



**TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE AA6061/TiB₂/GRAFEN HİBRİD
KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ, MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Eyüp Kutay ÇAKIROĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Eyüp Kutay ÇAKIROĞLU

29/09/2023

TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE AA6061/TiB₂/GRAFEN HİBRİD KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ, MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN

ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Eyüp Kutay ÇAKIROĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2023

ÖZET

Bu çalışmada oldukça sünek, korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti yüksek olan AA6061 alaşımına TiB₂ ve grafen nano parçacık ilavesi yapılmış nano hibrit kompozit malzemeler toz metalürjisi (TM) tekniği ile üretilmiştir. Alüminyum kompozitler konvansiyonel alaşımlara göre geliştirilmiş mukavemete, artan aşınma direncine, düşük yoğunluğa, yüksek korozyon direncine ve sertliğe sahiptirler. Çalışmada matris olarak 150 mikron altı AA6061 tozu, takviye elemanı olarak ise 5 mikron altı TiB₂ ve 5 nm parçacık boyutunda 18 mikron çapında nano grafen plaka (NGP) tozları kullanılmıştır. Çalışmada takviyeli ve takviyesiz olmak üzere 6 farklı malzeme üretilmiştir. Bunlardan ilki AA6061 alaşımıdır. İkincisi ise AA6061 %10 TiB₂ kompozit malzemesidir. Diğerleri ise sırası ile AA6061 %10 TiB₂ %0.25 nano grafen, AA6061 %10TiB₂ %0.5 nano grafen, AA6061 %10 TiB₂ %1 nano grafen ve AA6061 %10 TiB₂ %2 nano grafen hibrid kompozit malzemeleridir. Karışım tozlar etanol solisyon içerisinde ultrasonik banyoda 53 KHz şiddetinde 60 dakika süre boyunca karıştırılmıştır. Karışım banyosu daha sonra dakikada 580 rpm karıştırma hızında manyetik karıştırıcı vasıtası ile karıştırılmıştır. Karışım banyosu içerisindeki etanolun ortamdan uzaklaştırılması için vakum fırında kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutulan tozlar daha sonra üç boyutlu karıştırıcıda 1:5 toz bilye oranında 30 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karışım tozlar oda sıcaklığında 50 MPa basınç altında soğuk olarak preslendikten sonra dakikada 10 °C ısıtma hızında 550 °C ye getirilmiş ve bu sıcaklıkta 30 dakika bekletildikten sonra yine aynı sıcaklıkta 200 MPa basınç altında presleme işlemi yapılmıştır. Preslenen tozlar oda sıcaklığına soğutulduktan sonra T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Kompozitlerin mikroyapı, yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Takviye malzemesi oranının artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde düşüş görülmüştür. GNP miktarının artışına bağlı olarak sertlik değerlerinde azalma olduğu, çekme dayanımında ise artış olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91512
Anahtar Kelimeler : AA6061, TiB₂, grafen, nano malzeme, mekanik özellikler, aşınma, sertlik, çekme testi, mikroyapı.
Sayfa Adedi : 82
Danışman : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

PRODUCTION OF AA6061/TiB₂/GRAPHENE HYBRID COMPOSITE MATERIALS
BY POWDER METALLURGY METHOD AND INVESTIGATION OF
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Eyüp Kutay ÇAKIROĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2023

ABSTRACT

In this study, nano-hybrid composite materials with the addition of TiB₂ and graphene nanoparticles to the AA6061 alloy, which is highly ductile, has high corrosion resistance and weldability, were produced by powder metallurgy (PM) technique. Aluminum composites have improved strength, increased wear resistance, low density, high corrosion resistance and hardness compared to conventional alloys. In the study, AA6061 powder under 150 microns, TiB₂ under 5 microns and graphene nano plate (GNP) powders with a particle size of 5 nm and 18 micron diameter were used as the reinforcement element. In the study, 6 different materials, reinforced and non-reinforced, were produced. The first one is AA6061 alloy. The second is AA6061 10% TiB₂ composite material. Others are AA6061 10% TiB₂ 0.25% nano graphene, AA6061 10%TiB₂ 0.5% nano graphene, AA6061 10% TiB₂ 1% nano graphene and AA6061 10% TiB₂ 2% nano graphene hybrid composite materials. The mixed powders were mixed into the ethanol solution in an ultrasonic bath at 53 KHz for 60 minutes. The mixing bath was then mixed with a magnetic stirrer at a stirring rate of 580 rpm per minute. In order to remove the ethanol in the mixing bath from the environment, drying in the vacuum oven was carried out. The dried powders were then mixed in a three-dimensional mixer at the ratio of 1:5 powder balls for 30 minutes. After the mixture powders were cold pressed at room temperature under 200 MPa pressure, they were brought to 550 °C at a heating rate of 10 °C per minute. After the pressed powders were cooled to room temperature, T6 heat treatment was applied. Microstructure, density, hardness, tensile strength and abrasion properties of composites were investigated. There was a decrease in the density values depending on the increase in the reinforcement material ratio. Depending on the increase in the amount of GNP, it was observed that there was a decrease in the hardness values and an increase in the tensile strength.

Science Code : 91512

Key Words : AA6061, TiB₂, Graphene, Nano material, Mechanical properties, Abrasion, Hardness, Tensile test, Microstructure.

Page Number : 82

Supervisor : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

TEŞEKKÜR

Danışman hocalarım Prof. Dr. Ramazan ÇITAK ve Öğr. Gör. Dr. Halil KARAKOÇ' a, Öğr. Gör. Damla Dilara ÇAKIL' a, MSB' de Fizik Mühendisi olarak çalışan İlker İÇEN' e, TAI' de şef mühendis olarak çalışan Poyraz Mehmet ÇAPAR' a ve hem eşim hem de mesleki danışmanım olarak bilgi birikim ve tecrübelerini seferber eden Makine Mühendisi Burcu ÖZBİLGİN ÇAKIROĞLU' na, merhum babama ve anneme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ.....	3
2.1. Toz Metalurjisiyle Parça Üretimi	4
2.1.1. Toz üretim yöntemleri.....	5
2.2. Toz karakterizasyonu	6
2.2.1. Tozların fiziksel özellikleri	6
2.2.2. Tozların kimyasal özellikleri.....	7
2.3. Harmanlama ve karıştırma	8
2.4. Tozların Sıkıştırılması	8
2.4.1 Presleme	8
2.4.2. Haddeleme.....	9
2.4.3. Ekstrüzyon.....	10
2.4.4. Sinterleme.....	11
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	13
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	14
3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozitler	14

	Sayfa
3.2.1. Polimer matrisli kompozitler.....	15
3.2.2. Seramik matrisli kompozitler	15
3.2.3. Metal matrisli kompozitler	16
3.3. Hibrit Kompozit Malzemeler	18
3.4. Kullanılan Matris Elemanları	19
3.4.1. Bakır (Cu).....	19
3.4.2. Alüminyum.....	19
3.5. Kullanılan Takviye Malzemeleri.....	27
3.5.1. Alüminyum oksit (Al_2O_3).....	27
3.5.2. Bor karbür (B_4C)	27
3.5.3. Silisyum karbür (SiC)	27
3.5.4. Titanyum diborür (TiB_2)	28
3.5.5. Grafen.....	29
3.6.1. Grafen nano parçacık (GNP).....	32
3.7. Grafen Takviyeli Alüminyum Kompozitler.....	32
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
4.1. Malzemeler.....	36
4.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi	36
4.2.1. Tozların karıştırılması	36
4.2.2. Tozların preslenmesi	37
4.2.3. T6 ısıtıl işlem.....	39
4.2.4. Mekanik test numunelerinin hazırlanması	39
4.4. Malzeme Karakterizasyonu.....	42
4.4.1 Malzeme yoğunluğunun belirlenmesi	42
4.4.2. Mikro yapı analizleri	43
4.4.3. Sertlik testi.....	45

	Sayfa
4.4.5. Çekme testi.....	45
4.4.6. Aşınma deneyi.....	46
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
5.1. Yoğunluk Değişimi	49
5.2. Mikroyapı Analizleri	50
5.2.1. Optik mikroskop analizleri.....	50
5.2.2. SEM ve EDS analizleri	51
5.3. Sertlik Değişimi	53
5.4. Çekme Testi Sonuçları	55
5.5. Kırık Yüzeylerde EDS ve SEM Analizleri	57
5.6. Aşınma Analizi Sonuçları	61
5.6.1. Yüzey morfolojisi.....	65
6. SONUÇLAR.....	69
7. ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	80

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Alüminyumun özellikleri.....	20
Çizelge 3.2. ABD Normlarına göre alüminyum alaşımların gösterimi	22
Çizelge 3.3. ABD normlarına göre alüminyum alaşımların kullanım alanları	22
Çizelge 3.4. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler türleri	25
Çizelge 3.5. AA6061 alüminyum alaşımın yüzde bileşimi	26
Çizelge 3.6. Titanyum diborürün özellikleri.....	28
Çizelge 3.7. Grafenin özellikleri.....	30
Çizelge 3.8. GNP ve Al ile ilgili yapılan çalışmalar ve sonuçları	33
Çizelge 4.1. Kullanılan matris malzemesi ve takviye malzemelerinin özellikleri.....	36
Çizelge 4.2. Numunelerin karışım oranları.....	37
Çizelge 5.1. Üretilen numunelerin teorik ve deneysel yoğunluklarının karşılaştırılması.....	49
Çizelge 5.2. Üretilen kompozitlerin sertlik değerleri.....	53
Çizelge 5.3. Numunelere ait çekme testi sonuçları.....	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Toz metalurjisi ile parça üretimi.....	3
Şekil 2.2. Toz metalurjisinde parça üretim iş akışı.....	4
Şekil 2.3. a) Tek yönlü sıkıştırma, b) Çift yönlü sıkıştırma.....	9
Şekil 2.4. Presleme tekniğindeki kalıp sıkıştırma aşamaları.....	9
Şekil 2.5. Haddeleme işlem aşamaları	10
Şekil 2.6. Ekstrüzyon işlem aşamaları	11
Şekil 2.7. Sinterleme model gösterimi.....	12
Şekil 3.1. Kompozitlerin üretildikleri malzeme sınıfları	14
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması	15
Şekil 3.3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	21
Şekil 3.4. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	24
Şekil 3.5. Dökme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	24
Şekil 3.6. Karbon esaslı malzemeler.....	30
Şekil 3.7. Grafenin özellikleri bilinen diğer malzemelerle kıyaslanması	31
Şekil 3.8. Grafen takviyeli Al kompozitlerin üretim şeması	32
Şekil 4.1. TM yöntemi ile AA6061 alaşımına TiB_2 ve GNP ekleyerek kompozit malzeme üretimi ve deneysel akış şeması.....	35
Şekil 4.2. Sıcak presleme işleminin yapılışı	38
Şekil 4.3. T6 ısıtım işlemi grafiği.....	39
Şekil 4.4. Çekme testi numunesi 3 boyutlu görüntü ve teknik resmi	46
Şekil 4.5. Aşınma testi deney düzeneği	47
Şekil 5.1. Numuneler ait yoğunluk grafiği.....	49
Şekil 5.2. Numune 5 EDS analizi	53
Şekil 5.3. Üretilen kompozitlerin sertlik değişimi	54
Şekil 5.4. Numunelere ait çekme testi verilerinin ortalama gösterim grafiği	56

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. AA6061+ %10 TiB ₂ + %0,25 GNP içeren 3. numunenin a) SEM görüntüsü b) 1 numaralı bölgenin EDS analizi c) 2 numaralı bölgenin EDS analizi	58
Şekil 5.6. %89 %10 TiB ₂ + %1 GNP içeren 5. numunenin a) SEM görüntüsü b) 1 numaralı bölgenin EDS analizi c) 2 numaralı bölgenin EDS analizi.....	59
Şekil 5.7. a) 5. numunenin 1. Bölgesinden alınan EDS MAP b) 5. numunenin 2 ile işaretli bölgesinden alınan EDS MAP	60
Şekil 5.8. Numunelere uygulanan tüm yükler için kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak hacim kaybındaki değişim	61
Şekil 5.9. 15 N' luk yük için kayma mesafesinin sürtünme katsayısına göre değişimi.....	63
Şekil 5.10. Uygulanan yüklere göre kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak aşınma direncinin değişimi grafikleri	64
Şekil 5.11. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü	65
Şekil 5.12. Uygulanan tüm yükler altındaki aşınma mekanizmasının şematik gösterimi.....	66
Şekil 5.13. Aşınma haritası	67

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Numunelerin üretim aşamalarının cihaz gösterimi a) Precisa marka terazi b) Kudos marka ultrasonik banyo c) Protherm marka fırın d) Alphie-3 marka manyetik karıştırıcı	37
Resim 4.2. Proterm marka sıcak presleme cihazı sisteminin görüntüsü.....	38
Resim 4.3. Numunelerin ayrılma durumunu gösterir 3 boyutlu tasarım resmi	40
Resim 4.4. Sodick tel erozyon tezgahı (Atılım Üniversitesi)	40
Resim 4.5. Tel erozyon sonrası numunelerin gösterimi	41
Resim 4.6. Freze ile test numunelerinin hazırlanması (MSB 4. ABFM).....	41
Resim 4.7. Yüzey pürüzlülüğü işlemi sonrası numunelerin ön ve yan görünüşü.....	42
Resim 4.8. Leica DM4000M optik mikroskop	44
Resim 4.9. JEOL JSM 6060LV taramalı elektron mikroskobu	44
Resim 4.10. Sertlik ölçümü yapılan bölgelerin numune üzerinde gösterimi	45
Resim 4.11. Instron 3369 model 50 kN kapasite test cihazı	46
Resim 4.12. Aşınma testi numuneleri	47
Resim 5.1. Malzemelerin optik mikroskop altındaki görüntüleri	50
Resim 5.2. Malzemelerin SEM görüntüleri	52
Resim 5.3. Çekme testi numunesi öncesi ve sonrası	55
Resim 5.4. Kırık yüzey SEM görüntüleri	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

cm^3	Santimetreküp
C	Santigrat
g	Gram
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
M	Metre
m^2	Metrekare
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
s	saniye
TPa	Terapascal
V	Hız
W	Watt
ΔV	Hacimsel aşınma
Δm	Kütle kaybı
ρ_D	DeneySEL yoğunluk

Kısaltmalar

Açıklamalar

4.ABFM	4. Ana Bakım Fabrika Müdürlüğü
AA6061	Alüminyum 6061 alaşımı
Al	Alüminyum
ASO	Ankara Sanayi Odası
CO	Karbonmonoksit
EDS	Enerji dağılımı x-ışını spektroskopisi
GNP	Grafen nano parçacık

Kısaltmalar**Açıklamalar**

H	Hidrojen
HIP	Sıcak izostatik presleme
HMMK	Hibrit metal matrisli kompozit
MMK	Metal matrisli kompozitler
MSB	Milli Savunma Bakanlığı
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
PMK	Polimer matrisli kompozitler
PVA	Polivinil alkol
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SMK	Seramik matrisli kompozitler
TEM	Geçirmeli elektron mikroskobu
TiB₂	Titanyum diborür
TM	Toz metalürjisi
XRD	X – ışını kırınımı
W	Aşınma oranı

1. GİRİŞ

Günümüzde, teknolojik gelişmeler ve farklı gereksinimlerin ortaya çıkması sebebiyle geleneksel malzemelerin yanı sıra, daha üstün özelliklere sahip malzemelerin geliştirilme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Özellikle nano teknolojinin insan hayatına girmesiyle birçok endüstriyel alanda yeni nesil malzemeler üretilmeye başlanmıştır [1]. Bu nedenle daha iyi özelliklere sahip malzemelerle ürünler elde edebilmek amacıyla kompozit malzemeler kullanılmaya ve geliştirilmeye başlanmıştır. Bilim insanları tarafından üretilen kompozit malzemeler; istenilen özellikte bir malzeme elde etmek amacıyla en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme bütünüdür. Özer (2019), kompozit malzemelerin ileri bilimsel ve teknik yöntemlerle farklı üstünlükteki malzemelerin birleştirilerek daha üstün ve istenilen özelliklerde üretilen mühendislik malzemeler olduğunu belirtmiştir [2]. Özellikle havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde yüksek mukavemet ve hafif malzeme gereksinim, kompozit malzemelere, özellikle alüminyum alaşımlı kompozit malzemelere olan ilgiyi her geçen gün arttırmaktadır.

Hibrit metal matrisli kompozitler daha iyi özellikler elde etmek için birden fazla tip, şekil ve boyutta takviyenin kullanıldığı ikinci nesil kompozit malzemelerdir [3]. Alüminyum alaşımlı hibrit kompozitler, başta otomotiv sanayi, savunma sanayi, çeşitli makine parçalarının üretimi ve kapsamlı yapısal parçaların üretiminde kullanılmaktadır [4].

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi (TM) kullanılarak hibrit metal matrisli kompozit malzemeler (HMMK) üretilmiştir. Alüminyum 6061 alaşımına TiB_2 ve grafen nano parçacık ilavesiyle üstün mekanik özelliklere sahip hibrit kompozit malzemelerin takviye oranının etkileri araştırılmıştır.

Grafen takviyeli alüminyum matrisli kompozitler üzerine, özellikle son yıllarda yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Tian ve diğerleri [5] yapmış oldukları çalışmalarda, farklı katkı oranlarına sahip grafen takviyeli Al7055 alaşım kompozitleri toz metalurjisi ve spark plazma yöntemiyle üreterek sertlik değeri sonuçları üzerine çalışmışlardır. % 1'den fazla grafen katkı oranında grafenin topaklanmasıyla birlikte malzemenin sertlik dayanımının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Zhai ve diğerleri [6] çalışmalarında, Ni_3Al kompozitlere grafen nano parçacık ilavesinin tribolojik performansa etkilerini incelemişlerdir. GNP takviye elemanı eklenmiş kompozit malzemenin aşınma oranının Ni_3Al alaşımınınkinden düşük olduğunu görmüşlerdir.

Niteesh Kumar ve diğerleri [7] çalışmalarında, toz metalürjisi ve ekstrüzyon yöntemi ile üretmiş oldukları kompozitlerin, % 1 GNP takviye oranına göre saf alüminyum karşısındaki çekme dayanımını kıyaslamışlardır. Grafen takviyesiyle birlikte çekme dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir.

Tabandeh – Khorshid ve diğerleri [8], çalışmalarında TM metoduyla Al ve çeşitli oranlarda GNP takviye ederek kompozit malzemelerini elde etmişlerdir. Grafen katkısıyla birlikte sertliğin düştüğünü gözlemlemişlerdir. % 1 GNP takviyesinin ise en düşük sürtünme katsayısına ve en yüksek aşınma dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

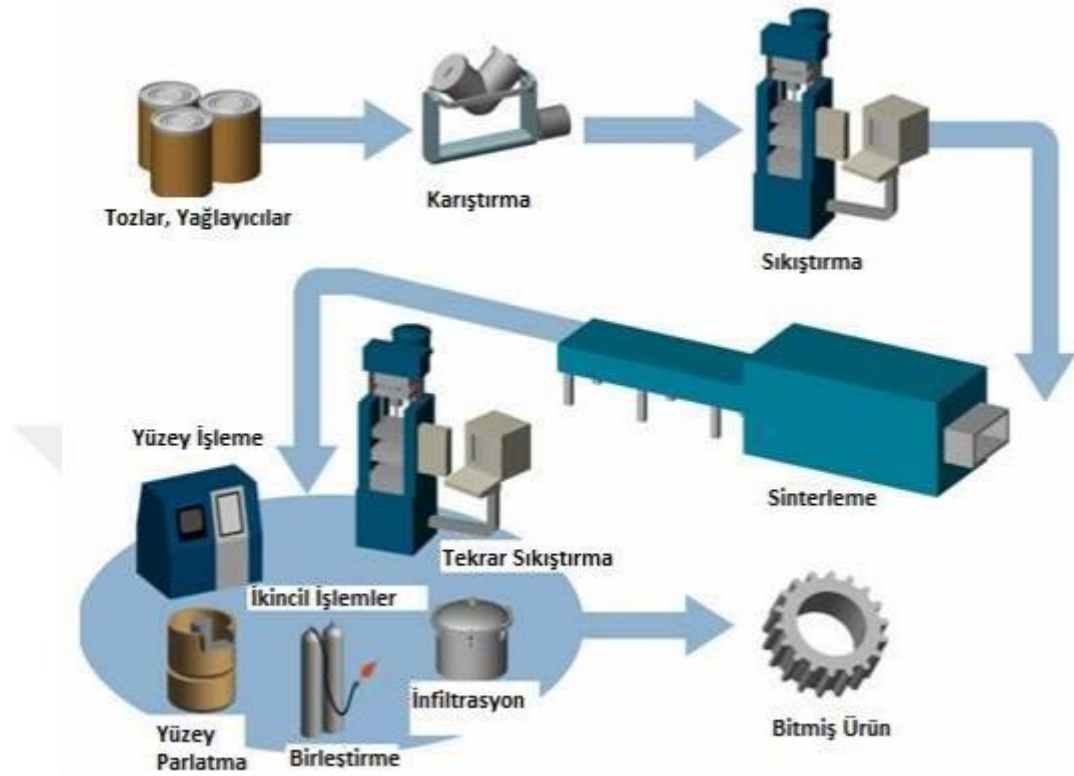
Bastwros ve diğerleri [9], yürüttükleri çalışmada grafen takviyeli nanokompozitleri toz metalürjisi metoduyla üreterek eğme dayanımlarını incelemişlerdir. Al6061 alaşımına kıyasla takviyeli kompozitin eğme dayanımının % 47 oranında bir artış yakaladığı görülmüştür.

Rashad ve diğerleri [10], çalışmalarında, grafen katkısının alüminyum kompozitlerin sertlik, çekme ve basma dayanımı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Saf alüminyum ile kıyaslandığında ağırlıkça % 0.3 grafen katkısı çekme mukavemetini ve Vickers sertliğini arttırmış, basma dayanımını azaltmıştır.

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile AA6061 ana matris malzemesine TiB_2 ve GNP takviyesi ile hibrit kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere T6 ısıtma işlemi (çökelme sertleşmesi) uygulanarak bu malzemelerin dayanım ve sertliği artırılmıştır. Daha sonra ise numunelerin hepsinin yoğunluk değişimi, mikroyapı analizi, aşınma analizi, sertlik ve çekme testleri yapılarak takviye malzemelerinin göstermiş oldukları performanslar analiz edilmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ

Toz metalürjisi, metal tozu ve ondan kütsel gereçler ile şekillendirilmiş parçalar üretme teknolojis ve sanatı olarak tanımlanmıştır [11]. Soğutulduktan sonra, sinterleme işleml ile birlikte mekanik özellikleri artırılarak mamul veya yarı mamul parça elde edilir. Üretim şeması Şekil 2.1' de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.1. Toz metalürjisi ile parça üretimi [11]

Toz metalürjisi yönteminin genel olarak avantajları;

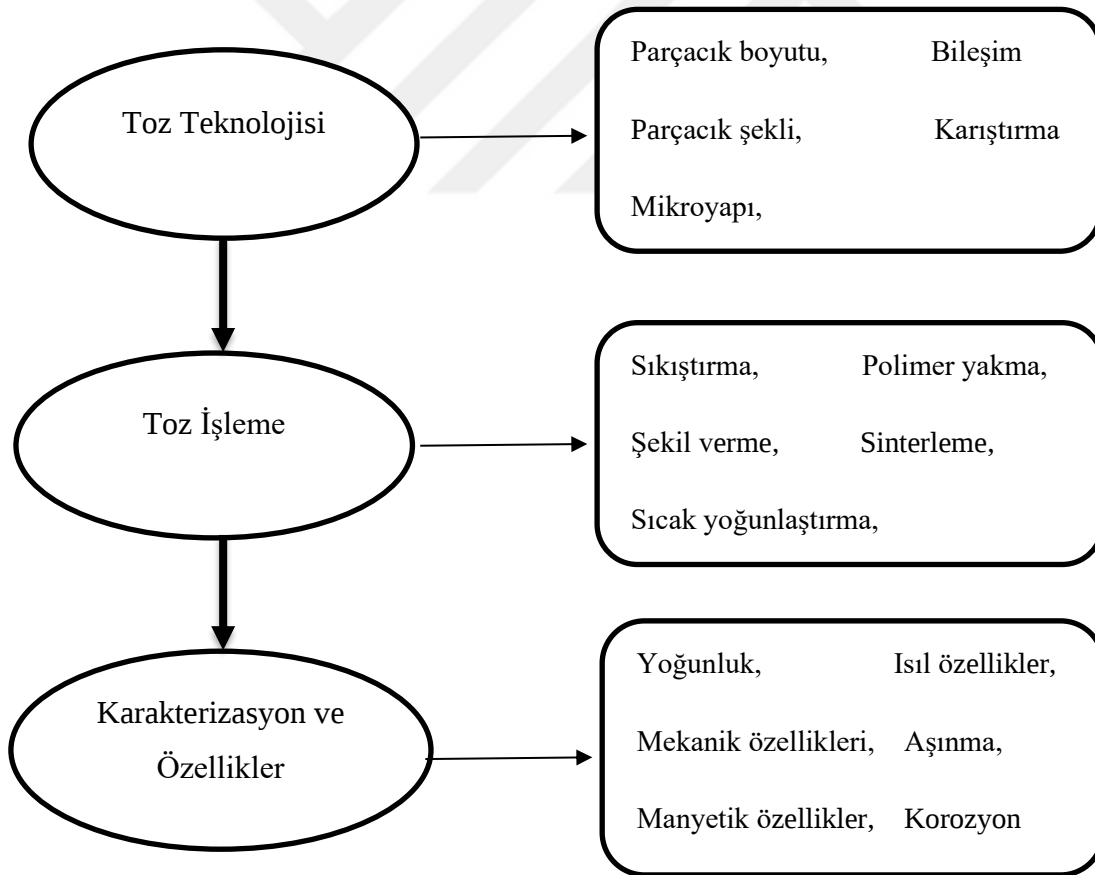
- Ekonomik üretim,
- Yüksek üretim hızı,
- Üretim aşamasında malzeme kaybının yok denecek kadar az olması,
- Yüksek yoğunluğa sahip parça üretimi,
- Parçaların gözeneklilik oranının kontrol edilebilir olması şeklindedir.

Dezavantajları ise;

- Metal tozlarının maliyetlerinin fazla olması,
- Çok büyük boyutlu parça üretiminin yapılamaması,
- Sıkıştırma ve sinterleme gibi toz metalürjisi ünitelerinin ilk yatırım maliyetlerinin fazla olması,
- Mekanik ve fiziksel özelliklerin ilave bazı işlemler olmadan sınırlı kalmasıdır.

2.1. Toz Metalürjisiyle Parça Üretimi

Üretilen parçaların özellikleri; taneciklerin şekli, boyutu, bileşimi, presleme basıncı, sinterleme süresi ve sıcaklığı gibi çok sayıda etkene bağlıdır. Parça üretim aşamaları Şekil 2.2' deki gibidir;



Şekil 2.2. Toz metalürjisinde parça üretim iş akışı

TM'de parçaların üretimi aşamaları genel olarak aşağıdaki gibidir;

- Toz hazırlama (Karıştırma ve harmanlama)
- Presleme
- Sinterleme
- Yağ emdirme ve kalibrasyon
- Toz dövme
- Çapak alma
- İkincil işlemler

2.1.1. Toz üretim yöntemleri

Tozların imalinde kullanılan teknikler, tozların birçok özelliğini belirler. Malzemelerin çoğu, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline getirilebilir. Birçok toz üretim yöntemi arasından, ticari olarak şu yöntemler kullanılmaktadır [12];

- Mekanik yöntemler
- Kimyasal yöntem
- Elektroliz yöntemi
- Atomizasyon yöntemi

Mekanik üretim yöntemleri

Mekanik üretim yöntemler kapsamında dört ana yöntem tercih edilmektedir; Öğütme, kesme, darbe ve basmadır.

Öğütme; temelde malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe meydana gelerek tozların kırılması şeklinde oluşmaktadır.

Kesme; malzemenin kesme işlemi ile parçalanmasıdır.

Darbe; malzemeye çekiç ve benzeri bir araçla vurma gibi anlık ve çok hızlı işlemlerle malzemeyi çok küçük parçalara ayırmadır.

Basma, bir basma kuvveti ile malzemenin kırılma noktasına kadar deformasyona uğratılıp toz haline getirilmesidir [13].

Kimyasal yöntem

Kimyasal yöntemle üretimde, metal oksitlerin (Bakır, demir, tungsten, nikel molibden ve kobalt), karbonmonoksit (CO) veya hidrojen (H) gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesi ile üretim gerçekleşir. [14, 15].

Elektroliz yöntemi

Toz üretiminde bir elektroliz hücresinin katodu üzerinde belirli çalışma koşullarında element tozlarının birikmesi şeklinde olan üretim yöntemidir.

Atomizasyon yöntemi

Akışkan bir metalin mekanik olarak ya da belirli bir hıza sahip sıvı veya gaz alımı ile parçalanması işlemidir. Diğer üretim yöntemlerine göre toz üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir [13].

2.2. Toz karakterizasyonu

Toz metalürjisinde üretim yaparken üretilen tozların presleme, sinterleme ve ikincil işlemler için edilmesi karakterize edilmesi gerekmektedir. Genel olarak tozların incelenmesinde iki tür teknik kullanılır;

- Fiziksel özelliklerin incelenmesi
- Kimyasal özelliklerin incelenmesi

2.2.1. Tozların fiziksel özellikleri

Fiziksel özellikler; tane şekli, tane boyutu özgül yüzey alanı, görünür yoğunluk ve akış hızına bağlıdır. Tane şekli ışın ve elektron mikroskoplarıyla belirlenir. Tane boyutu ölçümü için pek çok teknik kullanılabilir. Bunlar; elek analizi, ışık hüzmesi, X-ışınları, sedimentasyon ve mikroskopik analizdir.

Elek analizi

Metal veya ipek tellerden elek kullanılarak yapılan bir tekniktir. Eleklerden geçirilen tozlardan büyük olan parçacıklar elek üzerinde kalırken, küçük parçalar aşağı doğru hareket eder. En çok kullanılan toz tane boyutu tekniklerinden birisidir.

Işık hüzmesi

Bu teknikte akışkan bir sıvının içerisinde yüzen toz parçacıkları lazer ışınlarının sayım tekniği ile parçacık boyutunu tespit etmek için kullanılır. Lazer ışık sisteminde dedektör yardımı ile sayım yapılarak toz parçacık dağılımı ortaya çıkar.

X-ışınları

Küçük açı saçınımı olarak da bilinen bir tekniktir. Özellikle küçük tane boyutuna sahip tozların ölçümünde kullanılır.

Sedimentasyon

Bu teknikte tozlar önce bir çökme tüpünde dağıtılır. Çökme işlemi su gibi bir akışkan içerisinde yapılır. Çökme süresine bağlı olarak dibe çöken tozun hacim ve ağırlık ölçümleri yapılır.

Mikroskopik analiz

Elektron mikroskobu (SEM), geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) ve optik mikroskop gibi cihazların kullanıldığı analiz yöntemidir.

2.2.2. Tozların kimyasal özellikleri

Toz metalürjisi tekniğinde üretilen tozlar; ön karışımli, elemental ve bileşik tozlar olabilir. Bundan dolayı üretilen tozların kimyasal karakterizasyonu yapılarak safsızlık oranları belirtilmelidir. Bu durum uygun toz seçimi için çok önemlidir.

2.3. Harmanlama ve karıştırma

Harmanlama, farklı tane boyutlarındaki aynı bileşime sahip tozların karıştırılma işlemidir. Karıştırma ise, farklı kimyasal özelliklerdeki benzer veya farklı tane boyutunda olan tozları bir araya getirmek ve homojen bir dağılım sergilemek için yapılan işlemidir [15].

2.4. Tozların Sıkıştırılması

Tozun sıkıştırılabilirliğini etkileyen pek çok parametre vardır. Tozun şekli, boyutu, sertlik derecesi gibi faktörler vardır.

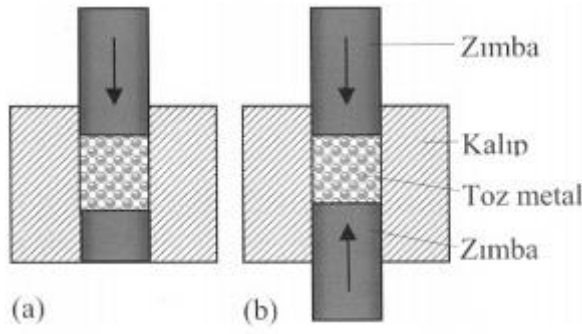
Toz sıkıştırmada kullanılan yağlayıcılar; çinko stearat, alüminyum stearat, magnezyum stearat, lityum stearat, kalsiyum stearat, stearik asit ve grafitir.

Toz sıkıştırma teknikleri aşağıdaki gibidir;

- Presleme,
- Haddeleme,
- Ekstrüzyon,
- İzostatik presleme,
- Toz kalıplamadır.

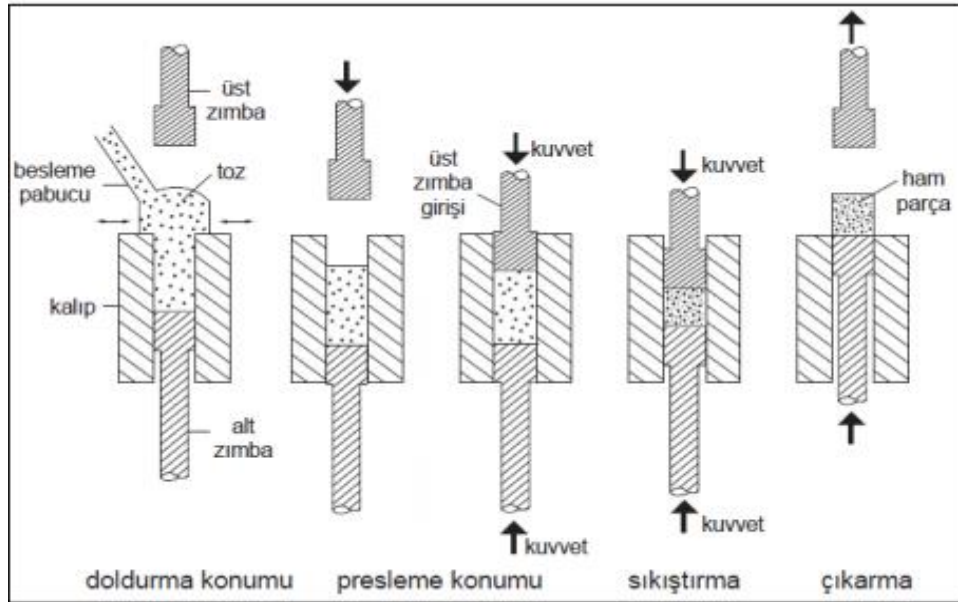
2.4.1. Presleme

En yaygın kullanılan toz sıkıştırma tekniği preslemedir. Tek eksen boyunca uygulanan basınç sonucu kalıbı dolduran tozlar preslenerek şekillendirilir. Presleme işlemi Şekil 2.3’te gösterildiği gibi çift veya tek taraflı basınç uygulanarak yapılan bir işlemdir [15].



Şekil 2.3. a) Tek yönlü sıkıştırma, b) Çift yönlü sıkıştırma [15]

Presleme tekniğinde kalıpta oluşan sıkışma sırası Şekil 2.4' te verildiği gibidir.



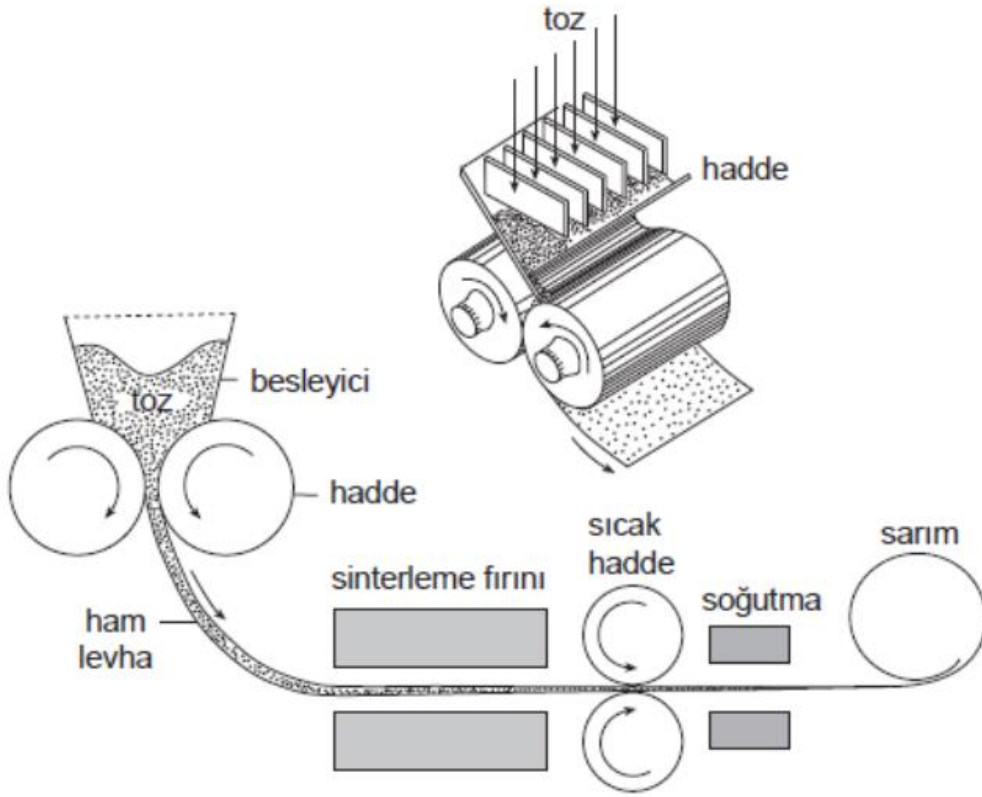
Şekil 2.4. Presleme tekniğindeki kalıp sıkıştırma aşamaları [15]

Presleme işleminden önce tozların sahip olduğu yoğunluğa görünür yoğunluk denir. Tozların presleme sonrasında yoğunluğuna ise ham yoğunluk adı verilir.

2.4.2. Haddeleme

Haddeleme yöntemi ile gevşek halde bulunan tozlar iki veya daha fazla olan silindir arasından geçirilerek sıkıştırılıp şekillendirilir. Çubuk, levha, şerit gibi basit geometriye sahip parçaların üretiminde kullanılan bir tekniktir.

Haddeleme işleminin aşamaları Şekil 2.5’ teki gibidir.

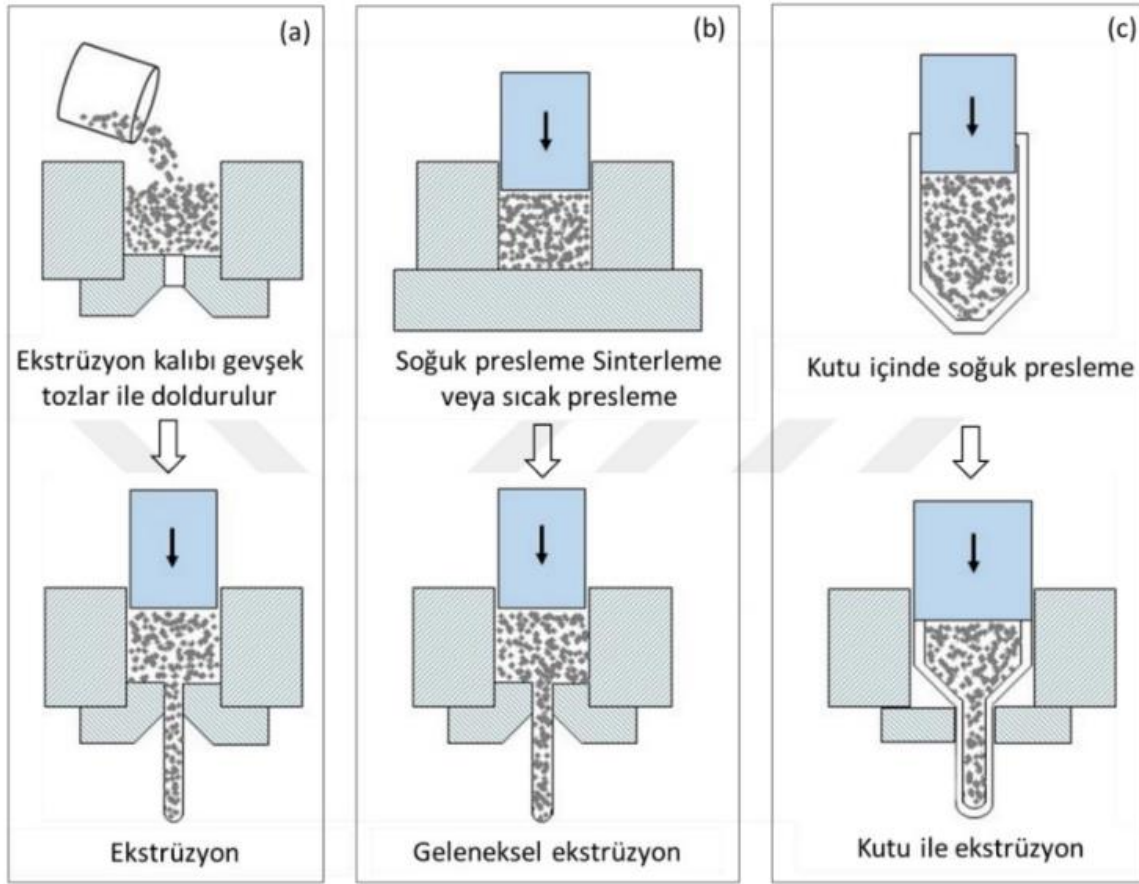


Şekil 2.5. Haddeleme işlem aşamaları [17]

2.4.3. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon işleminde, tozlar ısıtılmış ekstrüzyon kalıbına gevşek şekilde doldurulur ve matrizen bastırılır. Ardından soğuk pres uygulanarak yoğunlaştırılır. Daha sonra buradan alınan sıkıştırılmış parça sıcak ekstrüzyona tabi tutulur (Şekil 2.6). Bu teknik, tam yoğun toz metalürjisi parça üretimine uygun bir tekniktir.

Ekstrüzyon tekniği ile çubuk, bal peteği, tüp gibi değişik şekil ve uzunluklarda parça üretimi mümkündür.

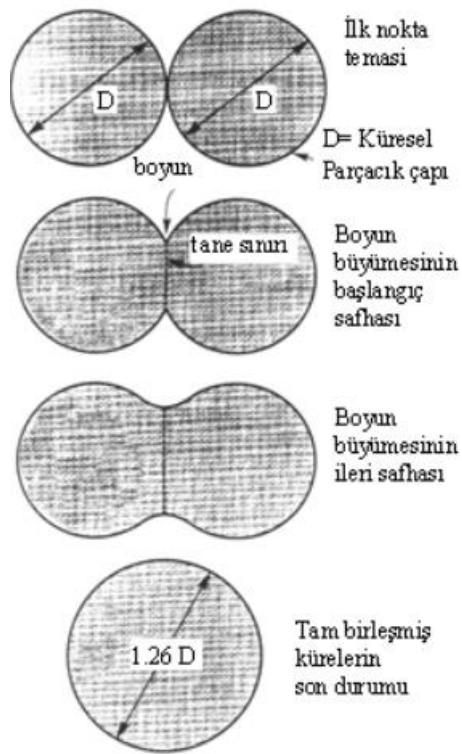


Şekil 2.6. Ekstrüzyon işlem aşamaları [15]

2.4.4. Sinterleme

Sinterleme, kalıp içerisinde çıkarılan yoğunluk kazanmış olan parça ergime sıcaklığı altında ısıya maruz bırakarak birbiri içerisinde bağ oluşturarak tozların mukavemet ve şekil kazanma işlemidir. Bu teknikte, ısı altında bağlar güçlenir, malzeme istenilen mukavemeti, dayanımı ve özellikleri kazanmış olur [14]. Sinterleme modeli Şekil 2.7' de gösterilmiştir.

Sinterleme sonrasında elde edilen ürünler, boyutsal olarak son şekle sahip oldukları için genellikle ek bir işleme tabi tutulmaz. Ancak bazı durumlarda talaşlı işlem gerekebilir [18].



Şekil 2.7. Sinterleme model gösterimi [19]

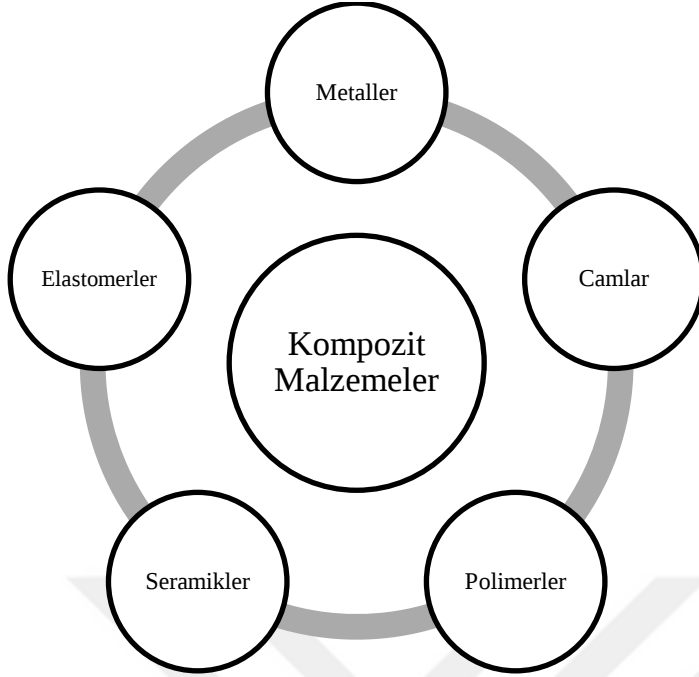
3. KOMPOZİT MALZEMELER

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte aynı anda birden fazla mekanik özellikleri barındıran, günümüz toplumunun ihtiyaçlarını karşılayabilecek yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Kompozit malzemeler bu ihtiyaç sonucu doğan yeni nesil malzemelerdendir. Malzemeye birden farklı özelliği tek malzeme içerisinde toplamak veya ilave özellik kazandırmak amacıyla iki ya da daha fazla malzemenin karıştırılması veya birleştirilmesiyle elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denir. Mazumdar, kompozit malzemeyi, fiziksel form veya kimyasal bileşim bakımından farklılık gösteren iki veya daha fazla mikro bileşenin bir kombinasyonu olarak tanımlar [20]. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler çoğunlukla özelliklerini korumaktadır [21]. Kompozit malzeme üretimi ile aşağıda verilen birkaç özelliğin bir araya getirilmesi amaçlanır;

- Yüksek sıcaklıkta çalışma,
- Isıl iletkenlik,
- Akustik,
- Ekonomiklik,
- Estetik görünüm,
- İmalat kolaylığı
- Yüksek kimyasal direnç,
- Hafiflik,
- Titreşim sönümleme,
- Mukavemet

Kompozit malzemeler, matris ana fazı ve içine dağılmış takviye elemanından oluşur. Matris elemanı uygulanan bir kuvvet ile ara yüzey bağı vasıtasıyla takviye edici faza iletir. Böylece takviye elemanını planlanan şekilde tutarak tahribatı önler. Takviye elemanı, üretim esnasında matris elemanının tane büyüklüğünü kontrol eder ve iletilen yükleri paylaşarak karşı koyar [20].

Kompozit malzemelerin günümüzde pek çok çeşidi bulunmaktadır. Malzeme cinsine göre; metal, seramik, polimer, cam ve elastomer olarak sınıflandırılabilir. Şekil 3.1' de Kompozitlerin üretildikleri malzeme çeşidine göre sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.1. Kompozitlerin üretildikleri malzeme sınıfları [21]

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

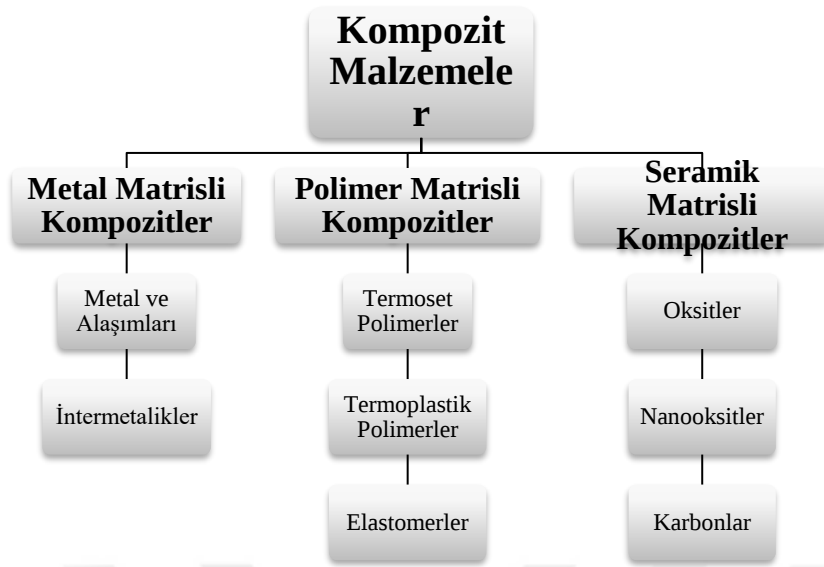
Kompozit malzemelerin birden çok sınıflandırma şekli mevcuttur. Sınıflandırma yapılırken malzeme bileşenlerine göre; metal – organik veya metal – inorganik, bileşen fazlarının karakteristik özelliklerine göre matris veya tabakalı yapılar, bileşen fazlarının dağılım şekline göre sürekli ya da süreksiz dağılımlı, fonksiyonlarına göre elektriksel veya yapısal olarak pek çok sınıflandırma yapılabilir [22 - 24].

3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Kompozit malzemeleri oluşturan matris malzemesinin cinsine bağlı olarak yapılan sınıflandırmadır. Kompozit malzemeler matris malzemesine göre üç farklı şekilde sınıflandırılırlar;

- Metal matrisli kompozitler
- Polimer matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler

Sınıflandırma Şekil 3.2.' de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması

3.2.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMK) malzemeler hafif olmaları, kolay üretilebilirliği ve iyi bir kimyasal dirence sahip olmalarından dolayı tercih edilirler. Matris malzemesi olarak termoset ve termoplastikler kullanılmaktadır. Termoset olarak, epoksi ve polyeater, termoplastik olarak ise termoplastik polyeater, poliamid, politetrafloretilen, polietilen kullanılmaktadır.

PMK malzemeler diğer kompozit malzemelere göre daha ekonomik olduğundan endüstride yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Örnek olarak; spor ve tarım malzemeleri, uçak ve helikopter parçaları gibi.

3.2.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozit malzemeler (SMK), genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalarda kullanılır. Malzemeler, sert ve kırılgan yapıdadırlar. Düşük kopma ve tokluğa sahip olup, termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Bunlara karşın düşük yoğunluk, yüksek çalışma sıcaklığı ve yüksek elastite modülüne sahiptirler. Elektriksel olarak çok iyi yalıtkan özellik gösterirler.

3.2.3. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), ana yapıyı metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak seramik ya da organik yapıda bir malzemenin kullanıldığı kompozitleridir. Malzemelerin kullanılmasını zor olduğu, çok yüksek kritik ısı değeri olan yerlerde kullanılmak üzere tercih edilen malzemelerdir. İyi süneklik ve tokluk özelliğine sahip olan metallerle, yüksek mukavemet ve elastite modülüne sahip seramik malzemelerin bir araya gelmesi ile oluşurlar. Diğer malzemelere karşı sağladıkları üstünlükler aşağıda sıralanmıştır;

- Yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modülü,
- Yüksek tokluk ve darbe özellikleri,
- Sıcaklık değişimleri veya ısıl şoklara karşı düşük duyarlılık,
- Yüksek yüzey dayanımı ve yüzey hatalarına karşı düşük duyarlılık,
- Yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik,
- Değişik tekniklerle şekillendirilebilme ve işlenebilme özellikleri

Metal matrisli kompozit malzemeler, uzay sanayisi başta olmak üzere, otomotiv sanayi, makine tasarım ve test donanımında, spor malzemeleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar sonucunda her geçen yıl üretim teknolojileri yenilenmekte ve gelişmektedir. Üretim yöntemleri metalik matrisin üretim esnasındaki sıcaklığına göre sınıflandırılmaktadır. Üretim yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır [25].

- Sıvı faz üretim yöntemleri,
- Katı faz üretim yöntemleri,
- İki faz (sıvı-katı) üretim yöntemleri,
- Biriktirme üretim yöntemleri,
- In-situ üretim yöntemleri

Sıvı faz üretim yöntemleri

Sıvı faz üretim yöntemi, ergitilmiş matris malzemesinin takviye malzemeler ile karıştırılarak bağ kurması işlemidir. Üretimin günümüzde katı hal yönteminden daha ekonomik, avantajlı ve teknik öneme sahip olduğu bilinmektedir ve bu nedenle tercih edilmektedir.

Kompozit malzemelerin sıvı faz üretim yöntemi ile üretimi genel olarak karıştırılmalı döküm, sıkıştırılmalı döküm, basınçlı döküm, yarı katı döküm, infiltrasyon ve püskürtme çökmesidir.

Katı faz üretim yöntemleri

Katı faz üretim yöntemlerinde matris ile takviye elemanı arasındaki kimyasal etkileşim çok azdır. Bu yöntemde matris ile takviye malzemesinin birbiriyle tam olarak karıştırılması gerekmektedir.

Basit olarak incelendiğinde, bu yöntem matris tozunun takviye elemanı ile karıştırılması ve karışımın klasik toz metalürjisi yöntemleri ile (Soğuk presleme ve sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme) numunesi elde edilmesini amaçlar. Katı faz üretim yöntemleri arasında bulunan ve toz metalürjisi dışından sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem de difüzyonla bağlanma yöntemidir.

İki faz (Sıvı – katı) üretim yöntemleri

İki faz üretim yöntemleri, matris elemanının faz diyagramında hem katı hem sıvı bölgede bulunduğu matris ve takviye elemanının karıştırılması işlemidir. Bu üretim yöntemleri; compo döküm, ospray biriktirme ve çok fazlı malzemelerin değişken birleştirilmesidir.

Biriktirme üretim yöntemleri

Biriktirme üretim yöntemleri, metal matrisli kompozit malzeme üretimi için kompozit formunu oluşturmak amacıyla fibelerin matris malzemesi ile kaplanması ve yapısal şeklini sağlamak için difüzyon bağlama işleminden oluşmaktadır. Bu yöntemler ile üretilen

kompozit malzemeler döküm yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerden daha homojendir.

Bu üretim yöntemleri; elektrokaplama, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme, spreyle biriktirme, daldırma ile kaplama, spreyle biçimlendirmedir.

In-situ üretim yöntemleri

In-situ üretim yöntemleri, ergimiş metal ile kullanılan gaz arasındaki reaksiyonun kontrolü ve takviye elemanlarını oluşturmak amacıyla bileşenler arasında endotermik reaksiyonları oluşturma olmak üzere iki bölümden oluşur. Bu işlemde kullanılan yöntemler; ekzotermik reaksiyon, ötektiklerin yönlü katılaştırılması ve tercihli yönlendirilmiş metal oksidasyonudur.

3.3. Hibrit Kompozit Malzemeler

Hibrit kompozit malzemeler, metalografik ölçekte makroskobik yapıdaki melezleşen malzemelere denir [26]. Makroskobik yapının hibritlenmesi materyallerin kombinasyonu veya karışımın amacı olduğu için bu malzemeler yapısal olarak hibritleşmiş malzemeler olarak adlandırılır.

Nanokompozitlerin, nanometre ölçekli bir karıştırma yapısına sahip olması amaçlanmıştır. Bu nedenle, nanokompozitler yapısal olarak hibritleşmiş malzemelerdir. Bazı nanokompozitlerin, bileşen materyalleri arasındaki arayüzdeki belirli kimyasal bağlara dayanan mükemmel özellikleri bulunmaktadır. Bu durumda karışımın amacı, bileşik yapının oluşturulması değil, yeni kimyasal bağlar oluşturulmasıdır.

Hibrit kompozitler özellikle, medikal sanayinde, otomotiv, yapı-inşaat, uzay ve havacılık, savunma sanayi, rüzgar türbin kanatları ve gövde parçaları, güneş kolektörleri, lityum iyon piller, fotovoltatik hücreler, biyosensörler ve tekstil sanayinde kullanılır.

3.4. Kullanılan Matris Elemanları

3.4.1. Bakır (Cu)

Bakır, iyi ısı ve elektrik iletkenliği, süneklilik ve korozyon direncinin yüksek olması, imalatının kolay olması ve düşük maliyeti nedeniyle bir çok uygulama alanında çelik ve alüminyumdan sonra yaygınca kullanılmaktadır. Bakır matrisli kompozit malzemeler, düşük yoğunluklu olmaları, yüksek yorulma mukavetmeleri ve iyi korozyon dirençleri sayesinde ana matris malzemeleri olarak tercih edilmektedir [27 – 30].

3.4.2. Alüminyum

Alüminyum (Al), 19. Yüzyılda İngiltere’de ortaya çıkmıştır. Endüstride kullanımı özellikle sanayi devriminden sonra yaygınlaşmıştır.

Şenel ve arkadaşları (2015) belirttiğine göre, Al demirden sonra dünyada en fazla kullanılan metaldir. Al’ nin hafif olması, şekillendirilebilirliğinin yüksek olması, ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması tercih edilmesindeki en büyük etkindir [31]. Alüminyum ve alaşımları otomotiv, havacılık, uzay ve inşaat sektörü gibi büyük sektörlerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Alüminyum, silisyumdan sonra en fazla bulunan üçüncü element olup, doğada bileşik halinde bulunmaktadır. Alüminyumun en önemli hammaddesi boksittir. Dünya boksit rezervi ortalama 38 milyar ton olup, ülkemizin boksit rezervi 68.91 milyon tondur [32, 33]. Alüminyumun özellikleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Alüminyumun özellikleri [34]

Özellik	Değer
Periyodik tabloda gösterim	Al
Atom numarası	13
Atom yarıçapı	1,82 Å
Kristal yapısı	YMK
Atom ağırlığı	26,98 g/mol
Yoğunluk	2,69 g/cm ³
Ergime sıcaklığı	660,2 C°
Özgül ısı	0,9 JK ⁻¹ /g
Isıl iletkenliği	237 WK ⁻¹ /m
Elastisite modülü	68,3 GPa
Sertlik	21 HB
Çekme dayanımı	<80 MPa
Elektrik iletkenliği	37,6 mΩ ⁻¹ /mm ²

Üretim yöntemine alüminyum ürünleri;

- Hammadde (Külçe) ve yarı ürünler (Profil, çubuk, lama),
- Yassı ürünler (Levha şerit, folyo),
- Döküm ürünleri,
- İletken ürünlerdir.

Alüminyum kullanımı çok sık olmasının yanı sıra geri dönüşümün olması sebebiyle geleceğin malzemesi olarak adlandırılmaktadır [35]. ABD Savunma Bakanlığına Bağlı Savunma Lojistik Ajansı (Defence Logistics Agency)'nın yayınladığı Stratejik Metaller Listesi'ne göre alüminyum ve alüminyum alaşımları ilk sırayı almaktadır [36].

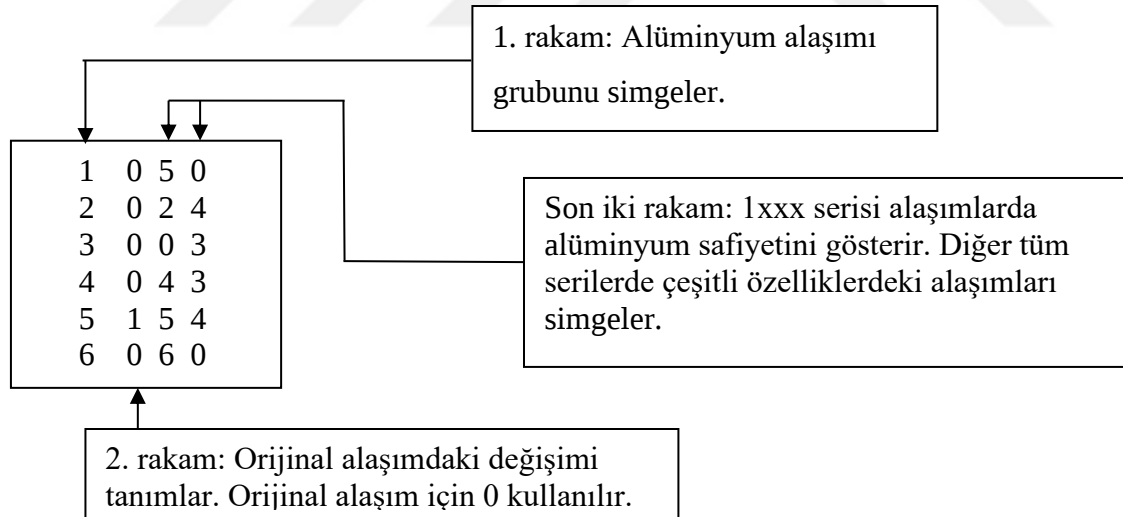
Alüminyum günümüz Dünyasında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedenleri; hafifliği, kolay işlenebilirliği, dış etkenlere karşı dayanıklılığı, yüksek korozyon direnci, iyi elektrik ve ısı iletkenliği ve ürün çeşitliliğinin fazla olmasıdır [37].

Alüminyum alaşımları

Alüminyum doğada kararlı bir bileşik olan alüminyum oksit halinde bulunur ve indirgenerek alüminyum metali elde edilir [11].

Kompozit yapıda, alüminyum ve alaşımları, yüksek korozyon direnci, iyi şekillendirilebilirlik, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, termal ve elektriksel iletkenliğe sahip olması sebebiyle ana matris malzemesi olarak sıkça tercih edilmektedir [38 - 40]. Alüminyum alaşımlarının düşük dayanım, sertlik ve aşınma dayanımı gibi dezavantajlarından dolayı alümina, silisyumkarbür, borkarbür, silisyumoksit, titanyumoksit gibi takviye malzemeleri alüminyum esaslı kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [38].

Saf alüminyuma mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebilmek için içerisine alaşım elementleri katılarak çeşitli alüminyum alaşımları elde edilebilir. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması yapılırken Alüminyum Topluluğu'na (Aluminum Association) ait sınıflandırma sisteminin kullanımı yaygındır (Çizelge 3.2 ve 3.3). Sınıflandırılma için dört rakamdan oluşan bir kodlama sistemi kullanılır. Bu rakamlardan ilki, alüminyuma ilave edilen ana alaşım elementini, ikincisi orijinal alaşımdaki değişimi, son iki rakam ise alüminyum içerisinde bulunan alaşımları simgeler. Şekil 3.4' te alüminyum alaşımlarının sınıflandırılma kodları gösterilmiştir.



Şekil 3 3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [39]

Çizelge 3.2. ABD Normlarına göre alüminyum alaşımların gösterimi [41]

ABD normlarına göre adlandırma	Alaşımlar
1xxx	Al oranı % 99.0 veya daha fazla)
2xxx	Bakırlı alüminyum alaşımı
3xxx	Manganezli alüminyum alaşımı
4xxx	Silisyumlu ve bakır veya magnezyum
5xxx	Magnezyumlu alüminyum alaşımı
6xxx	Silisyum ve magnezyumlu alüminyum alaşımı
7xxx	Çinkolu alüminyum alaşımı
8xxx	Demir ve silisyumlu alüminyum alaşımı
9xxx	Kullanılmayan seriler

Çizelge 3.3. ABD normlarına göre alüminyum alaşımların kullanım alanları [41]

ABD normlarına göre adlandırma	Kullanım alanları
1xxx	Elektrik ve kimya endüstrisinde
2xxx	Yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe
3xxx	Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarında
4xxx	Kaynak işlemlerinde, levha üretiminde, otomotiv endüstrisinde
5xxx	Gemi inşa sanayinde korozyona karşı yüksek direnç gösteren parçaların imalatında
6xxx	Ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında
7xxx	Havacılık parçaları ve yüksek dayanım istenen yerlerde
8xxx	Uçak ve uzay araçları parçalarında
9xxx	Kullanım alanı bulunmamaktadır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları günümüz endüstrisinde;

- İnşaat, elektrik, elektronik, karayolu ve petrol endüstrisinde,
- Sıfırın altı sıcaklıklarda çalışacak yapı ve donanımlarda,
- Gıda, ilaç, kimya ve atom endüstrisinde,
- İçten yanmalı motorlarda,
- Otomotiv endüstrisinde,
- Motor bloklarının, pistonların ve segmanların üretiminde,
- Demiryolu donatımlarında,
- Denizcilik ve gemi inşa sanayinde,
- Havacılık ve uzay çalışmalarında,
- Savunma sanayi sektöründe,
- Yataklama, alet, takım, cihaz ve diğer mekanik uygulamalarda,

- Ev araçları ve mobilya endüstrisinde,
- Ambalaj işlemleri, boya ve boya malzemeleri sanayinde,
- Metalurji ve kimyasal reaksiyonlarda

Diğer mühendislik malzemelerine göre kullanımını daha cazip şekilde devam etmektedir.

Alüminyum alaşımların gruplandırılması

Alüminyum alaşımları üretim şeklinde göre dövme alüminyum alaşımları ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki bölüme ayrılır.

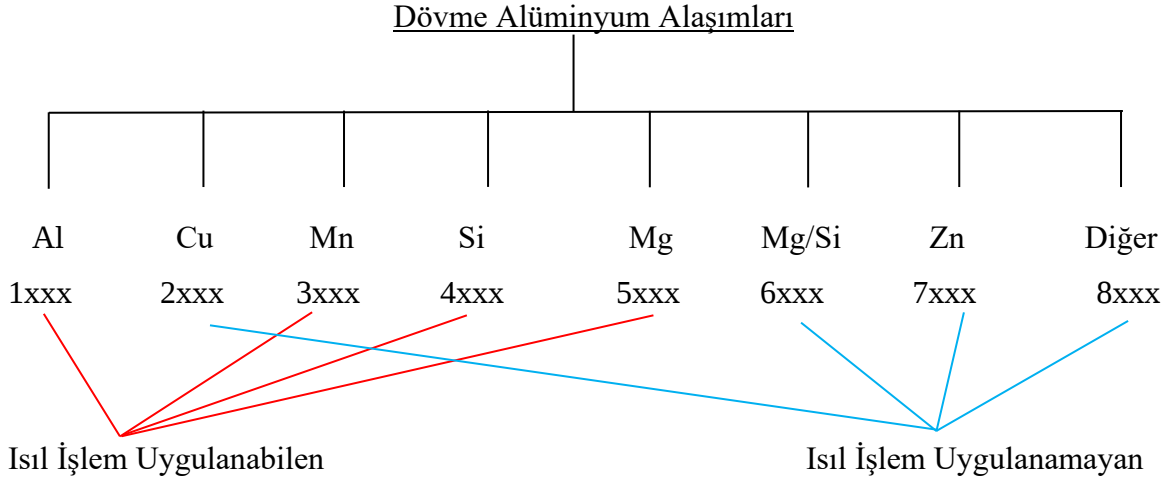
Dövme alüminyum alaşımları; plastik deformasyon ile şekil alabilen Al alaşımlarıdır. Döküm Al alaşımlarından farklı olarak mikro yapı ve kimyasal bileşime sahiptirler.

Döküm alüminyum alaşımları ise: sıvı olarak kolayca dökülüp, şekil alabilen alüminyum alaşımlarıdır.

Bu iki grup Al alaşımları ısıtılabilir ve ısıtılabilir Al alaşımları olarak iki alt gruba ayrılırlar. Isıtılabilir, alüminyum alaşımların dayanımlarını artırmak için kullanılır.

Dövme alüminyum alaşımları

Plastik deformasyon ile şekil değiştirebilen Al alaşımlarıdır. Büyük bir kısmına ısıtılabilir işlem uygulanabilir. Bunlar; 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serisi olanlardır. Isıtılabilir işlem uygulanamayan dövme alüminyum alaşımları; 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serisi alaşımlardır. Bu alaşımlar sadece plastik deformasyon ile sertleştirilebilirler. Dövme alüminyum alaşımlarının çeşitleri Şekil 3.5’ te gösterildiği gibidir.

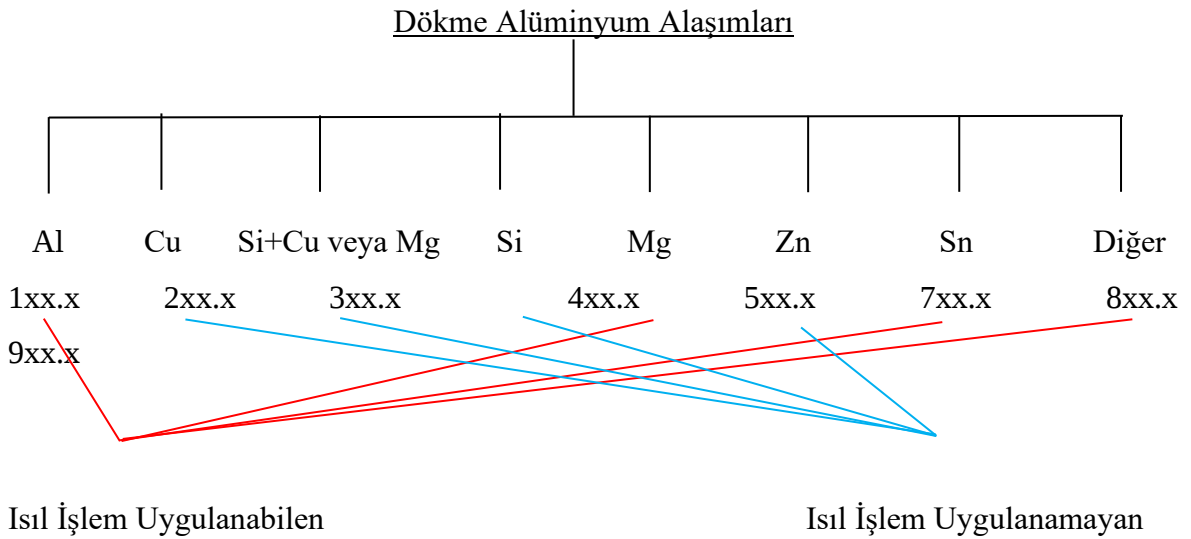


Şekil 3.4. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [41, 42]

Dökme alüminyum alaşımları:

İyi bir dökümün kolay bir şekilde bir alaşımdan elde edilmesine dökülebilirlik denir.

Döküm alüminyum alaşımlarının pek çoğu ötektik reaksiyon gösterebilen silisyum içerir. Silisyum iyi akışkanlık ve dökülebilirlik sağlamaktadır. Dökme alüminyum alaşımlarının çeşitleri Şekil 3.6' da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.5. Dökme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [42, 43]

Alüminyum Alaşımlara Uygulanan Isıl İşlemler

Alüminyum alaşımlara yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilmektedir. Yaşlandırma; Al alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirir, korozyon ve ısıl iletkenliklerini de değiştirmektedir.

Yaşlandırma üç aşamada gerçekleşmektedir. Çözeltiye alma, su verme ve çökeltme şeklindedir. Aşırı doymuş katı fazdan yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında mikro yapı içerisinde çok ince çökelti fazının dağılımı mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynar. Mikro yapı içerisinde oluşabilecek çökelti fazı doğal olarak gerçekleşebileceği gibi yapay olarak da gerçekleşebilir. Al alaşımları genellikle yapay yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulur. Uygulanan ısıl işlem türleri ve kodları Çizelge 3.4’ te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlem türleri [44]

Kod	Uygulanan Isıl İşlem
F	Üretilmiş hali
O	Tavlama
H	Soğuk şekillendirme
T	Yaşlandırma
T1	Üretim sıcaklığında soğutma ve doğal yaşlandırma
T2	Üretim sıcaklığında soğutma, soğuk şekil verme ve doğal yaşlandırma
T3	Çözeltiye alma, soğuk şekil verme ve doğal yaşlandırma
T4	Çözeltiye alma ve doğal yaşlandırma
T5	Üretim sıcaklığında soğutma ve yapay yaşlandırma
T6	Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma
T7	Çözeltiye alma ve aşırı yaşlandırma
T8	Çözeltiye alma, soğuk şekil verme ve yapay yaşlandırma
T9	Çözeltiye alma, yapay yaşlandırma ve soğuk şekil verme
T10	Üretim sıcaklığında soğutma, soğuk şekil verme ve yapay yaşlandırma

6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri

AA6xxx serisi olan alüminyum alaşımlar, yüksek oranda magnezyum ve silisyum içerirler. Yapı içerisinde bulunan Mg, Si, Fe, Cu, Mn, Zn vb. elementlerin oranları kullanım alanlarına göre farklı özelliklerde alaşım üretimini sağlarlar.

2xxx ve 7xxx alaşımları kadar dayanıklı olmamalarına rağmen iyi şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik ve iyi korozyon direncine sahiptir [44, 45].

AA6061 alüminyum alaşımı

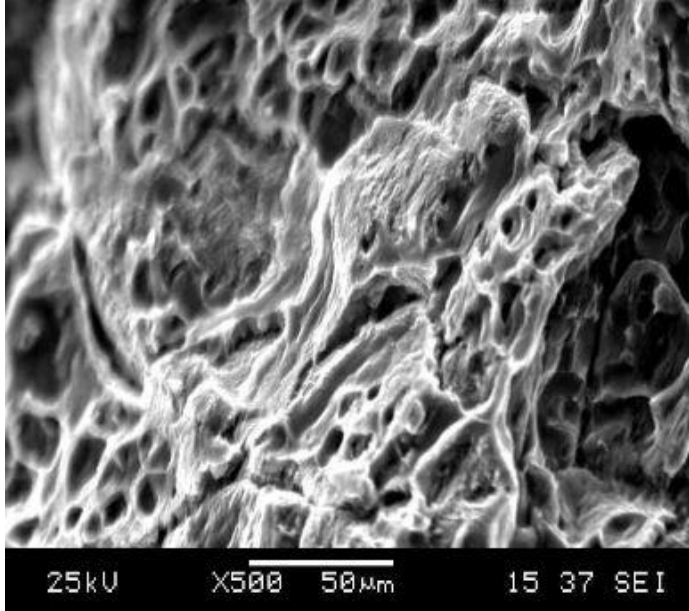
6xxx serisi alüminyum alaşımları içerisinde AA6061 alaşımı en sık kullanılanlardan biridir. Orta derece dayanıma sahip bir alaşımdır. Çok iyi korozyon direnci ve kaynaklanma özelliği olan bir alaşımdır. Kimyasal bileşim Çizelge 3.5’ te verilmiştir.

Çizelge 3.5. AA6061 alüminyum alaşımın yüzde bileşimi [46]

Al	Si	Mg	Cr	Cu	Fe	Zi	Ti	Mn
97.9	0.7	0.9	0.25	0.30	0.6	0.2	0.1	0.05

Orta seviyede yorulma dayanımına sahiptir. T4 (Doğal yaşlandırma işlemi olarak ifade edilen bu süreç, çözeltiye alma ve su vermenin ardından oda sıcaklığında yaşlandırma işlemidir) ve T6 (Çözeltiye alma ve su vermenin ardından oda sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi, zirve yaşlandırma işlemidir) yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanabilir.

En sık kullanım örneklerinin görüldüğü yerler; gemi inşası, askeri ve normal köprü inşası, uzay sanayi, kamyon çerçeveleri, taşımacılık endüstrisi ve perçinler sayılabilir.



Resim 3.1. AA6061 tozuna ait SEM görüntüsü [46]

Resim 3.1’ de verilen AA6061 tozunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde alüminyum tozlarının süngerimsi bir morfolojik yapıda olduğu gösterilmiştir.

AA6061 alaşımı ulaşım, inşaat, gemi inşa ve savunma sanayi gibi endüstriyel çalışma sahalarında kullanılmaktadır.

3.5. Kullanılan Takviye Malzemeleri

3.5.1. Alüminyum oksit (Al_2O_3)

Yüksek ekme, basma dayanımı ve elastik modüle sahiptir. İyi korozyon direnci nedeniyle genellikle aşındırıcı olarak kullanılmaktadır [47]. Otomotiv sanayi, motor teknolojilerinde, ve kesici takım malzemesi olarak tercih edilmektedir.

3.5.2. Bor karbür (B_4C)

Bor karbür, düşük yoğunluk, iyi ısıl kararlılık ve yüksek rijitlik nedeniyle alüminyum alaşım kompozitlerin üretiminde kullanılan takviye malzemelerinden biridir [41, 42]. Bor karbür, SiC, Al_2O_3 gibi takviye malzemelerine göre sertliği daha yüksektir fakat maliyet yönünden diğerlerine göre daha pahalı olması sebebiyle yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. B_4C sürtünme direnci, nötron absorpsiyonu ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalar için yüksek avantajlara sahiptir. Seramik malzemeler içerisinde hafif olan malzemedir. Bundan dolayı kompozit malzemenin kütlesini değiştirmeden sadece mekanik olan özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek kullanılabilir. B_4C ' nin dezavantajı, malzemenin sertliğinin yüksek olmasına bağlı olarak kompozit malzemenin ekstrüzyon olarak üretim yapmasına sınırlama getirmesidir [48 - 50].

3.5.3. Silisyum karbür (SiC)

Silisyum karbür, mekanik ve tribolojik özellikleri sebebiyle özellikle alüminyum kompozit üretiminde takviye elemanı olarak tercih edilen bir malzemedir. İyi mukavemeti, sert olması, yüksek ısı iletkenliği, yüksek aşınma direnci ve ekonomik olması sebebiyle takviye elemanı olarak tercih edilmektedir. Askeri ve güvenlik amaçlı zırh yapımında, yüksek aşınma direnci olan nozul, dökümün yapılacağı filtreler, dökümde kullanılacak olacak potalar ve fırında kullanılacak seramik malzemelerde SiC takviyeli alaşımlı kompozit malzeme kullanılır [48, 51]

3.5. Titanyum diborür (TiB₂)

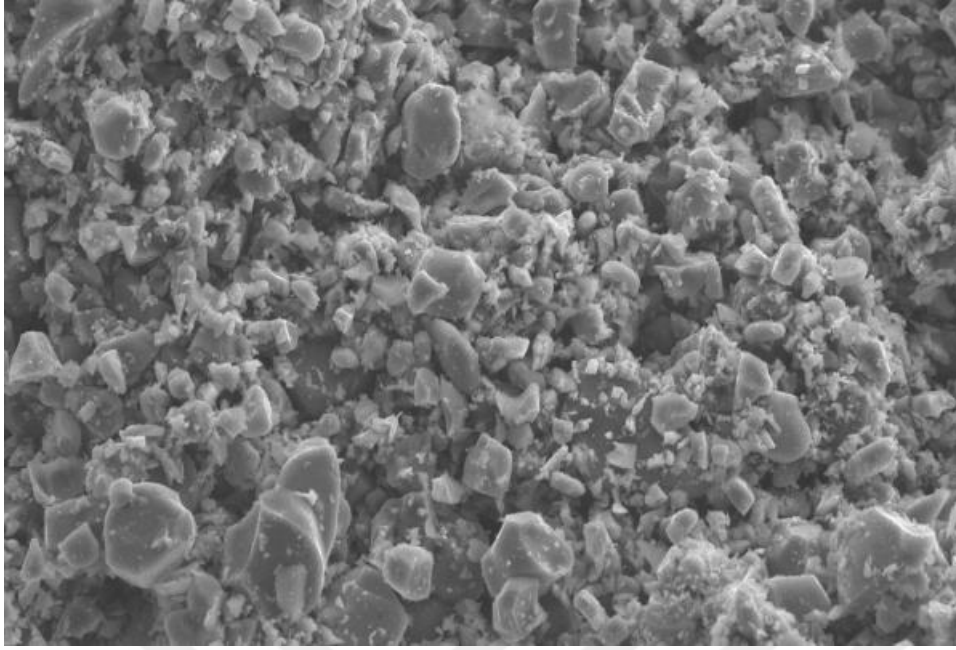
Titanyum diborür (TiB₂) bir geçiş metali borürü olup, TiB₂ IV-VI grubundan geçiş metali benzeri refrakter boritlerin tipik bir temsilcisidir [52, 53].

Geçiş metallerinin diborürleri yüksek sertlik, mukavemet ve yüksek ergime sıcaklığının yanında yüksek oksidasyon direnci de gösterirler. Titanyum diborürün ise bu özelliklerin yanında ıslanabilirliğinin çok iyi olduğu, yüksek sıcaklıklarda daha mukavemetli, daha iyi kırılma tokluğuna ve daha yüksek sertliğe sahiptir [54 – 57]. Çizelge 3.6’da titanyum diborürün özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.6. Titanyum diborürün özellikleri [58, 59]

Özellikler	Değer
Kimyasal formül	TiB ₂
Kristal yapısı	Hegzagonal
Renk	Gri
Mol ağırlığı	69.54 g/ mol
Yoğunluk	4.52 g/cm ³
Ergime sıcaklığı	2920 °C
Sertlik	25 GPa
Vickers sertliği	3370 HV
Termal iletkenliği	24 ~ 26.3 W/ m.K
Elektrik direnci	9 10 ⁻⁸ Ω.cm
Çekme mukavemeti	127 MPa

Titanyum diborür, yüksek sertliği, young modülü ve yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemeti ve kimyasal kararlılığıyla aşınmaya dayanıklı kısımlar ve kesici takım uçlarının üretiminde, kumlama ve sert partiküllerin püskürtüldüğü nozullarda alaşımlandırma ve tane boyutlarının modifikasyonlarında da kullanılmaktadır (Resim 3.2). Ayrıca askeri uygulamalarda, hem personel hem de araçlar için seramik zırh olarak, metal ve seramik matriks kompozitlerde dispersan olarak, fiber optik kabloların koruma altlığı ve refrakter malzemesi olarak uygulama alanı bulmaktadır.

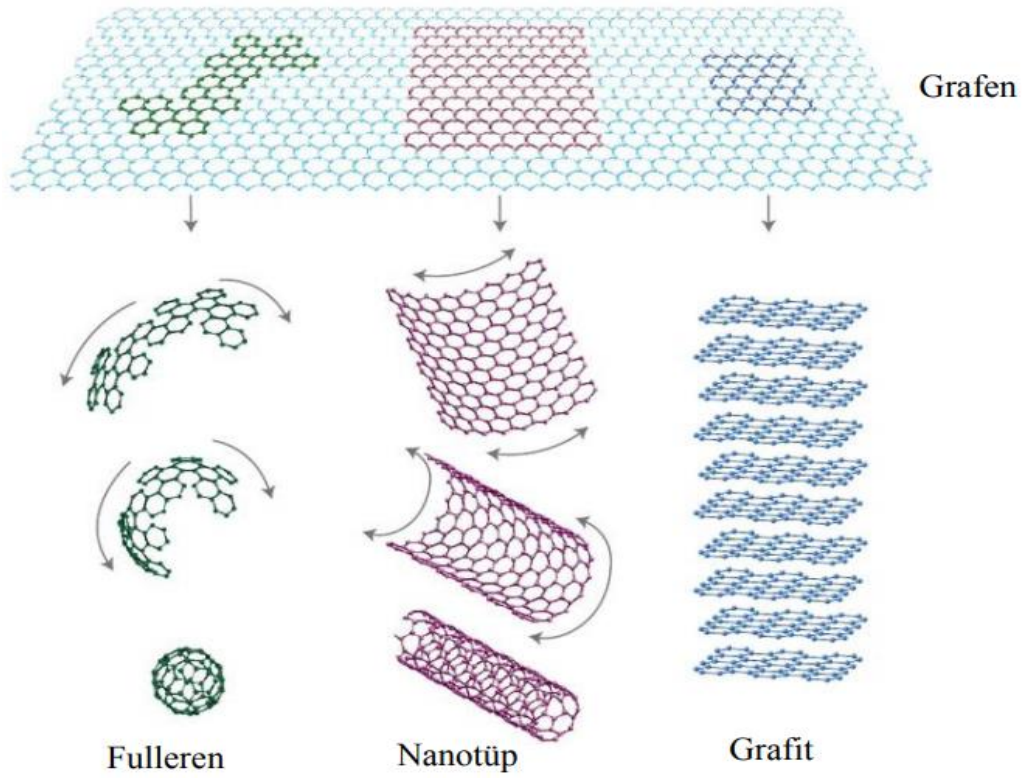


Resim 3.2. TiB₂ tozuna ait SEM görüntüsü [60]

3.5.2. Grafen

Grafen, 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Sergeevich tarafından Manchester Üniversitesinde yapılan çalışmalar sonucu bulunan bir malzemedir [61]. Karbon atomunun bal peteği örgülü yapılarından birine verilen isimdir. Grafen; grafit, karbon nano tüp ve fulleren gibi iki boyutlu sp^2 bağlı karbon atomlarının hegzagonal şekilde bir araya gelmesiyle oluşmuş tek tabakalı bir yapıdır.

2010 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov grafen üzerin yapmış oldukları deneyler kapsamında Nobel Fizik Ödülüne layık görülmüşlerdir [62 - 65].

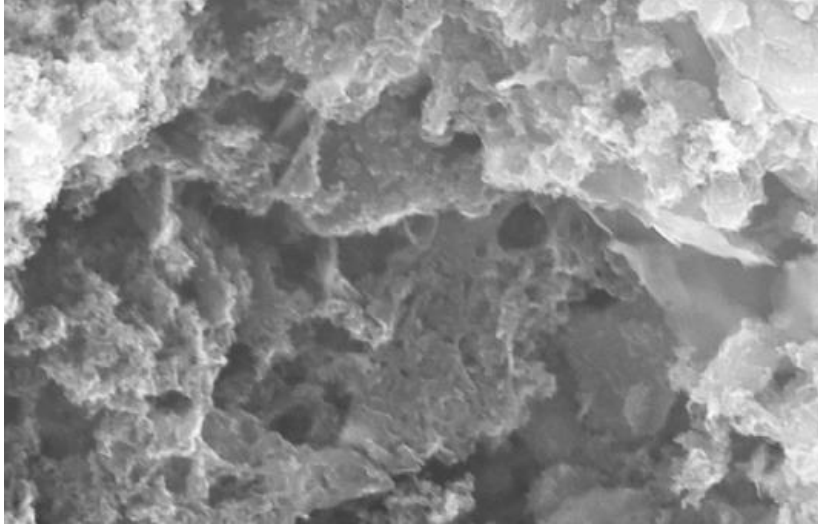


Şekil 3.6. Karbon esaslı malzemeler [66]

Grafen Şekil 3.7’ de verilen çeşitlerden oluşan karbon esaslı iki boyutlu bir malzemedir. Bu iki boyutlu malzeme, altı adet karbon halkalarının bir araya gelmesiyle oluşan nanokarbon tabakalardır. İdeal grafen yapısı tek tabakalı olandır (Resim 3.3). Grafenin özellikleri Çizelge 3.7’ de verilmiştir.

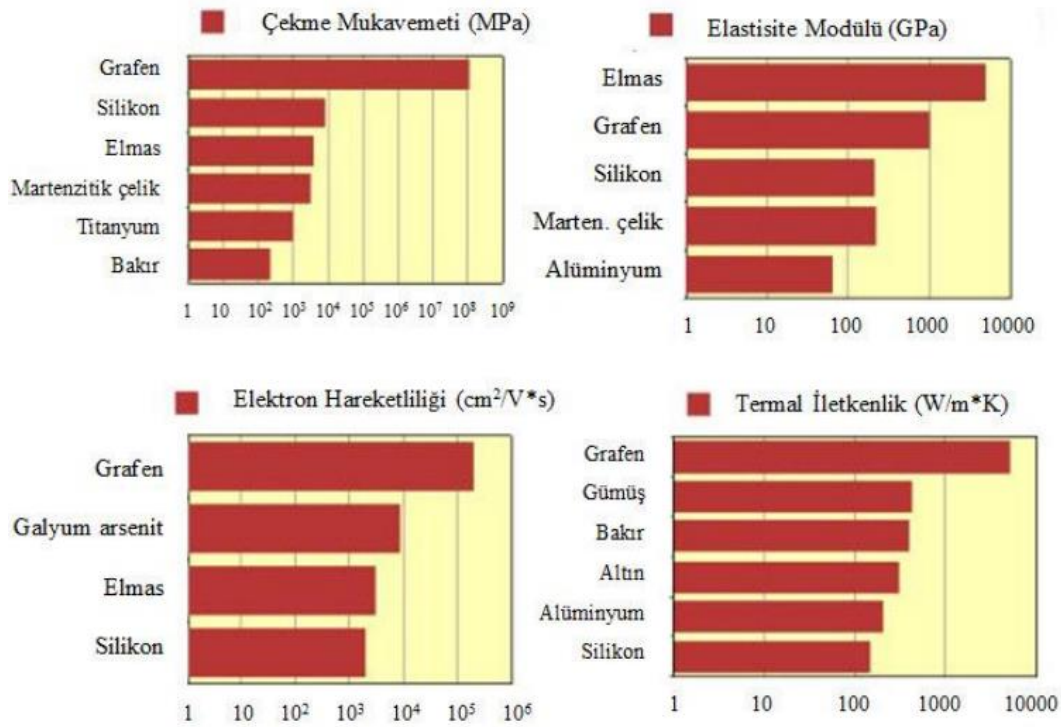
Çizelge 3.7. Grafenin özellikleri [66 – 68]

Özellikler	Değer
Bağ türü	sp ²
Katmanların sayısı	Tek
Kristalin yapısı	Altıgen kafes
Boyut	2
Saflık derecesi	% 99
Yoğunluk	2,25 g/cm ³
Çekme mukavemeti	125 – 130 GPa
Young modülü	1 TPa
Ergime sıcaklığı	5727 °C
Termal iletkenlik	1000 – 5300 W/ m.K



Resim 3.3. GNP SEM görüntüsü [69]

Grafenin diğer malzemelerle kıyaslamaları Şekil 3.8' de verildiği gibidir.



Şekil 3.7. Grafenin özellikleri bilinen diğer malzemelerle kıyaslanması [70]

Günümüz dünyasında grafenin kullanım alanı giderek artmaktadır. İlerleyen dönemlerde grafen, otomotiv, havacılık, elektrik elektronik, robotik, güneş hücreleri, enerji depolama, tıp, biyoloji, telekomünikasyon gibi birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılması beklenilmektedir.

3.6.1. Grafen nano parçacık (GNP)

Grafen Nano Parçacık (Graphen Nano Plate); iki boyutlu bir nano parçacıklı yapıdaki grafen katman yığınlarıdır. Gelişmiş bir korozyon direncine sahip, düşük yoğunluklu ve elektrik dirençleri yüksek malzemelerdir.

Grafen Nano Parçacıklar bileşimlerinde ortalama % 85 - 95 karbon ve % 5 - 15 oksijen barındırırlar. Yoğunlukları ortalama 0,06 - 0,004 g/cm³ aralığındadır.

3.7. Grafen Takviyeli Alüminyum Kompozitler

Grafen, sahip olduğu sıra dışı termal, mekanik ve elektronik özellikler sayesinde kompozit üretiminde önemli bir takviye elemanı haline gelmiştir [71]. Grafen aynı zamanda basit proseslerle kompoziti daha hafif yapmasının yanı sıra, kompoziti çok fonksiyonlu uygulamalar için daha mukavemetli hale getirmektedir [72].

Grafen iyi yağlayıcılık özelliğinden dolayı sürtünmeyi düşüren ve aşınmanın neden olduğu mekanik hataları azaltan bir takviye malzemesi de olduğu için çok sık tercih edilmektedir [73].



Şekil 3.8. Grafen takviyeli Al kompozitlerin üretim şeması

Şekil 3.9’ da grafen takviyeli alüminyum kompozit yapının genel üretim akış şeması gösterilmiştir.

Yan, S. ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda da incelendiği üzere, tek başına alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 155 MPa olarak ölçülürken, ağırlıkça % 0,5 grafen katkısıyla birlikte dayanımın 315 MPa’ya kadar çıktığı görülmüştür [68].

Çizelge 3.8’ de incelenen çalışmalara göre GNP ve Al ile üretilen çeşitli kompozitlerin özellikleri değerlendirilmiştir.

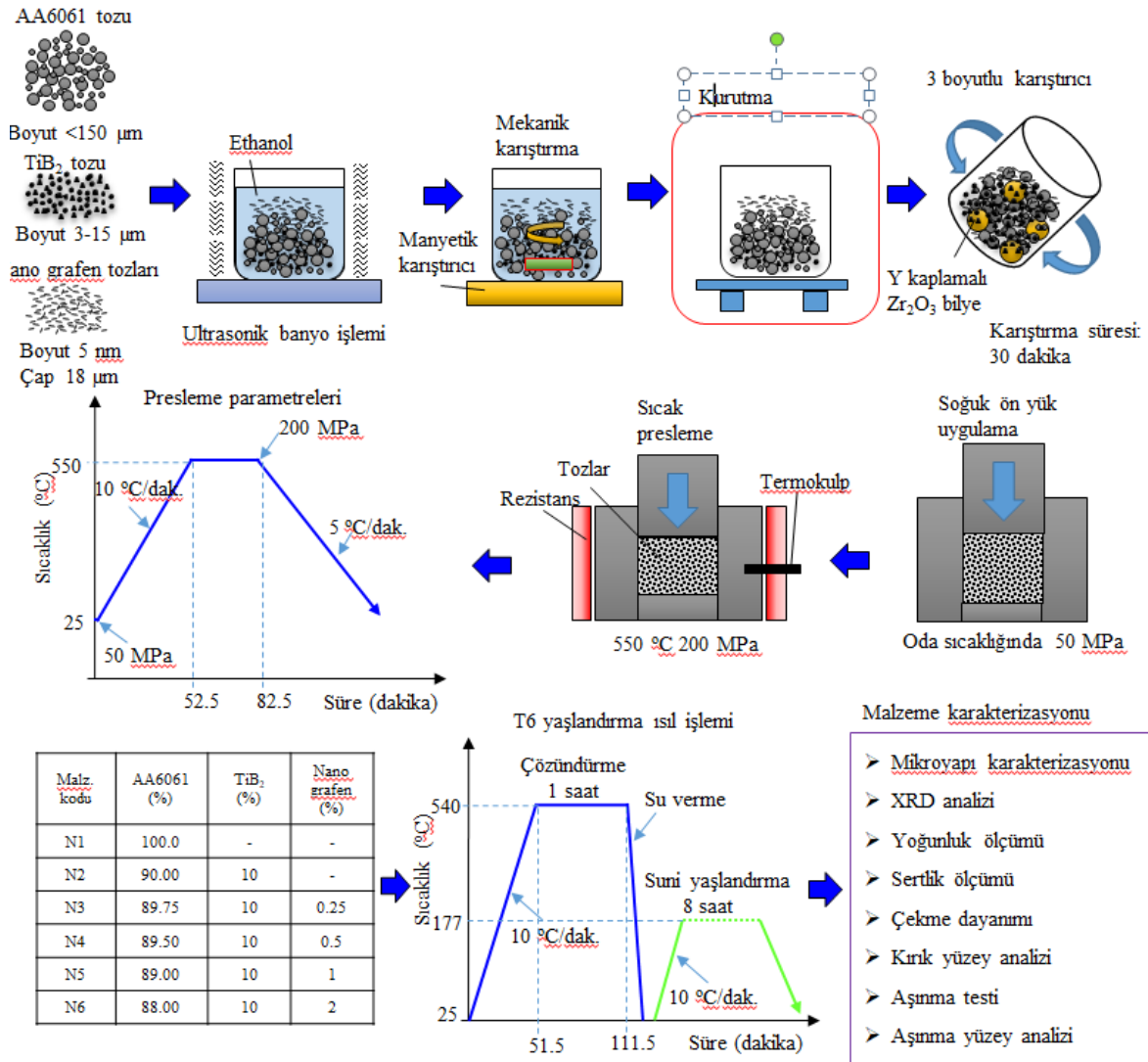
Çizelge 3.8. GNP ve Al ile ilgili yapılan çalışmalar ve sonuçları

Ağırlıkça %	Üretim Yöntemi	Sertlik (HV)	Çekme Dayanımı (MPa)	Referans
% 100 Al	TM	40	154	[69]
% 0,1 GNP + % 99,9 Al	TM + HIP + Ekstrüzyon	84	260	[70]
% 0,3 GNP + % 99,7 Al	TM + HIP	85	280	[72]
% 1 GNP + % 99 Al6061	TM + Mekanik alaşımlama	-	760 – 800	[70]
% 0,25 GNP + % 99,75 Al	TM	73 85 94	-	[71]
% 0,50 GNP + % 99,5 Al				
% 1 GNP + % 99 Al				
% 0,15 GNP + % 99,85 Al	TM + HIP + Sıcak ekstrüzyon	-	250 315	[72]
% 0,5 GNP + % 99,5 Al				
% 0,5 GNP + % 99,5 Al	TM	-	165	[74]
% 1 GNP + % 99 Al			250	
% 1,5 GNP + % 98,5 Al			212	
% 2 GNP + % 98 Al			160	
% (1-3) GNP + % (10-15-20) Al ₂ O ₃ + Al	TM	155 - 400	-	[75]



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada toz metalürjisi ile sıcak presleme işlemi kullanılarak AA6061 alaşımı, Al6061/ %10TiB₂ kompozit malzemesi ve farklı oranlarda (%0.25, %0.5, %1 ve %2) nano grafen içeren Al6061/ %10TiB₂/ nano grafen hibrit kompozit malzemeler üretildi. Çalışmanın deneysel akış şeması Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. TM yöntemi ile AA6061 alaşımına TiB₂ ve GNP ekleyerek kompozit malzeme üretimi ve deneysel akış şeması

4.1. Malzemeler

Çalışmada <150 µm parçacık boyutuna sahip %99.6 saflıkta AA6061 tozu, 3-5 µm arası parçacık boyutuna sahip %98.5 saflıkta TiB₂ tozları ve 5 nm parçacık kalınlığı ve 18 µm parçacık çapına sahip nano grafen tozları kullanıldı.

Kullanılan malzemelere ait özellikler Çizelge 4.1.'de belirtildiği gibidir.

Çizelge 4.1. Kullanılan matris malzemesi ve takviye malzemelerinin özellikleri [74]

Özellikler	Malzemeler		
İsim	AA6061	TiB ₂	GNP
Parçacık boyutu (µm)	<150	3 - 15	5 nm
Çap (µm)	-	-	18
Saflık (%)	99	98,5	99,9
Ergime derecesi (°C)	582-652	2920	
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7	4,6	2,25
Young modülü (GPa)	69	41-44,8	1000
Isıl iletkenlik (W/m K)	180	26,3	5300
Termal genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	23,6	5,2	-

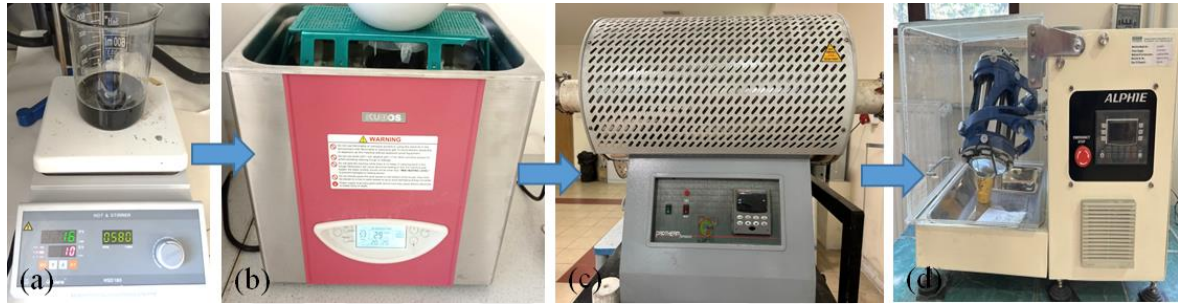
4.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi

4.2.1. Tozların karıştırılması

Kompozit malzemelerin üretimi Gazi Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Laboratuvar imkanları kullanılarak yapıldı. Malzeme üretiminde sarfiyatı önlemek için ön çalışma yapıldı. Ön çalışmalardaki tecrübelerden faydalanarak nihai kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirildi. Toz malzemelerin karışım oranları Çizelge 4.2' de verilmiştir. Tozlar 0.001 gr hassasiyete sahip Precisa marka terazide tartılarak hazırlandı. Karışım tozlar beher içerisinde bulunan 250 ml ethanol içerisinde konularak Kudos marka ultrasonik banyo içerisinde 55 KHz frekansta 60 dakika süre boyunca karıştırıldı. Ultrasonik banyo sonrası Alphie-3 marka manyetik karıştırıcıda dakikada 580 rpm hızla mekanik olarak karıştırıldı. Ethanol toz karışımı içerisindeki ethanolun ortamdaki uzaklaştırılması için Protherm marka fırında 80 °C' de kurutma işlemi yapıldı. Kurutulan tozlar Turbola marka 3 boyutlu karıştırıcıda 1:5 toz bilye oranında yitrium kaplı zirkon bilyeler yardımı ile 30 dakika boyunca karıştırıldı (Resim 4. 1).

Çizelge 4.2. Numunelerin karışım oranları

Numune kodu	Sembolik gösterim	Ağırlıkça % birleşim oranları		
		Al6061	TiB ₂	Grafen
N1	AA6061	100	-	-
N2	AA6061/10TiB ₂	90	10	-
N3	AA6061/10TiB ₂ /0.25GNP	89.75	10	0.25
N4	AA6061/10TiB ₂ /0.5GNP	89.50	10	0.5
N5	AA6061/10TiB ₂ /1GNP	89	10	1
N6	AA6061/10TiB ₂ /2GNP	88	10	2



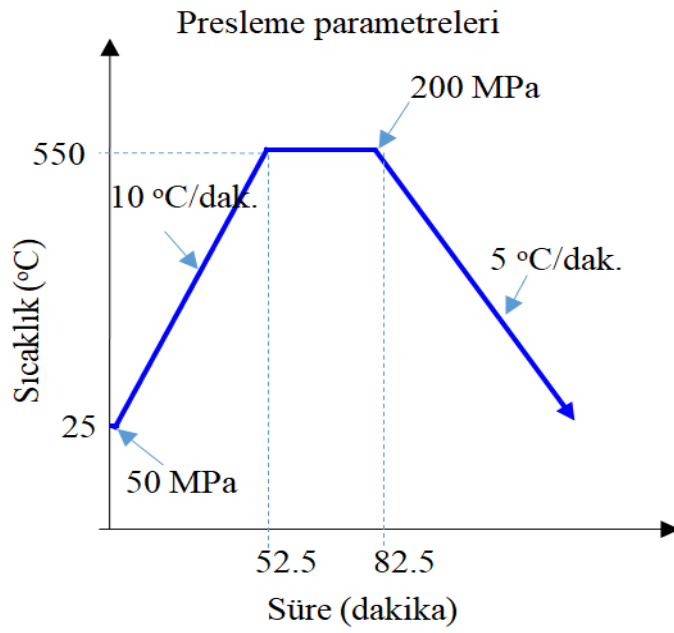
Resim 4.1. Numunelerin üretim aşamalarının cihaz gösterimi a) Precisa marka terazi b) Kudos marka ultrasonik banyo c) Protherm marka fırın d) Alphie-3 marka manyetik karıştırıcı

4.2.2. Tozların preslenmesi

Karışım tozlar özel olarak tasarlanmış Proterm marka PLF 120/12 model sıcak presleme ünitesinde argon korumalı gaz atmosferi altında sıcak olarak preslendi (Resim 4.2). Presleme işlemi ilk olarak oda sıcaklığında 50 MPa basınç altında yapıldı. Daha sonra kalıp sıcaklığı dakikada 10 °C ısıtma hızında 550 °C' ye getirildi. Bu sıcaklıkta 30 dakika süre bekletildikten sonra 200 Mpa basınç altında sıcak presleme işlemi yapıldı. Sıcak presleme sonrası kalıp sıcaklığı oda sıcaklığına getirildikten sonra 60 x 60 x 10 mm³ ebatlarındaki numuneler kalıptan çıkarıldı. Sıcak presleme işleminin grafik olarak gösterimi Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Resim 4.2. Proterm marka sıcak presleme cihazı sisteminin görüntüsü



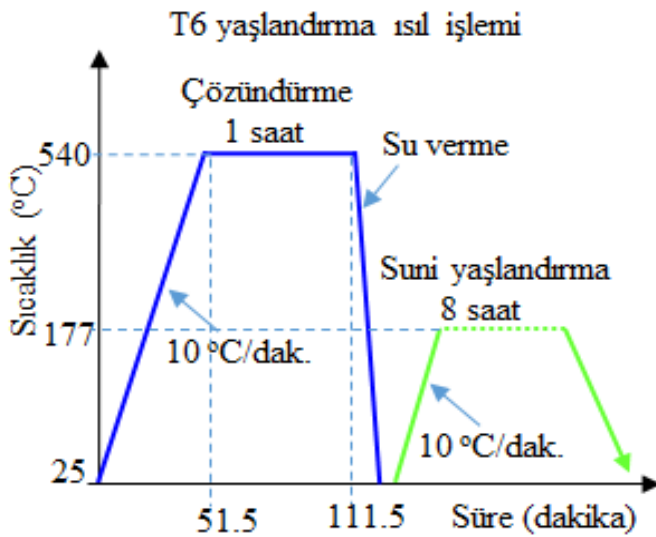
Şekil 4.2. Sıcak presleme işleminin yapılışı

4.2.3. T6 ısıt işlemi

T6 yaşlandırma işlemi AA6061 alaşımlarına en sık uygulanan ısıt işlem çeşitlerinden biri olup, bu çalışmada da numunelere dayanımlarını arttırmak için uygulanmıştır.

Elde edilen numuneler fırın içerisinde aşağıda belirtilen şartlar uygulanıp devamında su verilerek hızlı soğutma işlemine tabi tutulmuştur.

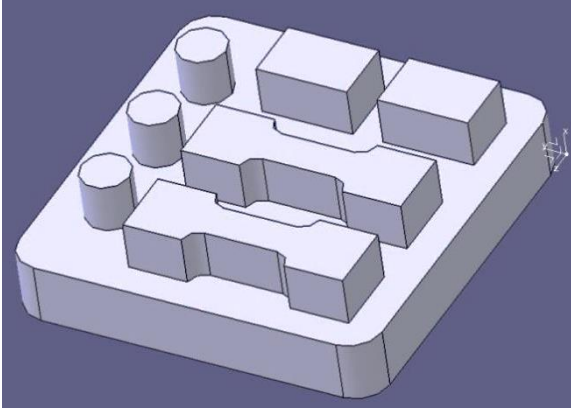
Numuneler 10 °C/ dakika ısıtma hızı kullanılarak 540°C sıcaklığa çıkarılarak 1 saat süre ile çözündürme ve ardından su verilerek hızlı soğutma yapıldı. Su verilerek soğutulan numuneler 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 177°C sıcaklığa getirilerek her bir numune için (3 ana parça) 8 saat ayrı ayrı yaşlandırma işlemine tabi tutuldu (Şekil 4.2).



Şekil 4.3. T6 ısıt işlemi grafiği.

4.2.4. Mekanik test numunelerinin hazırlanması

Elde edilen numuneler; mikro yapı, sertlik, çekme testi, aşınma testlerinde kullanılabilir hale getirmek için (Resim 4.3) Atılım Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezinde bulunan Resim 4.4' te gösterilen Sodick marka tel erozyon tezgâhı kullanılarak ayrıldı.



Resim 4.3. Numunelerin ayrılma durumunu gösterir 3 boyutlu tasarım resmi

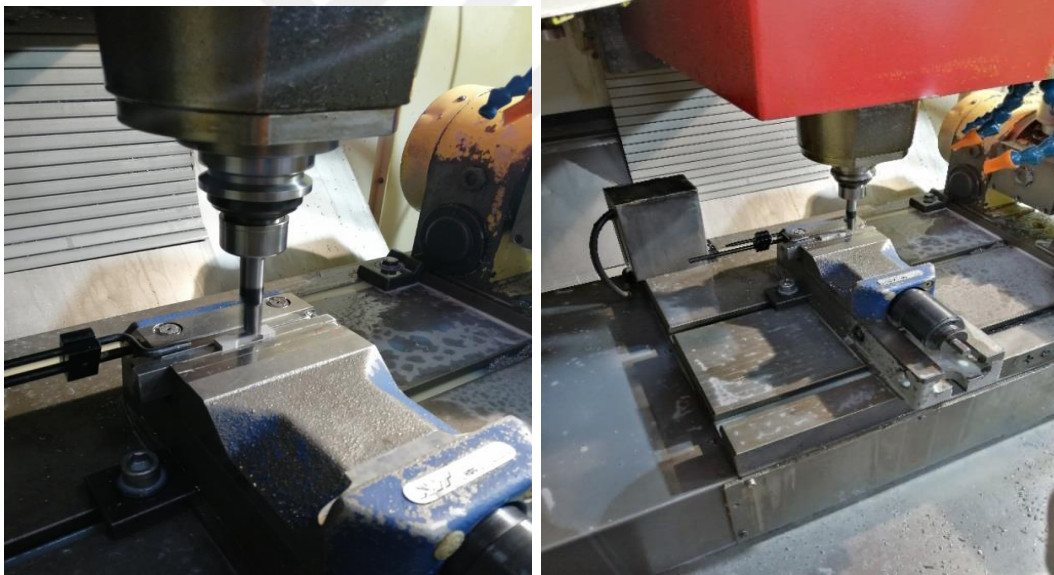
Kesilen numune örnekleri Resim 4.5’ de verildiği gibidir. Tel erozyon ile kesilen numunelerden çekme testi uygulanacak olanlar, yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi için Milli Savunma Bakanlığı 4. Ana Bakım Fabrika Müdürlüğüne bağlı İmalat Fabrikasında Cincinnati Machine marka dik işleme merkezinde frezeleme işlemine tabi tutulmuştur (Resim 4.6).



Resim 4.4. Sodick tel erozyon tezgahı (Atılım Üniversitesi)

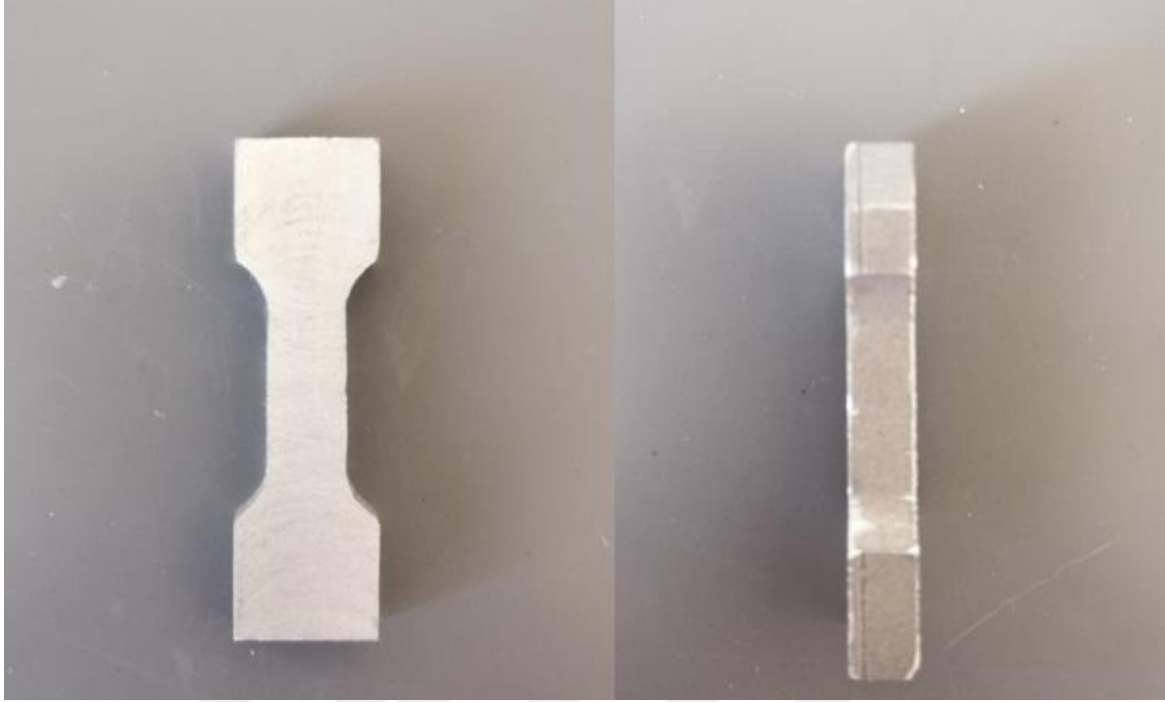


Resim 4.5. Tel erozyon sonrası numunelerin gösterimi



Resim 4.6. Freze ile test numunelerinin hazırlanması (MSB 4. ABFM)

Frezelenen numuneler mekanik testler için hazır hale getirildi. Teste girecek hazır numuneler Resim 4.7' de verilmiştir.



Resim 4.7. Yüzey pürüzlülüğü işlemi sonrası numunelerin ön ve yan görünüşü

4.4. Malzeme Karakterizasyonu

4.4.1. Malzeme yoğunluğunun belirlenmesi

Üretilen AA6061/ TiB₂/ GNP kompozit malzemelerinin yoğunluğu Precisa marka terazi kullanılarak Arşimet prensibine göre çalışan ve 0.0001 mg hassasiyetli Sartorius marka yoğunluk kiti kullanılarak ölçülmüştür.

Numunelerin teorik yoğunlukları aşağıda verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$\text{Teorik Yoğunluk} = (\text{Ana Malzeme Yoğunluğu} \times \% \text{ Karışım}) + (\text{Takviye Malzemesi Yoğunluğu} \times \% \text{ Karışım}) \quad (1)$$

Üretilen kompozit malzemelerin deneysel yoğunlukları ise eşitlik (2)' de verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$\rho^* = \frac{m_{hava}}{m_{hava} - m_{su}} \quad (2)$$

ρ^* =Malzemenin yoğunluğu (g/cm³)

m_{hava} =Malzemenin havadaki ağırlığı(g)

m_{su} =Malzemenin su içindeki ağırlığı(g)

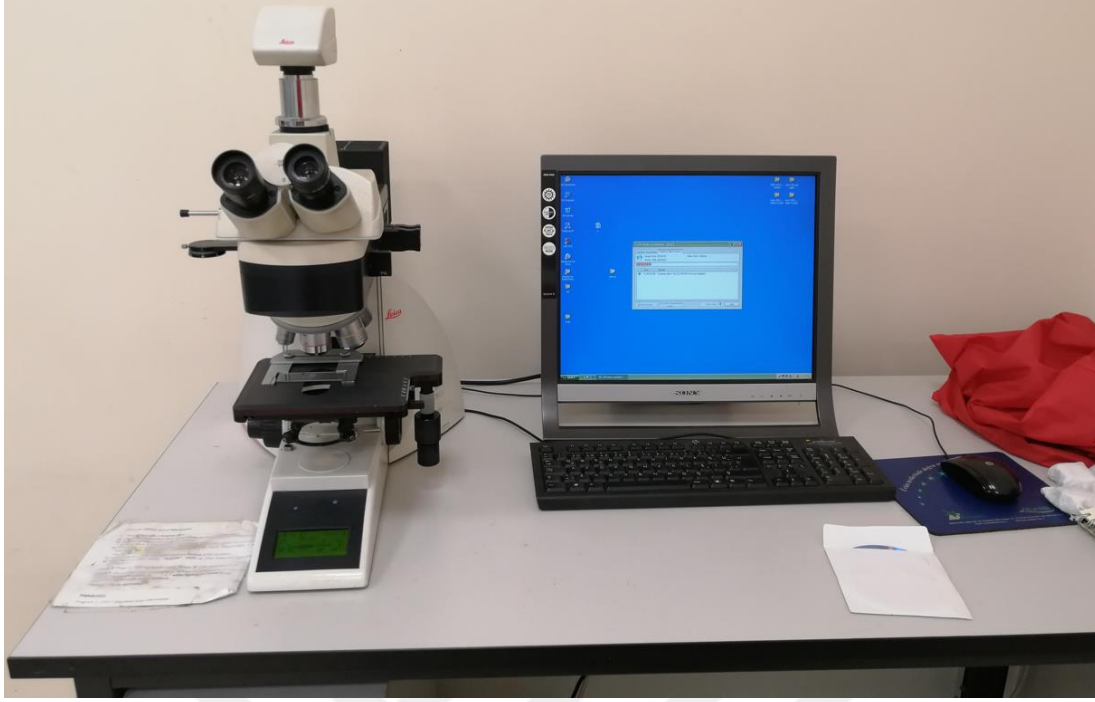
4.4.2. Mikro yapı analizleri

Mikro yapı analizleri için tel erozyon ile kesilen numuneler Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında, ATM GmbH Opal 460.2 bakalitleme makinesinde, bakalit kalıba alındı.

Numunelere hem parlatma hem de zımpara işlemi uygulandı. Numuneler sırası ile 120 mesh zımpara ile 300 rpm' de aynı yönde 2 dakika süre ile, 320 mesh zımpara ile 300 rpm' de aynı yönde 2 dakika süre ile sulu dönen disk üzerinde zımparalandı. Zımparalama sonrası keçe üzerine sıkılan 3 ve 6 μ elmas süspansiyon (pasta) ile parlatılmış olup; 3 μ elmas süspansiyonda, DiaDuo-2, 6 μ elmas süspansiyonda CT Dia Twin Mono marka pasta kullanıldı.

Parlatma işleminin devamında malzemelere 2 dakika süre ile Collodal Silica Suspension uygulandı. Son olarak, numuneler Kellers dağılayıcı (1ml HF + 200 ml H₂O) çözeltisi içinde 15 - 20 sn süre ile dağılama işlemine tabi tutuldu. Bu işlemler ile numuneler optik inceleme aşaması için hazır hale getirildi.

Numune optik incelemeleri Leica DM4000M optik mikroskop ile yapıldı. (Resim 4.8). Üretilen numunelerin ana malzemesi olan AA6061 alaşım ile takviye malzemesi olan TiB₂ ve GNP malzemeleri arasındaki bağ uyumunu inceleyebilmek için JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Yine aynı cihazda EDS analizleri gerçekleştirildi (Resim 4.9).



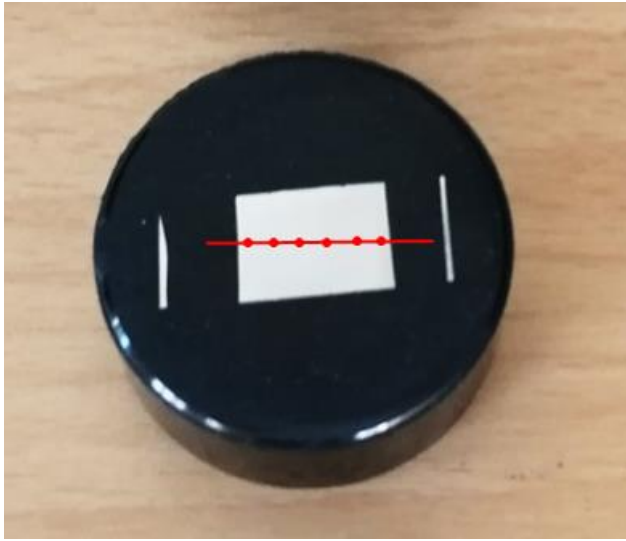
Resim 4.8. Leica DM4000M optik mikroskop



Resim 4.9. JEOL JSM 6060LV taramalı elektron mikroskobu

4.4.3. Sertlik testi

Toz metalurjisi ile üretilip T6 yaşlandırma işlemine tabi tutulan kompozit numunelerin sertliklerini ölçmek için Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanıldı. Ölçümler, EMCO TEST DuraVision 200 marka sertlik ölçüm cihazında 2,5 mm bilye uç ve 31,25 kgf kuvvet kullanılarak gerçekleştirildi. Sertlik testine girecek numune ve ölçüm yapılacak bölgeler Resim 4.10’ da belirtilmiştir.

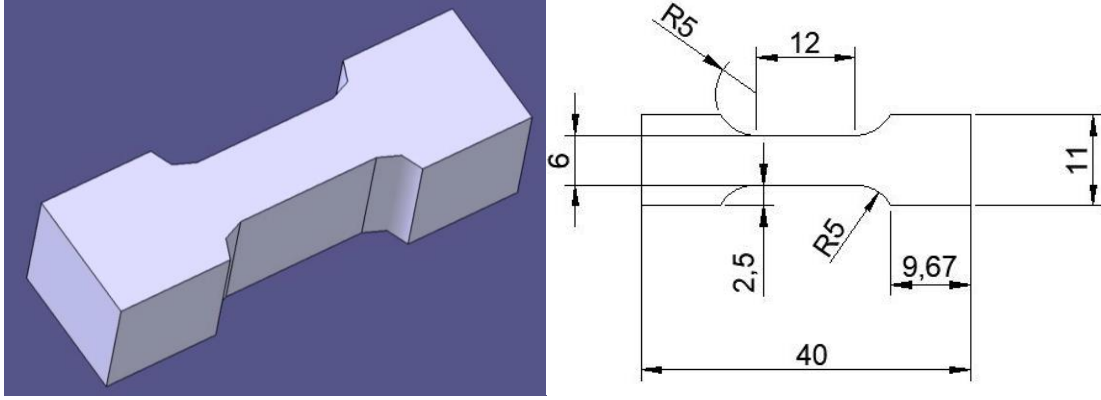


Resim 4.10. Sertlik ölçümü yapılan bölgelerin numune üzerinde gösterimi

4.4.5. Çekme testi

Çekme testi numunelerini ana parçadan her numune bölgesinden 3 bölünerek toplamda (6 x 3) 18 numune elde edilecek şekilde ayrıldı. Bunun yapılmasındaki amaç numunelerin üretimi aşamasında karşılaşılan, malzemelerin belirli bölgelerinde toplanma olasılığı değerlendirilerek ölçümlerden en net sonuçları elde etmektir.

Şekil 4.2’ de Metal Powder Industries Federation standartına göre hazırlanmış çekme testi numune ölçümleri verilmiştir. Testler Instron 3369 model 50 kN çekme – basma kapasiteli cihazda 1 mm/ dk çekme hızında gerçekleştirildi. Deney sırasında, gerilme ve % uzama değerleri çekme cihazına entegre bilgisayardan grafik olarak alındı. Numune bağlanmış deney düzeneği Resim 4.11’ de verilmiştir.



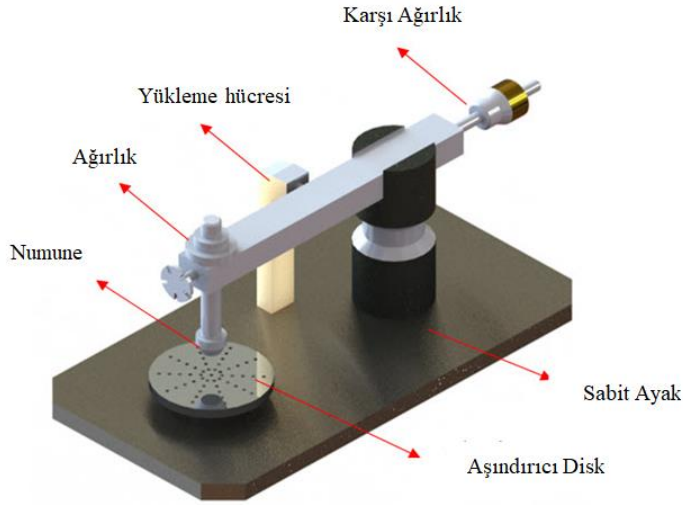
Şekil 4.4. Çekme testi numunesi 3 boyutlu görüntü ve teknik resmi



Resim 4.11. Instron 3369 model 50 kN kapasite test cihazı

4.4.6. Aşınma deneyi

Aşınma deneyleri, ASTM G132-96 standardına uygun olarak Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı imkanları kullanılarak, pin-on-disk aşınma test cihazı (Şekil 4.3) kullanılarak gerçekleştirildi.



Şekil 4.5. Aşınma testi deney düzeneği

Aşınma analizine girecek numunelerimiz Resim 4.12’ de de görüldüğü gibi her biri 8 mm çaplı ve 10 mm yüksekliğe sahiptir.



Resim 4.12. Aşınma testi numuneleri

Aşınma deneyi 100, 200 ve 300 metre mesafelerde, 1,2 m/s hızlarda ve 5, 10 ve 15 N' luk uygulanan yükler altında gerçekleştirildi.

Pim numunesi ile disk arasındaki sürtünme katsayısı yük hücresinin ölçülmesi ile belirlendi. Bu ölçümden önce numuneler, yüzey kirleticilerini uzaklaştırmak için asetonla temizlendi, kurutuldu ve ardından 0.001 mg çözünürlüklü dijital terazi kullanılarak tartıldı.

Numune üzerine uygulanan yük, aşınma testi boyunca ölçülerek ve sürtünme katsayısını hesaplamak için gerekli verileri sağladı. Sürtünme katsayısı eşitlik (1) kullanılarak hesaplandı.

$$\mu = \left(\frac{F}{P} \right) \quad (1)$$

Bu bağlamda F, yük hücresi tarafından ölçülen sürtünme kuvvetini temsil eder ve P, numuneye uygulanan normal yükü belirtir [38]. Hacim kaybı, eşitlik (2) kullanılarak hesaplandı.

$$\text{Hacim Kaybı (mm}^3\text{)} = \left(\frac{\text{Kütle Kaybı (g)}}{\text{Yoğunluk (} \frac{\text{g}}{\text{mm}^3}\text{)}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Aşınma testleri her numune için beş kez yapıldı. Aşınma oranı, aşağıdaki denklem (3)' e göre hesaplandı.

$$K_o = \frac{W}{\rho L d} \text{ m}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1} \quad (3)$$

Denklemde W, kilogram cinsinden ağırlık kaybını, ρ , kg/m³ cinsinden aşınma numunesinin yoğunluğunu, L, Newton cinsinden yükü ve d, metre cinsinden kayma mesafesini gösterir. Bu deney beş kez tekrarlandı ve aşınma oranını hesaplamak için en benzer iki ağırlık kaybı değerinin ortalaması kullanıldı.

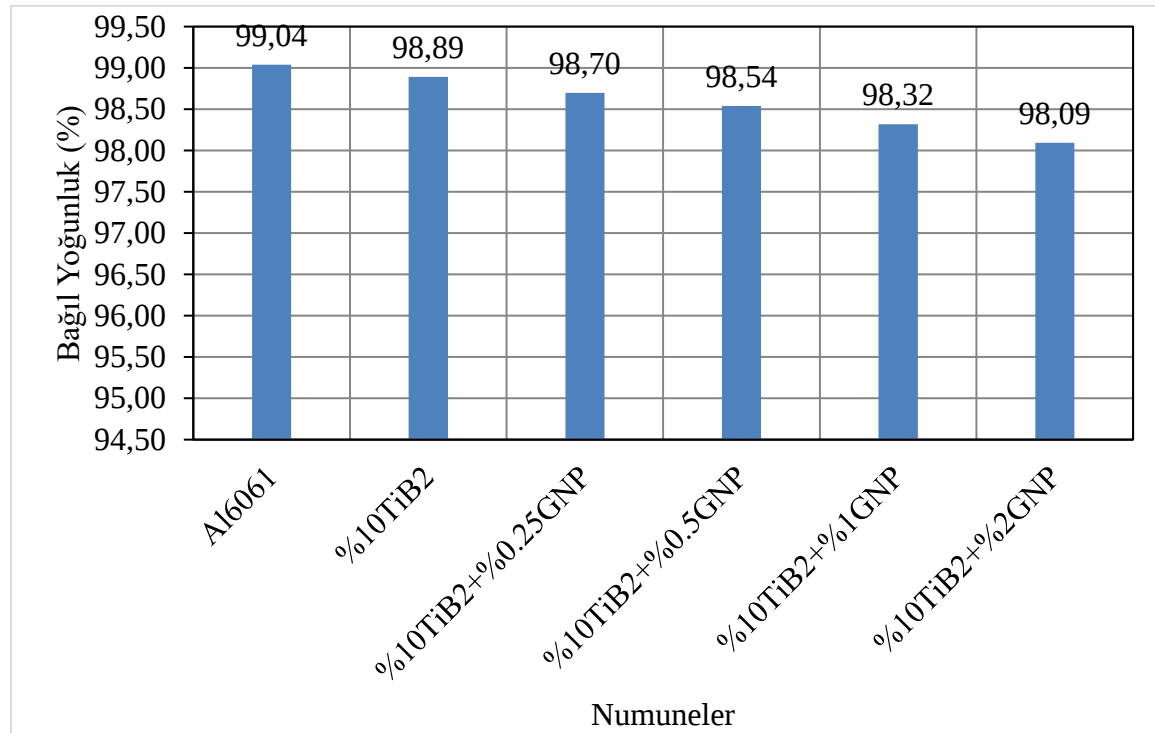
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Yoğunluk Değişimi

Malzemelerin teorik ve deneysel yoğunluk oranlarının kıyaslaması Çizelge 5.1.'de , % yoğunluk sonuçları ise Şekil 5. 1'de verildiği gibidir. AA6061=2.7 g/cm³, TiB₂= 4.52 g/cm³, GNP= 2.3 g/cm³

Çizelge 5.1. Üretilen numunelerin teorik ve deneysel yoğunluklarının karşılaştırılması

Numune	Malzeme	AA6061 (%)	TiB ₂ (%)	GNP (%)	Teorik Yoğunluk	Deneysel Yoğunluk	Bağlı Yoğunluk Değişimi (%)
1	AA6061	100	0	0	2.7	2.67	99.04
2	AA6061 + TiB ₂	90	10	0	2.88	2.85	98.89
3	AA6061 + TiB ₂ + GNP	99.75	10	0.25	3.15	3.11	98.7
4	AA6061 + TiB ₂ + GNP	99.5	10	0.5	3.15	3.10	98.54
5	AA6061 + TiB ₂ + GNP	99	10	1	3.148	3.102	98.32
6	AA6061 + TiB ₂ + GNP	98	10	2	3.144	3.08	98.09



Şekil 5.1. Numuneler ait yoğunluk grafiği

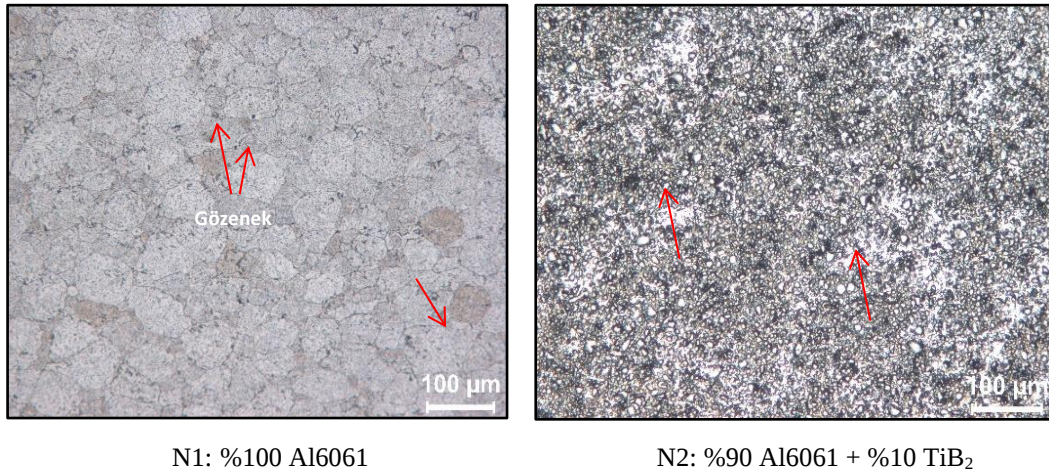
Yoğunluk grafiği incelendiğinde GNP oranı arttıkça deneysel yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri azalmaktadır. Bunun nedeni GNP yoğunluğunun düşük olmasından kaynaklanmaktadır. TiB_2 eklenmesi ile yoğunluk değerlerinde artış yaşanmıştır. Bunun nedeni ise TiB_2 yoğunluğunun yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Literatür incelendiğinde (Ayvaz ve Çetinel, 2014) benzer sonuçların alındığı ifade edilmiştir [76].

En yüksek bağıl yoğunluk değeri % 99,04 ile %100 AA6061 numunesinde elde edilirken, en düşük bağıl yoğunluk değeri % 98,09 değeri ile %10 TiB_2 + %2 GNP takviyeli numunede olduğu görüldü. Kompozit yapısındaki sert takviye oranının artmasıyla tozların sıkıştırılabilirliğinde bir azalma meydana gelmekte ve bu da bağıl yoğunluğun düşmesine neden olmaktadır. Sonuçlar, takviye hacim oranının da artmasıyla birlikte yoğunluğunun da azaldığını yorumlayan Şahin Y. (2003) yaptığı çalışmanın sonucuyla uyumludur [77].

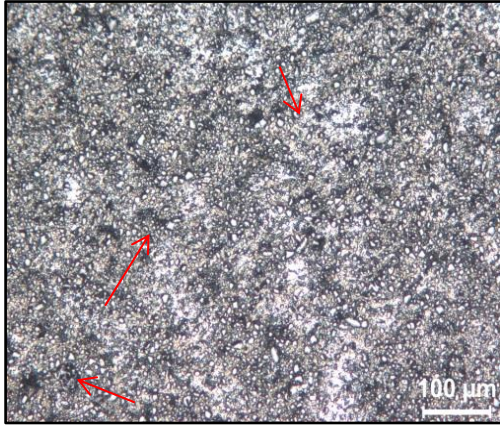
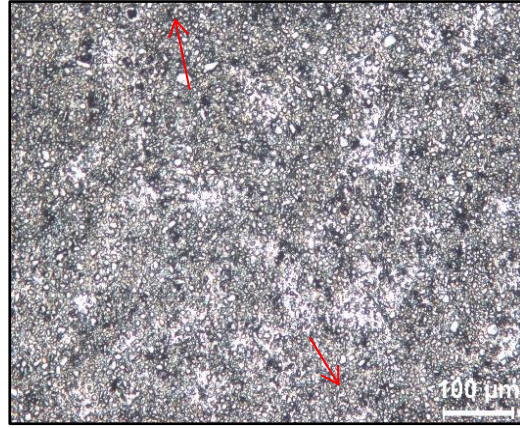
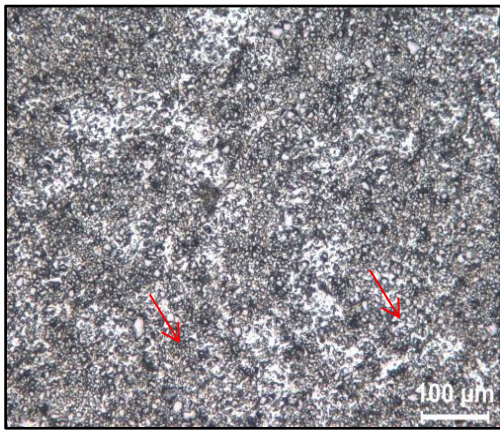
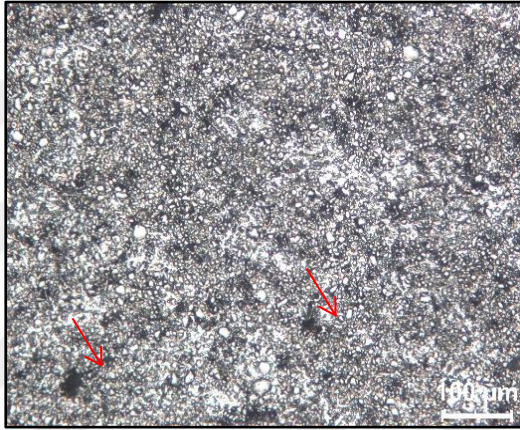
5.2. Mikroyapı Analizleri

5.2.1. Optik mikroskop analizleri

Resim 5.4' te üretilen kompozitlerin optik görüntüleri verilmiştir. Resimleri incelediğimizde takviye miktarına bağlı olarak gözeneklerin arttığı görüldü. TiB_2 ve GNP takviye oranının artmasına bağlı olarak parçacık dağılımındaki homojenliğin arttığı görüldü.



Resim 5.1. Malzemelerin optik mikroskop altındaki görüntüleri

N3: %89,75 Al6061 + %10 TiB₂ + %0,25 GNPN4: %89,5 Al6061 + %10 TiB₂ + %0,5 GNPN5: %89 Al6061 + %10 TiB₂ + %1 GNPN6: %88 Al6061 + %10 TiB₂ + %2 GNP

Resim 5.1. (devam) Malzemelerin optik mikroskop altındaki görüntüleri

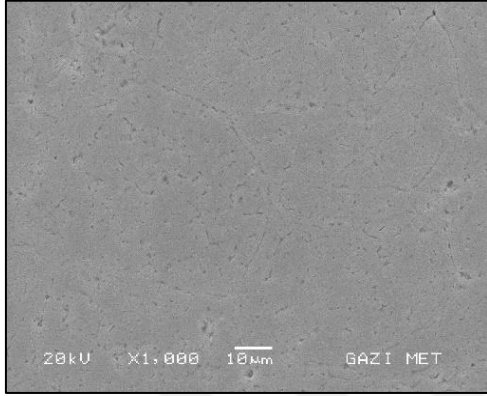
Resimlerde siyah olarak gösterilen bölgeler gözeneği oluştururken, koyu ve açık gri bölgeler ise takviye elemanlarını göstermektedir. Takviye malzeme oranının artışıyla birlikte kompozit yapı içerisindeki gözenek yapısının da arttığı gözlemlendi. Gözenekliliğin aynı zamanda üretim sırasında yapılan hatalardan da kaynaklanabileceği değerlendirildi.

Malzeme içerisindeki Al6061 parçacıklarının farklı boyutlarda, genellikle küresel, TiB₂ ve GNP parçacıklarının genellikle keskin köşeli yapıda olduğu görüldü.

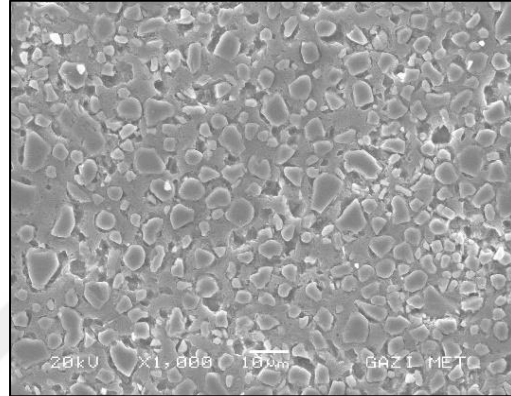
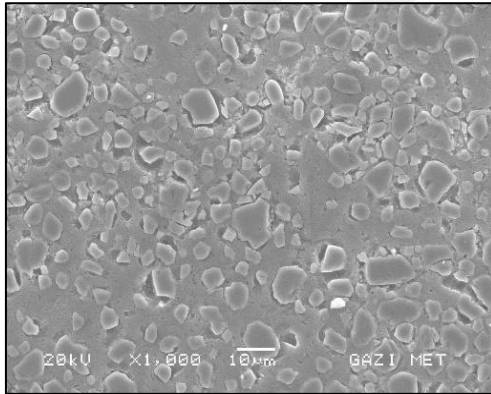
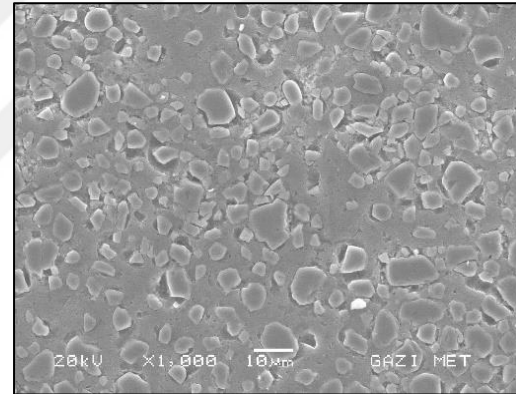
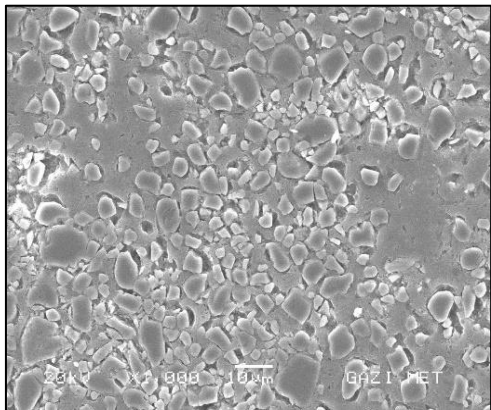
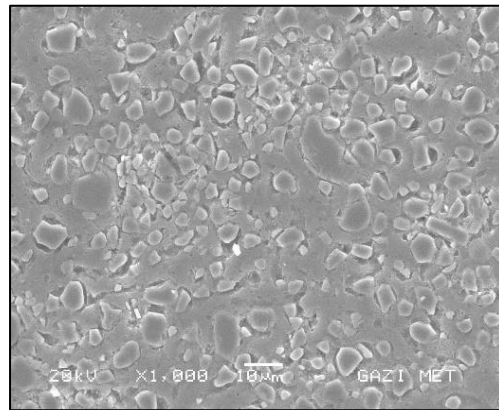
5.2.2. SEM ve EDS analizleri

500x, 1000x ve 3000x yakınlaştırma değerlerine göre numunelerden alınan SEM görüntüleri Resim 5.5' te verilmiştir.

SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere TiB_2 ve GNP' nin matris yüzeyinde nispeten homojen dağılım sergilediği değerlendirildi. Al6061' in kompozit malzeme içerisinde koyu gri, TiB_2 ' nin beyaz ve GNP' nin açık gri renklerde oldukları görüldü. Grafenin çoğunun tek katmanlı pul formunda olduğu görüldü.

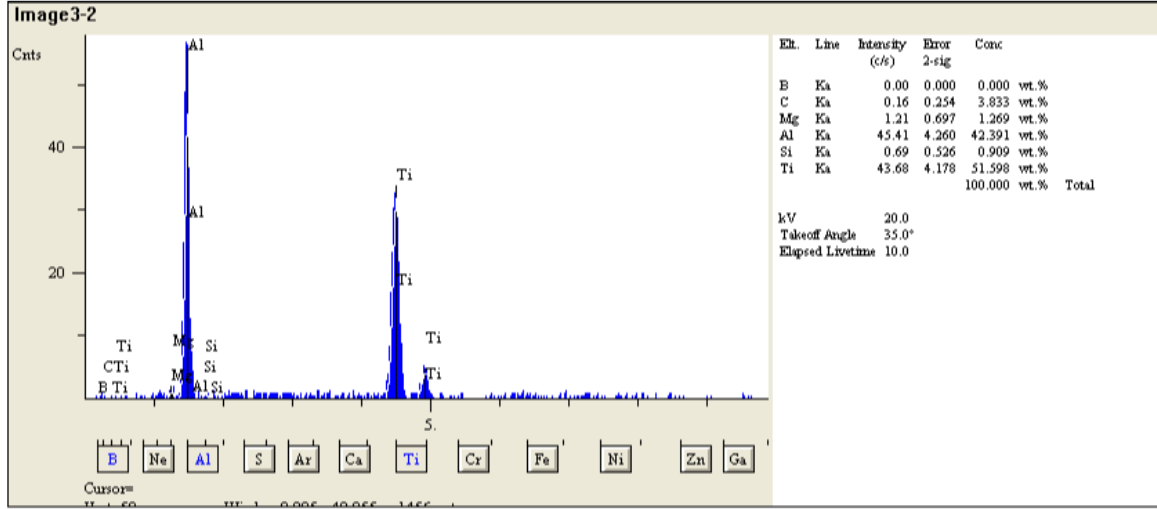


N1: %100 Al6061

N2: %90 Al6061 + %10 TiB_2 N3: %89,75 Al6061 + %10 TiB_2 + %0,25 GNPN4: %89,7 Al6061 + %10 TiB_2 + %0,5 GNPN5: %89 Al6061 + %10 TiB_2 + %1 GNPN6: %88 Al6061 + %10 TiB_2 + %2 GNP

Resim 5.2. Malzemelerin SEM görüntüleri

Görüntüler incelendiğinde, gözeneklerin küçük ve az sayıda, süreksiz olduğu görüldü. Bu durumun mekanik alışımına etki etmediğini gösterdi. Sonuçların optik mikroskopla elde edilen mikroyapı sonuçları ile uyumlu olduğu görüldü.



Şekil 5.2. Numune 5 EDS analizi

Şekil 5.3' te belirtilen enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi incelendiğinde alüminyum, titanyum ve karbon tepe noktalarının gözlemlendiği görüldü.

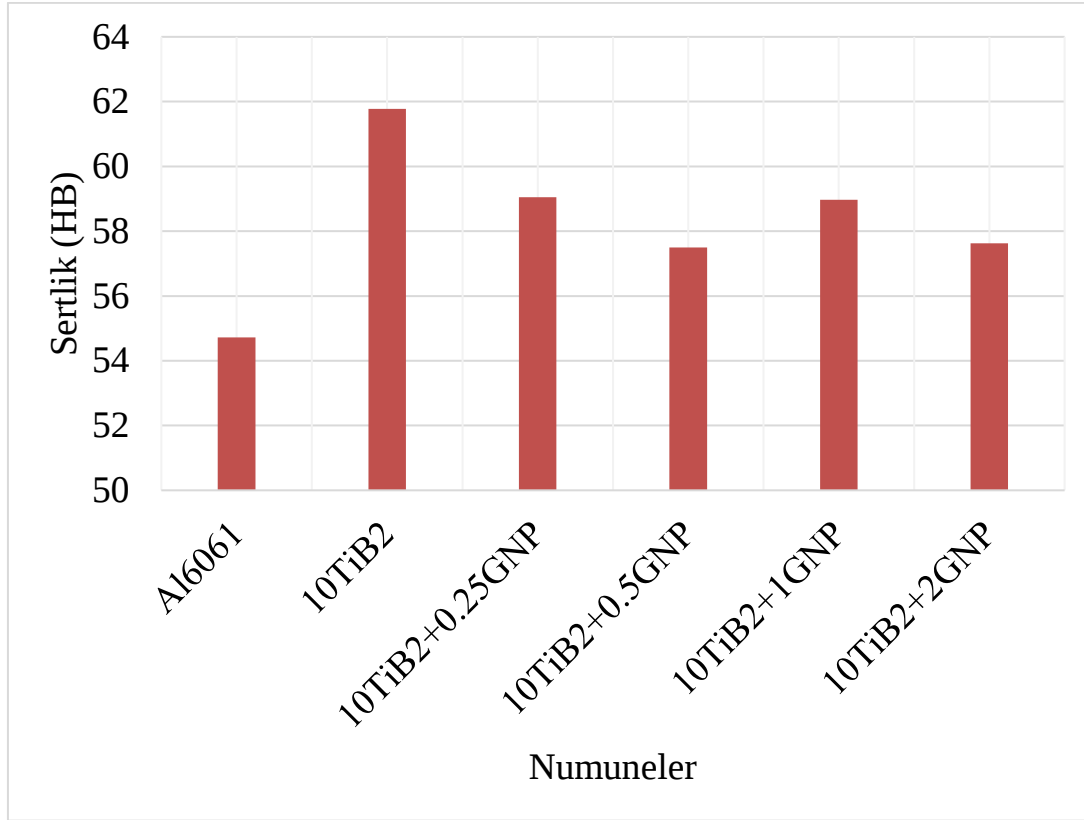
Analizler sonucunda AA6061, TiB₂ ve GNP' nin kompozit malzeme içerisine başarılı bir şekilde dahil edildiği gözlemlendi.

5.3. Sertlik Değişimi

Üretilen numunelerin sertlik değerleri Çizelge 5.2 ve Şekil 5.4' te verildiği gibidir.

Çizelge 5.2. Üretilen kompozitlerin sertlik değerleri

Sertlikler HB (2,5 bilye, 31,25 yük)					
Numuneler	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Ortalama
N1	54,8	54,8	54,1	55,2	54,725
N2	61,5	61,8	61,8	62	61,775
N3	58,9	59,1	59,1	59,1	59,05
N4	57,8	58	57,1	57,1	57,5
N5	58	59,4	59,6	58,9	58,975
N6	57,8	57,6	58	57,1	57,625



Şekil 5.3. Üretilen kompozitlerin sertlik değişimi

Şekil 5.4' te verilen grafik incelendiğinde en yüksek sertlik değerine 2 numaralı numunede (%90 Al6061 + %10 TiB₂) elde edildi. GNP' nin takviye oranına göre sertlik değerlerinde düşme gözlemlendi. Bu durumun kompozit yapı içerisinde takviye elemanı oranının artmasına bağlı olarak gözenek sayısının artışıyla doğru orantılı olduğu değerlendirildi.

Normal şartlarda hem TiB₂ hem de GNP alüminyuma göre daha sert bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla takviye elemanı oranı arttıkça sertliğin artması beklenebilir. Fakat durum TiB₂ oranı sabitken GNP takviyesi arttıkça tam tersini gösterdi. Çünkü; GNP artmasıyla birlikte hem gözeneklilik oranı hem de takviye yığılmaları meydana geldi. Sonuç olarak Al6061' e kıyasla takviye elemanı artmasına bağlı olarak numunelerimizde sertlik değerinin arttığı görüldü. En yüksek sertlik değeri ortalama 61,775 HB ile 2. numunede, en düşük sertlik değeri ortalama 54,725 HB ile 1. numunede bulundu. GNP oranındaki artış ile birlikte % 0.5 GNP takviyesine kadar azalış, %1 GNP takviyesinden sonra artış, sonrasında tekrar azalış meydana geldi.

5.4. Çekme Testi Sonuçları

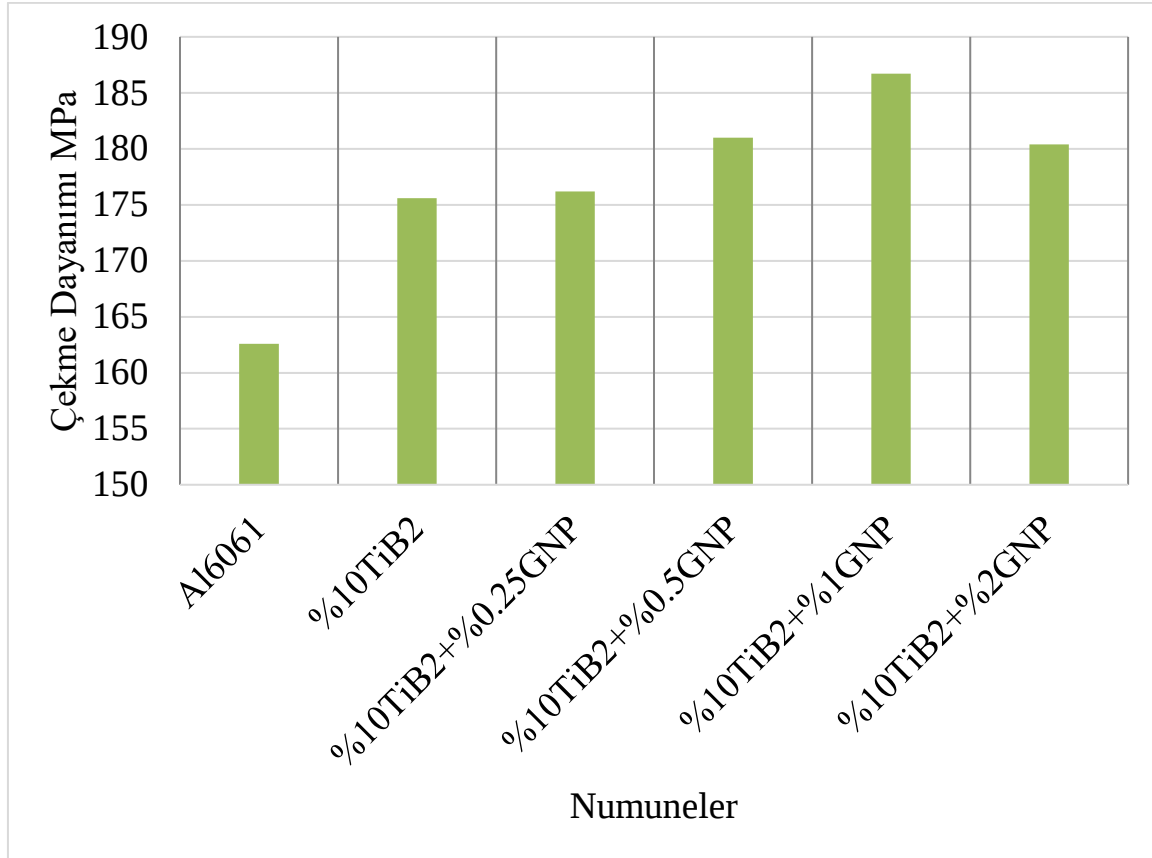


Resim 5.3. Çekme testi numunesi öncesi ve sonrası

Numunelere ait çekme testi değerlerinin gösterimi Çizelge 5.3' de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Numunelere ait çekme testi sonuçları

Çekme Testi Verileri	
Numuneler	Ortalama
N1	162,8
N2	175,6
N3	176,2
N4	181
N5	186,7
N6	180,4



Şekil 5.4. Numunelere ait çekme testi verilerinin ortalama gösterim grafiği

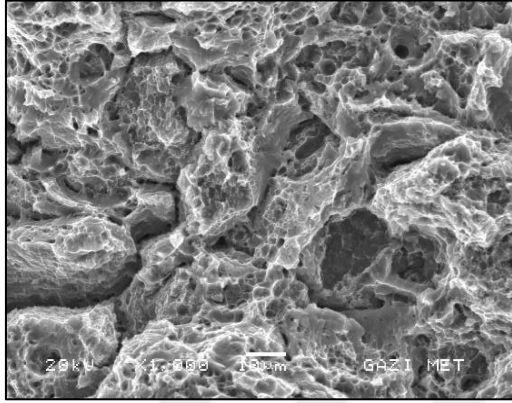
Şekil 5.5 incelendiğinde en yüksek dayanımı ortalama 186,7 MPa ile %10 TiB₂ + %1 GNP karışım oranlarındaki 5. numunede, en düşük dayanımı ise 175,6 MPa ile %10 TiB₂ karışım oranlarındaki 2 numaralı numunede olduğu görüldü. Hiçbir takviye olmayan 1. numunede çekme dayanımı ortalama 162,8 MPa olarak ölçüldü. Takviye malzeme oranı arttıkça çekme dayanımının 176,2 MPa, 181 MPa ve 186,7 MPa olarak arttığı gözlemlendi.

Abdollahi ve arkadaşları, mekanik alaşımlama ve sıcak ekstrüzyon tekniği ile alüminyum alaşım belirli takviye elemanları ekleyerek, takviyeli ve takviyesiz durumdaki malzeme davranışlarını incelemişlerdir. Mekanik testlerin sonuçlarında alaşımlarda takviye eleman varlığının mukavemeti ve sertliği arttırdığını, ancak sünekliliğini şiddetle azalttığını görmüşlerdir. Bunun nedenin de, dislokasyon hareketlerini engelleyen engellerin artması olduğunu değerlendirmişlerdir [78].

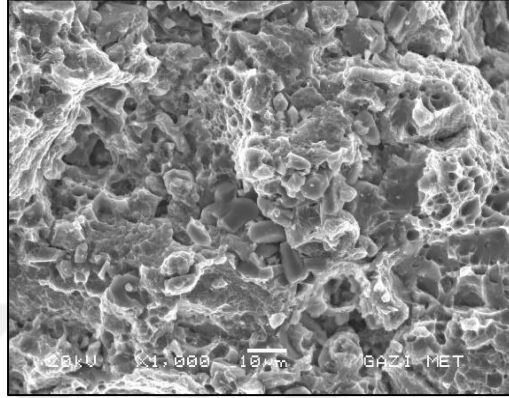
Son olarak sırasıyla % 10 TiB₂ takviye malzemesi eklenen numunede çekme dayanımın gözle görülür şekilde arttığı, daha sonra belirli yüzdelerde (% 0,25, 0,5, 1 ve 2) GNP eklenmesiyle birlikte çekme dayanımının arttığı fakat sonradan azalış gösterdiği görüldü.

5.5. Kırık Yüzeylerde EDS ve SEM Analizleri

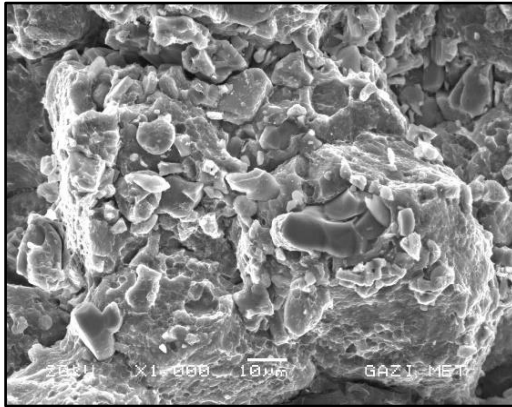
Numunelerin kırık yüzeylerinde TiB_2 ve GNP parçacıklarının varlıklarının tespiti amacıyla EDS analizi yapıldı. Numunelere ait SEM görüntüler Resim 5.10' da görüldüğü gibidir.



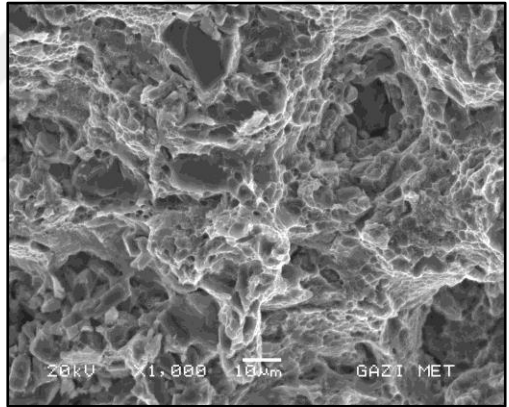
N1: %100 Al6061



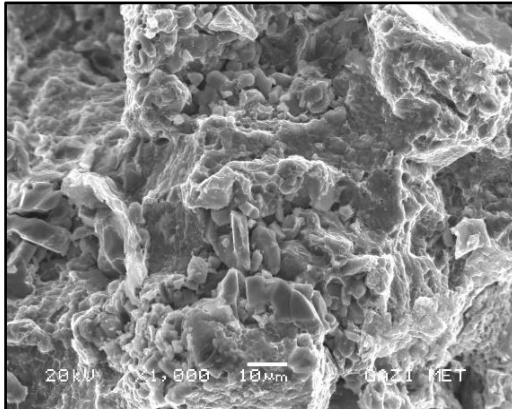
N2: %90 Al6061 + %10 TiB_2



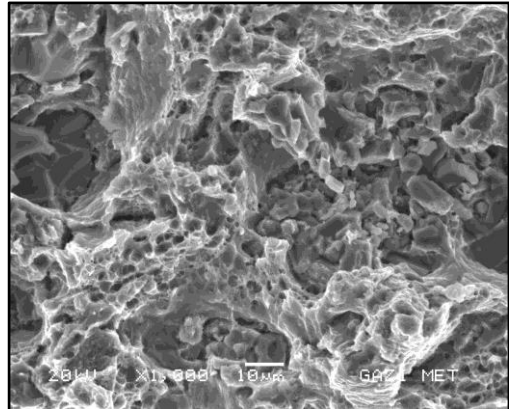
N3: %89,75 Al6061 + %10 TiB_2 + %0,25 GNP



N4: %89,7 Al6061 + %10 TiB_2 + %0,5 GNP

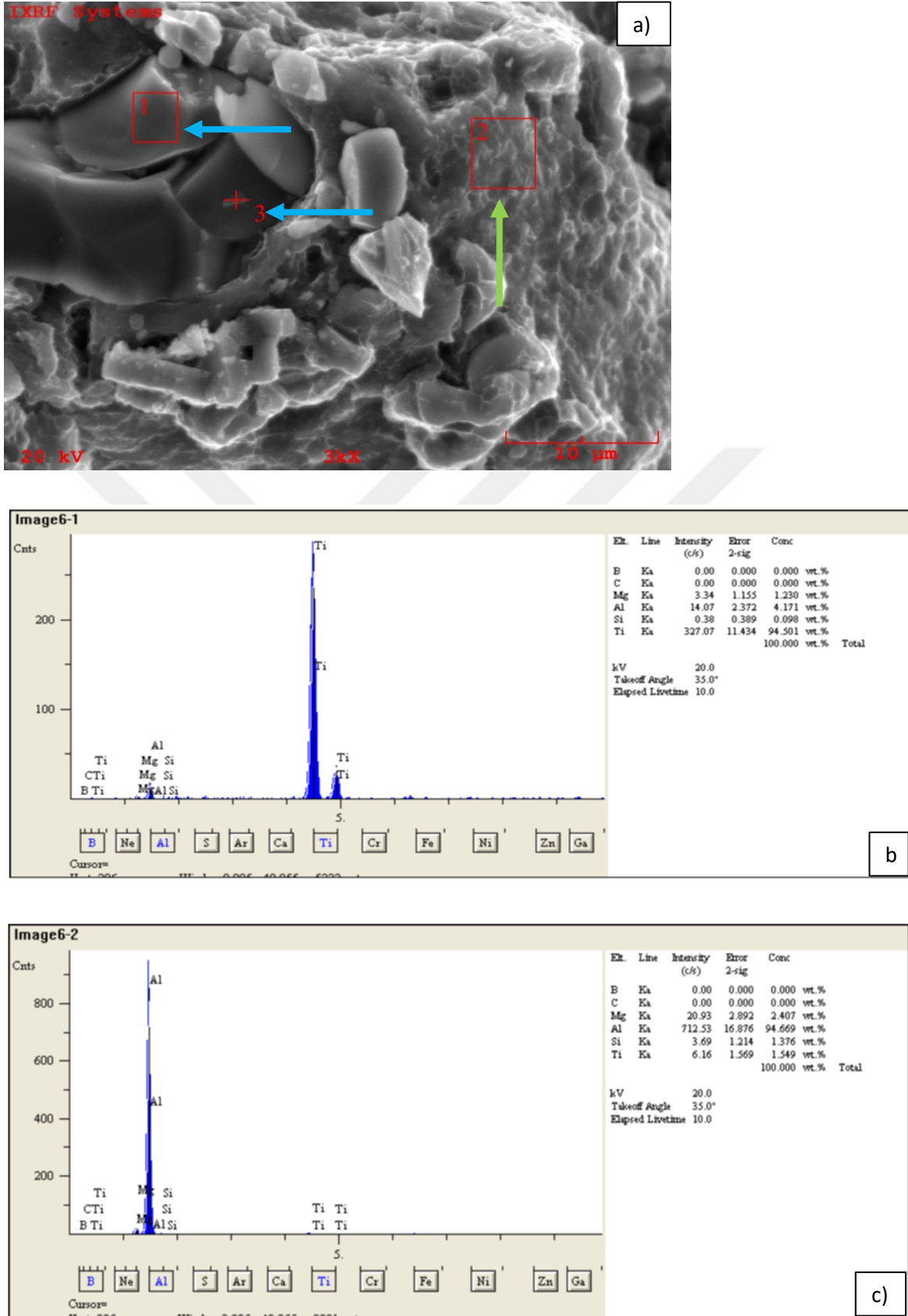


N5: %89 Al6061 + %10 TiB_2 + %1 GNP



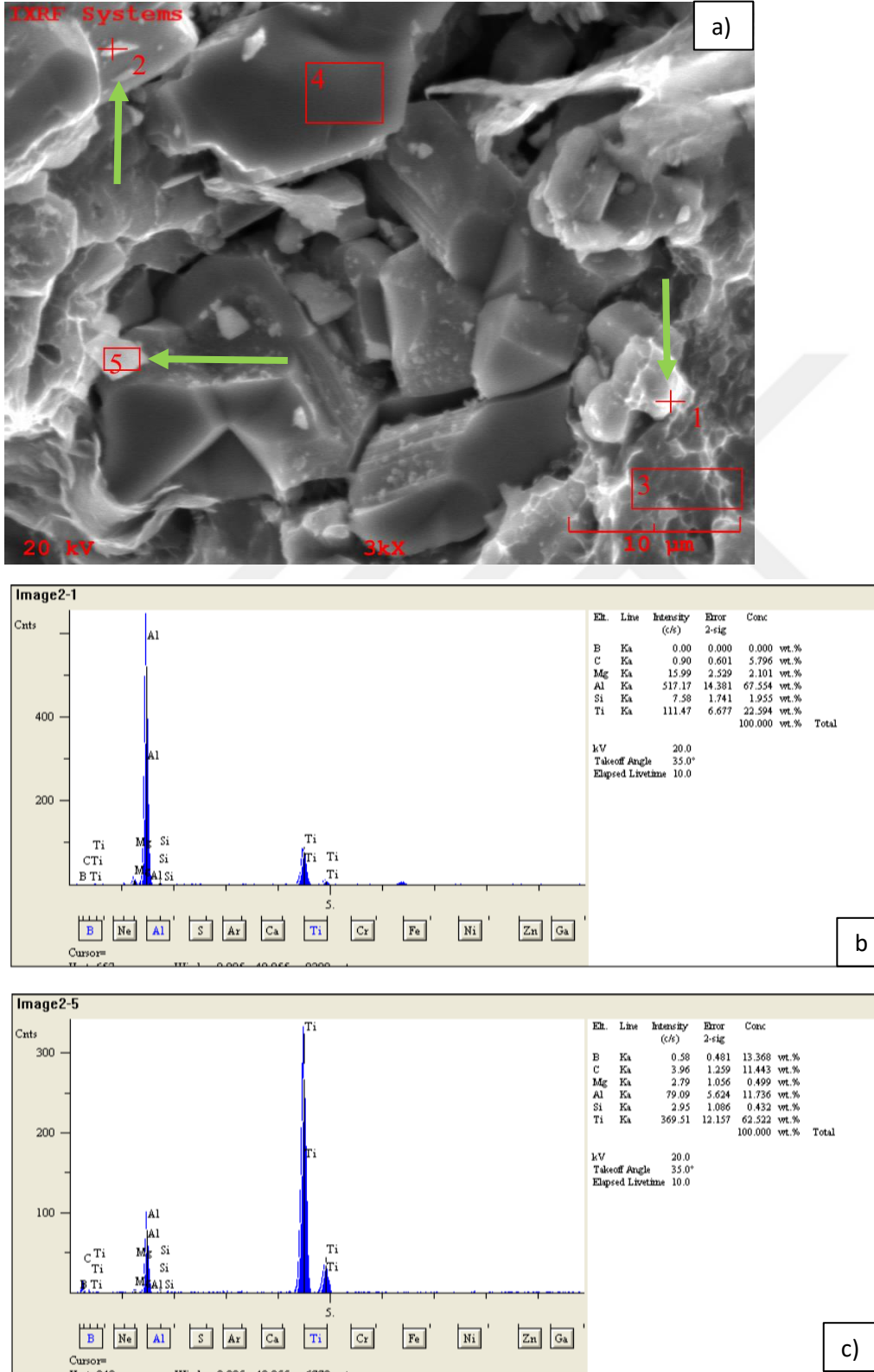
N6: %88 Al6061 + %10 TiB_2 + %2 GNP

Resim 5.4. Kırık yüzey SEM görüntüleri

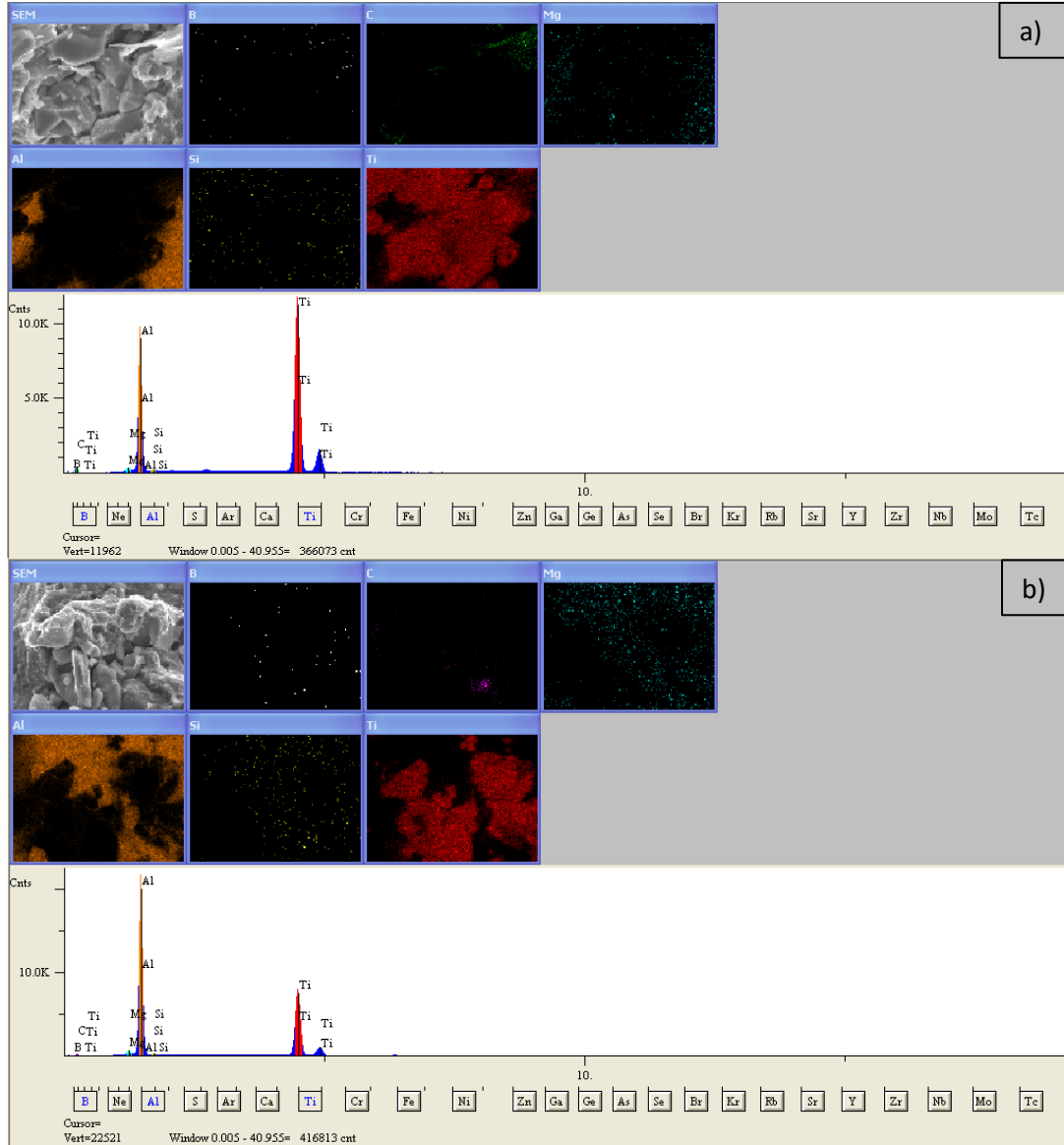


Şekil 5.5. AA6061+ %10 TiB₂+ %0,25 GNP içeren 3. numunenin a) SEM görüntüsü b) 1 numaralı bölgenin EDS analizi c) 2 numaralı bölgenin EDS analizi

Şekil 5.6' da 3. Numuneye ait kırık yüzey SEM görüntüleri ve 1. ve 2. bölgeden alınan EDS analizleri verildi. Analizler incelendiğinde ilgili bölgelerde TiB_2 ve Al tespit edildi.



Şekil 5.6. %89 %10 TiB_2 + %1 GNP içeren 5. numunenin a) SEM görüntüsü b) 1 numaralı bölgenin EDS analizi c) 2 numaralı bölgenin EDS analizi



Şekil 5.7. a) 5. numunenin 1. Bölgesinden alınan EDS MAP b) 5. numunenin 2 ile işaretli bölgesinden alınan EDS MAP

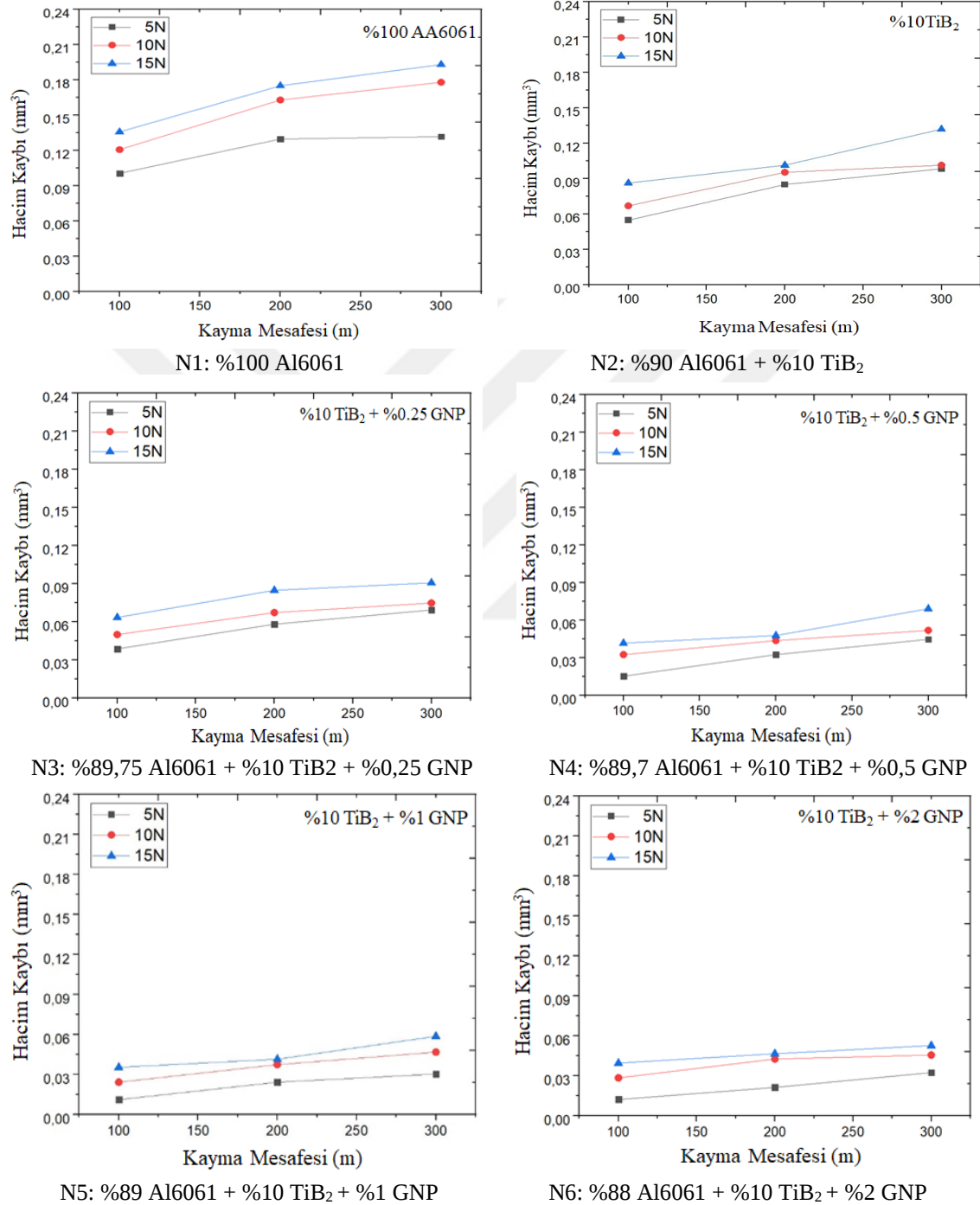
5. numune üzerinden alınan kırık yüzey SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizleri (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8) incelendiğinde normal yüzey sonuçları gibi; TiB_2 ve GNP' nin alüminyum alaşım malzeme içerisine dahil edildiği gözlemlendi.

Kırık yüzeyler incelendiğinde, kırılmaların genellikle gevrek kırılma olduğu gözlemlendi. Görüntüler incelendiğinde matris elemanı AA6061 ile takviye elemanları TiB_2 ve GNP taneciklerinin kırılmadan malzeme yapısı içerisinde kaldığı gözlemlendi.

Hem ara yüzey hem de takviye elemanı matristen güçlü ise kırılan matriste numunelerimizde görmüş olduğumuz gözenek oluşumu meydana gelmektedir [79].

5.6. Aşınma Analizi Sonuçları

Aşınma sonuçları Şekil 5.10' da verilmiştir.



Şekil 5.8. Numunelere uygulanan tüm yükler için kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak hacim kaybındaki değişim

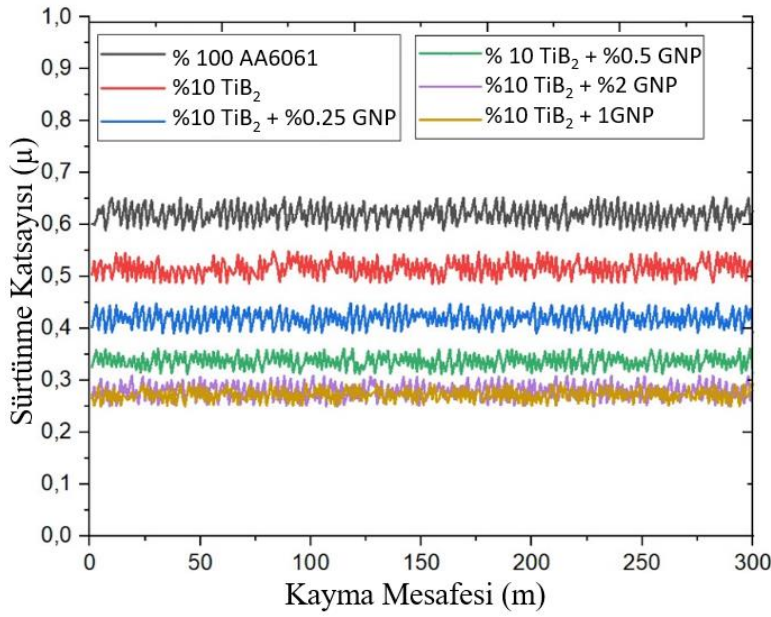
Şekil 5.10' daki grafikler incelendiğinde TiB₂ ve GNP ağırlık yüzdesinin kontrol edilmesiyle aşınma direncinin iyileştirilebileceği görüldü. Görüldüğü gibi, artan normal

yük ve kayma mesafesi ile numunelerin hacim kaybı artmıştır. En yüksek hacim kaybının sadece AA6061' in olduğu 1. numunede olduğu görüldü. Bu durum sertliğin düşük olmasından kaynaklanabileceği değerlendirildi. Literatür incelendiğinde de, daha yumuşak olan malzemelerin daha sert olanlara göre daha yüksek hacme sahip olması durumuyla benzeştiği belirlendi [80].

Takviye malzemelerinin artışına bağlı olarak hacim kaybının önemli ölçüde azaldığı görüldü. Kayma mesafesinin 200 m' ye kadar olan aşınma sürecinde ilerleyen kayma mesafelerinde elde edilen sonuçlara göre daha yüksek oranda aşınma gerçekleştiği tespit edildi. Bu durumun nedeni olarak takviye malzeme olan GNP' nin yağlayıcı etkisinin aşınan yüzey tabakasında 200 m' den sonra daha etkin hale geldiğine yorumlandı. Bu durumun literatürdeki uygulamalarla da benzer durumda olduğu görüldü [80, 81]. En düşük hacim kaybı tüm yük ve mesafeler altında ortalama $0,035 \text{ mm}^3$ olarak %10 TiB_2 + %1 GNP olan 4. numunede elde edildi. GNP' nin kendi kendini yağlama özelliğinden dolayı aşınma yüzeyi arasındaki kendinden yağlamalı azaltılmış temas ara yüzünün bu duruma etki ettiği düşünüldü. Kendinden yağlamalı filmlerin kalınlığı artan GNP ağırlık yüzdesi ile artar. Öte yandan, GNP' nin üzerine uygulanan kuvvet miktarı arttıkça, kendi kendini yağlama etkisinin azalacağı değerlendirildi.

Grafenin kendi kendini yağlama durumu, Zhang ve diğerleri tarafından incelenmiş; GNP' lerin aşınma kalıntılarında sarma ve yüzey altı çatlakları arasındaki köprüleme etkilerinin kompozitin aşınma direncini iyileştirebileceğini bulmuşlardır. Literatürdeki diğer çalışmalar, aşınma testleri sırasında numunelerin aşınma yüzeyinde mekanik olarak karıştırılmış sabit bir tabakanın oluştuğunu göstermektedir. Tabakanın oluşumu, sürtünme kuvveti arasındaki teması azaltabilir ve aşınma direncini artırabilir [82, 83].

Sürtünme katsayısı, hibrit metal matrisli kompozit özelliklerinin aşınma direncini değerlendirmek için önemli değerlerden biridir. Ağırlıkça GNP miktarının yüzde değişimlerinin sürtünme katsayısına etkisini araştırmak için, 15 N' luk normal yük kullanılarak deneyler yapıldı. Numunelerin, çeşitli yük ve kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak alınan sonuçlar Şekil 5.11' de verilmiştir.



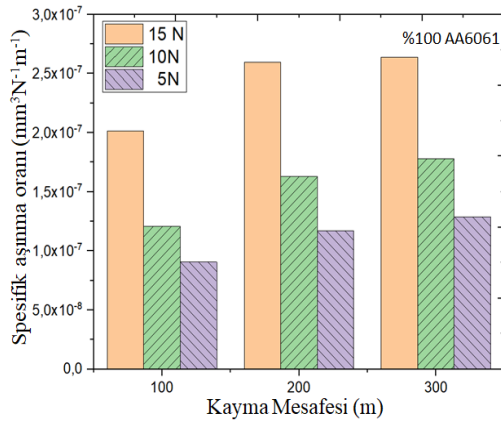
Şekil 5.9. 15 N' luk yük için kayma mesafesinin sürtünme katsayısına göre değişimi

Şekil 5.11' deki grafikten anlaşılacağı üzere, sürtünme kuvvetini, numunelerin TiB_2 ve GNP ağırlık yüzdesi doğrudan etkilemektedir. GNP eklenmesi, kendi kendini yağlama özelliklerinden dolayı sürtünme kuvvetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle %10 TiB_2 + %1 GNP içeren 4. numunede en düşük ortalama sürtünme katsayısı olarak 0,3 μ elde edildi.

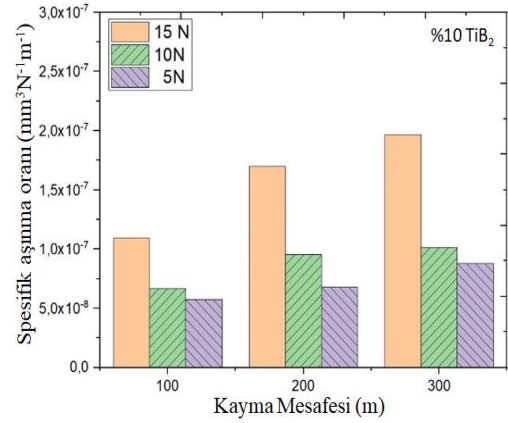
%100 AA6061 matris elemanı olan 1. numune ortalama 0,6 μ sürtünme katsayısı değeri ile en yüksek değeri göstermektedir. GNP miktarının az olması nedeniyle yetersiz yağlama özelliğinden dolayı 2. ve 3. numunelerde daha yüksek sürtünme katsayıları elde edildi (Şekil 5.11).

GNP, malzeme içerisinde temas arayüzünde ara katman ve tribofilm sağlar. Zayıf Van Der Waals etkileşimi nedeniyle GNP tabakalar arası kayması sürtünme kuvvetini azaltabilir. Bundan dolayı, tribofilmlerin sarma etkisine sahip olması nedeniyle de çatlak başlamaları ortadan kalkar. Literatürdeki önceki çalışmalarda, GNP miktarını arttırarak sürtünme kuvvetini azaltmış ve aşınmış yüzey üzerinde kararlı tabaka oluşturulabileceğini göstermiştir [84, 85].

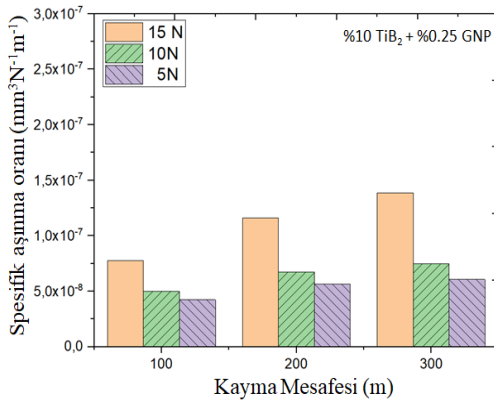
Kayma mesafesi ve yük arasındaki ilişkinin GNP miktarındaki artışla değişimini görmek için aşınma değerleri hesaplandı. Uygulanan yükler ile kayma mesafesindeki değişimler Şekil 5.12' de verilmiştir.



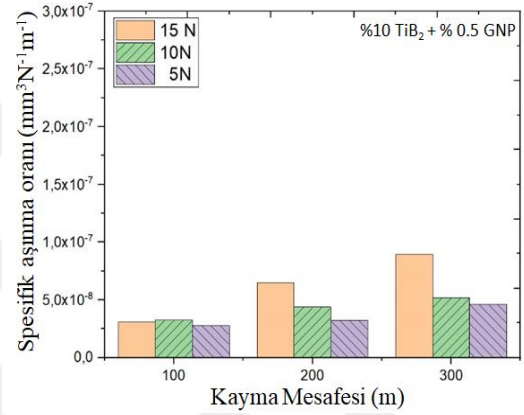
N1: %100 Al6061



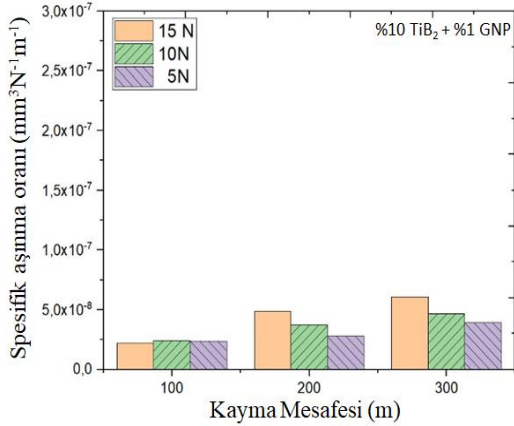
N2: %90 Al6061 + %10 TiB₂



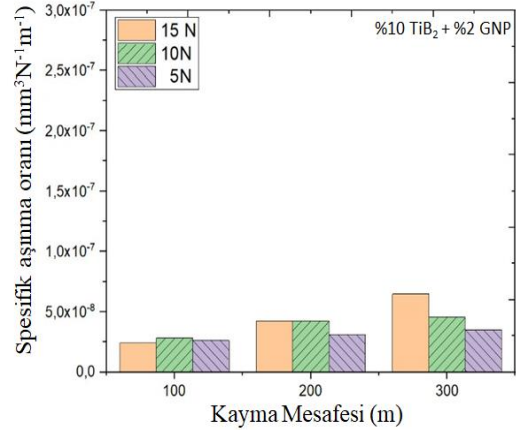
N3: %89,75 Al6061 + %10 TiB₂ + %0,25 GNP



N4: %89,7 Al6061 + %10 TiB₂ + %0,5 GNP



N5: %89 Al6061 + %10 TiB₂ + %1 GNP



N6: %88 Al6061 + %10 TiB₂ + %2 GNP

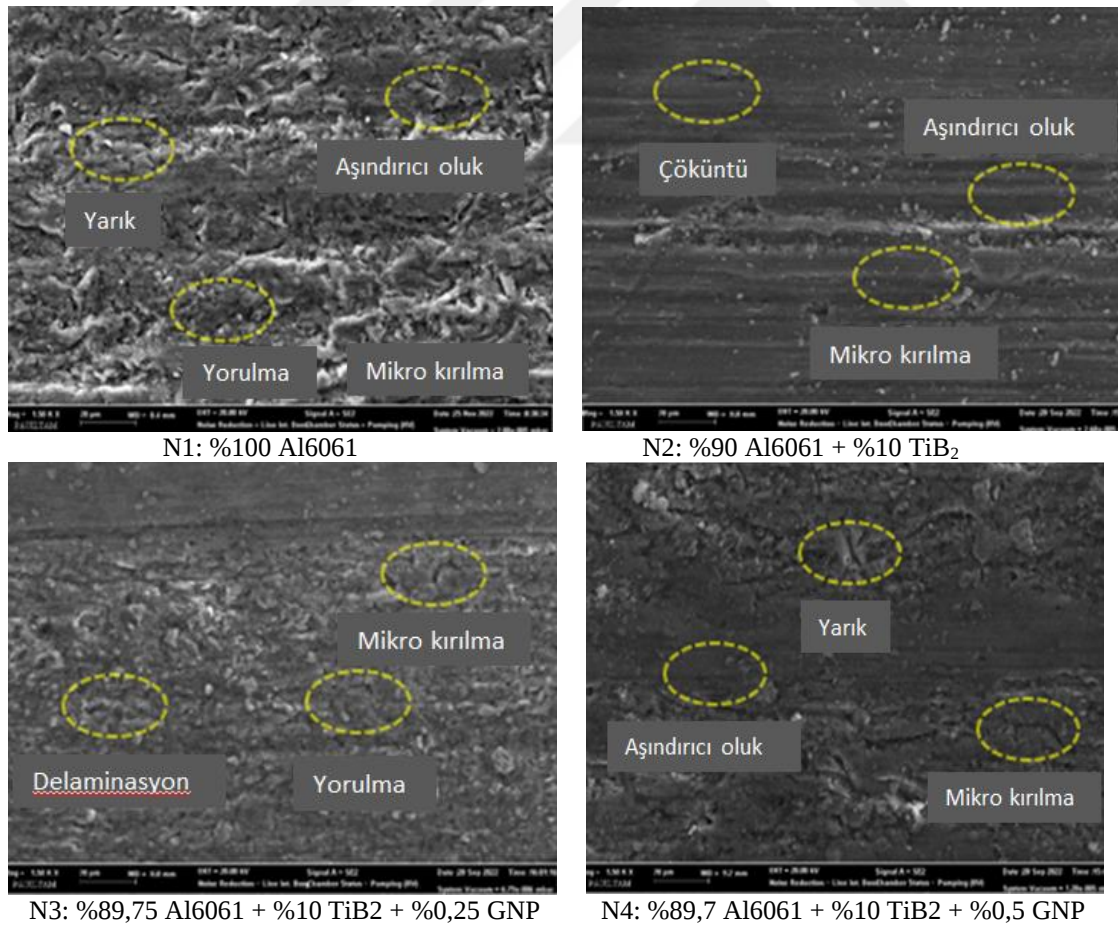
Şekil 5.10. Uygulanan yüklere göre kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak aşınma direncinin değişimi grafikleri

Şekil 5.12' deki grafikler incelendiğinde, yüklerin artmasıyla birlikte kayma mesafesi ile aşınma direncinin arttığı görüldü. Sonuçta, karşı yüzeyin sertliğinin, artan normal yük ve kayma mesafesi ile karşı yüzeyin sıcaklığının artması nedeniyle olduğu belirlendi. En düşük aşınma direnci 100 m kayma mesafesi için 5 N yük altında $4 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ değeri ile %Al6061 + %10 TiB₂ + %1 GNP içeren 5. numunede elde edilirken, en yüksek aşınma

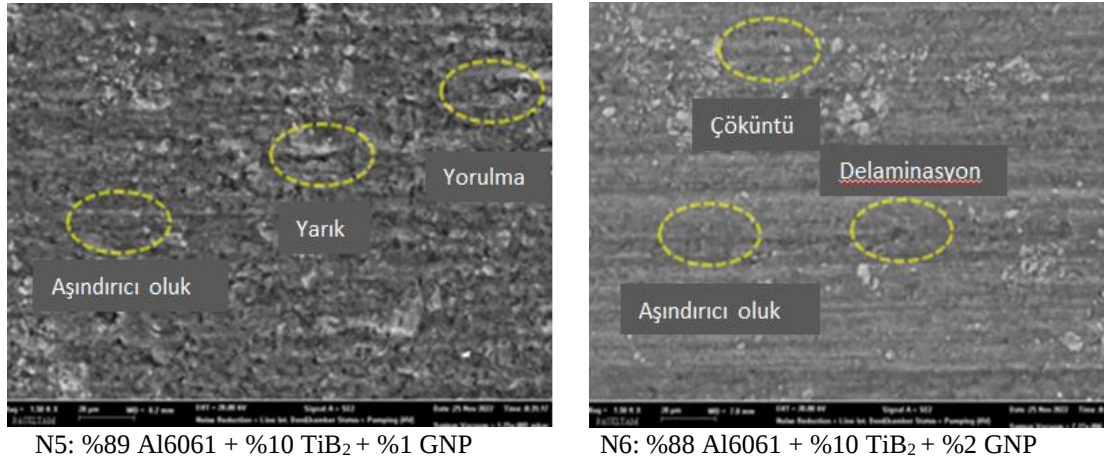
direnci ise 300 m kayma mesafesi için 15 N yük altında $2,5 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ sadece AA6061 içeren 1. numunede elde edildi.

5.6.1. Yüzey morfolojisi

Aşınma mekanizmalarını tanımlamak için tüm numunelerin çeşitli yük ve kayma mesafeleri altında SEM görüntüleri ile aşınmış yüzey karakterizasyonu yapıldı. Mikro kesme, sabanlama, mikro çizme, aşındırma ve yorulma aşınma mekanizması tüm numuneler için ayrı ayrı incelendi. Alüminyum metal matris kompozitlerin aşınma davranışı incelenmesinde, yaygın aşınma mekanizmaları, yorulma, aşındırma ve delaminasyon aşınmasını içerir [86, 87]. Aşınma mekanizmaları çalışmalarında, grafenin aşınmayı sınırlamak için geliştirilmiş iyi bir malzeme olduğu görüldü. Aşınmış yüzeyde genellikle sığ ve dar aşınma olukları görüldü. Ayrıca yüzeyde yapışma nedeniyle delaminasyon bölgeleri gözlemlendi.

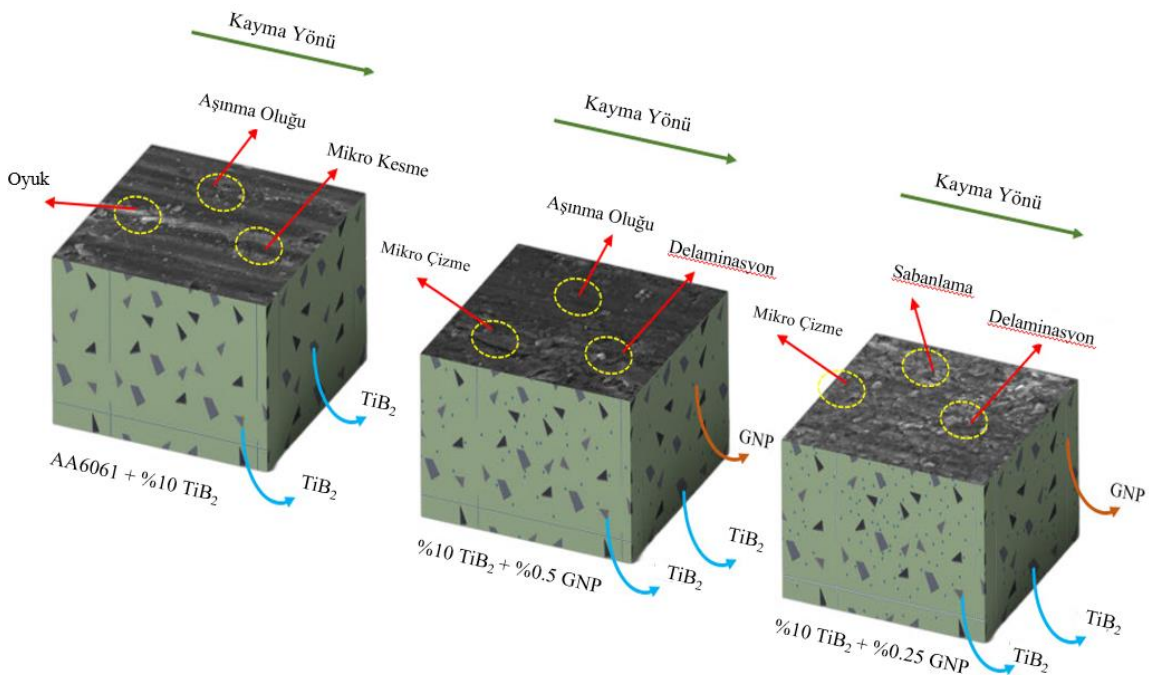


Şekil 5.11. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü



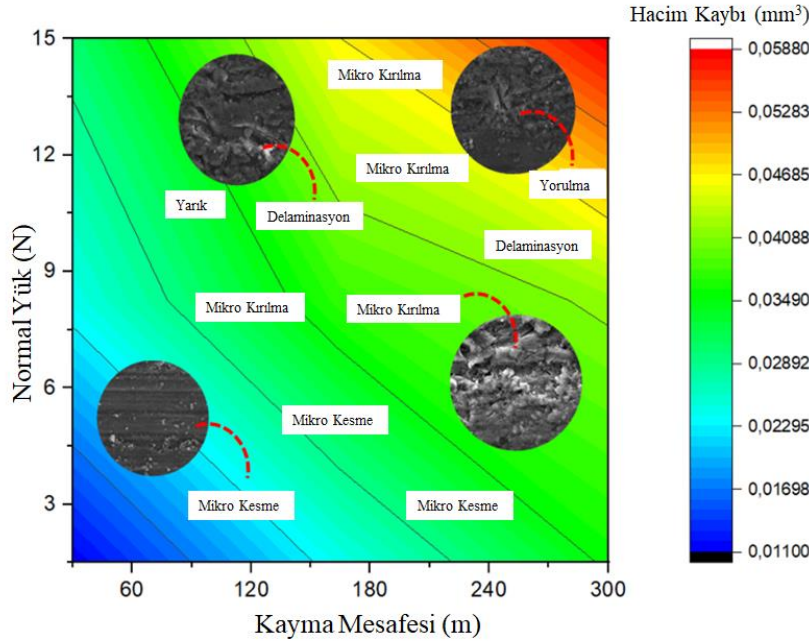
Şekil 5.11. (devam) Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüsü

Şekil 5.13' te gösterildiği gibi, %89 Al6061 + %10 TiB₂ + %1 GNP içeren 5. numunenin delaminasyonu diğer tüm numunelere göre önemli ölçüde daha azdır. Takviye elemanı olmayan %100 AA6061 içeren 1. numunede diğer numunelere kıyasla daha derin aşındırıcı oluklar görüldü. Aşınmış yüzey analizi, aşınma mekanizmasının aşınmasından delaminasyonun, şiddetli plastik deformasyonun, yorulma mekanizmasının ve artan ağırlık yüzdesi ile değiştiğini göstermektedir. Grafenin yağlayıcı özelliği sayesinde takviye yüzdesinin artışına bağlı olarak aşınma izlerinin azalmış olduğu SEM görüntülerinde doğrulandı.



Şekil 5.12. Uygulanan tüm yükler altındaki aşınma mekanizmasının şematik gösterimi

Mikro kesmenin, daha düşük kesme kuvveti ve kayma mesafesi altında oluşturduğu baskın aşınma mekanizması Şekil 5.14' te gösterilmektedir. GNP takviyeli hibrit metal matris kompozitin aşınma mekanizmasının karakterizasyonunu araştırmak amacıyla Şekil 5.15' te gösterilen aşınma haritası oluşturulmuştur.



Şekil 5.13. Aşınma haritası

Aşınma mekanizmasının çeşitli aşınma koşullarında değiştiği iyi bilinmektedir. Yorulma ve mikro kırılma aşınma mekanizmaları, aşırı aşınma koşullarında aktif mekanizmalar haline gelir. Yarık durumu ise tüm aşınma koşullarında görülmektedir. Daha düşük yük ve kayma mesafesi altında hafif yarıklar gözlenirken, şiddetli plastik deformasyon nedeniyle büyük yarık durumları gözlenmektedir. Bu durumun aşırı aşınma koşulları altında gerçekleşen sertleşme ve gevrekleşme nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Hacim kaybındaki azalma eğilimi, aşınma koşullarındaki değişikliklerle farklılık göstermektedir.

Literatürdeki çalışmalar da incelendiğinde AA6061 alaşımının tribolojik davranışı, katı yağlayıcı olarak grafen parçacıklarının eklenmesiyle azaldığı ve daha düşük değerler kaydettiği görüldü [84, 86, 87].



6. SONUÇLAR

Toz metalürjisi yöntemi ile AA6061/ TiB₂/ Grafen hibrit kompozit malzemelerin üretimi, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Takviye malzemeleri eklenmiş numunelerde en yüksek bağıl yoğunluk değerine % 98.7 %10 TiB₂ + % 0.25 GNP içeren numunede elde edilirken, minimum değere % 98.09 ile % 10 TiB₂ + % 2 GNP içeren numunede elde edildi. GNP içermeyen numunede ise bağıl yoğunluk %98.89 olarak olarak gözlemlendi. Kompozitlerde takviye oranı arttıkça yoğunlukta bir azalma tespit edildi.
2. Numuneler incelendiğinde, kompozit malzeme, homojen bir takviye dağılımı olduğu görüldü. Takviye oranlarının artışına bağlı olarak homojenlikte de artış olduğu gözlemlendi.
3. AA6061 matris içerisine TiB₂ ve GNP takviye oranı arttıkça gözeneklilik ve topaklanma oranının arttığı gözlemlendi. Gözenekliliğin üretim aşamasında, döküm esnasında yapılan hatalardan da olabileceği değerlendirildi.
4. Sertlik sonuçları incelendiğinde AA6061 matrisin içerisine ilave edilen TiB₂ ve GNP oranı arttıkça sertliğin ve mukavemetin azaldığı tespit edildi. En yüksek sertlik değerine 59.05 HB ile % 0.25 GNP oranına sahip 2. numunede rastlanırken, en düşük değere 57.5 HB ile % 0.5 GNP oranına sahip 4. numunede ölçülmüştür. Sadece % 10 TiB₂ katkısı olan 2 numaralı numunede 61.775 HB olarak sertlik değeri ölçülmüştür.
5. Çekme testi analizleri sonucunda en yüksek ortalama değer 186.7 MPa ile % 1 GNP içeren 5. numunede, en düşük değer ise 176.2 MPa ile % 0.25 GNP içeren 3. umunede ölçüldü. Sadece TiB₂ takviyesinin olduğu 2. numunede ise 175.6 MPa olarak ölçüldü. TiB₂ ve GNP takviyesinin mukavemeti ve sertliği arttırdığı değerlendirildi..
6. Kompozit yapı içerisine % 0,5'e kadar bir GNP katkısı yapıldığında mekanik özelliklerin arttığı gözlemlendi. Bu değer üzerindeki oranlarda ise grafenin nanopartikül kümelenmesi (topaklanma) eğilimine girdiği gözlenmiştir.
7. SEM analizi sonuçlarına göre, TiB₂ ve GNP takviye malzemelerinin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı doğrulandı.

8. X-ışını analizi incelendiğinde, numunelerdeki alüminyum, titanyum ve karbon atomlarının pik şiddetlerinin takviye oranı arttıkça arttığı gözlemlendi.
9. Kırık yüzeylerde görülen katman katman şeklinde olan yapının sünek bir kırılmadan kaynakladığı anlaşıldı. TiB_2 ve GNP taneciklerinin kırılmadan malzeme içerisinde kaldığı gözlemlendi. Bu durumun matris malzemesi ile takviye malzemelerinin güçlü bir bağ kuramadığına yorumlandı.
10. Aşınma analizi sonuçları incelendiğinde, takviye malzemelerinin artışına bağlı olarak hacim kaybının önemli ölçüde azaldığı görüldü. En düşük hacim kaybına 5N ağırlık altında % 0.5 GNP içeren 4. numunede rastlanırken, en yüksek hacim kaybına 15N'luk yük altında % 0.25 GNP içeren 3. numunede ölçüldü.
11. Grafenin sahip olduğu kendi kendini yağlama özelliğinden dolayı, aşınma dayanımının arttığı, sürtünme katsayısının da azaldığı tespit edildi. En düşük sürtünme katsayısı 0.3 μ ile % 1 GNP içeren 4. numunede elde edildi.
12. AA6061 alaşımının tribolojik davranışı, katı yağlayıcı olarak grafen nano parçacığının eklenmesiyle azaldığı ve daha düşük aşınma analiz değerleri kaydedildiği görüldü.

7. ÖNERİLER

1. Grafenin yağlayıcılık özelliğinden dolayı özellikle son yıllarda seramik malzemelerle birlikte alüminyum matris içerisine takviye elemanı olarak aşınma dayanımı yüksek kompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Seramik ve grafen birlikte kullanıldığında seramiğin yüksek aşınma dayanımı ve grafenin yağlayıcılık özelliğinden faydalanılarak kompozit malzemeler üretilebilmektedir.
2. TiB_2 ile birlikte grafen nanomalzeme takviyesi, yüksek mukavemetli otomotiv ve havacılık bileşenleri için üstün sertlik, basınç ve mukavemetin gerekli olduğu hibrit nanokompozit malzemelerin kullanılması gereken yerlerde iyi takviye edici partiküller olarak önerilebilir.
3. Matris malzemesin takviye malzeme eklenmesinde ultrasonik yardımcı eriyik karıştırma ile homojen olarak dağıtılmış hibrit kompoziti malzeme elde etmek için, özellikle alüminyum esaslı hibrit kompozit malzeme hazırlanması için tavsiye edilmektedir.
4. Grafen nano parçacıkların kendinden yağlayıcı olarak kullanılması aşınma direncini artırır, sürtünme katsayısını en aza indirir. Bu durum hizmet verimliliğini artırıp malzemenin ömrünü uzatır.



KAYNAKLAR

1. Gürbüz, M, Gençoğlu O., Durmuş, A., Kolbakır, F., Pekşen, C., Üreyen, M.E., Koparal A. S. ve Doğan, A. (2010). *Kompozit malzemeler ve nano boyutlu antinbakteriyel seramik toz katkılı kompozitlerin havacılık sektöründe kullanımı*. III. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Eskişehir.
2. Özer, H. (2019). *AA2024 Matrisli Karbon Nanotüp Takviyeli Metal Matrisli Nanokompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 22-40.
3. Rajmohan, T., Palanikumar, K. and Ranganathan, S. (2013), Evaluation of mechanical and wear properties of hybrid aluminium matrix composites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 2509 – 2517
4. Pul, M. (2022). Al 6061/ B₄C/ GNP hibrit kompozitlerde B₄C ve GNP takviye miktarlarının abrasiv aşınma davranışına etkisi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1179 – 1187
5. Tian, W., Li, S., Wang, B., Chen, X., Liu, J. and Yu, M. (2016). Graphene reinforced aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 23(6), 723 – 729
6. Zhai, W., Shi, X., Wang, M., Xu, Z., Yao, J., Song, S., Wang, Y. and Zhang, Q. (2014). Effect of graphene nanoplate addition on the tribological performance of Ni₃Al matrix composites, *Journal of Composite Materials*, 48(30), 3727 – 3733.
7. Niteesh Kumar S.J., Keshavamurthy R., Haseebuddin M.R. and Koppad P.G. (2017). Mechanical properties of aluminium - graphene composite synthesized by power metallurgy and hot extrusion, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(3), 605 -613
8. Tabandeh – Khorshid, M., Omrani, E., Menezes, P. L. and Rohatgi, P. K. (2016). Tribological performance of self - lubricating aluminum matrix nanocomposites: role of graphene nanoplatelet, *Engineering Science and Technology an International Journal*, 19, 463 – 469
9. Bastwros, M., Kim, G. Y., Zhang, C. Z. K., Wang, S., Tang, X. (2014). Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering, *Composites: Part B*, 60, 111–118.
10. Rashad, M., Pan, F., Tang, A. and Asif, M. (2014). Effect of graphene nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminium using a semi-powder method, *Progress in Natural Science: Materials International*, 24, 101 - 108.
11. German, R. M. (2007). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*. (çev. S, Sarıtaş, M, Türker, N, Durlu). Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, (Eserin orijinali 2005’de yayımlandı), 60-80.

12. Şenel, M. C. (2018). *Grafen-Seramik Tanecik Takviyeli Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Metoduyla Üretimi, Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 47-53.
13. Ayata, A. (2014). *Toz metal alüminyum malzemelerin mikrodalga enerjisi ile sinterlenebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
14. Çıtak, H. (2017). *TM Yöntemi ile B₄C Takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin ve Balistik Performansının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-48.
15. Ay, H. (2014), *Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımına Ti ve B₄C ilavesinin aşınma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
16. Ay, H. (2014), *Toz metalurjisi ile yöntemi ile ürtine AA7075 alüminyum alaşımına Ti ve B₄C ilavesinin aşınma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi* Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Karabük.
17. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.civilengineeringhandbook.tk%2Fpowdermetallurgy%2Fmechanicsofpowderextrusion.html>date =2017-02-11, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
18. Babayev, Y. (2007). *Bir kompresör gövdesi imalatının toz metalürjisi ve difüzyon kaynağı yöntemler uygulanarak optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
19. İnternet: Ünal, R. (2013). *Sinterleme*. URL: <https://rahmiunal.net/toz/sinterleme/sintering.html> Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
20. Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing materials, product and process engineering book*. New York: CRC Press, 12.
21. Corbin, S. F. and Wilkinson, D. S. (1994), The influence of particle distribution on the mechanical response of a particulate metal matrix composite. *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(4), 1311-1318.
22. Berthelot, J. M. (2012), *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. Berlin: Springer Science & Business Media, 1-52.
23. Uygur, I. ve Saruhan, H. (2004), Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 167-174.
24. Kaya, A. İ. (2016). *Kompozit malzemeler ve özellikleri makalesi*. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Burdur.
25. İnternet: Uslularhadde (t.y). *Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri* URL: <https://uslularhadde.com/metal-matrisli-kompozit-malzemeler> Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.

26. İnternet: Beşergil, B. (t.y.). Hibrid Kompozit (hybrid composite).URL:<http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/hibrid-kompozit-hybrid-composite.html#:~:text=Hibrid%20kompozitler%2C%20konvensiyonal%20kompozitlerin%20üstün,-1%20mm%27dur> Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
27. Borman, W. C., Hanson, M. A., Oppler, S. H., Pulakos, E. D., and White, L. A. (1993, May). The people in organization. *Organizational Management*, 76-79.
28. Hahn, H. T. and Tsai, S. W. (1980), Inroduction To Composite Materials (1st Edition), USA: CRC Press, 112 – 116.
29. Hitit, A., Kara, M. E., Akdağ, E., Erdoğan, L. ve Azınç, Y. S. (2021). Tungsten borür takviyeli bakır matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesi. *Journal of Science and Engineering*, 21, 1181 - 1186
30. Uraylı, Ç. (2018). *Cu – B₄C Kompozit Malzemelerdeki Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 12.
31. Akhtar, F., Askari, S. J., Shah, K. A., Du, X. And Guo, S. (2009). Microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and wear behavior of high volüme TiC reinforced Cu – matrix composites, *Materials Characterization*, 60, 327 – 336
32. Schuvert, T., Trindade, B., Weissgarber, T. And Kieback, B. (2008). Interfacial design of Cu- based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. *Materials Scicence and Engineering A*, 475, 39 – 44
33. Şenel M., Gürbüz M., ve Koç E. (2015), Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 56(669), 36 - 47.
34. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (2012). *Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektör Raporu*. Ankara: Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) Yayınları, 11.
35. Alüminyum Raporu, (2006). TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 24. Dönem Çalışma Raporu, Ankara.
36. İnternet: Defense Logistics Agency (2023). *Materials of Interest*. URL: <https://www.dla.mil/Strategic-Materials/Materials/> Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
37. İnternet: Alcoa (2022). *Maximizing Value Through Sustainability*. URL: <https://www.alcoa.com/sustainability/en> Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
38. Şahin, İ. (2014), Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin matkap ile delinmesi konusunda yapılan çalışmaları incelenmesi, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 55 (649), 9 – 16
39. Polmear, I. and John, D. S. (2005), Light Alloys: From Traditional Alloys To Nanocrystals (Fourth edition). USA: Butterworth-Heinemann, 231-235.

40. İnternet: URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kmyocorrosionlab.duzce.edu.tr%2FDokumanlar%2F3ea391d-3ab8-485b-b346be285b57c274_Al%2520ve%2520Ala%25C5%259F%25C4%25B1mlar%25C4%25B1%2520Korozyon.pdf&date=2017-02-11, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
41. Starke, E. A. and Staley, J. T. (1996), Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2-3), 131-172.
42. İnternet: Alüminyum Alaşımları, URL: <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/08/aluminyum-alasimlari/>, Son Erişim Tarihi: 08.05.2017
43. Karacif, K., Karabulut, H., ve Çıtak, R. (2019). Al₂O₃ Takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerde mekanik alaşımlama süresinin korozyon davranışına etkilerinin incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 576-583.
44. Iacob, G., Ghica, V. G., Buzatu, M., Buzatu, T. and Petrescu, M. I. (2015), Studies on wear rate and micro-hardness of the Al/Al₂O₃ /Gr hybrid composites produced via powder metallurgy. *Composites: Part B*, 69, 603 - 311
45. Arsun, O. (2021). Sürdürülebilir Karbon Takviyeli Al-7075 Alaşımlarının Toz Metalurjisi ile Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
46. Christy, T. V., Murugan, N., and Kumar, S. (2010). A comparative study on the microstructures and mechanical properties of Al 6061 alloy and the MMC Al 6061/TiB₂/12p. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 9(1), 57-65.
47. İnternet: Wikipedia (2023). Alüminyum oksit. URL: https://tr.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BCminyum_oksit Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
48. Bansal, S., and Saini, J. S. (2015), Mechanical and wear porperties of SiC/ graphite reinforced Al359 alloy based metal matrix composite. *Defence Science Journal*, 65(4), 330 – 338.
49. Hamouda, A. M. S., Sulaiman, S., Vijayaram, T. R., Sayuti, M. and Ahmad, M. H. M. (2007), Processing and characterization of particulate reinforced aluminium silicon matrix composite, *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, 25(2), 11 – 16.
50. Halverson, D. C., Pyzik, A. J., Aksay, I. A., & Snowden, W. E. (1989). Processing of boron carbide-aluminum composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 72(5), 775-780.
51. Cui, K., Li, Y. (2016). Fabrication, mechanical properties and thermal shock resistance of laminated TiB₂-based ceramic. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54, 148-153.

52. Şahin, Y. (2021). *Kompozitlerde kullanılan takviye elemanları ve özellikleri*. Nişantası Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
53. Antepli, A. (2021). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al2024 ve Al6061 Matrisli Grafen – Karbon Nanotüp ve Titanium Dioksik Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak, 5.
54. Özşarı, A.R.B. (2018). *Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilen AA2024 ve AA6061 matrisli, B₄C ve SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi İçyapı, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak.
55. Uenishi, K., Matsubara, T., Kambara, M. and Kobayashi, K. F. (2001), Nanostructured titanium – aluminides and their composites formed by combustion synthesis of mechanically alloyed powders. *Scripta Materialia*, 44, 203 – 266
56. Radev, D. D., Marinov, M. (2013). Comparative studies on the high – temperature and mechanochemical synthesis of titanium diboride. *Bulgarian Academy of Science, Tome*, 66, 827-832.
57. Akkurt F., Kalender E., ve Yörükoğlu A. (2019). Üstün özelliklere sahip ileri teknoloji seramiği: Titanyum diborür. *Bor Dergisi*, 203 – 208
58. Şahin, O. (2018). *TiB₂ ve B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilebilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Entitüsü, Kırıkkale, 23.
59. Frage, N., Guo, S., Cui, F., Feng, P. and Lin, T. (2007). TiB₂ and TiC stainless steel matrix composites. *Materials Letters*, 61(1), 189-191.
60. Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., and Khondaker, S. I. (2012). Graphene based materials: past, present and future progress, *Materials Science*, 56(9), 426 – 432.
61. İnternet: Nobel Prize (2023). *The Nobel Prize in Physics 2010*. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/> Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
62. Iqbal, A. A., Sakib N., Iqbal A. K. M.P., and Nuruzzaman D. M. (2020), Graphene - based nanocomposites and their fabrication. *Mechanical properties and applications, Materialia*, 12, 100815
63. Zhao Z., Bai P., Du W., Liu B., Pan D., Das R. (2020). An overview of graphene and its derivatives reinforced MMCs: Preparation, properties and applications. *Carbon*, 170, 302–326
64. Güler, Ö. and Bağcı N. (2020). A short review on mechanical properties of graphene reinforced MMCs. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6808–6833

65. Lin K., Fang Y., Gu D., Ge Q., Zhuang J., and Xi L. (2021), Selective laser melting of graphene reinforced titanium matrix composites: Powder preparation and its formability. *Advanced Powder Technology*, 32(5), 1426 – 1437
66. Su J.,Teng J. (2021), Recent progress in graphene-reinforced aluminum matrix composites. *Frontiers of Materials Science*, 15(1), 79 – 97.
67. Gürbüz, M., Şenel, M. C., Koç, E. (2018). The effect of sintering temperature, time and graphene addition on the mechanical properties and microstructure of aluminum composites. *Journal of Composite Materials*, 52(5), 553 – 563
68. Yan, S. J., Dai, S. L., Zhang, X. Y., Yang, C., Hong, Q. H., Chen, J. Z., Lin, Z. M. (2014). Investigation aluminum alloy reinforced by graphene nanoflakes. *Materials Science & Engineering A*, 612, 440 – 444
69. Bartolucci, S. F., Paras, J., Rafiee, M. A., Rafiee, J., Lee, S., Kapoor, D., and Koratkar, N. (2011), Graphene – aluminum nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, 528(27), 7933– 7937
70. Şenel, M.C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2018). *Alüminyum - grafen kompozit yapılarda çekme dayanımının, aşınma direncinin ve mikroyapının incelenmesi*. 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Samsun.
71. Şenel, M. C., Gürbüz, M. ve Koç, E. (2019). *Grafen ve SiC takviyeli alüminyum kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. 1. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun.
72. Bustamante, R. P., Bolanos-Morales, D., Bonilla-Martinez, J. and Estrada-Guel, I. (2014), Microstructural and hardness behavior of graphene – nanoplatelets/ aluminum composites synthesized by mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 578 – 582
73. İnternet: Sertlik Deneyi, URL: [https://autoeng.cu.edu.tr/storage/Lab%20F%C3%B6yler/T%C3%BCrk%C3%A7e/D-Sertlik%20Deneyi%20\(2019-2020\).pdf](https://autoeng.cu.edu.tr/storage/Lab%20F%C3%B6yler/T%C3%BCrk%C3%A7e/D-Sertlik%20Deneyi%20(2019-2020).pdf). Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
74. İnternet: Malzeme Bilgisi, URL: <https://shop.nanografi.com.tr/> Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
75. Kerti, I. (2019). B₄C takviyeli magnezyum (AZ91) matrisli kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu. *Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11, 18 - 24
76. Ayvaz, M., Çetinel, H. (2014). Farklı matris kompozisyonları ve takviye oranları için alüminyum esaslı kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve karakterizasyonu. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10, 45-33.
77. Şahin, Y. (2003). Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites. *Materials and Design*, 24, 671-679.

78. Abdollahi, A., Alizadeh, A. and Baharvandi, H. R. (2014), Dry sliding tribological behavior and mechanical properties of Al₂O₃ 4–5 wt .% B₄C nanocomposite produced by mechanical milling and hot extrusion. *Journal Of Materials & Design*, 55, 471–481.
79. Wang, J., Li, Z., Fan, G., Pan, H., Chen Z. and Zhang, D. (2012). Reinforcement with graphene nanosheets in aluminium matrix composites. *Scripta Materialia*, 66(8), 594–597.
80. Ertürk, A. T. ve Vatansever, F. (2018). Çok tabakalı sürekli polyester fiber dokuma ve PTFE partikül takviyeli polyester kompozitin aşınma davranışı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 189-194,
81. Zhang, J., Chen, Z., Zhao, J. and Jiang, Z. (2018). Microstructure and mechanical properties of aluminium - graphene composite powders produced by mechanical milling. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 4, 1 - 9.
82. Zhang, J., Yang, S., Chen, Z., Wu, H., Zhao, J. and Jiang, Z. (2019). Graphene encapsulated SiC nanoparticles as tribology - favoured nanofillers in aluminium composite. *Composites Part B: Engineering*, 162, 445 - 453.
83. Patel, S. K., Singh, V. P., Roy, B. S. and Kuriachen, B. (2020). Recent research progresses in Al-7075 based in-situ surface composite fabrication through friction stir processing: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 262, 114708.
84. Wakhi Anuar, N. F. B., Salleh, M. S., Omar, M. Z., Zamri, W. F. H. W., Md Ali, A. and Samat, S. (2023). Wear properties of graphene-reinforced aluminium metal matrix composite: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 62(1), 20220326.
85. Wilson, S. and Alpas, A. T. (1997). Wear mechanism maps for metal matrix composites. *Wear*, 212(1), 41 - 49.
86. Hasan, M. S., Wong, T., Rohatgi, P. K., and Nosonovsky, M. (2022). Analysis of the friction and wear of graphene reinforced aluminum metal matrix composites using machine learning models. *Tribology International*, 170, 107527.
87. Zhang, S., Chen, Z., Wei, P., Liu, W., Zou, Y., Lei, Y. and Zhang, L. (2022). Wear properties of graphene/zirconia biphasic nano-reinforced aluminium matrix composites prepared by SLM. *Materials Today Communications*, 30, 103009





Gazili olmak ayrıcalıktır