise ön karıştırma yapılmış tozlara bir kalıp içerisinde belirli bir süre zarfında sıcaklık altında basınç uygulanması esasına dayanan bir üretim yöntemidir. Şekil 2.8’de sıcak pres cihazı şematik olarak gösterilmiştir. Bu proses kullanılarak alüminyum, magnezyum, titanyum gibi çok çeşitli metallerin üretimi başarıyla gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık etkisi altında sinterleme esnasında tek eksenli basınç uygulanması yüksek yoğunluklu parçaların üretilmesine imkân sağlamaktadır. Sıcak

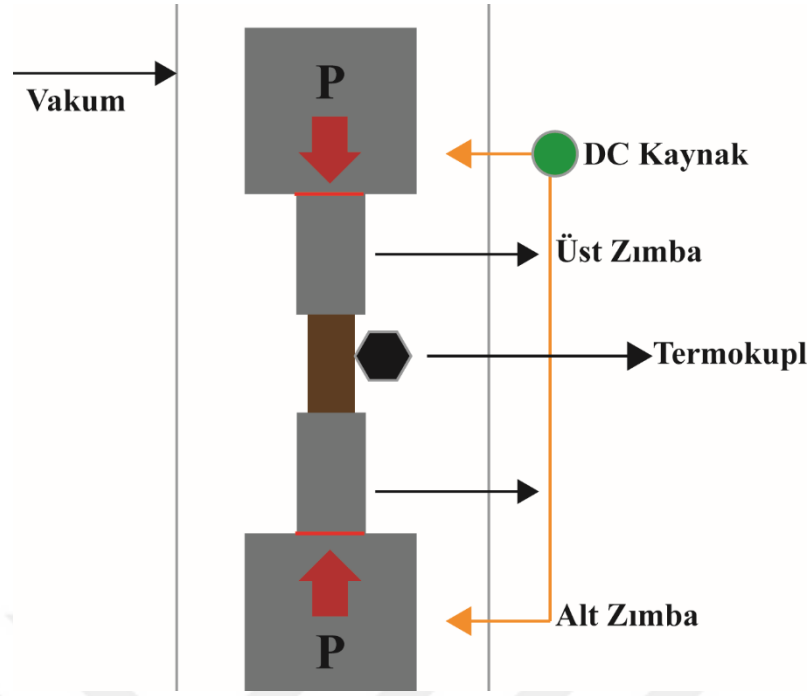
presleme işleminde genellikle grafit ve sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş kalıplar kullanılmaktadır. Proses esnasında işlem ortamına inert gaz girişi sağlanarak oksidasyon minimize edilmeye çalışılmaktadır [38, 68].



Şekil 2.8: Sıcak pres cihazı şematik gösterim.

Ön karıştırma işlemi yapılmış tozlar kalıp içerisine yerleştirildikten sonra kalıp veya ortam rezistans vasıtasıyla ısıtılır. Isıtma işlemiyle birlikte inert gaz sisteme beslenir. Kalıp boşluğuna doldurulmuş olan tozlar belirli bir basınç altında sıkıştırılır. İstenen sıcaklığa ulaşana kadar sıkıştırma devam eder. Belirli bir bekleme süresi tanımlanır ve bu süre zarfının bitişini takiben kalıp oda sıcaklığına kadar soğutulur [42].

Spark plazma sinterleme prosesinde ise grafit kalıp ve zımbalar arasında bulunan tozların yüksek akım yoğunluğundaki doğru akım vasıtasıyla ısıtılması şeklinde gerçekleştirilir. Şekil 2.9’da spark plazma sinterleme sistemi görselleştirilmiştir. Bu sistemde verilen akım sayesinde yüksek enerji akışı oluşturulup yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler üretilabilmektedir. Spark plazma sinterleme prosesi sıcak presleme yöntemine benzemekle beraber, ısı kaynağının farklılığı sebebiyle birbirinden ayrılmaktadır. Spark plazma sinterleme yönteminde anlık doğru akım sayesinde ısıtma sağlanırken, sıcak preslemede daha düşük sıcaklıklarda rezistans yoluyla ısıtma sağlanmaktadır [67, 69].



Şekil 2.9: Spark plazma sinterleme prosesi şeması.

2.7 Karıştırma Prosesleri

Metal matrislere mikron ve nano boyutlu takviye ilavesi yapılması, kaliteli ve istisnai özelliklere sahip bir kompozit elde etmeye yarasa da proses içerisinde homojen bir dispersiyon yöntemi uygulamak gibi bir çekince barındırmaktadır. Nihai olarak üretilen kompozitte bir nano takviye malzemesinin optimal dağılımı için, toz karıştırma prosesinin başlarında matris içerisinde homojen dağılım sağlamak çok önemlidir. Geniş yüzey alanına ve yüksek yüzey enerjisine sahip takviye grupları matris içerisinde kümelenme eğilimindedir. Bu negatif durum uniform dağılımın önünde en büyük engellerden birisidir. Yapıda karşılaşılan kümelenme oluşumları kompozitin mekanik özelliklerine bozmakta, çatlakların, gözeneklerin ve mikro deliklerin oluşmasına sebebiyet vermektedir. Son yıllarda kompozitlerin karıştırma proseslerinin geliştirilmesi hususunda birçok çalışma yapılmasına rağmen, kompozit malzemelerinin farklı yapıda olan doğaları sebebiyle sınırlı sayıda karıştırma yöntemi belirlenebilmiştir [45, 70].

Katı hal yöntemi kullanılarak karıştırma, toz metalürjisi yöntemine dayanan mekanik alaşımlama yöntemi takviye fazları metal matris içerisinde dağıtmada kullanılan etkin yöntemlerden birisidir. Bu teknik basit proses adımları, esnek üretim, nihai ürün boyutlarında net şekillendirebilme gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Geleneksel toz

metalürjisi süreçleri, kuru veya ıslak koşullarda mekanik alaşımlama işlemleriyle gerçekleştirilen prosesle başlamaktadır. Bu proseste toz karıştırma homojen dağılımı sağlayan tek işlem olması sebebiyle toz metalürjisi için parça özelliklerini belirlemede çok önemlidir. Karışım sonrası gerçekleştirilen konsolidasyon prosesleri takviyelerin matris içerisinde dağılımını değiştirmemektedir. Literatürde birçok çalışmada, metal matrisli yapı içerisinde takviye gruplarının etkin bir şekilde dağılımını sağlamak amacıyla mekanik alaşımlama yönteminden faydalandığı görülmektedir [71–73]. Mekanik alaşımlama prosesinden kaynaklı sert öğütme ortamları sebebiyle, yapı bütünlüğünün bozulabildiği, özellikle karbon esaslı takviye gruplarında özellik kaybının olduğu belirtilmiştir [45, 74, 75].

Kolloidal yöntem kullanılarak karıştırma ise mekanik alaşımlama yönteminde karşılaşılan sorunlar sebebiyle, yeni karıştırma yöntemleri geliştirilmiştir. Kolloidal işleme prosesi süspansiyonlar kullanılarak takviyelerin matris içerisinde homojen dağılımını kolaylaştıran bir sıvı faz karıştırma yöntemidir. Proses iki adımdan oluşmaktadır; birinci adımda genellikle saf su, etanol gibi çözü içerisinde takviyelerin ultrasonik enerjiyle dağıtılması gerçekleştirilirken, ikinci adımda metal tozları ile karışım birlikte karıştırılarak büyük topaklanmış yapılar dağıtılmaktadır. Ayrıca bu yöntemle matris ve takviye parçacıklar arasında ıslanabilirlik de geliştirilebilmektedir [40, 76]. Dispersiyon işlemi sonikatör tarafından sağlanan şok dalgalarının varlığında takviyelerin uygun çözücülerle etkileşimi sayesinde yönetilmektedir. Optimum ultrasonik dağılım; sonikasyon enerjisi, takviye tipi, sonikasyon süresi, ayrıştırıcı çeşidi ve oranına bağlı olarak değişmektedir [77].

Hibrit karıştırma yöntemi kullanılarak karıştırmada ise, son çalışmalar katı hal karıştırma prosesi ve kolloidal karıştırma prosesinin kombine edilerek birlikte uygulanmasının daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Bu yöntemde öncelikle takviyeler sıvı çözücü içerisinde ultrasonikasyonla dağıtıldıktan sonra bu karışım matris çözücü karışımına eklenerek tekrar ultrasonikasyon işlemi uygulanır [78]. Prosesin çeşidine ve kompozit bileşenlerine bağlı olarak ister sıvı halde ister etüvde kurutulmuş olan karışım tozlarının katı halde mekanik alaşımlama işlemine maruz bırakılmasıyla hibrit karıştırma yöntemi kullanılarak matris ve takviye partikülleri karıştırılmaktadır. Hibrit karıştırma yöntemiyle üretilen kompozitlerden elde edilen özelliklerin değerlendirilmesi sonrasında, sonuçların diğer karıştırma proseslerine göre daha iyi çıkması bu yöntemin öne çıkmasını sağlamaktadır [28, 40].

Hibrit karıştırma yöntemi özellikle CNT'lerin matris faz içerisinde optimum karıştırılmasına ciddi oranda katkı sağladığı önceki çalışmalarda bildirilmiştir [40, 79]. Ultrasonikasyon ile CNT'lerin Al matris içerisinde dağılımını takiben ıslak olarak mekanik alaşımlama işlemi yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde, karıştırma prosesi ile birlikte matris-takviye arasında güçlü bir ara yüzey oluşturulduğu, matris yapı alüminyum yüzeyi tarafından CNT'lerin absorpsiyonunun sağlandığı rapor edilmiştir [80]. Karakterizasyon yöntemleri kullanılarak CNT'lerin karıştırma prosesi esnasında hasar alıp almadıkları incelenmiş olup, kabul edilebilir seviyede minimum hasar olduğu ve ek olarak karbon esaslı bu takviye grubunun özelliklerinin devam ettiği görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, CNT-Al arayüzü içinde verimli yük transferine izin veren daha etkili ve düzgün takviye dağılımı nedeniyle çekme dayanımı değerinin önemli ölçüde geliştirildiği rapor edilmiştir [81].

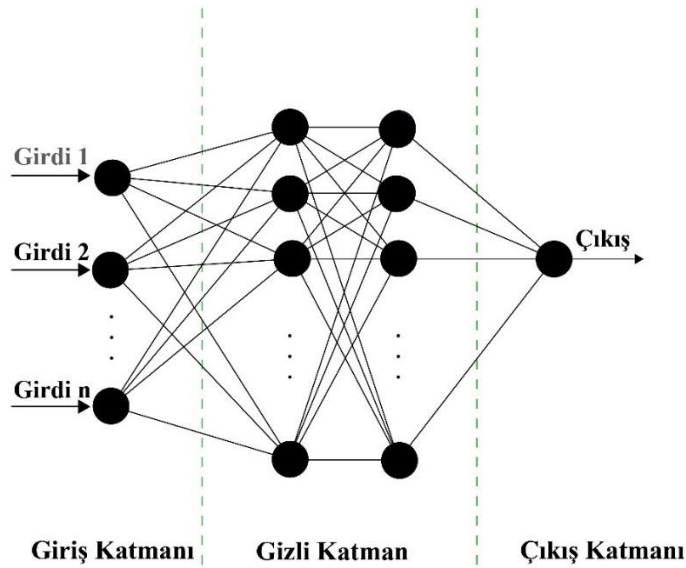
3. YAPAY SİNİR AĞLARI

Malzeme üretim tekniklerinin yüksek maliyet gerektiren prosesler olması bilim insanlarını alternatif yöntemler bulmaya teşvik etmektedir. İstatiksel yöntemler yapısal bazı değişiklikler yapılarak çeşitli optimizasyon yöntemlerinin geliştirilebildiği önemli bir araçtır [82, 83]. Gerçek hayatta deneysel yöntemler sonucunda elde edilen verilerin belirli kalıplara sokulması zordur. İstatiksel alanda model oluşturulurken veriye uygun modelin seçilmesi önemli zorluktur. Özellikle son zamanlarda istatistik bilimine artan ilgiyle beraber, verilere uygun model belirlemekten ziyade, modelin verilere kendisini uydurabildiği veri merkezli yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Yapay sinir ağları yöntemi de veriye dayalı modellemenin uygulandığı önemli bir yöntemdir [84, 85].

İnsan sinir sisteminden esinlenerek geliştirilen yapay sinir ağları insan sinir hücresine benzeyen nöronlara sahiptir. Yapay sinir hücrelerini oluşturan bu elemanlar bir araya gelerek yapay sinir ağını oluşturmaktadır. Bu nöronlar dış ortamdan aldıkları bilgileri toplayıp bu bilgileri işledikten sonra sonuç üretmektedir [86]. Yapay sinir ağlarının tarihçesine bakılacak olunursa; 1940 yılında Donald Olding Heb, Warren McCulloch, Walter Pitts yapay sinir ağlarının mühendislik alanında uygulayıcısı olmuşlardır. Biyolojik bir nöronun matematiksel modelini oluşturarak bilime önemli bir katkı sunmuşlardır [83].

Yapay sinir ağları gerçek problemlerinin birçoğunun çözülmesinde etkilidir, doğrusal olsun ya da olmasın çok girişli ve çıkışlı sistemler için modellenme yapabilmektedir. Sürekli veya kategorik verilerin kullanımına olanak sağlamaktadır. Ağ içerisinde hiç görmediği örneklemeler üzerinden bilgi üretebilmektedir. Özellikle doğrusal olmayan sistemlerde yüksek doğrulukla çalışabilmektedir [87]. Özellikle kısıtlı üretim girdilerine sahip olan alanlar için önemli bir katkı olarak gözlem sayısının çok az olduğu sistemlerde bile yüksek doğrulukla tahmin yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu avantajların yanı sıra bazı dezavantajları da mevcuttur. Yapay sinir ağları kabul edilebilir çözümlemeler yaratmaktadır, kesin olarak en iyi çözümü garanti edemez. Ağ sistemi içerisinde ağ eğitiminin hangi noktada sonlandırılacağına dair bir karar netliği yoktur. Hata değeri kabul edilebilir seviyeye indirildiğinde ağ eğitimi genellikle sonlandırılır [87, 88]. Sonlandırılan eğitim işlemi elde edilebilecek en iyi değerin yakalandığını göstermemektedir. Bahsedilen bu avantaj ve dezavantaj durumları değerlendirildiğinde,

yapay sinir ağlarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır [84]. Şekil 3.1’de yapay sinir ağı modelinin temsili şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Yapay sinir ağı temsili şeması.

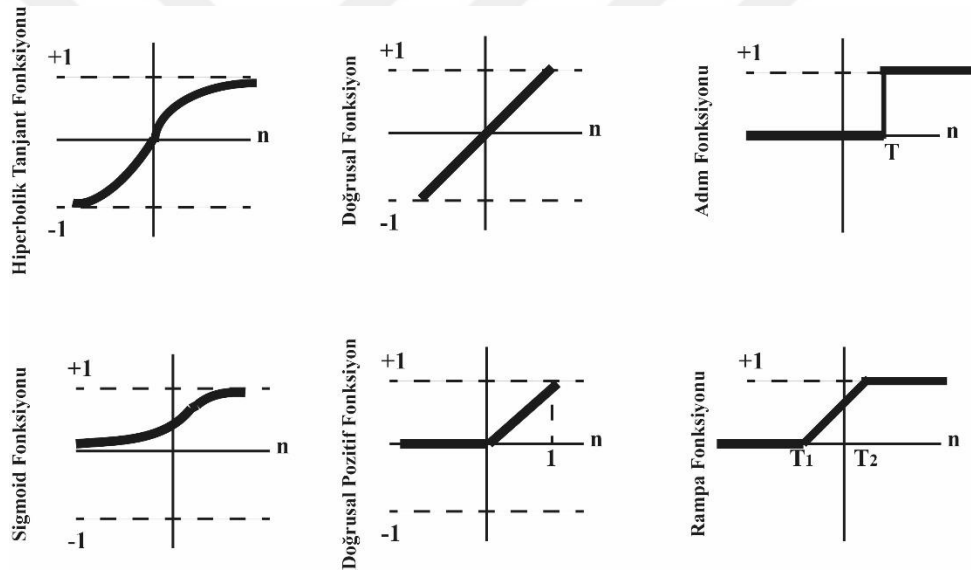
Genel yapay sinir ağı beş elemandan oluşmaktadır. Girdiler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktı değeridir. Girdi katmanı çevreden gelen bilgilerin toplandığı katman olarak tanımlanmaktadır. Girdi katmanı içerisinde genelde bir işlem oluşmaksızın veriler ara katmanlara gönderilmektedir. Ağırlık değerleri yapay sinir ağı sisteminde hücrelere gelen bilginin önemini göstermektedir. Ağ yapısı kendine gösterilen yeni örneklerin en uygun sonucu elde edene kadar ağırlık değerlerini değiştirmektedir. Birleştirme fonksiyonları ise, yapay sinir ağında girdiler ve ağırlıkların çarpılması sonrası elde edilen NET girdi değerinin hesaplanmasında kullanılan yöntemi ifade etmektedir. Elde edilen NET girdi değerinin işleyen ve mevcut ağı üreteceği çıktıyı belirleyen ise aktivasyon fonksiyonudur [83, 89, 90].

Şekil 3.2’de yapay sinir ağı ile optimizasyon çalışmalarında en fazla kullanılan aktivasyon fonksiyonu çeşitleri gösterilmiştir. Sigmoid fonksiyonu literatürde en fazla kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından birisidir [88]. Bu fonksiyon tipinde hem lineer hem de non-lineer fonksiyonların her biri için dengelenmiş çıktılar üreterek modelleme yapabildiği görülmektedir. Sigmoid fonksiyon için ağı değerleri Denklem 3.1 kullanılarak belirlenebilmektedir.

$$F(\text{net}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{Net}}} \quad (3.1)$$

Hiperbolik tanjant fonksiyonu da yapay sinir ağlarında sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonlarından birisidir. Bu fonksiyonda girdi değerleri öncelikle (-1,1) aralığına normalize edilir ve sonuç değerleri de (-1,1) aralığında hesaplanmaktadır. Çıktı değerlerinin bahsedilen bu değerler arasında olmasının arzulandığı durumlarda hiperbolik tanjant fonksiyonun aktivasyon fonksiyonu olarak belirlenmesi mantıklı olmaktadır. Ağın değeri Denklem 3.2'den hiperbolik tanjant fonksiyonu kullanılarak bulunabilmektedir [84], [91].

$$F(\text{Net}) = \frac{e^{\text{Net}} - e^{-\text{Net}}}{e^{\text{Net}} + e^{-\text{Net}}} \quad (3.2)$$



Şekil 3.2: Yapay sinir ağlarında kullanılan bazı aktivasyon fonksiyonları.

Lineer model tanımlanan durumlara doğrusal aktivasyon fonksiyonun kullanılması mantıklıdır. Bu modelde net girdi direkt net çıktı olarak sistemden elde edilmektedir. Doğrusal pozitif fonksiyonunda ise, ağ Net değeri 0'dan büyük olması durumunda veya eşit olması durumunda Net değerini alır ya da 0'dan küçükse 0 değerini aldığı belirlenmiştir. Adım fonksiyonun kullanıldığı yapay sinir ağı modellerinde ise; ağ eşik değerinden küçük veya eşit tüm Net değerinde çıktı olarak 0 elde edilirken eşik değerinden büyük değerlerde ise ağ 1 değerini çıktı olarak sunacaktır. İki adet rampa oluşturuvcu değerin (T_1 ve T_2) kullanıldığı rampa fonksiyonunda ise; elde edilen Net değeri T_1 'den

küçükse ağ 0 değerini, Net değer T_2 'den büyükse 1 değerini üreteceği belirlenmiştir [83], [87].

Yapay sinir ağının tasarlanması ve girdi değerlerinin çeşitli katmanlarda değerlendirilip eğitilmesini takiben çıktı değerleri elde edilmektedir. Geliştirilen modelden elde edilen tahmin değerleri ile deneysel çalışmalar sonucu elde edilen değerler kıyaslanarak korelasyon hesabı yapılmaktadır[83]. MSE (Ortalama Kare Hata) ve R^2 (Determinasyon Katsayısı) değerleri ağın sonucu üzerine fikir verebilen araçlardır, sistemin performansını belirlemektedir. R^2 varyasyon yüzdesini temsil eden 0 ile 1 arasında değişen bir sayıdır (Denklem 3.3). R^2 , 1 değerine yaklaşırsa geliştirilen modelin daha anlamlı olduğu kabul edilmektedir [92], [93].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_k)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y)^2} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te; Y_i hedef değeri gösterdiği yerde, Y_k ve Y , sırasıyla tahmin edilen değeri ve tahmin edilen verilerin ortalamasını temsil etmektedir.

MSE, bir makine öğrenme modelinin performansını ölçmek için kullanılır ve sıfıra yakın değerlere sahip tahmin edicilerin daha iyi sonuçlar verdiği kabul edilmektedir. (Denklem 3.4)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_k)^2 \quad (3.4)$$

Yukarıda bahsedilen özellikleri sebebiyle hibrit kompozitlerin üretim parametreleri yapay sinir ağları metoduyla optimize edilerek aşınma kayıpları minimize edilmeye çalışılmıştır. Bu yöntem sayesinde minimum deney sayısında optimum çıktıların elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak çalışmanın ilgili bölümlerinde detaylıca analiz edilip sunulmuştur.

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez çalışması kapsamında kullanılacak malzemeler, üretim yöntemleri ve testler detaylıca incelenmiş olup, literatür araştırması yapılarak karşılaşılabilecek potansiyel sorunlar değerlendirilerek çalışma kapsamlı olarak araştırılmıştır.

P. Samal ve diğerleri [94], 5000 serisi alüminyum alaşımı olan 5052 malzemesini TiC fazı ile kuvvetlendirmeyi amaçlamışlardır. Kompozit üretiminde kullanılan metod olarak ise sıvı faz üretim yöntemi olan karıştırılmalı döküm metodu seçilmiştir. Bu yöntemde matris malzemesi bir pota içerisinde 800 °C ertildikten sonra takviye grupları eklenmiş ve belirli süre karıştırılmıştır. Daha sonrasında ise ergiyik karışım kalıp içersine boşaltılmıştır. Karıştırma döküm prosesinde istenmeyen fazların oluşma ihtimali üretim yönteminin tercih edilmesinde çekince oluşturmaktadır. Takviyesiz malzemeyle kıyaslandığında, %9 TiC takviyelendirmesi sonucunda, sertlikte, çekme dayanımında ve akma dayanımında sırasıyla %32, %78 ve %116'ya kadar ilerleme kaydedilmiştir.

A.D. Moghadam ve diğerleri kapsamlı derleme çalışmalarında [95], farklı prosesler sonucu üretilen kompozitlerde matris ve takviye bağlantısı uygun olmadığında takviye olarak kullanılan sert seramik parçacıkları kolayca yapıdan ayrılabilirdiğini bildirmişlerdir. Bu durumla bağlantılı olarak, ayrılan bu yapılar kayma yüzeyleri arasında sıkışarak, üçüncü cisim aşındırıcısı (third body abrasives) olarak hareket ederek aşınma oranını arttıracaktır. Üretilen bu kompozitlerde, Al₂O₃ ve SiC gibi seramik esaslı takviyelerle kıyaslandığında karbon esaslı takviyeler yağlayıcı doğası sebebiyle daha iyi tribolojik özellikler gösterebilmişlerdir.

Idrisi ve diğerleri çalışmalarında [96], mikron ve nano boyutlu seramik esaslı SiC takviyesi ile dişli parçası üretmek amacıyla AA5083 alaşımını takviyelendirmişler. Taguchi yöntemi kullanılarak aşınma test parametreleri (uygulama yükü, test süresi ve SiC takviye oranı) optimize edilmiştir. Nano parçacık ilavesinin aşınma direnci üzerinde mikronize takviyeye göre daha efektif olduğu belirlenmiştir. Proses içerisinde test süresi ve SiC takviye içeriğinin en etkin parametreler olduğu belirlenmiştir.

Mazaheri ve diğerleri çalışmalarında [97], alüminyum matrisi karıştırma döküm prosesi kullanılarak TiC, B₄C gibi malzemelerle takviyelendirilmişler. Karıştırma döküm esnasında

uygun olmayan takviye ıslatabilirliği ve takviye gruplarının kötü dağılımları gibi zorlukların varlığına dikkat çekmişler. Sertlik ve çekme testlerinden sonra, malzemenin kırılma karakteristiği saptamışlardır. Kompozit iç yüzey ayrılmasının en yaygın kırılma mekanizması olduğu bildirmişler ve ayrıca Al_4C_3 gibi gevrek fazların matris-takviye ara yüzeyinde var olduğunu, bu durumda kırılma ara yüzey zayıflattığını açıklamışlardır.

Esawi ve diğerleri çalışmalarında [98], CNT içeriğinin alüminyum kompozitlerin mekanik özelliklerine odaklanmışlar. Toz metalürjisi yöntemiyle ürettikleri ağırlıkça %0.5, 1, 2 ve 5 CNT içerikli kompozit toz karışımlarını 400 dev/dk dönme hızı, 30 dakika şartlarında mekanik alaşımlama işlemine tabi tuttuktan sonra 475 MPa basınç altında üretmişlerdir. Bu işlemi takiben, 500 °C sıcaklıkta 4:1 ekstrüzyon oranında numuneleri ekstrüde etmişlerdir. Ağırlıkça %5 CNT takviyesinin alüminyum matris içerisinde uygun dağılmadığı, mekanik alaşımlama işleminin yüksek nano takviye oranlarında dispersiyon sağlamada kısmen yetersiz kaldığını saptamışlardır. Bu içerikli kompozitin mekanik özelliklerinin takviyesiz numuneden daha kötü olabileceğini rapor etmişlerdir.

Bains kapsamlı derleme çalışmasında [99], metal matrisli kompozitlerin değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Toz metalürjisi yöntemini diğer üretim yöntemleriyle kıyaslandığında Al matrisli kompozitler için çok yönlü ve en uygun yöntem olduğunu bildirmiştir. Özellik homojen mikro yapı oluşturma'nın ciddi bir üretim kolaylığı sağladığı rapor etmiştir. İnfiltrasyon ve karıştırma döküm gibi yöntemlerde üretim esnasında oluşan boşlukların ciddi sorunlara yol açacağını belirlemiştir.

Shivaramu ve diğerleri [100] alüminyum silikon alaşımını (Al-Si) MWCNT ile ağırlıkça 0.25-1 oranlarında toz metalürjisi yöntemiyle takviyelendirmişler. Başarıyla üretilen kompozitlere farklı aşınma parametrelerinde aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma karakteristikleri incelendikten sonra, aşınma mesafesi 500 m'den 1000 m'ye artırıldığında aşınma oranının azaldığını belirlemişler. Ayrıca maksimum aşınma direncinin ağırlıkça 0.75 oranında MWCNT eklenmiş kompozitten elde edildiğini bildirmişlerdir.

Yang ve diğerleri çalışmalarında [101], saf alüminyum matrisli kompozitleri grafen nano plaka takviyesi ile basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. GNP ilavesiyle birlikte mekanik özellikler ciddi artışların olduğu saptanmıştır. Ağırlıkça %0.54 GNP eklenen

kompozitlerde ekstrüzyon işleminde önce akma dayanımı ve çekme dayanımında yaklaşık olarak %116 ve %45 seviyelerinde artış olduğu rapor edilmiştir. Alüminyum matris ve GNP takviye arasındaki reaksiyon düşük sinterleme süresi ve sıcaklığı ile kontrol edildiği belirlenmiştir. Ön şekillendirme sonrası gerçekleştirilen ekstrüzyon işleminin tane boyutunu sınırladığı, bununla mekanik özelliklere önemli katkısı olduğu bildirilmiştir.

Perez-Bustamante ve diğerleri çalışmalarında [102], sinterleme süresinin Al/GNP kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Mekanik alaşımlanmış Al/GNP tozları 950 MPa basınç altında soğuk preslenmiştir daha sonra ise 500 °C sıcaklıkta 0.5-5 saat sürelerinde argon gaz atmosferinde sinterleme işlemini gerçekleştirmişlerdir. 5 saat süresince mekanik alaşımlanan kompozit tozlarından üretilen numunelerde maksimum sertlik değerinin elde edildiği bildirilmiştir. GNP oranının sertlik üzerinde önemli etkisi olduğu saptanmıştır. Ayrıca optimum sinterleme sıcaklığının 2 saat olduğu rapor edilmiştir. Saf alüminyum malzemesiyle kıyaslandığında, belirlenen proses parametreleriyle maksimum %138 sertlik artışı elde edildiği bildirilmiştir. Mekanik alaşımlama işlem süresinin artmasının sinterleme esnasında difüzyon oranını arttırdığı ve sinterleme süresini kısalttığı saptanmıştır.

Li ve diğerleri çalışmalarında [103], yüksek enerjili mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yoluyla %99'dan daha fazla bir oranda teorik yoğunluğa sahip alüminyum-grafen kompozitlerin üretmişlerdir. Ağırlıkça %0.25-0.5-1 oranlarında grafen takviye içeren karışım tozları grafit kalıp içerisinde preslenmiş ve 610 °C 4 saat süresince 30 MPa basınç altında preslenmiştir. Kompozitlerin bağıl yoğunluk değerleri saf alüminyum numunesinden bir miktar düşük olarak saptanmıştır. Bu durum oksijen, azot gibi elementlerin yapıdaki absorpsiyonuna dayandırılmıştır. Genel olarak alüminyum-grafen kompozitlerde iyi bir matris-takviye ara yüzeyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yüksek oranda grafen içeren numunelerde Al_4C_3 yapılarının ara yüzeyde mevcut olduğu saptanmıştır.

Bish ve diğerleri çalışmalarında [104], Al/GNP kompozitleri toz metalurjisi yöntemiyle başarıyla üretmişlerdir. Ayrıca ağırlıkça %0.5-1-3-5 GNP oranlarında takviyeler alüminyum malzemesiyle bir araya getirilmiştir. Karışım işlemi olarak ultrasonikasyon seçilmiştir. Aseton içerisinde karıştırılan matris ve takviye tozları daha sonrasında kurutularak konsolidasyon işlemine hazır hale getirilmiştir. Spark plazma sinterleme

prosesi toz metalurjisinde kullanılan üretim yöntemlerinden birisidir, çalışmada SPS yoluyla tozlar katı forma dönüştürülmüştür. Argon gaz atmosferinde gerçekleştirilen işlemde 50 MPa basınç ve 550 °C sıcaklık ve 40 dakika işlem süresi seçilmiştir. Ağırlıkça %0.5 ve 1 GNP içeren kompozitlerde yüksek bağıl yoğunluk elde edilmesine rağmen, %1 GNP takviyesinden fazla takviyelendirme durumunda yoğunluğun düştüğü rapor edilmiştir. Bu durum nano boyutlu GNP takviyelerinin kritik değerden sonra topaklanma eğiliminde olmasına dayandırılmıştır. Mikro yapı incelemelerinden sonra nano boyutlu takviyelerin tane büyümesini sınırladığı bu sayede mekanik özelliklerin arttığı belirlenmiştir. Ağırlıkça %3'den fazla GNP eklenmesi durumunda ise siyah bölgeler tane sınırlarında yoğunlaştığı net bir şekilde gözlemlenmiştir, bu durum tane boyutunu arttırdığı belirtilmiştir.

Alipour ve diğerleri çalışmalarında [105], mekanik alaşımlama ve ultrasonik karıştırma döküm prosesini metal matrisli kompozit üretim metodu olarak belirlemişlerdir. Matris faz olarak Al7068 malzemesi, takviye faz olarak ise GNP seçilmiştir. Öncelikle karışım tozları mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonrasında ise, ingot haldeki Al7068 malzemesi yaklaşık olarak 750 °C'de ergitilmiştir. Ön ısıtılmış Al/GNP tozları ise ergimiş alüminyum alaşımı içerisine eklendikten sonra 10-15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu işlemi takiben 2000 W ultrasonik dalgalarla 1 dakika boyunca ultrasonikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %0.1-1 GNP oranlarında eklenen takviye ile birlikte kompozit karışım daimi kalıp içerisine dökülmüştür. Metalografik işlem adımlarından sonra mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. GNP katkılı Al7068 kompozitlerde, GNP ilavesiyle birlikte kaba alfa-Al taneleri incelererek eş eksenli forma şekillenmiştir. Bu durum alfa Al tanelerinin katılaşması esnasında çekirdeklenme bölgesi gibi hareket eden GNP varlığıyla ilgili olduğu bildirilmiştir.

Li ve arkadaşları çalışmalarında [106], hacimce %0.5-1-2 oranlarında GNP ile kuvvetlendirilmiş alüminyum matrisli kompozitleri toz metalurjisi yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin FE-SEM görüntüleri incelendiğinde matris faz içerisinde düzenli olarak dağılmış hasar görmemiş GNP takviyeleri tespit etmişlerdir. Nanokompozitlerin basma dayanımları hesaplandığında hacimce eklenen GNP takviyesiyle (%0.5-1-2) basma dayanımları 297, 345 MPa ve 527 MPa olarak belirlenmiştir. Takviyelendirilmemiş alüminyum malzemesiyle kıyaslandığında %330-586 seviyelerinde basma dayanımı artışı elde edildiği rapor edilmiştir. Basma dayanımındaki

bu artış Al ve GNP'ler arasındaki uyumlu yüzey ve ara yüzey davranışından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Simões ve arkadaşları çalışmalarında [107], farklı ağırlıkça takviye oranlarında (%0.1-0.25-0.5) CNT ilavesiyle Al/CNT kompozitlerin üretimini gerçekleştirmişler. Mikroyapı ve sertlik test sonuçları incelendikten sonra, literatürden farklı olarak sertlikte CNT takviyesinin önemli bir etkisinin olmadığını bildirmişlerdir (yaklaşık 2 HV sertlik farkı mevcuttur). Ancak basma test sonuçları ise sertlik testinden farklı olarak ciddi oranda CNT etkisinin olduğu belirlenmiştir. Maksimum basma dayanımı artışı ağırlıkça %0.5 CNT içeren kompozitten 506 MPa olarak elde edilmiştir.

Jaswin ve diğerleri çalışmalarında [108], Al-CNT kompozitleri toz metalurjisi yöntemini kullanarak imal etmişlerdir. Çalışmada düşük enerjili mekanik alaşımlama karıştırma metodu olarak seçilmiştir. Ağırlıkça %1 CNT içeren karışım tozları paslanmaz çelik kap içerisinde 5:1 toz/toz oranında alaşımlanmıştır. 200 dev/dk işlem hızı olarak belirlenirken, 500-550 °C civarında alüminyum parçacıklarının muhtemel soğuk kaynaklanması engellenmek istenmiştir. Daha sonrasında kalıp içerisinde 2.5 ton yük altında soğuk preslenen karışım tozları etkili biçimde konsolide edilmiştir.

Shivaramu ve diğerleri çalışmalarında [100], Al-Si alaşımını MWCNT nano takviyesiyle kuvvetlendirerek metal matrisli kompozitleri toz metalurjisiyle üretmişlerdir. Ağırlıkça %0.25-0.5-0.75-1 oranlarında MWCNT ilavesi eklenmiştir. Üretilen kompozitler için ASTM-G99-95a standartına göre aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Test parametreleri çeşitlendirilerek optimum test parametreleri belirlenmiştir. Aşınma mesafesi, yük ve aşınma hızı girdi parametresi olarak belirlenmiştir. 1000 m aşınma mesafesinde minimum aşınma oranının elde edildiği, aşınma mesafesi 1500 m'ye çıktığında aşınma oranının aniden artış gösterdiği bildirilmiştir. Ağırlıkça %0.75 MWCNT takviyeli kompozitlerde en iyi aşınma direnci değerinin elde edildiği görülmüştür. Aşınma mekanizmaları SEM cihazıyla incelenerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

Mohapatra ve diğerleri çalışmalarında [109], sıcak pres yoluyla farklı oranlarda TiC takviyeleri saf alüminyum ile bir araya getirilmiştir. TiC malzemesi ilmenit adı verilen Fe₃TiO₃'ten sentezlenerek elde edilmiştir. TiC malzemesinin düşük yoğunluklu olması bu üretim prosesinde tercih sebebi olduğu bildirilmiştir. 325 mesh altı alüminyum tozları ve

ortalama tane boyutu 10 µm olan TiC tozları (hacimce % 5-20) ön karıştırma yapıldıktan sonra, 10 mm çaplı kalıp içerisinde 400 °C sıcaklıkta 400 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Üretimde kullanılan inert gaz cinsinin argon olduğu belirtilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numuneler metalografik işlemlerden geçirildikten sonra SEM cihazı vasıtasıyla mikroyapı incelemesine tabi tutulmuştur. Mikroyapıda herhangi bir büyük porozite varlığı saptanmamış olup, TiC dağılımı kısmen uniform olarak bildirilmiştir. Gerçekleştirilen mekanik testler sonucunda akma ve çekme dayanımı değerlerinin 205 MPa ve 360 MPa olarak hacimce %20 TiC takviyeli kompozitten elde edildiği saptanmıştır. TiC takviyesinin mekanik özelliklere ciddi oranda katkısı olduğu fakat matris faz içerisinde dağılımının iyileştirilebileceği değerlendirilmiştir.

Sivananth ve diğerleri çalışmalarında [110], otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere Al/TiC kompozitlerin üretimini gerçekleştirmiş ve yük taşıma kapasitesi açısından alternatif bir malzeme grubu olabileceğini bildirmiştir. Üç farklı ağırlıkça takviye oranlarında (%10-12-15) 325 mesh altı TiC tozlar karıştırma döküm yoluyla alüminyum içerisine katkılандırılmıştır. Yorulma ve çekme testleri ASTM standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Otomobil süspansiyon sisteminde uygulanan direksiyon mafsalları yorulmaya maruz kalan ciddi bir yapısal bileşendir. Deneysel incelemelerde bu bileşenin üretiminde Al/TiC kompozit malzeme kullanılması sonrasında performansın TiC takviyesiyle beraber arttığı tespit edilmiştir. Kırılma hasarları incelendiğinde yükün çatlak başlangıcını matris bölgesinden başlattığı rapor edilmiştir.

Murthy ve diğerleri çalışmalarında [111], 100 nm boyutlu TiC malzemesini takviye fazı olarak, Al6061 malzemesini de matris fazı olarak belirlemişlerdir. Üretim prosesi karıştırma döküm olarak seçilmiş olup, ağırlıkça %2-4-6 oranlarında TiC takviyesi kullanıldığı rapor edilmiştir. 800 °C’de pota içerisinde ergitilen Al6061 malzemesi paslanmaz çelik mekanik karıştırıcı vasıtasıyla karıştırılmıştır. Paslanmaz çelik karıştırıcı korozyon etkilerden korunması amacıyla alümina ile kaplanmıştır. Karıştırıcının dönüş hızı 450 dev/dk olarak belirlenmiştir. 400 °C’de ön ısıtmaya maruz bırakılan takviye grupları pota içerisine dökülmüştür. Testler sonucunda, Al6061 ve TiC arayüzeyinin kabul edilebilir oranda oluşum gösterdiği bildirilmiştir. TiC takviyesinin ayrıca korozyon direncini arttırdığı görülmüştür. Karıştırma döküm yönteminin getirmiş olduğu takviyelerin matris faz içerisindeki dispersiyon sorunu bu çalışmada da kısmen görülmüştür.

Kishore ve diğerkleri çalışmalarında [112], Al6061/TiC kompozitleri karıştırma döküm yoluyla imal etmişlerdir. 900 °C’de bir pota içerisinde ergitilen matris malzeme alüminyum içerisine TiC takviyeleri eklenmiştir. 300 g yük altında 15 s bekleme süresince gerçekleştirilen Vickers sertlik test sonucuna göre kompozit yapı içerisinde artan TiC oranına göre sertliğin önemli oranda arttığı belirtilmiştir. Bu teste ek olarak üretilen kompozitlerin işlenebilirliği araştırılmış olup; kesme hızının, beslemenin ve kesme derinliğinin farklı parametrelerde uygulanarak Al6061/TiC kompozitlerin talaşlı imalat prosesi Taguchi L-27 ortogonal dizi ile optimize edilmiştir.

Hanizam ve diğerkleri çalışmalarında [113], sıvı faz üretim yöntemi olan karıştırma döküm yöntemiyle A356-MWCNT kompozitleri başarıyla üretmişlerdir. Ayrıca üretilen kompozitlere T6 ısıt işlemi de gerçekleştirilmiş olup, bu işlemin etkileri de incelenmiştir. Farklı oranlardaki MWCNT takviyelerinin etkisi, Mg ısıtma ajanının etkisi ve mekanik karıştırma süresinin etkisi Taguchi metodu ile araştırılmıştır. Sinyal/gürültü oranında en iyileme yoluyla sertlik ve çekme dayanımı için optimum parametre değerkleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Optimum sertlik ve çekme dayanımı değerkleri 106.4 HV ve 277 MPa olarak belirlenmiştir. Maksimum ıktı değerklerinin elde edilmesini sağlayan girdi değerkleri ise; ağırlıkça %0.5 MWCNT takviyesi, 0.5 g Mg eklentisi ve 10 dk karıştırma süresidir. Ham malzeme ile kıyaslandığında sertlikte %76.3 artış, çekme dayanım değerkinde %108.4 artış elde edilmiştir. Karıştırma döküm prosesinin getirmiş olduğu porozite yapısı ayrıca rapor edilmiştir.

Jeyasimman ve diğerkleri çalışmalarında [71], Al6061 nanokristalin yapıdaki matris fazını ağırlıkça %0.5-1-1.5-2 MWCNT takviyesiyle güçlendirerek kompozit yapı elde etmişlerdir. 30 saat süresince mekanik alaşımlanan alüminyum tozlarının son iki saatinde MWCNT takviyeleri eklenerek ikili karıştırma yapılmıştır. 2 saat süresince MWCNT takviyesiyle mekanik alaşımlama yapılmasının nedeni karbon esaslı MWCNT yapısının yüksek sıcaklıktan zarar görmesini engellemektir. Alaşımlanan karışım tozları preslendikten sonra 450-525-600 °C’de sinterlenmiştir. MWCNT takviyesinin konsolidasyon davranışına etkisi Heckel, Panelli, Ambrosio Filho eşitlikleriyle incelenmiştir. Sertlik testi sonucunda ham malzemeye kıyaslandığında 43 kat sertlik artışı kompozit üretim prosesiyle elde edilebilmiştir. %2 MWCNT içeren kompozitten maksimum basma dayanımı değeri 161 MPa olarak elde edilmiştir.

Prabhakar ve diğerleri çalışmalarında [114], katı hal metal matrisli kompozit üretim yöntemi olan sürtünme karıştırma yöntemiyle Al5083 malzemesini MWCNT ile takviyelendirmeyi başarmışlardır. 4 mm kalınlığındaki Al5083 plakalar 100x50x5 mm³ boyutlarında işlem için hazırlanmıştır. Sürtünme karıştırma işlemi için plakaların üzerinde 1 mm x 2 mm boyutlarında oyuklar açılmıştır. Açılan bu oyuklara MWCNT takviyesi konumlandırılmıştır. Proses 1800 dev/dk dönüş hızında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma yönteminin metal matrisli kompozit üretiminde alternatif bir metod olduğu ortaya konmuştur. Sertlik testleri sonucunda eklenen takviyelerin sertlikte artış gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca MWCNT takviyelerinin korozyon direncini önemli oranda arttırdığı rapor edilmiştir.

Van Trinh ve diğerleri çalışmalarında [115], pul toz metalurjisi ve sıcak presleme yöntemlerini kombine ederek Al/CNT kompozitlerin üretimini gerçekleştirmiştir. Raman spektroskopisi, optik mikroyapı, taramalı elektron mikroskobu incelemesi işlemleri üretilen kompozitlere uygulanmıştır. Bu proses işlemleriyle tabakalı Al/CNT varlığının olduğu bildirilmiştir. Matris içerisinde iyi dağılmış CNT yapıları gözlemlenmiş olup, nano takviyelerin mikro-çatlakları köprüleme görevi yaptığı değerlendirilmiştir. Termal genleşme katsayısı (CTE) karbon içeriğinin artmasıyla birlikte azalış gösterdiği rapor edilmiştir.

Ghazaly ve diğerleri çalışmalarında [116], grafen takviye oranının kompozitlerin mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. AA2124 malzemesinin matris olarak belirlendiği çalışmada, grafen takviyesinin özellikle aşınma oranı üzerinde ciddi etkisi olduğu saptanmıştır. Kendinden yağlacı özelliği bulunan grafen takviyesinin takviyesiz malzemeye kıyaslandığında düşük aşınma oranları gösterdiği bildirilmiştir. %3 oranında grafen içeren kompozitin aşınma yüzeyleri SEM yoluyla inceledikten sonra, delaminsayon yapılarının varlığının takviyesiz malmemeye göre daha az yer aldığı rapor edilmiştir. Grafen oranı %5'e arttırıldığında baskın aşınma mekanizmasının plastik deformasyon olduğu belirlenmiştir. Grafen takviyesinin yapıya eklenmesiyle birlikte sürtünme katsayısı değerinde düşüş olduğu kaydedilmiştir.

Omrani ve diğerleri çalışmalarında [117], grafen nano plakaların alüminyum metaline eklenmesi sonrasında tribolojik değişimleri açıklamaya çalışmışlardır. Al₂O₃ malzemesi ikincil takviye grubu olarak belirlenmiş olup, hibrit yapının muhtemel etkileri

araştırılmıştır. Al/GNP ve Al/GNP/Al₂O₃ kompozitleri farklı oranlarda soğuk preslemeyi takiben sıcak presleme yoluyla imal edilmiştir. Eklenen GNP ve Al₂O₃ takviyeleriyle birlikte sertlik değerlerinde artış saptanmıştır. Takviyesiz alüminyum metaliyle kıyaslandığında, Al/GNP kompozit numunesinde %20 sertlik artışı elde edilirken, Al/1GNPs/2Al₂O₃ numunesinden %27 sertlik artışı elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri de sertlik sonuçlarıyla paralel olarak ortaya çıkarak Al/1GNP ve Al/1GNPs/2Al₂O₃ kompozitlerinde sırasıyla %22 ve %53 sürtünme katsayısı düşüşü gözlemlenmiştir.

Ujah ve diğerleri çalışmalarında [118], Al-CNTs-Nb hibrit kompozitleri spark plazma sinterleme yöntemiyle üretmişler. Yüksek maliyet gerektiren spark plazma sinterleme parametrelerini de Taguchi metodunu kullanarak optimize etmişlerdir. Sisteme girdi olarak sinterleme sıcaklığı, basıncı, süresi ve ısıtma oranı tanımlanmıştır. Çıktı olarak ise sertlik ve yoğunluk tanımlaması yapılmıştır. Sertlik testleri Vickers skalasında, yoğunluk ölçümleri Arşimet metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, maksimum sertlik değeri 38.57 HV, maksimum yoğunluk değeri ise %99.3'tür. Maksimum çıktı değerlerinin sistemden elde edilmesine olanak sağlayan girdi parametreleri ise; 630 °C sinterleme sıcaklığı, 30 MPa üretim basıncı, 10 dk sinterleme süresi ve 200 derece/dakika ısıtma hızı olarak belirlenmiştir. Spark plazma sinterleme metodu kullanılarak sertlikte %20 oranında artış elde edilmiştir.

Varol ve diğerleri çalışmalarında [119], seramik takviye olan SiC malzemesi Al2024 alaşımı ile toz metalurjisi yöntemi kullanılarak konsolide edilmiştir. Üretim prametreleri yapay sinir ağları ile optimize edilmiştir. SiC takviye oranı, Al2024 matris boyutu ve mekanik alaşımlama süresi girdi parametresi olarak, yoğunluk ve sertlik ise çıktı olarak tanımlanmıştır. Sistemin başarı değerlendirilmesi MAPE VE RMSE değerleri ile ölçülmüştür. MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hata) ve RMSE (Kök Ortalama Kare Hata) değerleri sırasıyla %0.18 ve %0.99 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler sistemin yapay sinir ağları ile yüksek oranda açıklanabildiğini kanıtlamıştır.

Aydın ve diğerleri çalışmalarında [120], Al2024-BN kompozitlerin yüksek sıcaklık aşınma davranışını incelemiştir. Öncelikle ağırlıkça %1 ve %2 oranlarında BN takviyeleri Al2024 alaşımı ile ön karıştırma proseslerinden sonra sıcak pres cihazında 525 °C'de 1 saat süresince, 50 MPa basınç altında üretilmiştir. Numune ölçüleri 15 mm x 23 mm olarak

seçilmiştir. Tribolojik özellikleri 10 N, 20 N ve 30 N altında, 25-125-225 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. En yüksek aşınma performansı Al2024 alaşımın ağırlıkça %2 oranında BN ile takviyelendirildiği kompozitten elde edilmiştir. Aşınma izlerinin SEM cihazı ile incelenmesinden sonra baskın aşınma mekanizmasının delaminasyon olduğu bildirilmiştir. Nonlineer regresyon analizi %91.5 oranında başarıyla sonuçları tahmin ettiği bildirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında bir çok literatür çalışması incelenmiş olup, yayınlanan çalışmaların pozitif ve negatif yanları değerlendirilmiştir. Literatür sayesinde üretim yönteminin çeşidi, prosesin etkinlik seviyesi, proses maliyeti göz önüne alınarak üretim yöntemi belirlenmiştir. Karıştırma döküm yönteminde üretim maliyeti düşük olmasına rağmen proses esnasında karşılaşılan istenmeyen fazların mevcut olduğu, bu durumun kompozitin özelliklerini doğrudan etkilediği sonucuna varılması neticesinde toz metalurjisi yöntemi tercih edilmiştir. Mikro ve nano takviye gruplarının ikili ve üçlü kombinasyonlarının etkilerinin üretilecek malzemenin özelliklerini önemli oranda değiştirdiği görüldüğü sonrasında, hibrit takviye grubu çalışılmasına karar verilmiştir. Toz metalurjisi yönteminde de bir çok etkin parametrenin var olması ve bu parametrelerin çıktılar üzerinde etkili olması sebebiyle üretim parametrelerinin optimizasyonunun yapılarak üretim maliyetinin minimizasyonu planlanmıştır. Yanıt yüzey metodu, Taguchi gibi yöntemlerin pozitif ve negatif yönleri analiz edilmiş olup çalışmamız için en etkili optimizasyon yönteminin yapay sinir ağları metodu olduğu sonucuna varılmıştır. Yapay sinir ağları ile optimizasyon yapılması sonrasında sistemin değerlendirme ölçütü R^2 değeri ve MSE değerleriyle ölçülmüştür.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Materyal

Bu çalışmada Al 6000 serisi grubundan olan Al6061 (Al-Mg-Si) alaşımı matris fazı olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Al6061 tozunun ortalama tane boyutu yaklaşık 10 µm olarak belirlenmiştir, saflık seviyesi 99.5% olarak bildirilmiştir. Al6061 malzemesinin özellikleri ve içerdiği elemental değerler Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1: Çalışmada kullanılan Al6061 malzemesinin kimyasal analizi.

Si	Mn	Cr	Zn	Cu	Ti	Mg	Al
0.4-0.8	<0.1	0.04-0.35	<0.2	0.15-0.40	<0.1	0.8-1.2	Kalan

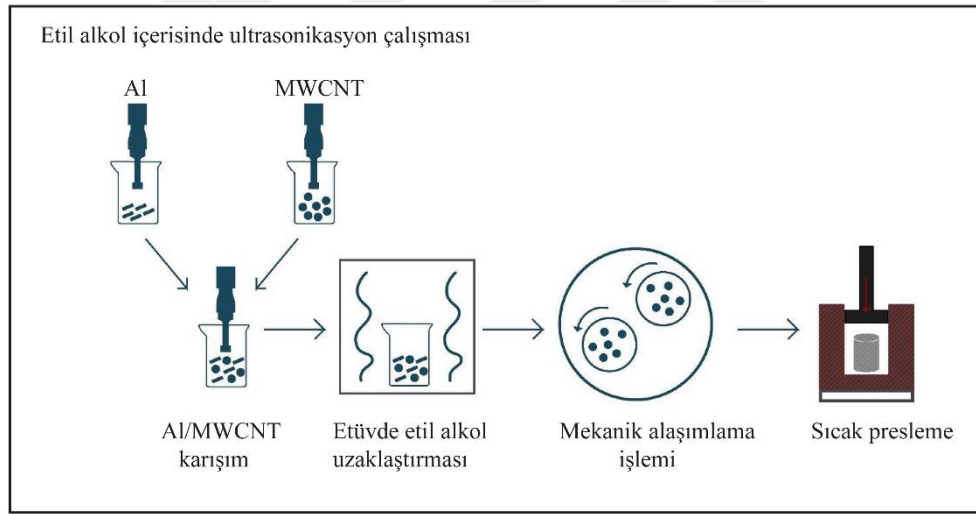
Çalışmada hibrit yapının oluşturulması amaçlandığı için iki farklı takviye grubu belirlenmiştir. Kullanılan takviye malzemeleri TiC (Titanyum Karbür), MWCNT (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp) ve GNP (Grafen Nano Plaka)'dır. TiC genellikle metal matrisli malzemelerin üretiminde kullanılmakta olup, termodinamik açıdan kararlıdır, yüksek sertliğe sahip seramik esaslı malzemedir. MWCNT yeni nesil malzeme gruplarından birisi olup, son zamanlarda büyük ilgi çeken nano takviye malzemesidir. Karbon nanotüpler üç formda kullanılmaktadır: i) çok duvarlı CNT (MWCNT), ii) çift duvarlı CNT (DWCNT), and tek duvarlı CNT (SWCNT). Çelik malzemeden 60 kat daha yüksek çekme dayanımı değeriyle (~60 GPa), yüksek mukavemet gerektiren birçok uygulamada karbon nanotüpler öne çıkmaktadır. Bir diğer takviye grubu GNP'de istisnai düzlem içi elastik modülü, karbon atomlarının sp^2 hibrit bağından kaynaklanmaktadır. Grafenin 2D yapısı, işlemede yüksek basınçların sıklıkla kullanıldığı metal ve seramik kompozitlerde kullanım için idealdir.

Bu tez çalışmasında yukarıda bahsedilen malzeme grupları çeşitli kombinasyonlar halinde, ön çalışmalar ve literatür incelemesi sonucu belirlenen üretim parametrelerine göre toz metalürjisi yöntemiyle sıcak pres cihazında üretilmiştir. Üretilen kompozitler şu şekildedir; Al6061/TiC/MWCNT, Al6061/TiC/GNP, Al6061/MWCNT/GNP, Al6061/TiC, Al6061/MWCNT, Al6061/GNP şeklinde gruplandırılmıştır. TiC, GNP ve MWCNT malzemelerinin çalışma içerisinde farklı oranlarda bir araya getirilerek, malzemelerin sahip oldukları sertlik, kimyasal kararlılık ve doğal yağlayıcılık özelliklerinin kompozit malzemede oluşturulması amaçlanmıştır.

Deneysel işlemlere başlanmadan önce deney tasarımı yapılarak minimum deney sayısında tüm sistemin açıklanabilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple MINITAB yazılımı kullanılarak yapılacak deneylerin planlaması tasarlanmıştır.

5.2 Yöntem

Çalışmada incelenen hibrit kompozitler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Şekil 5.1’de tez prosesinin işlem adımları gösterilmiştir. Toz metalürjisi yönteminde bir dizi tozların hazırlığının yapıldığı ön işlem ve daha sonrasında üretim işleminden oluşmaktadır. Nano boyutlu tozların yüksek Van der Waals bağ kuvvetleri içermeleri ve bunun neticesinde topaklanma eğilimleri sebebiyle takviyenin matris içerisinde iyi bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Çalışmada iki farklı nano boyutlu takviye malzemesi kullanılması sebebiyle karışım tozları sıcak pres cihazında bir araya getirilmeden önce, tozlara iki aşamalı toz karışım prosesi uygulanmıştır.



Şekil 5.1: Tez prosesinin işlem adımları.

Öncelikle tozlar ayrı ayrı beherde bulunan etil alkol içerisine boşaltılıp ultrasonikasyon işlemine maruz bırakılmıştır. Ayrı ayrı ultrasonikasyon uygulanan tozlar daha sonra tek bir beher içerisine boşaltılmış ve tekrar ultrasonikasyona maruz bırakılmıştır. Ultrasonikasyon işlemi her bir adımda 30 dakika süresince 20 kHz şiddetinde uygulanmıştır. Bu işlem esnasında yüksek frekanslı dalgalar kullanılması sebebiyle etil alkol toz karışımı ısınacaktır. Tozlarda görülebilecek aşırı ısınma durumunda özellikle karbon esaslı

malzemelerde görülen bozulmaların oluşmaması amacıyla kullanılan parametrelere dikkat edilmiştir. Şekil 5.2’de çalışmada kullanılan ultrasonikasyon test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Çalışmada uygulanan ultrasonikasyon işlemi.

Ultrasonikasyon işleminden sonra etil alkolün toz karışımından uzaklaştırılması gerekliliği sebebiyle etüv cihazı kullanılarak yapıdan etil alkol uzaklaştırılarak tozlar kurutulmuştur. Kurutma işlemi 24 saat süresince 60 °C’de gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında kurutulmuş tozlar mekanik alaşımlamaya tabi tutulmuştur. Mekanik alaşımlamanın amacı takviye gruplarının matris içerisinde dağılımını arttırmak ve topaklanmayı minimize etmektir. Mekanik alaşımlama işlemi 250 dev/dk dönme hızında 1 saat süresince gerçekleştirilmiştir. Mekanik alaşımla işleminde kullanılan cihaz Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Bu işlem sırasında çinko sterat maddesi toz karışımına eklenerek toz karışımın bilyalara ve hazneye yapışmasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. İşlem sırasında 10:1 oranında bilya toz oranı belirlenmiştir. Bilya malzemesi ise 10 mm çaplı paslanmaz çeliktir.



Şekil 5.3: Mekanik alaşımla cihazı.

Kompozit tozların karışım prosesi tamamlandıktan sonra, tozlar sıcak pres cihazında argon atmosferinde belirlenen proses parametrelerinde başarıyla üretilmiştir. Sıcak pres cihazı Balıkesir Üniversitesi Kompozit Araştırma Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunmaktadır. Sıcak pres cihazı MSE marka olup, maksimum sıcaklığı 750 °C ve maksimum basıncı 25 tondur. Şekil 5.4’de çalışmada kullanılan sıcak pres cihazı gösterilmiştir.

Sinterleme ve presleme işleminin sıcak pres cihazında aynı anda uygulanmasının mekanik özelliklere önemli bir katkısı olduğu literatürde belirtilmiştir. Sıcak pres cihazında kullanılan kalıp malzemesi sıcak iş takım çeliğinden üretilmiştir. 15 mm çapında 10 mm yüksekliğinde silindirik numuneler üretilmiştir. Üretim esnasında kalıp toz yapışmasının önüne geçmek amacıyla hekzagonal bor nitrür kalıp ayırıcı kullanılmıştır. Her üretim öncesi ve sonrasında sıcak iş takım çeliğinin iç yüzeyi detaylıca temizlenmiştir. Üretilen kompozitler kalıp içerisinde kolaylıkla çıkartılmış olup herhangi bir çatlak yapısı tespit edilmemiştir.



Şekil 5.4: Çalışmada kullanılan sıcak pres cihazı.

Üretilen kompozitlerin yüzey incelemesi yapılmadan önce metalografik işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Metalografik işlemler Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Metalurji Laboratuvarında bulunan Metkon marka zımparalama ve parlatma cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’de zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan cihaz gösterilmiştir. Öncelikle 400 kademeden 1200 gritlik SiC zımpara kademesine kadar numuneler zımparalanmış daha sonrasında ise elmas pasta solüsyon ile parlatılmıştır.

Çalışmada kullanılan tozların morfolojileri ve üretilmiş kompozitlerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) vasıtasıyla analiz edilmiştir. Matris yapı içerisinde takviye dağılımlarının oryantasyonları EDS analiziyle saptanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm tozların parçacık boyut analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5: Zimparalama ve parlatma işleminin yapıldığı cihaz.

Üretilen kompozitlerin porozite ve yoğunluk değerlerini saptamak amacıyla Arşimet Metodu kullanılarak numunelerin yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan elektronik Arşimet terazisi Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Bu yöntemde malzemelerin öncelikle kuru ağırlıkları daha sonra ise su içerisindeki asılı haldeki ağırlıkları ölçülmüştür. Deney sıvısı olarak ise oda sıcaklığında bulunan saf su kullanılmıştır.

Kompozitlerin teorik yoğunluğu Denklem 5.1 kullanılarak bulunmuştur.

$$\rho_{teo} = (\rho_m \times \%w) + (\rho_{tak} \times \%w) \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’ de; kompozitin teorik yoğunluğu ρ_{teo} ile, matrisin yoğunluğu ρ_m ile ifade edilirken, takviyenin yoğunluğu ρ_{tak} ile ağırlıkça yüzde oran ise $\%w$ ile temsil edilmiştir.

$$\rho_{den} = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times 1 \quad (5.2)$$

Üretilen kompozitlerin deneysel yoğunluk değerleri (ρ_{den}) Denklem 5.2’ den yararlanılarak saptanmıştır. Kompozitin havada ölçülen kuru ağırlığı m_h ile, su içerisindeki asılı ağırlığı ise m_s ile tanımlanmıştır.

Kompozitlerin yoğunluğu ve içerdikleri porozite hakkında bilgi veren bağıl yoğunluk değerleri Denklem 5.3 vasıtasıyla saptanmıştır.

$$\rho_r = \frac{\rho_{den}}{\rho_{teo}} \times 100 \quad (5.3)$$



Şekil 5.6: Deneyde kullanılan Arşimet terazisi.

Çalışmada kullanılan tozların (Al6061, TiC, MWCNT, GNP) parçacık boyut analizleri Master Sizer Hydro 3000 marka parçacık boyut ölçüm cihazı vasıtasıyla belirlenmiştir. Lazer ışık saçılımı prensibiyle çalışan bu sistem yoluyla her bir toz çeşidinin ortalama parçacık boyutu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan parçacık boyut analiz cihazı Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Çalışmada kullanılan parçacık boyut analiz cihazı.

Numunelerin iç yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. SEM cihazının çalışma prensibinde görüntüler, numune üzerine yüksek seviyede voltaj ile hızlandırılmış elektronların odaklanmasını takiben, tanımlanan elektron demetinin numune

yüzeyi çerçevesinde taratılması esnasında incelenen numune atomları ve elektron arasında meydana gelen çeşitli girişimler neticesinde oluşan etkilerin algılayıcılar tarafından bir araya getirilmesi ve sinyal güçlendiricilerinden geçirilmesi sonrasında katot ışınları tüpü ekranına aktarılmasıyla elde edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında numunelerin iç yapı görüntülemeleri ve aşınma izi görüntülemeleri Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (DEFAM) bünyesinde bulunan Zeiss Gemini 500 marka SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8: Çalışma kapsamında kullanılan SEM cihazı.

Tez kapsamında kullanılan tozlar arasında MWCNT ve GNP gibi karbon esaslı malzemelerin olması sebebiyle gerek bu elementin varlığının tespiti gerekse de üretim öncesi gerçekleştirilen iki aşamalı karıştırma prosesi esnasında karbon esaslı takviyelerin yüksek sıcaklık sebebiyle zarar görüp görmediğini belirlemek amacıyla Raman analizi gerçekleştirilmiştir. Raman analizi prensip olarak; moleküllerin foton ile etkileşimi sonrasında enerji aktarımı prensibine göre moleküllerin farklı titreşim enerji düzeylerinde bulunması esasına dayalı bir karakterizasyon yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Analizlerin yapılmasında İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Renishaw marka Raman Spektrometresi Cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9: Raman spektroskopisi cihazı.

Kompozit yapıların içerisindeki takviye gruplarının tüm numune hacmindeki dağılımını belirlemek amacıyla SkyScan 1172 Micro-CT marka tomografi cihazıyla Al/TiC kompozitler tomografik olarak detaylıca incelenmiştir. Çalışmada kullanılan Micro-CT cihazı Şekil 5.10’da görülmektedir.



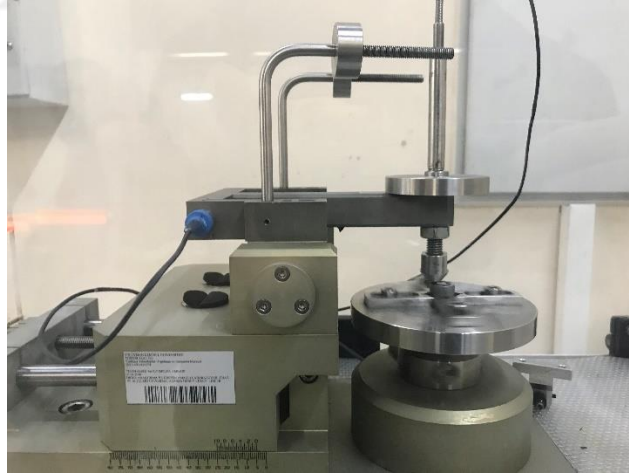
Şekil 5.10: Çalışmada kullanılan Micro-CT cihazı.

Üretilen numunelerin elektriksel iletkenlik ölçüm işlemleri Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜBTAM)’da bulunan Keithley 2400 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.11). Ölçümler LabVIEW programı yoluyla kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.11: Çalışmada elektriksel iletkenlik ölçümlerinde kullanılan cihaz.

Aşınma testleri UTS marka Pin-on disk aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.12). Kullanılan yük 2N, aşınma mesafesi 150 m ve aşınma hızı 0.05 m/s olarak kararlaştırılmıştır. Aşındırıcı olarak paslanmaz çelik aşındırıcı pin kullanılmıştır. Kuru ortamda gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda anlık aşınma katsayısı değişimleri bilgisayar ortamında elde edilmiştir. Aşınma testlerine başlamadan önce numunelerin kuru haldeki ağırlıkları hassas terazi vasıtasıyla belirlendikten sonra testler gerçekleştirilmiş ve aşınma sonrası kütleleri tekrar ölçülmüştür. Numunelerin aşınma kayıpları belirlenerek detaylı karşılaştırmalar ilgili bölümler içerisinde açıklanmıştır.



Şekil 5.12: Çalışmada kullanılan univarsal aşınma test cihazı.

Malzemelerin aşınma kayıpları (Δ_x) Denklem 5.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ifade edilen x_1 aşınma testi öncesi numune ağırlığını, x_2 ise aşınma testi sonrası numune ağırlığını temsil etmektedir.

$$\Delta_x = x_1 - x_2 \quad (5.4)$$

Aşınma kaybı hesaplandıktan sonra, hacimsel aşınma oranını (Δ_m) hesaplamak için malzemelerin deneysel yoğunluk ρ_{den} değerinin kullanıldığı Denklem 5.5 oluşturulmuştur.

$$\Delta_m = \frac{\Delta_x}{\rho_{den}} \quad (5.5)$$

Son olarak üretilen kompozitlerin aşınma oranları Denklem 5.6 kullanılarak hesaplanmıştır (W_r). Denklemde ifade edilen F aşınma testinde kullanılan kuvveti (2 N), L ise aşınma mesafesini (150 m) temsil etmektedir.

$$W_r = \frac{\Delta_m}{F \times L} \quad (5.6)$$

Üretilen numunelerin sertlik değerlerini saptamak amacıyla mikro Vickers sertlik testi gerçekleştirilmiştir. Sertlik testi tepe açısı 136° olan elmas piramit uç kullanılarak 1 kg yük altında HV_1 mertebesinde gerçekleştirilmiştir. Yükün uygulanma süresi 10 s olarak belirlenmiştir. İz oluştuktan sonra köşegenler arası mesafeler ölçülüp (d_1 ve d_2) sertlik değeri hesaplanmaktadır. Mikro sertlik test cihazı Metkon marka olup, Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Her bir numuneden beş adet ölçüm alındıktan sonra ortalama değerleri alınıp sertlik değerleri belirlenmiştir.



Şekil 5.13: Sertliklerin testlerinin gerçekleştirildiği mikro sertlik cihazı.

Üretilen numunelerin basma testleri Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜBTAM)'da bulunan bilgisayar kontrollü Zwick/Roell marka 250 kN kapasiteli çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Basma testleri ASTM E9-09 standardında 0.5 mm/dk şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan çekme/basma test cihazı Şekil 5.14'de gösterilmiştir.



Şekil 5.14: Çalışmada kullanılan universal basma test cihazı.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, öncelikle belirlenen üretim parametreleri altında deney tasarımı MINITAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir, üretim sırası yazılımdan elde edilen sıralamaya göre belirlenmiştir. İki ve üçlü takviyelerin kullanıldığı üretimler Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilmiştir. Takviye oranları ön çalışmalar neticesinde belirlenerek, optimum parametreler belirlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 6.1: Çalışmada deney tasarımı yapılan birinci seri üretim grubu.

Numune Sırası	Ağırlıkça Mikronize Takviye (%)	Ağırlıkça Nano Takviye (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)
1	4	0.5	450	15	150
2	12	0.5	450	15	50
3	4	1.5	450	15	50
4	12	1.5	450	15	150
5	4	0.5	550	15	50
6	12	0.5	550	15	150
7	4	1.5	550	15	150
8	12	1.5	550	15	50
9	4	0.5	450	45	50
10	12	0.5	450	45	150
11	4	1.5	450	45	150
12	12	1.5	450	45	50
13	4	0.5	550	45	150
14	12	0.5	550	45	50
15	4	1.5	550	45	50
16	12	1.5	550	45	150
17	4	1	500	30	100
18	12	1	500	30	100
19	8	0.5	500	30	100
20	8	1.5	500	30	100
21	8	1	450	30	100
22	8	1	550	30	100
23	8	1	500	15	100
24	8	1	500	45	100
25	8	1	500	30	50
26	8	1	500	30	150
27	8	1	500	30	100
28	8	1.5	450	30	100
29	8	0.5	550	30	100
30	4	0.5	500	30	100
31	12	1.5	500	30	100
32	12	0.5	500	30	100

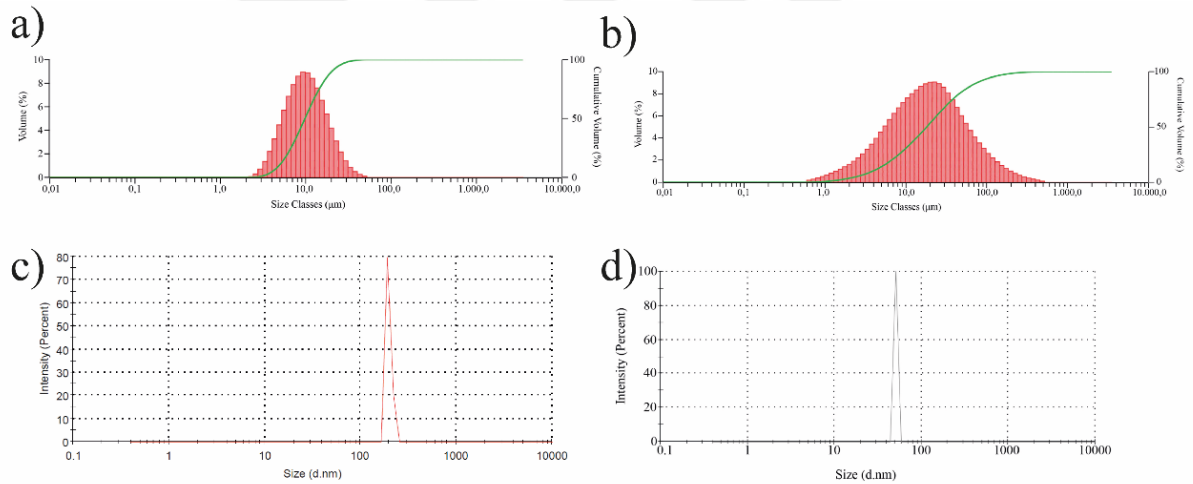
Tablo 6.2: Çalışmada deney tasarımı yapılan ikinci seri üretim grubu.

Numune Sırası	Ağırlıkça Nano Takviye (%)	Ağırlıkça Nano Takviye (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)
1	0.5	0.5	450	15	150
2	1.5	0.5	450	15	50
3	0.5	1.5	450	15	50
4	1.5	1.5	450	15	150
5	0.5	0.5	550	15	50
6	1.5	0.5	550	15	150
7	0.5	1.5	550	15	150
8	1.5	1.5	550	15	50
9	0.5	0.5	450	45	50
10	1.5	0.5	450	45	150
11	0.5	1.5	450	45	150
12	1.5	1.5	450	45	50
13	0.5	0.5	550	45	150
14	1.5	0.5	550	45	50
15	0.5	1.5	550	45	50
16	1.5	1.5	550	45	150
17	0.5	1	500	30	100
18	1.5	1	500	30	100
19	1	0.5	500	30	100
20	1	1.5	500	30	100
21	1	1	450	30	100
22	1	1	550	30	100
23	1	1	500	15	100
24	1	1	500	45	100
25	1	1	500	30	50
26	1	1	500	30	150
27	1	1	500	30	100
28	1	1.5	450	30	100
29	1	0.5	550	30	100
30	0.5	0.5	500	30	100
31	1.5	1.5	500	30	100
32	1.5	0.5	500	30	100

Al/TiC, Al/GNP, Al/MWCNT, Al/GNP, Al/TiC/GNP, Al/TiC/MWCNT kompozitlerin yoğunluk, SEM mikroyapı, Raman Spektroskopisi, Micro-CT analizi, sertlik, aşınma testleri ve optimizasyonu, basma testleri ve optimizasyonu, elektriksel iletkenlik testleri sonucunda elde edilen bulgular sunulmuş olup, sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

6.1 Tane Boyut Analizi Sonuçları

Çalışmada kullanılan tozların tanecik boyut dağılımları Master Sizer Hydro 3000 lazer tane boyut ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Mikronize tozlar kuru olarak nano tozlar ise sulu ortamda tane boyutları belirlenmiştir. Şekil 6.1.a'da matris faz olarak çalışmada kullanılan Al6061 tozunun tane boyut dağılımı ve ortalama tane boyutu gösterilmektedir. Grafik analiz edildiğinde, Al6061 tozunun ortalama tane boyutu 9.79 μm olarak belirlenmiştir. Takviye faz olarak kullanılan mikronize TiC tozunun ortalama tane boyutu ise 18.1 μm olarak elde edilmiştir (Şekil 6.1.b). Nano boyutlu tozların mikronize tozlarla metal matrisli kompozit üretiminde etkileşiminin nihai ürün üzerinde etkilerini belirlemek ve yorumlamak amacıyla seçilen MWCNT ve GNP tozlarının parçacık boyut analizleri gerçekleştirilmiştir. MWCNT malzemesinin ortalama boyutu 196.3 nm olarak belirlenmiştir (Şekil 6.1.c). Diğer takviye grubu GNP malzemesinin ortalama tane boyutu ise 50.75 nm olarak saptanmıştır (Şekil 6.1.d).

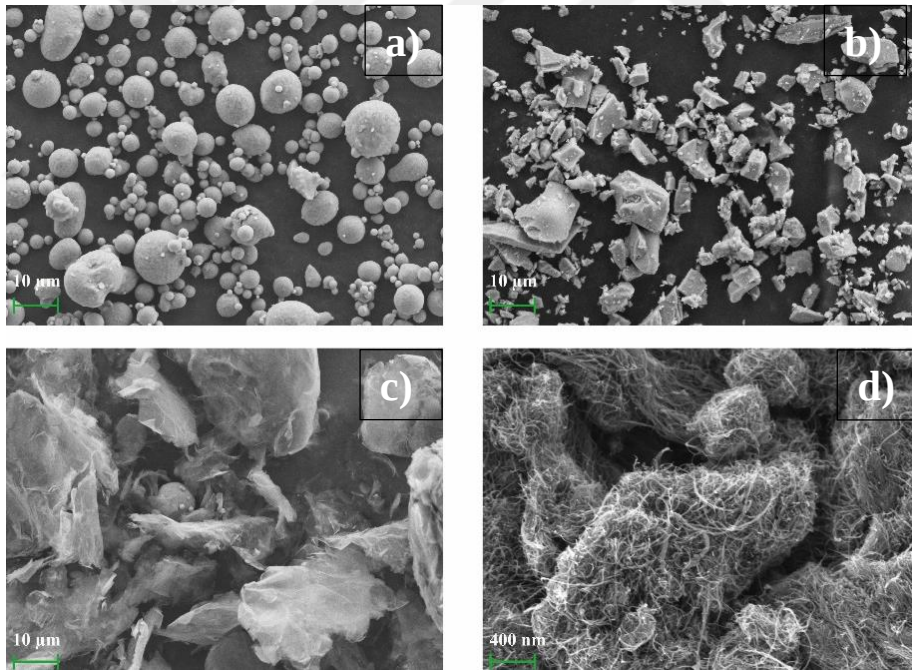


Şekil 6.1: Çalışmada kullanılan tozların parçacık boyut analizleri
a) Al6061 b) TiC c) GNP d) MWCNT.

6.2 Tozların SEM Görüntüleri

Çalışmada kullanılan toz malzemelerin karıştırma ve şekillendirme prosesi öncesinde SEM görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. İncelemeler neticesinde elde edilen net görüntüler Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Şekil 6.2.a incelendiğinde 6061 alaşımı alüminyum esaslı tozların dağılımları net bir şekilde görülmektedir. Al6061 tozların genellikle eş eksenli olarak dağılım gösterdiği, morfolojilerinin istenildiği gibi küresel olarak yer aldığı belirlenmiştir. Küresel yapılı matris tozların şekillendirilmesi esnasında düzensiz dağılan

ve uniform şekilli olmayan tozlara göre daha iyi şekillendirilebildiği daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir [42]. Çalışmada takviye gruplarının matris faz içerisinde iki aşamalı karıştırma prosesi uygulanması planlandığından (ultrasonikasyon ve mekanik alaşımlama), küresel şekilli matris tozların mevcudiyetinin önemli olduğu açıktır. Şekil 6.2.b’ de birinci takviye fazı olarak kullanılan mikronize TiC tozlarının SEM görüntülemesi verilmiştir. Tozların kabul edilebilir ölçüde uniform dağılıma sahip olduğu görülmektedir. İkincil takviye grubu olarak kullanılan GNP malzemesinin SEM görüntülemesi Şekil 6.2.c’de verilmiştir. Nano boyutlu GNP tozlarının literatürde belirtildiği üzere tabakalı formda olduğu açıkça görülmektedir. Bu istisnai morfolojik özellik GNP malzemesinin birçok alanda kullanılmasının önüne açmakta ve malzeme bilimine önemli katkı sunmaktadır. Şekil 6.2.d’de MWCNT takviye grubunun SEM görüntülemesi gösterilmiştir. MWCNT yapılarının tüp şeklinde olduğu net bir şekilde görülmektedir. GNP ile benzer şekilde MWCNT malzemesi de sahip olduğu bu morfoloji sebebiyle istisnai özelliklere sahiptir.

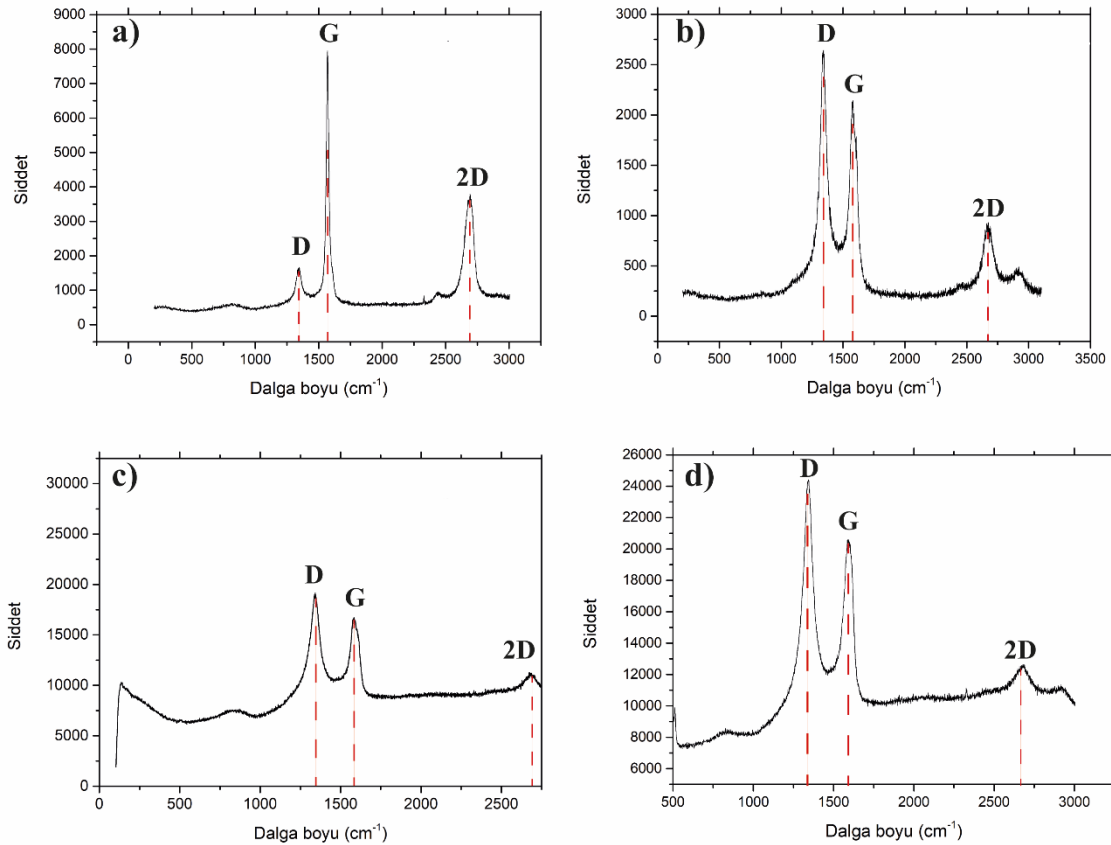


Şekil 6.2: Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri
a) Al6061 b) TiC c) GNP d) MWCNT.

6.3 Raman Analizi

Çalışma kapsamında takviye grubu olarak GNP ve MWCNT nano takviyelerinin kullanılması ve karbon esaslı bu malzemelerin şekillendirme öncesi karıştırma prosesi esnasında hasara uğrayıp uğramadığının belirlenmesi amacıyla Raman Spektroskopisi

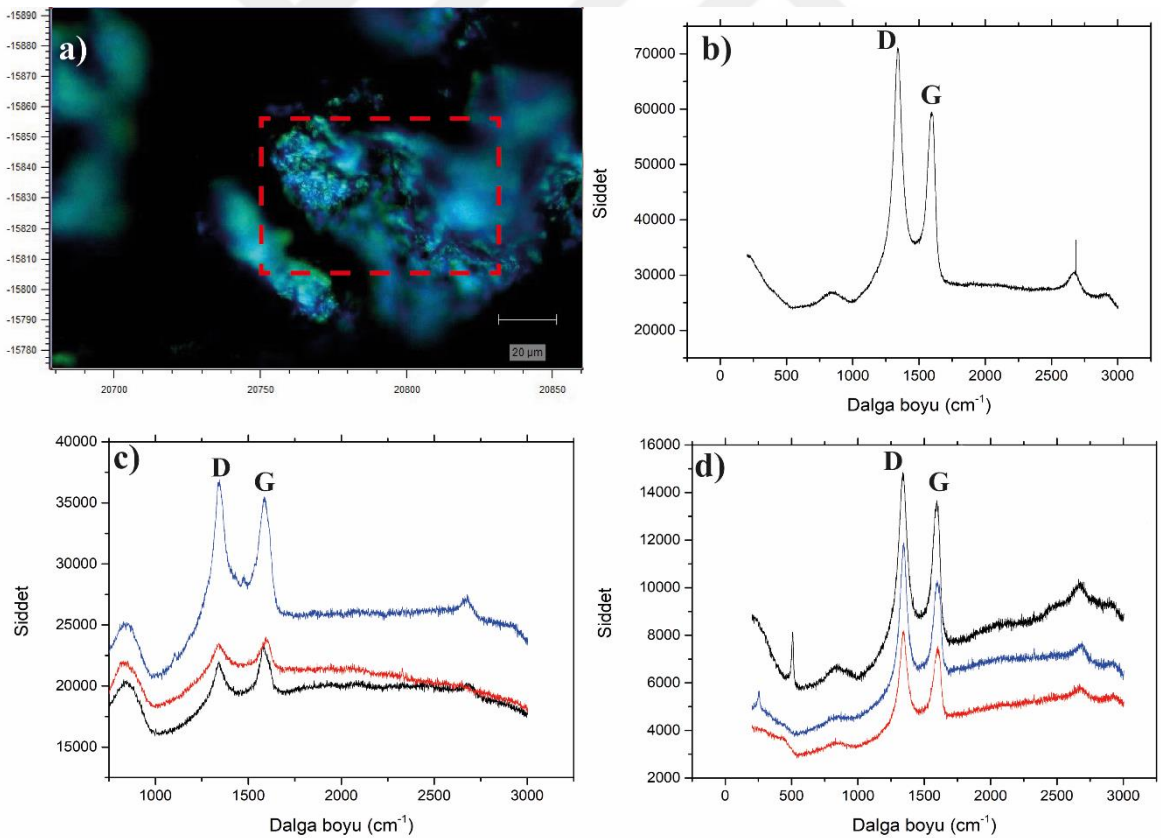
gerçekleştirilmiştir. XRD analizlerinde GNP ve MWCNT malzemesinin saptanması esnasında karşılaşılan sıkıntılar olduğu değerlendirilmesi sonrası Raman analizinin çalışmada uygulanması kararlaştırılmıştır. Çalışmada iki aşamalı karıştırma prosesi gerçekleştirilmiştir. Ultrasonikasyon işleminin ultrasonik dalgaların kullanımı esasına dayanması sebebiyle etil alkol içerisinde tozların karışımı esnasında yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. İkinci karıştırma adımı olan mekanik alaşımlama prosesinde ise, bir kap içerisinde toz karışımı paslanmaz çelik bilyalar ile yüksek dönme hızlarında çarpıştırılmaktadır. Gerek ultrasonikasyon gerek ise mekanik alaşımlama esnasında sıcaklık ve basınç etkili dış etmenlerin karbon esaslı takviyelerin yapısal özelliklerinde zarar verebileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca karbon esaslı malzemelerin genellikle 1200-3000 cm^{-1} dalga boyu seviyelerinde pik verdiği bildirilmiştir [121]. Bu değer çerçevesinde elde edilen pikler yapıda ilgili malzemelerin var olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 6.3: Raman spektroskopisi sonuçları
a) GNP b) MWCNT c) Al/GNP d) Al/MWCNT.

GNP ve MWCNT yapılarının Raman spektroskopisinde yaklaşık olarak 1400 cm^{-1} seviyelerinde konumlanan D band ve yaklaşık 1580 cm^{-1} seviyelerinde konumlanan G band şeklinde yapıyı temsil eden iki ana band mevcuttur. Düzlem içi titreşimler nedeniyle

altıgen grafit yapıdaki kusurlar, Raman spektrumunda D bandının aktivasyonuna neden olmaktadır. G bandı oluşumunda ise karbon-karbon esneme modları etkindir. Şekil 6.3.a'da GNP tozlarının Raman spektroskopisi sonuçları gösterilmektedir. GNP takviyesi için D band 1336 cm^{-1} , G band 1570 cm^{-1} ve 2D band 2691 cm^{-1} seviyelerinde elde edilmiştir. Şekil 6.3.b'de MWCNT malzemesinin Raman spektroskopisi görülmektedir. Analiz neticesinde D, G ve 2 bandlar sırasıyla 1346 cm^{-1} , 1574 cm^{-1} , ve 2665 cm^{-1} dalga boyu değerlerinden saptanmıştır. Şekil 6.3.c'de Al6061/GNP kompozit tozun karıştırma prosesi sonrasında elde edilen tozlarının Raman spektroskopisi analizi verilmiştir. Yapıda bulunan D band 1342 cm^{-1} , G band 1583 cm^{-1} ve 2D band 2686 cm^{-1} dalga boyu değerlerinde pik oluşturduğu belirlenmiştir. Bu analizlere ek olarak Al6061/MWCNT kompozit tozun Raman spektroskopisi analizinde D, G ve 2D band değerleri 1344 cm^{-1} , 1594 cm^{-1} ve 2684 cm^{-1} dalga boyu değerlerinden elde edildiği saptanmıştır. Elde edilen bu değerlerin literatürle uyumluluğu olduğu ve ilgili malzemelerin varlığının kanıtlandığı görülmüştür [21], [122].



Şekil 6.4: Raman analiz sonuçları a) Analiz haritalaması b) Al6061/GNP/MWCNT c) Al6061/TiC/GNP d) Al6061/TiC/MWCNT.

Şekil 6.4 de iki aşamalı karıştırma prosesi sonrası matris/takviye dağılımı gerçekleştirilen tozların Raman analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 6.4.a’da Al6061/MWCNT kompozit tozu için Raman analizinde taraması gerçekleştirilen bölge gösterilmektedir. Şekil 6.4.b’de iki nano tozun bir arada kullanılıp alüminyum alaşımı matris içerisinde takviyelendirildiği Al6061/GNP/MWCNT kompozit tozların Raman spektroskopi analizi neticesinde elde edilen değerler görülmektedir. Bu numune için D band 1336 cm^{-1} ve 1591 cm^{-1} dalga boyu değerlerinden pikler elde edilmiştir. Al6061/TiC/GNP kompozit tozlarına uygulanan Raman spektroskopisinde ise 1342 cm^{-1} ve 1581 cm^{-1} dalga boyu değerleri sırasıyla D bandı ve G bandı temsil etmektedir. Son olarak Al6061/TiC/MWCNT kompozit tozlarının Raman Spektroskopisi incelemesinde, D band 1338 cm^{-1} ve G band 1595 cm^{-1} dalga boyu seviyelerinde konumlanmıştır.

Gerçekleştirilen analizler neticesinde literatürle uyumlu olarak gerek ham haldeki GNP ve MWCNT takviyeleri için gerekse kompozitlerin ikili ve üçlü kombinasyonu yapılan karışımlarında GNP ve MWCNT varlığı kanıtlanmıştır. Karıştırma prosesi uygulanmış kompozit tozlarda ID/IG olarak ifade edilen değer 1 ’e yakın çıkması yapıdaki karbon esaslı malzemenin proses esnasında yapısal zararının kabul edilebilir değerlerde olduğunu göstermektedir. ID yapıdaki düzensiz yapıların şiddetini, IG ise düzenli yapıların şiddetini temsil etmektedir.

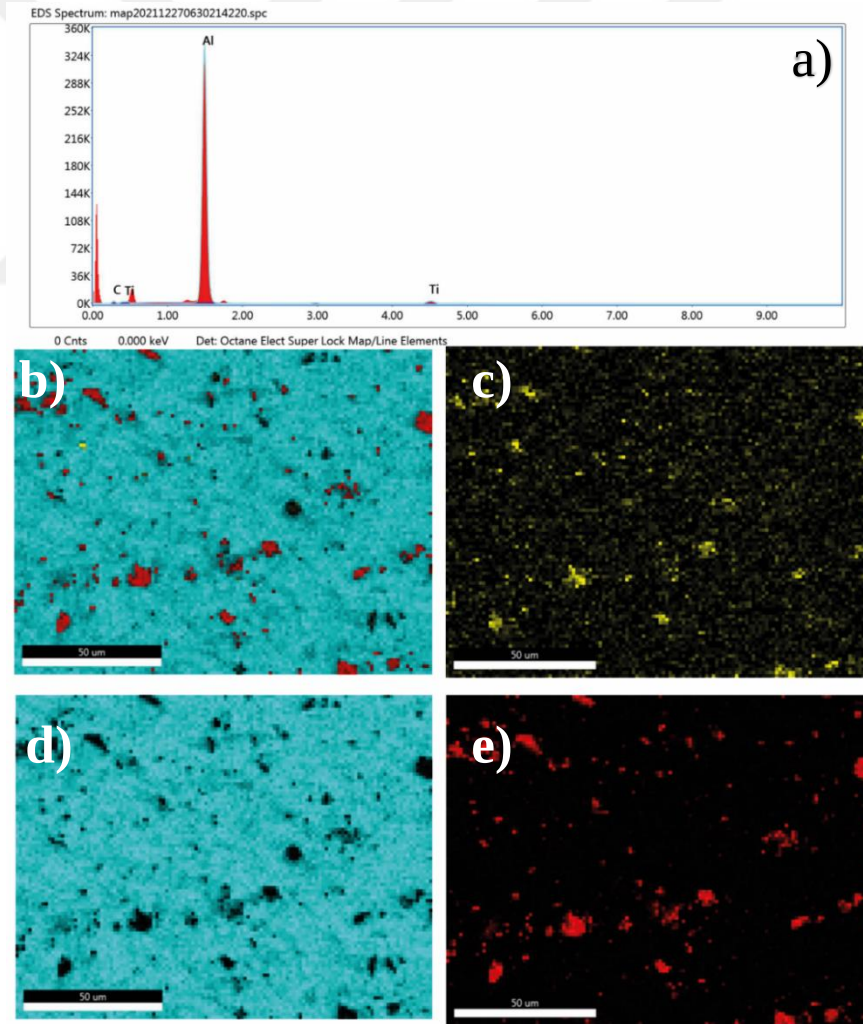
Raman analizi gerçekleştirilen tüm kompozit tozlarında ID/IG oranının 1 ’e yakın çıkması, proses esnasında GNP ve MWCNT takviyelerinde yapısal hasarın düşük olduğunu ispatlamıştır. Karıştırma prosesi uygulanmış Al/GNP ve Al/MWCNT tek takviyeli kompozit tozlarından elde edilen ID/IG oranları sırasıyla 1.1465 ve 1.1843 olarak bulunmuşken, çift takviyeye sahip Al/GNP/MWCNT, Al6061/TiC/GNP ve Al6061/TiC/MWCNT kompozit tozlarından elde edilen ID/IG oranları sırasıyla 1.1960 , 1.0339 ve 1.0859 olarak saptanmıştır. Tablo 6.3’de çalışmada elde edilen ID/IG oranlarının literatürde yer alan benzer üretim prosesi kullanılarak üretilen kompozitlerden elde edilen ID/IG oranlarıyla kıyaslanması verilmiştir. Çalışmada elde edilen değerlerin referans çalışmalarla uyumlu olduğu saptanmıştır.

Tablo 6.3: ID/IG oranlarının diğer çalışmalarla kıyaslanması.

Kompozit içeriği	Üretim yöntemi	ID/IG oranı	Referans
Al/CNT kompozit	Toz metalurjisi	1.13	[123]
Al6061/CNT kompozit	Toz metalurjisi	1.64	[124]
Al2024/1 TiC/1 GNP kompozit	Toz metalurjisi	1.84	[125]
Al/5 GNP kompozit	Toz metalurjisi	1.28	[126]
Al6061/GNP kompozit	Toz metalurjisi	1.1465	Mevcut çalışma
Al6061/MWCNT kompozit	Toz metalurjisi	1.1843	Mevcut çalışma
Al6061/TiC/GNP kompozit	Toz metalurjisi	1.0339	Mevcut çalışma
Al6061/GNP/MWCNT kompozit	Toz metalurjisi	1.1960	Mevcut çalışma
Al6061/TiC/MWCNT kompozit	Toz metalurjisi	1.0859	Mevcut çalışma

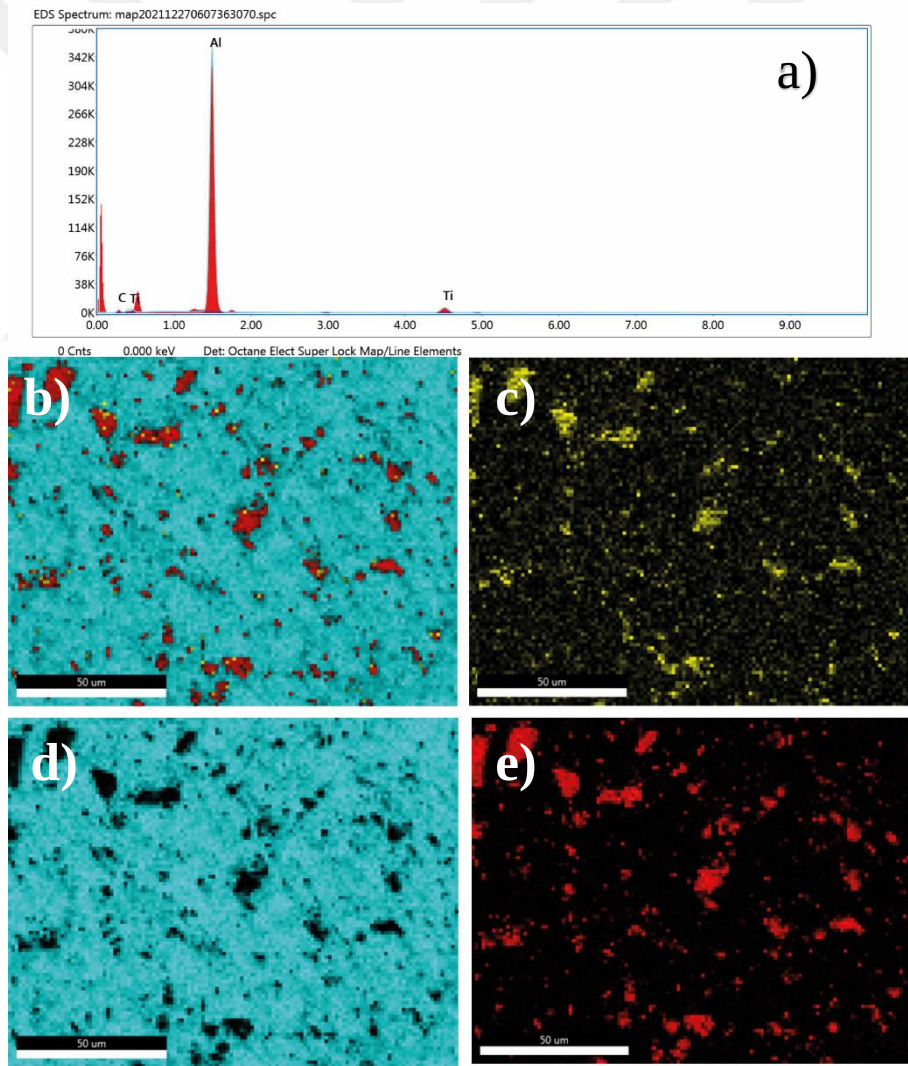
6.4 Kompozitlerin SEM/EDS İncelemesi

Çalışma kapsamında üretilen hibrit kompozitlerin iç yapı görüntülemeleri, matris faz içerisinde takviye gruplarının dağılımlarının belirlenmesi Zeiss Gemini 500 SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntülemesinde önce üretilen kompozitler metalografik işlemlerden geçilerek incelenecek yüzeyleri zımparalanmış ve parlatılmıştır. Metalografik işlemler kaba zımparalama kademesinden ince zımparalama kademesine kadar sürdürülmüştür. 400 SiC zımpara kademesinden 1200 SiC zımpara kademesine kadar numuneler zımparalanmış daha sonrasında ise elmas pasta solüsyon ile parlatılmıştır. Şekil 6.5’de ağırlıkça %4 TiC ve %0.5 GNP takviyeli hibrit kompozitlerin SEM/EDS görüntülemeleri ve EDS spektrumları verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, takviye gruplarının matris faz olan Al6061 alaşımı içerisinde uygun şekilde dağıldığı görülmektedir.



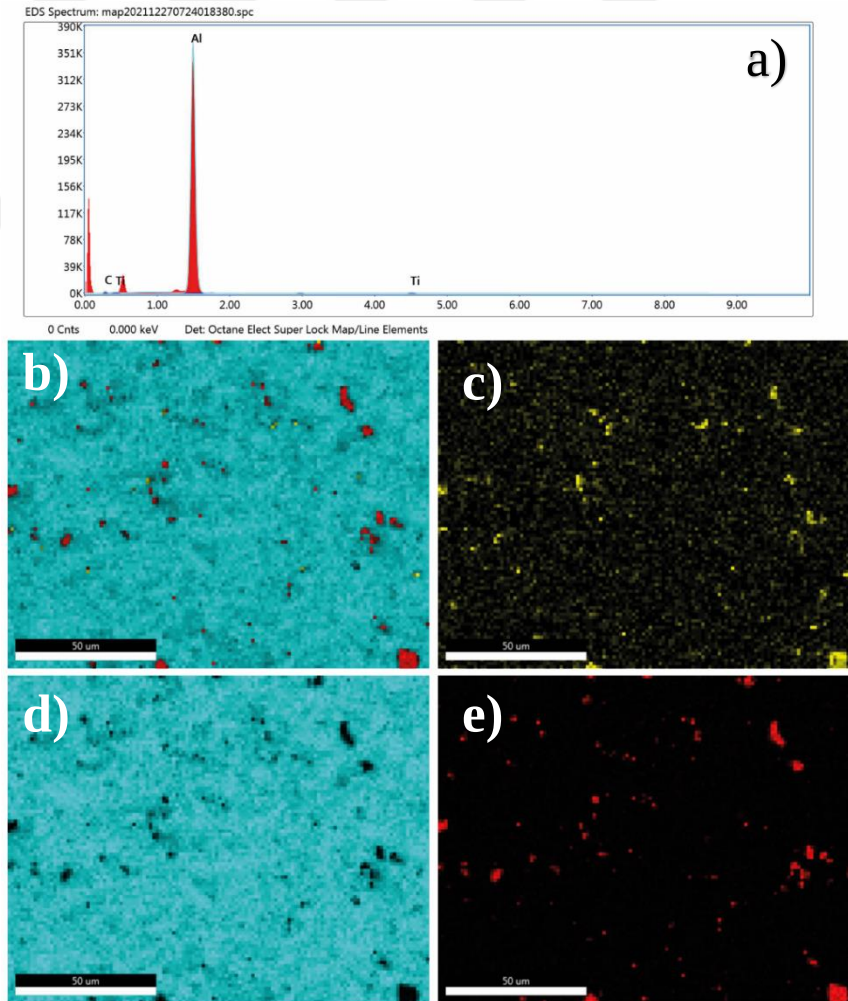
Şekil 6.5: Al6061/4 TiC/1GNP kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri a) Elementel analiz b) kompozit haritalama c) Karbon d) Alüminyum e) Ti.

Şekil 6.5.a'da Al6061/4 TiC/1 GNP kompozitin elementel spektrumu görülmektedir. Al6061 malzemesinin bünyesinde yüksek oranda alüminyum, magnezyum ve silisyum bulunduğu bilinmektedir, bu analizle birlikte belirtilen bu elementlerin kompozit yapıdaki varlığı kanıtlanmıştır. SEM/EDS analizinde kompozit yapıda bulunan en etkin elementler alüminyum, titanyum ve karbon dağılımlarının gösterimi verilmiştir. Şekil 6.5 içerisinde mavi bölgeler matris faz alüminyum elementini (Şekil 6.5.b ve Şekil 6.5.d), sarı bölgeler karbon elementini (Şekil 6.5.c) ve kırmızı bölgeler ise titanyum elementini temsil etmektedir (Şekil 6.5.e). Takviye grubu olarak TiC ve GNP malzemesi seçildiği belirtilmiştir, bu iki takviye içerisinde de karbon elementinin bulunması haritalamada ayırtırmayı güçleştirmiştir. SEM/EDS haritalaması incelendiğinde kırmızı bölgeler ve sarı bölgelerin çakışmadığı alanların GNP yapıları olduğu tespit edilmiştir.



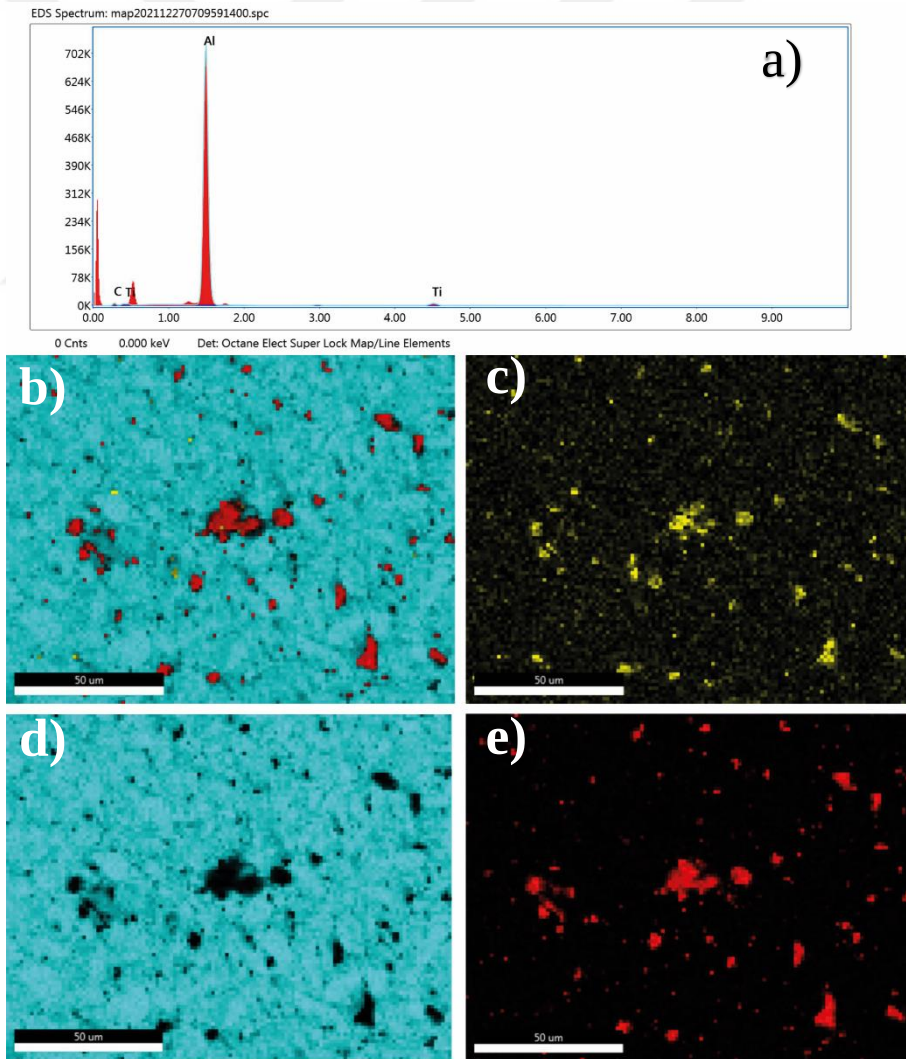
Şekil 6.6: Al6061/4 TiC/1.5 GNP kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri a) Elementel analiz b) kompozit haritalama c) Karbon d) Alüminyum e) Ti.

Al6061/4 TiC/1.5 GNP bileşiminden oluşan hibrit kompozit içerisindeki ağırlıkça GNP oranının %1.5' çıkarıldığı durum için temsil edilen SEM/EDS görüntülemesi Şekil 6.6' da verilmiştir. Şekil 6.6.a'da kompozitin elementel spektrumu görülmektedir, pikler incelendiğinde kompoziti oluşturan ana elementlerin varlığı kanıtlanmıştır (alüminyum, magnezyum, silisyum, titanyum, karbon). Şekil 6.6.(a-e)'de görüldüğü üzere; alüminyum elementini mavi bölgeler (Şekil 6.6.b ve Şekil 6.6.d), karbon elementini sarı bölgeler (Şekil 6.6.c) ve titanyum elementini ise kırmızı bölgeler temsil etmektedir (Şekil 6.6.e). Al6061/4 TiC/1.5 GNP için takviye gruplarının (TiC ve GNP) matris içerisinde uygun şekilde dağılım gösterdiği görülmektedir. Nano boyutlu takviye olan GNP'nin yüksek orandaki varlığının takviye dağılımını bozabileceği öngörülmesine rağmen uygulanan ultrasonikasyon ve mekanik alaşımlama işleminin daha iyi bir takviye dağılımı oluşturduğu saptanmıştır. Al6061/4TiC/1 GNP ile kıyaslandığında, Al6061/4 TiC/1.5 GNP bileşiminden oluşan hibrit kompozitte yoğun karbon yapıları izlenmektedir.



Şekil 6.7: Al6061/4 TiC/1MWCNT kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri a) Elementel analiz b) kompozit haritalama c) Karbon d) Alüminyum e) Ti.

Çalışmada kullanılan bir diğer hibrit kompozit numune olan Al6061/4 TiC/1 GNP içeriğine sahip kompozitin SEM/EDS incelemesi Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Kompozitin elementel spektrumu Şekil 6.7.a’da görülmektedir, elementlerin pik konumları incelendiğinde kompoziti oluşturan ana elementlerin varlığı kanıtlanmıştır (alüminyum, magnezyum, silisyum, titanyum, karbon). Şekil incelendiğinde TiC ve MWCNT takviyelerinin matris içerisinde iyi bir şekilde dağılım gösterdikleri izlenmektedir. Çalışmada tane boyut ölçümüyle ortalama tane boyutu belirlenen (9.79 μm) Al6061 matris malzemesi Şekil 6.7.b ve Şekil 6.7.d’de mavi bölgeler ile gösterilmektedir. SEM/EDS analizinde 196.3 nm tane boyutuna sahip olduğu belirlenen MWCNT nano takviyesi sarı bölgeler ile tanımlanırken (Şekil 6.7.c), 18.1 μm ortalama tane boyutuna sahip olduğu tespit edilen mikronize TiC takviyesi ise kırmızı bölgelerle temsil edilmektedir (Şekil 6.7.e).



Şekil 6.8: Al6061/4 TiC/1.5 MWCNT kompozitlerin SEM/EDS görüntüleri.

Al6061 matris içerisinde TiC ve GNP takviyelerin hibritize edildiği Al6061/4 TiC/1.5 MWCNT kompozit numune grubunda ise artan ağırlıkça % MWCNT oranıyla birlikte bölgesel topaklanmaların görüldüğü belirlenmiştir. Şekil 6.8.a'da MWCNT malzemesini temsilen karbon piki, TiC takviyesini temsilen titanyum ve karbon piki, Al6061 malzemesini temsilen de alüminyum, silisyum ve magnezyum pikleri saptanmıştır. Çalışmada kullanıldığı belirtilen hem matris hem takviye grupların kompozitlerin yapısı içerisindeki mevcudiyeti kanıtlanmıştır. SEM/EDS analizinde Şekil 6.8.b ve Şekil 6.8.d'de alüminyum malzemesini mavi bölgeler şeklinde izlendiği belirtilmiştir. Sarı bölgeler ile karbon dağılımı, kırmızı bölgeler ile de titanyum dağılımı sırasıyla Şekil 6.8.c ve Şekil 6.8.e'de gösterilmiştir. MWCNT nano takviyelerinin sahip olduğu nano boyut sebebiyle yüksek Van der Waals kuvvetleri %1.5 MWCNT içeren hibrit yapıda topaklanma eğilimini arttırdığı açıktır ancak bunun kabul edilebilir seviyede olduğu kabul edilmiştir. Benzer durumların literatürde de rapor edildiği görülmüştür [24, 127].

Nano boyutlu GNP ve MWCNT takviyelerinin ikincil fazlarla karıştırılmadan saf halde dahi topaklanma eğiliminde olduğu. Bu eğilimin genellikle mekanik alaşımla ile giderilmeye çalışılsa da bunun yeterli seviyede başarıya ulaşmadığı rapor edilmiştir [128]. Ultrasonikasyon işleminin takviye dispersiyonunu arttırabileceği düşünülerek ultrasonikasyon işlemi çalışmaya eklenmiştir. Ultrasonikasyon işlemi sırasında yapıda yüksek sıcaklık oluşumunun karbon esaslı nano takviyelere zarar verebileceği düşünülse de gerçekleştirilen Raman analizleriyle önemli bir yapısal zarar saptanmamıştır. Topaklanma sadece mikroyapısal bir sorun değil aynı zamanda kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerini doğrudan etkileyen bir ayrıştırma problemidir. Uygun şekilde karıştırılamayan takviyeler topaklanma eğilimi gösterip bölgesel takviye birikintilerine sebep olacaktır. Bu topaklanmalar yapıda boşluk gibi hareket ederek malzemenin özelliklerinde kayıplara neden olacaktır. MWCNT ve GNP malzemelerinin sahip oldukları yüksek spesifik yüzey alanı matristen gerilme aktarımını ve yük taşıma yeteneğini arttırmaktadır. Ancak yüksek spesifik yüzey alanı güçlü çekme kuvvetlerin etkisi sebebiyle topaklanma eğilimi de artmaktadır. Ayrıca kompozitlerin yük altında gösterdikleri mekanik davranışlar ele alındığında, takviyeden beklenen özellik olan yük taşıma kabiliyeti yapıda mevcut olan topaklanmalar ile sınırlanarak mekanik özelliklerde düşüş görülecektir. Bu durumun topaklanmış bölgelerin taneler arasında yük iletimini sınırlayıcı hareket etmesinin sonucu olduğu bildirilmiştir. Çalışmamızda da ilerleyen bölümlerde belirtileceği üzere,

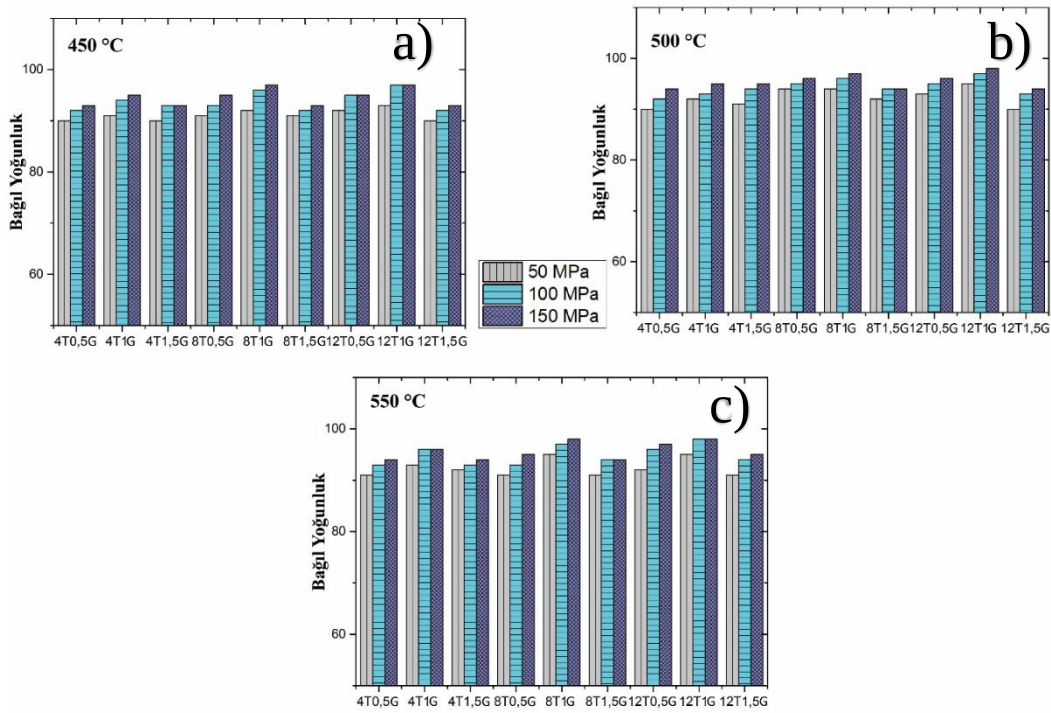
gerçekleştirilen testlerde kısmi topaklanmış bölgelerinin kompozitlerin özellikleri üzerinde değişiklikler oluşturduğu gözlemlenmiştir.

6.5 Kompozitlerin Yoğunluk Hesapları

Çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin yoğunluk hesaplamaları elektronik Arşimet terazisi vasıtasıyla Arşimet kuralı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Denklem 6.1, Denklem 6.2 ve Denklem 6.3). Öncelikle numunelerin teorik yoğunluğunu bulmak amacıyla karışım kuralı kullanılmıştır, her bir numune için ayrı ayrı teorik yoğunluklar hesaplanmıştır (Denklem 6.1). Daha sonrasında ise, Arşimet kuralında kullanılan ilgili formülizasyon gereği numunelerin kuru haldeki ağırlığı tartılmış daha sonra ise saf su içerisinde mevcut ağırlıklıları tartılarak rapor edilmiştir. Son olarak ise kompozitlerin yoğunluğu ve içerdikleri porozite hakkında bilgi veren bağıl yoğunluk değerleri Denklem 6.3 vasıtasıyla saptanmıştır. 3 grup hibrit kompozit numune içeriğine sahip Al6061/TiC/GNP, Al6061/TiC/MWCNT ve Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin üretim parametrelerine ve içeriklerine bağlı olarak hesaplanan bağıl yoğunluk değerleri Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de verilmiş sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada deneysel tasarım gerçekleştirilirken belirlenen üretim parametreleri; ağırlıkça % birinci takviye oranı, ağırlıkça % ikinci takviye oranı, sinterleme sıcaklığı, sinterleme basıncı ve sinterleme süresidir. Ancak tezin başlangıç çalışmalarında üretim parametrelerinin etkinliği üzerine gerçekleştirdiğimiz optimizasyon çalışmasında proses çıktıları üzerinde sinterleme süresinin diğer parametrelere oranla daha az etkin olduğu belirlenmesi üzerine tasarlanan grafikler üzerinde sinterleme süresi belirtilmemiş sadece metin içerisinde açıklanmıştır [42].

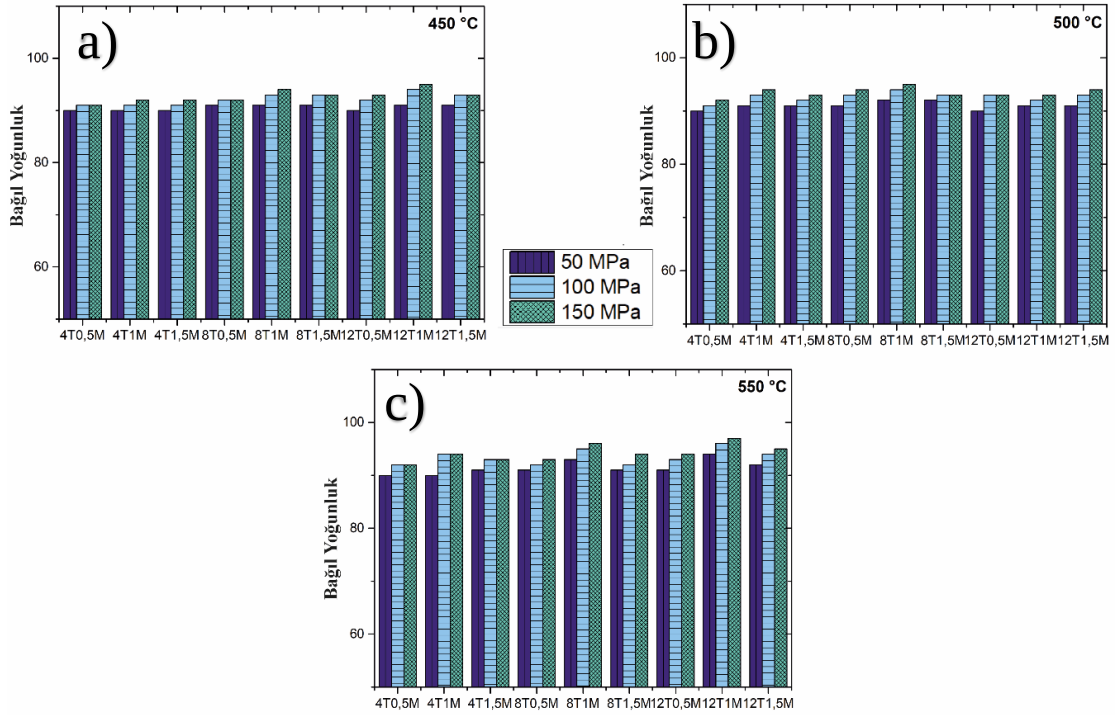
Toz metalürjik üretim prosesi esnasında sinterleme kavramı en etkin olgulardan birisidir. Uygun bir çevrimde sinterlenemeyen, diğer bir ifadeyle bireysel tozlar arasında iyi bir bağ oluşumu gerçekleşmeyen malzemelerde poroziteler oluşacak ve bu poroziteler birincil olarak yoğunluk değerlerini etkileyerek malzeme özelliklerine olumsuz yönde etki edecektir. Çalışmada kompozit tozların şekillendirmesi için belirlenen yöntemin sıcak presle üretim olması aynı anda sıcaklık ve basıncın tozlara uygulanması anlamına gelmektedir. Literatürde karşılaştığımız soğuk presleme ve daha sonrasında fırında sinterleme prosesinin getirdiği düşük bağıl yoğunluk değerleri uyguladığımız prosesle mümkün mertebe engellenmeye çalışılmıştır.

Şekil 6.9'da üretim parametrelerine bağlı olarak Al6061/TiC/GNP hibrit kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri verilmiştir. Şekil 6.9.a'da 450 °C'de sinterlenen 50-100-150 MPa basınç altında sıcak preslenen kompozitlerin içeriğine bağlı olarak yoğunluk değişimleri görülmektedir. Şekil 6.9.a incelendiğinde 450 °C'de sinterlenen tüm kompozit numuneler için bağıl yoğunluk değerinin %90'dan büyük olduğu görülmektedir. Maksimum bağıl yoğunluk değeri (% 97.4) ağırlıkça % 8 TiC ve % 1 GNP ile takviyelendirilmiş 150 MPa altında preslenmiş hibrit kompozittten elde edildiği görülmektedir. Minimum bağıl yoğunluk değeri ise (% 90.1) ağırlıkça %12 TiC, 1.5 GNP ile takviyelendirilmiş hibrit kompozittten elde edilmiştir. 500 °C'de sinterlenen kompozit numuneler için minimum ve maksimum bağıl yoğunluk 50 MPa altında preslenmiş Al6061/ 12 TiC/1.5 GNP ve 150 MPa altında preslenmiş Al6061/8 TiC/1 GNP numunelerinden % 90.3 ve % 98.4 değerleriyle elde edilmiştir (Şekil 6.9.b). Aynı zamanda %98.4 bağıl yoğunluk değeri bu grup malzemedan elde edilen en yüksek yoğunluk değeridir. Sinterleme sıcaklığının 550° C'ye çıkarıldığı durumda ise 50 MPa altında preslenmiş %8 TiC ve %1.5 GNP içeren kompozitte %91.1 ile minimum bağıl yoğunluk değeri elde edilirken, 150 MPa altında preslenmiş %12 TiC ve %1 GNP içeren numuneden maksimum bağıl yoğunluk değeri %98 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.9.c).



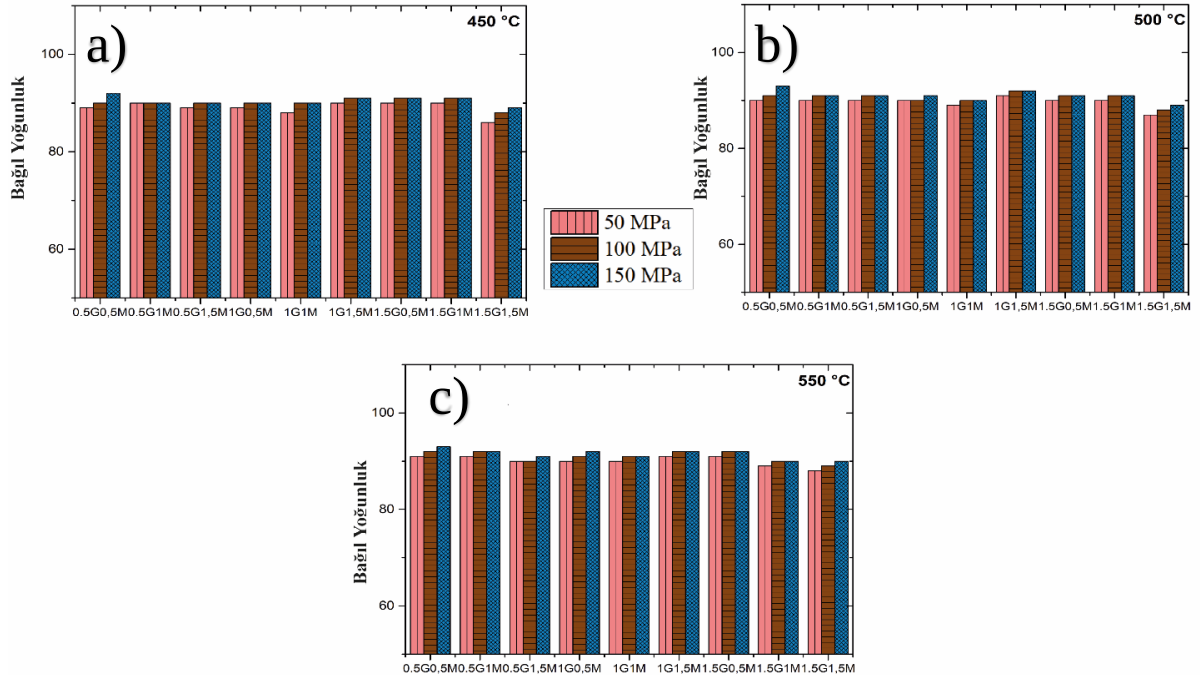
Şekil 6.9: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.

Üretim parametrelerine bağlı olarak Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir. 450 °C'de sinterlenen 50-100-150 MPa basınç altında sıcak preslenen kompozitlerin içeriğine bağlı olarak yoğunluk değişimleri Şekil 6.10.a'da verilmiştir. Şekil 6.10.a'da 450 °C'de sinterlenen tüm kompozit numuneler için bağıl yoğunluk değerinin %91'den büyük olduğu belirlenmiştir. 150 MPa altında preslenmiş Al6061/12 TiC/1 MWCNT hibrit kompozitten maksimum bağıl yoğunluk değeri %95 olarak, minimum bağıl yoğunluk değeri ise % 90.8 olarak 50 MPa altında preslenmiş Al6061/8 TiC/1.5 MWCNT numunesinden elde edilmiştir (Şekil 6.10.a). 50 MPa basınç altında 500 °C'de sinterlenmiş Al6061/12 TiC/1.5 MWCNT'de %91.4 minimum bağıl yoğunluk değeri elde edilirken, 150 MPa basınç altında 500 °C'de sinterlenmiş Al6061/8 TiC/1 MWCNT'de maksimum bağıl yoğunluk değeri % 95.7 olarak saptanmıştır (Şekil 6.10.b). Şekil 6.10.c'de 550 °C'de sinterlenen hibrit kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri görülmektedir. Bu bileşimden oluşan kompozit numuneler için maksimum bağıl yoğunluk değeri % 97.1 olarak 150 MPa altında preslenmiş Al6061/8 TiC/0.5 MWCNT'den elde edilirken, 50 MPa altında preslenmiş Al6061/8 TiC/1.5 MWCNT içeriğinden minim bağıl yoğunluk değeri % 91.2 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.10.c).



Şekil 6.10: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.

İki nano takviyenin kullanıldığı Al6061/GNP/MWCNT içeriğine sahip hibrit kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri Şekil 6.11’de verilmiştir. Diğer takviye gruplu kompozitlerle kıyaslandığında bu gruptan elde edilen bağıl yoğunluk değerlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.11.a’da 450 °C’de sinterlenen 50-100-150 MPa basınç altında sıcak preslenen kompozitlerin içeriğe bağlı olarak yoğunluk değişimleri verilmiştir. Maksimum bağıl yoğunluk değeri (%92.1) ağırlıkça % 0.5 GNP ve % 0.5 MWCNT takviyelerinin kullanıldığı 150 MPa altında preslenmiş hibrit kompozittten elde edilmiştir. Minimum bağıl yoğunluk değeri ise (%86.9) ağırlıkça %1.5 GNP, 1.5 MWCNT ile takviyelendirilmiş hibrit kompozittte belirlenmiştir. Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin 500 °C’de sinterlenmiş numunelerinde maksimum ve minimum bağıl yoğunluk yüzdeleri %93.2 ve %87.4 olarak sırasıyla 150 MPa basınç altında preslenmiş Al6061/0.5 GNP/0.5 MWCNT ve 50 MPa basınç altında preslenmiş Al6061/1.5 GNP/1.5 MWCNT içerikli kompozitlerden elde edilmiştir (Şekil 6.11.b). Şekil 6.11.c’de 550 °C sıcaklıkta sinterlenmiş hibrit kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri verilmiştir. Bu içeriği oluşturan kompozit numuneler için maksimum bağıl yoğunluk değeri %93.7 olarak 150 MPa altında preslenmiş Al6061/0.5 GNP/0.5 MWCNT’den elde edilirken, 50 MPa altında preslenmiş Al6061/1.5 GNP/1.5 MWCNT içeriğinden minim bağıl yoğunluk değeri %88.2 olarak belirlenmiştir



Şekil 6.11: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin bağıl yoğunluk değişimleri
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.

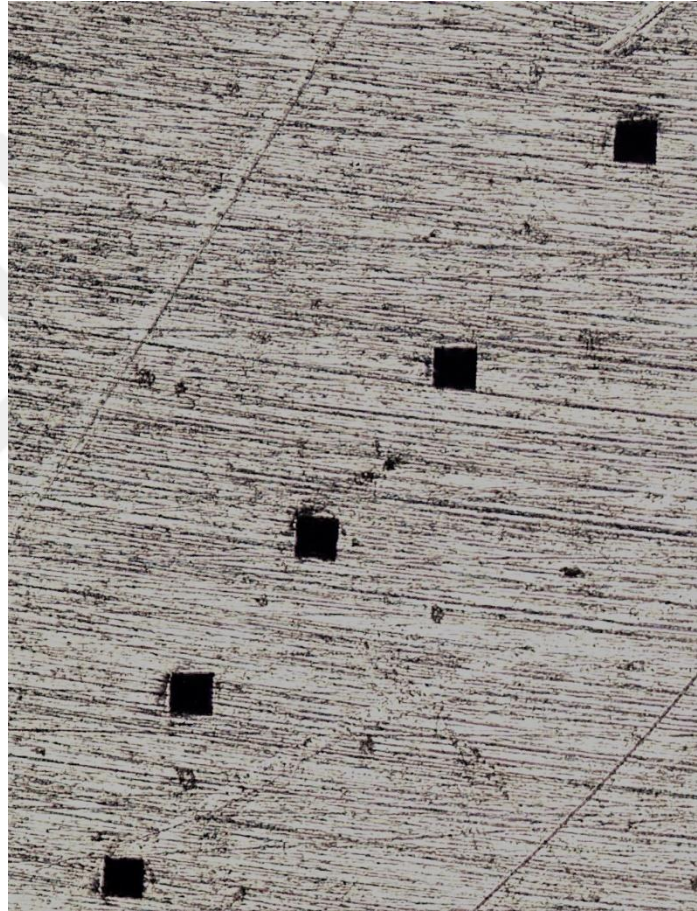
Gerçekleştirilen yoğunluk ölçüm işlemleri sonrasında, sıcak presleme yoluyla üretilen kompozitlerde yüksek bağıl yoğunluk değerlerinin elde edildiği saptanmıştır. Sinterleme işleminin termal aktive edici bir proses olduğu bilinmektedir. Yüksek sinterleme sıcaklıklarının yüksek difüzyon oranı sağladığı ve yapıdaki boşlukların eliminasyonunu arttırdığı bildirilmiştir [129]. Literatürle uyumlu olarak uygulanan işlem basıncının artmasıyla birlikte gözeneklerin kapanarak yoğunluk değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Artan sıcaklık değerinin numunelerin yoğunluğu üzerinde etkin değişime sebebiyet verdiği, 500 °C ve 550 °C de sinterlenmiş numunelerde daha yüksek yoğunluk değerlerinin elde edilmiştir.

Takviyesiz Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında (%99.1), yapıya eklenen mikronize TiC takviyesinin bağıl yoğunluk değerini bir miktar düşürdüğü belirlenmiştir (Al/TiC kompozit). Bu durum yüksek sertliğe sahip TiC malzemesinin şekillendirme prosesi esnasında tozların basma kabiliyetini düşürmesine dayandırılmıştır. Ayrıca TiC malzemesinin yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasının da bu durumun oluşmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Nano boyutlu GNP ve MWCNT malzemelerinin yoğunluğa önemli bir katkı sunduğu bu durumda nano boyutlu takviyelerin matris tozları arasındaki boşlukları doldurmasına dayandırılmıştır. Ancak %1 sınır değerinin aşıldığı nano takviye ilavesinde yoğunluk değerleri düşüş eğilimine girerek bağıl yoğunluğun azaldığı belirlenmiştir. Bu düşüşün muhtemel nano takviye topaklanmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Al6061/1GNP ve Al6061/1MWCNT kompozitleri için bağıl yoğunluk değerlerinin %98.6 ve %98.2 olduğu hesaplanmıştır. Çalışmada en düşük bağıl yoğunluk değerlerinin iki nano takviyenin bir arada kullanıldığı Al6061/GNP/MWCNT kompozit numunede elde edilmiştir. Yüksek spesifik yüzey alanına sahip GNP ve MWCNT karbon esaslı takviyeler az miktarda eklense bile yüksek hacim oranı göstermesi sebebiyle bu durumun ortaya çıktığı ileri sürülmüştür.

Çalışmada kullanılan sıcak presleme işleminin üretim yöntemi olarak belirlenmesi sebeplerinden birisi de üretilen kompozitlerin yüksek yoğunlukta elde edilmesine olanak sağlamasıdır. Soğuk presleme sonrası fırında sinterleme işlemiyle metal matrisli kompozit üretim çalışmalarıyla kıyaslandığında, sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulandığı bu çalışmada daha yüksek yoğunluk değerleri elde edildiği bildirilmiştir [130–133]. Ayrıca şekillendirme prosesi öncesinde gerçekleştirilen iki aşamalı karıştırma prosesinin toz şekillendirme prosesine ve yoğunluk artışına katkı sağladığı düşünülmektedir.

6.6 Kompozitlerin Sertlik Testi Sonuçları

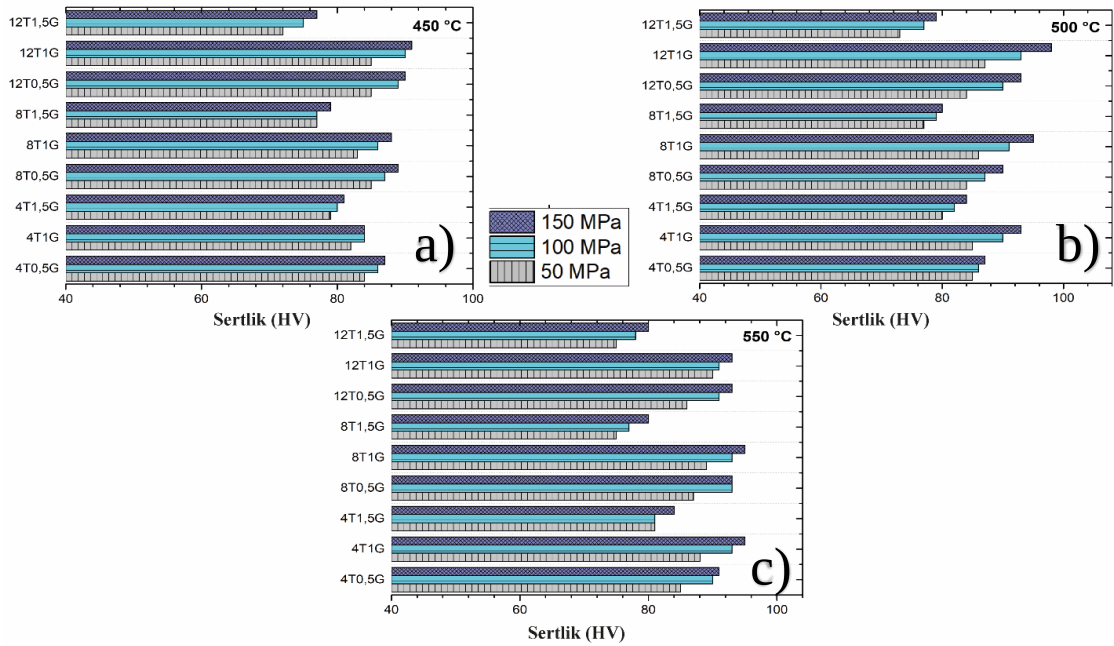
Üretilen kompozitlere sertlik testleri Vickers sertlik standardına göre 10 saniye bekleme süresince 1 kg yük altında uygulanmıştır. Her bir numune için beş sertlik ölçümü gerçekleştirilerek hesaplanan sertlik değerlerinin ortalaması alınarak numune sertliği hesaplanmıştır. Referans numune olan takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin sertlik değeri ile kompozitlerin sertlikleri kıyaslanarak sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Şekil 6.12’de üretilen Al6061 malzemesinden alınan örnek Vickers sertlik ölçümleri gösterilmiştir.



Şekil 6.12: Al6061 malzemesinden alınan örnek sertlik ölçümü.

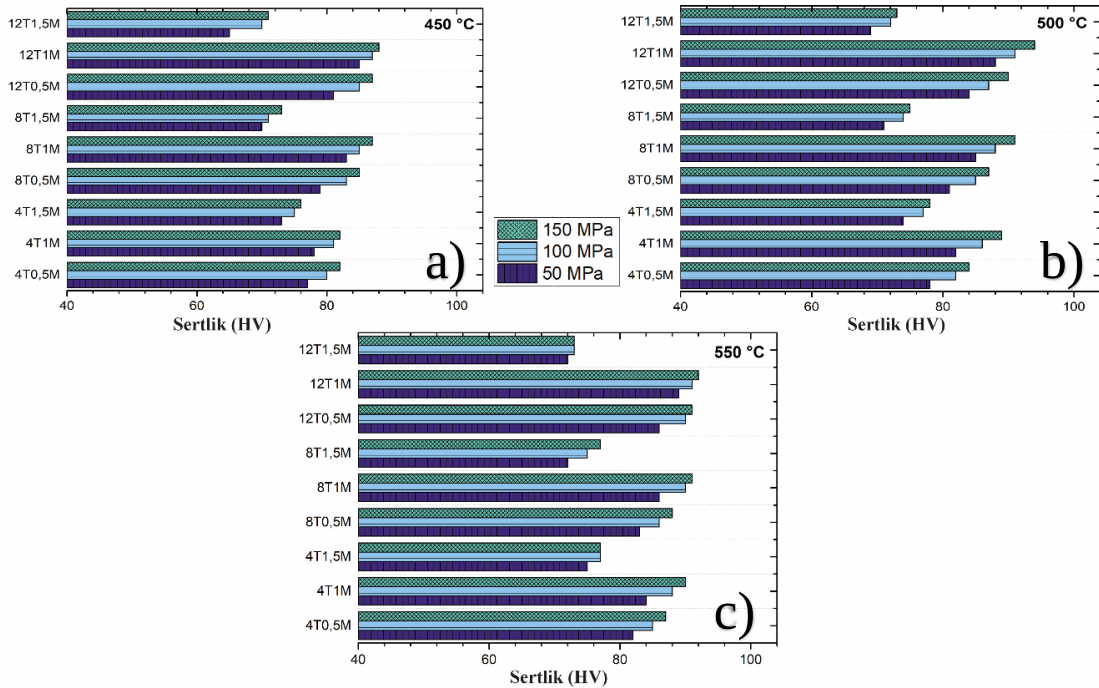
Ağırlıkça takviye oranları (%4-8-12 TiC, %0.5-1-1.5 GNP ve %0.5-1-1.5 MWCNT) sinterleme sıcaklığı (450 °C, 500 °C ve 550 °C) ve üretim basıncının (50 MPa, 100 MPa ve 150 MPa) çalışma kapsamında üretilen hibrit kompozitlerin sertlik değerleri üzerine etkileri Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15’de verilmiştir.

Üretim parametrelerine bağlı olarak Al6061/TiC/GNP hibrit kompozitlerin Vickers sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Farklı basınç altında (50-100-150 MPa) 450 °C’de sinterlenen kompozitlerin %TiC ve %GNP değerine bağlı olarak sertlik sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, maksimum sertlik değeri 91 HV olarak 150 MPa basınç altında preslenmiş Al6061/12 TiC/1 GNP içeriğine sahip kompozitten elde edilmiştir, bu duruma ek olarak minimum sertlik değeri 72 HV olarak 50 MPa basınç altında preslenmiş Al6061/12 TiC/1.5 GNP içerikli kompozitten elde edilmiştir (Şekil 6.13.a). 500 °C’de sinterlenen kompozitlerde sertlik değişimleri ise; 150 MPa basınç altında 500 °C’de sinterlenmiş Al6061/12 TiC/1 GNP’de maksimum sertlik değeri 98 HV olarak saptanmışken, minimum sertlik değeri ise 50 MPa basınç altında Al6061/12 TiC/1.5 GNP’de 73 HV olarak belirlenmiştir (Şekil 6.13.b). Şekil 6.13.c’de ise 550 °C’de sinterlenen hibrit kompozitlerin sertlik değişimleri verilmiştir. Al6061/TiC/GNP bileşenlerinden oluşan kompozit numuneler için maksimum sertlik değeri 95 HV olarak 150 MPa altında preslenmiş Al6061/8 TiC/1 GNP içerikli kompozitten elde edilirken, 50 MPa altında preslenmiş Al6061/12 TiC/1.5 GNP içeriğinden minimum sertlik değeri 75 HV olarak belirlenmiştir (Şekil 6.13.c). Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin Vickers sertlik değeri ile kıyaslandığında (41 HV), Al/TiC/GNP içerikli hibrit kompozitte elde edilen maksimum ve minimum sertlik değeriyle sırasıyla %139.02 ve %75.60 artış elde edilmiştir.



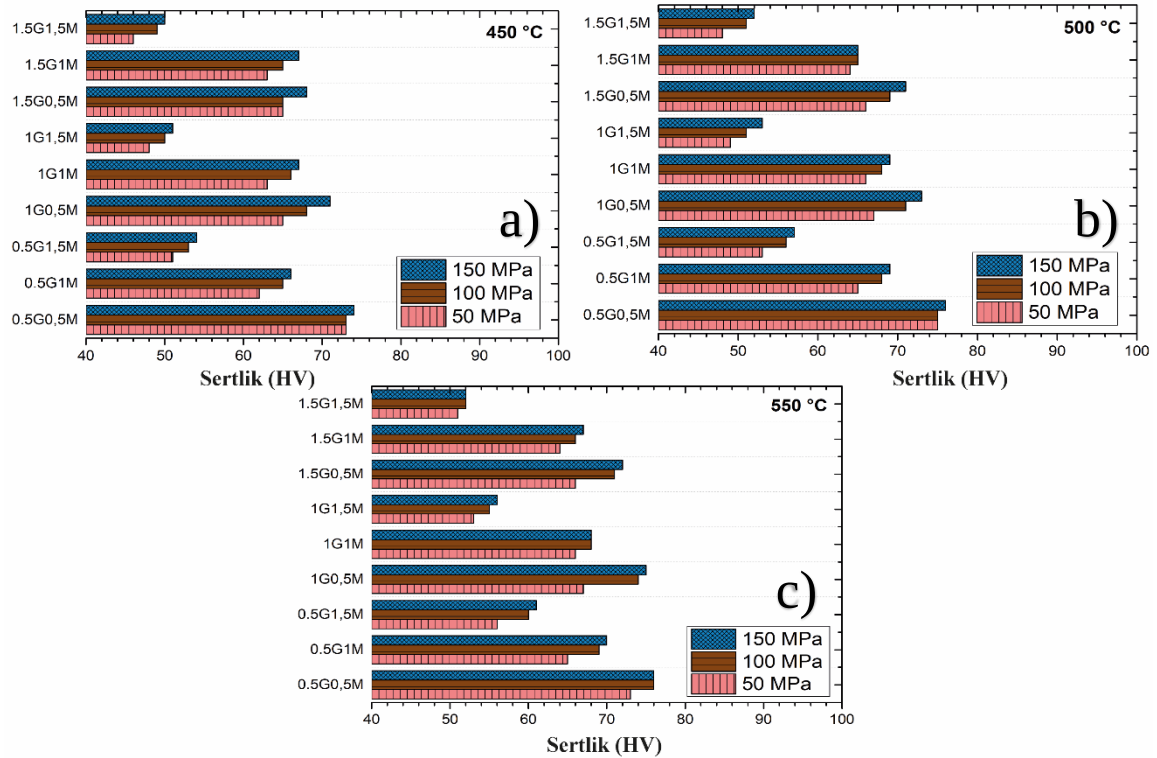
Şekil 6.13: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin vickers sertlik değişimleri
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.

Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin Vickers sertlik değerlerinin değişimi üretim parametrelerine bağlı olarak Şekil 6.14’de belirtilmiştir. 50-100-150 MPa basınç altında 450 °C de sinterlenen hibrit kompozitlerin takviye içeriğine (% TiC ve % MWCNT) bağlı olarak değişmekte olan sonuçları Şekil 6.14.a’da gösterilmiştir. Bu gruptan maksimum sertlik değeri 88 HV olarak 150 MPa basınç altında üretilen Al6061/12 TiC/1 MWCNT kompozitten elde edilirken, minimum sertlik değeri ise 50 MPa basınç altında şekillendirilen Al6061/12 TiC/1.5 MWCNT kompozitten 65 HV olarak elde edilmiştir. Sıcak presleme işleminin 500 °C de gerçekleştiği Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerde ise; maksimum sertlik 94 HV ile 150 MPa basınç altında üretilen % 12 TiC ve %1 MWCNT içeren kompozitten elde edilirken, minimum sertlik 71 HV olarak 50 MPa basınç altında üretilen % 8 TiC ve %1.5 MWCNT içeren kompozitten elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 6.14.b). 550 °C de sinterlenmiş Al/TiC/MWCNT kompozitlerin üretim parametrelerine bağlı sertlik değişimleri ise Şekil 6.14.c’de gösterilmiştir. 150 MPa basınç altında şekillendirilen Al6061/12 TiC/1 MWCNT kompozitten maksimum sertlik değeri 91 HV olarak belirlenirken, 50 MPa basınç altında şekillendirilen Al6061/12 TiC/1.5 MWCNT hibrit kompozitten 71.2 HV olarak saptanmıştır. Saf Al6061 malzemesinin sertlik değeri ile kıyaslandığında, Al/TiC/MWCNT içerikli hibrit kompozitte elde edilen maksimum ve minimum sertlik değeriyle sırasıyla %129.26 ve %58.53 artış elde edilmiştir.



Şekil 6.14: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin vickers sertlik değişimleri
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.

GNP ve MWCNT içerikli iki nano takviyenin bir arada kullanıldığı Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerinin Vickers sertlik değişimleri Şekil 6.15’de verilmiştir. 450 °C’de sinterlenmiş 50-100-150 MPa basınçlar altında üretilmiş hibrit kompozitlerin takviye içeriğine bağlı olmak üzere mevcut sertlik değişimleri Şekil 6.15.a’da gösterilmiştir. Şekil 6.15.a incelendiğinde, maksimum sertlik değeri 74 HV olarak 150 MPa basınç altında şekillendirilen Al6061/0.5 GNP/0.5 MWCNT içerikli hibrit kompozitten elde edilirken, minimum sertlik değeri ise 46 HV olarak 50 MPa basınç altında şekillendirilen Al6061/1.5 GNP/1.5 MWCNT içerikli hibrit kompozitten elde edilmiştir. 500 °C sıcaklık değerinde sinterlenerek farklı basınçlar altında sıcak preslenmiş hibrit kompozitlerin sertlik değişimleri Şekil 6.15.c’de verilmiştir. %0.5 GNP ve %0.5 MWCNT içerikli 150 MPa basınç altında şekillendirilen hibrit kompozitten maksimum sertlik değeri 76.2 HV olarak elde edilirken, %1.5 GNP ve %1.5 MWCNT içerikli 50 MPa basınç altında şekillendirilen hibrit kompozitten minimum sertlik değeri 48 HV olarak belirlenmiştir. 550 °C de sinterlenip 50-100-150 MPa basınç değerlerinde şekillendirilen GNP ve MWCNT takviyeli hibrit kompozitlerde maksimum sertlik değeri 150 MPa basınç altında üretilen Al6061/0.5 GNP/0.5 MWCT kompozitte (76.8 HV) ve minimum sertlik değeri ise Al6061/1.5 GNP/1.5 MWCT içerikli kompozitte saptanmıştır (51 HV) (Şekil 6.15.c)



Şekil 6.15: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin vickers sertlik değişimleri
a) 450 °C b) 500 °C c) 550 °C.

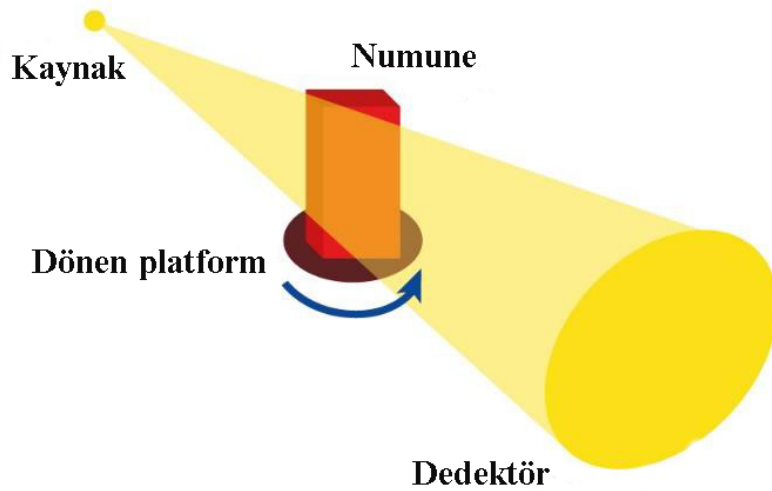
Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin Vickers sertlik değeri ile kıyaslandığında (41 HV), Al/GNP/MWCNT içerikli hibrit kompozitte elde edilen maksimum ve minimum sertlik değeriyle sırasıyla %87.31 ve %12.19 artış elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, bu gruptaki kompozitlerin ortalama sertlik değerlerinin diğer gruptaki hibrit kompozitlerin sertlik değerlerinden genellikle düşük olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sertlik testlerinde, üretim parametrelerine bağlı olarak sertlik değerlerinin farklılık gösterdiği, artan sinterleme sıcaklığı ve üretim basıncıyla beraber sertlikte artış elde edildiği belirlenmiştir. Diğer üretim parametreleriyle kıyaslandığında sinterleme süresinin ise sertlik üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı saptanmıştır. Matris faza eklenen takviye gruplarının kompozitin sertliğine arttırıcı yönde etki ettiği, mikronize TiC takviyesinin nano boyutlu GNP ve MWCNT ile kombinasyonlarında önemli artışlar olmasına karşın, GNP ve MWCNT takviyelerinin birlikte kullanıldığı üretim gruplarında daha az sertlik artışı elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan Al6061/8TiC (80.8 HV), Al6061/1 GNP (83.6 HV) ve Al6061/1 MWCNT (85.5 HV) kompozitlerinde de takviyelerin sertliğe ciddi katkı yaptığı görülmektedir. GNP ve MWCNT nano boyutlu tozların yüksek spesifik yüzey alanları sebebiyle topaklanma eğiliminde olduğu bilinmektedir. Bu nedenle ağırlıkça %1.5 seviyelerinde gerçekleştirilen GNP ve MWCNT ilavelerinin kompozitin sertliğini azaltıcı etki yaptığı saptanmıştır.

Metal matrisli kompozitlere eklenen takviye elemanların, kompozitin sertliğini genellikle matrisin plastik deformasyonunu engelleme etkisiyle ve uygulanan yük dağılımını iletilebildiği rapor edilmiştir [24]. Ayrıca malzemenin takviyelendirme etkinliğini belirlemek için iki önemli faktör; i) verimli olarak matristen takviyeye yük aktarım oranı ii) takviye tarafından değiştirilebilen gerilim dağılım oranı mevcuttur. Bahsedilen bu iki önemli faktörün etkisi matris/takviye ara yüzey bağlanmasının, morfoloji/yüzey alanının ve takviye dağılımının çok önemli olduğu belirtilmektedir [134, 135]. Ayrıca yapıda bulunan mikro boşlukların nano boyutlu takviyeler tarafından doldurularak yoğunluğun arttırılması sebebiyle sertlik üzerinde önemli bir etki görülebileceği belirtilmiştir [136]. Nano boyutlu takviyelerin ayrıca dislokasyon hareketini engelleyerek sertliği önemli ölçüde arttırabilecekleri önceki çalışmalarda rapor edilmiştir [104, 137].

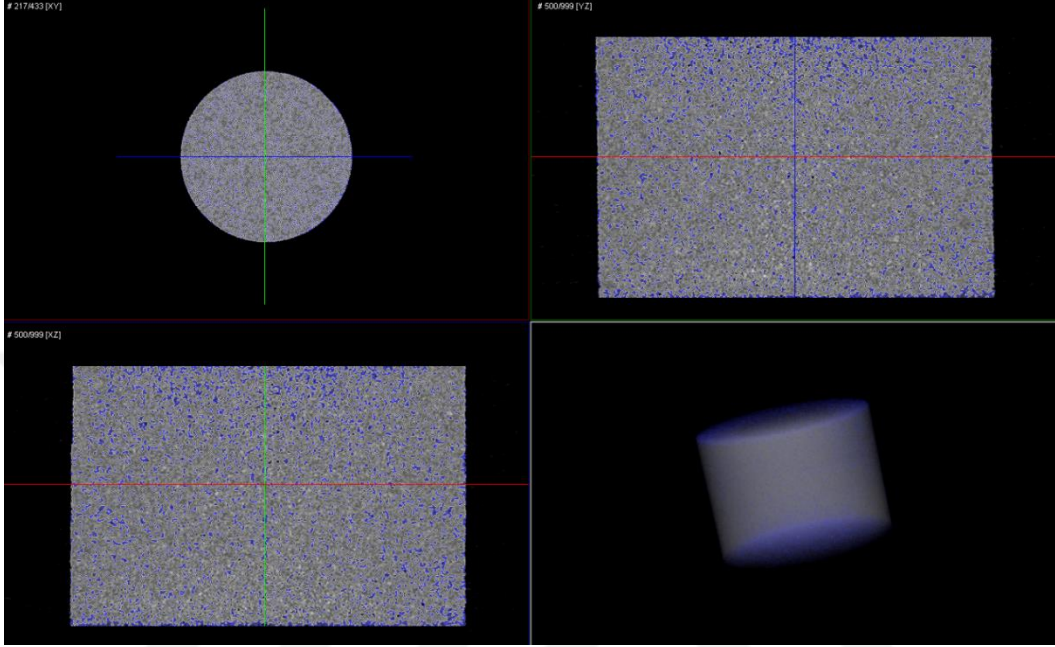
6.7 Kompozitlerin Micro-CT Analizleri

Çalışma kapsamında üretilen Al6061/4TiC, Al6061/8TiC ve Al6061/12TiC kompozitlerin Micro-CT (Bilgisayarlı Mikro Tomografi) analizleri gerçekleştirilmiştir. Nano takviye içeren numunelerde, kullanılan cihazın yetersiz kalması sebebiyle incelemeler mikron boyutlu takviyelerin yer aldığı kompozitlere uygulanmıştır. Micro-CT tekniği karmaşık bileşenlerin iç ve dış geometrisini analiz edebilen, tahribatsız bir 3D görüntüleme tekniğidir. Bir bileşenin etrafından değişen açılarla birçok iki boyutlu görüntünün alındığı daha sonra alınan görüntülerin tüm numune boyunca bir görüntü yığını halinde tüm hacimde yapılandırıldığı bir işleyiş gerçekleştirilir. Bu sistem genel olarak; incelenecek numuneyi X ışınları ile maruz bırakıp, bu işlemi takiben absorplanan x ışını görüntüsünü ölçme ve numune döndükçe tekrar tekrar bu tür görüntüleri elde etme ilkesine göre çalışmaktadır. Elde edilen görüntüler daha sonra hacimsel bir veri seti oluşturmak için matematiksel bir yeniden oluşturma işleminde kullanılır. Bu hacim, temsil ettiği malzemenin X-ışını yoğunluğuna bağlı olarak her pikselin parlaklığına sahip voksellerden (hacimsel pikseller) oluşur. Tarama ve yeniden yapılandırmadan sonra, tipik olarak özel yazılımda veri görselleştirme ve analizi gerçekleştirilir. XY-YZ ve XZ düzlemlerinde yapılan incelemeler neticesinde her bir numune için yaklaşık 300 adet kesit görüntülemesinin AVIZO programı kullanılarak birleştirilmesi ve takviyelerin ayrıştırılması neticesinde aşağıda belirtilen Micro-CT görüntüleri elde edilmiştir. Micro-CT görüntülemesiyle birlikte tüm numune hacminde takviyelerin dağılımı incelenebilmektedir. Bu özelliği sebebiyle SEM incelemesinden ayrılmaktadır. Şekil 6.16'da Micro-CT analizinin işlem prosesi görselleştirilmiştir.

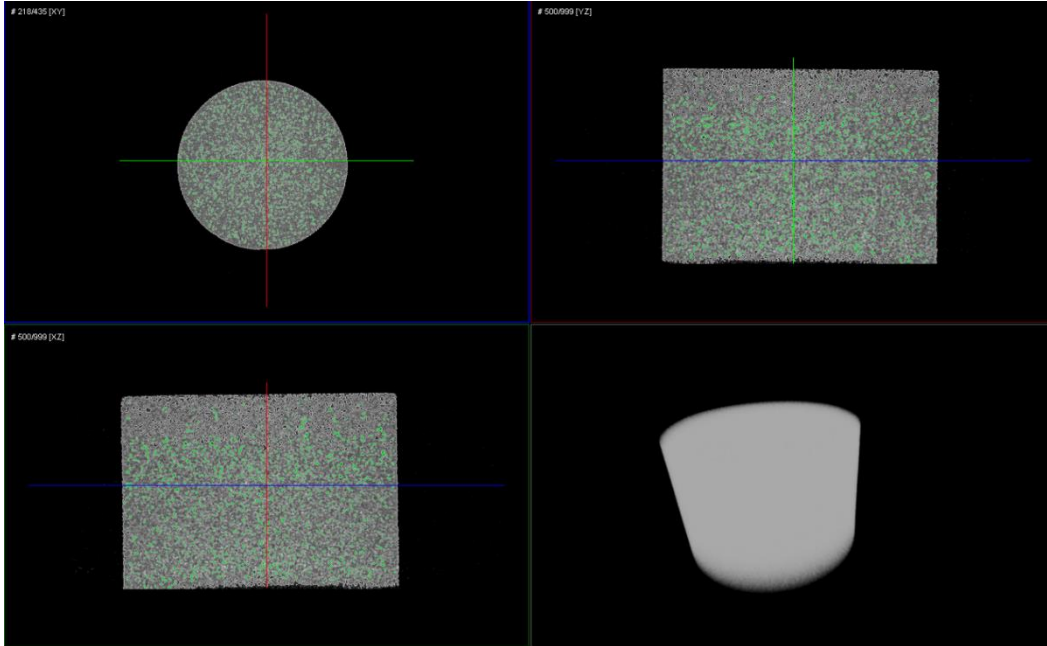


Şekil 6.16: Micro-CT analizi temsili şeması.

Şekil 6.17’de Al6061 malzemesinin ağırlıkça %4 TiC ile takviyelendirilmesiyle elde edilen Al6061/4TiC kompozitin Micro-CT görüntülemesi verilmiştir. Şekilde mavi renkle TiC takviyeleri görülmektedir. Takviyelerin matris faz içerisinde tüm kesitlerde uygun şekilde dağıldığı, topaklanmaların çok sınırlı kaldığı belirlenmiştir.



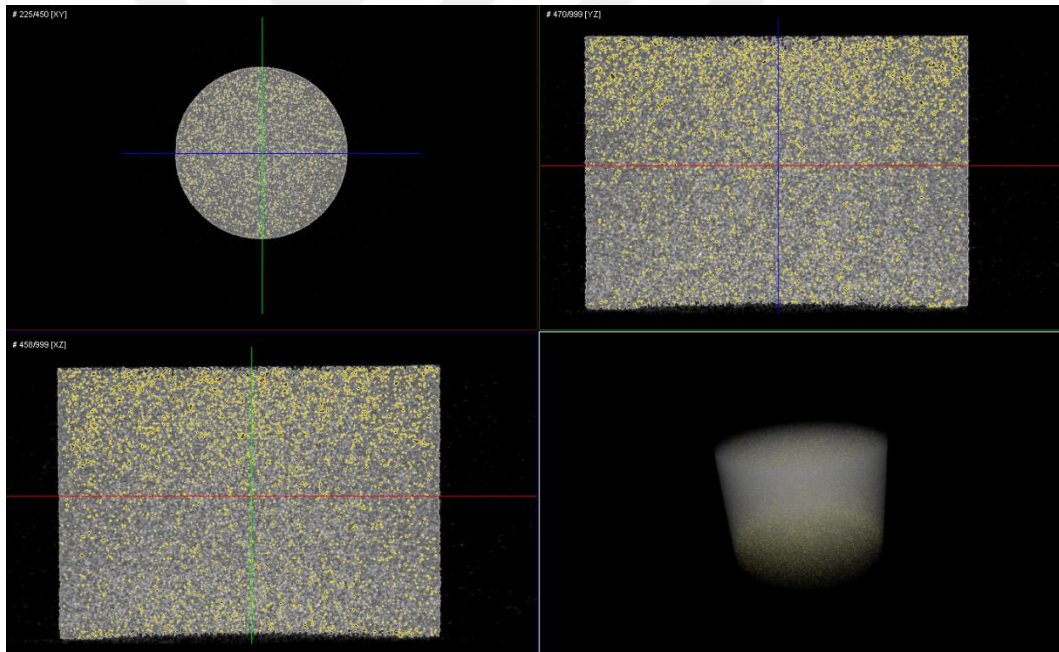
Şekil 6.17: Al6061/4 TiC kompozitin Micro-CT analizi.



Şekil 6.18: Al6061/8 TiC kompozitin Micro-CT analizi.

Şekil 6.18’de Al6061/8TiC kompozitin Micro-CT görüntülemesi verilmiştir. Takviye faz olarak yapıya eklenen TiC fazının yeşil parçacıklar olarak yapıda yer aldığı, tüm kompozit kesiti boyunca takviye grubunun iyi bir şekilde matris faz Al6061 içerisinde dağılım gösterdiği saptanmıştır. Elde edilen uygun takviye dağılımının doğrudan mekanik özelliklere etki ettiği düşünülmektedir.

Şekil 6.19’da Al6061/12TiC kompozitin Micro-CT görüntülemesi verilmiştir. Takviye fazı olarak ağırlıkça %12 oranında matris faza eklenen TiC partiküllerinin (sarı bölgeler) matris içerisinde dağılımının yoğunlaştığı belirlenmiştir. Artan bu takviye yoğunlaşmasıyla birlikte numune hacmi boyunca sarı bölgelerin yoğunlaştığı görülmektedir. TiC takviye oranının %12 ile sınırlandırılmasının uygun olduğu Micro-CT incelemesiyle kanıtlanmıştır. Matris fazın taşıyabileceği oranların üzerinde takviye eklenmesinin yapıda süreksizliklere yol açacağı ve mekanik özellikleri düşürebileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.19: Al6061/12 TiC kompozitin Micro-CT analizi.

Matris malzemeye eklenen TiC oranının artmasıyla beraber takviyelerin bir araya gelme eğiliminde olduğu açıktır. Çalışmada gerçekleştirilen ultrasonikasyon ve mekanik alaşımlama işlemleriyle karıştırma proseslerinin takviye malzemenin alüminyum matris içerisinde dağılımını iyileştirdiği açıkça görülmektedir. TiC takviye oranının %4’den %12’ye çıkmasıyla birlikte yoğun TiC izlendiği görülmektedir, hem Micro-CT analizleri hem de SEM analizleri neticesinde sonuçlar birbirini doğrulamaktadır.

6.8 Aşınma Test Sonuçları ve Optimizasyonu

Çalışma kapsamında deney tasarımı gerçekleştirilen ve üretim parametreleri belirlenen kompozitlerin aşınma ve basma testi sonucunda elde edilen aşınma kaybı ve basma dayanımı değerleri yapay zekâ yöntemi olarak kabul edilen yapay sinir ağları yöntemiyle modellenip analiz edilerek sonuçların tahmini değerleri belirlenmiştir. Kompozitlerin özelliklerine etki eden nihai üretim parametreleri ön çalışmalarla belirlenmiştir. Öncelikle Tablo 6.4’de gösterilen sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, üretim basıncı değerleri Al/MWCNT kompozitin aşınma kaybı yapay sinir ağlarıyla modellenmiştir. Al/MWCNT kompozit içerisinde ağırlıkça %1 MWCNT eklemesi gerçekleştirilerek numuneler üretilmiştir. Al/MWCNT kompozit için iki gizli katmana sahip ve bu gizli katmanlarda 15 ve 10 adet nöron kullanılmıştır. Nöronların sistem üzerine etkileri ayrıca belirtilmiştir. Gizli katmanda transfer fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant sigmoid transfer fonksiyonu seçilmiştir. Tablo 6.4’de gösterilen veriler sırasıyla %70, %15 ve %15’i eğitim, doğrulama ve test olarak rastgele ayrılarak işlenmiştir. Eğitim algoritması olarak ise Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak aşınma kaybı değerleri optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Al/MWCNT kompozitler için minimum aşınma kaybı değeri 0.00211 g değeri ile 550 derecede 30 dakika süresince sinterlenip, 200 MPa basınç altında üretilen numuneden elde edildiği belirlenmiştir (Numune 13). MSE (Ortalama Kare Hata) ve R^2 (Determinasyon Katsayısı) değerleri ağın sonucu üzerine fikir verebilen araçlardır, geliştirilen bu sistemin performansını belirlemede bu değerlerden yararlanılmıştır. MSE sıfıra yakın değerlere sahip tahmin edicilerin daha iyi sonuçlar verdiği kabul edilmekteyken, R^2 varyasyon yüzdesini temsil eden 0 ile 1 arasında değişen bir sayıdır. R^2 , 1 değerine yaklaşırsa geliştirilen modelin daha anlamlı olduğu kabul edilmektedir. Deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen tahmini değerlerin kıyaslaması sonucunda modelde R^2 değeri 0,97 elde edilirken, MSE değeri ise 0.0006 olarak saptanmıştır. Bu sonuçlar belirlenen üretim parametrelerinin aşınma kaybı üzerinde etkin olarak rol oynadığını göstermektedir. Bu sonuçlar ışığında tez çalışması kapsamında incelenecek parametrelerin sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi ve üretim basıncının yanı sıra ağırlıkça takviye oranlarının da eklenmesi gerektiği düşünülerek bu şekilde deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında üretilen kompozitlerin hibrit yapıda olması sebebiyle ön çalışmada belirtilen faktör parametreleri yeniden revize edilerek uygulanmıştır. Bu

faktörlerin sınır değerleri herhangi bir çatlak içermeyen kompozit numune üretimi yapılana kadar ilerletilmiştir. Faktör değerleri 3 seviyeden oluşmaktadır, tasarlanan deney setlerinin her biri için 32 adet deney planlanmıştır. Yapay sinir ağıları modelleri aşınma kaybı ve basma dayanımı üzerinde yoğunlaşarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 6.4: Al/1 MWCNT kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağıları tahmini sonuçları.

Numune Kodu	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)	Deneysel Aşınma Kaybı (g)	YSA Tahmini Aşınma Kaybı (g)
1	500	30	100	0.00327	0.0032
2	500	30	300	0.00564	0.0061
3	600	30	100	0.00340	0.0036
4	600	30	300	0.00977	0.0086
5	500	60	100	0.00349	0.0033
6	500	60	300	0.00596	0.0054
7	600	60	100	0.00412	0.0050
8	600	60	300	0.01059	0.0127
9	550	45	100	0.00281	0.0020
10	550	45	300	0.00723	0.0074
11	500	45	200	0.00223	0.0023
12	600	45	200	0.00461	0.0053
13	550	30	200	0.00211	0.0011
14	550	60	200	0.00263	0.0036
15	550	45	200	0.00252	0.0031
16	550	30	100	0.00236	0.0028
17	550	30	300	0.00329	0.0036
18	550	60	100	0.00224	0.0012
19	550	60	300	0.00492	0.0051
20	600	45	300	0.00561	0.0065

Çalışma kapsamında Al6061/TiC/GNP, Al6061/TiC/MWCNT ve Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin deney tasarımları oluşturulmuştur. Daha sonrasında üretim parametrelerinin optimizasyonu yapay sinir ağı yoluyla optimize edilerek çıktı değerleri model kullanılarak tahmin edilmiştir. Yapay sinir ağı modellemesinde kullanılan fonksiyonlar ve algoritmalar, Yapay Sinir Ağları bölümünde detaylandırılmıştır.

Al6061/TiC/GNP hibrit kompozitlerin aşınma testi sonucunda elde edilen deneysel sonuçlar ve aşınma kayıpları yapay sinir ağlarıyla modellenerek çıktı değerleri (aşınma kayıpları) optimize edilmiştir. Tablo 6.5’de Al6061/TiC/GNP kompozitlerin aşınma kaybı

deneysel ve yapay sinir ağı tahmini çıktı değerleri verilmiştir. Tabloda deney sıralaması MINITAB yazılımından elde edilen deney sıralamasına göre belirlenmiştir. Kodlamalarda ise A, T ve G sırasıyla Alüminyum, TiC ve GNP'yi temsil etmektedir. M olarak temsil edilen ise MWCNT takviyesidir. Aşınma sonuçları değerlendirildiğinde, minimum aşınma kaybı değeri 0.0005 g olarak ATG23 kodlu hibrit kompozitten elde edilmiştir (%8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 100 MPa üretim basıncı). Daha sonrasında ise ikinci en düşük aşınma değerinin elde edildiği ATG25 kodlu numuneden 0.0007 g aşınma kaybı saptanmıştır (%8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı). Bunu takiben ise 0.0011 g aşınma kaybı sonucu ile ATG26 kodlu numune öne çıkmaktadır (%8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Ayrıca tüm veri seti değerlendirildiğinde, ortalama aşınma kaybı ise 0.0118 g olarak saptanmıştır. Maksimum aşınma kayıpları ise ATG16 (%12 TiC, %1.5 GNP, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı), ATG12 (%12 TiC, %1.5 GNP, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı) ve ATG8 (%12 TiC, %1.5 GNP, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı) kodlu numunelerden sırasıyla 0.0500 g, 0.0434 g ve 0.0416 g olarak elde edilmiştir. Bu durum TiC takviyesinin yüksek oranda kullanılmasının getireceği olumlu etki, %1.5 seviyelerinde nano takviyelerin oluşturduğu topaklanma yapılarıyla birlikte ortadan kalkmıştır. Bu durum ayrıca SEM/EDS incelemelerinde de doğrulanmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, % TiC ve % GNP ilavesinin kompozitin aşınma kaybı üzerinde ciddi oranda etkisi olduğu görülmüştür, maksimum aşınma direncinin %8 TiC içeren takviyelerde olumlu yönde etki gösterdiği fakat %12 TiC içeren kompozitlerde ise % GNP'nin %1.5 seviyesinde kompozit yapıya eklenmesiyle birlikte aşınma direncinde düşüşler olduğu belirlenmiştir. Bu durumun sebebinin yüksek oranda matrise eklenen nano takviyelerin TiC takviyelerinin etrafından kümelenmesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde %1 GNP içerikli kompozitlerde maksimum aşınma direnci görülürken, takviye oranı %1.5 seviyesine ulaştığında aşınma direnci önemli ölçüde düşmektedir.

Tablo 6.5: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağıları tahmini sonuçları.

Numune Kodu	Ağırlıkça TiC (%)	Ağırlıkça GNP (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)	Deneysel Aşınma Kaybı (g)	YSA Aşınma Tahmini (g)
ATG1	4	0.5	450	15	150	0.0062	0.0058
ATG2	12	0.5	450	15	50	0.0024	0.0028
ATG3	4	1.5	450	15	50	0.0375	0.0374
ATG4	12	1.5	450	15	150	0.0414	0.0371
ATG5	4	0.5	550	15	50	0.0056	0.0062
ATG6	12	0.5	550	15	150	0.0029	0.0009
ATG7	4	1.5	550	15	150	0.0101	0.0103
ATG8	12	1.5	550	15	50	0.0416	0.0415
ATG9	4	0.5	450	45	50	0.0071	0.0064
ATG10	12	0.5	450	45	150	0.0026	0.0029
ATG11	4	1.5	450	45	150	0.0164	0.0158
ATG12	12	1.5	450	45	50	0.0434	0.0430
ATG13	4	0.5	550	45	150	0.0058	0.0056
ATG14	12	0.5	550	45	50	0.0029	0.0033
ATG15	4	1.5	550	45	50	0.0105	0.0250
ATG16	12	1.5	550	45	150	0.0500	0.0499
ATG17	4	1	500	30	100	0.0071	0.0072
ATG18	12	1	500	30	100	0.0182	0.0183
ATG19	8	0.5	500	30	100	0.0058	0.0057
ATG20	8	1.5	500	30	100	0.0327	0.0325
ATG21	8	1	450	30	100	0.0021	0.0016
ATG22	8	1	550	30	100	0.0022	0.0022
ATG23	8	1	500	15	100	0.0005	0.0002
ATG24	8	1	500	45	100	0.0017	0.0023
ATG25	8	1	500	30	50	0.0007	0.0007
ATG26	8	1	500	30	150	0.0011	0.0058
ATG27	8	1	500	30	100	0.0035	0.0032
ATG28	8	1.5	450	30	100	0.0351	0.0341
ATG29	8	0.5	550	30	100	0.0056	0.0055
ATG30	4	0.5	500	30	100	0.0057	0.0055
ATG31	12	1.5	500	30	100	0.0081	0.0080
ATG32	12	0.5	500	30	100	0.0029	0.0030

Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında, Al6061/TiC/GNP kompozit üretim grubu için maksimum 33.33 kat aşınma direnci artışı elde edildiği görülmüştür.

Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin aşınma testi sonucunda üretim parametrelerine bağlı olarak aşınma kaybı sonuçları yapay sinir ağlarıyla modellenerek çıktı değerleri (aşınma kayıpları) optimize edilmiştir. Tablo 6.6'da Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrasında elde edilen aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları gösterilmiştir. Aşınma test sonuçları karşılaştırıldığında, hibrit kompozitlerden elde edilen minimum aşınma kaybı değeri 0.0006 g olarak ATM26 kod numarasına sahip numunede saptanmıştır (%8 TiC, %1 MWCNT, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Daha sonrasında ise bu numuneyi ATM 22 kodlu numune 0.0009 g değeri ile takip etmiştir (%8 TiC, %1 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 100 MPa üretim basıncı). Minimum aşınma gösteren üçüncü sıradaki numune ise ATM25 kod numarasına sahip numunedir (0,0020 g) (%8 TiC, %1 MWCNT, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı). Al6061/TiC/MWCNT içerikli kompozit grubu içerisinde ortalama değer 0.0160 g olarak saptanmıştır. Maksimum aşınma değeri ise 0.0715 g olarak ATM 16 kodlu numuneden (%12 TiC, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı) elde edilirken bu değeri 0.0589 g değeri ile ATM8 kodlu numune (%12 TiC, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı) ve 0.0591 g değeri ile ATM 12 kod numaralı hibrit kompozitten elde edildiği belirlenmiştir (%12 TiC, %1.5 MWCNT, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı).

Sonuçlar değerlendirildiğinde, % TiC ve % GNP ilavesinin kompozitin aşınma kaybı üzerinde ciddi oranda etkisi olduğu görülmüştür. Maksimum aşınma direncinin %8 TiC içeren takviyelerde olumlu yönde etki gösterdiği fakat %12 TiC içeren kompozitlerde ise aşınma direncinde düşüşler olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde %1 GNP içerikli kompozitlerde maksimum aşınma direnci görülürken, takviye oranı %1.5 seviyesine ulaştığında aşınma direnci önemli ölçüde düşmektedir.

Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin aşınma test sonuçları karşılaştırıldığında, mikronize boyutlu TiC takviyesi ve nano boyutlu GNP takviyesinin aşınma kaybını düşürdüğü belirlenmiştir. Ancak maksimum aşınma direnci %8 TiC ve %1 GNP seviyelerinde elde edilirken, ağırlıkça takviye oranı TiC varlığı %12 seviyesine, ağırlıkça takviye oranı GNP varlığı ise %1.5 seviyesine ulaştığında aşınma direncinin ilerlemesi minimize olmaktadır. Aynı zamanda üretim basıncının 50 MPa'dan 150 MPa'ya çıkmasıyla aşınma direncinin

olumlu yönde etkilendiği belirlenmiştir. Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında (0.019 g) maksimum 27.53 kat aşınma direnci artışı elde edildiği görülmüştür.

Tablo 6.6: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağı tahmini sonuçları.

Numune Kodu	Ağırlıkça TiC (%)	Ağırlıkça MWCNT (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)	Deneysel Aşınma Kaybı (g)	YSA Aşınma Tahmini (g)
ATM1	4	0.5	450	15	150	0.0071	0.0026
ATM2	12	0.5	450	15	50	0.0053	0.0053
ATM3	4	1.5	450	15	50	0.0561	0.0575
ATM4	12	1.5	450	15	150	0.0549	0.0531
ATM5	4	0.5	550	15	50	0.0066	0.0140
ATM6	12	0.5	550	15	150	0.0038	0.0037
ATM7	4	1.5	550	15	150	0.0195	0.0194
ATM8	12	1.5	550	15	50	0.0589	0.0549
ATM9	4	0.5	450	45	50	0.0086	0.0086
ATM10	12	0.5	450	45	150	0.0040	0.0040
ATM11	4	1.5	450	45	150	0.0200	0.0256
ATM12	12	1.5	450	45	50	0.0591	0.0589
ATM13	4	0.5	550	45	150	0.0079	0.0078
ATM14	12	0.5	550	45	50	0.0031	0.0030
ATM15	4	1.5	550	45	50	0.0119	0.0132
ATM16	12	1.5	550	45	150	0.0715	0.0719
ATM17	4	1	500	30	100	0.0069	0.0076
ATM18	12	1	500	30	100	0.0205	0.0078
ATM19	8	0.5	500	30	100	0.0029	0.0029
ATM20	8	1.5	500	30	100	0.0389	0.0309
ATM21	8	1	450	30	100	0.0058	0.0058
ATM22	8	1	550	30	100	0.0009	0.0116
ATM23	8	1	500	15	100	0.0039	0.0039
ATM24	8	1	500	45	100	0.0039	0.0106
ATM25	8	1	500	30	50	0.0020	0.0012
ATM26	8	1	500	30	150	0.0006	0.0006
ATM27	8	1	500	30	100	0.0065	0.0069
ATM28	8	1.5	450	30	100	0.0090	0.0092
ATM29	8	0.5	550	30	100	0.0025	0.0078
ATM30	4	0.5	500	30	100	0.0076	0.0076
ATM31	12	1.5	500	30	100	0.0724	0.0728
ATM32	12	0.5	500	30	100	0.0035	0.0054

İki nano takviyenin birlikte kullanıldığı Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin aşınma test sonuçları yapay sinir ağları kullanılarak optimize edilmiştir. Tablo 6.7’de Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin üretim parametrelerine bağlı olarak değişen aşınma kayıpları verilmiştir. Aşınma sonuçları değerlendirildiğinde Al6061/GNP/MWCNT kompoziti için, AGM5 kodlu numuneden 0.0010 g aşınma kaybı ile minimum aşınma kaybı elde edilmiştir (%0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı). Bu değeri 0.0013 g aşınma kaybı değeri ile AGM13 kodlu hibrit kompozit takip etmiştir (%0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Üçüncü sırada minimum aşınma gösteren ise 0.0015 g aşınma kaybı ile AGM1 kodlu numunedir (%0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Al6061/GNP/MWCNT için ortalama aşınma değeri 0.0338 g olarak belirlenmiştir. Maksimum aşınma ise 0.1065 g değeri ile AGM4 kodlu numune öne çıkarken (%1.5 GNP, %1.5 MWCNT, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı), bu değeri 0.1056 g değeri ile AGM8 (%1.5 GNP, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı) ve 0.1015 g değeri ile AGM16 kodlu numune takip etmiştir (%1.5 GNP, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı).

Nano boyutlu GNP ve nano boyutlu MWCNT takviyelerin alüminyum matris içerisinde düşük oranlarda bulunduğu takdirde (%0.5) aşınma direncini arttırdığı ancak bu oranın artmasıyla birlikte özellikle %1.5 oranında yapıda ihtiva etmesi durumunda aşınma direncinin oldukça düştüğü belirlenmiştir. Bu duruma yüksek yüzey alanına sahip nano takviyelerin topaklanma eğilimi göstermesinin sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Yüksek Van der Waals çekim gücüne sahip nano takviyeler birbiriyle topaklanma oluşturarak yapıda süreksizlik oluşturacakları bilindiğinden bu seviyede bulunan nano takviye varlığının kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir. Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında maksimum 17.9 kat aşınma direnci artışı elde edildiği görülmüştür. Ayrıca ortalama üretim parametre seviyesinde üretilen Al6061/1 GNP ve Al6061/1 MWCNT kompozitlerinde aşınma kayıpları sırasıyla 0.0049 g ve 0.0062 g olarak bulunmuştur.

Tablo 6.7: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin aşınma kaybı deneysel ve yapay sinir ağıları tahmini sonuçları.

Numune Kodu	Ağırlıkça GNP (%)	Ağırlıkça MWCNT (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)	Deneysel Aşınma Kaybı (g)	YSA Aşınma Tahmini (g)
AGM1	0.5	0.5	450	15	150	0.0015	0.0021
AGM2	1.5	0.5	450	15	50	0.0592	0.0595
AGM3	0.5	1.5	450	15	50	0.0362	0.0365
AGM4	1.5	1.5	450	15	150	0.1065	0.1069
AGM5	0.5	0.5	550	15	50	0.0010	0.0012
AGM6	1.5	0.5	550	15	150	0.0465	0.0468
AGM7	0.5	1.5	550	15	150	0.0223	0.0773
AGM8	1.5	1.5	550	15	50	0.1056	0.1058
AGM9	0.5	0.5	450	45	50	0.0033	0.0033
AGM10	1.5	0.5	450	45	150	0.0550	0.0558
AGM11	0.5	1.5	450	45	150	0.0195	0.0188
AGM12	1.5	1.5	450	45	50	0.0985	0.0520
AGM13	0.5	0.5	550	45	150	0.0013	0.0013
AGM14	1.5	0.5	550	45	50	0.0635	0.0410
AGM15	0.5	1.5	550	45	50	0.0259	0.0260
AGM16	1.5	1.5	550	45	150	0.1015	0.1015
AGM17	0.5	1	500	30	100	0.0095	0.0094
AGM18	1.5	1	500	30	100	0.0781	0.0761
AGM19	1	0.5	500	30	100	0.0230	0.0158
AGM20	1	1.5	500	30	100	0.0591	0.0581
AGM21	1	1	450	30	100	0.0142	0.0145
AGM22	1	1	550	30	100	0.0126	0.0129
AGM23	1	1	500	15	100	0.0038	0.0038
AGM24	1	1	500	45	100	0.0038	0.0041
AGM25	1	1	500	30	50	0.0156	0.0158
AGM26	1	1	500	30	150	0.0049	0.0049
AGM27	1	1	500	30	100	0.0153	0.0058
AGM28	1	1.5	450	30	100	0.0599	0.0366
AGM29	1	0.5	550	30	100	0.0025	0.0028
AGM30	0.5	0.5	500	30	100	0.0033	0.0024
AGM31	1.5	1.5	500	30	100	0.1015	0.0786
AGM32	1.5	0.5	500	30	100	0.0656	0.0756

Çalışma kapsamında belirlenen matris takviye gruplarının aşınma test sonuçları ve aşınma direncinde görülen değişimler aşağıda belirtilen esaslara dayandırılmıştır.

Dış yükler altında iki malzeme birbiriyle temas ettiği durumda, iki yüzeyin uç noktaları birbiriyle temas halinde olur ve hareket halinde aşınma olarak bilinen yüzey bozulmaları ve kayıpları meydana gelir. Daha yumuşak malzemelerin daha sert malzemelere karşı

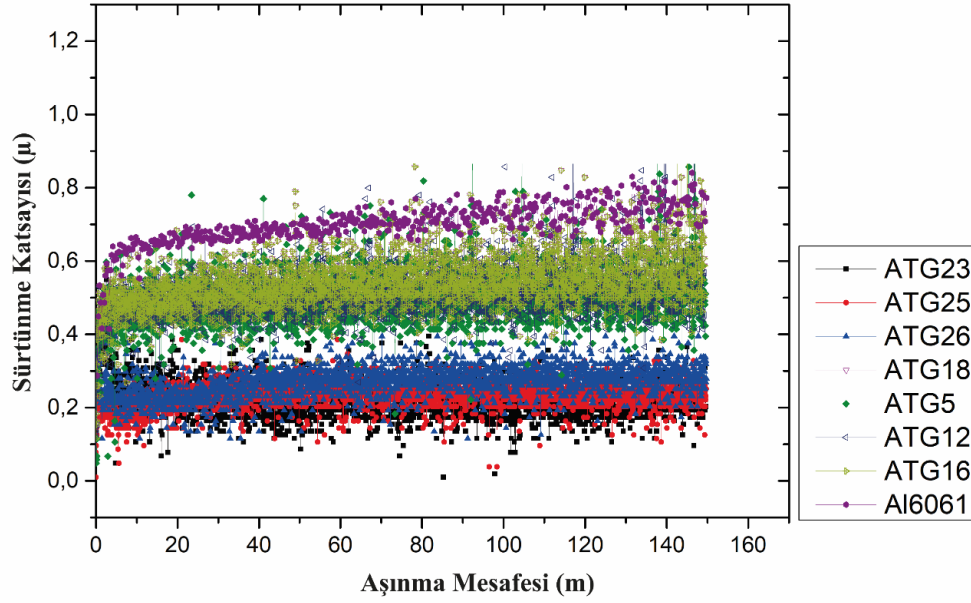
kayma hareketi yapması sonucunda, atomlar daha yumuşak olan malzemeden ayrılarak kendilerini daha sert olan malzemenin yüzey pürüzlerine konumlandırma eğiliminde olacaktır. Sonuç olarak ise, temas yüzeylerinde ve ara yüzey formları boyunca atomlar arası bağlantılarda soğuk kaynama meydana gelebilir.

Kayma işleminin devam etmesi durumunda, birleşme yerlerinde kırılmalar meydana gelerek ve parçaların yapışan pürüzlerinde ayrılmalar oluşabilmektedir. Sürtünme kuvveti, uygulanan bir kuvvet altında iki yüzeyin hareketi sırasında atomlar arası bağlantılarda kaymaya neden olur. Archad adhesiv aşınma kaynaklı aşınma kaybını Denklem 6.1'deki bağıntı ile tanımlamıştır. Bu denklemde aşınma kaybını V temsil ederken, c , P , L ve H sırasıyla sürtünme katsayısı, uygulanan yük, aşınma mesafesi ve yumuşak yüzeyin sertliğini temsil etmektedir [138, 139].

$$V = c \times \frac{P \cdot L}{H} \quad (6.1)$$

Metal matrisli kompozitler takviyesiz metal malzemeler ile kıyaslandığında düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Ayrıca yapıya eklenen seramik takviyeler aşınma direnci üzerinde pozitif etki yapmaktadır. Aşınma direnci üzerindeki bu ilerleme direkt sürtünme katsayısı ile ilgilidir. Geleneksel metal matrisli kompozitler için, takviye grupları temas yüzeylerinde kayma esnasında yüzeyi sürtünmeye karşı koruma eğiliminde olan yük taşıyan bileşenler olarak hareket etmektedir. Takviyenin sertliği aşınma kaybını doğrudan etkilediği bilinmektedir. Metal matrisli kompozitlerin aşınma kayıpları, takviyenin matris faz içerisinde dağılımına ve matris-takviye ara yüzey bağı gibi iç yapı özelliklerine bağlıdır. Matris ve takviye ara yüzeyindeki bağın zayıf olması durumunda, sert seramik parçacıklar kompozit içerisinde kolayca ayrılabilir ve daha sonra kayma yüzeyleri arasında sıkışarak üçüncü cisim aşındırıcısı olarak hareket ederek aşınma yüzey hasarını ve aşınma oranını artıracaktır.

Al6061/TiC/GNP hibrit kompozitlerin aşınma testi esnasında alınan sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.20'de gösterilmiştir, şekil incelendiğinde minimum sürtünme katsayısı değeri ATG23 kodlu numunede (%8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 100 MPa üretim basıncı). 0.22 μ olarak elde edilmiştir. Takviyelendirilmemiş Al6061 (0.70 μ)'den elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri ile kıyaslandığında 3.1 kat azalış elde edilmiştir.

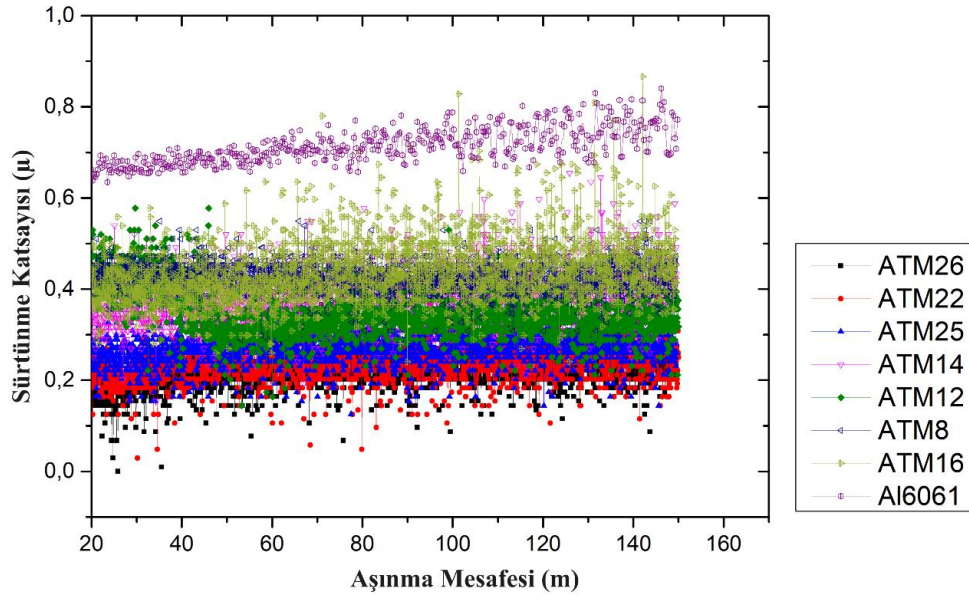


Şekil 6.20: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri.

Karbon esaslı kompozitlerin kendinden yağlayıcı özelliği olduğu bilinmektedir. Karbon esaslı metal matrisli kompozitlerde görülen düşük sürtünme katsayısının nedeni temas yüzeyleri arasında doğrudan teması önleyici yağlayıcı film yapısı bulunmasıdır. Ayrıca doğrudan teması engelleyen yağlayıcı film varlığından dolayı, atomların daha yumuşak yüzey pürüzlerinden daha sert yüzey pürüzlerine geçişi azalacağından, daha yumuşak aşınma yüzeylerinin atomlarının soğuk kaynaklanmasında azalma sağlanabilmektedir.

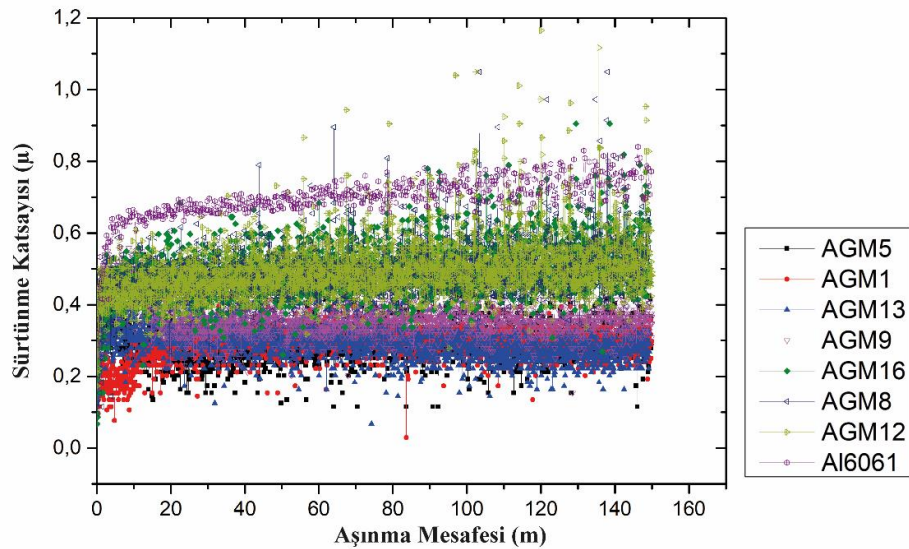
Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.21’de gösterilmiştir, Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri incelendiğinde minimum sürtünme katsayısı değeri ATM26 kodlu numunede 0.21 μ olarak elde edilmiştir. Takviyelendirilmemiş Al6061 (0.70 μ)’den elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri ile kıyaslandığında 3.29 kat azalış elde edilmiştir.

Al6061/TiC/GNP ve Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin içerisinde seramik esaslı TiC ve nano karbon esaslı takviye olan GNP ve MWCNT’ler ile kombine edilmesi sebebiyle hem seramik esaslı malzemenin yüksek sertliği hem de karbon esaslı nano malzemelerin oluşturduğu doğal yağlayıcı film yapısının sürtünme katsayısını ciddi oranda düşürdüğü saptanmıştır.



Şekil 6.21: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri.

Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde minimum sürtünme katsayısı değeri AGM5 kodlu numunede (%0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı) 0.29 μ olarak elde edilmiştir. Takviyelendirilmemiş Al6061 (0.70 μ)’den elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri ile kıyaslandığında 2.41 kat azalış elde edilmiştir.



Şekil 6.22: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin sürtünme katsayısı değişimleri.

Kompozitlerin üretim yöntemleri yüksek maliyet ve uzun zaman gerektiren proseslerdir. Geliştirilen yapay sinir ağı modeliyle beraber maliyet ve zamandan tasarruf amaçlanmıştır. Yapay sinir ağları insan beyin sistemine benzeyen çalışma prensibine sahiptir. Geleneksel istatistik yöntemlerinden farklı olarak, yapay sinir ağları karmaşık modelleri açıklamada yüksek başarı göstermektedir. Bu makine öğrenmesi metodunda sisteme giren ve ayrılan değerler yüksek doğruluklu olarak yorumlanabilmektedir. Sistemi girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı oluşturmaktadır. Ön çalışmalar esnasında elde edilen değerlerin lineer olmayan sonuçlar göstermesi, yapay sinir ağı metodunun kullanılma motivasyonunu oluşturmuştur.

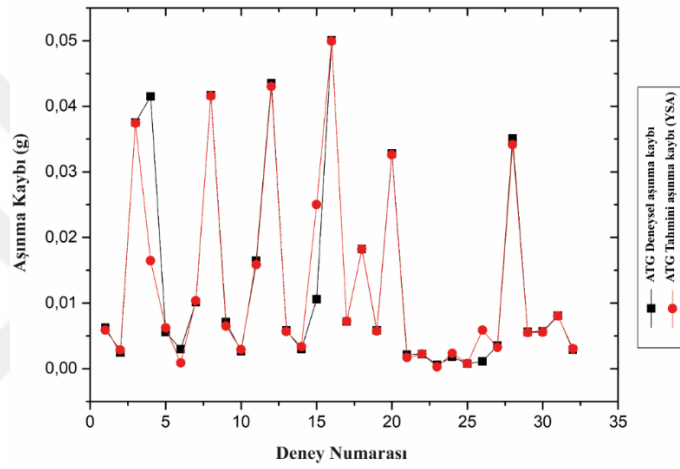
Modellenen yapay sinir ağında girdi katmanını 5 adet parametre oluşturmaktadır. Bunlar; birinci takviye yüzdesi (ağırlıkça), ikinci takviye yüzdesi (ağırlıkça), sinterleme sıcaklığı (°C), sinterleme süresi (dk), üretim basıncı (MPa) olarak belirlenmiştir. Her bir girdi değeri eşit olarak dağılan 3 seviye adımından oluşmaktadır. % TiC değişimi (4-8-12), %GNP değişimi (0.5-1-1.5), sinterleme sıcaklığı (450-500-550 °C), sinterleme süresi (15-30-45 dk), sinterleme basıncı (50-100-150 MPa) olarak belirlenmiştir. Veri değerleri eğitim, doğrulama ve test olarak (%75-15-15) olarak ayrıştırılmıştır. Veri setlerinin farklı sayısal değerlerden oluşması sebebiyle, değerler öncelikle normalize edilmiştir (Denklem 6.2). Bu denklemde x_{norm} normalize edilmiş değerleri, x_i girdi değerini, x_{mn} minimum veri değerini x_{mx} maksimum data değerini temsil etmektedir.

$$x_{norm} = 2 \times \frac{x_i - x_{mx}}{x_{mx} - x_{mn}} - 1 \quad (6.2)$$

Oluşturulan yapay sinir ağında 2 adet gizli katman kullanılmıştır. Bu gizli katmanların her birinde 10 adet nöron yer almaktadır. Literatür incelemesinde, tek katmanlı tasarlanan gizli katmanların sistemi açıklamada geniş ölçüde yetersiz kalabildiği belirtilmiştir. Ayrıca iki gizli katmanlı yapay sinir ağlarında, ilk gizli katman incelenecek veri uzayını küçük bölgelere ayırırken ikinci katman ise yaklaşıklığı incelemek üzere serbest bırakılmaktadır [86, 140, 141]. Eğitim algoritması olarak Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu olarak ise hiperbolik tanjant sigmoid transfer fonksiyonu seçilmiştir (Denklem 6.3).

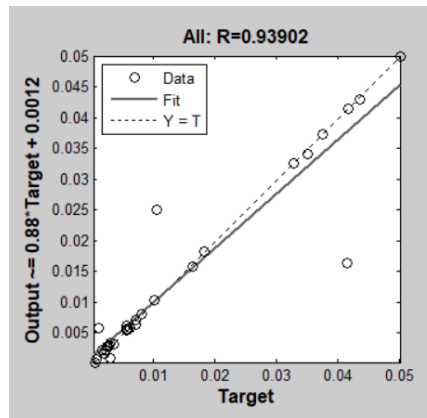
$$f(x) = 1/(1 + e^{-\delta x}) \quad (6.3)$$

Tasarlanan ağ modeli hem aşınma kayıpları hem basma dayanımı için modellenmiştir. Al6061/TiC/GNP kompozitlerin aşınma testi sonucunda elde edilen ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden alınan tahmini aşınma kaybı sonuçları ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı grafiği sırasıyla Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’de verilmiştir. MSE, bir makine öğrenme modelinin performansını ölçmek için kullanılır ve sıfıra yakın değerlere sahip tahmin edicilerin daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir ve R ise 1 değerine yaklaşırsa geliştirilen modelin daha anlamlı olduğu kabul edilmektedir. Sonuçlar analiz edildiğinde, deneysel ve tahmini aşınma kaybı değerlerinin yüksek oranda uyumluluk gösterdiği saptanmıştır.



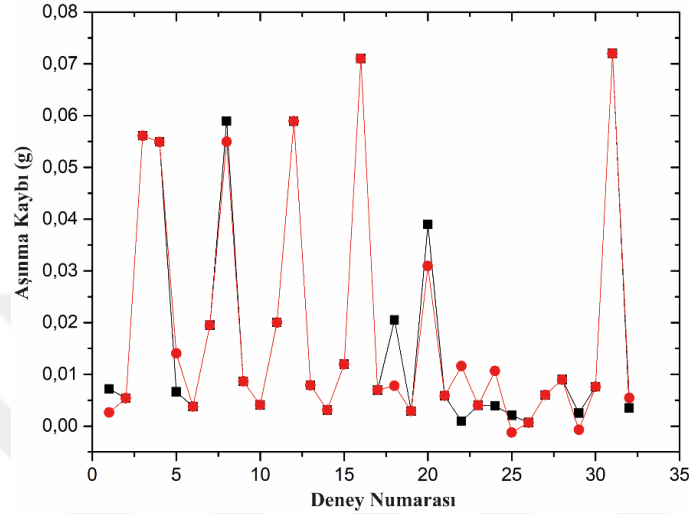
Şekil 6.23: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen aşınma kaybı sonuçlarının karşılaştırılması.

Tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9390 elde edilirken, MSE değeri 0.00571 olarak elde edilmiştir.



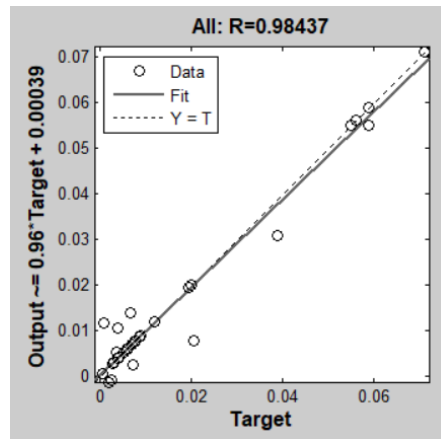
Şekil 6.24: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin aşınma kaybı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.

Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonucunda elde edilen ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden alınan tahmini aşınma kaybı sonuçları ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı grafiği sırasıyla Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da verilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde, deneysel ve tahmini aşınma kaybı değerlerinin yüksek oranda uyumluluk gösterdiği saptanmıştır.



Şekil 6.25: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen aşınma kaybı sonuçlarının karşılaştırılması.

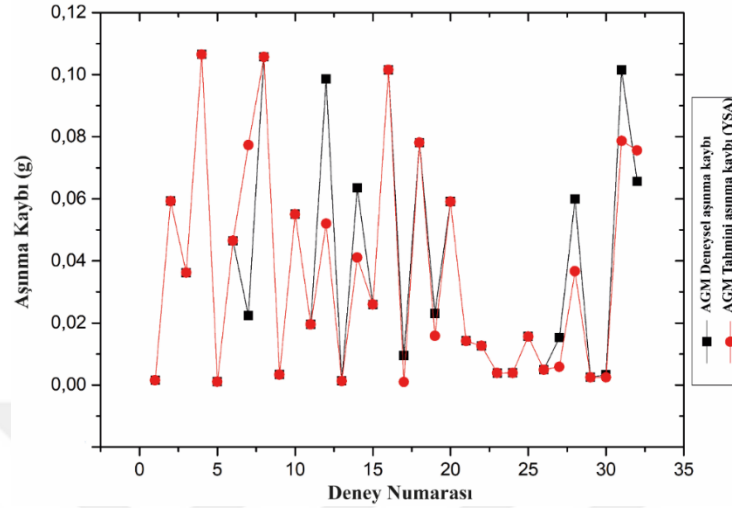
Tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9843 elde edilirken, MSE değeri 0.01493 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.26: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.

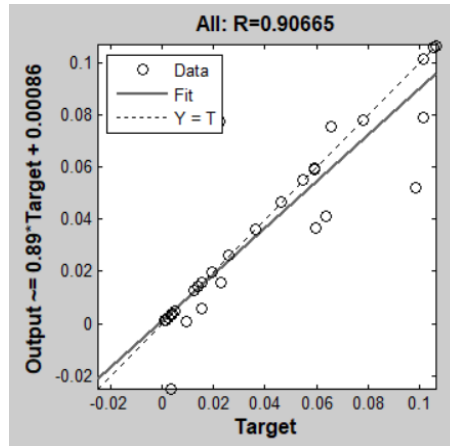
Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonucunda elde edilen ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden alınan tahmini aşınma kaybı sonuçları ve yapay sinir ağı

modelinden elde edilen regresyon katsayısı grafiği sırasıyla Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de verilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde, deneysel ve tahmini aşınma kaybı değerlerinin yüksek oranda uyumluluk gösterdiği saptanmıştır.

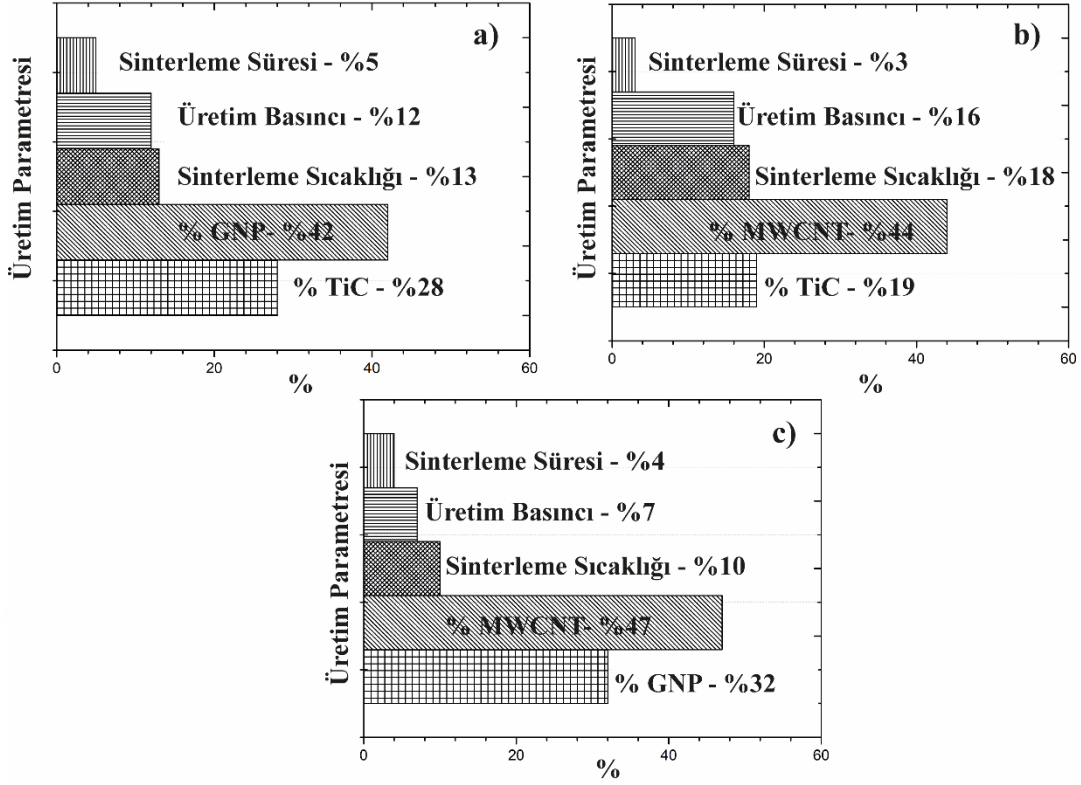


Şekil 6.27: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen aşınma kaybı sonuçlarının karşılaştırılması.

Tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9066 elde edilirken, MSE değeri 0.03261 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.28: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.



Şekil 6.29: Çalışmada kullanılan hibrit kompozit gruplarının istatistiksel modelden elde edilen aşınma kaybı etki oranları

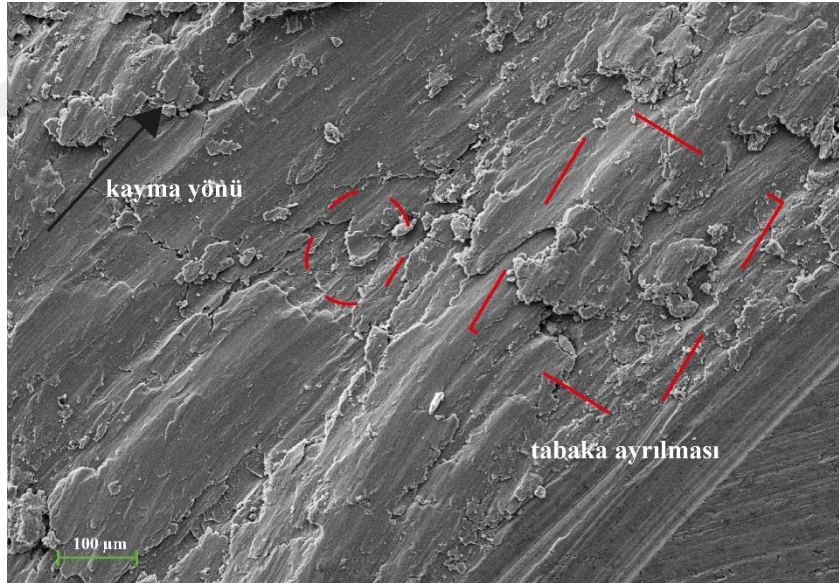
a) Al6061/TiC/GNP b) Al6061/TiC/MWCNT c) Al6061/GNP/MWCNT.

Şekil 6.29’da çalışma kapsamında üretilen hibrit kompozitlerin aşınma kaybı üzerinde gösterdikleri etki oranları verilmiştir. Şekil incelendiğinde her bir hibrit kompozit grubu için de takviye oranlarının en etkili parametre olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, literatürle uyumlu olarak aşınma kaybı üzerinde minimum etkinin sinterleme süresi parametresinden elde edildiği belirlenmiştir [42]. Sinterleme süresinin aşınma üzerinde etkisinin düşük olması çalışmada tercih edilen toz metalurjisi yöntemi esnasında uygun sinterleme süresinin yakalanmasına dayandırılmıştır. Uygun olmayan üretim parametre seçimlerinin üretilen kompozit özelliklerine olumsuz yönde etki edeceği bilinmekte olup, çalışma öncesi gerçekleştirilen ön denemelerde bu durum minimize edilmeye çalışılmıştır.

6.9 Aşınma İzleri SEM İncelemesi

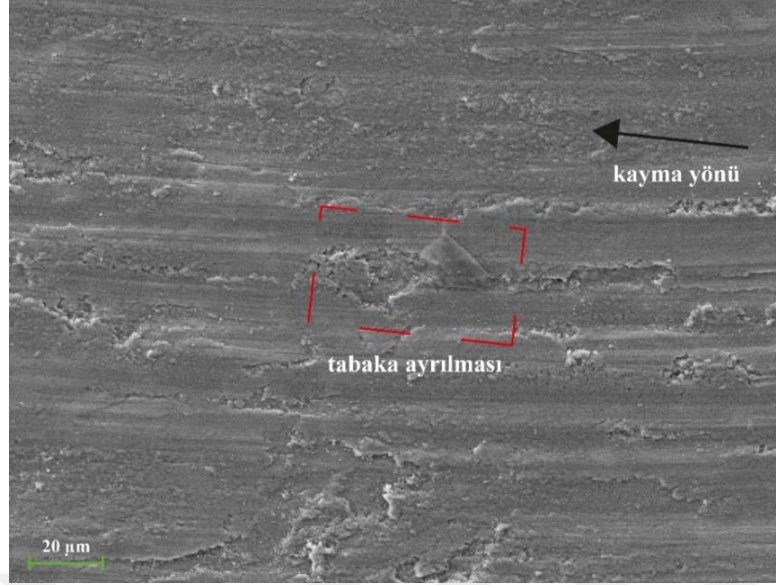
Aşınma testi sonrasında aşınan yüzeylerin SEM cihazı vasıtasıyla incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler neticesinde aşınma izi SEM görüntüleri sunulan kompozitlerin aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Sıklıkla karşılan aşınma mekanizmaların adhezyon, abrazyon, delaminasyon ve oksidasyon olduğu belirlenmiştir. Üretim parametrelerinin aşınma mekanizmaları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu saptanmıştır.

Şekil 6.30'da 500 °C'de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilen takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin aşınma testi sonrasında analiz edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Aşınma görüntüsü değerlendirildiğinde, yapının yüksek seviyede deforme olduğu, büyük parça ayrışmalarının gözlemlenmiştir. Delaminasyon ve mikro çatlakların izlendiği açıkça görülmektedir. Aşınma izlerinin görüntülemesinde karşılaşılan bu olumsuz durumlar, aşınma kaybı değeriyle de uyumlu olduğu sonuçlarda tespit edilmiştir.



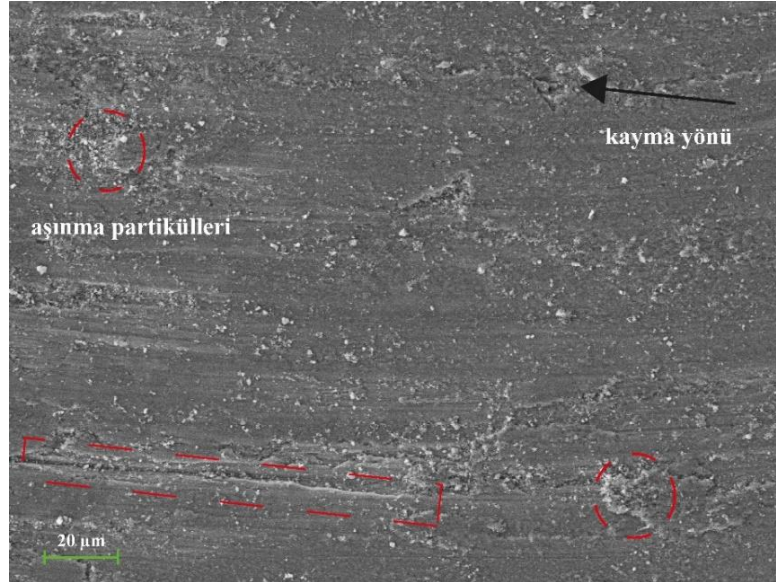
Şekil 6.30: Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin aşınma testi sonrası SEM görüntüsü.

Şekil 6.31'de 500 °C'de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/GNP kompozitin aşınma sonrası SEM görüntülemesi verilmiştir. Aşınma izleri incelendiğinde kısmi tabaka ayrılması varlığı görülmesinin yanı sıra kayma yönü doğrultusunda aşınma izlerinin mevcudiyeti saptanmıştır. Yapıda mevcut aşınma mekanizmalarının baskın olarak adhezyon ve abrazyon olduğu belirlenmiştir.



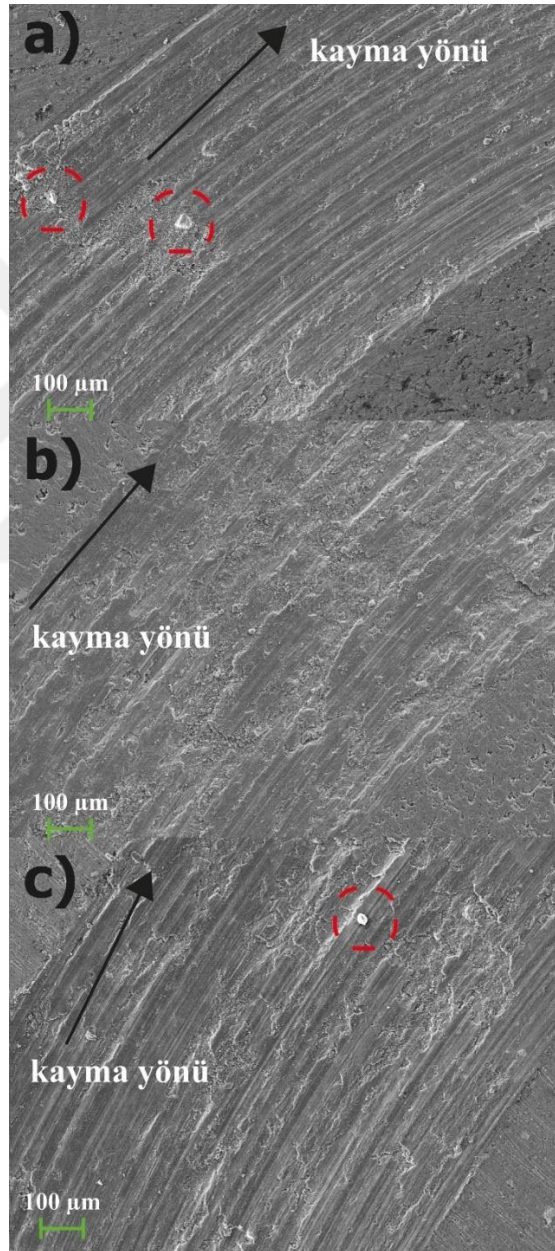
Şekil 6.31: Al6061/GNP kompozitin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 6.32’de 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/MWCNT kompozitin aşınma sonrası SEM görüntülemesi verilmiştir. Aşınma izleri değerlendirildiğinde, yapıda yoğun şekilde aşınma partiküllerinin bulunduğu görülmektedir. Bu durum aşınma mekanizması olarak yoğun abrazyon varlığını göstermektedir.



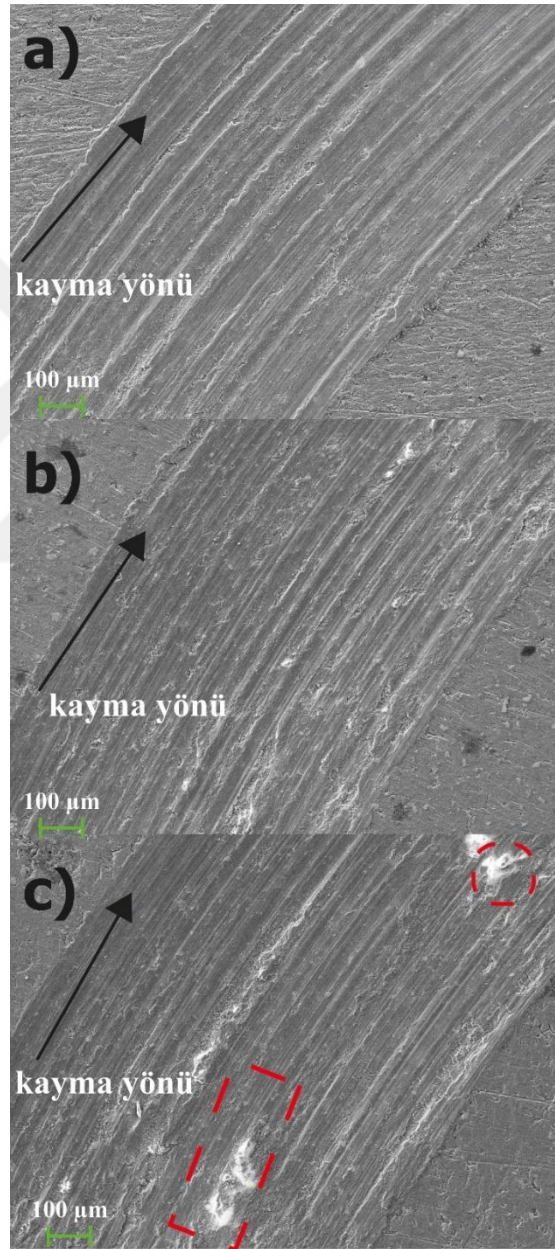
Şekil 6.32: Al6061/MWCNT kompozitin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 6.33’de 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/TiC/0.5 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.33.a %4 TiC ve %0.5 GNP, Şekil 6.33.b %8 TiC ve %0.5 GNP, Şekil 6.33.c ise %12 TiC ve %0.5 GNP ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Aşınma sonrası yapıdan kopan parçalar görülmektedir. Aşınma izlerinde baskın mekanizmanın adhezif aşınma olduğu, ayrıca bölgesel delaminasyon oluşumlarının da izlendiği rapor edilmiştir.



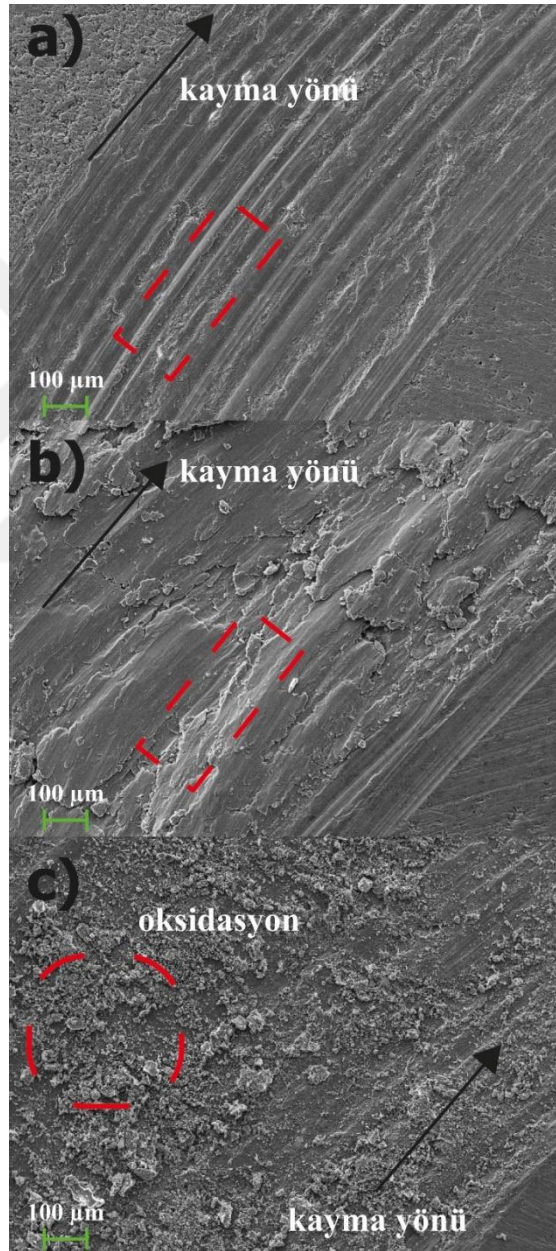
Şekil 6.33: Al6061/TiC/0.5 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/4 TiC/0.5 GNP b) Al6061/8 TiC/0.5 GNP c) Al6061/12 TiC/0.5 GNP.

Şekil 6.34’de 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/TiC/1 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.34.a %4 TiC ve %1 GNP, Şekil 6.34.b %8 TiC ve %1 GNP, Şekil 6.34.c ise %12 TiC ve %1 GNP ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Aşınma sonrası SEM görüntülerinde, kayma yönüne paralel aşınma oyuklarının varlığı tespit edilmiştir, artan TiC varlığıyla beraber abrazyon aşınma tipinin baskın olduğu ve aşınma artıklarının fazlaştığı görülmektedir.



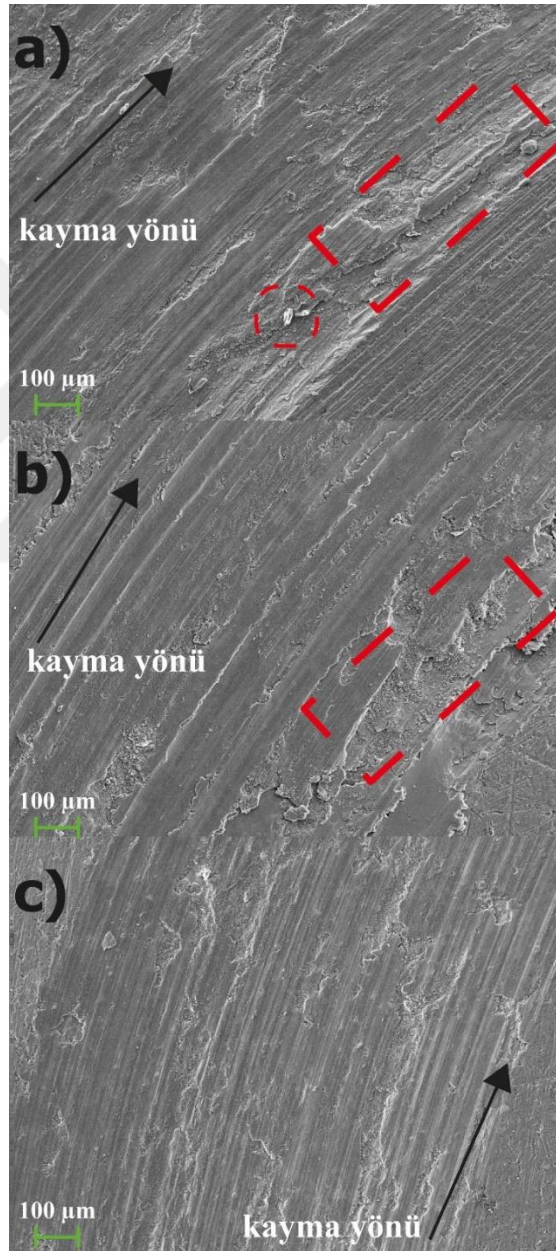
Şekil 6.34: Al6061/TiC/1 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/4 TiC/1 GNP b) Al6061/8 TiC/1 GNP c) Al6061/12 TiC/1 GNP.

Şekil 6.35’de 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/TiC/1.5 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.35.a %4 TiC ve %1.5 GNP, Şekil 6.35.b %8 TiC ve %1.5 GNP, Şekil 6.35.c ise %12 TiC ve %1 GNP ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Aşınma izleri incelendiğinde aşınma oranlarıyla uyumlu olarak aşınma izlerinin derinleştiği yapıda bölgesel tabaka ayrılmalarının görüldüğü belirlenmiştir. Ayrıca yüksek yoğun oksidasyon yapılarının varlığı tespit edilmiştir.



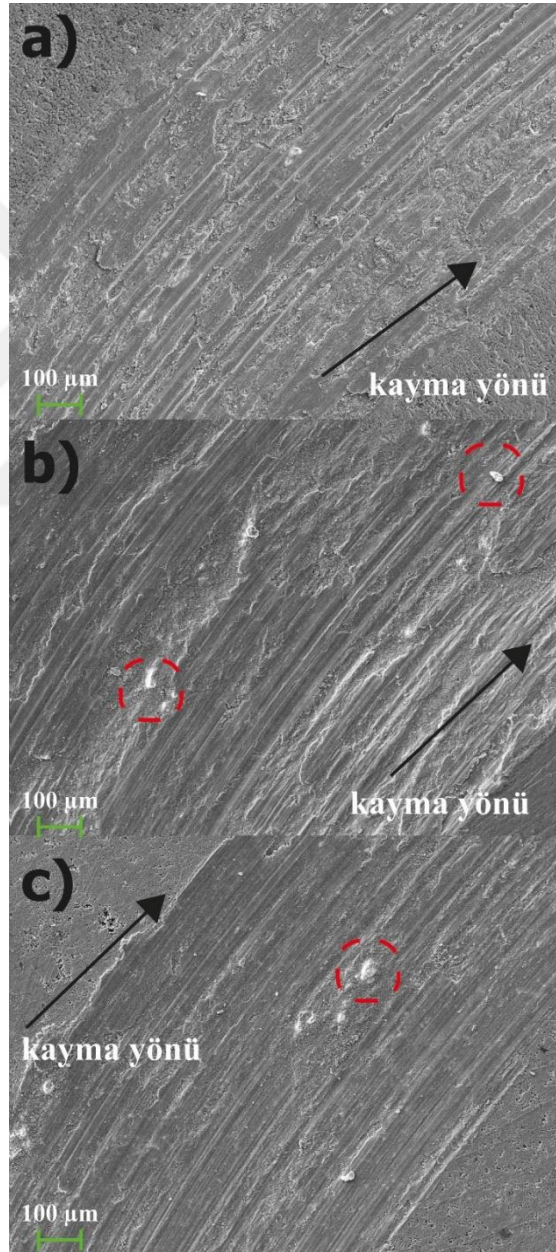
Şekil 6.35: Al6061/TiC/1.5 GNP kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/4 TiC/1.5 GNP b) Al6061/8 TiC/1.5 GNP c) Al6061/12 TiC/1.5 GNP.

Şekil 6.36'da 500 °C'de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/TiC/0.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.36.a %4 TiC ve %0.5 MWCNT, Şekil 6.36.b %8 TiC ve %0.5 MWCNT, Şekil 6.36.c ise %12 TiC ve %0.5 MWCNT ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Aşınma sonrası SEM görüntülerinde, delaminasyon aşınma mekanizmasının düşük TiC oranlarında baskın olduğu, %12 TiC içeren kompozitte ise adhezif aşınmanın etkin olduğu değerlendirilmiştir.



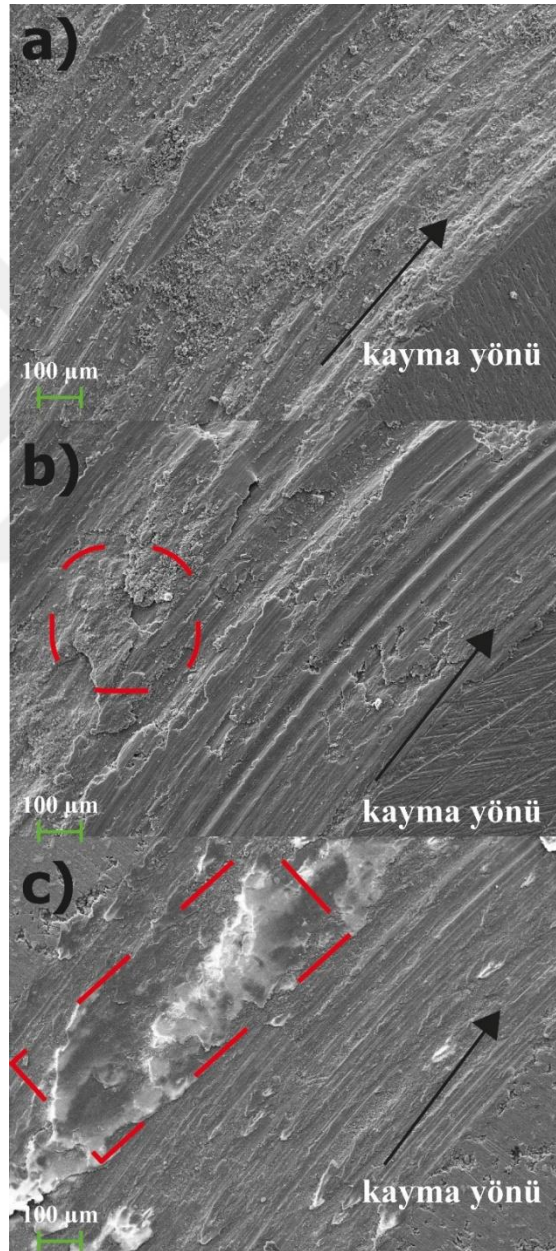
Şekil 6.36: Al6061/TiC/0.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/4 TiC/0.5 MWCNT b) Al6061/8 TiC/0.5 MWCNT c) Al6061/12 TiC/0.5 MWCNT.

Şekil 6.37’de 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/TiC/1 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.37.a %4 TiC ve %1 MWCNT, Şekil 6.37.b %8 TiC ve %1 MWCNT, Şekil 6.37.c ise %12 TiC ve %1 MWCNT ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Artan TiC takviye oranıyla beraber kayma yönüne paralel aşınma izlerinin belirginleştiği saptanmıştır. Ayrıca aşınma yapısının adhezif aşınmadan baskın abrazif aşınmaya doğru geçiş yaptığı, aşınma partiküllerinin varlığı ve derinleşen aşınma izleri bu durumu doğrulamaktadır.



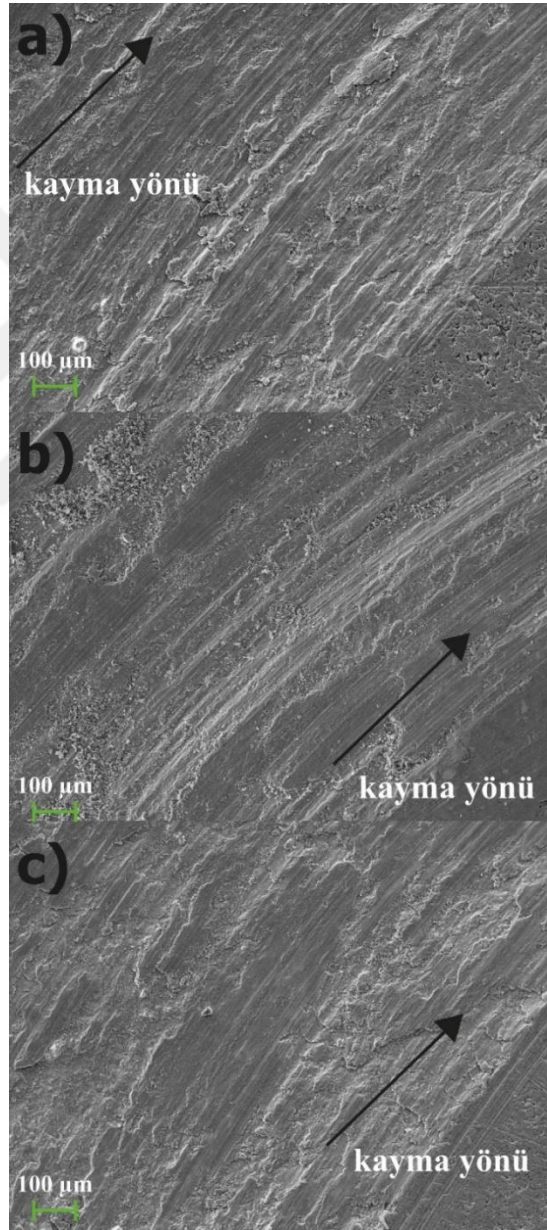
Şekil 6.37: Al6061/TiC/1 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/4 TiC/1 MWCNT b) Al6061/8 TiC/1 MWCNT c) Al6061/12 TiC/1 MWCNT.

Şekil 6.38’de 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/TiC/1.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.38.a %4 TiC ve %1.5 MWCNT, Şekil 6.38.b %8 TiC ve %1.5 MWCNT, Şekil 6.38.c ise %12 TiC ve %1 MWCNT ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Yüksek oranlarda mikro ve nano takviye içeren kompozitlerde derin aşınma izlerinin varlığı tespit edilmiştir. Ek olarak tabaka ayrılması ve oksit yapılarının varlığı ve mikro boşluklar görülmüştür.



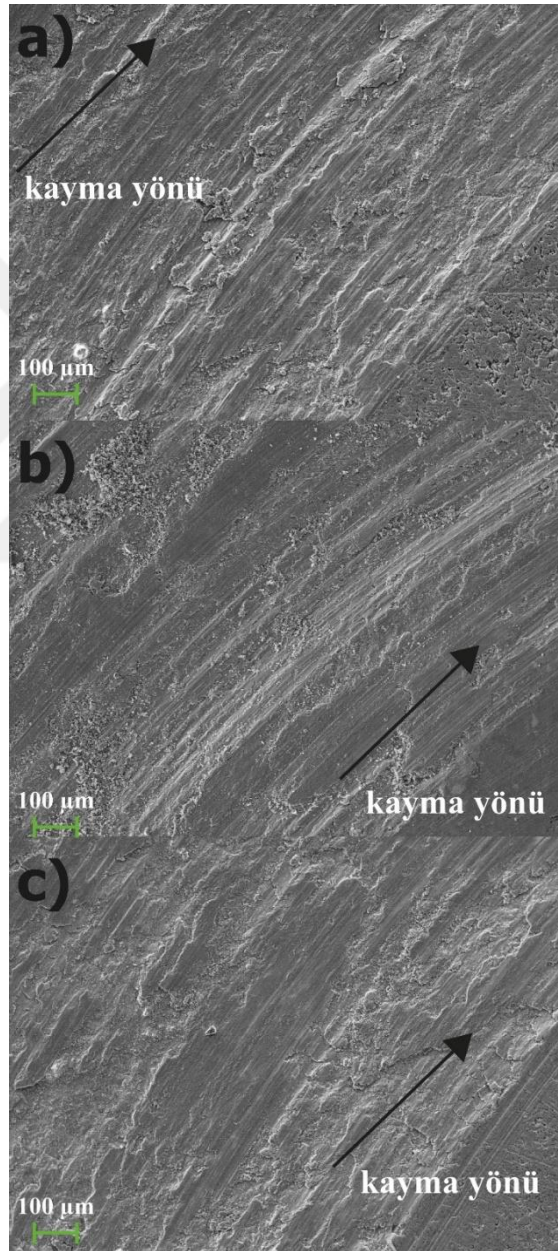
Şekil 6.38: Al6061/TiC/1.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/4 TiC/1.5 MWCNT b) Al6061/8 TiC/1.5 MWCNT
c) Al6061/12 TiC/1.5 MWCNT.

Şekil 6.39’da 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/GNP/0.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.39.a %0.5 GNP ve %0.5 MWCNT, Şekil 6.39.b %1 GNP ve %0.5 MWCNT, Şekil 6.39.c ise %1.5 GNP ve %0.5 MWCNT ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Aşınma izleri SEM incelemesinde, adhezif ve abrazif aşınma tiplerinin varlığı tespit edilmiştir. Artan GNP takviyesiyle beraber adhezif aşınmadan abrazif aşınmaya geçiş saptanmıştır. Kayma yönüne paralel sıkı aşınma izlerinin abrazif aşınmayı işaret etmektedir.



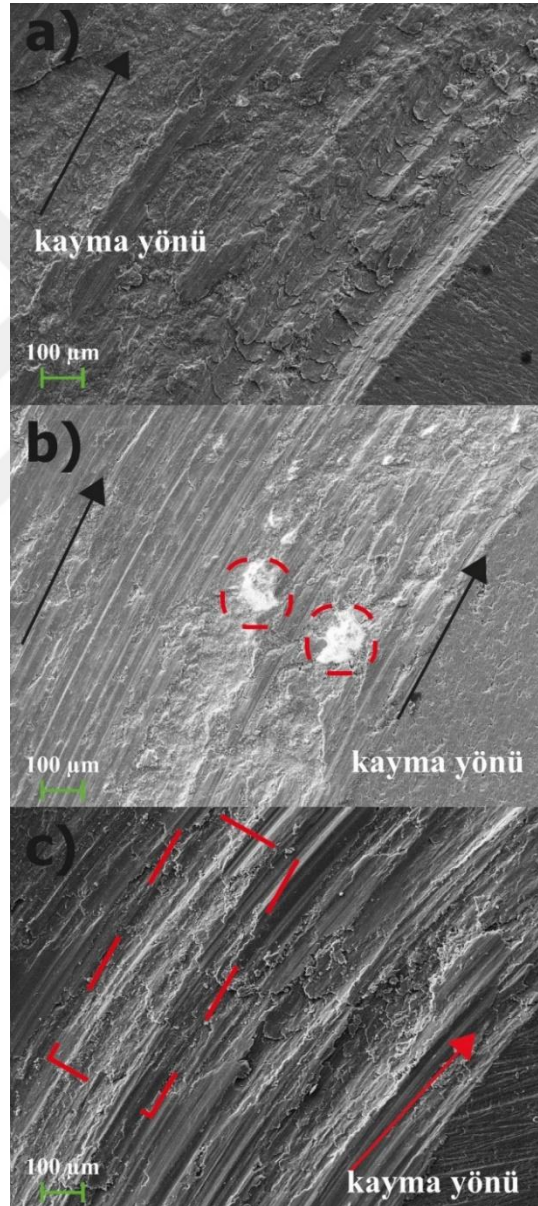
Şekil 6.39: Al6061/GNP/0.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/0.5 GNP/0.5 MWCNT b) Al6061/1 GNP /0.5 MWCNT
c) Al6061/1.5 GNP /0.5 MWCNT.

Şekil 6.40'da 500 °C'de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/GNP/1 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.40.a %0.5 GNP ve %1 MWCNT, Şekil 6.40.b %1 GNP ve %1 MWCNT, Şekil 6.40.c ise %1.5 GNP ve %1 MWCNT ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Aşınma izleri incelendiğinde, abrazif aşınmanın baskın aşınma mekanizması olduğu ancak adhezif aşınmanın da görüldüğü belirlenmiştir. İki aşınmanın da varlığı karışık aşınma tipinin varlığını kanıtlamaktadır.



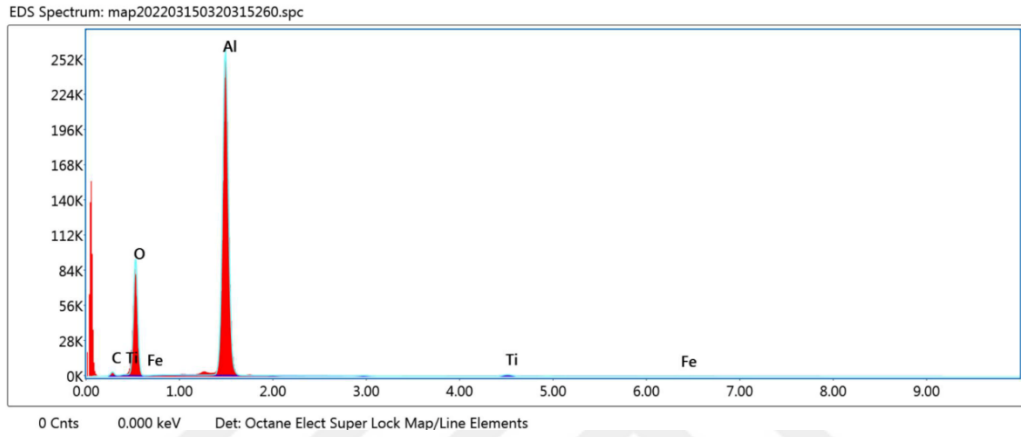
Şekil 6.40: Al6061/GNP/1 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/0.5 GNP/1 MWCNT b) Al6061/1 GNP /1 MWCNT
c) Al6061/1.5 GNP /1 MWCNT.

Şekil 6.41’de 500 °C’de, 30 dk boyunca sinterlenip 100 MPa basınç altında üretilmiş Al6061/GNP/1.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası elde edilen aşınma izleri gösterilmiştir. Şekil 6.41.a %0.5 GNP ve %1.5 MWCNT, Şekil 6.41.b %1 GNP ve %1.5 MWCNT, Şekil 6.41.c ise %1.5 GNP ve %1.5 MWCNT ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aşınma görüntüleridir. Aşınma izleri incelendiğinde artan GNP ve MWCNT oranıyla beraber yüksek hasarlı deformasyon bölgelerinin oluştuğu, oyuklanma yapılarının gözlemlendiği belirlenmiştir. Yüksek aşınma oranı sonuçlarıyla uyumlu olarak yüksek oranda parçacık kopması görüldüğü saptanmıştır.



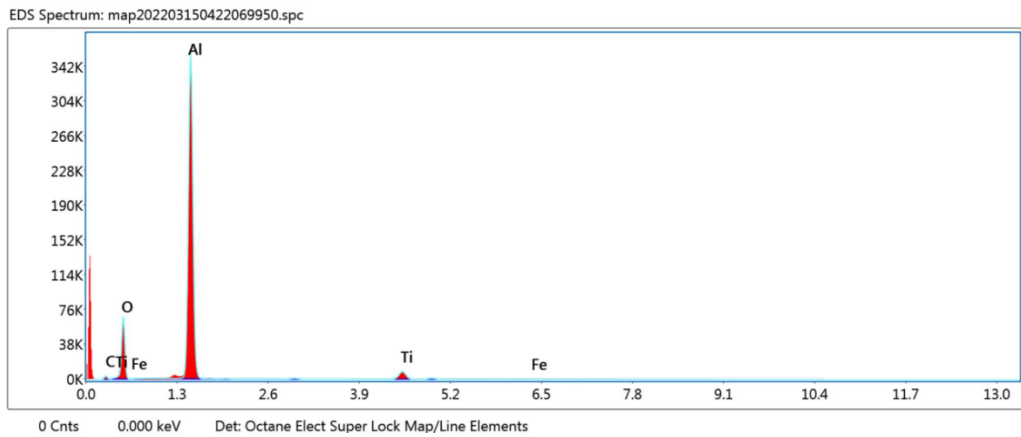
Şekil 6.41: Al6061/GNP/1.5 MWCNT kompozitlerin aşınma testi sonrası SEM görüntüleri
a) Al6061/0.5 GNP/1.5 MWCNT b) Al6061/1 GNP /1.5 MWCNT
c) Al6061/1.5 GNP /1.5 MWCNT.

Üretilen hibrit kompozitlerin aşınma mekanizmaları genel olarak değerlendirilecek olursa; kompozit yapıya eklenen takviye gruplarının oranlarının aşınma mekanizmaları üzerinde etkin rol oynadığı belirlenmiştir. Sıklıkla karşılaşılan aşınma tiplerinin abrazyon ve adhezyon olduğu görülmektedir. Ayrıca bu aşınma mekanizmalarına delaminasyon ve oksidasyon yapılarının varlığı da tanımlanmaktadır. Genellikle adhezyon ve abrazyon mekanizmasının düşük takviye oranlarında birlikte bulunduğu, bu durumda aşınma mekanizmasının karışık tip aşınma olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.42: Al6061/TiC/1.5 GNP kompozitin aşınma sonrası EDS spektrumu.

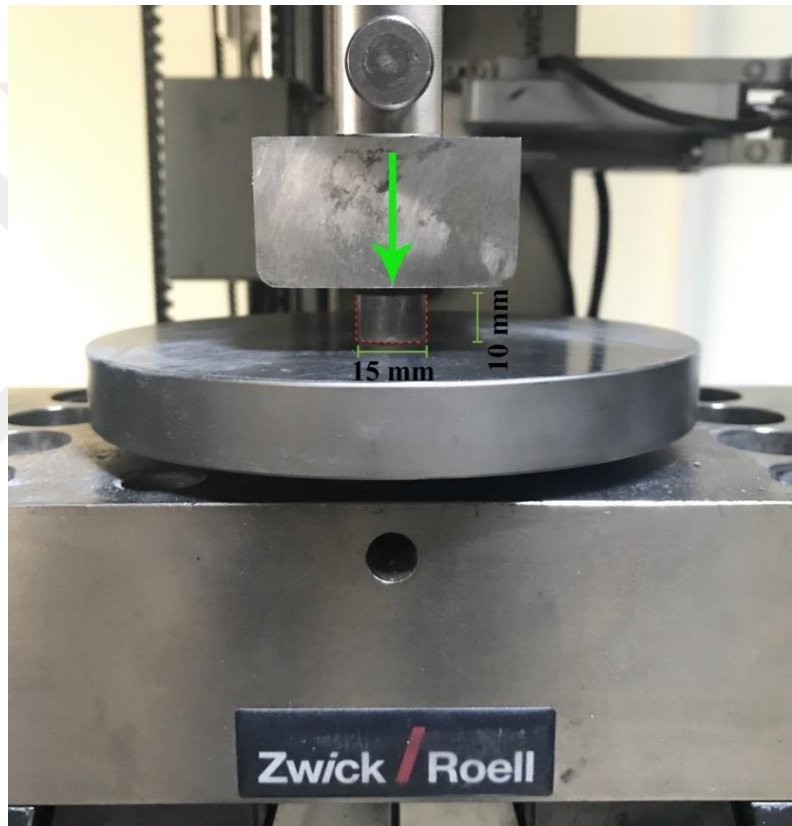
Şekil 6.42’de Al6061/TiC/1.5 GNP kompozitin Şekil 6.43’de ise Al6061/TiC/1.5 MWCNT kompozitin aşınma sonrası EDS spektrumu gösterilmiştir. Yapıda bulunan oksit fazı aşınma izinde oksidasyon olarak belirtilen aşınma mekanizmasının varlığını doğrulamıştır.



Şekil 6.43: Al6061/TiC/1.5 MWCNT kompozitin aşınma sonrası EDS spektrumu.

6.10 Basma Test Sonuçları ve Optimizasyonu

Üretilen hibrit kompozitlerin basma testleri Zwick/Roell marka 250 kN kapasiteli çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Basma testleri ASTM E9-09 standardında 0.5 mm/dk şartlarında uygulanmıştır. Aşınma test sonuçlarının analiz edilmesi için tasarlanan iki gizli katmanlı yapay sinir ağı modeli, basma test sonuçlarının değerlendirilmesi için de kullanılmıştır. Şekil 6.44'de test numunesinin basma test cihazına analiz öncesi konumlandırılması gösterilmektedir. Basma test plakalarından üst plaka hareketli, alt plaka sabit olarak test sisteminde yer almaktadır. Basma testine başlamadan önce numuneye bir miktar ön yük uygulandıktan sonra test başlatılmıştır.



Şekil 6.44: Basma test cihazı kompozit yerleşimi.

Basma test parametreleri tüm numuneler için sabit olarak uygulanmıştır. Testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerine göre hibrit kompozitlerin basma dayanımları farklılık göstermiştir. Test bitirilişi malzeme kırılmasını takiben otomatik olarak test cihazı tarafından sonlandırılarak basma dayanımı % uzama grafikleri çizilmiştir. Her bir grup için elde edilen basma test sonuçları kodlanarak tablolarda gösterilmiştir. Al6061/TiC/GNP kompozitlerin basma test sonuçları ve yapay sinir ağı ile optimize edildikten sonra modelden elde edilen tahmini basma dayanımı değerleri Tablo 6.8'de

verilmiştir. Maksimum basma dayanımı ATG23 kodlu numuneden 318.60 MPa olarak elde edildiği saptanmıştır (%8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 100 MPa üretim basıncı). İkinci en yüksek basma dayanımı değeri ise 312.56 MPa değeri ATG25 kodlu hibrit kompozitten elde edilmiştir (%8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı). Bu numuneyi takiben ise ATG26 kodlu kompozitten 295.79 MPa basma dayanımı değeri elde edilmiştir (%8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Al6061/TiC/GNP kompozitlerin veri setinde deneysel olarak elde edilen ortalama basma dayanım değeri ise 209.79 MPa'dır. Al6061/TiC/GNP hibrit kompozit grubundan elde edilen minimum değer 122.89 MPa değeridir, bu değer ATG16 kodlu kompozitten elde edilmiştir (%12 TiC, %1.5 TiC, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Bu değeri takiben diğer en düşük basma dayanımları ATG20 (%8 TiC, %1.5 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 100 MPa üretim basıncı) ve ATG4 (%12 TiC, %1.5 GNP, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı) kodlu numunelerden sırasıyla 127 MPa ve 133.22 MPa olarak saptanmıştır.

Al6061/TiC/GNP kompozit grubu için matris malzemeye eklenen %TiC ve %GNP oranlarının basma dayanımları üzerinde etkin rol oynadığı saptanmıştır. Ayrıca optimum ağırlıkça %8 TiC ve %1 GNP ilavesinin basma dayanımını yüksek oranda geliştirdiği belirlenmiştir. Ağırlıkça % TiC oranının 8'den 12'ye ve ağırlıkça % GNP oranının 1'den 1.5'a çıkmasıyla basma dayanımı ilerlemesindeki ivmenin azaldığı ve gittikçe takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin basma dayanımına yaklaştığı belirlenmiştir (83 MPa). Sinterleme sıcaklık artışı 450 °C'den 500 °C'ye çıkmasıyla basma dayanımı üzerinde olumlu etki gözlemlenmiştir, bu duruma ek olarak sinterleme sıcaklığı 600 °C'ye çıkması durumunda ise basma dayanımında önemli bir artış elde edilememiş hatta bazı durumlarda basma dayanımı ilerlemesi azalma eğilimine girmiştir. Bu durumun alüminyum malzemesinin optimum sinterleme sıcaklığının geçilmesi durumuna ve yüksek sıcaklıkta oluşmaya başlayan tane büyümesi durumuna yol açtığı düşünülmektedir.

Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin basma dayanımı ile kıyaslandığında, Al6061/TiC/GNP hibrit kompozitlerin veri setleri içerisinde maksimum 3.83 kat basma dayanımı artışı elde edildiği bildirilmiştir. İkili kompozit kombinasyonu olan ağırlıkça %1 GNP içeren Al6061/GNP kompozitin basma dayanımı (137 MPa) ile kıyaslandığında ise

maksimum 2.32 kat basma dayanımı artışı kazandırılmıştır. TiC ve GNP kompozitin birlikte Al6061 matris içerisine takviyelendirilmesiyle önemli oranda dayanım kazandığı ispatlanmıştır.

Tablo 6.8: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin basma dayanımı deneysel ve yapay sinir ağıları tahmini sonuçları.

Numune Kodu	Ağırlıkça TiC (%)	Ağırlıkça GNP (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)	Deneysel Basma Day. (MPa)	YSA Basma Day. Tahmini (MPa)
ATG1	4	0.5	450	15	150	209.93	203.31
ATG2	12	0.5	450	15	50	238.93	291.97
ATG3	4	1.5	450	15	50	151.07	175.32
ATG4	12	15	450	15	150	133.22	130.48
ATG5	4	0.5	550	15	50	232.07	218.76
ATG6	12	0.5	550	15	150	217.05	260.17
ATG7	4	1.5	550	15	150	188.77	188.71
ATG8	12	1.5	550	15	50	146.26	140.71
ATG9	4	0.5	450	45	50	214.74	195.09
ATG10	12	0.5	450	45	150	220.01	215.96
ATG11	4	1.5	450	45	150	142.48	120.97
ATG12	12	1.5	450	45	50	136.56	114.80
ATG13	4	0.5	550	45	150	208.71	256.06
ATG14	12	0.5	550	45	50	234.30	234.66
ATG15	4	1.5	550	45	50	160.69	136.81
ATG16	12	1.5	550	45	150	122.89	122.89
ATG17	4	1	500	30	100	157.59	147.95
ATG18	12	1	500	30	100	150.19	177.34
ATG19	8	0.5	500	30	100	201.23	195.50
ATG20	8	1.5	500	30	100	127.00	123.21
ATG21	8	1	450	30	100	235.88	209.25
ATG22	8	1	550	30	100	243.85	241.67
ATG23	8	1	500	15	100	318.60	312.59
ATG24	8	1	500	45	100	282.45	247.38
ATG25	8	1	500	30	50	312.56	271.34
ATG26	8	1	500	30	150	295.79	242.54
ATG27	8	1	500	30	100	239.62	229.49
ATG28	8	1.5	450	30	100	130.52	115.53
ATG29	8	0.5	550	30	100	203.98	204.06
ATG30	4	0.5	500	30	100	230.49	222.13
ATG31	12	1.5	500	30	100	128.49	125.90
ATG32	12	0.5	500	30	100	230.52	223.54

TiC ve MWCNT ile takviyelendirilmiş Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma testi sonuçları ve geliştirilen yapay sinir ağı modelinden elde edilen tahmini basma dayanımı değerleri Tablo 6.9’da verilmiştir. Hibrit kompozit numune grubu olan Al6061/TiC/GNP kompozitlerde maksimum basma dayanım değeri 350.54 MPa değeri ATM26 kodlu kompozitten elde edilmiştir (%8 TiC, %1 MWCNT, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). İkinci sıradaki yüksek basma dayanımı elde edilen numune ATM25 olup, 329.45 MPa basma dayanımı sağlanmıştır (%8 TiC, %1 MWCNT, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı). Bu kompozit numuneyi ise ATM 6 kodlu kompozit takip etmiş olup, 285.52 MPa basma dayanımı elde edilmiştir (%12 TiC, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Al6061/TiC/MWCNT kompozit malzeme grubu için ortalama basma dayanımı 176.76 MPa bulunmuştur. Bu malzeme grubu için minimum basma dayanımı ATM8 kodlu numuneden 81.41 MPa olarak hesaplanmıştır (%12 TiC, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı). Bu değeri ise 82.46 MPa basma dayanımıyla ATM4 kodlu numune takip etmiştir (%12 TiC, %1.5 MWCNT, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Üçüncü sıradaki minimum basma dayanımı ise 85.62 MPa olarak ATM16 kodlu numuneden saptanmıştır (%12 TiC, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı).

Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin basma dayanım veri setleri içerisinde elde edilen en yüksek basma dayanımı ile kıyaslandığında (350.54 MPa), TiC ve MWCNT hibritizasyonu ile takviyelendirilmemiş malzemeye göre 4.22 kat basma dayanım artışı elde edilmiştir. Al6061 malzemesinin yalnızca MWCNT ile takviyelendirildiği ağırlıkça %1 MWCNT içeren Al6061/MWCNT kompozitin basma dayanımına göre ise (141 MPa), 2.48 kat basma dayanımında artış saptanmıştır. Nano takviye MWCNT oranının %1.5’a çıkmasıyla hibrit kompozitlerin basma dayanımında düşüş eğilimi görüldüğü belirlenmiştir. Mikronize TiC ve nano boyutlu MWCNT takviyelerinin bir arada kullanıldığı hibrit kompozit yapı oluşumu ile birlikte basma dayanımına ciddi katkı sağlandığı görülmektedir. Sıcak presleme üretim esnasında uygulanan basınç değerinin de basma dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Diğer parametrelerinin sabit bırakılıp uygulama basıncının 50 MPa’dan 150 MPa’ya çıkarıldığı durumda basma dayanımında ilerleme saptanmıştır. Literatürde üretim basıncındaki bu artışın iç yapıdaki zayıf bağlantıların kuvvetlendirilmesine, parçacıkların bağlantı alanının arttırılmasına ve

bununla bağlantılı olarak yoğunlukta artış elde edilmesine dayandırılmıştır. Tozların sıkıştırılma kapasitesi literatürde Heckel, Panelli, Ambrozio Filho ve GE tarafından incelenmiş olup, üretim basıncının tozların plastik deformasyon kapasitesini ve sıkıştırılabilirlik davranışı üzerinde önemli rol oynadığı belirtilmiştir [142–144].

Tablo 6.9: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı deneysel ve yapay sinir ağları tahmini sonuçları.

Numune Kodu	Ağırlıkça TiC (%)	Ağırlıkça MWCNT (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)	Deneysel Basma Day. (MPa)	YSA Basma Day. Tahmini (MPa)
ATM1	4	0.5	450	15	150	128.88	129.91
ATM2	12	0.5	450	15	50	180.15	157.55
ATM3	4	1.5	450	15	50	86.28	88.03
ATM4	12	1.5	450	15	150	82.46	85.23
ATM5	4	0.5	550	15	50	139.62	136.52
ATM6	12	0.5	550	15	150	285.52	281.64
ATM7	4	1.5	550	15	150	120.54	140.81
ATM8	12	1.5	550	15	50	81.41	82.91
ATM9	4	0.5	450	45	50	109.98	105.09
ATM10	12	0.5	450	45	150	212.65	210.75
ATM11	4	1.5	450	45	150	97.13	47.60
ATM12	12	1.5	450	45	50	86.77	86.19
ATM13	4	0.5	550	45	150	134.29	134.01
ATM14	12	0.5	550	45	50	263.57	264.23
ATM15	4	1.5	550	45	50	110.56	110.56
ATM16	12	1.5	550	45	150	85.62	85.24
ATM17	4	1	500	30	100	95.77	95.59
ATM18	12	1	500	30	100	139.62	139.65
ATM19	8	0.5	500	30	100	220.70	190.51
ATM20	8	1.5	500	30	100	132.72	132.94
ATM21	8	1	450	30	100	201.15	201.01
ATM22	8	1	550	30	100	230.76	233.66
ATM23	8	1	500	15	100	200.11	160.95
ATM24	8	1	500	45	100	199.57	197.59
ATM25	8	1	500	30	50	329.45	195.73
ATM26	8	1	500	30	150	350.54	350.62
ATM27	8	1	500	30	100	226.84	226.25
ATM28	8	1.5	450	30	100	130.59	128.93
ATM29	8	0.5	550	30	100	222.58	271.12
ATM30	4	0.5	500	30	100	115.34	115.55
ATM31	12	1.5	500	30	100	90.88	121.92
ATM32	12	0.5	500	30	100	260.59	260.32

İki farklı nano takviye grubunun (GNP ve MWCNT) birlikte kullanıldığı Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma testi sonuçları ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen tahmini basma dayanımı değerleri Tablo 6.10'de sunulmuştur. Tablo 6.10 incelendiğinde, Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerden elde edilen maksimum basma dayanımı değeri 423.95 MPa olarak AGM5 kodlu hibrit kompozitte saptanmıştır (%0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı). İkinci en yüksek basma dayanım değeri ise AGM1 kodlu numuneden 364.54 MPa değeriyle elde edilmiştir (%0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Bu değeri ise 288.35 MPa basma dayanım değeri AGM13 kod numarasına sahip hibrit kompozit takip etmiştir (%0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı). Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin veri setinde deneysel olarak elde edilen değerlerin ortalaması alındığında karşılaşılan ortalama basma değeri 188.01 MPa değeridir. Minimum basma dayanımında ise çok ciddi bir düşüş görülmüştür. Minimum basma dayanımı GNP ve MWCNT ile takviyelendirilen kompozitlerde 42.65 MPa olarak AGM8 kodlu kompozitten elde edilirken (%1.5 GNP, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı), bu değeri 42.93 MPa ve 45.33 MPa değerleri ile AGM4 (%1.5 GNP, %1.5 MWCNT, 450 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı) ve AGM16 kodlu (%1.5 GNP, %1.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 45 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı) numuneler sırasıyla takip etmiştir.

Nano takviyelerle güçlendirilmemiş Al6061 malzemesinin basma dayanımı ile kıyaslandığında, Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin veri değerleri içerisinde maksimum 5.1 kat basma dayanımı ilerlemesi elde edildiği bildirilmiştir. İkili kompozit kombinasyonu olan ağırlıkça %1 GNP içeren Al6061/GNP kompozitin basma dayanımı (137 MPa) ve ağırlıkça %1 MWCNT içeren Al6061/MWCNT kompozitin basma dayanımı (141 MPa) ile kıyaslandığında ise sırasıyla maksimum 3.08 ve 3.06 kat basma dayanımı artışı kazandırılmıştır. GNP ve MWCNT nano takviye grubunun birlikte Al6061 matris içerisine takviyelendirilmesiyle önemli oranda dayanım kazandığı ispatlanmıştır. Ancak %1'den daha fazla eklenen GNP ve MWCNT takviyelerinin bir arada kullanıldığı hibrit kompozitlerin basma dayanımlarının çok düşük olduğu ayrıca belirlenmiştir. Ağırlıkça %1,5'den fazla eklenen nano takviye gruplarının topaklanma eğilimine girdiği, oluşan bu yapıların malzemeye uygulanan yük altında süreksiz bölgeler olarak hareket ettiği, yük

aktarımının matris takviye grubunda zayıfladığı önceki çalışmalarda ayrıca belirtilmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan iki aşamalı karıştırma prosesinin (ultrasonikasyon ve mekanik alaşımlama işlemi) nano takviyelerin matris faz içerisinde dağılımına katkı sağladığı ağırlıkça %0.5 ve %1 oranında eklenen kompozitlerde görülmektedir.

Tablo 6.10: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı deneysel ve yapay sinir ağı tahmini sonuçları.

Numune Kodu	Ağırlıkça TiC (%)	Ağırlıkça MWCNT (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)	Üretim Basıncı (MPa)	Deneysel Basma Day. (MPa)	YSA Basma Day. Tahmini (MPa)
AGM1	0.5	0.5	450	15	150	364.54	364.95
AGM2	1.5	0.5	450	15	50	92.44	103.99
AGM3	0.5	1.5	450	15	50	112.67	117.11
AGM4	1.5	1.5	450	15	150	42.93	40.44
AGM5	0.5	0.5	550	15	50	423.95	287.33
AGM6	1.5	0.5	550	15	150	96.08	73.30
AGM7	0.5	1.5	550	15	150	203.59	205.19
AGM8	1.5	1.5	550	15	50	42.65	37.34
AGM9	0.5	0.5	450	45	50	261.63	265.93
AGM10	1.5	0.5	450	45	150	92.44	99.01
AGM11	0.5	1.5	450	45	150	201.26	184.90
AGM12	1.5	1.5	450	45	50	69.59	70.70
AGM13	0.5	0.5	550	45	150	288.35	387.70
AGM14	1.5	0.5	550	45	50	88.52	93.86
AGM15	0.5	1.5	550	45	50	166.13	179.96
AGM16	1.5	1.5	550	45	150	45.33	45.38
AGM17	0.5	1	500	30	100	253.74	259.58
AGM18	1.5	1	500	30	100	76.56	78.89
AGM19	1	0.5	500	30	100	200.49	223.07
AGM20	1	1.5	500	30	100	90.15	129.56
AGM21	1	1	450	30	100	235.47	242.91
AGM22	1	1	550	30	100	256.87	236.97
AGM23	1	1	500	15	100	271.71	279.19
AGM24	1	1	500	45	100	257.55	262.83
AGM25	1	1	500	30	50	223.24	240.89
AGM26	1	1	500	30	150	261.15	263.62
AGM27	1	1	500	30	100	235.47	251.10
AGM28	1	1.5	450	30	100	95.92	127.04
AGM29	1	0.5	550	30	100	205.56	230.50
AGM30	0.5	0.5	500	30	100	285.59	292.82
AGM31	1.5	1.5	500	30	100	70.49	74.69
AGM32	1.5	0.5	500	30	100	95.49	102.38

Çalışma kapsamında belirlenen matris takviye gruplarının sonuçları detaylıca verilmiştir. Basma dayanımında görülen önemli artış aşağıda belirtilen esaslara dayandırılmıştır.

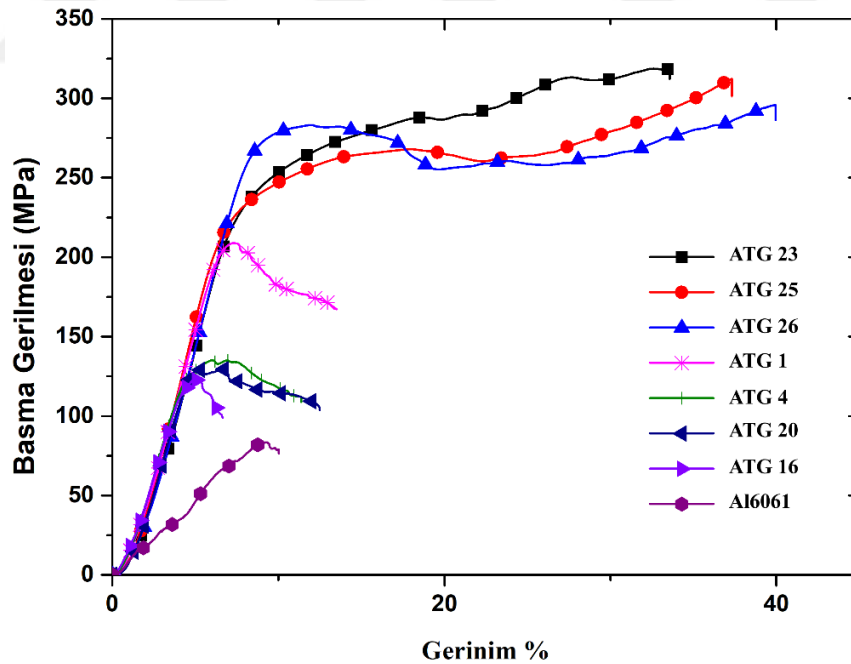
Genelde metal matrisli kompozitlerin iki adet mukavemetlendirme mekanizması olduğu düşünülmektedir. Bunlar; takviyenin varlığıyla beraber oluşan indirekt mukavemetlendirme ve matris malzemeden takviye malzemeye yük taşınımı esasına dayanan direkt mukavemetlendirme mekanizmalarıdır. GNP ve MWCNT nano takviyelerin Al6061 matrise olan güçlendirme etkisi, bireysel olarak takviyelerin sahip olduğu yüksek mukavemet değerinin doğrudan bir sonucudur. Matris içerisinde takviye dağılımının uygunluğu ve takviye matris bağ kuvvetinin seviyesi mukavemet üzerinde etkin rol oynamaktadır. Hibrit kompozitlerde görülen yüksek basma dayanımı değerleri; i) Tane inceltme mekanizması, ii) termal uyumsuzluk etkisi, iii) Orowan döngüsü iv) yük taşıma kapasitesi etmenlerine bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir [21].

Hibrit kompozitlerde görülen tane küçültme mekanizması Hall-Petch ilişkisi ile açıklanmaktadır. Bu ilişkide tane boyutunun küçülmesinin mukavemeti arttırdığı ileri sürülmektedir. Küçük taneler yapı içerisinde çok fazla tane sınırının oluşmasını sağlayacaktır. Bu bölgelerde dislokasyon hareketi yapıya eklenen GNP ve MWCNT takviyeleriyle sınırlanarak mukavemetin arttığı ileri sürülmüştür [14, 104].

Termal uyumsuzluk etkisi metal matrisli hibrit kompozitlerde görülen bir diğer önemli mukavemet artış mekanizmasıdır. Alüminyum ve hibrit yapıya eklenen GNP ve MWCNT takviyeleri arasında önemli bir termal genleşme katsayısı farkı mevcuttur. Dislokasyon yoğunluğu takviye partiküllerinin yüzey alanına bağlı olduğunda çalışmada kullanılan nano takviyeler dislokasyon yoğunluğunun artışına sebebiyet verecektir. Burada bahsedilen yeni oluşturulan dislokasyonlar orjinal dislokasyon hareket yönüne ters yönde bir ster alanı uygulamaktadır. Bu durum da malzemenin mukavemetini otomatik olarak arttırdığı bildirilmiştir. Termal genleşme farklılığı esasına dayanan mukavemet artış mekanizması, oda sıcaklığında şekillendirilen kompozitlerde etkin değildir. Çalışmamızda üretim prosesi olarak sıcak presleme işleminin kullanılması sebebiyle, yüksek sıcaklık çevrimlerinde üretim yapılmıştır. Bu sebeple çalışmada üretilen hibrit kompozitlerde termal genleşme katsayısı esasına dayanan mukavemetlendirme mekanizmasının etkin olarak mevcut olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte matris ve takviyeler arasında elastik modül uyumsuzluğunun da mukavemetlendirmede etkili olduğu bilinmektedir [21].

Matris içerisinde uygun şekilde dağılım göstermiş ve matris fazdan daha sert yapıda bulunan takviye grupları yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğunu arttırmada etkin rol oynamaktadırlar. Ayrıca özellikle çalışmada kullanılan yüksek yüzey alanına sahip belirli oranlarda sisteme eklenen GNP ve MWCNT takviyelerinin varlığı dislokasyon yoğunluğunu arttırdığı düşünülmektedir. Bahsedilen bu takviye gruplarının matris içerisine ilgili prosesler kullanılarak eklenmesi, gerilme durumu altında dislokasyon hareketini engellediği bilinmektedir. Malzemenin mukavemet değerleri üzerinde ciddi değişimlere sebebiyet veren bu mekanizma Orowan mekanizması olarak belirtilmektedir [104, 145, 146]. Belirli bir eşiğin üzerindeki grafen içeriğinin topaklanma oluşumuna ve mekanik özelliklerin bozulmasına neden olacağı, bu nedenle grafen katkı maddelerinin miktarının optimize edilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Şekil 6.45’de Al6061/TiC/GNP kompozitlerin veri setlerinden elde edilmiş en yüksek ve en düşük basma dayanımı gösteren ilk üç kompozit, veri setlerinde görülen ortalama basma dayanımı ve takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin basma dayanım değerleri üzerine elde edilen grafik gösterilmiştir.

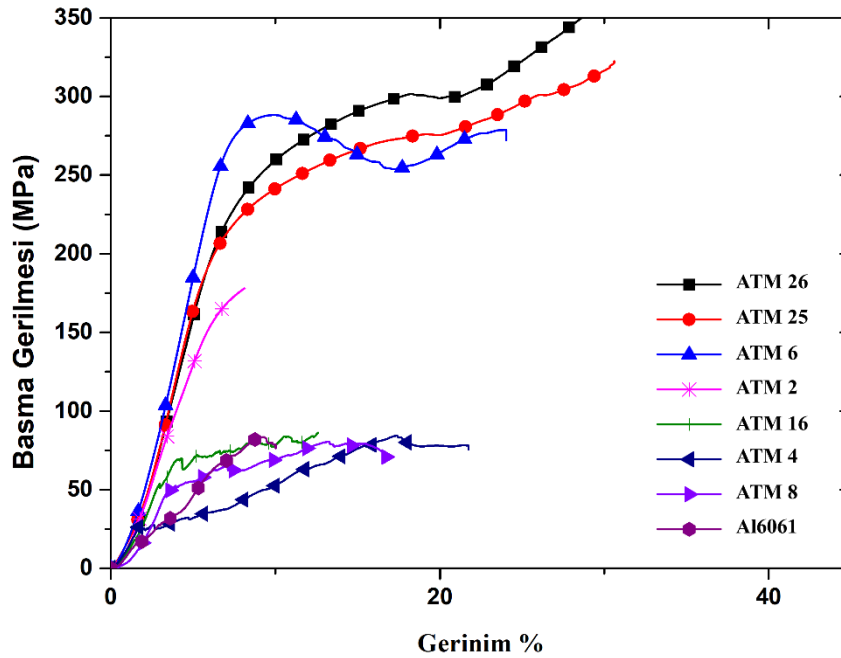


Şekil 6.45: Al6061/TiC/GNP Kompozitlerin basma testi sonuçları.

Takviye gruplarıyla güçlendirilen kompozitlerde, uygulanan yük takviye/matris ara yüzeyi boyunca gelişen kayma gerilmesi yoluyla matristen takviyeye transfer edilir. Bu

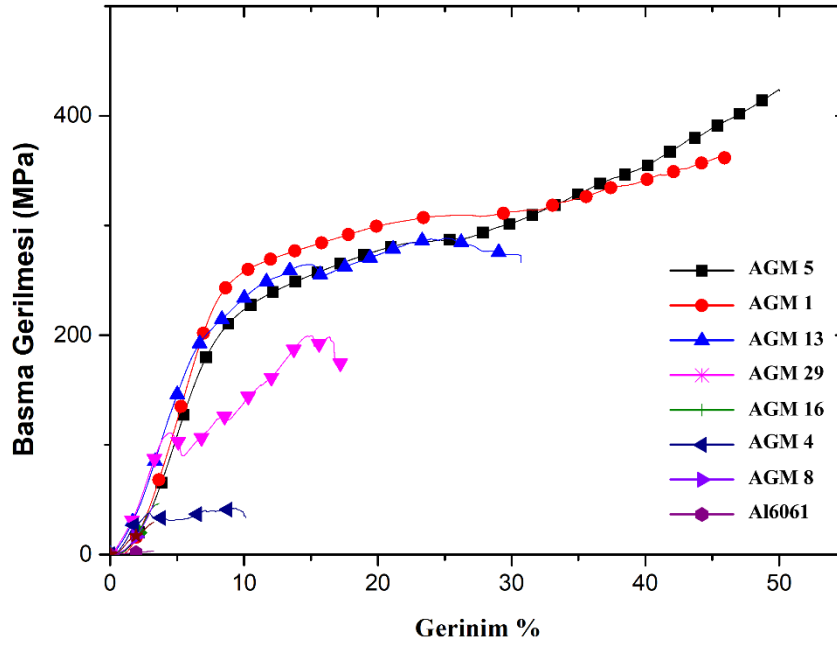
mekanizma kompozitlerin mukavemet artışında yük transfer mekanizması olarak bilinmektedir [137, 147].

Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin veri setlerinden elde edilmiş en yüksek ve en düşük basma dayanımı gösteren ilk üç kompozit, veri setlerinde görülen ortalama basma dayanımı ve takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin basma dayanım değerlerinin gösterildiği grafik Şekil 6.46'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde saf haldeki Al6061 malzemesine göre üretilen hibrit kompozitlerle basma dayanımının ciddi oranda arttırıldığı görülmektedir. Ancak nano takviye ilavesinin %1.5'a yaklaşmasıyla muhtemel topaklanma yapısı sebebiyle basma dayanımının düştüğü görülmektedir.



Şekil 6.46: Al6061/TiC/MWCNT Kompozitlerin basma testi sonuçları.

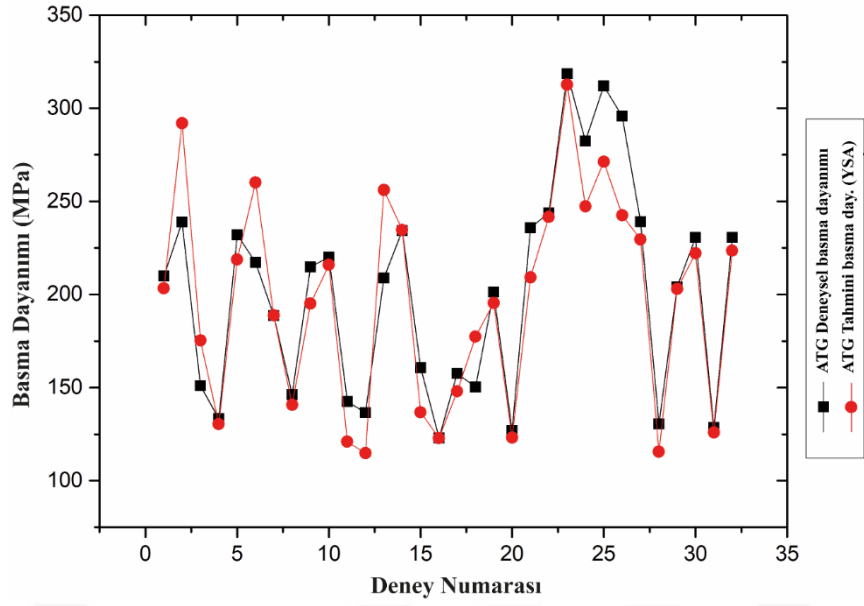
Şekil 6.47'de iki nano takviye ile güçlendirilen Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin veri setlerinden elde edilmiş en yüksek ve en düşük basma dayanımı gösteren ilk üç kompozit, veri setlerinde görülen ortalama basma dayanımı ve takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin basma dayanım değerleri üzerine elde edilen grafik gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde çalışmada kullanılan tüm kompozit grupları içerisinde elde edilen en büyük basma dayanım değerinin 423.945 MPa Al6061/GNP/MWCNT grubundan elde edildiği görülmektedir. Ayrıca bu duruma ek olarak, çalışmada elde edilen minimum basma dayanımının da bu içeriğe sahip hibrit kompozitlerden elde edildiği 42.65 MPa değeriyle belirlenmiştir.



Şekil 6.47: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma testi sonuçları

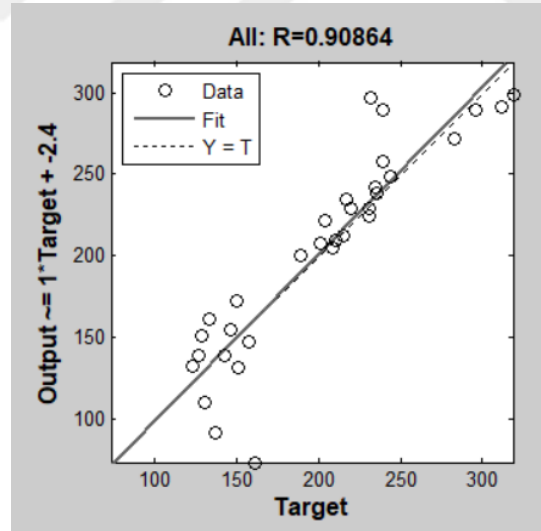
Seramik takviye partiküllerinin metal matrislere dahil edilmesi, süneklikten kayıp olsa da metallerin sertliğini ve mukavemetini artırır. Süneklik ve mukavemet arasındaki karşılaşılan bu ikilem, seramik partiküllerle güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlerde görülmektedir. Nano takviye GNP ve MWCNT etkisi ile Al6061/TiC/GNP, Al6061/TiC/MWCNT ve Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerde geleneksel metal matrisli kompozitlere göre, aynı anda yüksek mukavemet ve üstün süneklik sağlanabildiği kanıtlanmıştır. Özellikle GNP takviyesi sünekliği ciddi oranda geliştirmiştir. Bu durum; plastik deformasyon sırasında çok katlı ve karmaşık yapıya sahip grafen levhaların düzleştiği ve bu durumun da sünekliğin iyileştirilmesine veya korunmasına yol açtığı düşünülmektedir.

Şekil 6.48’de Al6061/TiC/GNP kompozitlerin basma testi sonucunda elde edilen ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden alınan tahmini basma dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde deneysel ve tahmini basma dayanımı değerlerinin yüksek oranda uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir.



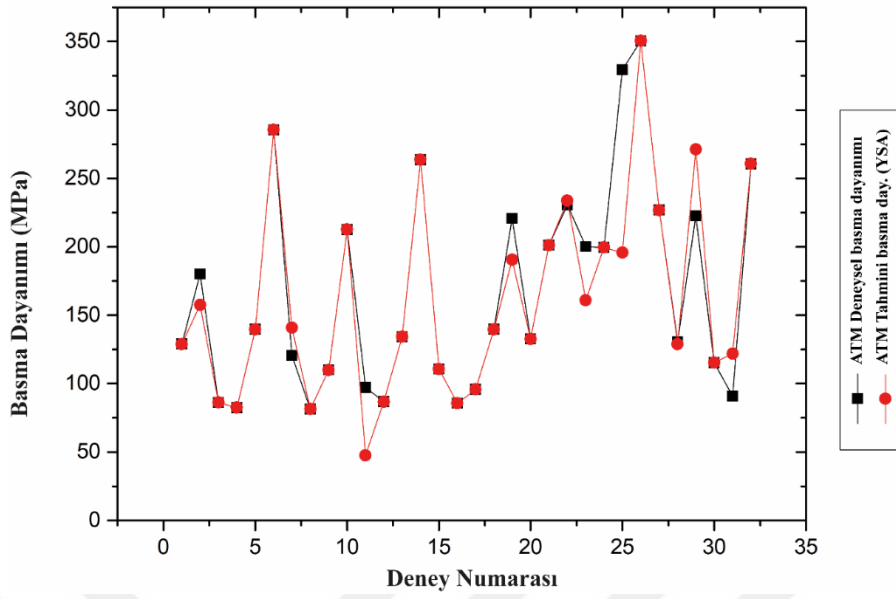
Şekil 6.48: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen basma dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.

Yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı grafiği Şekil 6.49’de verilmiştir. Tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9086 elde edilirken, MSE değeri 0.07347 olarak elde edilmiştir.



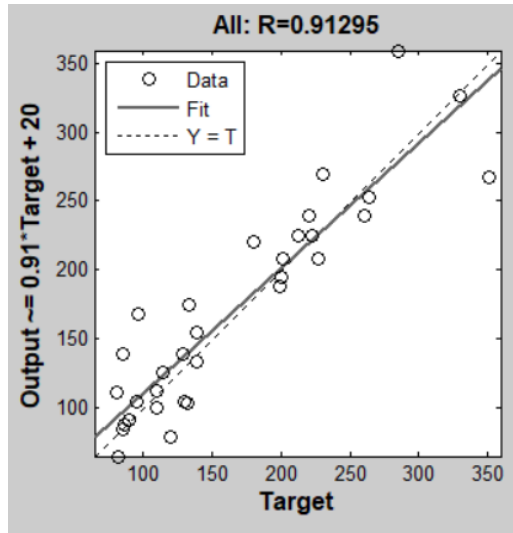
Şekil 6.49: Al6061/TiC/GNP kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.

Şekil 6.50’de Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma testi sonucunda elde edilen ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden alınan tahmini basma dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde deneysel ve tahmini basma dayanımı değerlerinin yüksek oranda uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 6.50: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen basma dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.

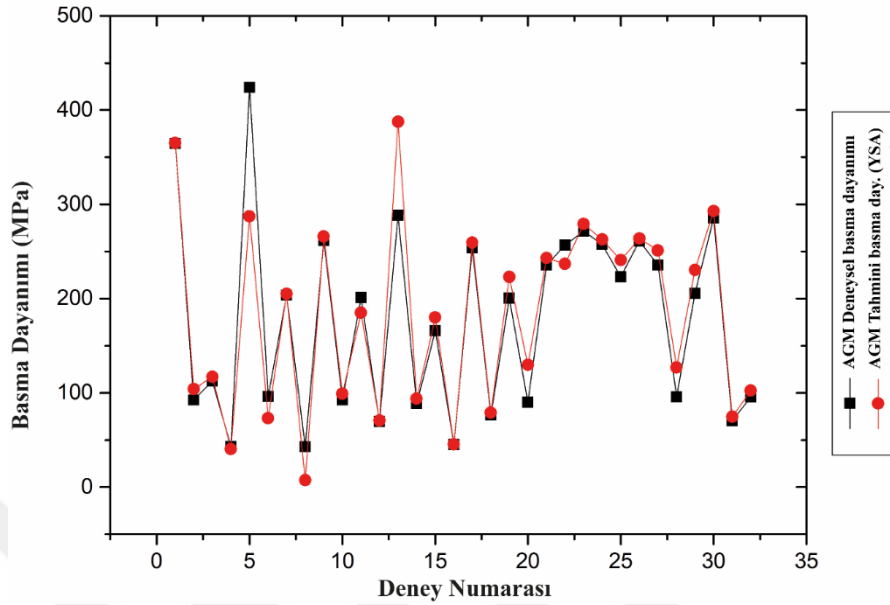
Yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı grafiği Şekil 6.51’de gösterilmiştir. Tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9129 elde edilirken, MSE değeri 0.06606 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.51: Al6061/TiC/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.

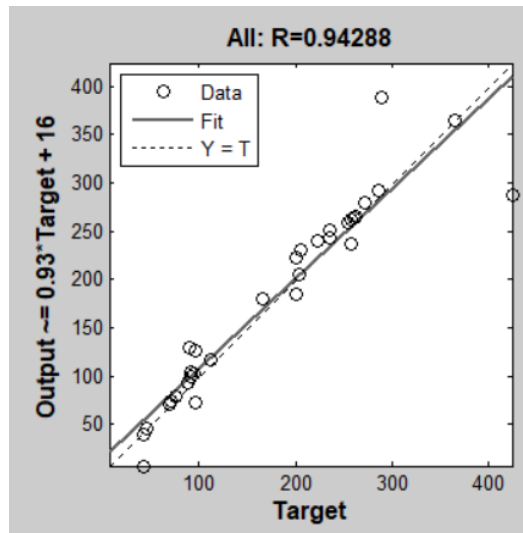
Şekil 6.52’de Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma testi sonucunda elde edilen ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden alınan tahmini basma dayanımı sonuçları

gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde deneysel ve tahmini basma dayanımı değerlerinin yüksek oranda uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir.

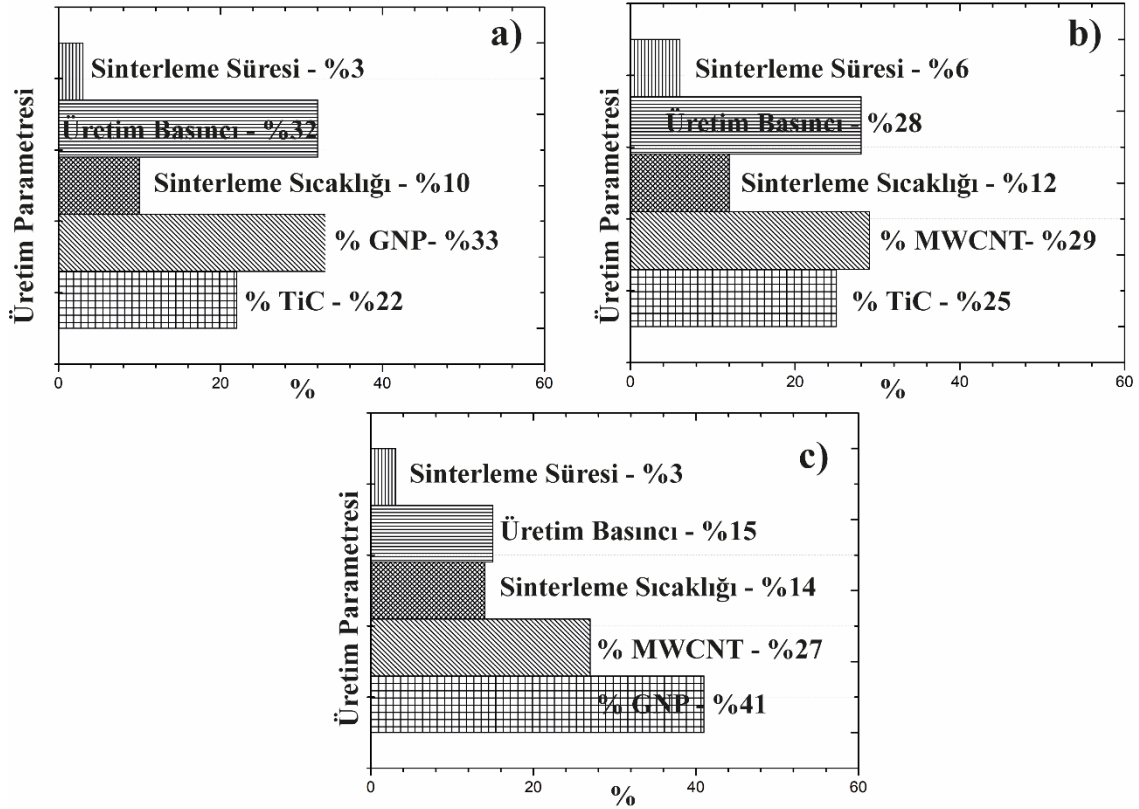


Şekil 6.52: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin deneysel ve yapay sinir ağı modelinden elde edilen basma dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.

Geliştirilen yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı grafiği Şekil 6.53’de verilmiştir. Tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9428 elde edilirken, MSE değeri 0.06015 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.53: Al6061/GNP/MWCNT kompozitlerin basma dayanımı için yapay sinir ağı modelinden elde edilen regresyon katsayısı.



Şekil 6.54: Çalışmada kullanılan hibrit kompozit gruplarının istatistiksel modelden elde edilen basma dayanımı etki oranları a) Al6061/TiC/GNP b) Al6061/TiC/MWCNT c) Al6061/GNP/MWCNT.

Üretilen hibrit kompozitlerin basma dayanımlarının istatistiksel modelden elde edilen parametre etkileri Şekil 6.54’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde basma dayanımı üzerinde takviye oranlarının en etkin parametreler olduğu, bu parametrelere ek olarak üretim basıncının da yüksek oranda etkili olduğu saptanmıştır. Hibrit kompozitler üzerinde en düşük etkili parametrenin sinterleme süresi olduğu belirlenmiştir. Nano boyutlu takviyelerin kompozit yapıya eklenmesinin basma dayanımı üzerindeki etkisinin mikron boyutlu takviye eklenmesine göre daha etkili olduğu saptanmıştır.

6.11 Elektriksel İletkenlik Sonuçları

Üretim prosesleri sonrasında elde edilen kompozitlerin elektriksel iletkenlik ölçümleri Ketihley-2400 marka cihaz vasıtasıyla akım-voltaj değişimine göre ölçülmüştür. Boyu 10 mm, çapı 15 mm olan silindirik numuneler bu ölçümler için tasarlayıp imal ettiğimiz 3D yazıcıdan üretilen polimer kalıp içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 6.55)



Şekil 6.55: Elektriksel iletkenlik ölçüm sistemi.

Elektriksel iletkenlikte kullanılacak ölçüm metodu olarak iki nokta ölçüm metodu olarak belirlenmiştir. Numunelere -1 ve +1 Volt arasında doğru akım (DC) voltajı uygulanmış ve LabTracer yazılımı kullanılarak akım voltaj grafikleri elde edilmiştir. Ohm yasasına uygun olarak, düşük voltaj değerlerinde akım değerlerinin voltaja bağlı olarak değişimi doğrusal formda izlenmiştir. Denklem 6.4’de R kompozit malzemenin direncini temsil etmektedir. Elde edilen akım-voltaj grafiğinin eğimi hesaplandıktan sonra malzemelerin dirençleri belirlenmiştir.

$$R = \frac{V}{I} \quad (6.4)$$

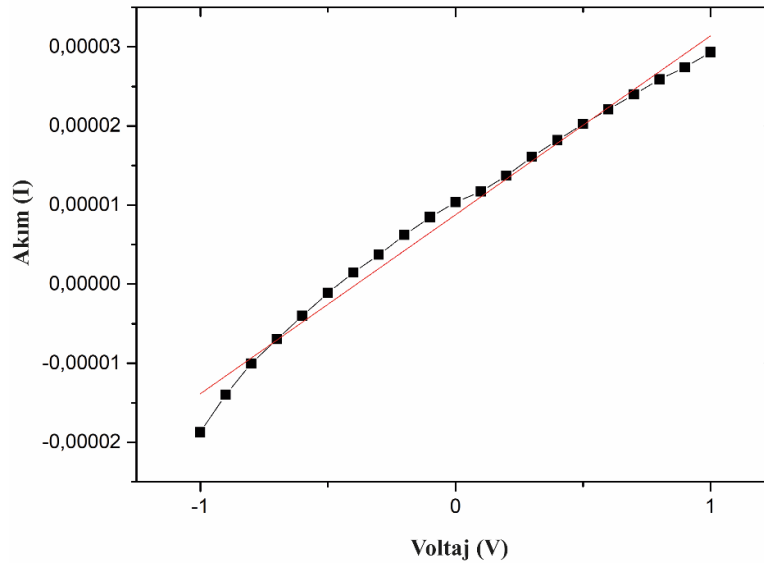
Malzeme boyutları ve direnci bilinen bir numunenin öz direnci (ρ) Denklem 6.5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (6.5)$$

Öz direncin tersi hesaplanarak (Denklem 6.6) kompozitlerin elektriksel iletkenlik değeri (σ) elde edilmiştir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (6.6)$$

Elde edilen elektriksel iletkenlik değerleri IACS (Uluslararası Tavlı Bakır) standardına göre değerlendirilmiştir.

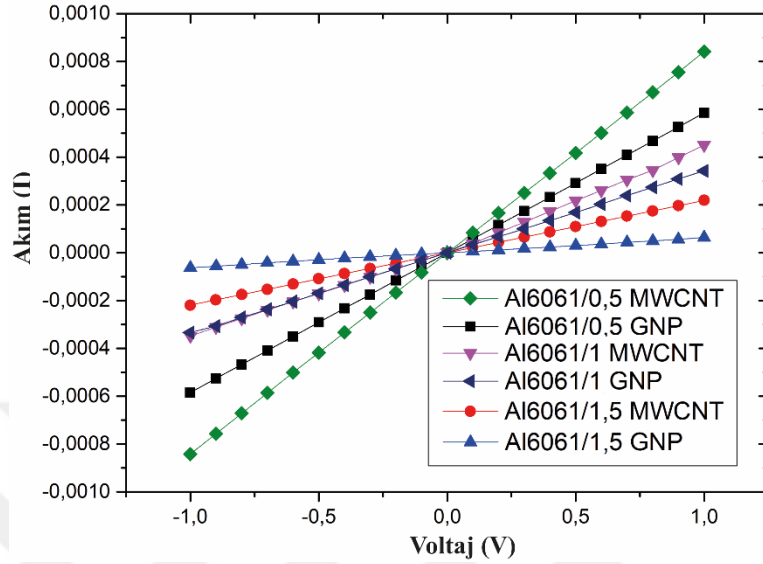


Şekil 6.56: Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin akım-voltaj değişimi.

Şekil 6.56’da toz metalürjisi yöntemiyle üretilen takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin akım-voltaj değişim grafiği verilmiştir. Çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerleri takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin elektriksel iletkenlik değeri referans alınarak kıyaslanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. TiC içerikli hibrit kompozitlerde elektriksel iletkenlik değerleri takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesine göre daha düşük çıkmıştır, bu durum eklenen TiC takviye malzemesinin daha düşük elektriksel iletkenliğe sahip olmasına dayandırılmıştır. Al6061/GNP ve Al6061/MWCNT kompozitlerde ise eklenen karbon esaslı takviye grubunun elektriksel iletkenliğini belirli oranlar için arttırdığı saptanmıştır.

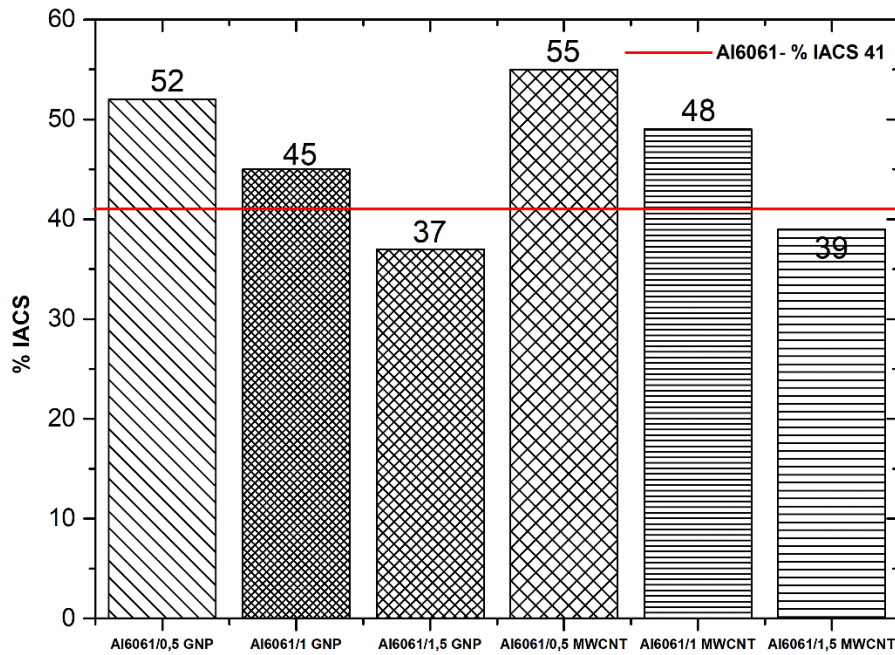
Sonuçlar göstermiştir ki, çalışmada üretilen numuneler arasında en yüksek elektriksel iletkenlik değeri Al6061/0.5 GNP kompozitten %55 IACS değeri ile elde edilmiştir. Bu değeri ise %52 IACS değeri ile Al6061/0.5 MWCNT kompoziti takip etmiştir. Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinden ise %41.2 IACS iletkenlik değeri elde edilmiştir. Elektriksel iletkenlik değerindeki artışın karbon esaslı takviye grubu olan MWCNT ve GNP’lerin elektron taşınımına katkı sağlaması sonucu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca literatürde uygun oranlarda eklenen nano takviyelerin tane sınırlarında konumlanarak elektriksel sızma eşiğini engellediği belirtilmiştir [148]. Yüksek yoğunluklu yapıların iç yapıda bulunan porozitelerin minimize olması sebebiyle elektriksel iletkenliğe katkı sağladıkları düşünülmektedir.

Şekil 6.57’de çalışma kapsamında üretilen Al6061/GNP ve Al6061/MWCNT kompozitlerin akım-voltaj değişim eğrileri gösterilmiştir. Elektriksel iletkenlik değeri arttıkça eğrinin dikleştiği belirlenmiştir.



Şekil 6.57: Al6061/GNP ve Al6061/MWCNT kompozitlerin akım-voltaj değişim eğrileri.

Şekil 6.58’de çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al6061, Al6061/GNP ve Al6061/MWCNT malzemelerinin % IACS olarak elektriksel iletkenlik değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.58: Al6061, Al6061/GNP ve Al6061/MWCNT malzemelerinin elektriksel iletkenlik karşılaştırılması.

Tek nano takviyeden oluşan kompozitler arasından en düşük elektriksel iletkenlik değeri Al6061/1.5 GNP kompozitten %37 IACS değeri ile elde edilmiştir. Bu durumun nedenin nano takviyelerin topaklanma eğiliminde olması sebebiyle matris faz içerisinde kümelenme göstermeleri sonucu olduğu değerlendirilmiştir.

Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin elektriksel iletkenlik değeri ile kıyaslandığında, çalışmada üretilen Al6061/0.5 MWCNT kompozit malzemesinde %33.49 elektriksel iletkenlik artışı kazanılmıştır. Elde edilen değerlerin literatürde karşılaşılan sonuçlarla uyumlu olduğu saptanmıştır.



7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada toz metalürjisi yöntemi kullanılarak farklı üretim parametreleri altında Al6061/GNP, Al6061/MWCNT, Al6061/TiC, Al6061/TiC/GNP, Al6061/TiC/MWCNT ve Al6061/GNP/MWCNT kompozitler başarıyla üretilmiştir.

Çalışmada kullanılan Al6061, TiC, GNP ve MWCNT tozların tane boyut ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde; matris olarak kullanılan Al6061 tozunun ortalama tane boyutu 9.79 μm , TiC tozunun ortalama tane boyutu ise 18.1 μm olarak saptanmıştır. Karbon esaslı takviyeler GNP ve MWCNT tozlarının ortalama tane boyutları sırasıyla 50.75 nm ve 196.3 nm olarak belirlenmiştir.

Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüsü incelemeleri gerçekleştirilmiştir. İncelemeler sonrasında tüm tozların uniform dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Al6061 tozunun küresel formda olduğu, TiC tozunun ise keskin köşelere sahip olduğu belirlenmiştir. Nano boyutlu GNP tozunun tabaka şeklinde olduğu, MWCNT tozlarının ise literatürle uyumlu olarak tüp şeklinde yer aldığı saptanmıştır.

Kompozitlerin üretim öncesi toz karışım prosesi esnasında karbon esaslı GNP ve MWCNT takviyelerinin çeşitli dış etmenlerden zarar görüp görmediği Raman analizi ile belirlenmiştir. Analiz neticesinde karbon esaslı malzemelerde ciddi bir hasarın olmadığı saptanmıştır. Karıştırma prosesi uygulanmış Al/GNP ve Al/MWCNT tek takviyeli kompozit tozlarından elde edilen ID/IG oranları sırasıyla 1.1465 ve 1.1843 olarak bulunmuşken, çift takviyeye sahip Al/GNP/MWCNT, Al6061/TiC/GNP ve Al6061/TiC/MWCNT kompozit tozlarından elde edilen ID/IG oranları sırasıyla 1.1960, 1.0339 ve 1.0859 olarak saptanmıştır.

Kompozitlerin üretim sonrası iç yapı görüntülemesi ve değerlendirmesi çalışmalarında, SEM incelemesi sonrasında takviyelerin genellikle matris içerisinde uygun şekilde dağılım gösterdiği saptanmıştır. Özellikle nano takviye eklentisi sonrası artan nano takviye ile birlikte bölgesel topaklanma morfolojilerinin de olduğu rapor edilmiştir. Genel olarak hibrit kompozitlerde matris-takviye dağılımının iyi bir şekilde sağlandığı belirlenmiştir. İki aşamalı karıştırma prosesinin bu olumlu durumun sebebi olduğu belirtilmiştir.

Çalışmada üretilen kompozitlerin yoğunlukları Arşimet metodu kullanılarak belirlenmiştir. Hibrit kompozitlerden elde edilen maksimum bağıl yoğunluk değerlerinin Al6061/TiC/GNP kompoziti için %98.4, Al6061/TiC/MWCNT kompoziti için %97.1 ve Al6061/GNP/MWCNT kompoziti için ise %93.7 olarak elde edildiği saptanmıştır. İki nano takviyenin bir arada bulunduğu kombinasyonda porozite değerlerinin karşılaşılan topaklanmayla birlikte arttığı belirlenmiştir.

Üretilen kompozitlerin sertlik değerleri Vickers sertlik skalası kullanılarak belirlenmiştir. Al6061/TiC/GNP kompoziti için %12 TiC %1 GNP ilavesiyle maksimum sertlik değeri 98 HV olarak belirlenmişken, Al6061/TiC/MWCNT kompoziti için ise 94 HV değeri %12 TiC %1 MWCNT ilavesiyle elde edilmiştir. GNP ve MWCNT nano takviyelerinin birlikte kombine edildiği Al6061/GNP/MWCNT kompozitinde maksimum sertlik değeri %0.5 GNP ve %0.5 MWCNT içerikli kompozitten 76.8 HV olarak belirlenmiştir.

Al6061/4 TiC, Al6061/8 TiC ve Al6061/12 TiC kompozitlerin Micro-CT görüntülemesi gerçekleştirilerek tüm kompozit boyunca takviye dağılımları incelenmiş, matris malzeme Al6061 içerisinde TiC dağılımının uygun şekilde olduğu belirlenmiştir. Analizler neticesinde hem Micro-CT analizleri hem de SEM analiz sonuçlarının birbirini doğruladığı açıktır.

Belirlenen koşullar altında üretilen kompozitlerin aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Al6061/TiC/GNP hibrit kompozitleri içerisinde minimum aşınma kaybı %8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 100 MPa üretim basıncı parametrelerinde üretilen kompozitte elde edilirken, takviyesiz Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında 33.33 kat aşınma direnci artışı elde edildiği belirlenmiştir. Bu değer üretilen kompozitler arasında en iyi aşınma direnci gösteren sonuçtur. Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitleri içerisinde minimum aşınma kaybı %8 TiC, %1 MWCNT, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı şartlarında üretilen kompozitte elde edilirken, takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında 27.53 kat aşınma direnci artışı elde edildiği belirlenmiştir. İki nano takviyenin birlikte kullanıldığı Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozitlerin aşınma test sonuçlarında ise minimum aşınma kaybı %0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı koşulları altında üretilen nano

kompozitte elde edilmiştir, takviyesiz Al6061 malzemesiyle kıyaslandığında 17.9 kat aşınma direnci artışı elde edildiği saptanmıştır.

Aşınma üzerinde önemli bir gösterge olan sürtünme katsayı değerleri de aşınma testi sonrasında tüm kompozitler için hesaplanmıştır. Al6061/TiC/GNP hibrit kompozit grubu için minimum sürtünme katsayısı değeri 0.2 μ olarak elde edilirken, takviyelendirilmemiş Al6061 (0.7 μ)’den elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri ile kıyaslandığında 3.1 kat azalış sağlanmıştır. Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozit grubu için minimum sürtünme katsayısı değeri 0.2 μ olarak saptanırken, takviyelendirilmemiş Al6061 (0.70 μ)’den elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri ile kıyaslandığında 3.29 kat azalış elde edilmiştir. Al6061/GNP/MWCNT hibrit kompozit grubu için ise minimum sürtünme katsayısı değeri 0.29 μ olarak belirlenirken, takviyelendirilmemiş Al6061 (0.70 μ)’den elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri ile kıyaslandığında 2.41 kat azalış elde edilmiştir.

Çalışmada üretilen kompozitlerin üretim prosesi parametreleri aşınma kaybı için yapay sinir ağı kullanılarak optimize edilmiştir. Tasarlanan ve optimize edilen sonuçlar neticesinde tüm hibrit kompozit grupları için yüksek oranda aşınma kayıpları tahmin edilebilmiştir. Al6061/TiC/GNP kompozit grubu için, tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9390 elde edilirken, MSE değeri 0.00571 olarak elde edilmiştir. Al6061/TiC/MWCNT için ise, tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9843 elde edilirken, MSE değeri 0.01493 olarak saptanmıştır. İki nano takviyeden oluşan Al6061/GNP/MWCNT kombinasyonu için ise R değeri 0.9066 elde edilirken, MSE değeri 0.03261 olarak elde edilmiştir.

Aşınma testi sonrasında numunelerin aşınan yüzeylerin SEM cihazı vasıtasıyla incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler neticesinde aşınma izi SEM görüntüleri sunulan kompozitlerin aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. İncelemeler neticesinde kompozit yapıya eklenen takviye gruplarının oranlarının aşınma mekanizmaları üzerinde etkin rol oynadığı düşünülmektedir. Genellikle karşılaşılan aşınma tiplerinin abrazyon ve adhezyon olduğu görülmektedir. Ayrıca bu aşınma mekanizmalarına delaminasyon ve oksidasyon yapılarının varlığı da tanımlanmaktadır. Genellikle adhezyon ve abrazyon

mekanizmasının düşük takviye oranlarında birlikte bulunduğu, bu durumda aşınma mekanizmasının karışık tip aşınma olarak tanımlanmıştır.

Basma testleri sonrasında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Al6061/TiC/MWCNT kombinasyonunda maksimum basma dayanımı 318.60 MPa olarak %8 TiC, %1 GNP, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 100 MPa üretim basıncı altında üretilen kompozitten elde edilmiştir. Al6061/TiC/GNP kompozitlerde maksimum basma dayanım değeri ise 350.54 MPa olarak %8 TiC, %1 MWCNT, 500 °C sinterleme sıcaklığı, 30 dk sinterleme süresi, 150 MPa üretim basıncı altında üretilen kompozitte elde edilmiştir. Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin basma dayanımı ile kıyaslandığında, Al6061/TiC/GNP hibrit kompozitlerin veri setleri içerisinde maksimum 3.83 kat basma dayanımı artışı elde edildiği bildirilmiştir. Al6061/TiC/MWCNT hibrit kompozitlerin basma dayanım veri setleri içerisinde elde edilen en yüksek basma dayanımı ile kıyaslandığında TiC ve MWCNT hibritizasyonu ile takviyelendirilmemiş malzemeye göre 4.22 kat basma dayanım artışı elde edilmiştir. İki farklı nano takviye grubunun (GNP ve MWCNT) birlikte kullanıldığı Al6061/GNP/MWCNT kombinasyonunda maksimum basma dayanımı 423.95 MPa olarak %0.5 GNP, %0.5 MWCNT, 550 °C sinterleme sıcaklığı, 15 dk sinterleme süresi, 50 MPa üretim basıncı şartlarında üretilen kompozitten elde edilmiştir. Ayrıca bu değer üretilen kompozit grupları arasında en yüksek basma dayanımı gösteren sonuçtur. Takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesine göre de maksimum 5.1 kat basma dayanımı ilerlemesi sağlanmıştır.

Üretim parametrelerine bağlı olarak üretilen kompozitlerin basma dayanımı sonuçları yapay sinir ağı yöntemiyle optimize edilmiştir. Basma dayanımı sonuçları ve tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen tahmini değerlerin sonuçları karşılaştırılmış ve modelin yüksek oranda tahmin doğruluğuna sahip olduğu belirlenmiştir. Al6061/TiC/GNP kompozit grubu için, tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9086 elde edilirken, MSE değeri 0.07347 olarak elde edilmiştir. Al6061/TiC/MWCNT için ise, tasarlanan yapay sinir ağı modelinden elde edilen sonuçlar neticesinde R değeri 0.9129 elde edilirken, MSE değeri 0.06606 olarak elde edilmiştir. İki karbon esaslı nano takviye grubundan oluşan Al6061/GNP/MWCNT kombinasyonu için ise R değeri 0.9428 elde edilirken, MSE değeri 0.06015 olarak hesaplanmıştır.

Üretilen kompozit gruplarının elektriksel iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiş olup, takviyelendirilmemiş Al6061 malzemesinin elektriksel iletkenlik değeri ile kıyaslandığında Al6061/0.5 GNP, Al6061/1 GNP, Al6061/0.5 MWCNT ve Al6061/1 MWCNT kompozit gruplarında elektriksel iletkenlik artışı elde edilmiştir. TiC takviyesinin mevcut olduğu kompozitlerde ise elektriksel iletkenlik değerinin düşük çıkmasının sebebinin ise seramik esaslı takviye grubunun sahip olduğu düşük iletkenlik değeri olduğu düşünülmektedir.

Çalışmada gerçekleştirilen hibrit takviyelendirme prosesinin avantajları hem aşınma direnci üzerinde hem de basma dayanımı üzerinde açıkça tespit edilmiştir. Gerek takviyelendirilmemiş alüminyum alaşımıyla gerekse üretilen tek takviyeli kompozitlerle kıyaslandığında hibritizasyonun sonuçlar üzerinde olumlu etkisi çalışmada önemli bir kazanım olarak öne çıkmaktadır.

8. KAYNAKLAR

- [1] S. Mondal, “Aluminum or Its Alloy Matrix Hybrid Nanocomposites,” *Met. Mater. Int.*, vol. 27, no. 7, pp. 2188–2204, 2021.
- [2] M. Chiachio, J. Chiachio, and G. Rus, “Reliability in composites - A selective review and survey of current development,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 3, pp. 902–913, 2012.
- [3] Y. Huang, J. Li, L. Wan, X. Meng, and Y. Xie, “Strengthening and toughening mechanisms of CNTs/Mg-6Zn composites via friction stir processing,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 732, no. May, pp. 205–211, 2018.
- [4] R. Yamanoglu, N. Gulsoy, E. A. Olevsky, and H. O. Gulsoy, “Production of porous Ti5Al2.5Fe alloy via pressureless spark plasma sintering,” *J. Alloys Compd.*, vol. 680, pp. 654–658, 2016.
- [5] A. O. Inegbenebor, C. A. Bolu, P. O. Babalola, A. I. Inegbenebor, and F. O. Sunday, “Influence of the Grit size of Silicon Carbide Particles on the Mechanical and Electrical Properties of Stir Casting Aluminum Matrix Composite Material,” *Silicon*, vol. 8, no. 4, pp. 573–578, 2016.
- [6] S. J. James, M. Ganesan, P. Santhamoorthy, and P. Kuppan, “Development of hybrid aluminium metal matrix composite and study of property,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 13048–13054, 2018.
- [7] I. Aatthisugan, A. Razal Rose, and D. Selwyn Jebadurai, “Mechanical and wear behaviour of AZ91D magnesium matrix hybrid composite reinforced with boron carbide and graphite,” *J. Magnes. Alloy.*, vol. 5, no. 1, pp. 20–25, 2017.
- [8] V. Chak, H. Chattopadhyay, and T. L. Dora, “A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites,” *J. Manuf. Process.*, vol. 56, no. May, pp. 1059–1074, 2020.
- [9] L. Zhang *et al.*, “Microtopography and mechanical properties of vacuum hot pressing Al/B4C composites,” *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 3, pp. 3048–3055, 2018.
- [10] D. Ramakrishnan, *Automotive applications of powder metallurgy*. Woodhead Publishing Limited, 2013.

- [11] P. Honarmandi, "Composite Materials in Automotive Body Panels, Concerning Noise and Vibration," *Adv. Compos. Mater. Automot. Appl. Struct. Integr. Crashworthiness*, pp. 371–387, 2013.
- [12] A. Kawasaki, *Advances in powder and powder metallurgy*, vol. 62, no. 7. 2015.
- [13] T. Rajmohan, K. Palanikumar, and S. Arumugam, "Synthesis and characterization of sintered hybrid aluminium matrix composites reinforced with nanocopper oxide particles and microsilicon carbide particles," *Compos. Part B Eng.*, vol. 59, pp. 43–49, 2014.
- [14] M. Y. Zhou *et al.*, "Progress in research on hybrid metal matrix composites," *J. Alloys Compd.*, vol. 838, 2020.
- [15] X. Jiang, T. Song, Z. Shao, W. Liu, D. Zhu, and M. Zhu, "Synergetic Effect of Graphene and MWCNTs on Microstructure and Mechanical Properties of Cu/Ti₃SiC₂/C Nanocomposites," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 12, 2017.
- [16] M. Rashad, F. Pan, A. Tang, M. Asif, and M. Aamir, "Synergetic effect of graphene nanoplatelets (GNPs) and multi-walled carbon nanotube (MW-CNTs) on mechanical properties of pure magnesium," *J. Alloys Compd.*, vol. 603, pp. 111–118, 2014.
- [17] Z. Yu *et al.*, "Enhanced load transfer by designing mechanical interfacial bonding in carbon nanotube reinforced aluminum composites," *Carbon N. Y.*, vol. 146, pp. 155–161, 2019.
- [18] N. Rajesh Jesudoss Hynes, M. Vivek Prabhu, and P. Nagaraj, "Joining of hybrid AA6063-6SiCp-3Grp composite and AISI 1030 steel by friction welding," *Def. Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 338–345, 2017.
- [19] P. D. Srivyas and M. S. Charoo, "Role of Fabrication Route on the Mechanical and Tribological Behavior of Aluminum Metal Matrix Composites - A Review," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 20054–20069, 2018.
- [20] T. S. Sudarshan, K. A. Khor, and M. Jeandin, *Surface modification technologies*, vol 13, vol. 10, no. 1. Ohio: ASM International, 2001.
- [21] N. Seyed Pourmand and H. Asgharzadeh, "Aluminum Matrix Composites Reinforced with Graphene: A Review on Production, Microstructure, and

- Properties,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 8436, pp. 1–49, 2019.
- [22] H.-T. Lin, *Innovative processing and manufacturing of advanced ceramics and composites II*, no. 1. New Jersey, USA: Wiley, 2014.
- [23] K. Srinivas and M. S. Bhagyashekar, “Wear behaviour of epoxy hybrid particulate composites,” *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 488–494, 2014.
- [24] A. Saboori, S. K. Moheimani, M. Dadkhah, M. Pavese, C. Badini, and P. Fino, “An overview of key challenges in the fabrication of metal matrix nanocomposites reinforced by graphene nanoplatelets,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 3, 2018.
- [25] G. V. Jagadeesh and S. Gangi Setti, “A review on micromechanical methods for evaluation of mechanical behavior of particulate reinforced metal matrix composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 55, no. 23, pp. 9848–9882, 2020.
- [26] C. Composites, *7 - Carbon-Matrix Composites*, Second Edi. Elsevier Inc., 2017.
- [27] A. Raju and M. Shanmugaraja, “Recent researches in fiber reinforced composite materials: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 9291–9296, 2019.
- [28] L. Jiang, Z. Li, G. Fan, L. Cao, and D. Zhang, “The use of flake powder metallurgy to produce carbon nanotube (CNT)/aluminum composites with a homogenous CNT distribution,” *Carbon N. Y.*, vol. 50, no. 5, pp. 1993–1998, 2012.
- [29] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, and A. Elharfi, “Polymer composite materials: A comprehensive review,” *Compos. Struct.*, vol. 262, no. November 2020, pp. 0–3, 2021.
- [30] S. Huang, Q. Fu, L. Yan, and B. Kasal, “Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 13, pp. 1441–1484, 2021.
- [31] K. Friedrich, “Polymer composites for tribological applications,” *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 3–39, 2018.
- [32] C. Barry Carter and M. Grant Norton, *Ceramic materials: Science and engineering*. Springer, 2007.
- [33] K. Chawla, *Composite materials*, vol. 2, no. 4. Springer, 2001.
- [34] S. Banerjee, S. Poria, G. Sutradhar, and P. Sahoo, “Abrasive wear behavior of WC

- nanoparticle reinforced magnesium metal matrix composites,” *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, vol. 8, no. 2, 2020.
- [35] B. N. Sharath *et al.*, “Multi ceramic particles inclusion in the aluminium matrix and wear characterization through experimental and response surface-artificial neural networks,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 11, 2021.
- [36] C. Zhang, Z. Jiang, and L. Zhao, “Mechanical properties and tribological behaviors of yttria-zirconia ceramics with additions of graphene oxide by hot-press sintering for dental implants,” *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, vol. 8, no. 3, 2020.
- [37] E. A. Diler, “Toz Metalurjisiyle Üretilen Al-SiCp Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Partikül Dağılımı, Eğme Dayanımı ve Asınma Özelliklerine Etkileri,” Ege Üniversitesi, 2012.
- [38] L. Singh, B. Singh, and K. K. Saxena, “Manufacturing techniques for metal matrix composites (MMC): an overview,” *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 0698, no. Mmc, 2020.
- [39] N. K. Bhoi, H. Singh, and S. Pratap, “Developments in the aluminum metal matrix composites reinforced by micro/nano particles – A review,” *J. Compos. Mater.*, vol. 54, no. 6, pp. 813–833, 2020.
- [40] K. S. Munir and C. Wen, “Deterioration of the Strong sp² Carbon Network in Carbon Nanotubes during the Mechanical Dispersion Processing—A Review,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 347–366, 2016.
- [41] N. Seyed Pourmand and H. Asgharzadeh, “Aluminum Matrix Composites Reinforced with Graphene: A Review on Production, Microstructure, and Properties,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 289–337, 2020.
- [42] T. Turkoglu and S. Celik, “Process optimization for enhanced tribological properties of Al/MWCNT composites produced by powder metallurgy using artificial neural networks,” *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, vol. 9, no. 4, 2021.
- [43] Q. Guo, K. Kondoh, and S. M. Han, “Nanocarbon-reinforced metal-matrix composites for structural applications,” *MRS Bull.*, vol. 44, no. 1, pp. 40–45, 2019.
- [44] S. Li, B. Sun, H. Imai, T. Mimoto, and K. Kondoh, “Powder metallurgy titanium metal matrix composites reinforced with carbon nanotubes and graphite,” *Compos.*

Part A Appl. Sci. Manuf., vol. 48, no. 1, pp. 57–66, 2013.

- [45] Z. Baig, O. Mamat, and M. Mustapha, “Recent Progress on the Dispersion and the Strengthening Effect of Carbon Nanotubes and Graphene-Reinforced Metal Nanocomposites: A Review,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 1, pp. 1–46, 2018.
- [46] A. E. Nassar and E. E. Nassar, “Properties of aluminum matrix Nano composites prepared by powder metallurgy processing,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 295–299, 2017.
- [47] M. O. Bodunrin, K. K. Alaneme, and L. H. Chown, “Aluminium matrix hybrid composites: A review of reinforcement philosophies; Mechanical, corrosion and tribological characteristics,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 434–445, 2015.
- [48] U. Pandey, R. Purohit, P. Agarwal, and S. Kumar Singh, “Study of Fabrication, Testing and Characterization of Al/TiC Metal Matrix Composites through different Processing Techniques,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 4106–4117, 2018.
- [49] H. M. Sabbar *et al.*, “AA7075-ZrO₂ nanocomposites produced by the consecutive solid-state process: A review of characterisation and potential applications,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 5, 2021.
- [50] B. Prasanna Sahoo and D. Das, “Tribological behaviour of ceramic and carbon nano-tube reinforced metal matrix composites - A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 20549–20559, 2018.
- [51] S. Seetharaman, “Fundamentals of Metal Matrix Composites,” *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, no. August, 2021.
- [52] S. Seetharaman, “Fundamentals of Metal Matrix Composites,” *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, vol. 1, pp. 1–19, 2021.
- [53] R. Yamanoglu, A. Bahador, and K. Kondoh, “Effect of Mo Addition on the Mechanical and Wear Behavior of Plasma Rotating Electrode Process Atomized Ti6Al4V Alloy,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 5, pp. 3203–3212, 2021.
- [54] Y. Huang *et al.*, “Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 105, pp. 235–257, 2018.

- [55] M. N. Avettand-Fènoël and A. Simar, “A review about Friction Stir Welding of metal matrix composites,” *Mater. Charact.*, vol. 120, pp. 1–17, 2016.
- [56] P. Yuvararasimman and R. Malayalamurthi, “Studies on Fractures of Friction Stir Welded Al Matrix SiC-B₄C Reinforced Metal Composites,” *Silicon*, vol. 10, no. 4, pp. 1375–1383, 2018.
- [57] S. T. T. Çelik, “Engineering Sciences,” *Sci. News*, vol. 98, no. 8/9, p. 170, 1970.
- [58] A. Naseer *et al.*, “A review of processing techniques for graphene- reinforced metal matrix composites,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 34, no. 9, pp. 957–985, 2019.
- [59] N. Panwar and A. Chauhan, “Fabrication methods of particulate reinforced Aluminium metal matrix composite-A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5933–5939, 2018.
- [60] R. M. German, *Sintering Practice*. 2014.
- [61] R. Yamanoglu, M. Zeren, and R. M. German, “Solidification characteristics of atomized AlCu₄Mg₁-SiC composite powders,” *J. Min. Metall. Sect. B Metall.*, vol. 48, no. 1, pp. 73–79, 2012.
- [62] R. German, *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*. 2014.
- [63] R. Yamanoglu, I. Daoud, and E. A. Olevsky, “Spark plasma sintering versus hot pressing–densification, bending strength, microstructure, and tribological properties of Ti₅Al_{2.5}Fe alloys,” *Powder Metall.*, vol. 61, no. 2, pp. 178–186, 2018.
- [64] R. M. German and S. J. Park, *Mathematical Relations in Particulate Materials Processing*. Wiley, 2008.
- [65] M. Yildirim, D. Özyürek, and M. Gürü, “Effect of Milling Time on Dry Sliding Wear Behaviors of Carbon Nanotubes Reinforced Al Matrix Composites,” *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 20, no. 4, pp. 2633–2638, 2019.
- [66] M. Karbalaee Akbari, O. Mirzaee, and H. R. Baharvandi, “Fabrication and study on mechanical properties and fracture behavior of nanometric Al₂O₃ particle-reinforced A356 composites focusing on the parameters of vortex method,” *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 199–205, 2013.
- [67] R. Yamanoglu, “Pressureless Spark Plasma Sintering: A Perspective from

- Conventional Sintering to Accelerated Sintering Without Pressure,” *Powder Metall. Met. Ceram.*, vol. 57, no. 9–10, pp. 513–525, 2019.
- [68] V. P. Meshalkin and A. V. Belyakov, “Methods used for the compaction and molding of ceramic matrix composites reinforced with carbon nanotubes,” *Processes*, vol. 8, no. 8, pp. 1–37, 2020.
- [69] W. Węglewski, M. Basista, A. Manescu, M. Chmielewski, K. Pietrzak, and T. Schubert, “Effect of grain size on thermal residual stresses and damage in sintered chromium-alumina composites: Measurement and modeling,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 67, pp. 119–124, 2014.
- [70] S. R. Bakshi, D. Lahiri, and A. Agarwal, “Carbon nanotube reinforced metal matrix composites - A review,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 55, no. 1, pp. 41–64, 2010.
- [71] D. Jeyasimman, K. Sivaprasad, S. Sivasankaran, and R. Narayanasamy, “Fabrication and consolidation behavior of Al 6061 nanocomposite powders reinforced by multi-walled carbon nanotubes,” *Powder Technol.*, vol. 258, pp. 189–197, 2014.
- [72] R. Pérez-Bustamante, F. Pérez-Bustamante, I. Estrada-Guel, L. Licea-Jiménez, M. Miki-Yoshida, and R. Martínez-Sánchez, “Effect of milling time and CNT concentration on hardness of CNT/Al2024 composites produced by mechanical alloying,” *Mater. Charact.*, vol. 75, pp. 13–19, 1970.
- [73] A. Javadi, S. Mirdamadi, M. Faghihihsani, S. Shakhesi, and R. Soltani, “Well-dispersion of multi-walled carbon nanotubes in aluminum matrix composites by controlling the mixing process,” *Fullerenes Nanotub. Carbon Nanostructures*, vol. 21, no. 5, pp. 436–447, 2013.
- [74] B. Chen *et al.*, “Load transfer strengthening in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via in-situ tensile tests,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 113, pp. 1–8, 2015.
- [75] K. S. Munir, P. Kingshott, and C. Wen, “Carbon nanotube reinforced titanium metal matrix composites prepared by powder metallurgy - A review,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 40, no. 1, pp. 38–55, 2015.
- [76] J. Texter, “Graphene dispersions,” *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, vol. 19, no. 2,

- pp. 163–174, 2014.
- [77] P. Vichchulada, M. A. Cauble, E. A. Abdi, E. I. Obi, Q. Zhang, and M. D. Lay, “Sonication power for length control of single-walled carbon nanotubes in aqueous suspensions used for 2-dimensional network formation,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 114, no. 29, pp. 12490–12495, 2010.
 - [78] A. C. Gowda, P. G. Koppad, D. Sethuram, and R. Keshavamurthy, “Morphology Studies on Mechanically Milled Aluminium Reinforced with B 4 C and CNTs,” *Silicon*, vol. 11, no. 2, pp. 1089–1098, 2019.
 - [79] M. Chen *et al.*, “Tailoring and characterization of carbon nanotube dispersity in CNT/6061Al composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 757, no. April, pp. 172–181, 2019.
 - [80] Y. Pan *et al.*, “Fabrication, mechanical properties and electrical conductivity of Al₂O₃ reinforced Cu/CNTs composites,” *J. Alloys Compd.*, vol. 782, pp. 1015–1023, 2019.
 - [81] B. Chen *et al.*, “An approach for homogeneous carbon nanotube dispersion in Al matrix composites,” *Mater. Des.*, vol. 72, pp. 1–8, 2015.
 - [82] M. S. Hasan, A. Kordijazi, P. K. Rohatgi, and M. Nosonovsky, “Triboinformatics approach for friction and wear prediction of Al-graphite composites using machine learning methods,” *J. Tribol.*, vol. 144, no. 1, pp. 1–13, 2022.
 - [83] S. Shanmuganathan, *Artificial neural network modelling: An introduction*, vol. 628. Springer, 2016.
 - [84] C. C. Aggarwal, *Neural Networks and Deep Learning*. Springer, 2018.
 - [85] N. Yin, Z. Xing, K. He, and Z. Zhang, “Tribo-informatics approaches in tribology research : A review,” 2022.
 - [86] M. Mohammadzaheri, L. Chen, A. Ghaffari, and J. Willison, “A combination of linear and nonlinear activation functions in neural networks for modeling a de-superheater,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 17, no. 2, pp. 398–407, 2009.
 - [87] J. S. Huang, J. X. Liew, A. S. Ademiloye, and K. M. Liew, “Artificial Intelligence in Materials Modeling and Design,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, no. 5, pp.

3399–3413, 2021.

- [88] S. Sieniutycz, *Complex systems of neural networks*. Elsevier Inc., 2020.
- [89] A. Kordijazi, T. Zhao, J. Zhang, K. Alrfou, and P. Rohatgi, “A Review of Application of Machine Learning in Design, Synthesis, and Characterization of Metal Matrix Composites: Current Status and Emerging Applications,” *Jom*, 2021.
- [90] H. Cartwright, *Artificial neural networks: Second edition*. 2014.
- [91] F. Çakır, *Yapay Sinir Ağları: Matlab Kodları ve Matlab Toolbox Çözümleri*, 2nd ed. Ankara: Nobel, 2019.
- [92] D. Y. Dhande, M. R. Phate, and N. Sinaga, “Comparative Analysis of Abrasive Wear Using Response Surface Method and Artificial Neural Network,” *J. Inst. Eng. Ser. D*, vol. 102, no. 1, pp. 27–37, 2021.
- [93] M. S. Hasan, A. Kordijazi, P. K. Rohatgi, and M. Nosonovsky, “Triboinformatic modeling of dry friction and wear of aluminum base alloys using machine learning algorithms,” *Tribol. Int.*, vol. 161, no. April, p. 107065, 2021.
- [94] P. Samal, P. R. Vundavilli, A. Meher, and M. M. Mahapatra, “Influence of TiC on dry sliding wear and mechanical properties of in situ synthesized AA5052 metal matrix composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 28–30, pp. 4323–4336, 2019.
- [95] A. Dorri Moghadam, E. Omrani, P. L. Menezes, and P. K. Rohatgi, “Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene - A review,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 77, pp. 402–420, 2015.
- [96] A. H. Idrisi and A. H. I. Mourad, “Wear Performance Analysis of Aluminum Matrix Composites and Optimization of Process Parameters Using Statistical Techniques,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 50, no. 11, pp. 5395–5409, 2019.
- [97] Y. Mazaheri, M. Meratian, R. Emadi, and A. R. Najarian, “Comparison of microstructural and mechanical properties of Al-TiC, Al-B 4C and Al-TiC-B 4C composites prepared by casting techniques,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 560, pp. 278–287, 2013.

- [98] A. M. K. Esawi, K. Morsi, A. Sayed, M. Taher, and S. Lanka, “Effect of carbon nanotube (CNT) content on the mechanical properties of CNT-reinforced aluminium composites,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 16, pp. 2237–2241, 2010.
- [99] P. S. Bains, S. S. Sidhu, and H. S. Payal, “Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites: A Review,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 31, no. 5, pp. 553–573, 2016.
- [100] H. T. Shivaramu and K. S. Umashankar, “Dry sliding wear behaviour of multi walled carbon nanotubes reinforced aluminium composites produced by powder metallurgy technique,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 11, 2019.
- [101] W. Yang *et al.*, “Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplates reinforced pure Al matrix composites prepared by pressure infiltration method,” *J. Alloys Compd.*, vol. 732, pp. 748–758, 2018.
- [102] R. Pérez-Bustamante, D. Bolaños-Morales, J. Bonilla-Martínez, I. Estrada-Guel, and R. Martínez-Sánchez, “Microstructural and hardness behavior of graphene-nanoplatelets/aluminum composites synthesized by mechanical alloying,” *J. Alloys Compd.*, vol. 615, no. S1, pp. S578–S582, 2015.
- [103] G. Li and B. Xiong, “Effects of graphene content on microstructures and tensile property of graphene-nanosheets / aluminum composites,” *J. Alloys Compd.*, vol. 697, pp. 31–36, 2017.
- [104] A. Bisht, M. Srivastava, R. M. Kumar, I. Lahiri, and D. Lahiri, “Strengthening mechanism in graphene nanoplatelets reinforced aluminum composite fabricated through spark plasma sintering,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 695, no. April, pp. 20–28, 2017.
- [105] M. Alipour, R. E. Farsani, and Y. A. Abuzin, “Influence of graphene nanoplatelet reinforcements on microstructural development and wear behavior of an aluminum alloy nanocomposite,” *Miner. Met. Mater. Ser.*, no. 210809, pp. 233–246, 2018.
- [106] D. Li, Y. Ye, X. Liao, and Q. H. Qin, “A novel method for preparing and characterizing graphene nanoplatelets/aluminum nanocomposites,” *Nano Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 1642–1650, 2018.
- [107] S. Simões, F. Viana, M. A. L. Reis, and M. F. Vieira, “Influence of

- dispersion/mixture time on mechanical properties of Al-CNTs nanocomposites,” *Compos. Struct.*, vol. 126, pp. 114–122, 2015.
- [108] A. Jaswin, “Development of Al-CNT Composite by powder metallurgy method,” *Int. J. Adv. Eng.*, vol. 1, pp. 362–366, 2015.
- [109] S. Mohapatra, A. K. Chaubey, D. K. Mishra, and S. K. Singh, “Fabrication of Al-TiC composites by hot consolidation technique: Its microstructure and mechanical properties,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 117–122, 2016.
- [110] V. Sivananth, S. Vijayarangan, and N. Rajamanickam, “Evaluation of fatigue and impact behavior of titanium carbide reinforced metal matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 597, pp. 304–313, 2014.
- [111] H. C. Ananda Murthy and S. K. Singh, “Influence of TiC particulate reinforcement on the corrosion behaviour of Al 6061 metal matrix composites,” *Adv. Mater. Lett.*, vol. 6, no. 7, pp. 633–640, 2015.
- [112] D. S. C. Kishore, K. P. Rao, and A. Mahamani, “Investigation of Cutting Force, Surface Roughness and Flank Wear in Turning of In-situ Al6061-TiC Metal Matrix Composite,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpe, pp. 1040–1050, 2014.
- [113] H. Hanizam, M. S. Salleh, M. Z. Omar, and A. B. Sulong, “Optimisation of mechanical stir casting parameters for fabrication of carbon nanotubes-aluminium alloy composite through Taguchi method,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 2223–2231, 2019.
- [114] G. V. N. B. Prabhakara *et al.*, “Producing Al5083-CNT composites by friction stir processing: Influence of grain refinement and CNT on mechanical and corrosion properties,” *Mater. Today Proc.*, vol. 15, pp. 44–49, 2019.
- [115] P. Van Trinh *et al.*, “Microstructure, microhardness and thermal expansion of CNT/Al composites prepared by flake powder metallurgy,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 105, pp. 126–137, 2018.
- [116] A. Ghazaly, “Mechanical and Tribological Properties of AA2124-Graphene Self Lubricating Nanocomposite,” *Light Met. 2013*, pp. 411–415, 2013.
- [117] E. Omrani, A. D. Moghadam, A. K. Kasar, P. Rohatgi, and P. L. Menezes, “Tribological performance of graphite nanoplatelets reinforced al and al/al₂o₃ self-

- lubricating composites,” *Materials (Basel)*., vol. 14, no. 5, pp. 1–17, 2021.
- [118] C. O. Ujah, A. P. I. Popoola, O. M. Popoola, and V. S. Aigbodion, “Optimisation of spark plasma sintering parameters of Al-CNTs-Nb nano-composite using Taguchi Design of Experiment,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 100, no. 5–8, pp. 1563–1573, 2019.
- [119] T. Varol, A. Canakci, and S. Ozsahin, “Prediction of effect of reinforcement content, flake size and flake time on the density and hardness of flake AA2024-SiC nanocomposites using neural networks,” *J. Alloys Compd.*, vol. 739, pp. 1005–1014, 2018.
- [120] F. Aydın, “Investigation of Elevated Temperature Wear Behavior of Al 2024-BN Composites using Statistical Techniques,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 11, pp. 8560–8578, 2021.
- [121] A. Nieto, A. Bisht, D. Lahiri, C. Zhang, and A. Agarwal, “Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 62, no. 5, pp. 241–302, 2017.
- [122] O. A. Shenderova, V. V. Zhirnov, and D. W. Brenner, “Carbon nanostructures,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 27, no. 3–4, pp. 227–356, 2002.
- [123] R. Xu *et al.*, “Balanced strength and ductility in CNT/Al composites achieved by flake powder metallurgy via shift-speed ball milling,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 96, pp. 57–66, 2017.
- [124] M. Chen *et al.*, “Design of an efficient flake powder metallurgy route to fabricate CNT/6061Al composites,” *Mater. Des.*, vol. 142, pp. 288–296, 2018.
- [125] F. Lin *et al.*, “Synergistic effects of TiC and graphene on the microstructure and tribological properties of Al2024 matrix composites,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 32, no. 10, pp. 3635–3649, 2021.
- [126] Z. Zheng, S. Zhong, X. Zhang, J. Li, and L. Geng, “Graphene nano-platelets reinforced aluminum composites with anisotropic compressive properties,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 798, no. August, p. 140234, 2020.
- [127] S. Manzetti and J.-C. P. Gabriel, “Methods for dispersing carbon nanotubes for nanotechnology applications: liquid nanocrystals, suspensions, polyelectrolytes,

- colloids and organization control,” *Int. Nano Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 31–49, 2019.
- [128] R. I. Rubel, M. H. Ali, M. A. Jafor, and M. M. Alam, “Carbon nanotubes agglomeration in reinforced composites: A review,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 756–780, 2019.
- [129] A. M. Al-Qutub, A. Khalil, N. Saheb, and A. S. Hakeem, “Wear and friction behavior of Al6061 alloy reinforced with carbon nanotubes,” *Wear*, vol. 297, no. 1–2, pp. 752–761, 2013.
- [130] M. Jagannatham, M. S. Senthil Saravanan, K. Sivaprasad, and S. P. Kumaresh Babu, “Mechanical and Tribological Behavior of Multiwalled Carbon Nanotubes-Reinforced AA7075 Composites Prepared by Powder Metallurgy and Hot Extrusion,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 11, pp. 5675–5688, 2018.
- [131] M. M. H. Bastwros, A. M. K. Esawi, and A. Wifi, “Friction and wear behavior of Al-CNT composites,” *Wear*, vol. 307, no. 1–2, pp. 164–173, 2013.
- [132] D. Jeyasimman, S. Sivasankaran, K. Sivaprasad, R. Narayanasamy, and R. S. Kambali, “An investigation of the synthesis, consolidation and mechanical behaviour of Al 6061 nanocomposites reinforced by TiC via mechanical alloying,” *Mater. Des.*, vol. 57, pp. 394–404, 2014.
- [133] H. R. Manjunath Naik, L. H. Manjunath, V. Koti, A. Lakshmikanthan, P. G. Koppad, and S. K. P, “Al/Graphene/CNT Hybrid Composites: Hardness and Sliding Wear Studies,” *FME Trans.*, vol. 49, no. 2, pp. 414–421, 2021.
- [134] S. E. Shin, H. J. Choi, J. H. Shin, and D. H. Bae, “Strengthening behavior of few-layered graphene/aluminum composites,” *Carbon N. Y.*, vol. 82, no. C, pp. 143–151, 2015.
- [135] S. R. Bakshi and A. Agarwal, “An analysis of the factors affecting strengthening in carbon nanotube reinforced aluminum composites,” *Carbon N. Y.*, vol. 49, no. 2, pp. 533–544, 2011.
- [136] V. Khanna, V. Kumar, and S. A. Bansal, “Mechanical properties of aluminium-graphene/carbon nanotubes (CNTs) metal matrix composites: Advancement, opportunities and perspective,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 138, no. November 2020, p. 111224, 2021.

- [137] Z. Baig, O. Mamat, and M. Mustapha, “Recent Progress on the Dispersion and the Strengthening Effect of Carbon Nanotubes and Graphene-Reinforced Metal Nanocomposites: A Review,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 1, pp. 1–46, 2018.
- [138] J. F. Archard, “Contact and rubbing of flat surfaces,” *J. Appl. Phys.*, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, 1953.
- [139] W. Zhai, N. Srikanth, L. B. Kong, and K. Zhou, “Carbon nanomaterials in tribology,” *Carbon N. Y.*, vol. 119, pp. 150–171, 2017.
- [140] A. J. Thomas, M. Petridis, S. D. Walters, S. M. Gheytaasi, and R. E. Morgan, “Two hidden layers are usually better than one,” *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 744, pp. 279–290, 2017.
- [141] E. Fathi and B. Maleki Shoja, *Deep Neural Networks for Natural Language Processing*, 1st ed., vol. 38. Elsevier B.V., 2018.
- [142] M. Kuentz and H. Leuenberger, “Pressure susceptibility of polymer tablets as a critical property: A modified Heckel equation,” *J. Pharm. Sci.*, vol. 88, no. 2, pp. 174–179, 1999.
- [143] C. Sun and D. J. W. Grant, “Influence of elastic deformation of particles on Heckel analysis,” *Pharm. Dev. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 193–200, 2001.
- [144] R. Panelli and F. Ambrozio Filho, “A study of a new phenomenological compacting equation,” *Powder Technol.*, vol. 114, no. 1–3, pp. 255–261, 2001.
- [145] R. George, K. T. Kashyap, R. Rahul, and S. Yamdagni, “Strengthening in carbon nanotube/aluminium (CNT/Al) composites,” *Scr. Mater.*, vol. 53, no. 10, pp. 1159–1163, 2005.
- [146] X. Zhang, N. Zhao, and C. He, “The superior mechanical and physical properties of nanocarbon reinforced bulk composites achieved by architecture design – A review,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 113, no. February, p. 100672, 2020.
- [147] O. Carvalho, M. Buciumeanu, G. Miranda, N. Costa, D. Soares, and F. S. Silva, “Mechanisms governing the tensile, fatigue, and wear behavior of carbon nanotube reinforced aluminum alloy,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 23, no. 8, pp. 917–925, 2016.

- [148] N. A. Ulloa-Castillo, O. Martínez-Romero, R. Hernandez-Maya, E. Segura-Cárdenas, and A. Elías-Zúñiga, “Spark plasma sintering of aluminum-based powders reinforced with carbon nanotubes: Investigation of electrical conductivity and hardness properties,” *Materials (Basel)*., vol. 14, no. 2, pp. 1–11, 2021.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Türker Türkoğlu

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi	2017
Lisans	Kocaeli Üniversitesi	2014
Lise	Fatma Emin Kutvar Anadolu Lisesi	2008

Yayın Listesi

Uluslararası Makaleler

- [1] T. Turkoglu and S. Celik, “Synergistic Effects of TiC/GNP Strengthening on the Mechanical and Tribological Properties of Al6061 Matrix Composites coupled with Process Optimization by Machine Learning,” *Proc Inst Mech Eng Part E J Process Mech Eng.*, 2022. [Under Review] **[Tezden türetilmiştir]**
- [2] T. Turkoglu, S. Celik, N. Aslan, and E. Atik, “The effect of processing parameters on the wear properties Al6061/GNP composites produced by hot pressing,” *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2022. **[Tezden türetilmiştir]**
- [3] T. Turkoglu and S. Celik, “Process optimization for enhanced tribological properties of Al/MWCNT composites produced by powder metallurgy using artificial neural networks,” *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, vol. 9, no. 4, 2021. **[Tezden türetilmiştir]**
- [4] T. Turkoglu and I. Ay, “Investigation of mechanical, kinetic and corrosion properties of borided AISI 304, AISI 420 and AISI 430,” *Surf. Eng.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2021.
- [5] T. Turkoglu and I. Ay, “Analysis of boride layer thickness of borided AISI 430 by response surface methodology,” *Int. J. Optim. Control Theor. Appl.*, vol. 9, no. 3, pp. 39–44, 2019.

Uluslararası Bildiriler

- [1] Türkoğlu, and S. Çelik, “Investigation of the Effect of Process Parameters on the Compressive Strength of Al6061/GNP/MWCNT Composites” in International Congress of Engineering and Natural Sciences (ICENSS 2022), Ankara, Turkey, May, 2022. **[Tezden türetilmiştir]**
- [2] Ö.F. Ersöz, T. Türkoğlu, and S. Çelik, “Micro-Computed Tomography based modelling for composites” in International IDU Engineering Symposium–IES’21, Izmir, Turkey, Dec. 2021, pp. 14-24.
- [3] Türkoğlu, and S. Çelik, “Effects of Reinforcement and Processing Parameters on Mechanical Properties of Al/Graphene Nanoplatelet Composites” in International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology (IMSMATEC’21), Nevşehir, Turkey, May. 2021, pp. 139-142.
- [4] Türkoğlu, and S. Çelik, “Optimization of Coating Hardness of Borided AISI 304 By Response Surface Methodology” in International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology (IMSMATEC’21), Nevşehir, Turkey, May. 2021, pp. 143-145.
- [5] Türkoğlu, and S. Çelik, “The Effects Of Dual Particle Size and Production Parameters On Al/Al₂O₃/B₄C Hybrid Composites” in International IDU Engineering Symposium–IES’20, Izmir, Turkey, Dec. 2020, pp. 231-236.
- [6] Türkoğlu, and S. Çelik, “Mechanical Behaviours of Al/Al₂O₃/B₄C Hybrid Composites Produced By Powder Metallurgy Method” in 4nd International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC’19), Ankara, Turkey, Oct. 2019, pp. 642-645.
- [7] Türkoğlu, and I. Ay, “Optimization of Boride Layer Thickness Of Borided AISI 420 Martensitic Stainless Steel By Using Response Surface Method (RSM) and Face Centered Central Composite Design (FCCD)” in 3rd International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC’18), Nevşehir, Sep. 2018, pp. 700.

Uluslararası Kitaplar

- [1] Properties of Al-Al₂O₃-B₄C Hybrid Composites by Using Grey Relational Analysis, Academic Studies in ENGINEERING SCIENCES, pp. 29-42, Livre de Lyon, 2020.

Projeler

- [1] Yürütücü: Sare. Çelik, Araştırmacı: Türker Türkoğlu, “Farklı takviyelerle kuvvetlendirilmiş 6000 serisi alüminyum alaşımlı hibrit kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle imalatı, analizi ve incelenmesi” Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, Doktora Tezi.

