

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM GRAFEN OKSİT KOMPOZİT
MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE
ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kasım Safa YAKACAK

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Dr. Öğretim Üyesi Serdar ASLAN

Ağustos 2022

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM GRAFEN OKSİT KOMPOZİT
MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE
ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kasım Safa YAKACAK

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez 06.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile
kabul edilmiştir.**

**Dr. Öğr. Üyesi
Serdar ASLAN
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr
Hatem AKBULUT
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Harun GÜL
Üye**

BEYAN

Tez çalışmam boyunca tüm verilerin akademik kurallar içerisinde elde edildiğini ve ayrıca görsel ve yazılı tüm bilgilerin akademik ve etik kurallara uygun şekilde ortaya koyulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması esnasında bilimsel normlara göre uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer verilmiş tüm verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını açıkça beyan ederim.

Kasım Safa YAKACAK

07.07.2022

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bana akademik kariyerimde yol gösteren çok değerli büyüğüm, danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Serdar ASLAN hocama sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Yine çalışmalarım süresince tecrübe ve birikimlerini ile yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarımda bana desteğini her zaman hissettiren değerli hocam Doç. Dr. Mehmet UYSAL'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Erhan DURU ve Dr. Öğr. Üyesi Abdülkadir KIZILASLAN hocalarıma ayrı ayrı teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince bana yardımcı olan Öğr. Gör. Fuat KAYIŞ ve Murat KAZANCI'ya teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca desteğini esirgemeyen ablam Arş. Gör. Gülnihal Ahter YAKACAK'a ve beni yetiştiren bugünlere gelmem de maddi ve manevi katkıları olan ailemin tüm fertlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	3
2.1. Döküm Yöntemi ile Üretim.....	3
2.1.1. Döküm yöntemleri nelerdir?	5
2.2. Plastik Şekil Verme (PŞV) ile Üretim Yöntemi	5
2.2.1. Plastik şekil verme yöntemlerinin sınıflandırılması.....	7
2.3. Talaşlı İmalat Yöntemi	8
2.3.1. Talaş kaldırma yöntemleri	9
2.4. Kaynak Yöntemi.....	9
2.4.1. Kaynak yönteminin sınıflandırılması	11
2.4.2. Kaynak yöntemleri nelerdir?	11
2.5. Hızlı Prototip Yöntemi (HPY).....	11
2.5.1 HPY yöntemi ile ilgili bilgiler.....	11
2.6. Toz Metalurjisi	12
2.6.1. Toz üretimi	15

2.6.1.1. Elektrolizle üretim teknikleri	15
2.6.1.2. Kimyasal yöntemler	16
2.6.1.3. Atomizasyon yöntemi	16
2.6.1.4. Mekanik üretim yöntemleri	17
2.6.2. Toz metalurjisi yönteminin üretim aşamaları	18
2.6.2.1. Malzeme seçimi	18
2.6.2.2. Karıştırma işlemi	19
2.6.2.3. Mekanik alaşımlama	19
2.6.2.4. Tozların preslenmesi	19
2.6.2.5. Sinterleme yöntemleri	21
2.6.3. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçaların kullanım alanları	22

BÖLÜM 3.

KOMPOZİT MALZEMELER	23
3.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi	23
3.2. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Genel Özellikleri	24
3.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	25
3.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	26
3.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	29
3.5.1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler	30
3.5.2. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler	33
3.5.2.1. Seramik matrisli kompozitler	33
3.5.2.2. Polimer matrisli kompozitler	34

BÖLÜM 4.

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER	36
4.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri	39
4.1.1. Alüminyum ve alaşımları	41
4.2. Alüminyum Metal Matrisli Kompozitler	43
4.3. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları	44
4.4.1. Grafen ve özellikleri	44
4.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	45

4.4.1. Katı faz üretim yöntemleri	46
4.4.2. Toz metalurjisi yöntemi.....	47
4.5. Metal Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	47
 BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
5.1. Modifiye Hummer Yöntemiyle GO Tozlarının Üretimi.....	49
5.2. GO Tozlarının Akımsız Ni - P ile Kaplanması	52
5.2.1. Tozların kaplanması	52
5.3. Kompozit Tozlarının Hazırlanması	54
5.4. Presleme ve Sinterleme İşlemi	55
5.5. Karakterizasyon İşlemleri.....	56
 BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	59
6.1. Tozların ve Üretilen Kompozitlerin XRD ve Raman Spektroskopisi	59
6.2. Tozların ve Üretilen Kompozitlerin FESEM Görüntülerinin Analizi	62
6.3. Sertlik Ölçüm ve Yoğunluk Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	64
6.4. Aşınma İzlerinin Taramalı Elektron Mikroskopuyla İncelenmesi ve Aşınma İzlerinin FESEM Görüntüleri	65
6.5. Çekme Testi Sonuçları.....	69
 BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
7.1. Sonuçlar.....	70
7.2. Öneriler.....	71
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ	79

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Aluminum Oksit
AR-GE	: Araştırma Geliştirme
Cu	: Bakır
Dk	: Dakika
ECAS	: The Electric Current Activated/Assisted Sintering
EEM	: Eş Zamanlı Mühendislik Metodolojisi
FESEM	: Field Emission Scanning Electron Microscopy
GO	: Grafen Oksit
H ₂ O ₂	: Hidrojen Peroksit
H ₂ SO ₄	: Sülfirik Asit
HPY	: Hızlı Protatip Yöntemi
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
J	: Joule
K	: Kelvin
KMnO ₄	: Potasyum Permanganat
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
MPa	: Megapaskal
Ni	: Nikel
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
PŞV	: Plastik Şekil Verme
SiC	: Silisyum Karbür
SİHA	: Silahlı İnsansız Hava Aracı

SİP	: Sıcak İzostatik Presleme
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
Ti	: Titanyum
Tm	: Toz Metalurjisi
XRD	: X-Ray Diffraction
Zn	: Çinko
ZrO ₂	: Zirkonya
μ	: Sürtünme Katsayısı
σ_c	: Çekme Dayanımı [Mpa]



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Malzeme Üretim Yöntemleri	3
Şekil 2.2. Plastik şekil ve işlemlerinde malzemelere uygulanabilecek kuvvetler (a) çekme (b) basma (c) kayma	6
Şekil 2.3. Malzeme kaldırma İşlemleri sınıflandırılması	8
Şekil 2.4. Eklemeli İmalat Yönteminin İşlem Basamakları	12
Şekil 2.5. Elektroliz ile toz üretimi gösterimi	18
Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi	20
Şekil 2.7. Atomizasyon ile toz üretim aşamaları	20
Şekil 2.8. Toz metalurjisi yönteminin işlem basamakları	21
Şekil 2.9. Tek eksenli preslemenin şematik gösterimi	20
Şekil 2.10. Sıcak izostatik presleme şematik gösterimi	16
Şekil 2.11. Sinterleme işleminin kademeleri	17
Şekil 2.12. Ünlü endüstriyel şirketleri içeren TM ürünlerinin pazarı	22
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin şematik gösterimi	25
Şekil 3.2. Baykar Savunma Şirketinin ürettiği SİHA Akıncı	28
Şekil 3.3. Boeing 787 de kullanılan kompozitler	28
Şekil 3.4. Kompozit malzemelerin gruplandırılması	29
Şekil 3.5. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri	31
Şekil 3.6. Kompozitlerin özelliklerini etkileyebilecek dağınık faz parçacıklarının çeşitli geometrik ve uzaysal özelliklerinin şematik gösterimleri: (a) konsantrasyon, (b) boyut, (c) şekil, (d) dağılım ve (e) yönelim	33
Şekil 4.1. Endüstride kullanılan matris malzeme oranları	400
Şekil 5.1. Kullanılan Malzemeler (a) Sülfirik Asit (H_2SO_4), (b) Potasyum Permanganat ($KMnO_4$), (c) Hidrojen Peroksit (H_2O_2), (d) Alüminyum tozu (Al)	49

Şekil 5.2. Grafen oksit Üretiminde kullanılan Techizatlar (a) Mettler Toledo marka hassas terazi (b) Hielscher” marka sonikatör (c) “heidolph” marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı (d) “Hermle” marka santrifüj işlemi cihazı (e) “ISOLAB” marka plastik santrifüj tüp	50
Şekil 5.3. Ni-P banyosunda kaplanmış Alüminyum-GO kompoziti.....	53
Şekil 5.4. Üretilen kompozit tozlarının sinterleme öncesi görüntüleri	55
Şekil 5.5. Preslenmiş kompozit numuneler. (a) Al-%0.5 (b) Al-%1 (c) Al-%2...	56
Şekil 5.6. İncelemerde kullanılan FESEM Cihazı	57
Şekil 5.7. Rigaku marka XRD cihazı	58
Şekil 5.8. İncelemelerde kullanılan Raman spektroskopisi cihazı.....	58
Şekil 6.1. Saf Alüminyumun XRD paterni	60
Şekil 6.2. GO numunesinin Ni kaplaması sonrası XRD paterni	60
Şekil 6.3. Komzpoitlerin Sinterleme Öncesi (A) Ve Sonrası (B) XRD Grafikleri..	60
Şekil 6.4. Farklı Konsantrasyonlarda GO İçeren Alüminyum Kompozitlerin Raman Spektrumlarını.....	61
Şekil 6.5. Farklı indirgeyici içeren banyolardan elde edilen GO’lerin FESEM mikrografları (a) Saf Al (b) %0.5GO (c) %1GO (d)%2GO.....	62
Şekil 6.6. Saf alüminyum tozları ile farklı konsantrasyonlarda GO içeren alüminyum kompozit tozlarının FESEM mikrografları (a) saf Al, (b) ağırlıkça %0.5 GO, (c) %1 GO ve (d) %2 GO katkılı kompozit tozları.....	63
Şekil 6.7. (a) Üretilen kompozitlerin ortalama sertlik değeri (b) Al-GO kompozit malzemelerin sinterleme sonrası deneysel yoğunlukları	65
Şekil 6.8. Saf Al ve Al kompozitlerin (a) sürtünme katsayısı (b) aşınma oranı	66
Şekil 6.9. Üretilen Al-GO Metal matrisli kompozitlerin aşınma izleri	68
Şekil 6.10. Çekme testi uygulanmış Saf Al ve Al-GO kompozit numuneleri	69

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Döküm yöntemlerinin sınıflandırılması	5
Tablo 2.2. Kaynak Yönteminin Sınıflandırılması	11
Tablo 3.1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları	26
Tablo 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması ve uygulama alanları	26
Tablo 3.3. Takviye elyaflarının avantaj ve dezavantajları.....	32
Tablo 4.1. Sürekli ve hizalanmış liflerle takviye edilmiş birkaç metal-matriks kompozitin özellikleri.....	37
Tablo 4.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri.....	38
Tablo 4.3. Alüminyumun fiziksel özellikleri.....	43
Tablo 4.4. Grafen oksit özellikleri	44
Tablo 5.1. Nikel banyosunun genel bileşimi.....	52
Tablo 5.2. Üretilen tozların derişimi	55

ÖZET

Toz Metalurjisi (TM), Alüminyum (Al), Grafen Oksit (GO), Triboloji, Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Bu çalışmada, takviye malzemesi olarak grafen oksitin (ağırlıkça %0,5, %1, %2) tercih edildiği Al matrisli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Toz metalurjisi yöntemi uygulanmadan önce grafen oksit tozları Ni-P banyosunda akımsız kaplama işlemine tabii tutulmuştur. Saf Al ve ağırlıkça %0,5, %1, %2 grafen oksit takviyeli alüminyum matrisli kompozit toz karışımları 15 mm çapındaki silindirik boşluğa sahip çelik kalıp içerisinde 250MPa basınç altında preste tek yönlü basınca maruz bırakılarak disk şeklinde numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler ECAS (Electric Current Activated/Assisted Sintering) yöntemi ile sinterlenmiştir.

Üretilen bulk numunelere, saf alüminyum ve grafen oksitin (ağırlıkça %0,5, %1, %2) katkı oranlarının kompozitlerin yoğunluğuna, tribolojik özelliklerine, gözenekliliğine, mekanik özelliklerine (sertliğine, aşınma, akma ve çekme mukavemeti) ve mikro yapısına olan etkisini incelemek için testler uygulanmıştır. Testler uygun oda şartlarında ve optimum seviyede gerçekleştirilmiştir.

PRODUCTION OF ALUMINUM GRAPHENE OXIDE COMPOSITE MATERIALS BY POWDER METALLURGY AND INVESTIGATION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES

SUMMARY

Keywords: Powder metallurgy, aluminum, graphene oxide, metal matrix composites

In this study, composite materials with Al matrix, in which graphene oxide (0.5%wt, 1%wt, 2%wt) is preferred as reinforcement material, were produced by powder metallurgy method. Before applying the powder metallurgy method, graphene oxide powders were subjected to electroless coating in a Ni-P bath. Pure Al and 0.5%wt, 0.1%wt, 0.2%wt graphene oxide reinforced aluminum matrix composite powder mixture was obtained in a steel mold with a cylindrical cavity with a diameter of 15 mm, and disc-shaped samples were obtained by pressing under 250MPa pressure with unidirectional pressure and ECAS (Electric Current Activated) /Assisted Sintering) method, these discs were sintered.

The effect of the additive ratios of pure Al and graphene oxide (0.5%wt, 1%wt, 2%wt) on the density, tribological properties, porosity, mechanical properties (Vickers hardness, abrasion resistance, yield, and tensile strength), and microstructure of the composites were observed on the bulk samples produced. tests were used to examine it. The tests were performed in convenient room conditions and at the optimum level.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde artan sanayileşmeyle, klasik yöntemlerle üretilen endüstriyel malzemelerden beklenen bazı özellikler (yüksek mukavemet, yüksek elektriksel özellik vb.) yeterli beklentiyi karşılamamaktadır. Bu yüzden, ileri teknolojiye sahip yeni ve akıllı malzemelerin geliştirilmesine ve üretilmesine yönelik yapılan AR-GE faaliyetleri çağımızda önem ve hız kazanmıştır [1]. Ek olarak, özellikle nanobilimin insan hayatının bir parçası olmasıyla birden fazla alanda yeni nesil kompozit malzemeler üretilmeye ve geliştirilmeye başlanılmıştır [2].

Kısaca kompozit malzemeleri tanımlayacak olursak, tek bir malzemede iki veya ikiden fazla malzemenin üstün özelliklerinin bir araya gelmesi ile elde edilen yeni malzeme olarak tanımlanır [3]. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler sınıflandırılır (metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler). Polimer matrise sahip kompozitlerin (PMK) matris malzemesi polimer olan kompozit çeşidi olup PMK'ların düşük yoğunluğa sahip olması, ekonomik olması, mekanik özelliklerinin iyiliği ve kolay üretilebilirliği gibi özellikleri nedeniyle endüstride kullanım alanı oldukça genişir [4]. Metal matrisli kompozitler ise partikül yapıdaki takviye malzemelerin belli oranlarda karışmasıyla elde edilir. Takviye fazı olarak genellikle silisyum nitrür (Si_3N_4), zirkonya (ZrO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum karbür (SiC) gibi seramikler kullanılabilir. MMK üretiminde matris malzemesi olarak genellikle bakır (Cu), çinko (Zn), magnezyum (Mg), alüminyum (Al) ve titanyum (Ti) gibi metaller ve alaşımları tercih edilmektedir. Unutulmamalıdır ki matris malzemenin seçiminde oksitlenme, korozyon dayanımı ve mekanik özellikler gibi unsurlar göz önünde bulundurulmaktadır [5].

Bu çalışmada, ağırlıkça %0,5 GO %1 GO ve %2 GO takviyeli Alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi metoduyla takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin üretildikten sonra ECAS yöntemiyle sinterlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmamızda

tercih ettiğimiz kompozit malzeme üretiminde kullanılacak matris malzemesinin ve takviye elamanıyla ilgili genel literatür bilgileri aşağıda özetlenmiştir.

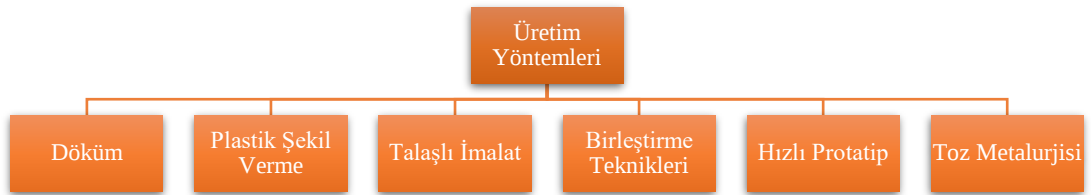
MMK’lerde takviye fazı olarak tercih edilen Alüminyum ve Alüminyum alaşımları dünyada demirden sonra en fazla kullanım alanına sahip metal ve alaşımıdır. Kolay işlenebilirlik, kolay şekillendirme, yüksek tokluk, iyi ısı ve elektrik iletkenliği, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve dayanım gibi üstün özellikler alüminyumun yoğun bir şekilde tercih edilmesine sebep olmuştur. Bu nedenle endüstride birçok sektörde; otomotiv, uzay ve uçak sanayi, havacılık, gibi alanlarda Alüminyum ve Alüminyum alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

2004 yılında ilk kez sentezleme işlemi yapılmış olan karbon takviyeli grafen nanotabaka, 2010 yılından itibaren kompozit yapılarda takviye ürünü olarak kullanıma başlamıştır. Altıgen hücreli ve yaklaşık olarak bir atom kalınlığında olan grafen oksit, grafit kristal yapının tek katmanıdır. Grafen oksit ayrıca optik ve termal özellik ile üstün mekanik özellikli bir malzemedir [7].

BÖLÜM 2. MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

İnsanoğlu var olduğu süre boyunca ihtiyaçlarını gidermek için üretime ihtiyaç duymuş ve farklı üretim metotları geliştirilmiştir. Günümüzde insanoğlunun yaşam standartları olağanüstü artış göstermiş ve üretim yöntemlerinin gelişmesini etkilemiştir. Önemli oranda seri ve ucuz olarak yüksek kaliteli ürünlerin tasarımını sağlayan üretim yöntemlerinin geliştirilmesi sayesinde endüstride gelişim ilerlemiştir. Bu sebeple mühendisler üretmek istediği parçanın olumlu ve olumsuz yanlarını tanıyarak elde etmek istedikleri tasarıma en kısa yol olan her bir üretim yöntemini iyi bilmelidir [8].

Üretim, doğada bulunan organik ya da inorganik maddelerin istenilen özellikte ürünlere dönüştürmek olarak tanımlanabilir. Yani kısacası üretim malzemelerin istenilen biçim ve boyutlara getirilmesidir. Üretim yöntemleri Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Kısaca üretim yöntemleri, döküm, toz metalurjisi, kaynak, talaş kaldırma, plastik şekil verme ve hızlı prototip ile yapılan üretimleri içerirler [9].



Şekil 2.1. Malzeme Üretim Yöntemleri

2.1. Döküm Yöntemi ile Üretim

Önemli bir üretim yöntemi olan döküm yönteminin buluşu ile insanoğlunun hayatı üretim açısından değişime uğramıştır. İnsanların metallerle tanışıp malzeme olarak tercih etmeleri MÖ 7000 'den önceki yıllara kadar uzandığına dair bulgular vardır. Bu

devirlerde özellikle doğada saf olarak elde edilebilen gümüş ve altın gibi metallerin şekillendirilebilme kolaylıklarından dolayı sadece tas, bardak ve günlük ihtiyaç gibi basit eşyaların yapımında kullanıldığı tahmin edilmektedir [10].

Metal dökümü tanımlama olarak, istenilen bir şekli oluşturmak için, istenen metal veya alaşımın ergitilmesi ile istenen ürünün şeklinin negatifi olan kalıbın boşluğuna, basınç uygulanarak veya yerçekimi ile doldurularak katılaşmasının sağlandığı yöntemdir [11].

Kaliteli bir döküm parçası elde etmek için bazı ilkeler göz önünde tutulur;

- Uygun döküm yönteminin tercihi
- Kalıp ve model tasarımı (yolluk ve besleyici hesaplamaları)
- Kalıp ve maçaların hazırlığı, özelliklerini belirlenmesi ve kontrolü
- Alaşım hazırlama, uygun ergitme ünitesinin seçilmesi ve ergitme için gerekli işlemlerin yapılması (gaz giderme, flakslama, aşılama, modifikasyon)
- Sıvı metalin kalıba uygun şekilde ve akıcılıkta girişinin sağlanması
- Döküm yapısının kontrolü [11]

Döküm Yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre bazı üstünlükleri vardır. Bazı durumlarda yalnızca sadece döküm yönteminden faydalanmak yeterli olmasına rağmen bazı durumlarda da diğer üretim yöntemlerinden olan diğer üretim yöntemleri olan kaynak, dövme, plastik şekil verme (PŞV), talaşlı imalat ile üretim ve hızlı protatip gibi üretim yöntemlerinden de faydalanmak gerekmektedir. Üretim için de her tekniğin yeri ayrı önemlidir. Her yöntem kendi içinde üstün olduğu ve tercih sebebi olan üretim kademelerine sahiptir [12].

Döküm yönteminin tercih sebebi olmasını gerektiren durumlar ve dökümün avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Dıştan ve içten karmaşık geometrili parçalar dökülebilir.

- Dökme demir gibi bazı metaller yalnızca döküm yöntemi kullanılarak üretilirler.
- Basitleştirilebilir bir üretim yöntemine sahiptir.
- Tek bir işlem ile parçalar döküm yöntemi ile üretilirler.
- Döküm yöntemi ile çok sayıda parça, hızlı bir şekilde üretimi yapılabilir.
- Diğer üretim yöntemlerinde yapımı zor olan ve ekonomik açıdan uygun olmayan ağır ve büyük ürünler imal edilebilir.
- Döküm yöntemi ile üretim ekonomiktir [13].

Döküm yönteminin birçok avantajının yanında dezavantajları da bulunmaktadır;

- Çok ince kesitlere sahip parçaların üretilmesi oldukça güçtür.
- Az sayıda üretim için ekonomik değildir.
- Dayanım özellikleri açısından diğer yöntemlere göre sınıfta kalır.
- Genellikle iyi bir yüzeyin kalitelerinin sağlanması güçtür.
- Doğaya zararı diğer yöntemlere göre oldukça fazladır [13].

2.1.1. Döküm yöntemleri nelerdir?

Döküm yöntemleri Tablo 2.1.'de detaylı olarak gösterilmektedir.

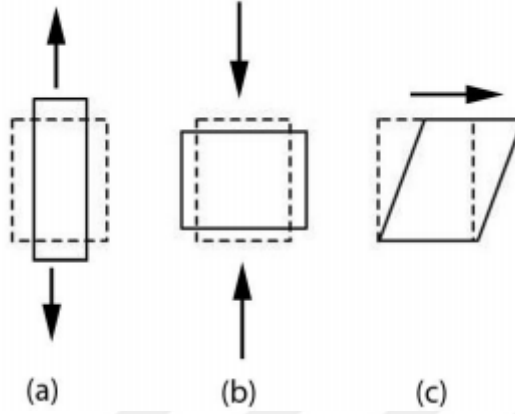
Tablo 2.1. Döküm yöntemlerinin sınıflandırılması [13]

DÖKÜM YÖNTEMLERİ		
Harcanan Kalıp Kullanılarak	Kalıcı Kalıp Kullanılarak	Diğerleri
Kabuk Kalıba Döküm	Metal Kalıba (Kokil) Döküm	Çil döküm
Kum Kalıba Döküm	Savurma Döküm	Sürekli döküm
Alçı Kalıba Döküm	Sürekli Döküm	
	Vakum döküm	

2.2. Plastik Şekil Verme (PŞV) ile Üretim Yöntemi

Bir katı maddenin şeklini istenilen bir şekle dönüştürmek için uygulanan ve bu işlem esnasında malzemede kütle ve bileşim değişikliğine uğramadan gerçekleştirilen üretim

yöntemidir. Değişik amaçlarla plastik şekil verme yöntemleri geliştirilmiştir [14]. PŞV işlemlerinde malzemelere uygulanan kuvvet yönleri Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Plastik şekil ve işlemlerinde malzemelere uygulanabilecek kuvvetler (a) çekme (b) basma (c) kayma

Şekil değiştirme işlemi uygulanan bir malzemede oluşan birim şekil değişimi, bu malzemede meydana gelen şekil değiştirme işleminden önce ve sonrasındaki boyutuna bağlı olarak tarif edilir [14].

Plastik şekil vermenin diğer üretim yöntemlerine göre üstünlükleri vardır. Bu üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- PŞV ile üretim yönteminde malzemenin hacim ve kütlesi sabit kalmakta sadece şeklinde değişiklik meydana gelir.
- PŞV ile üretimlerinden sıcak şekillendirmede söz konusu malzemenin katılaşması esnasında boşluk ve gözenekler oksitlenmeden kapanır. Mekanik özelliklerde (akma dayanımı, süneklik, çekme dayanımı ve darbe dayanımı) iyileşme görülür.
- PŞV esnasında oluşan yeniden kristalleşme ile kaba taneli döküm yapısı yerini homojen ince taneli bir yapıya bırakır.

- Soğuk şekillendirme esnasında meydana gelen pekleşme, malzemenin dayanımı arttırabilir.
- PŞV yöntemiyle birçok dar toleranslara sahip hassas parçaların üretimi ve çok kaliteli yüzeyler elde edilir.
- PŞV işleminde kullanılan tezgâh ve teçhizatlar pahalı olduğundan dolayı bu işlemler ancak seri üretim için ekonomiktir [14].

2.2.1. Plastik şekil verme yöntemlerinin sınıflandırılması

Endüstride malzeme üretimi için diğer üretim yöntemlerine göre daha fazla tercih edilen PŞV yöntemi, genellikle üretim esnasında kullanılan malzemenin yüzey/hacim oranına göre sınıflandırılırlar [15].

Genellikle başlangıçtaki parça şekilleri, silindirik kütükler ve dikdörtgen kesitli çubuklardan oluşmaktadır. Bu kriterlere göre sınıflandırma yapılmaktadır. Sınıflandırmanın içerdiği uygulama yöntemleri aşağıdakiler gibidir [15].

- Haddeleme tablo
- Dövme
- Ekstrüzyon
 - Direkt ekstrüzyon
 - Endirekt ekstrüzyon
 - Hidrostatik ekstrüzyon
- Tel ve çubuk çekme

Kütle şekil verilmesinden farklı olarak başlangıç malzemesine yüksek oranda yüzey/hacim oranına sahip ürüne PŞV yapılmakta ve presler vasıtası ile bu işlem yapıldığından genel olarak buna pres işi olarak adlandırılır. Bu işlemler sırasıyla olmak üzere;

- Kesme
- Bükme ve kıvrırma
- Derin çekme
- Gerdirme
- Lastikle şekillendirme
- Damgalama
- Patlamalı şekillendirme
- Basınç ile şekillendirme (Hidroform) [16-17-18]

2.3. Talaşlı İmalat Yöntemi

Talaşlı imalat yöntemi başlangıç parçasından malzeme uzaklaştırarak, kalan parçanın istenen geometriye sahip olmasını temsil eden bir malzeme şekillendirme yöntemidir. Genel olarak, dövme çubuk, çekme ve döküm gibi imalat yöntemlerinden sonra gerçekleştirilen bir işlemdir [19]. Diğer yöntemler, başlangıç parçasının genel şeklini oluşturur. Talaş kaldırma, diğer yöntemlerle oluşturulamayan son şekli, yüzey kalitesini, geometrik detayları ve boyutları gibi detayları oluşturabilir. Birçok malzeme kaldırma işlemi vardır. Bunlar Şekil 2.3.'te gösterilmektedir;



Şekil 2.3. Malzeme kaldırma İşlemleri sınıflandırılması

Talaşlı imalat yöntemin diğer yöntemlere avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Talaşlı İmalat Yönteminin avantajları arasında;

- İşlenebilen parça malzemesinin çeşitliliği

- Çoğunlukla metalleri kesmek için kullanılır
- Parça şekillerinin ve özel geometrik formların çeşitliliği
- Çok düz kenar ve yüzeyler [20]

Bu üstünlüklerin yanı sıra söz konusu yöntemin bazı olumsuzlukları vardır. Bunlar;

- Malzeme sarfıyatı fazladır
- Talaşlı imalatla üretilen talaşlar atık malzemedir
- Zaman alıcıdır.
- Bir talaş kaldırma işlemi uzun sürebilen bir işlemdir [20].

2.3.1. Talaş kaldırma yöntemleri

Birçok talaş kaldırma yöntemi vardır. Bunların en önemlileri

- Tornalama
- Delme
- Frezeleme

Diğer talaş kaldırma yöntemleri:

- Vargelleme
- Broşlama
- Testereyle kesme

2.4. Kaynak Yöntemi

Kaynak yöntemi, uygulanacağı malzemenin cinsine göre, plastik malzeme kaynağı ve metal kaynağı olarak ele alınır.

Metal Kaynağı: Metal malzemeyi basınç, ısı veya basınç ve ısıyı bir arada kullanarak veya aynı cinse sahip veya ergime aralığı aynı malzeme ilave ederek veya etmeyerek birleştirmeye denir. İki parçanın birleştirmesi işleminde ilave bir malzeme kullanılıyor ise bu malzemeye ilave malzeme adı verilir [21].

Plastik Malzeme Kaynağı: Aynı veya farklı cinse sahip termoplastik (sertleşmeyen plastik) parçayı basınç ve ısı ile ve aynı cinsten bir plastik malzeme ilavesi katarak veya katmayarak birleştirme işlemine denir.

Kısaca, ana metalin kaynak esansında erimesini sağlayan başlıca parametreler şunlardır.

- Bağlantı tipi ve metalin kalınlığı
- Malzemenin ısı iletkenliği
- Kaynak işleminden önce esas metalin sıcaklığı
- Metalin ergime sıcaklığı
- Elektrodun hareketi ve açısı
- Kaynak işlemi sırasındaki ısı girdisi [22]

Kaynak yönteminin döküm işlemine göre sağladığı üstünlükler ise şu şekildedir;

- Kaynakta işleminde döküm modeli masrafı yoktur.
- Kaynak tamir işleminde üstünlük sağlar.
- Döküm yönteminde 6 mm parçaların üretilmesi zor iken kaynak işleminde bu gibi ince metallerin üretilmesi mümkündür.
- Ağırlıktan ekonomi sağlar.
- Çok fazla üretimi yapılacak malzemeler söz konusu ise kaynak yöntemi döküm yöntemine göre daha üstündür [10].

Kaynak yönteminin ile perçinle birleştirme yöntemine göre göre üstünlükleri;

- Kaynak, işçilikten ve ağırlıktan tasarruf sağlar [21].
- Daha iyi sızdırmaz bağlantılar oluşturur.
- Perçine göre bağlantıların mukavemeti daha yüksektir.
- Kolay ve daha ucuz konstrüksiyonların üretimini mümkün kılar [12].

2.4.1. Kaynak yönteminin sınıflandırılması

Kaynak yönteminin sınıflandırılması Tablo 2.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Kaynak Yönteminin Sınıflandırılması

Kaynak İşleminin Cinsine Göre	İmalat Cinsine Göre	Kaynağın Amacına Göre
Ergitme Kaynağı	El Kaynağı	Birleştirme Kaynağı
Basınç Kaynağı	Mekanik Kaynak	Doldurma Kaynağı
	Yarı Otomatik Kaynak	
	Tam Otomatik Kaynak	

2.4.2. Kaynak yöntemleri nelerdir?

Endüstride kullanılan bazı kaynak yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

- Klasik elektrik ark kaynağı
- Toz altı kaynağı
- TIG-MIG kaynağı
- Nokta (Punta) kaynağı
- Gaz altı kaynağı
- Su altı kaynağı
- Pres veya basınç kaynağı
- Elektrikli makara kaynağı
- Gaz ile eritme kaynağı
- TIG kaynağı [23]

2.5. Hızlı Prototip Yöntemi (HPY)

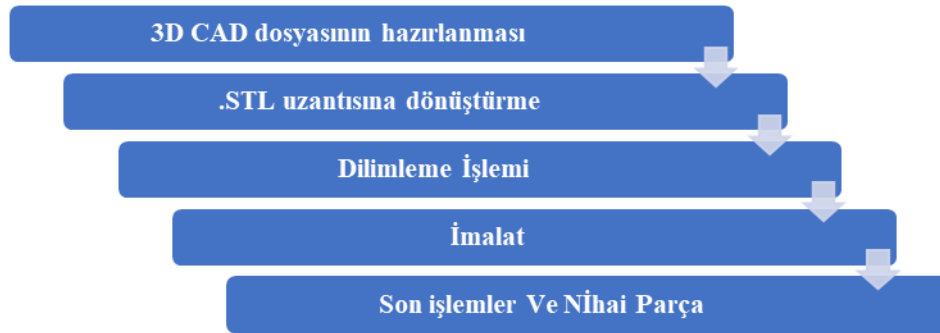
2.5.1. HPY yöntemi ile ilgili bilgiler

Hızlı prototip Yöntemi (HPY) geleneksel olarak bildiğimiz ve kullanımda olan imalat yöntemlerine göre elde edilmesi güç karmaşık geometriye sahip ürünlerin acaba

imalatı mümkün mü sorusunu ortadan kaldırarak ve hayal gücümüzü zorlayan bir yöntemdir.

HPY ile plastik, metal ve kompozit ürünler ile ergitme, malzeme yığma ve yapıştırma gibi çeşitli yöntemler ile 3 boyutlu parçalar elde edilebilir [24].

Günümüzde hayal edilebilen ürünlerin birçoğunun tasarımı çeşitli programlar yardımıyla dijital ortamında yapılır. Fakat tasarım yapılırken parçanın imalatının mümkün olması en önemli etmenlerden biridir. Tasarımı yapılan ürünlerin çeşitli imal etme kısıtlamaları veya çeşitli işleme kısıtlamaları olduğundan dolayı imalatı yapılamamaktadır. İlerleyen teknoloji sayesinde Hızlı prototip Yöntemi (HPY) tasarımı yapılan bir ürünün “imal edilebilir mi?” sorusunu ortadan kaldırmaktadır. [24]. Hızlı prototip Yöntemi, geleneksel imalat yöntemlerinin tersine imal edilecek parçanın 3 boyutlu (3B) model verisinden metal, plastik, kompozist seramik veya biyo mürekkep gibi malzemeler tercih edilerek katman katman şeklinde imal edilmesidir [25]. İmalatı biten parçaya sırasıyla temizleme, destek elemanları varsa parçadan ayırma, fırınlama, sinterleme ve infiltrasyon işlemleri yapılır ve ürünün parça imalatı tamamlanmış olur.



Şekil 2.4. Eklemeli İmalat Yönteminin İşlem Basamakları [26]

2.6. Toz Metalurjisi

İmalat sektöründe artan sayıda şirketler, ürün kalitesi ve verimliliği artırmak için eşzamanlı mühendislik metodolojisini (EEM) benimsemektedir. EEM tekniklerinin uygulanması, tasarım aşamasında ürünün yaşam döngüsü gereksinimlerinin analizini

gerektirir. Tasarım ve üretim işlevlerini entegre etmek için bir dizi yeni üretim sistemleri geliştirilmiştir. Sektörde şirketler temel iş faaliyetlerine yoğunlaştıkça birçok şirket üretim operasyonlarını emek ve diğer kaynakların daha ucuz olduğu uzak yerlere yaymaktadır. Ayrıca, ürünlerinde çevre dostu süreçlerin ve malzemelerin benimsenmesinde öncü bir rol oynamaktadır [27]. Toz metalurjisi ile üretim teknikleri bunların başında gelmektedir.

Günümüz çağında ilerleyen endüstrisinde kaliteli parçaların tek etapta ve herhangi bir ek işlem gerekmeden üretilmesi önem kazanmaktadır. Diğer bir deyişle, bir parçanın kimyasal özellikleri, mekanik özellikleri ve malzemelerin çalışma koşullarında elverişli ve tekrarlanan üretim devamlılığının sağlanması açısından çok önemlidir. Geleneksel üretim yöntemleri (döküm, PŞV, kaynak gibi) ile parça üretimine iyi bir alternatif olan toz metalurjisi yöntemi ile parça üretimi, endüstriyel pazarda birçok alana hizmet vermeye devam etmektedir [28].

Toz metalurjisi (TM) terimi, toz metallerden fonksiyonel bileşenlerin imalatını içeren endüstriyel bir işlem ifade eder [29]. Yani kısaca TM toz halinde bulunan malzemelerin hammadde olarak kullanarak endüstri ürünleri parçaları üretmek için kullanılmakta olan bir üretim yöntemidir.

Toz metalurjisi (TM), net şekilli parçaların daha yüksek malzeme kullanım oranında yapılabilmesi ve malzeme özelliklerinin uygulamaya uyacak şekilde uyarlanmasında esneklik gibi birçok avantaj sunan çevre dostu bir süreçtir. Bir dizi küçük ve orta boy parça için TM, işleme için uygun maliyete sahip bir alternatif olabilmektedir [27]. Toz metalurjisi parça üretim yöntemine göre en mükemmel örnek olarak parçacık takviyeli kompozit malzemeler verilebilir.

Çok çeşitli ürünler TM ile aşağıdaki malzeme türlerinin oluşturulmasında özellikle olağanüstü özelliklere sahip olduğu için üretilir:

- Yüksek erime noktalı metallerden oluşturulan alaşım malzemeler [30].
- Metal ve metal dışı malzemelerden yapılmış kompozitler.

- Birbirlerine çözünmeyen metallerden oluşan kompozitler.
- Gözenekli malzemeler [30].

TM ile parça üretimi İşlemin iki ana aşaması vardır. Birinci aşama metal tozunun 1 GPa'ya kadar basınçlarda bir kalıpta sıkıştırıldığı sıkıştırması iken ikinci aşama bir fırın içindeki parçanın, malzemenin erime noktasının biraz altında bir sıcaklığa ısıtılmasını içeren sinterleme işlemidir (demirli parçalar için yaklaşık 1200°C) [29].

TM ile parça üretim işleminin diğer yöntemlere göre bazı avantajları mevcuttur.

- TM, net şekil ve net şekle yakın ürünler üreterek, eritme ve katılaşma ile ilgili ciddi ayrışmayı önler. İşleme ve kaynak maliyetlerini ve yüksek hammadde kullanımını azaltarak daha düşük maliyet elde edebilir. Özellikle otomotiv ve uçak sektöründeki bazı parçalar bu yöntem ile seri ve ekonomik olarak rahat şekilde üretilmektedir.
- Tozların bileşimi ve şekillendirme koşulları ayarlanarak istenen mikro yapı elde edilebildiğinden alaşımların mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirilir.
- Üretim sırasında proses parametreleri ve prosedürleri optimize edilerek düşük maliyet ve az miktarda hammadde atığı elde edilebildiğinden TM proseslerinde yüksek ekonomik verimlilik beklentilerini diğer üretim metotlarına kıyasla başarıyla karşılamaktadır [31].

Fakat TM ile parça üretim işleminin diğer yöntemlere göre birkaç dezavantajlara sahiptir.

- İşlem maliyeti oldukça yüksektir
- Karmaşık şekillerin üretiminin zordur
- Büyük parça üretimine uygun değildir.
- Seri üretim uygulaması yapılmayacaksa ekonomik bir yöntem değildir.
- Kullanılan toz malzemenin maliyeti ingota daha yüksek maliyettedir [32].

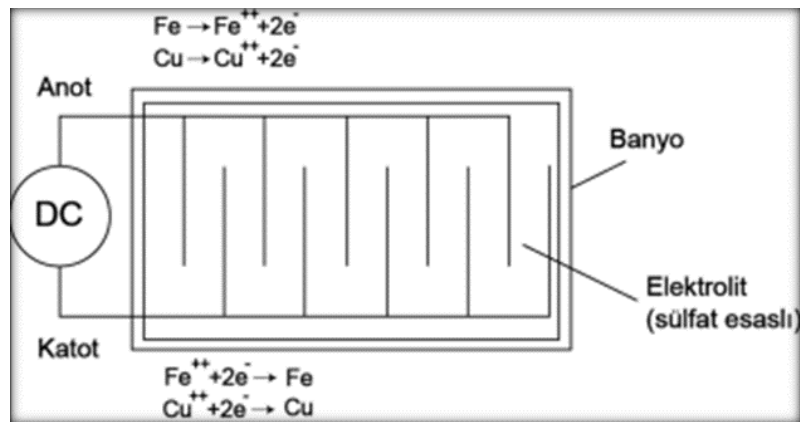
2.6.1. Toz üretimi

TM yöntemi ile üretilmiş olan bir parçanın toz üretim, üretilen tozların karakteristiği açısından önemlidir ve üretilecek olacak parçanın kalitesi doğrudan tozun kalitesine, bileşimine ve özelliklerine bağlıdır. Bir malzemenin toz haline getirilebilmesi için seçilen yöntemin üretimi yapılacak olan parçanın istenen özelliklerine, maliyet ve tepkimelere gibi faktörlerin seçimine doğrudan bağlıdır [38]. Toz üretim yöntemleri arasında 4 ana üretim yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır;

1. Elektrolizle Üretim Teknikleri
2. Kimyasal Üretim Yöntemleri
3. Atomizasyon yöntemi
4. Mekanik Üretim Yöntemleri [38].

2.6.1.1. Elektrolizle üretim teknikleri

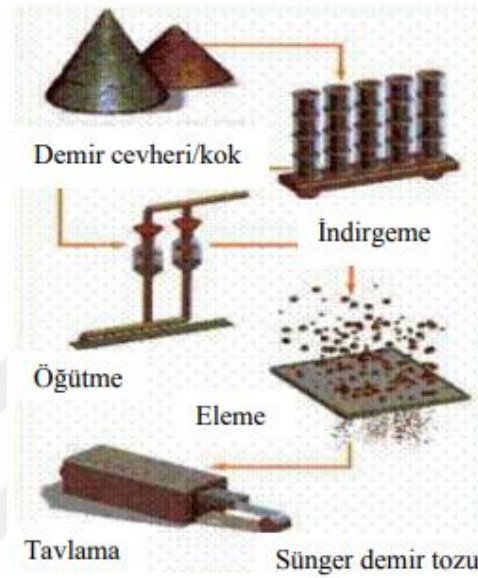
Elektroliz yönteminde, elektrolit toz örneğini askıya almalı ve elektrik devresini tamamlamalıdır. Bu nedenle, kabul edilebilir bir elektrolitin seçimi, analiz edilen metal tozuna ve boyut aralığına da bağlıdır. Elektrolit ve partiküller arasında partikül boyutunu veya elektrolit iletkenliğini değiştirebilecek hiçbir kimyasal reaksiyon meydana gelmez. Ayrıca, bazı tepkiler o kadar yavaş başlar ki ölçülebilir bir değişiklik gerçekleşmeden önce veri alınabilir [39].



Şekil 2.5. Elektroliz ile toz üretimi gösterimi [39].

2.6.1.2. Kimyasal yöntemler

Kimyasal indirgeme yöntemi, bakır oksitli demir, nikel, molibden, kobalt gibi metal oksitlerin öğütülmesi ile, hidrojen ve karbon monoksit gibi indirgeyici gazlar ile, uygun sıcaklık ortamında saf metallere kimyasal olarak indirgenmesi yöntemi işlemidir [40].



Şekil 2.6. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi [30]

2.6.1.3. Atomizasyon yöntemi

Atomizasyon tekniği, ultra ince metal ve alaşım tozu üretimi için endüstride yaygın olarak kullanılmakta olan bir endüstriyel işlemdir. Bu yöntem, ergimiş hale getirilmiş sıvı metalin, ince ince damıtılarak kinetik enerji ile bir nozuldaki yüksek hızla bir sıvı veya gaz jetiyle soğuması ile parçalanmaya ve metal damlacıklarına ayrılmaya neden olmasıyla gerçekleşir. Metal tozu parçacıkları halinde küreselleştirilir, soğutulur ve katılaşır. Bir atomizasyon sisteminin esas amaçlarından biri, yüksek verimde ince toz üretme kabiliyetindedir [38].

Atomizasyon işleminin ince ayarlanması, gaz basıncı, gaz tipi, eriyik akış hızı ve eriyik aşırı ısınması işlemsel parametrelerinin optimize edilmesiyle elde edilir atomizasyon işlemiyle elde edilecek tozun kalitesini etki eden çeşitli faktörler bulunmaktadır.

Ergitilme işlemi uygulanmış sıvı metal toz haline getiriliş biçimine ve püskürtülen maddeye göre birkaç biçimde uygulanır.

1. Gaz atomizasyonu
2. Su atomizasyonu
3. Savurmalı atomizasyon
4. Döner disk atomizasyonu



Şekil 2.7. Atomizasyon ile toz üretim aşamaları [41]

2.6.1.4. Mekanik üretim yöntemleri

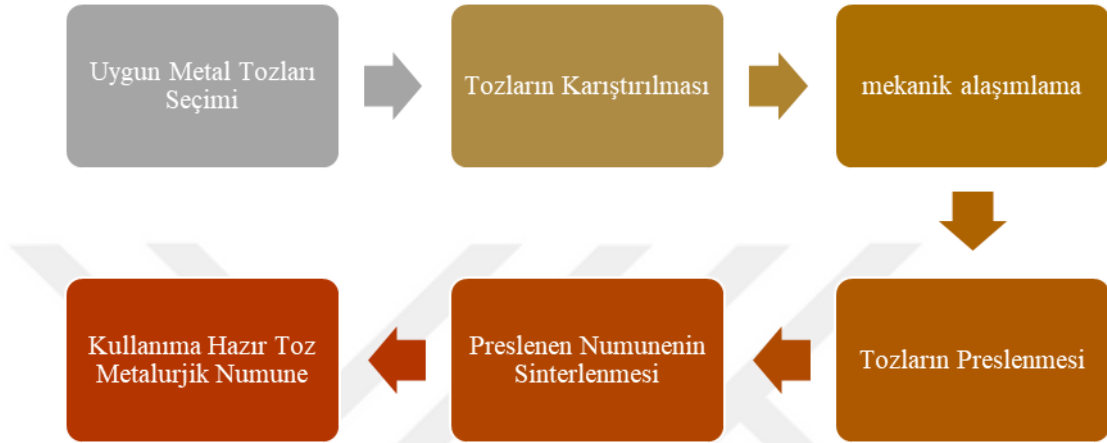
Mekanik üretim yöntemleri genel olarak ana başlık halinde 4'e ayrılır.

- Darbe
- Aşındırma-öğütme
- Kesme
- Basma

Darbe yöntemiyle mekanik üretim yöntemi, malzemeye çekiçle vurma ile malzemelerin küçük boyutlara ayrılmasıdır. Aşındırarak öğütme ise aşındırıcıların birbiri üzerinde meydana gelen sürtünme sayesinde parçacık boyutunun küçülme işlemidir. Kesme işlemi, talaşlı imalattaki gibi kesme işlemi ile malzemenin en az iki parça haline ayrılmasıdır. Son işlem olarak, basma kuvvetleri ile kırılıncaya kadar deformasyona maruz kaldığında toz üretimi gerçekleşmiş olur [42].

2.6.2. Toz metalurjisi yönteminin üretim aşamaları

Toz metalurjisi yöntemi ile üretim birkaç kademeden meydana gelmektedir. Temel üretim işlemleri ile ve ara işlemler ile nihai toz metalurjik parçalar elde edilir [33]. Şekil 2.5.'te toz metalurjisi ile üretim yönteminde işlem basamakları verilmiştir.



Şekil 2.8. Toz metalurjisi yönteminin işlem basamakları

2.6.2.1. Malzeme seçimi

TM yönteminin başarılı bir şekilde uygulanması tasarım, imalat ve malzeme seçim sürecinin daha iyi entegrasyonu olmalıdır [32].

TM kullanılarak yapılan parçalar sinterleme sırasında mukavemet geliştirir, bu da bir takım malzeme ve prosesle ilgili faktörlere bağlıdır. Bu parametrelerin seçilmesi önemli ölçüde uzmanlık gerektirmektedir ve genellikle toz içeriği önemli hale gelmektedir. Ayrıca sinterlenmiş parçaların davranışını doğru bir şekilde tahmin etmede zorluk nedeniyle, gerekli özelliklere sahip hassas parçaların üretimi bir dizi denemeyi içerir.

TM parçasının nihai özelliği, baz toz / alaşım ilavelerine ve ayrıca sinterleme sıcaklığı, zaman, sinterleme atmosferi, sıkıştırma gibi işlem koşullarına bağlıdır. Belirtilen özelliklere ulaşmak için malzeme ve işleme parametrelerinin seçimi oldukça önemli düzeydedir. Malzeme ve işleme parametreleri, sinterlenmiş parçanın boyutsal

doğruluğunu da belirleyebilir ve maliyet sonuçlarına yol açabilir [34]. Çoğu durumda, TM parça üretimi için malzeme ve süreç ayarları bilgisi endüstri standartlarına veya toz üreticileri tarafından sağlanan veri tabanlarına dayanmaktadır.

2.6.2.2. Karıştırma işlemi

Matris ile takviye olan malzemenin homojen bir şekilde karıştırılması işlemi toz metalürjisinde önemli bir adımdır. Matris ile takviye malzemenin karıştırma işlemi farklı cihazlar kullanılarak farklı yöntemler ile uygulanabilmektedir [35].

2.6.2.3. Mekanik alaşımlama

Mekanik alaşımlama işleminde, toz karışımları bilyalar vasıtasıyla karıştırılır ve bu karışma esnasında kaynaklanması ve kırılmasıyla işlem gerçekleştirilir. Karışım esnasında meydana gelebilecek Topaklanmayı önlemek için çoğunlukla steraik asit kullanılmaktadır [36]. Mekanik alaşımlama yöntemi ile katı hal reaksiyonlarının oluşumu mümkün kılınmakta ve malzemelerin büyük ölçüde özellikleri iyileştirilebilmektedir. Genel olarak bu yöntemde oksit takviyeli nanokompozitlerin üretimi mümkün kılınmaktadır.

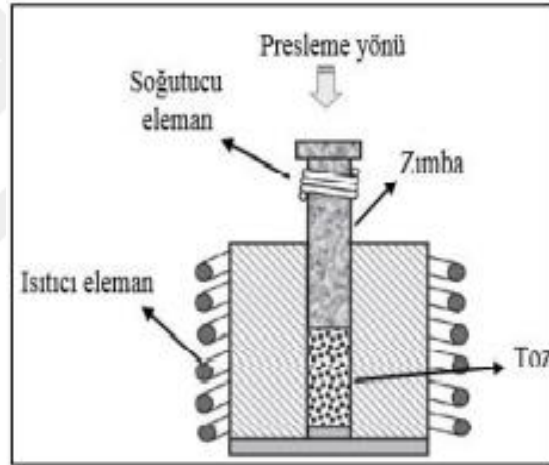
2.6.2.4. Tozların preslenmesi

Hazır halde bulunan tozlar istenen miktarda ve bileşimde birlikte karıştırılır ve daha sonra parçalanmaması için yeterli taşıma gücüne sahip olması umuduyla presleme işlemine tabi tutulur. Presleme aşaması genel olarak; tek eksenli presleme ve izostatik presleme olarak ikiye ayrılmaktadır.

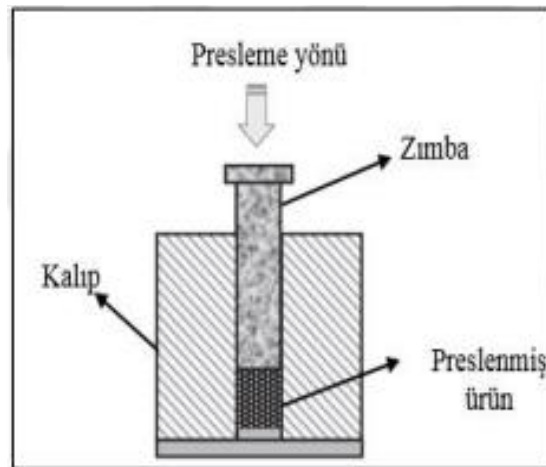
Tek eksenli preslemede, tozlar kalıp boşluğuna doldurulduktan sonra, tek yönlü bir şekilde preslenmektedir. İzostatik preslemede ise, soğuk presleme ve sıcak presleme yapılabilmektedir. Şekil 2.9.'de tek eksenli presleme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. Sıcak presleme için, kalıp, zımba, ısıtma elemanı gerekmektedir. İzostatik preslemede, basınç tüm yönlerden eşit oranda uygulanmaktadır. Basınç ortamı sıvı

veya gaz olabilmektedir. İzostatik presleme kendi içinde soğuk ve sıcak izostatik presleme olarak ikiye ayrılmaktadır [42]. Şekil 2.10.'de Sıcak izostatik presleme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

Sıcak İzostatik Presleme (SİP) yöntemi, tozun eş zamanlı olarak ısıtılmasını ve sıkıştırılmasını içerir ve %100 yoğun parçalar üretir. SİP ile yapılan parçaların, geometrik kısıtlamalarına tabi olmaması da önemlidir (burada parçanın geometrisi, sıkıştırmadan sonra kalıptan ekstraksiyona izin vermek zorundadır). Bununla birlikte, SİP'in uzun çevrim süreleriyle ilişkili yüksek maliyetler, pahalı tesis gereklilikleri ve çok yüksek gaz basınçlarıyla ilişkili güvenlik gerekliliklerinden kaynaklanan komplikasyonlar gibi birtakım dezavantajları vardır [29].



Şekil 2.9. Tek eksenli preslemenin şematik gösterimi [43]



Şekil 2.10. Sıcak izostatik presleme şematik gösterimi [42]

2.6.2.5. Sinterleme yöntemleri

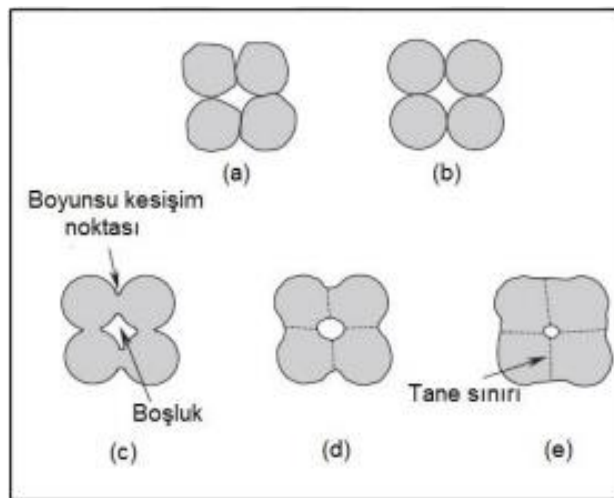
Parça kalıpta presleme işlemine tabi tutulduktan sonra belli bir şekle sahiptir ve istenilen forma gelir ancak parça düşük mukavemet gösterir. Parçanın mekanik mukavemeti, malzemelerin erime noktasının yaklaşık %80'inde sinterlenerek (gözenekleri gidermek ve parçanın yoğunlaşmasına izin vermek için ısıtılmalıdır) önemli ölçüde arttırılır. Bu, metal tozu içindeki atomik difüzyonun bir sonucudur. Bu durum, parçacıkları, tam olarak yoğun ürünlerle karşılaştırılabilir bir gerilme mukavemetine sahip olabilen bir malzeme üretmek için etkili bir şekilde bir araya getirir [44]. Kısaca sinterleme; preslenmiş tozun malzemenin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa ısıtılma işlemidir [45].

Sinterleme aşamaları;

- Partikül sınırlarında boyun oluşumu gerçekleşmesi
- Sinterleme süresi ilerlemesiyle, boşluk oluşumu azalması
- Yapının yoğunlaşması

olarak söylenebilir.

Şekil 2.11.'de (a) görselinde sinterleme öncesi preslenmiş tozları göstermektedir. Sinterleme başladığı anda, partiküller birbirlerine tutunur ve boşlukların oluşumu başlar (b,c). Sonraki kademelerde tane sınırları oluşumu gözlenmektedir.



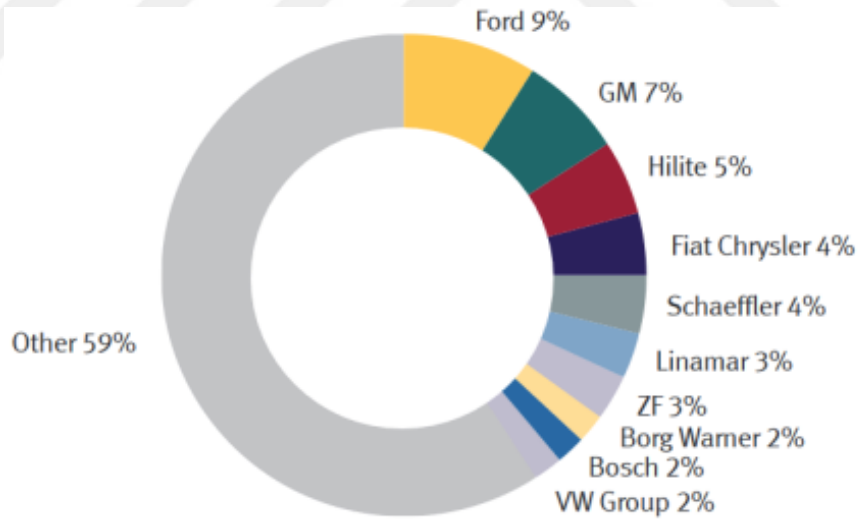
Şekil 2.11. Sinterleme işleminin kademelerinin şematik gösterimi [32].

2.6.3. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen parçaların kullanım alanları

Toz metalurjisi yöntemiyle parça üretimi endüstride oldukça yaygındır. Başlıca kullanım alanları;

- Endüstriyel uygulamalar: iş makinesi parçaları, testereler, diş dolguları.
- Yapısal otomotiv parçaları: otomotiv güç aktarma dişlileri, pistonlar vb.
- Sağlık sektörü: ortopedik protezler, biyomedikal parçalar
- Uçak ve uzay sektörü: jet motoru parçaları vb. kompozit uçak ekipmanları
- Enerji sektörü: nükleer güç yakıtları elemanları, şarj edilebilir piller, elektrik kontakları ve fırçaları
- Savunma ve silah sanayi: zırh delici mermiler, silah parçaları

Özellikle toz metalurjisi (TM) parçaları işlenmeden ve herhangi bir tasarımla yapılabileceğinden, otomobillerde yaygın olarak kullanılmaktadır [44].



Şekil 2.12. Ünlü endüstriyel müşteri ve şirketi içeren TM ürünlerinin küresel pazarını [44]

BÖLÜM 3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Kompozit malzemelerin tarihini araştırdığımızda ilk çağlara kadar dayandığını görebiliriz. İlk çağlardan beri insanoğlu kırılğan malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler ekleyerek kırılğanlık özelliğini minimize etmeye çalışmışlardır. Buna en iyi örnek kerpiç verilebilir. Kerpiç üretimi esnasında, killi çamur içine ilave edilen saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler kerpicing mukavemetini yüksek oranda artırmaktadır. Ayrıca diğeri bir örnek ise özellikleri farklı ağaç levhalar üst üste istiflenerek üretilen ok yayları olarak verilebilir. 19.yy. başlarında elyaf malzeme ve hidrolik bağlayıcılar tercih edilerek yapay taş plaka üretim yöntemi ön plana çıkmıştır. Ayrıca, kompozit malzemeler ilk kez ince levha yapımında kullanılan çimento ve asbest kompozitleri yıllarca kullanılmış ve bugün hala kullanılmaktadır [43].

Günümüzde kompozitlerde yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamalar oldukça eski tarihe dayandığı yapılan araştırmalarda ortaya çıkmıştır. Örneğin Eski Mısır’da cam elyaf üretimi oldukça popülerdi. Sanayide cam liflerinin kullanımı ise ilk olarak 1877 tarihlidir. 1950’li yıllardan sonra sanayide liflerle takviye edilmiş sentetik reçineler kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en ünlü grubunu “cam elyaf takviyeli polyester” oluşturmaktadır. Ülkemizde “fiber-glass” olarak bilinen bu malzemeler, 1960’lı yıllardan itibaren çatı levhaları, sıvı tankları ve küçük boy deniz tekneleri gibi ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan “Anadol’un” kaportası da bu malzemedendir. Son yıllarda, havacılık, otomotiv, enerji ve askeriye gibi birçok sektörlerde birbirinden farklı kompozit malzemeler ve ürünler geliştirilmiştir [44].

3.2. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Genel Özellikleri

Bir kompozit malzeme, makroskopik düzeyde spesifik karakteristikler ve özellikler elde etmek amacıyla, bileşim veya formda farklılık gösteren malzemeleri bir makro ölçekte üzerinde birleştirilerek bir araya getirilen bir malzeme olarak tanımlanabilir [45]. Yani iki ya da daha fazla malzemenin en uygun özelliklerini bir araya getirerek oluşturulan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Geleneksel malzemeler (metal ve metal alaşımları, polimerik malzemeler ve seramik malzemeler) tek başlarına kompozit malzemelerden elde edilebilen üstün mekanik özelliklere sahip olmadıklarından endüstride bazı uygulamalarda kompozit malzeme üretimi ve kullanımı oldukça fazladır [46].

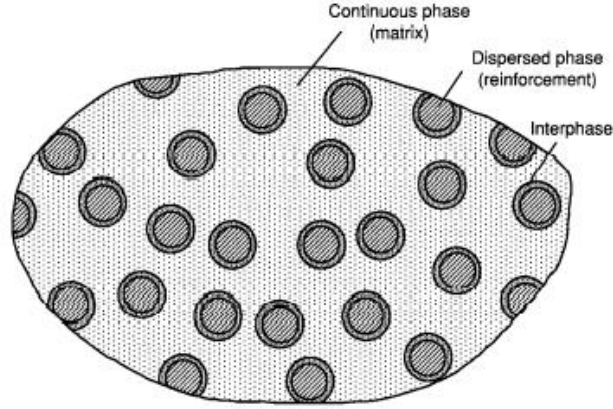
Kompozit malzeme üretilmesiyle geliştirilmesi istenen özelliklerin bazıları şunlardır;

- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Yüksek termal özellikleri
- Isıl ve elektrik iletkenliği
- Özgül rijitlik
- Uygun maliyet
- Kaliteli estetik görünüm

gibidir [33].

Kompozit malzemeler, mukavemeti arttıracak olan ve malzeme üzerine gelmekte olan yükü rahatlıkla taşıyacak olan bir ya da daha fazla takviye fazı ile bu takviye fazlarını çevreleyen matris diye adlandırılan ana malzemedan oluşmaktadırlar. Şekil 3.1.'de kompozit malzemelerin şematik gösterimi verilmiştir. Buradaki takviye fazı ve matris arasında bir arayüzey bağı oluşur [33]. Bir yük altındaki takviye fazı, matris malzemesi sayesinde bir arada tutulur ve matris malzemesi gelen bu yükü arayüzey bağı ile takviye fazına homojen bir şekilde dağıtılır. Kompozit malzemelerin mekanik

özellikleri takviye fazının gelen yükü taşıyabilmesine bağlıdır. Bu yüzden arayüzey bağının iyi şekilde meydana gelmesi kompozit malzemeler açısından oldukça önemlidir [47].



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin şematik gösterimi [47]

Kompozit malzemelerin istenen özellikleri belirleyen bazı unsurlar vardır. Bunlar;

- Bileşenlerin özellikleri,
- Takviyenin geometrisi ve dağılımı,
- Matris takviye arayüzünün özellikleri
- Takviyenin şekli,
- Takviyenin boyutu,
- Takviyenin konsantrasyonu
- Takviyenin yönü

kompozitin özelliklerini belirleyecektir [48].

3.3. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, birçok üstün özelliklerinden dolayı endüstride birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kompozit malzemelerin üstün özelliklerinin yanı sıra bazı olumsuz tarafları vardır. Tablo 3.1.'de kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajlarından bahsetmektedir.

Tablo 3.1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları [43-47]

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Çatlak ilerlemesi oldukça azdır	Birçok kompozitlerde çalıştıkları ortamda yer alan çözücü ve aşındırıcı sıvılar nedeniyle matrisin özelliğini yitirmesi, Talaşlı imalatla şekillendirilmeleri zordur.
Yorulma dirençleri yüksektir	Kullanılan malzemeler ve üretimi pahalıdır.
Hafiftir	Kaynaklı birleştirmelerde kısıtlıdır.
Kopma uzaması yüksektir	Üretim yöntemleri zahmetlidir.
Titreşimleri absorbe edebilir	Geri dönüşüme mümkün değildir.
Korozyon problemi yoktur. (Uygun malzeme seçilmeli çünkü temas halinde bulunan malzemeler galvaniz korozyona neden olur.)	
Yüksek mekanik özelliklere sahiptir	Nem kompozitlerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler
Üstün Tribolojik özelliklere sahiptir	Tamir edilmeden önce çok iyi temizlenmeleri ve sıcak kurutulmaları gerekir.

3.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, örnekleri ve uygulama alanları Tablo 3.2.'de verilmiştir.

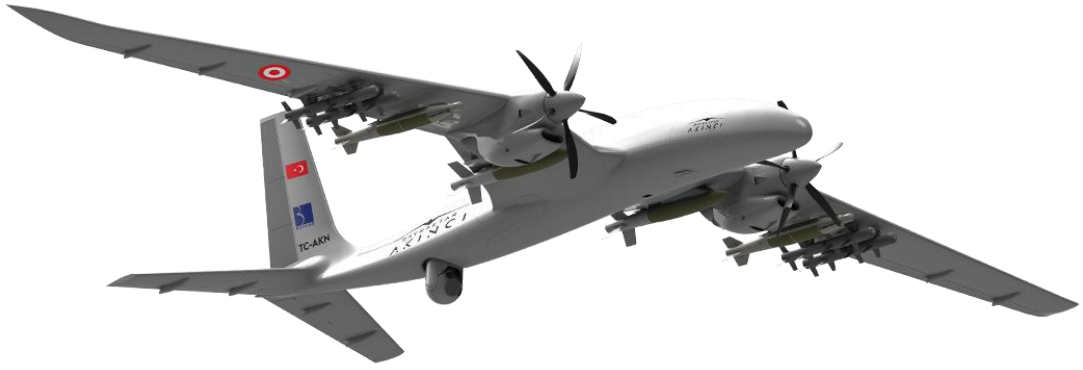
Tablo 3.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması ve uygulama alanları [48]

Kompozit tipi	Matris	Takviye fazı	Uygulama alanları
Polimer matrisli kompozitler	Elastomerler	Odun elyaf	Ambalaj
	Kauçuk	Cam elyaf	İnşaat
	Reçine	Karbon elyaf	Ahşap
		Mikro kürecikler	Otomotiv
Seramik matrisli kompozitler		Çelik elyaf	Spor ekipmanları
	Sement	Karbon fiber	Havacılık
	Karbon	Seramik fiber	Biyomedikal
	Seramik		Spor ekipmanları
Metal matrisli kompozitler			Uzay araçları
	Alüminyum	Karbon fiber	Uzay araçları
		Boron fiber	

Günümüzde artan rekabet ve teknolojik gelişmeler malzemelerin kalitesini ön plana çıkarmıştır. Bundan dolayı, hemen hemen her sektörde yeni malzeme ve gelişimlere ihtiyaç duyulmaktadır.

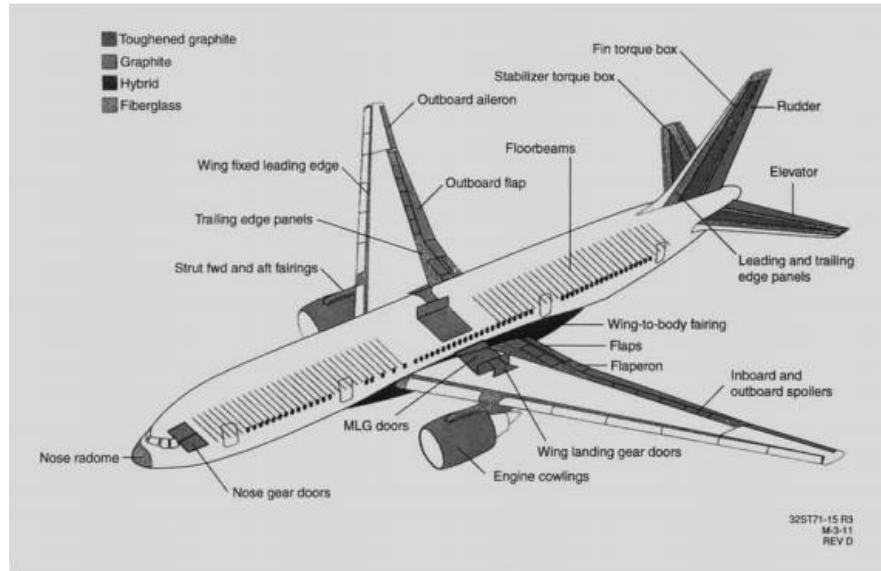
Özellikle otomotiv sektöründe kompozit malzemelere büyük ihtiyaçlar vardır. Eskiden otomotiv endüstrisinde, en pahalı, yüksek performanslı ve düşük üretim oranlı araçlarda, denenmiş ve test edilmiş metalik yapılar tercih ediliyordu. Bu durum malzemede kalite ve maliyette sıkıntılara sebep oluyordu. Şu anda kompozit kullanımı, daha hafif araç yapılarına ulaşmak için, otomotiv üreticilerinin gelecekteki tasarımlarda gelişmiş kompozit malzemelerden faydalanmaya gittikleri giderek daha da fazla hale gelmektedir. Örneğin, bir süredir Formula 1 ekipleri, neredeyse mümkün olan en yüksek seviyede performansa ulaşmak için kompozit malzemelerin kullanıldığı kompozit geliştirmenin ön saflarında yer almaktadır. Formül 1'deki kompozit kullanım, araç şasisini oluşturmak için alüminyumla birleştirilmiş cam takviyeli plastik kullanıldığında 1960'lı yıllarda ortaya çıkar. 1981'de McLaren MP4'e ilk karbon fiber şasinin tanıtılması, malzemelerin kullanımında hızlı bir artışa başladı ve ekipler ulaşılabilir faydaları hızla fark etti. 1990'larda McLaren, şimdi her takım tarafından kullanılan kompozit süspansiyon elemanlarını geliştirdi, kompozitlerin geliştirilmiş yorgunluk özellikleri, düşük ağırlıkları ile birleştiğinde, bu bileşenleri değiştirdikleri çelik muadilleri üzerinde önemli bir gelişme haline getirdi. Karbon fiber kompozitler, şasi, kaporta, soğutma kanalları, çarpışma yapıları, süspansiyon, şanzıman ve direksiyon simidi ve kolon gibi bileşenler dahil olmak üzere, bir Formula 1 aracının toplam hacminin %85'ini oluşturmaktadır [44-49].

Diğer yandan havacılık sektörü gelişmiş malzemelere ihtiyaç duyan en önemli sektördür. Günümüzde havacılık ve uzay sektöründe, yeni nesil uçaklar artık kompozit malzemeler kadar yapısal ağırlıklarının %50'sine sahiptir. Örneğin, Türkiye'nin ve dünyanın en önemli insansız hava aracı (İHA) üreticisi Baykar Savunma, hava platformlarında ve yer bileşenlerinde kompozit malzemeleri tercih etmiştir. Şekil 3.2.'de, Baykar Savunma Şirketi'nin Kompozit malzemeler kullanarak ürettiği teknoloji donanımlı Silahlı İnsansız hava Aracı (SİHA) gösterilmektedir [49].



Şekil 3.2. Baykar Savunma Şirketinin ürettiği SİHA Akıncı [50]

Düşük yoğunluklu özellikler, yüksek mukavemet, yüksek sertlik kompozitleri askeri ve sivil uçakların yapılarında oldukça tercih edilir kılmaktadır. Örneğin Boeing 777; döşeme kirişlerinde, kanat arka kenar yüzeylerinde ve diğer küçük parçalarda kompozitler kullanır. Sivil havacılıkta kompozitlerin kabulünün en önemli işareti, yeni Boeing 787'de kullanımıdır. Şekil 3.3.'te Boeing 787 de kullanılan kompozitleri göstermektedir. Diğer yandan dünyanın en büyük uçağı Airbus A380 Karbon / titanyum/ epoksi ve grafit gibi kompozit ürünler, kanatların ve gövdenin çoğu dahil olmak üzere Boeing 787'nin ağırlığının yaklaşık %50'sini oluşturur [50].



Şekil 3.3. Boeing 787 de kullanılan kompozitler

1. Enerji sektöründe ise yenilenebilen enerji kaynaklarında, kompozitler rüzgâr türbini kanatlarının boyut ve performansında neredeyse üstel bir büyüme sağlamıştır.
2. İnşaat mühendisliği sektöründe ise köprüler, prefabrik evler ve binaların inşası gibi parça üretiminde hızlı bir büyüme göstermektedir [51].
3. Savuma sanayi uygulamalarında ise kompozit malzemeler oldukça ön plandadır. Bu alanda kompozit malzemeler kullanılarak;

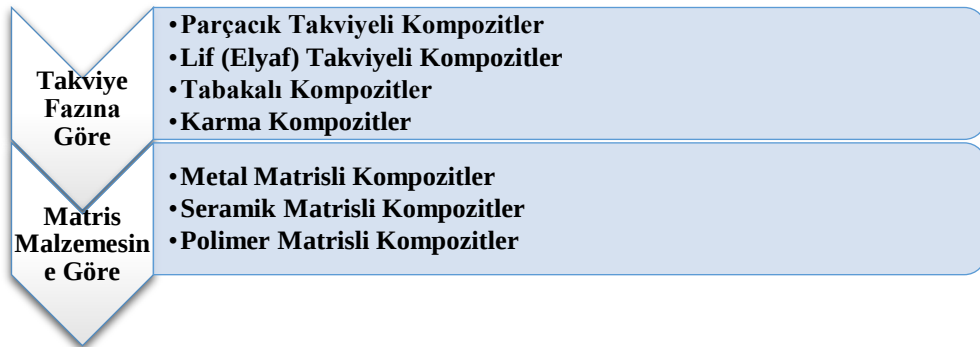
- Helikopter ve uçakların gövde parçaları
- Uçak kanat parçaları
- Kurşun geçirmez panel
- Askeri miğferler [44]

gibi birçok ürün imalat edilmektedir.

3.5. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler farklı biçimlerde sınıflandırılmıştır. Matris malzemesi ve takviye elemanının cinsine veya şekline göre sınıflandırma yapmak mümkündür [48].

Son yıllar kompozit malzemelerin endüstride kullanımı ve üretimi yaygın olduğundan sınıflandırma ihtiyacı doğurmuştur. Kompozit malzemeler genel olarak matris malzemesi ile takviye elemanın şekline ve cinsine göre gruplandırılmıştır [48].



Şekil 3.4. Kompozit malzemelerin gruplandırılması

Kompozit bir malzemede takviye, matris içinde dağıtılır. Takviye malzemesi genellikle matristen daha sert ve daha kuvvetlidir, matris tipik olarak takviye ile karşılaştırıldığında başarısızlığa karşı daha uzun bir uzamaya sahiptir. Kompozit bir malzemedeki her bileşen, matris tarafından birbirine bağlanan bir yük taşıma bileşeni olarak işlev gören takviye ile kendi rolüne sahiptir [52]. Takviye ve bir matris malzemesi seçmek için dikkate alınması gereken maddeler arasında:

- Erime Noktası
- Oynaklık
- Yoğunluk
- Elastik Modül
- Termal Genleşme Katsayısı
- Sürünme Karakteristikleri
- Dayanıklılık
- Kırılma Tokluğu
- Lif ve matris arasındaki uyumluluk [53]

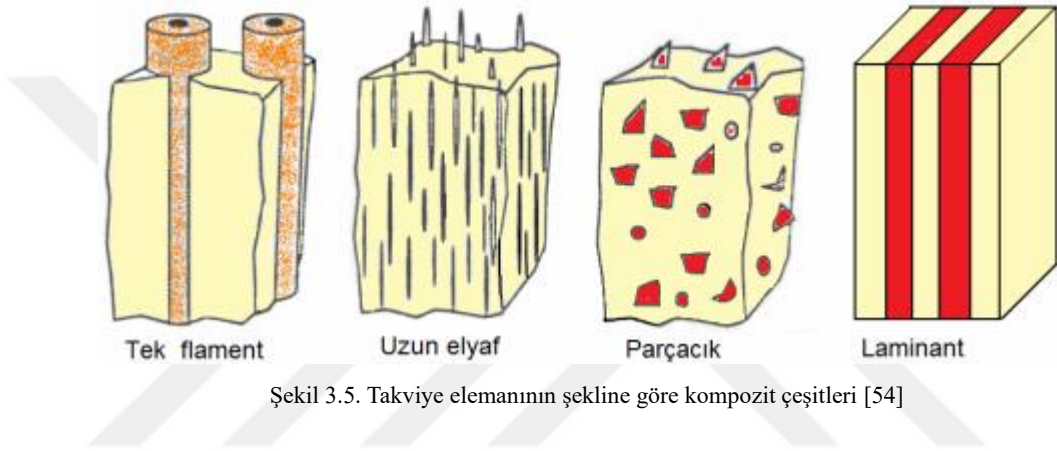
Bu özelliklerin çoğu seçilen işlem yolu üzerinde ve sonuçta meydana gelen kompozitin nihai özellikleri ve performansında önemli bir etkiye sahip olacaktır.

3.5.1. Takviye fazına göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerin özelliklerini daha çok kullanılan takviye elemanları belirlemektedir. Uygun matris/takviye elemanı seçimi, kompozit malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirler. Çünkü kompozit malzeme içerisinde yer alan matrisler tarafından yükün takviye elemanına yönlendirilmesinde takviye ile matris elemanı arasında yer alan ara yüzey bağının da kuvvetli olması, malzemenin termodinamik dengesinin oluşturulması açısından önemlidir. Oluşan arayüzey bağının kuvvetli olması ayrıca matrisin ıslata birlik özelliğine bağlıdır. Bu yüzden en uygun matris ve takviye fazı tercih edilmelidir [54].

Takviye malzemesi olarak genelde karbür, oksit veya nitrür bileşimleri yaygın olarak kullanılır. Kompozit malzemelerin imal edilmesinde kullanılan takviye elemanları şekline çeşitlere ayrılabilir [53].

- Tek filament
- Kısa ve uzun elyaf (fiber)
- Parçacık
- Laminant (katmanlı)



Şekil 3.5. Takviye elemanının şekline göre kompozit çeşitleri [54]

Bir kompozitin takviye fazı, sürekli veya kısa elyaflar, çeşitli şekillerdeki parçacıklar ve bıyık formunda olabilir. Bu fazlar kompozitlerin sertliğe ve mukavemetlerine katkıda bulunur veya bunu belirler.

Kompozitler için takviye olarak çok çeşitli elyaflar mevcuttur. Çoğu takviye edici elyafın istenen özellikleri yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve nispeten düşük yoğunluktur. Her bir lif türünün Tablo 3.3.'te listelenen kendi avantajları ve dezavantajları listelenmiştir.

Tablo 3.3. Takviye elyaflarının avantaj ve dezavantajları [56]

Takviye Fazı	Avantajları	Dezavantajlar
Cam fiber	Yüksek mukavemet	Düşük sertlik
	Düşük maliyet	Kısa yorulma ömrü
		Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıksızlık
Aramid (Kevlar)	Yüksek çekme mukavemeti	Düşük basınç dayanımı
	Düşük yoğunluk	Yüksek oranda nem emme
Boron	Yüksek sertlik	Yüksek maliyet
	Yüksek basınç dayanımı	
Karbon	Yüksek dayanıklılık	Yüksek maliyetli
(AS4,T300,IM7)	Yüksek sertlik	
Grafit (GY-70,	Aşırı yüksek sertlik	Düşük dayanım
		Yüksek maliyet
Seramik(Silisyum	Yüksek sertlik	Düşük dayanım
Karbür, Al ₂ O ₃)	Yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygunluk	Yüksek maliyet

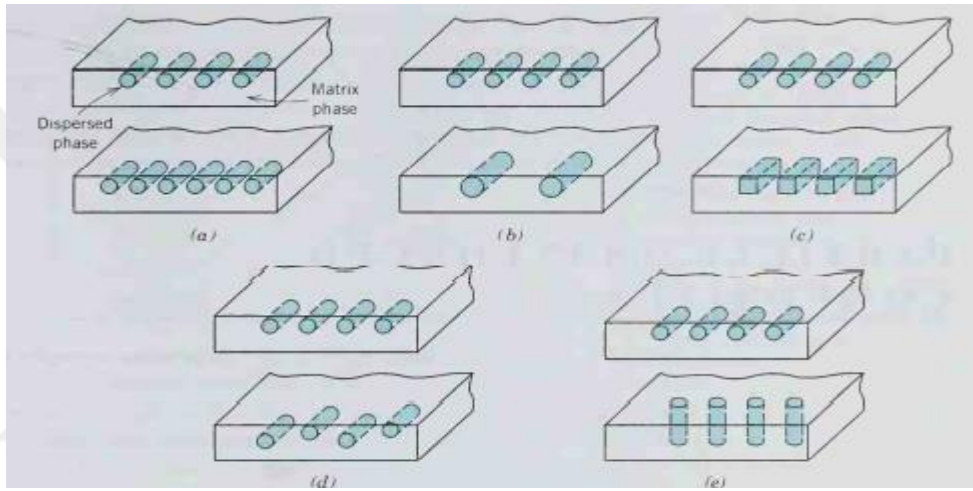
Kompozit malzemeler için elyaf takviyelerinden cam elyafı; yüksek gerilme mukavemeti ve düşük maliyeti nedeniyle düşük ila orta performanslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılanlardır. Yüksek performanslı kompozit uygulamalarda nispeten düşük sertlikleri, düşük yorulma dayanımları ve ciddi higrotermal koşullara maruz kaldığında özelliklerinin bozulması nedeniyle sınırlıdır [56].

Cam elyaflar, erimiş silika (SiO) ve diğer oksit karışımının, platin alaşımlı burcun küçük deliklerinden ekstrüzyonuyla üretilir. Yüzeylerini korumak ve reçine matrisine bağlanmayı sağlamak için liflere bir bağlama maddesi eklenir.

Kevlar elyaflar cam elyaflara göre yüksek sertliğe sahiptir. Kevlar lifleri düşük yoğunluğa, camın yaklaşık yarısına, darbe direncine, yüksek gerilme mukavemetine, mükemmel tokluğa sahiptir. Kevlar kompozitleri düşük oranda boyuna basınç ve enine çekme mukavemetlerine sahiptir ve nem emmeye karşı hassastır. Yüksek moleküler oryantasyonları nedeniyle termal ve mekanik olarak çok anizotropiktirler [55].

3.5.2. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

Birçok kompozit sadece iki fazdan oluşmaktadırlar; bunlardan biri sürekli olan ve diğer fazları çevreleyen, genel olarak dağıntık faz olarak matris olarak adlandırılır. Kompozitlerin özellikleri, nispi miktarlarını ve bileşen fazların özelliklerinin dağıntık fazın geometrisinin bir fonksiyonudur. Bu bağlamda dağıntık faz geometrisi, parçacıkların şekli ve parçacık boyutu, dağılımı anlamına gelir; bu özellikler Şekil 3.6.'de gösterilmektedir [57].



Şekil 3.6. Kompozitlerin özelliklerini etkileyebilecek dağıntık faz parçacıklarının çeşitli geometrik özelliklerinin şematik gösterimleri: (a) konsantrasyon, (b) boyut, (c) şekil, (d) dağılım ve (e) yönelim [58]

3.5.2.1. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (SMK'ler), polikristalin seramik yapmak için kullanılan geleneksel toz işleme teknikleriyle veya oldukça geleneksel olmayan tekniklerle yapılabilir. Burada önemli olan SMK'nin işlenmesinin, bir SMK bileşenini tasarlama sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak görülmesidir. Örneğin, işleme nedeniyle donatıya verilen hasar, nihai üründe arzu edilenden daha düşük bir performansla sonuçlanacaktır. Seramik matristeki fiber veya bıyık oryantasyonu imalat işleminin ayrılmaz bir parçasıdır. Ayrıca, takviye oryantasyonu bir SMK'nin uygulanan bir yüke mekanik tepkisi üzerinde en önemli etkiye sahiptir [59].

Seramik matrisli kompozitlerde; SiC, Al₂O₃, B₄C, Si₃N₄, gibi seramik özelliğe sahip matris malzemeleri sık olarak kullanılmaktadır. Seramik malzemeler çok sert, gevrekler ve yüksek sıcaklıklara kadar dayanıklıdır. Bu tür malzemelerin kayma dirençleri yüksek olup, plastik şekil verme olmaksızın gevrek olarak kolaylıkla kırılırlar. Seramikler sert olduklarından dolayı bunlardan Al₂O₃ ve SiC aşındırıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler ile SMK'ler üretildiğinde, 1200 °C ve üstü gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir. Seramik malzemelerin yüksek sıcaklıklara karşı dayanımları iyi olmasına rağmen, ani sıcaklık değişimleri ısıl şoklara sebep olur. Bu sebepten ötürü ortaya çıkan ısıl şoklara karşı seramiklerin dirençleri metallere göre daha düşüktür. Seramikler, plastik deformasyon göstermezler ve yapılarında oluşan bir çatlak veya çentik çok hızlı bir biçimde yayılmaktadır. [60-61].

Seramik matrisli kompozitler;

- Yüksek sıcaklık,
- Yüksek aşınma direnci
- Düşük yoğunluk

istenilen durumlarda kullanılmaktadır.

Seramik malzemelere fiber takviye edildiğinde mukavemetlerinde ve tokluklarında artış gözlemlenmiştir. Böylelikle, monolitik seramiklere oranla tokluğu 20 kata kadar artmaktadır. Gelecekte SMK'lerin kullanım alanlarında artış beklenmektedir [59].

3.5.2.2. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMK), matris malzemesi polimer olan kompozitlerin bir çeşididir. Bu PMK'ler;

- Ekonomiklik ve düşük yoğunluk
- Kolay üretilebilirliği
- Mekanik özelliklerinin üstün olması

gibi özelliklerinden dolayı endüstride çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Özellikle polimer matris kompozitler (PMK'ler), uçak ve uzay araçları yapısal bileşenleri, savunma sanayisi ve köprüler gibi birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Modern askeri araçlar ve ticari uçaklar sıcaklık ve nemdeki aşırı değişiklikler gibi çeşitli çevresel koşulları sürdürme yeteneğine sahip olmaları beklenmektedir. Bu nedenle, gelişmiş kompozit malzemelerin mevcut nesillerinin, sadece yük taşıyan bileşenler olarak hizmet etmeleri değil, aynı zamanda çeşitli harici uyaranlara adapte olurken yapıların performansını kontrol etme kabiliyetine sahip olmaları nedeniyle birden fazla işlevi içermesi beklenmektedir [55-62]. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan plastik matrisler termoplastik ve termoset olmak üzere iki türdür.

Termoset esaslı malzemeler termoplastik malzemelere göre daha çok tercih edilmektedir ve bu malzemeler üretilip bir defa ısıtılıp şekil verildikten sonra tekrar tekrar ısıtılıp biçimlendirilemez. Bu yüzden, termoset malzemelerin geri dönüşüm ile kullanımı mümkün değildir. Termoplastik malzemeler, termoset malzemelere göre geri dönüşüm ile tekrar kullanımı söz konusu olan malzemelerdir. Yani, termoplastikler üretildikten sonra ısıtma ve akabinde soğutma yapıp tekrar tekrar kullanılabilir. Isıtma ve soğutma işlemlerini, termoplastik malzemelerin sadece fiziksel özellikleri etkilerken kimyasal özelliklerinde herhangi bir şekilde etkilememektedir. Takviye edilmiş PMK'ler çok yaygın kullanım alanı mevcuttur. Bunlar;

- Kontrol panelleri yapımında
- Uçaklarda
- Helikopterlerin rotorlarında
- Spor ekipmanlarında
- Yarış arabalarında
- Kayık yapımında
- Su tanklarında
- El raketinde vb,

alanlarda kullanılırlar [60].

BÖLÜM 4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Metal matrisli kompozitler (MMK'ler), metallerin çok yönlü özellikleri nedeniyle sınırlı sayıda kullanılan ancak oldukça umut verici malzemelerdir. Geleneksel sertleştirme ve güçlendirme yöntemlerinin sonuçları, otomotiv ve havacılık endüstrileri için üretilen parçalar gibi bazı ileri mühendislik ürünleri için iyi ancak yeterli değildir. Güçlü parçacıkların doğal özellikleri kullanılmaz, çünkü onların tek işlevi metaldeki dislokasyon hareketini engellemektir. Bu nedenle, gelişmiş yüksek modüllü fiber takviyeli metal matrisli kompozitler üreterek sertlikteki iyileştirme elde edilebilir. Geleneksel metal matrisli kompozitler için karbon veya boron lifleri ve SiC kaplı boron lifleri gibi yaygın takviyeler kullanılabilir [61].

Metal matrisli kompozitler için matris bilindiği üzere sünektir. Bu kompozitler, temel muadillerine göre daha yüksek servis sıcaklıklarında kullanılabilir; ayrıca, takviye, ısı iletkenliği, aşınma direncini, sürünme direncini, özgül sertliği ve boyutsal stabiliteyi geliştirebilir. Bu malzemelerin polimer ve seramik matrisli kompozitlere göre avantajlarından bazıları arasında;

- Daha yüksek çalışma sıcaklıkları
- Alev almama
- Organik sıvılar tarafından bozunmaya karşı daha fazla direnç

bulunmaktadır [62].

Ancak yukarıda bahsedilen avantajların aksine MMK'lerin diğer kompozitlere göre bazı dezavantajları vardır. Metal matrisli kompozitler PMK'lerden çok daha pahalıdır. Bu nedenle MMK kullanımı biraz sınırlı olması en büyük dezavantajlarından biridir. Diğer bir dezavantaj ise, bazı matris takviye kombinasyonları yüksek sıcaklıklarda oldukça reaktiftir. Sonuç olarak, kompozit malzemelerin bozulması, yüksek sıcaklıkta işleme veya yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmasına bağlı olabilir. Bu sorun genellikle

malzemeye koruyucu bir yüzey kaplaması uygulanarak veya matris alaşım kompozisyonu değiştirilerek çözülür [57-59].

MMK’lerde matris malzemesi olarak genellikle ;

- Süper alaşımlar
- Alüminyum,
- Magnezyum,
- Titanyum
- Bakır

tercih edilir.

Takviye hem sürekli hem de süreksiz elyaflar halinde parçacıklar biçiminde olabilmektedir. Sürekli lifli malzemeler alüminyum oksit, karbon, bor, silikon karbür, ve refrakter metalleri içerir. Tablo 4.1. birçok yaygın metal matris, sürekli ve hizalanmış fiber takviyeli kompozitlerin özelliklerini göstermektedir.

Tablo 4.1. Sürekli ve hizalanmış liflerle takviye edilmiş birkaç metal-matris kompozitin özellikleri

Fiber	Matris	Fiber içeriği	Yoğunluk (g/cm ³)	Boyuna çekme modulu (Gpa)	Boyuna çekme mukavemeti (Mpa)
Karbon	6061 Al	41	2,44	320	620
Boron	6061 Al	48	-	207	1515
Sic	6061 Al	50	2,93	230	1480
Al₂O₃	380.0 Al	24	-	210	340
Karbon	AZ31 Mg	38	1,83	300	510

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan matris malzemelerinin içerdiği takviye elemanları, kullanıldıkları yerde neden olduğu iyileşmeler ve uygulama alanları Tablo 4.2.’deki gibidir.

Tablo 4.2. Metal matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri

Matris	Takviye elemanı	Avantaj	Uygulama alanı
Al ve alaşımları	Al ₂ O ₃	Aşınma Direnci	Otomobil parçaları
	SiC	Yüksek Mukavemet	
	Grafit	Aşınma Direnci	Yataklar
		İşlenebilirlik	Otomobil parçaları
		Özgül mukavemet	
Cu	B ₄ C	Yüksek nötron absorpsiyonu	Nükleer kaplar
	NbC	Aşınma direnci	Elektrot üretimi
	TiB ₂	Yüksek elektriksel ve	
	TiC	termal iletkenlik	
	SiC	Termal kararlılık	Elektronik paketleme
Ti alaşımları	Al ₂ O ₃	Sertlik	İletim terminalleri
		Aşınma direnci	Füzyon reaktörleri
		Yüksek elektriksel iletkenlik	
	Karbon fiberler	Aşınma direnci Özgül mukavemet	Elektronik cihazlar
	SiC	Özgül mukavemet	Isı değiştiricileri
		Termal kararlılık	Havacılık uygulamaları
	TiB	Aşınma direnci	Havacılık
		Termal kararlılık	uygulamaları
		Yorulma direnci	
	TiC	Termal kararlılık	Havacılık
		Sürünme direnci	uygulamaları

Normalde MMK'lerin işlenmesi en az iki adım içerir: sentez (matris içine takviyenin ilavesi), ardından ise bir şekillendirme işlemidir. Bazıları karmaşık olan pek çok sentez tekniği mevcuttur; süreksiz fiber MMK'ler standart metal şekillendirme işlemleri (dövme, ekstrüzyon, haddeleme) ile şekillendirmeye uygundur. Bu yüzden, son yıllarda otomobil üreticilerinin bir numaralı tercihi MMK'ler olmaya başlamıştır. Örneğin, bu sektörde Al₂O₃ ve C fiberlerle güçlendirilmiş bir alüminyum-alaşım matrisinden oluşan bazı motor bileşenleri ve parçaları tercih edilmiştir. MMK'lerin en büyük özelliği hafif olmasıdır bunun yanı sıra aşınmaya ve termal bozulmaya karşı dayanıklıdır. MMK'ler ayrıca tahrik milleri (daha yüksek dönme hızlarına ve düşük titreşim gürültü seviyelerine sahip), ekstrüde stabilizatör çubukları ve şanzıman

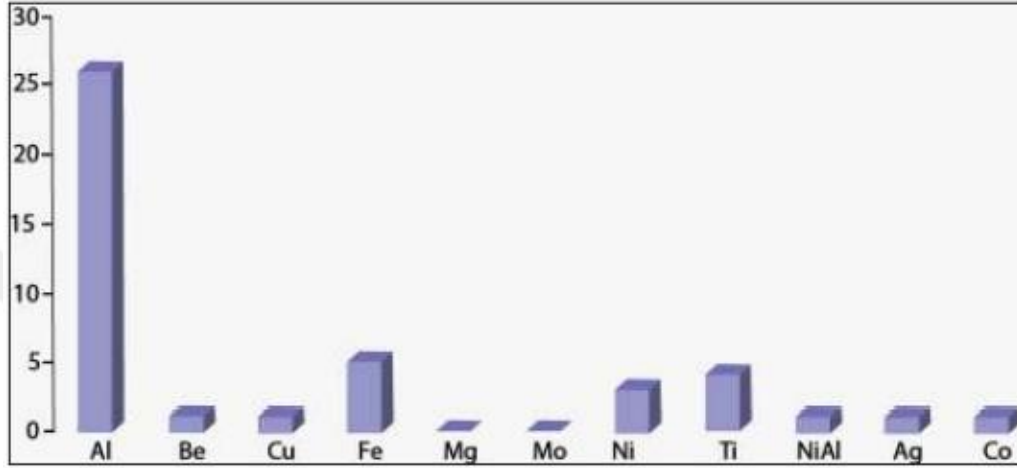
bileşenlerinde kullanılır. Bu yüzden havacılık endüstrisinin bir numaralı tercihi MMK'lerdir. Yapısal uygulamalar arasında gelişmiş alüminyum alaşımlı metal matris kompozitler; uzay mekiği orbiti için takviye olarak bor fiberleri ve Hubble Uzay Teleskobu için sürekli grafit fiber takviyesi ile kullanılır [63].

Bazı süper alaşımların (Ni ve Co-bazlı alaşımlar) yüksek sıcaklıkta kopma ve sünme özellikleri, tungsten gibi refrakter metaller kullanımı ile elyaf takviyesi kullanılarak artırılabilir. Mükemmel yüksek sıcaklıktaki oksidasyon direnci ve darbe dayanımı da korunur. Bu kompozitleri içeren tasarımlar, daha yüksek çalışma sıcaklıklarına ve türbin motorları için daha iyi verim sağlar.

4.1. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Matris Malzemeleri

Endüstride, Al, Ti, Mg, Cu, Ni ve süper alaşımlar (Ni ve Fe esaslı) uzun süredir metal MMK'ler için, matris fazı olarak tercih edilmektedir [64]. Alüminyum matrisli kompozitler uzun bir süredir, Al alaşımları için araştırma ve geliştirme hem de endüstriyel uygulamalarda matris malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemedir. Bunun başlıca nedeni alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluğudur. Ayrıca, Al diğer düşük yoğunluklu alaşımlarla (Ti veya Mg gibi) karşılaştırıldığında daha ucuz ve kullanışlıdır [65]. Yani, yeni nesil kompozit malzeme olan alüminyum MMK malzemeler mükemmel mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Alüminyum ve alaşımları özellikle, tribolojik davranışları ve mekaniksel dayanımı iyi hale getirmek için seramiklerle birlikte takviye edilirler. Seramik partiküllerinin sahip olduğu iyi mekanik ve fiziksel özellikleri ile Al ve alaşımlarının birleştirilmesi ile elde edilen alüminyum matrisli kompozitlerin endüstride tercih edilmeleri, gösterdikleri üstün özelliklerinden dolayı hızla artmaktadır [33]. Partikül takviyeli Al matrisli metal kompozitlerin sahip olduğu bazı özellikler nedeniyle (mükemmel özgül serfliği, fiziksel, tribolojik ve mekanik özellikleri, yüksek spesifik modülleri, düşük genleşmeleri ve üstün aşınma özellikleri) havacılık, savunma, otomotiv ve diğer sektörlerdeki uygulamalar için ilk tercih sebebidir [66]. Ayrıca, malzeme ağırlığının önemli bir faktör olduğu birçok endüstri alanında, örneğin otomotiv, savunma ve uzay sanayisi, alüminyum en çok tercih edilen matris malzemesidir [64]. Mikro boyutlu

seramik tozları ve lifleri Al bazlı kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır. Güçlendirilmemiş alüminyum alaşımı ile karşılaştırıldığında, bu kompozitler sadece önemli ölçüde geliştirilmiş bir mukavemet ve sertliğe sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda bunların yaygın kullanımını sınırlandıran bir sünekliğe sahiptir [66].



Şekil 4.1. Endüstride kullanılan matris malzeme oranları [33]

Şekil 4.1.'den görüldüğü gibi endüstride tüm MMK malzemeler içerisinde en çok kullanılan matris malzemesi Al'dir. Alüminyumun doğada çok fazla bulunması bunun başlıca nedenidir. Ayrıca, Al 'un hafifliği ve yüksek mukavemet özelliklere sahip olması sanayide bu metali matris malzemesi olarak kullanımını mümkün kılar. Elektriksel ve ısı özelliklerinin yüksek olması malzemeyi matris seçiminde önemli bir etmen haline getiren bir başka özelliğidir. Bütün bu özellikleri baz alındığında Al matris; metal matrise sahip kompozit malzemeler arasında oldukça önemli bir hale gelmektedir.

Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi sırasında; titanyum (Ti), magnezyum (Mg), alüminyum (Al) metalleri ve alaşımları ana malzeme olarak tercih edilmektedir [67].

4.1.1. Alüminyum ve alaşımları

Alüminyum (Al) yaklaşık 2.70 g/cm³ yoğunluğa, yaklaşık 70 GPa elastisite modülüne ve 660 °C erime noktasına sahiptir. Yerkabuğundaki içeriği göz önüne alındığında, oksijen ve silisyumdan sonra en çok kullanılan üçüncü elementtir [68]. Alüminyum, kolay işlenebilirlik, düşük yoğunluk ve korozyona karşı yüksek direnç gibi çok önemli özelliklere sahiptir. Alüminyum alaşımları farklı üretim yöntemleri ile ekonomik olarak üretilmektedir. Alüminyum alaşımlarının mukavemeti oldukça iyidir ve mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir [69].

Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından alüminyum alaşımları için tanımlanan dört haneli sistem dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sisteme göre, dört basamaklı sayısal gösterimin ilk iki basamağı, temel alaşım elementini gösterir.

- 1xxx: Temel alaşım elementleri olarak silikon (Si) ve demir (Fe) kullanılmaktadır. Sert deforme olabilen alaşımlar grubuna aittir. Saf alüminyuma çok benzediği için yüksek korozyon direnci, deformasyon olmaması ve elektriksel iletkenlik istenen yerlerde tercih edilmektedir. Bina yüzeylerini, alüminyum panelleri, mutfak lavabolarını kaplamak için levha olarak kullanılır.
- 2xxx: Temel alaşım elementi bakır (Cu) iken, bazı alaşımlarda alaşım elementi olarak magnezyum (Mg) ve manganez (Mn) de kullanılmaktadır. Bu tür alaşımlar ısı ile sertleştirilebilir. Geniş bir sıcaklık aralığında yüksek mukavemetli ve yüksek performanslı, mükemmel işlenebilirliğe, düşük korozyon direncine ve zayıf kaynaklanabilirliğe sahip alaşımlardır. Uçak gövdelerinde, cıvata ve saplama gibi bileşenlerde ve nakliye araçlarının gövdelerinde kullanılır.
- 3xxx: Alaşım elementi olarak Cu ve Mg kullanılmaktadır. Yüksek mukavemetli, yüksek korozyon direncine ve orta mukavemete (285 MPa)

sahip alaşımlardır. Kaynak ve lehimlemeye uygun olduğu için; Depolama tankları, pişirme kapları, radyatörler gibi uygulamalarda kullanılır.

- 4xxx: Alaşım malzemesi olarak silikonun kullanıldığı bu alaşım grubu, ısıl işlemle sertleştirilebilir. Bu alaşım şekillendirme kolaylığı, yüksek mukavemeti ve belirli işlemlerin (kaynak, lehimleme) kolaylıkla yapılabilmesi nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe sık sık kullanılmaktadır.
- 5xxx: Ana alaşım elementi olarak Mg kullanılır. Yüksek sertlik, korozyon direnci, tokluk ve kaynaklanabilirlik özelliklerine sahip alaşımlardır. Bu özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe; binalarda, rıhtımlarda ve yapılarda; Ulaşım sektöründe demiryolu, denizcilik ve otomotiv uygulamalarında kullanılmaktadır.
- 6xxx: Magnezyum ve silikon, temel alaşım elementleri olarak bulunur. Bu alaşım serisinin en önemli özelliklerinden biri ısıl işlem görmüş sertliğidir. Ayrıca bu alaşımlar yüksek mukavemetleri, yüksek korozyon direnci ve mükemmel kaynak özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir.
- 7xxx: Temel alaşım elementleri yapısında Cu, Zr, Mn ve Ag gibi elementlere ek olarak Zn ve Mg'dir. Bu tür alaşımlar yüksek mukavemete ve korozyona karşı yüksek dirence sahiptir. Uçak yapısal bileşenlerinde ve diğer yüksek mukavemetli uygulamalarda kullanılır.
- 8xxx: Temel alaşım elementleri yapısında Fe, Si, Cu, Mn ve Li gibi elementlerle zenginleştirilmiştir. Alaşım ısıl işlemle sertleştirilir; rulman vb. uygulamalarda öncelikli olarak tercih edilmektedir.

Alüminyum ve alaşımları, yüksek geri kazanım, darbe dayanımı ve ısı transferi nedeniyle gıda ve içecek ambalajlarında düşük ağırlığın hedeflendiği otomotiv, motor bloğu, havacılık, bisiklet ve motosiklet sektörlerinde yüksek iletim katsayıları

nedeniyle jeneratör ve güç kablolarında kullanılır. Ayrıca düşük ısı genleşme katsayısının tercih edildiği kaynak işlemlerinde ve korozyon direnci nedeniyle borularda ve akışkan tanklarında, mimari uygulamalarda, reflektör plaka ve baskı plakalarında tercih edilir. Sıralanan tüm bu ürünlerde kullanılan alüminyumun fiziksel özellikleri Şekil 4.3.'deki grafikte yer almaktadır.

Tablo 4.3. Alüminyumun fiziksel özellikleri

Alüminyumun fiziksel özellikleri	
Yoğunluk	2.7 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	660°C
Isıl genleşme katsayısı	24x10 ⁻⁶ 1/K
Isı iletim katsayısı	229 W/m.K
Çekme gerilmesi	62 MPa
Sertlik	15 Brinell
Kristal kafes yapısı	YMK

4.2. Alüminyum Metal Matrisli Kompozitler

Alüminyum matrisli kompozitlerin düşük ağırlığı nedeniyle uygulama alanları oldukça geniştir. Yüksek hızlı tren, havacılık sektörü, otomobil parçaları (piston, silindir, motor bloğu, şasi, debriyaj, fren ünitesi), bisiklet, savunma sanayi, güvenlik ekipmanları, kask gibi hafif malzemelerin kullanılmasını gerektiren parçalarda alüminyum matrisli kompozitler tercih edilir.

Alüminyum matrisli kompozitler, takviye elemanları sayesinde saf alüminyum veya alaşımlarından daha üstün özelliklere sahiptir. Seramik partiküllerin ilavesi ile yüksek sertlik, elastikiyet ve çekme mukavemeti değerlerine ulaşabilirler. Günümüz otomotiv ve havacılık endüstrilerinde düşük yakıt tüketimi, yüksek ivmelenme ve atmosferik ve diğer korozyonlara karşı yüksek direnç göz önüne alındığında, alüminyum matrisli kompozit kullanımı vazgeçilmezdir. Magnezyum ve titanyum gibi matris malzemelerinin daha iyi listelenen özellikler sağladığı söylene bile, alüminyumun diğer malzemelere göre fiyat avantajı, matris olarak kullanımını artırmaktadır. Alüminyum, düşük maliyet-performans oranı açısından oldukça iyidir [71].

4.3. Metal Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin kullanım alanına bağlı olarak MMK'lerdeki takviye elemanlarından beklenen özellikler aşağıda özetlenmiştir:

- Düşük yoğunluk,
- Yüksek dayanım,
- Yüksek ısı dayanımı,
- Matris malzemesi ile kimyasal uyumu,
- Üretiminin kolaylığı,
- Maliyetinin düşüklüğü,

Metal matrisli kompozit yapılarda genellikle seramik veya karbon esaslı takviye elemanları tercih edilmektedir. Grafen, karbon nanotüpler, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al₂O₃), bor karbür, silisyum nitrür (Si₃N₄) ve bor nitrür (BN) en sık kullanılan takviye elemanlarıdır [72].

4.4.1. Grafen ve özellikleri

2004 yılında Manchester Üniversitesi'nden Konstantin Sergeevich Novoselov ve Andre Geim adlı bilim adamları tarafından keşfedildi. Grafenin yapısını oluşturan karbon atomlarının iki boyutlu altıgen yapısı, grafenin inanılmaz mekanik, termal, elektriksel ve fiziksel özelliklere sahip olmasını sağlamıştır [73].

Tablo 4.4. Grafenin özellikleri

Özellikler	Değer
Hibrit Şekli	Sp ²
Kristal yapısı	hegzagonal
Tabaka Yapısı	Tek tabakalı
Boyut	2D
Kütleli Yoğunluk	0.3 g/cm ³
Elastik modülü	1000 Gpa
Termal iletkenliği	5100 (W/ (m°K))

Doğadaki en ince malzeme olarak bilinen grafen, güçlü karbon bağları nedeniyle oldukça dayanıklı bir malzemedir. Yüksek elastisite modülüne sahip ve çelikten daha yüksek mukavemete sahip olduğu bilinmektedir. İyi ısı iletkenliğe ek olarak, yüksek elektrik iletkenliği ve doğal yağlama özelliklerinden dolayı aşınma direncini olumlu yönde etkiler. Elmaştan daha sert olmasına rağmen şekillendirilebilme kolaylığı ve esnekliği nedeniyle birçok malzemenin kaplanması kullanılmaktadır. Başta alüminyum olmak üzere magnezyum ve titanyum gibi malzemelere grafen eklenerek geliştirilen grafen takviyeli metal matris kompozitlerin havacılık, otomotiv ve tıp gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılması bekleniyor.

- Silisyum Karbür (SiC)
- Alüminyum Oksit (Al₂O₃)
- Bor Karbür (B₄C)
- Silisyum Nitrür (Si₃N₄)

4.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Geleneksel fabrikasyon malzemeleri gelişen teknoloji ile endüstrinin talep ettiği üstün mekanik özellikleri karşılamada yetersiz kalmaktadır. Son yıllarda bu boşluğu doldurmak için kompozit malzemelerin gelişimi hızlanmıştır. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Metal esaslı kompozit malzemelerin üretim yöntemi, üretilen ürünün boyutuna, mekanik özelliklerine, altlık ile takviye elemanlarının uyumluluğuna, çalışma sıcaklığına ve üretim maliyetine göre belirlenir. Bu tip üretim yöntemine özgü artılar ve eksiler vardır. MMK malzemelerinin üretimi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Metal matrisli kompozitlerin işlenmesi, katı hal imalat teknikleri ve sıvı hal imalat teknikleri olmak üzere iki kategoriye ayrılır [74]. Toz metalurjisi, karbon nanotüple güçlendirilmiş metal bazlı kompozitlerin hazırlanmasında en yaygın kullanılan tekniktir. Toz metalurjisinde mekanik alaşımlama ve sinterleme en çok tercih edilen yöntemlerdir. Ayrıca sıcak presleme, kıvılcım plazma sinterleme ve deformasyon direnci konusunda da çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Termal püskürtme, galvanik

kaplama ve elektriksiz kaplama, karbon nanotüple güçlendirilmiş kompozit kaplamaların imalatında kullanılan diğer önemli tekniklerdir. Sıvı hal teknikleri, katı hal tekniklerinden daha ucuz olmaları, tozlardan daha kolay işlenebilmeleri ve döküm yoluyla çeşitli şekillerde kompozitler üretilebilmeleri nedeniyle genellikle tercih edilir. Tersine, sıvı hal teknikleri genellikle işleme parametrelerinin yetersiz kontrolünden ve altlık ile takviye arasındaki istenmeyen kimyasal reaksiyonlardan muzdariptir.

MMK üretiminde farklı tekniklerin geliştirilmesinin en önemli nedenlerinden biri farklı matris ve takviye malzemelerinin kullanılmasıdır. MMK üretim yöntemleri, üretim sırasında altlığın faz durumuna göre sınıflandırılabilir [75].

Katı faz üretim yöntemleri;

- Difüzyonla bağlama
- Toz metalurjisi (TM)
- Haddeleme

Sıvı faz üretim yöntemleri

- Sıvı Metal İnfiltrasyon
- Basıncılı ve Basıncsız İnfiltrasyon
- Sıkıştırma Döküm tekniği
- Sıvı Metal Karıştırma
- Plazma Püskürtme

Diğer Yöntemler

- Vidalı Ekstrüzyon
- In-Situ Tekniği
- XD Tekniği [41]

4.4.1. Katı faz üretim yöntemleri

Katı faz üretim yöntemi, metal esaslı kompozitler üretilirken en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, ana malzemeye erime noktasından daha düşük bir

sıcaklıkta farklı işlemler uygulanır. Katı faz üretim yöntemi ile sıvı faz üretim yöntemine göre daha iyi mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler üretmek mümkündür. Bu yöntemle üretilen kompozitlerin maliyeti diğer yöntemlere göre daha yüksektir. En yaygın olarak kullanılan katı faz üretim yöntemleri; difüzyon bağlama yöntemi ile toz metalurjisi yöntemidir [76].

- Difüzyonla bağlama
- Toz metalurjisi (TM)
- Haddeleme

4.4.2. Toz metalurjisi yöntemi

Metal matrisli kompozitler üretilirken en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde; İstenilen şekle sahip matris ve takviye elemanı belirli bir kalıpta sıkıştırılır. Sinterleme, sıkıştırılmış tozlar arasında yapışmayı sağlamak için erime sıcaklığı altında gerçekleştirilir. Sinterleme sonrası ikincil işlemlerle mükemmelleştirilmiş numuneler elde edilir.

Toz metalurjisi, fabrikasyon parçaların düşük yatırım maliyeti, yüksek üretkenlik, malzemelerin esnekliği ve karmaşık şekillere sahip parçaların seri üretim kolaylığı sebebiyle endüstride tercih edilir. Toz metalurjisi ile yapılan parçalar günümüzde otomotiv endüstrisinde yakıt parçaları, fren balataları, elektrik kontakları, sürtünme parçaları, dişli çarklar, akü hücreleri ve sert metaller gibi birçok alanda bulunmaktadır.

4.5. Metal Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler eski çağlardan beri birçok alanda, özellikle çeşitli aletlerde kullanılmaktadır. Örneğin, Orta Doğu'da ok uçları, bükülme mukavemetini artırmak için farklı liflerin katmanlanmasıyla üretilip tercih edilmiştir. Yay gövdesi, işlenmiş deri ve metalin birleştirilmesiyle üretilmiş darbelere karşı daha dayanıklıdır. Binalar yapılırken çamur, saman ve yanmamış karışımlar da karma yapılara örnektir. Havacılık şirketi Boeing tarafından yapılan 737 gibi uçakların kanatları, arka stabilizatörleri ve

iniş takımları, karbon fiber ve fiberglas kullanılarak kompozit yapıdan yapılmıştır. Metal matrisli kompozitlerin kullanımı savunma, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde oldukça yaygındır. Alüminyum alaşımlarının yoğunluğu düşük olmasına rağmen, bu alaşımlar seramik malzemelerle güçlendirilmiş ve geleneksel araç motorlarında kullanılmaktadır.

Alüminyum matrisli kompozitler 19. yüzyılın sonlarından beri çalışılmaktadır ve otomotiv endüstrisinde, zırh geliştirmede ve spor malzemeleri imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle teknolojinin gelişmesiyle havacılık sektöründe de sıklıkla tercih edilmiştir. Uzun mekiği, metal matrisli kompozitlerin ilk uygulama alanlarından biridir. Mekiğin gövdesi, hafif ve yüksek mukavemetli bir malzeme olan bor ilavesiyle karbon fiber ve alüminyum karışımından yapılmıştır. Alüminyum kompozitlerin otomotiv endüstrisinde kullanımına örnek olarak fren diskleri sunulabilir. Ayrıca kompozitler; valflerde, jet motorlarında, pervanelerde, kompresörlerde ve golf kulüplerinde kullanılır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında deneysel çalışma kısmı grafen oksit tozları üretimi, GO tozlarının kaplanması, Al-GO kompozit tozlarının eldesi, Al-GO tozların sinterlenmesi ve kompozit malzemelerin karakterize edilmesi aşamalarından oluşmaktadır. GO modifiye hummer yöntemiyle üretilmiştir. Ardından, bu tozlar akımsız Ni-P kaplama banyosunda kaplanmıştır. Kaplanmış GO tozları Al tozları ile ultrasonik homojenizatör vasıtasıyla karıştırılmış ve ECAS yöntemiyle sinterlenerek kompozit malzeme üretilmiştir. Son olarak da bu kompozit malzemelerin karakterizasyonu yapılmıştır.

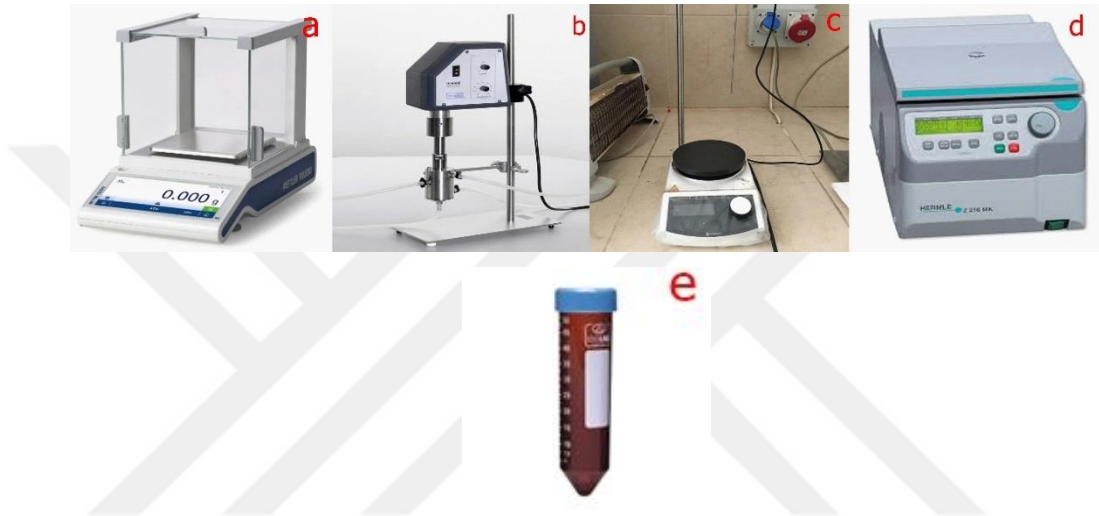
5.1. Modifiye Hummer Yöntemiyle GO Tozlarının Üretimi

Tez çalışmasında grafen oksit üretimi için; başlangıç malzemesi olarak Merck marka grafit tozu (%99,5) tercih edilmiştir. Aynı zamanda Şekil 5.1.'de gösterilen Merck marka sülfirik asit (H_2SO_4), Merck marka potasyum permanganat ($KMnO_4$), Alfa Aesar marka hidrojen peroksit (H_2O_2) kullanılmıştır. Üretilcek kompozit malzemenin ana matrisi içinse $\geq 160 \mu$ olan Acros Organics marka alüminyum ($\geq$ %99,5) kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Kullanılan Malzemeler (a) Sülfirik Asit (H_2SO_4), (b)Potasyum Permanganat ($KMnO_4$), (c)Hidrojen Peroksit (H_2O_2), (d) Alüminyum tozu (Al)

Grafen Oksit (GO) üretiminde kullanılan teçhizatların resimleri Şekil 5.2. (a-e)’ de verilmiştir. Malzeme tartımları Mettler Toledo” (a) marka hassas terazi ile yapılmıştır. Merck marka hegzagonal grafit tozlarının sonikasyon işlemi “Hielscher” (b) marka ve model sonikatör yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çözelti karıştırılması için “heidolph” (c) marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı tercih edilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen santrifüj işlemi “Hermle”(d) marka cihazında yapılmıştır. Santrifüj işleminde “ISOLAB” (e) marka 50 ml hacminde santrifüj tüpleri kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Grafen oksit Üretiminde kullanılan Techizatlar (a) Mettler Toledo marka hassas terazi (b) Hielscher” marka sonikatör (c) “heidolph” marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı (d) “Hermle” marka santrifüj işlemi cihazı (e) “ISOLAB” marka plastik santrifüj tüp

Grafen Oksit (GO) takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretmek için gerekli olan takviye malzemesi olan grafen oksit üretimi için Modifiye Hummer yöntemi tercih edildi. Geniş yüzey alanlarına sahip grafit tozlarının ummadık yüksek ısıların meydana gelmesi gibi tehlikeli işlemler içeren Modifiye Hummer yöntemi; modifiye işlemler ile güvenilir bir GO sentezi yöntemine dönüştürülebilmektedir. Modifiye Hummer yöntemiyle üretilen GO’nun kimyasal indirgeme reaksiyonları ile seri ve fazla miktarda GO üretilebilmektedir. Ayrıca bu yöntemin maliyeti de daha düşük olmaktadır. Grafit içinde bulunan bu GO tabakalarının arasındaki bağların koparılmasıyla grafen oksit üretimi gerçekleştirilmektedir. Burada grafen oksitin istenen mükemmel özellikleri sergilemesi için ilk aşama olan GO sentezi çok önemlidir. Modifiye Hummer yöntemi ile GO sentezi için gerekli malzemelerden

grafit tozu ($<20\ \mu\text{m}$). Hidrojen peroksit (H_2O_2), potasyum permanganat (KMnO_4) ve sülfirik asit (H_2SO_4) “Merck” firmasından edilmiştir.

Yapılan çalışmada başlangıç malzemesi olarak “Merck” marka hegzagonal grafit tozu (%99,5) kullanılmıştır. Modifiye Hummer yöntemiyle hegzagonal grafit tozları grafen nano tabakalar haline getirilmiştir. Bu yöntem şöyle gerçekleştirilmiştir; GO üretimi sentez işleminin ilk aşamasında buz banyosu içerisinde 1 gram grafit ve 1 gr Sodyum Sülfat (NaNO_3) 50 ml saf su içerisine ilave edilmiştir. Ardından, sülfirik asit (H_2SO_4) ekleyerek Şekil 5.2b.’deki “Heidolph marka” magnetik karıştırıcı yardımıyla 600 rpm güçte, 25 dakika karıştırma işlemi uygulanmıştır.

Hazırlanan banyo içerisindeki karışıma yüksek oksitleyici olan 6 gram potasyum permanganat (KMnO_4) yavaşça ilave edilmiştir. KMnO_4 yüksek oksitleyici olduğundan dolayı aniden ilave edilmesi durumunda ekzotermik reaksiyon gerçekleşeceğinden sıcaklık ani artış gösterebilir. Bu durum reaksiyon için istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple yavaş yavaş ilave edilmesinin sebebi ani sıcaklık artışını önlemektir.

Bu sırada ekleme işlemi süresi boyunca sıcaklığın 5°C ’nin altında olmasına özenle dikkat edilmiştir. Karışım buz banyosundan çıkartılıp 2 saat karıştırılmıştır. Daha sonra reaksiyonu durdurmak için 30 dakika süre içinde yavaş yavaş 50 ml saf su damlatıldı. Bir sonraki işlem Karışıma 8 ml hidrojen peroksit (%35,7), karışım sıcaklığı 40°C ’yi geçmeyecek şekilde, eklenip 2 saat karıştırılmıştır.

Sentez işleminin ikinci aşamasında elde edilen çözelti santrifüj işlemine tabi tutulmuştur. Çözelti “Hermle” (Şekil 5.2d.) marka santrifüj cihazında 1200 rpm hızla santrifüj işlemine tabi tutulmuştu 50 ml hacminde plastik santrifüj tüpleri kullanılarak çözelti yaklaşık 1,5 litre saf su da yıkanmıştır. Bu aşamada karışımın rengi siyahtan kahverengiye dönmüştür. Karışım $\text{pH}=7$ oluncaya kadar yıkanmış ve filtrelendi. Filtreleme işleminden sonra etüv yardımı ile kalan malzeme 50°C ’de etüvde 24 saat kurutulmuş ve toz halinde GO elde edilmiştir. Kurutma işleminden sonra elde edilen GO tabakaları Raman spektroskopisi deneyi ile incelenmiştir.

5.2. GO Tozlarının Akımsız Ni - P ile Kaplanması

Bu işlem üretmiş olduğumuz grafen oksiti toz partiküller haline getirip kaplama işlemine hazırlanması ve ardından akımsız nikel banyosunda kaplanması olarak ikiye ayrılır.

Daha önce üretmiş olduğumuz 300 mg GO üzerine 100 ml saf su koyarak ultrasonik karıştırmada belirli hızda (0.5 devir/60 şiddet) 1 saat boyunca karıştırma işlemi uygulandı. Diğer yandan, ayrı bir çözelti (4 gr SnCl_2 + 12 HCl + 300 ml saf su) hazırlanarak diğer çözeltiliye (300 mg + 100 ml saf su) ilave edildi. İki ayrı karışımın homojenleşmesi için ortalama 500 devirde 30 dk süre boyunca magnetik karıştırmaya maruz bırakıldı. Ardından, elde edilen 400 ml çözelti vakumla süzme işlemine tabi tutuldu. Süzme işleminden sonra elde edilen numuneyi aktifleştirmek için, 400 ml PdCl_2 ile 20 dk magnetik karıştırmaya bırakıldı. Yeniden süzme işleminden sonra elde edilen ürün yaklaşık 12 saat süre boyunca 60°C 'de 12 saat kurutma işlemi uygulandı. Son olarak, kurutma işleminden sonra aktifleşmiş GO tozlarına 100 ml saf su ilave ederek 1 saat ultrasonik karıştırıcıda karıştırıldı ve akımsız Ni-P kaplanmasına hazır hale getirildi.

5.2.1. Tozların kaplanması

PdCl_2 ile aktifleştirilmiş GO çözeltisi %7-8 fosfor içeren ortam şartlarında Ni-P kaplama uygulandı. Bu kaplamanın en belirgin özellikleri belli seviyede korozyon direnci, hızlı kaplama, yüksek sertlik ve son olarak parlak görünüm özelliklerine sahip olmasıdır. Akımsız nikel banyosunun genel bileşimi Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Banyonun çalışma şartları ve bileşenleri

Kimyasallar	Miktar	Çalışma şartları	Değer
Nikel (II) Klorür (NiCl_2)	45	Sıcaklık	50
Na-Citrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)	100	Karıştırma hızı	250
Amonyum Klorür (NH_4Cl)	50	pH	5
Na-fosfit (H_2PO_4^-)	60, 80, 100		

Tablo 5.1.'de gösterilen malzemelerden belirli oranlarda eklenen bileşimlerin üzerine 300 ml saf su eklenmiştir. İlk başta oda sıcaklığında Ph 5-6 olan çözelti, NaOH^- ekleyerek kaplamanın yapılması istenilen Ph 7-8 aralığına çıkarılmıştır. Kaplamaların bu PH aralığında daha doygun olduğu bilinmektedir. Ardından sıcaklık kontrollü şekilde arttırılarak 50-55°C aralığında PdCl_2 ile aktifleştirilmiş GO çözeltisi ilave edildi ve kaplama işlemi başlatıldı. Toz partikülleri 1 saat boyunca 70-75°C sıcaklık aralığında kaplama işlemine tabi tutuldu.

GO tozları 3 farklı indirgeyici konsantrasyonu içeren kaplama banyolarına daldırılmıştır. Burada amaç; GO yüzeyini Ni-P tortusu bırakmadan maksimum şekilde kaplamaktır. Maksimum şekilde kaplanan GO yüzeyinin iyi bir arayüzey oluşturması hedeflenmiştir. Ni-P kaplama banyolarının kimyasala bileşimi ve operasyon şartları Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Bir sonraki aşamada, kaplama işleminden sonra vakumlu süzme ile Ni-P banyosu süzülerek kaplanmış grafen oksitler elde edilmiştir. Ardından, istenmeyen bileşimlerin uzaklaştırılması için 5 saat boyunca 40°C sıcaklık altında etüvde kurutulmuştur. Şekil 5.3. Ni-P banyosunda kaplanmış GO malzemesine yer verilmiştir.



Şekil 5.3. Ni-P banyosunda kaplanmış GO numunesi

5.3. Kompozit Tozlarının Hazırlanması

Matris yapısı içerisinde katkı malzemesi olarak tercih edilen grafen oksit, birkaç tabakaya sahip karbon allotrobu olmasının yanı sıra grafen oksit kalınlığının 5 ila 8 nm olması nedeniyle aglomerasyon eğilimi göstermektedir. Grafen oksit alüminyum yapı içerisinde kullanılabilmesi için bu aglomereler bir şekilde birbirinden ayrıştırılmalıdır. Bu topakların ayrıştırılması için grafen oksitin ultrasonik dağıtıcıyla dağıtılması gerekmektedir.

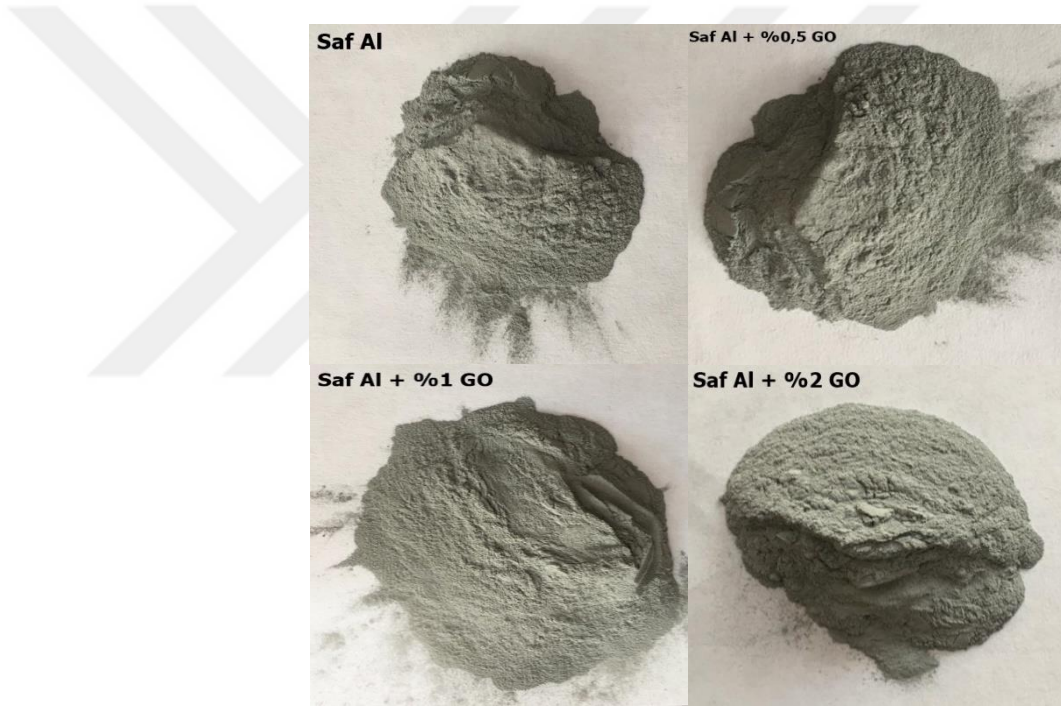
Akımsız nikel banyosunda kaplama işlemine tabi tutulmuş GO kompozisyonu, 100 ml etanol içerisinde ultrasonik dağıtıcıyla 0.3A akım şiddetinde 60 dakika boyunca dağıtıldı. Aynı esnada, alüminyum tozları etanol içerisinde ultrasonik olarak karıştırma işlemine tabi tutuldu. Alüminyum ve grafen oksit karışımlarını birbirine karıştırılması, GO alüminyum etkileşimi açısından son derece önemlidir. Bu yüzden, etkileşimi arttırmak için alüminyum-etanol çözeltisi içerisinde grafen oksit-etanol çözeltisi yavaş yavaş eklendi ve bir taraftan da ultrasonik karıştırıcıyla çözeltiler karıştırıldı. Böylece, tabakaları ayrıştırılan GO taneciklerin alüminyum içerisinde karışımı sağlanmış olur

Çalışmada saf alüminyuma ağırlıkça grafen oksit %0,5, %1, ve %2 oranlarında katılmıştır. 100 ml etanol içerisinde, 1 gram numuneye ağırlıkça grafen oksit oranları sırasıyla ilave edilmiştir. Tartımı yapılan tozlar 100 ml etanol içerisinde sürekli olarak sonike edilmiştir. Sonike edilen çözelti manyetik karıştırıcıda bulunan alüminyuma takviye edilmiştir. Yaklaşık 40 dakika boyunca bu iki karışım sonike işlemine bırakıldıktan sonra vakumla süzme işlemine tabi tutulmuştur. Bu esnada alkolden uzaklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sürekli olarak tekrarlanan bu işlemlerden sonra toz haline gelen kompozisyon alınmıştır. Ardından, tamamen kuruması için 12 saat sürede 50 derecede vakumlu fırına atılmıştır. Tablo 5.2.'de deneyde üretilen tozların bileşimleri verilmiştir.

Tablo 5.2. Üretilen tozların derişimi

Numune Adı	Takviye oranları
Numune 1	Saf Al
Numune 2	Saf Al
Numune 3	Al-%0,5 GO
Numune 4	Al-%0,5 GO
Numune 5	Al-%1 GO
Numune 6	Al-%1 GO
Numune 7	Al-%2 GO
Numune 8	Al-%2 GO

şekil 5.4.'te üretilen kompozit tozlarının sinterleme öncesi görüntüleri verilmiştir.



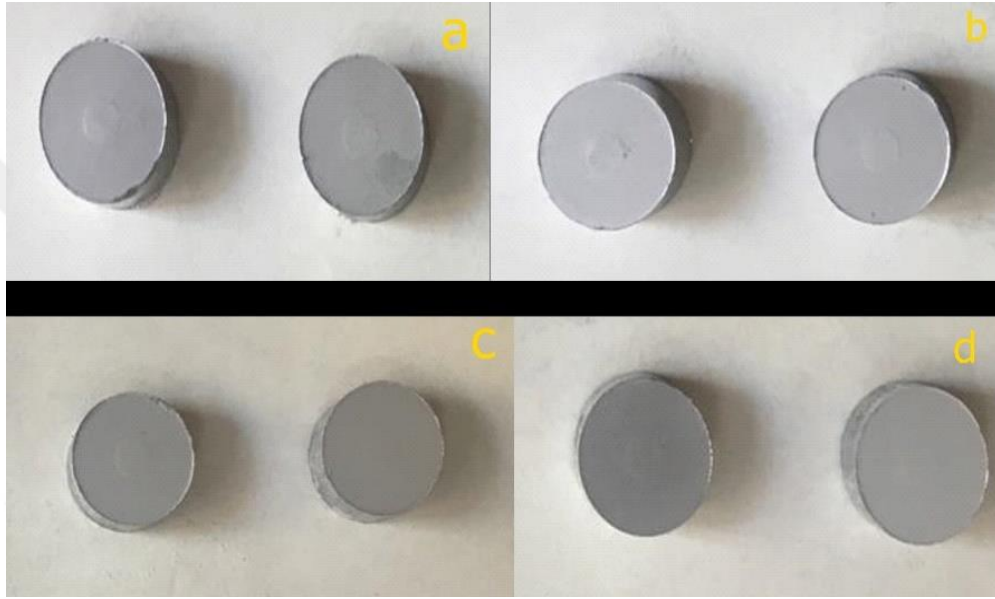
şekil 5.4. Üretilen kompozit tozlarının sinterleme öncesi görüntüleri

5.4. Presleme ve Sinterleme İşlemi

Üç farklı toz karışımından 2 gr tartılan kütleler katkısız olarak 15 mm çapında silindirik boşluğa sahip bir çelik kalıp içerisinde 250MPa basınç altında “Hidroliksan marka” preste tek yönde basılmış ve disk şeklinde numuneler elde edilmiş ve ECAS yöntemi ile bu diskler sinterlenmiştir. Daha yüksek ısıtma hızı, daha düşük sinterleme sıcaklığı ve kısa işlem süresi, kontrollü atmosfere sahip olması, soğuk preslemeye

ihtiyaç duyulmaması ve son olarak zor sinterlenen tozların kolaylıkla sinterlenebilmesi gibi özellikler ECAS'ı diğer sinterleme metotlarına göre üstün kılar.

ECAS yönteminde sinterleme bir kalıp içerisinde basınç ve elektrik akımı yardımı ile sağlanmaktadır. Her numune için ayrı kalıp hazırlanması gerekmektedir. Sinterleme işlemi 150 sn'de 20 MPa temas basınçta, 2200 A akımda gerçekleştirilmiştir ve toplam 8 adet numune elde edilmiştir.



Şekil 5.5. ECAS Preslenmiş kompozit numuneler. (a) Saf Al (b) Al-%0,5 (c) Al-%1 (d) Al-%2

5.5. Karakterizasyon İşlemleri

Saf Alüminyum ve ağırlıkça %0,5 %1 ve %2 GO takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin sertlik değerlerini elde etmek ve kesit görüntüleri alabilmek için bazı metalografik ve karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır. Öncelikle, her bir numunede ortadan ikiye kesilmiştir. Ardından, her kesilen numuneler sırayla iletken bakelite alınmıştır. Zımparalama işlemi öncesi numuneler 0,3 mikronluk alümina ile 6 dakika boyunca parlatma yapılmıştır ve ardından numuneler SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Son olarak parlatma işleminin ardından numuneler aşınma, çekme testi, sertlik ve görüntü alma işlemleri için hazır hale getirilmiştir.

Üretilen kompozit toz numunelerin numunelerdeki fazların ortaya çıkarılması ve sinterleme sonrası numunelerin faz incelemeleri için FESEM analizi uygulanmıştır. Bu analiz, Sakarya Üniversitesi merkez laboratuvarı olarak kurulan Sakarya Üniversitesi Araştırma Geliştirme merkezi (SARGEM), FEI Marka Quanta FEG 450 marka FESEM cihazı kullanılarak yapılmıştır. FESEM ile incelemeler, neredeyse sınırsız alan derinliği ile 10x ila 300.000x büyütmelerde topografik ve temel bilgiler sağlar. Her bir numune için sırasıyla farklı farklı büyütmelerde görüntü alınmıştır. FESEM yardımıyla kaplamaların kesit kalınlığı tayini yapılmıştır.



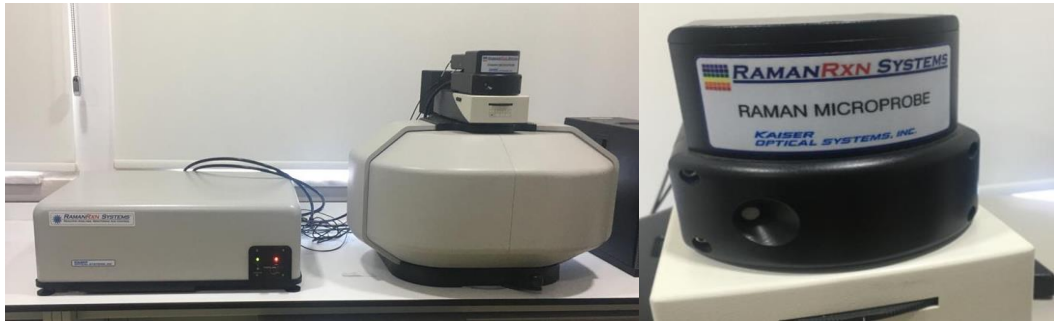
Şekil 5.6. İncelemerde kullanılan FESEM Cihazı

Saf Alüminyum ve üretilen kompozit numunelerinin, numunelerdeki faz incelemeleri için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Toz haldeki ve sinterlenmiş numunelerin faz yapıları Rigaku marka (Şekil 5.6.) XRD cihazı kullanılarak 3°/dk.'lık hızla ve 10-90° arasında yapılmıştır.



Şekil 5.7. Rigaku marka XRD cihazı

Raman ölçümleri, Sakarya Üniversitesi merkez laboratuvarı olarak kurulan Sakarya Üniversitesi Araştırma Geliştirme merkezi (SARGEM), Kaiser Optical Systems marka Raman cihazı kullanılarak lazer ışını altında yapılmıştır (Şekil 5.8.)



Şekil 5.8. İncelemelerde kullanılan Raman spektroskopisi cihazı

Saf Alüminyum ve üretilen kompozit numunelere yoğun testi ve sertlik testi uygulanmıştır. Yoğunluk testi için Arşimet deney düzenekleri kullanılmıştır. Tribolojik işlemler ise, ECAS sinterleme yöntemi ile üretilen Al-GO kompozit malzemelerin Aşınma testleri “tribometer” marka cihazda 1N yük altında ve 20 cm/sn kayma hızlarında çelik bilya kullanılarak yapılmıştır. Aşınma testleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma oranları incelenmiştir.

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

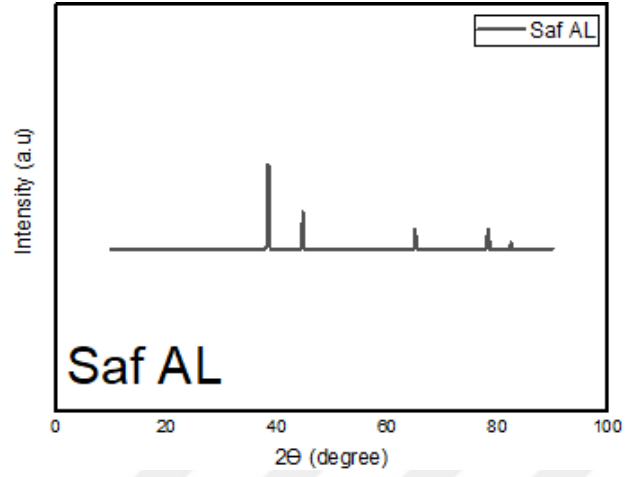
Bu bölümde, farklı katkı oranlarda (ağırlıkça %0,5, %1, %2) grafen oksit takviyeli Alüminyum matrisli kompozitlerin üzerinde yapılan deney sonuçlarına aşağıda yer verilmiştir. Bu analizler, kompozit malzeme üretimi esnasında kullanılan tozların ve üretilen kompozitlerin analizlerini kapsamaktadır. Bu analizler FESEM, XRD ve yoğunluklarını, Raman Spektroskopisi analizi, mekanik özelliklerini (sertlik ve akma, çekme mukavemetini), aşınma davranışını ve mikroyapı incelemelerini içermektedir.

6.1. Tozların ve Üretilen Kompozitlerin XRD ve Raman Spektroskopisi

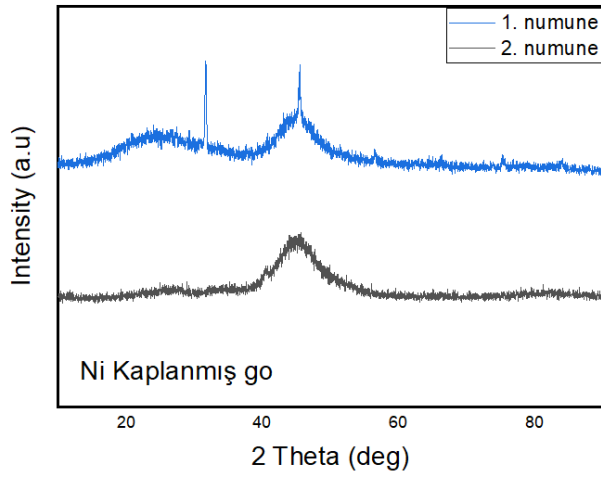
Bu tez kapsamında, grafen oksit (GO) takviyeli Alüminyum matrisli kompozitler toz metalurjisi metoduyla üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde Al dışında istenmeyen bir arafaz (Al_4C_3 gibi) oluşup oluşmadığını belirlemek için X-ışını kırınımı (XRD) tercih edilmiştir. Kompozit üretiminde kullanılan alüminyum (Şekil 6.1.) ve grafen oksit hammaddelerine ait XRD paterni Şekil 6.2.'de verilmiştir. XRD analizinden ise kullanılan tozların alüminyum ve grafen oksit ait olduğu görülmektedir.

Farklı grafen katkı oranları için ECAS yöntemiyle sinterlenmiş GO katkılı alüminyum matrisli kompozitlerin XRD paterni Şekil 6.3.'te verilmiştir. Şekil 6.3.'de toz metalurjisi yöntemiyle üretilen toz haldeki karışımların (ağırlıkça %0,5, %1, %2) ve sinterleme öncesi ve sonrası numunelerin XRD grafikleri verilmiştir. Söz konusu her iki durumda da saf alüminyum ve farklı grafen oksit katkısı (Saf al, ağırlıkça %0,5 GO, %1 GO ve %2 GO) için elde edilen XRD verileri incelendiğinde; üretilen kompozitlerin alüminyum esaslı olduğu için grafen oksit kullanımından kaynaklanan Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı tespit edilmiştir (Şekil 6.3.). Burada,

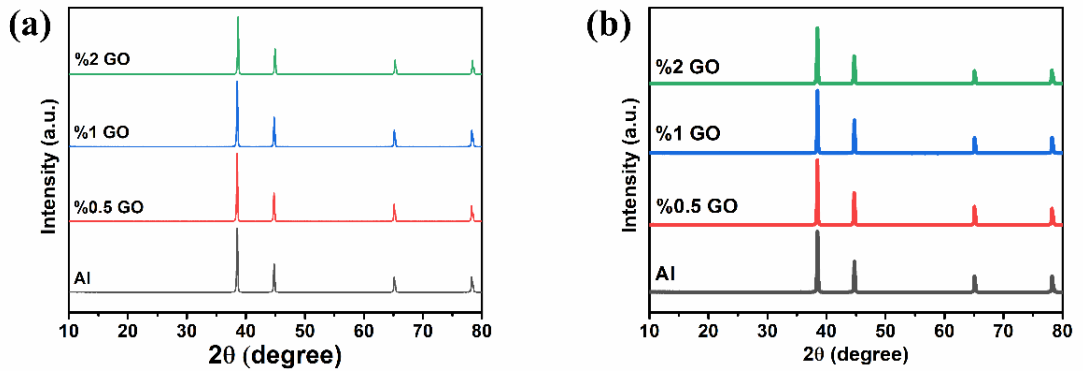
grafen oksitin oldukça düşük miktarlarda kullanılmasından ve cihazın düşük deteksiyon limitine sahip olmasında dolayı grafen oksit piki görülmemektedir.



Şekil 6.1. Saf Alüminyumun XRD pateni



Şekil 6.2. GO numunesinin Ni kaplaması sonrası XRD pateni

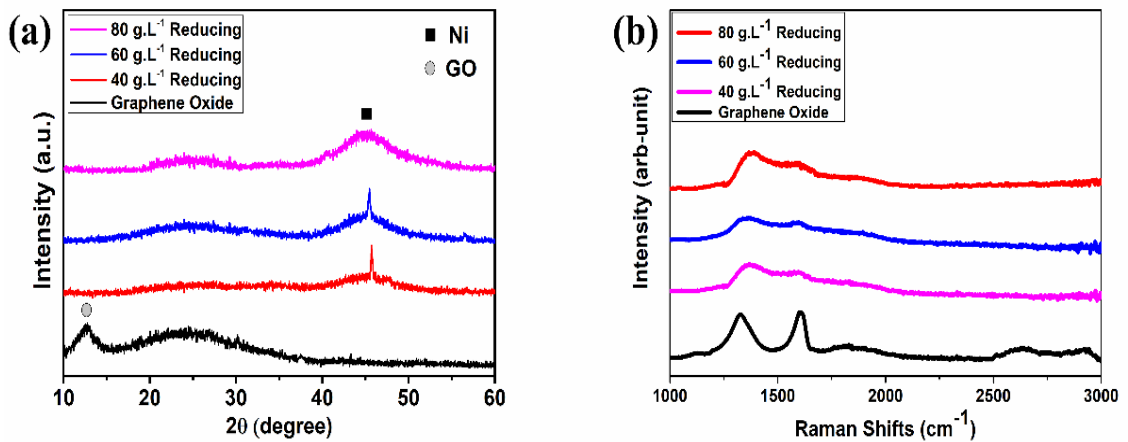


Şekil 6.3. Kompozitlerin Sinterleme Öncesi (A) ve Sonrası (B) XRD Grafikleri

M.Can Şenel ve ark. [5] çalışmalarında görüldüğü üzere toz metalurjisi metoduyla saf alüminyum ve ağırlıkça %0,1, %0,3, %0,5 oranında grafen takviyeli alüminyum esaslı kompozitler üretmişlerdir. Yapılan karakterizasyon incelemelerine bakıldığında üretilen yapının tamamen alüminyum piklerine ait olduğu grafen kullanımından kaynaklanan Al_4C_3 gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığı görülmektedir. Ayrıca grafen oranı az olduğundan dolayı grafen pikine rastlanılmamaktadır.

XRD analizlerinde grafen oksitin varlığı gözlemlenememiş olup bunda grafen oksitin iki boyutlu yapısı, düşük katkı oranı ve cihazın düşük hassasiyeti etkili olmuştur. Bu sebeple, sırasıyla Al-%0,5GO, Al-%1GO, Al-%2GO kompozit yapılarda grafen oksitin varlığını doğrulamak amacıyla Raman Spektroskobu analizi gerçekleştirilmiştir.

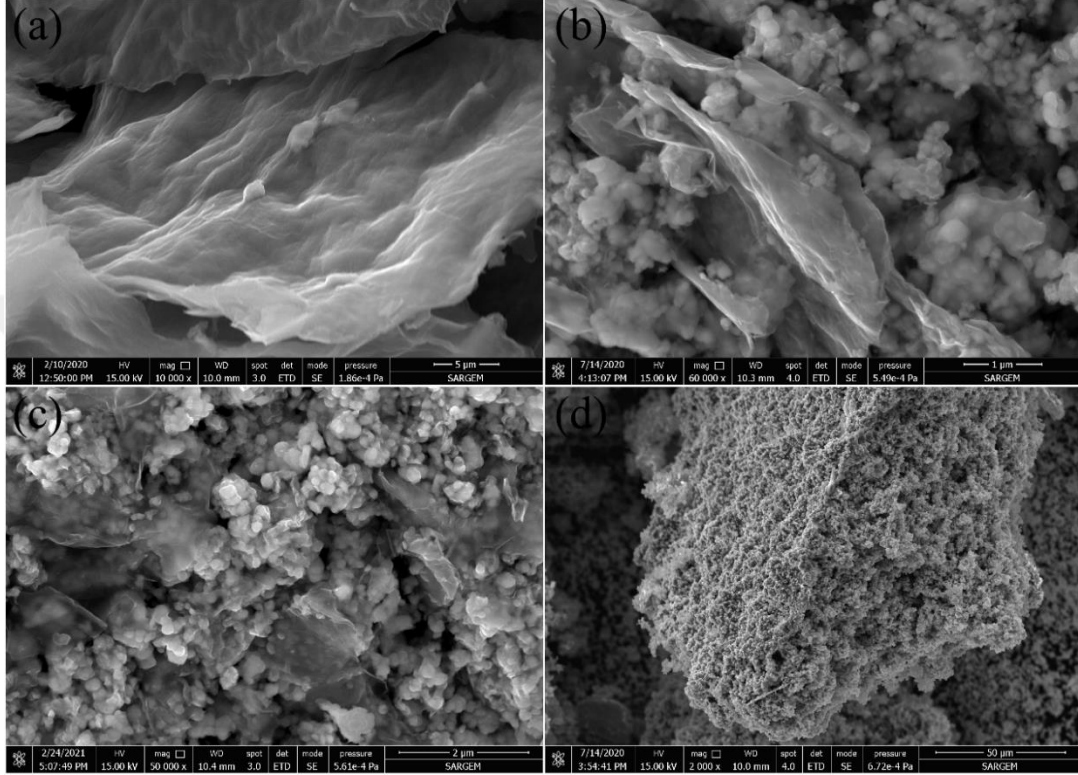
Şekil 6.4.'te farklı konsantrasyonlarda grafen oksit içeren alüminyum kompozitlerin Raman Spektrumlarını göstermektedir. Karbon türevi malzemelerin görüldüğü bant aralığı $1200-2800\text{ cm}^{-1}$ olup Al-%0.1GO kompozit malzeme $1200-3000\text{ cm}^{-1}$ bant aralığında Raman Spektroskobu ile analiz edilmiştir. Yürütülen analiz sonucunda, D bandı 1345 cm^{-1} , G bandı 1578 cm^{-1} ve 2D bandı 2676 cm^{-1} 'de pik vermiştir. Tian, Wen-ming ve ark. [68] Plazma sinterleme ile hazırlanmış grafen takviyeli alüminyum matris kompozitler üzerinde çalışma yapmış ve yapılan Raman spektrumları incelemelerinde benzer sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 6.4. Farklı Konsantrasyonlarda GO İçeren Alüminyum Kompozitlerin Raman Spektrumlarını

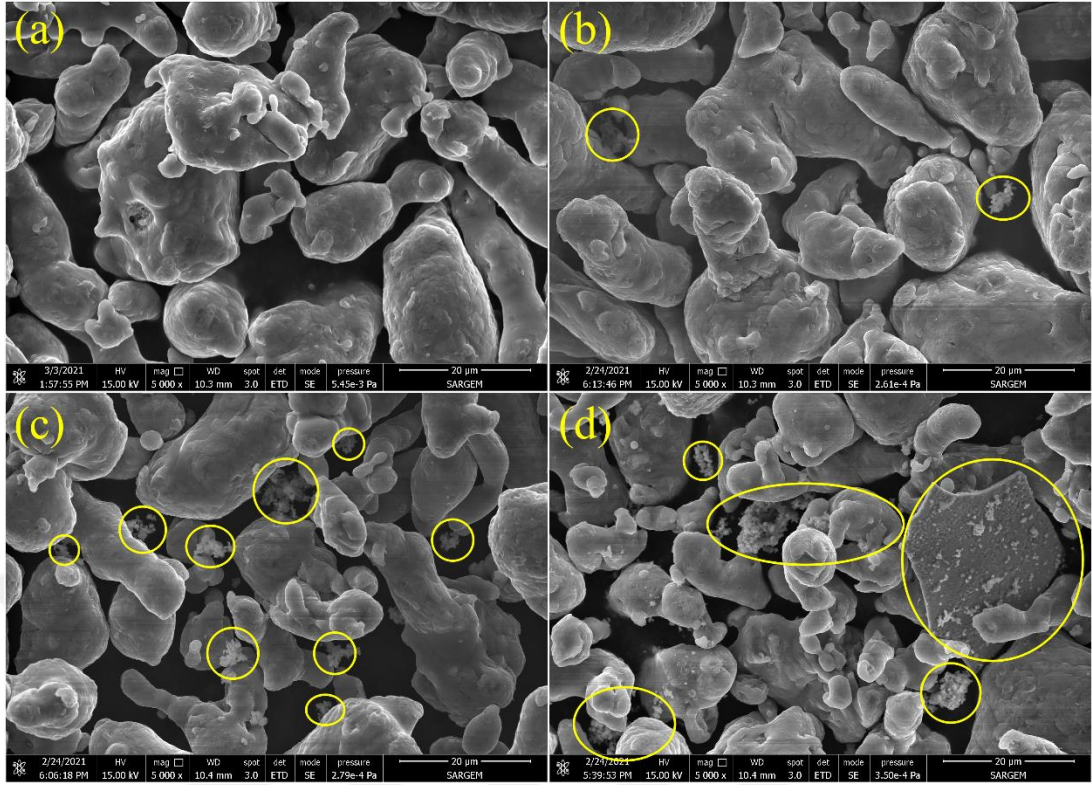
6.2. Tozların ve Üretilen Kompozitlerin FESEM Görüntülerinin Analizi

Şekil 6.5.'de modifiye hummer yöntemi ile üretilen grafen oksit ve farklı indirgeyici konsantrasyonlarında kaplanan GO tozlarının FESEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.5. Farklı indirgeyici içeren banyolardan elde edilen GO'lerin FESEM mikrografları. (a) Saf Al (b) %0.5GO (c) %1 GO (d) %2GO

Şekil 6.5b.'de 40 g/l indirgeyici içeren banyo kaplanmış GO görülmektedir. Burada her ne kadar Ni-P kaplama GO yüzeyinde birikmiş alanlar görülse de kaplanmamış yüzey daha büyük bir alan oluşturmaktadır. İndirgeyici miktarı 60 g/L (Şekil 6.5c.) arttırıldığında GO yüzeyinde daha fazla Ni-P birikmiştir ve çok az kaplanmamış alan kalmıştır. İndirgeyici miktarı 80 g/L ye çıkarıldığında ise Ni-P kaplaması GO 'in bütün yüzeyini kaplamakla kalmamış Ni-P toz şeklinde çökelmiştir. Şekil 6.5d.'ye bakıldığında kaplanmış GO ve Ni-P tortuları görülmektedir. Çökelen serbest Ni-P tortuları Al-GO kompozit malzemenin kimyasal bileşimini değiştireceğinden 80 g/L indirgeyici içeren banyodan elden edilen GO tozları kullanılmamıştır. Kompozit malzemelerde kullanılan GO tozları 60 g/L indirgeyici içeren banyolarda kaplanmıştır.



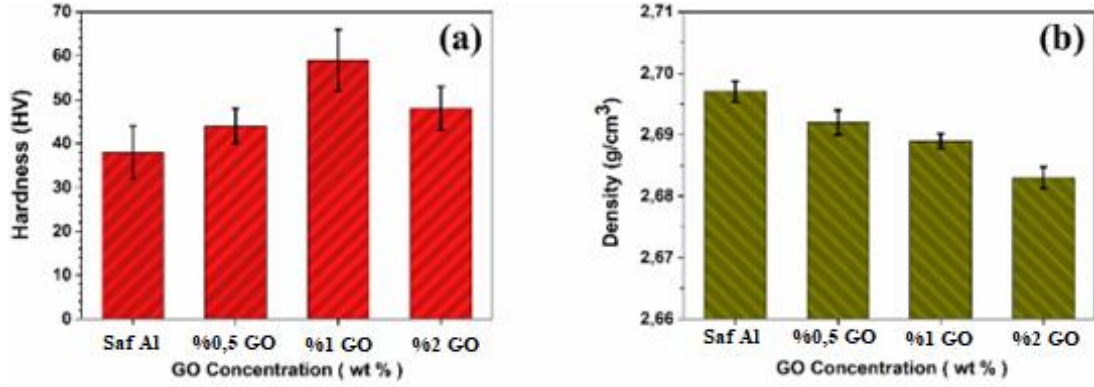
Şekil 6.6. Saf alüminyum tozları ile farklı konsantrasyonlarda GO içeren alüminyum kompozit tozlarının FESEM mikrografları. (a) saf Al, (b) ağırlıkça %0,5 GO, (c) ağırlıkça %1 GO ve (d) ağırlıkça % 2 GO katkıli kompozit tozları.

Şekil 6.6. farklı konsantrasyonlarda GO içeren alüminyum kompozit partiküllerinin FESEM görüntüleri ve etkileşimleri verilmiştir. Şekil 6.6a.'da saf alüminyum tozları dağılmış haldedir. Şekil 6.6b.'yi gözlemlediğimizde %0,5 grafen oksit ilavesiyle çok az oranda grafen oksit partikülleri tespit edilmiştir. %1 GO ilavesi oranının %0,5 GO için ilavesinden daha homojen olduğu ve partiküllerin daha belirgin olduğu görülmüştür. Şekil 6.6d.'de görüldüğü gibi, %2 GO ilavesiyle grafen partiküllerin büyümüş ve topaklanmalar meydana gelmiş ve partiküllerin homojen olarak dağılması topaklanmaya sebep olmuştur. Şekil 6.6b-c-d. görüntüleri incelendiğinde GO'lerin varlığı doğrulanmaktadır. Bu analizler, GO'lerin alüminyum kompozitte iyi dağıldığını göstermektedir. Alüminyum yüzeylerinden diğer konsantrasyonlara göre artış olduğu gözlemlenmiştir. Y.N. Zan ve ark. yaptıkları çalışmada fazla oranda grafen oksit ilavesinin topaklaşmaya sebep olduğunu gözlemlemişlerdir [77]. Benzer bir gözlem, Muhammad Rashad ve ark.[78] alüminyum-grafen kompozitlerinin mikro yapı, mekanik ve elektrokimyasal özellikleri ekstrüzyon öncesi ve sonrasında incelenmiştir. Yapılan incelemelerde GO ilavelerindeki artış miktarı GO miktarını ve

boyutunu arttırdığı gözlemlenmişti. GO'ler alüminyum tane sınırlarında toplanma olmaksızın yer almaktadır. Bununla birlikte, GO'ler tane sınırlarında istiflenir ve toplanır FESEM görüntülerinden, GO'lerin Al tane sınırları boyunca yer aldığı görülmüştür. Bu, mekanik testler sırasında kolay kaymaya neden olmaktadır.

6.3. Sertlik Ölçüm ve Yoğunluk Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Saf alüminyum ve farklı katkı oranlarında grafen oksit takviyesi içeren (ağırlıkça, %0,5, %1, %2) Al-GO kompozit malzemelerin sinterleme sonrası deneysel yoğunlukları Sekil 6.7b'de verilmiştir. Yoğunluk testi için Arşimet deney düzenekleri kullanılmıştır. Benzer bir çalışma Arnon Kraipok ve ark. tarafından yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada yoğunluk hesapları için Arşimet deneyi yaparak cam-seramik numunelerin yoğunlukları tespit edilmiştir [32]. En yüksek deneysel yoğunluk değerine (2.695 g/cm^3) Saf Al'de ulaşılmıştır. Artan grafen oksit katkı oranıyla deneysel yoğunluğun 2.69 g/cm^3 den 2.68 g/cm^3 'e düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu durum sonucunda malzemelerin porozite oranının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sinterlemenin, kompozit yapıdaki gözenek miktarını azaltarak deneysel yoğunluğu arttırdığı belirlenmiştir. Üretilen kompozitlerin ortalama Vickers sertlik değerleri Sekil 6.7a'da verilmiştir. Al-%2GO kompozitin ortalama Vickers sertliği 50 HV iken; Al-%1 kompozitin sertliği 60 HV olarak belirlenmiştir. Kompozit yapıda, grafen oksit katkısıyla Vickers sertliğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, grafen oksitin kompozit yapıda iyi dağıtılmış olmasıyla ve sahip olduğu üstün mekanik özelliklerle (elastisite modülü 1 TPa, çekme dayanımı 125 GPa) açıklanabilir. Mehmet Uysal ve ark. [79] “ultrasonik destekli darbeli elektro birlikte biriktirme ile üretilen Ni-W-TiO₂-GO kompozitlerinin tribolojik özellikleri” üzerine yaptıkları çalışmada ise, nano-mekanik test sonuçları, sırasıyla sertlik ve elastik modülde 8.1 GPa ve ~ 209 GPa gösterdi. Grafen oksit ve TiO₂ ilavesi, maksimum bir artış göstermiştir.

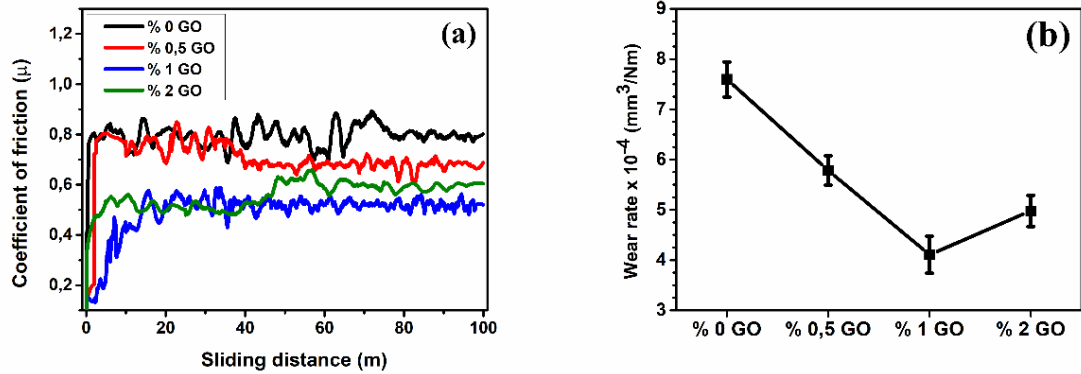


Şekil 6.7. (a) Üretilen kompozitlerin ortalama sertlik değerleri (b) Al-GO kompozit malzemelerin sinterleme sonrası deneysel yoğunlukları.

6.4. Aşınma İzlerinin Taramalı Elektron Mikroskopuyla İncelenmesi ve Aşınma İzlerinin FESEM Görüntüleri

Şekil 6.8.'de ECAS sinterleme yöntemi ile üretilen Al-grafen oksit kompozit malzemelerin 1N yük altında ve 20 cm/sn kayma hızlarında yapılan aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma oranları ve sürtünme katsayı değerleri verilmiştir. Şekil 6.8.'de görüldüğü gibi Al-GO kompozit malzemelerin sürtünme katsayıları takviye edilmemiş alüminyum malzemesine göre göre çok daha düşüktür ve ortalama sürtünme katsayısı %20 oranında azalmaktadır. %1 oranına kadar grafen oksit miktarı arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı, %2 oranında grafen oksit miktarının ilave edilmesiyle sürtünme katsayısının tekrar arttığı görülmektedir. %0,5 oranında grafen oksit takviye edilen kompozit malzemesinde görülen sürtünme katsayısındaki düşüş, matris içindeki grafen oksitin topaklanması sonucu meydana gelen çatlak ve sonrasındaki delaminasyon varlığı ile ilişkilendirilebilir. En düşük sürtünme katsayısı %1 grafen oksit takviyeli kompozit malzemede elde edilirken en yüksek sürtünme katsayısı saf alüminyumda elde edilmiştir. Sürtünme katsayısında görülen eğilimin benzeri aşınma oranlarında da görülmüştür. %1 oranına kadar grafen oksit miktarı arttıkça aşınma oranı düşmüş, %2 oranında ilave edilen kompozit malzemede aşınma oranı tekrar artmıştır. Bu durum grafitleşme ile açıklanabilir. Grafitleşme, uzun süreler boyunca yaklaşık yüksek sıcaklıklara maruz kalan karbondaki meydana gelebilen mikroyapısal bir değişiktir. Grafen oksitin katman katman yapısı atomik bağlardan dolayı aşınma esnasında yatay yönlerde kaymaya sebep olur. Böylelikle, %2 GO

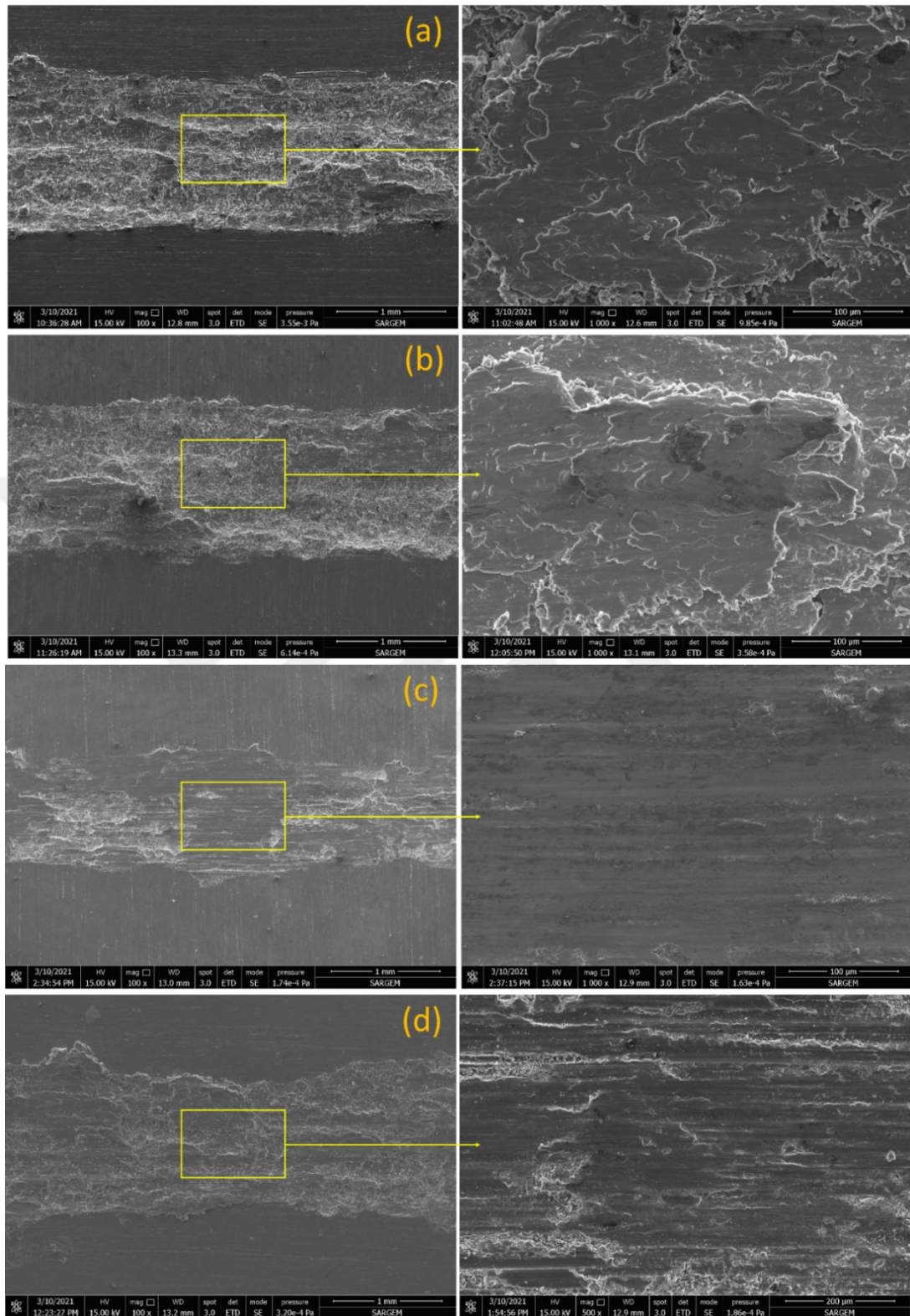
içeren kompozit yapıda katmanlı yapı topaksı yapıya dönüşür. Bu yüzden, porozite ve yüzey pürüzlülüğü artar. Çok fazla yanal kuvvet olması sürtünme katsayısını artırır ve aşınma dayanımını azaltır. Saf Alüminyum Al-%0.5GO Al-%1GO Al-%2GO kompozit malzemelerin aşınma oranları sırasıyla (7.5, 5.9, 4.1, 5 mm³Nm) olarak hesap edilmiştir. %1 grafen takviyeli kompozit malzeme, en yüksek aşınma performansı gösteren nanokompozit malzemesi olarak göze çarpmaktadır. Bunun nedeni, grafen oksit, temas yüzeyleri arasında bir yağlayıcı film oluşturması; bu yağlayıcı tabakanın iki yüzey arasında doğrudan teması önleyerek aşınma direncini iyileştirmesidir. Daha yüksek oranlarda takviye edilen kompozit malzemesi için; aglomerasyon nedeniyle mekanik özelliklerin azalması sonucu metal matriste kusurların oluşumu aşınma performansını azalmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak bu çalışma için mükemmel mekanik ve tribolojik özelliklere sahip kompozit malzemesi için optimum grafen oksit miktarı %3 olarak tespit edilmiştir. Erhan Duru ve ark. [80] “Darbeli elektrodpozisyon tekniği ile grafen oksit takviyeli Ni-B kompozit kaplamanın imalatı ve karakterizasyonu” üzerine araştırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, GO miktarının artması ile kaplamaların sürtünme katsayısının 0.46'dan 0.28'e düştüğünü bulmuşlardır.



Şekil 6.8. Saf Al ve Alüminyum kompozitlerin (a) sürtünme katsayısı (b) aşınma oranı

Şekil 6.9.'da alüminyum ve Al-GO kompozit malzemelerin aşınma sonrası yüzey görüntüleri sunulmaktadır. Şekil 6.9a.'da saf alüminyum yüzeyi incelendiğinde, baskın aşınma mekanizması adheziv aşınmadır. Adheziv aşınma, sünek malzemelerde görülen bir aşınmadır. Bu tip aşınma, saf alüminyumun sertliği düşük olduğunda meydana gelmiştir. Ağırlıkça %0,5 GO katkılı kompozit malzemenin aşınma görüntüsü Şekil

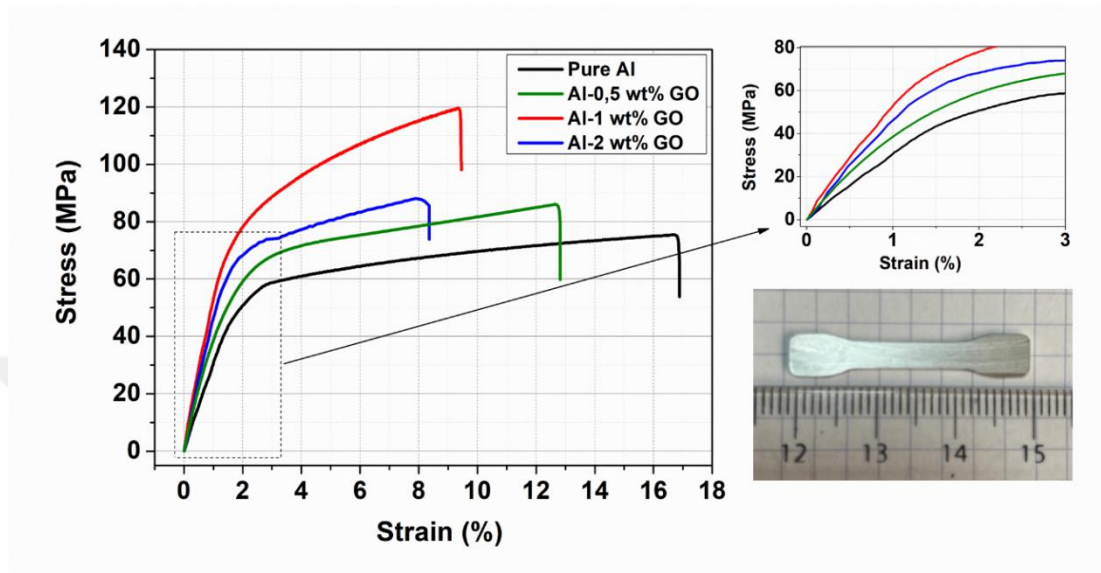
6.9b.'de verilmiştir. Ağırlıkça %0,5 GO katkılı malzemede yapışkan aşınması ile plastik deformasyon meydana geldi. GO katkısının malzemenin sertliğinde artışa neden olması sonucu plastik deformasyon meydana gelmiştir. %1 GO takviyeli kompozitin aşınma davranışı kısmen değişti. %1 GO takviyeli kompozitin aşınma davranışı da adheziv aşınmadır, yavaş yavaş yivler oluşmuştur. Güçlendirilmiş GO taneleri yüzeye sıvanmış ve kendi kendini yağlama özelliği göstermiş ve aşınmayı yavaşlatmıştır. Bu sayede daha kompakt bir yüzey elde edilmiştir. Hem aşınma mekanizmasının abrasiv aşınmaya dönüşmesi hem de kompakt yüzey malzemesinin sertliğinin artmasından kaynaklanmıştır. GO katkısı ağırlıkça %2 GO'ya yükseltildiğinde, malzemenin aşınma davranışı olumsuz yönde değişti. GO tanelerinin aglomerasyonu sonucunda malzemenin yoğunluğu ve sertliği azalmıştır. Malzemenin sertliğinin ve yoğunluğunun azalması malzemedeki aşınmayı hızlandırmıştır. Şekil 6.9d.'ye bakıldığında, aglomerasyondan kaynaklanan gözenekler görülmüştür. Gözenekler yüzeyde delaminasyona neden olur ve bu delaminasyonlardan kaynaklanan döküntüler görüntüde açıkça görülebilir. Min Li ve ark. [81] çalışmalarında "çok katmanlı arayüzlerin oluşumu ve grafen nanoplatelet takviyeli Al matris kompozitlerinde yük aktarımını" incelemişlerdir. Al-0.7 ağırlık grafen eklenmesiyle kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştiğini bulmuşlardır.



Şekil 6.9. Üretilen Al-GO Metal Matrisli Kompozitin Aşınma İzleri

6.5. Çekme Testi Sonuçları

Saf Al, ağırlıkça %0,5 GO, ağırlıkça %1 GO ve ağırlıkça %2 GO kompozitlerinin çekme testi sonuçları Şekil 6.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 6.10. Çekme testi uygulanmış Saf Al ve Al-GO kompozit numuneleri

Çekme testi sonucunda saf Al, ağırlıkça %0,5 GO, %1 GO, %2 GO katkılı kompozit malzemeler sırasıyla 40, 50, 62 ve 54 MPa akma dayanımına sahipken, çekme dayanımları ise 75, 85, 118 ve 88 MPa'dır. Saf alüminyumun akma ve çekme dayanımları grafen oksit katkısı ile artarken, % uzama azaldı. İkincil faz olarak takviye edilen grafen oksit tozları, dispersiyon sertleşmesine neden olarak kompozit malzemelerin mukavemetini arttırmış ve sünekliği azaltmıştır. %1 GO katkısı ile kompozit malzemenin akma ve çekme dayanımları maksimuma ulaşmıştır. GO katkısı %2'ye çıkarıldığında dayanım artmadı, aksine azalmıştır. Bu olgunun ortaya çıkmasındaki en önemli faktör, GO tanelerinin aglomere olması ve gözenekliliğe neden olmasıdır. Yifan Han ve ark. [82] "Nanolamine grafen (indirgenmiş grafen oksit)/Al-Mg-Si kompozitinin kolaylaştırılmış yaşlandırma işlemiyle iyileştirilmiş mekanik özelliği" adlı çalışmalarında, grafen oksit takviyesi. F. Javanshour ve ark. [83] "Keten epoksi kompozitlerinin arayüzey yapışması ve çekme performansı üzerindeki grafen oksit yüzey işleminin etkisi" üzerine yaptıkları çalışmada, GO ile modifiye edilmiş keten lifi/epoksi kompozitlerin çekme sertliğinin, işlenmemiş ketenden ortalama 2 GPa daha yüksek olduğunu bulmuşlardır.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

- 1- Saf alüminyum ve ağırlıkça %0,5, %1, %2 GO takviyesi içeren kompozit malzemeler ECAS yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- 2- Üretilen kompozitlerin yoğunlukları ise sırasıyla 2,697, 2,691, 2,689, 2,683 g/cm³ olarak hesaplanmıştır.
- 3- Saf alüminyumun sertliği 37 HV, kompozit malzemelerin sertliği ise sırasıyla 45, 60, 50 HV olarak ölçülmüştür.
- 4- Saf alüminyum ve kompozit malzemelerin akma dayanımları 40, 50, 62 ve 54 MPa, çekme dayanımları ise 75, 85, 118 ve 88 MPa bulunmuştur.
- 5- GO takviyesinin miktarı %1'e kadar artırıldığında kompozit malzemelerin sertliklerinde, akma ve çekme dayanımlarında artış görülmüştür. Bunun sebebi ikincil faz partikülleri olarak takviye edilen GO tozları dispersiyon sertleşmesine yol açmasıdır. İkincil faz partikülleri matriste distorsiyonlara yol açarak sertlik ve mukavemeti arttırmıştır.
- 6- En düşük sürtünme katsayısı %1 grafen oksit takviyeli kompozit malzemede elde edilirken en yüksek sürtünme katsayısı saf alüminyumda elde edilmiştir. Sürtünme katsayısında görülen eğilimin benzeri aşınma oranlarında da görülmüştür.
- 7- Alüminyum matrise ağırlıkça %0,5 ve %1 grafen oksit katkısında, grafen oksit partiküllerinin topaklandığı tespit edilmiştir. Bu numunelerin, aşınma izleri incelendiğinde, minimum deformasyonun %1 Al-GO kompozit yapıda olduğu gözlenmiştir.
- 8- Kompozitlerdeki GO konsantrasyonu %2'ye artırıldığında malzemenin sertlik ve mukavemetinde bir düşüş görülmüştür. Konsantrasyonun artmasıyla GO oksitler aglomere olmuştur. GO tozların aglomerasyonu sonucu matris

içerisinde poroziteler ve arayüzeyde zayıf bağlanmalara yol açarak mekanik özelliklerin düşmesine yol açmıştır.

7.2. Öneriler

- 1- Al-Grafen oksit kompozitlerinin arayüzeyleri üzerine yapılacak çalışmalar bu kompozitlerin mekanik özelliklerinin gelişmesine katkıda bulunacaktır.
- 2- Bundan sonra yapılacak çalışmalarda farklı GO takviye oranları kullanılarak mikroyapısal değişimlerine üzerine araştırma literatüre katkıda bulunacaktır.
- 3- Al-GO kompozit malzemeler üzerine yapılacak ileri bile çalışmada Korozyon testi, yorulma testi, üç noktalı eğme gibi testler yapılarak daha kaliteli sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yan, S.J., Yang, C., Research of Graphane Reinforced aluminum matrix nanocomposites, Journal of Malterials Engineering, 1(4),1-4, 2011.
- [2] Khan, I., Saeed, K., Khan, I., Nanoparticles: Properties, applications and toxicities, Arabian Journal of Chemistry, 12(7), 908-931, 2019.
- [3] Aniruddha V. S. Aravindan, I., Singh, P., Nano and hybrid aluminum based metal matrix composites: An overview, Manufacturing Review, 2015.
- [4] Sozhamannan, C., K., Naveenkumar., Machining characteristics of Al/TiCp/Gr hybrid composites, Materials Today: Proceedings, 5(1), 5940-5946, 2018.
- [5] Şenel M. C., Grafen-seramik Tanecik Takviyeli Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Metoduyla Üretimi, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin incelenmesi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, Samsun, 2018.
- [6] Das A., Spark Plasma Sintering of Magnesium Matrix Composites, Bangladesh University of Engineering and Technology, Yüksek Lisans Tezi, Dhaka, Bangladesh, 2009.
- [7] Bedeloğlu, M. T. A., Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri, Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 2016.
- [8] Miles,R.W., Photovoltaic solar cells: Choice of materials and production methods, 1090-1097, 2006.
- [9] Balasubramaniam, S., Investigations on Characterization and Properties of Al-MoO₃ Composites Synthesized Using Powder Metallurgy Technique, Silicon, 2663–2670 , 2017.
- [10] Chairath, T., An evaluation of the production of magnesium base alloy castings by the expendable pattern casting process, Loughborough University Master's thesis, 1997.
- [11] Ateş Hakan, Bahçeci E.,Nano Malzemeler için Üretim Yöntemleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 3(2),483-499, 2015.

- [12] Sharma, A. K., A study of fabrication methods of aluminum based composites focused on stir casting process, *Materials Today: Proceedings*, 1608-1612, 2020.
- [13] Pattnaik, K. S., A review of rapid prototyping integrated investment casting processes, *Sage Journals*, 249-277, 2013.
- [14] Kubilay, M. T., Vakum Filtre Izgara Çıtalarının Plastik Şekil Verme Yoluyla İmalatı, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi 1996.
- [15] Bong, H. J., Correlative Study on Plastic Response and Formability of Ti-6Al-4V Sheets under Hot Forming Conditions, 2020.
- [16] Jianga Y.F., Investigation into the hot forming-quenching integrated process with cold dies for high strength aluminum alloy, *Materials Characterization*, 2019.
- [17] Li, Z. H., Modeling mechanical properties and plastic strain for hot forming-quenching AA6061 aluminum alloy parts, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(3), 66-72, 2020.
- [18] Fan Y. X., Deformation and strengthening analysis of Al-Mg-Si alloy sheet during hot gas forming with synchronous die quenching, *Journal of Manufacturing Processes*, 2020.
- [19] Dedeakayoğulları H., Alaattin K., Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi, Kütahya, 2020.
- [20] Küçük, Ö., Öztürk B., Üniversal Diş Açma Makinesine Invertör Eklentisi Ve Diş Açma, *International Academic Research Congress*, 2018.
- [21] Verma, C. M., A review on fabrication and characteristics of functionally graded aluminum matrix composites fabricated by centrifugal casting method, *SN Applied Sciences*, 3(227) 2020.
- [22] Rahman, S. M., Mechanical Behaviors of Al-Based Metal Composites Fabricated by Stir Casting Technique, *Journal of Engineering Advancements*, 1(4), 144-149, 2020.
- [23] Ormanlı, E., Ultra Yüksek Mukavemetli S960ql Çeliğinin Mag Kaynağında Gaz Kompozisyonu Ve Kaynak Akımının Birleştirme Özelliklerine Etkisi, Sakarya, 2021.

- [24] Bardakçı, Y. S., Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalat Cihazı Tasarımı Ve Prototip İmalatı, Isparta, 2019.
- [25] Giannatsis, J. D. V., Additive Fabrication Technologies Applied to Medicine and Health Care, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 40(1):116-12, 2009.
- [26] Lorenz, A. S., Techniques for Infiltration of a Powder Metal Skeleton by a Similar Alloy with Melting Point Depressed, 2004.
- [27] Cherian, P., Knowledge based and adaptive computational techniques for concurrent design of powder metallurgy parts, Advances in Engineering Software, 433–463, 2001.
- [28] Karagöz, A. Ş., Metalik Toz İşleme Teknolojisi Ve Prosesleme Kademeleri Açısından Parametrik İlişkiler, Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University, 22(3), 2009.
- [29] Smith, L. N., A Knowledge Based System For Powder Metallurgy Technology, Faculty of Engineering, University of the West of England, Bristol , 1997.
- [30] Krsjak, D. Y. , Mechanical properties of tungsten in the transition temperature range, Journal of Nuclear Materials, 81-87, 2014.
- [31] Jiang, J., Development of Direct Powder Forging Process, Imperial College London, 2017.
- [32] Aydın, F., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Farklı Partikül Takviyeli Magnezyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, Karabük, 2018.
- [33] Unal, R., The influence of the pressure formation at the tip of the melt delivery tube on tin powder size and gas/melt ratio in gas atomization method, Journal of Materials Processing Technology, 2006.
- [34] Fujiki, A. Present state and future prospects of powder metallurgy parts for automotive applications, Materials Chemistry and Physics, 298–306, 2007.
- [35] Şimşek, İ., Toz Metalurjisi ile Üretilen Titanyum Alaşımı Biomalzemelerin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Karabük, 2017
- [36] Nazik, C., Alüminyum Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Konya, 2013.

- [37] Rashad, M., Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets, *Progress in Natural Science: Materials International*, 5(25),460–470, 2015.
- [38] Altınışık Z., Alüminyum Oksit Ve Grafen Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretimi Ve Karakterizasyonu, İstanbul, 2019.
- [39] Eroğlu, Ş., Toz-metalurjisi-prof-dr-erfettin-eroglu-istanbul-universitesi-muh-fakmetalurji-ve-malzeme-muh-bol.html.,2018.
- [40] Novák, P. Advanced Powder Metallurgy Technologies. *Materials* **2020**, *13*, 1742. <https://doi.org/10.3390/ma13071742>.
- [41] Gupta, M., Sharon N., Magnesium, magnesium alloys, and magnesium, 127-178, 2011.
- [42] Ayata, A., Toz metal alüminyum malzemelerin mikro dalga enerjisi ile sinterlenebilirliğinin incelenmesi, Ankara, 2014..
- [43] McCarthy, J. Composite Magnetostrictive Materials for High Frequency Applications, Birmingham, 1999 .
- [44] Javanshour, F., Effect of graphene oxide surface treatment on the interfacial adhesion and the tensile performance of flax epoxy composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021.
- [45] Cantwell, W.J., The impact resistance of composite materials, *Composites*, 5(22), 47-362, 1991.
- [46] Mrazova, M., Advanced composite materials of the future in aerospace industry, *Journal of Incas Bulletin*, 3(5), 139 – 150, 2013.
- [47] Isaac I., Daniel, M., *Engineering Mechanics Of Composite Materials*, 2006.
- [48] Suwarta, P., ductility of Unidirectional Thin-Ply Hybrid Compositesi, Bristol, 2020.
- [49] Hartley, W., Crashworthiness Improvements to Automotive Sandwich Composites Using Tufting, 2018.
- [50] www.baykarsavunma.com/iha-14., Erişim Tarihi 23.09.2021

- [51] Bağcı, N., Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi Ve Eşit Kanallı Açısız Preslemenin (Ekap) Malzeme Özelliklerine Etkisi, Mersin, 2019.
- [52] Trepalina,V., Doroganov A., Mechanochemically Activated Phosphate-Containing Refractory Composite Materials, Refractories and Industrial Ceramics 57(1) 2016.
- [53] Ramakrishna, S., Microstructural design of composite materials for crashworthy structural applications, Materials & Design, 3(18), 167-173, 1997.
- [54] M., Pul, Al matrisli MgO takviyeli kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi, Ankara, 2010.
- [55] Abdullah S., The Impact Behaviour of High Performance Fibre Composites, Yüksek lisans Tezi, London, 2018.
- [56] Cihan M., xperimental and Numerical Investigation on the Mechanical and Dynamic Performance of Flax/E-glass Hybrid Composites, Southampton, 2020.
- [57] Callisser, W. D., Materials Science and Engineering an introduction. Sekizinci Basımdan Çeviri, Nobel Yayıncılık, 577-619, 2013.
- [58] Trojan, K., Engineering Materials and Their Applications, 4th Edition, by Richard A. Flinn, Paul K. Trojan, 1056.
- [59] Stankovich S., Dmitriy A., Graphene-based composite materials, Indiana, 2006.
- [60] Erdoğan, M., Çelik takviyeli alüminyum kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Kütahya, 2005.
- [61] Şahin, İ., Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin matkap ile delinmesi konusunda yapılan çalışmaların incelenmesi., Mühendis ve Makina Dergisi,, 2014.
- [62] Laura J. C., Cruz-Silva R, Flash Reduction and Patterning of Graphite Oxide and Its Polymer Composite,2009
- [63] Walpole, L.J., Elastic Behavior of Composite Materials: Theoretical Foundations,Advances in Applied Mechanics, 21, 169-242, 1981.

- [64] Uygur, S. Ilyas, Aluminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, SAU Fen Bilirrleri Enstitüsü Dergisi ,1, 2004.
- [65] Torralba, J.M, P/M aluminum matrix composites: an overview,, Journal of Materials Processing Technology, 203-206, 2003.
- [66] Mazahery, Ali, Investigation on mechanical properties of nano-Al₂O₃-reinforced aluminum matrix composites, Journal of Composite Materials, 2579-2586, 2011.
- [67] Hegab, H. A., Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys: Manufacturing Review, 2016.
- [68] Tian, Y., Graphene-reinforced aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2016.
- [69] Demir M. indüksiyonla sıcak işlemin grafen ve/veya Si₃N₄/B₄C takviyeli Al6061 esaslı kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerine ve mikroyapısına olan etkisi, Samsun,2022
- [70] Bastwros, M., Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sin tering, Compos. Part B Eng., 60, 111–118, 2014.
- [71] Hegab, H. A., Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys: Manufacturing Review, 2016.
- [72] Pradhan, K., et al., (2019). Neuro-Regenerative Choline-Functionalized Injectable Graphene Oxide Hydrogel Repairs Focal Brain Injury, ACS Chem Neurosci, 10(3): p. 1535-1543.
- [73] Yu, H., et al., (2016). High-efficient Synthesis of Graphene Oxide Based on Improved Hummers Method, Sci Rep, 6: p. 36143
- [74] William S. Hummers Jr. and Richard E. Offeman, (1958). Preparation of Graphitic Oxide, J. Am. Chem. Soc. 80, 6, 1339.
- [75] Feicht, P., et al., (2019). Brodie's or Hummers' Method: Oxidation Conditions Determine the Structure of Graphene Oxide, Chemistry, 25(38): p. 8955-8959.
- [76] Gong, J.P., et al., (2003). Double-Network Hydrogels with Extremely High Mechanical Strength, Advanced Materials, 15(14): p. 1155-1158.

- [77] Yan, N. Z., Introducing graphene (reduced graphene oxide) into Al matrix composites for enhanced high-temperature strength, *Composites Part B: Engineering*, 2020.
- [78] Rashad M., Effect of Graphene Nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method, *Progress in Natural Science: Materials International*, Volume 24, Issue 2, 2014,
- [79] Uysal, M., tribological properties of Ni–W–TiO₂–GO composites produced by ultrasonically–assisted pulse electro co–deposition, *Surface and Coatings Technology*, 2021.
- [80] Duru, E., Optimization of Ni-B coating bath and effect of DMAB concentration on hardness and wear, *Surfaces and Interfaces*, 2021.
- [81] Min, Li., Formation of multilayer interfaces and the load transfer in graphene nanoplatelets reinforced Al matrix composites, *Materials Characterization*, 2020.
- [82] Yifan, H., Improved mechanical property of nanolaminated graphene (reduced graphene oxide)/Al–Mg–Si composite rendered by facilitated ageing process, *Materials Science and Engineering A*, 2020.
- [83] F. Javanshour, K. Ramakrishnan, R. K. Layek, P. Laurikainen, A. Prapavesis, M. Kanerva, P. Kallio, A. W. Van Vuure, and E. Sarlin, “Effect of graphene oxide surface treatment on the interfacial adhesion and the tensile performance of flax epoxy composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 142, p. 106270, Mar. 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kasım Safa YAKACAK

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2017
Lise	Köyceğiz Naip Hüseyin Lisesi	2012

YABANCI DİL

İngilizce C1

Almanca A2

Fransızca A2

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Investigation On Tribological and Mechanical Properties Of Aluminum-Graphene Oxide Composites Produced By Electric Current Assisted Sintering Method