KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Al-4Cu-5SiC-xGr KOMPOZİT MALZEMESİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SİNTERLEME SICAKLIĞININ VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN ETKİLERİ

EMRE CEM SUMMAK

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Al-4Cu-5SiC-xGr KOMPOZİT MALZEMESİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SİNTERLEME SICAKLIĞININ VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN ETKİLERİ

EMRE CEM SUMMAK

Prof. Dr. Adalet ZEREN		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. Ahmet ÜNAL		
Jüri Üyesi,	**Yıldız Teknik Üniversitesi**	.....
Doç. Dr. Aziz Armağan ARICI		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 02.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gelişen teknoloji ve artan üretim miktarları ile birlikte otomotiv, uzay, havacılık endüstrilerinin ve makine üreticilerinin üretim maliyetlerinin azaltılması, verimliliğin arttırılması, ağırlığın azaltılması gibi istekleri yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesine neden olmaktadır. Aluminyum yüksek mekanik özellikleri, korozyon direnci, düşük maliyetli olması ve düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen ve takviye malzemeleri ile güçlendirilen aluminyum matrisli kompozit malzemeler, otomobil pistonlarında, yataklarda ve silindir gömlekleri gibi sürtünerek çalışan yapısal parçalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-4Cu-5SiC bileşimine grafit takviye miktarının, sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işlemin malzemenin özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçların bu konuda çalışan araştırmacılara ve kuruluşlara yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

Yaptığım çalışmalarda her zaman destek olan, yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen ve bu tez çalışmasında büyük emeği olan değerli hocam Prof. Dr. Adalet ZEREN'e teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım sırasında bilgi ve tecrübeleri ile her zaman destek olan değerli hocalarım Prof. Dr. Muzaffer ZEREN'e ve Doç. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Tez kapsamında yaptığım çalışmalarda laboratuvarlarda teknik anlamda bana destek olan değerli hocalarım Arş. Gör. Erhan BALCI'ya, Arş. Gör. Beysim ÇETİN'e, Arş. Gör. Funda Gül KOÇ'a, Öğr. Gör. Serap GÜMÜŞ'e ve değerli arkadaşlarım Erdinç EFENDİ'ye, Onur MURATAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca her zaman yanımda olan, büyütüp bugünlere getiren, eğitim hayatım boyunca beni destekleyip cesaretlendiren aileme en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran - 2019 Emre Cem SUMMAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. KOMPOZİT MALZEMELER 2
1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi 2
1.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri 4
1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 6
1.3.1. Takviye çeşitlerine göre kompozit malzemeler 6
1.3.1.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler 6
1.3.1.2. Tabakalı kompozit malzemeler 8
1.3.1.3. Partikül takviyeli kompozit malzemeler 9
1.3.2. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler 10
1.3.2.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler 10
1.3.2.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler 12
1.3.2.3. Metal matrisli kompozit malzemeler 14
2. TOZ METALURJİSİ 16
2.1. Toz Metalurjisi Yöntemi 16
2.2. Toz Metalurjisi Tarihçesi 17
2.3. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları 19
2.4. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları 20
2.5. Toz Üretim Yöntemleri 22
2.5.1. Mekanik üretim yöntemleri 23
2.5.2. Kimyasal üretim yöntemleri 26
2.5.3. Elektrolizle üretim 27
2.5.4. Atomizasyon yöntemiyle üretim 28
2.5.4.1. Gaz atomizasyon yöntemi 29
2.5.4.2. Su atomizasyon yöntemi 30
2.5.4.3. Savurmalı atomizasyon yöntemi 31
2.5.4.4. Döner elektrot atomizasyon yöntemi 32
2.5.4.5. Vakum atomizasyon yöntemi 33
2.6. Mekanik Alaşımlama 35
2.6.1. Mekanik alaşımlama mekanizması 35
2.6.2. Mekanik alaşımlama ekipmanları 38
2.7. Tozların Şekillendirilmesi 40
2.7.1. Kalıpta presleme 40
2.7.2. İzostatik presleme 41
2.7.3. Ekstrüzyon ile presleme 43
2.7.4. Sıcak presleme 44

2.7.5. Spark plazma sinterleme 45
2.8. Sinterleme 47
2.8.1. Katı faz sinterlemesi 49
2.8.2. Sıvı faz sinterleme 50
3. AŞINMA 53
3.1. Triboloji 54
3.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler 56
3.3. Aşınma Mekanizmaları 57
3.3.1. Abrazif aşınma 58
3.3.2. Adhezif aşınma 61
3.3.3. Yorulma aşınması 63
3.3.4. Erozif aşınma 65
3.3.5. Korozif aşınma 66
4. MALZEME VE YÖNTEM 68
4.1. Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi 68
4.2. Kullanılan Tozların Özellikleri 72
4.3. Toz Bileşiminin Hazırlanması 73
4.4. Mekanik Alaşımlama 74
4.5. Tozların Sıcak Pres ile Sinterlenmesi 75
4.6. Toz Ağırlığı ve Numune Yoğunluğunun Belirlenmesi 78
4.7. Numunelere Uygulanan Isıl İşlemler 78
4.8. Numunelerin Metalografik İncelemelere Hazırlanması 80
4.9. Mekanik Testler 80
4.9.1. Sertlik ölçümü 80
4.9.2. Aşınma testi 81
4.10. Numunelerin Mikroyapısal Karakterizasyon 82
4.10.1. Optik mikroskop ile karakterizasyon 82
4.10.2. SEM ve EDX ile karakterizasyon 83
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 84
5.1. Yoğunluk Sonuçları 84
5.2. Sertlik Sonuçları 85
5.3. Optik Mikroskop ile Numunelerin İncelenmesi 89
5.4. Aşınma Sonuçları 94
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 108
KAYNAKLAR 110
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 119
ÖZGEÇMİŞ 120

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi 3
Şekil 1.2. Uçak parçalarında kullanılan kompozit malzemeler 4
Şekil 1.3. Kompozit malzemelerde kullanılan takviye çeşitleri..... 6
Şekil 1.4. Fiber takviyelerinin matriste yerleşim şekilleri 7
Şekil 1.5. Fiber takviyeli kompozitler kullanılarak üretilen ürünler a) fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilen otomobil gövdesi b) fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilen tenis raketi..... 8
Şekil 1.6. Tabakalı kompozit malzemelerin bir araya getirilmesi 9
Şekil 1.7. Polimer matrisli kompozit malzemelerle üretilen a) uçak pencere çerçeveleri, braketler, bağlantı parçaları klipsler, b) termoplastik esaslı kamyon tamponu c) cam fiber takviyeli polimer otomobil jantı, d) sürat teknesi gövdesi 12
Şekil 1.8. Seramik matrisli kompozit malzemelerin uygulamaları a) seramik fren diski, b) jet motoru dış kapak parçası 13
Şekil 1.9. Metal matrisli kompozit malzemelerin otomobilde kullanıldığı bazı parçalar a) piston, b) karter parçası, c) fren diski..... 15
Şekil 2.1. Toz metalürjisi yönteminin akış şeması..... 17
Şekil 2.2. Toz metalürjisi yönteminin otomobillerde kullanımı 21
Şekil 2.3. Toz metalurjisi ile üretilen a) tork konvertör gövdesi, b) değişken valf zamanlayıcısı rotor adaptörü, c) aluminyum kam mili yatak kafası, d) helisel dişli 21
Şekil 2.4. Toz üretiminde karşılaşılan toz şekilleri..... 23
Şekil 2.5. Toz üretiminde kullanılan kırıcılar a) çeneli kırıcı, b) çekiçli kırıcı 24
Şekil 2.6. Öğütme işlemi a) silindirik değirmende öğütme işlemi, b) atritör kullanarak öğütme..... 25
Şekil 2.7. Elektrolitik hücresi ve metal tozu üretimi..... 27
Şekil 2.8. Gaz atomizasyonu ile sıvı malzemeden damlacık oluşum aşamaları 29
Şekil 2.9. Su atomizasyon ünitesi 31
Şekil 2.10. Savurmalı atomizasyon yönteminin farklı uygulamaları a) döner disk, b) döner çukur kap, c) döner silindir..... 32
Şekil 2.11. a) Döner elektrot atomizasyon işlemi, b) damlacık davranışı 33
Şekil 2.12. Vakum atomizasyon ünitesi..... 34
Şekil 2.13. Mekanik alaşımlama işleminde bilyelerle tozların çarpışması 36
Şekil 2.14. Mekanik alaşımlamanın aşamaları a) başlangıç aşaması, b) orta aşama, c) son aşama..... 37
Şekil 2.15. Toz boyutuna etki eden bazı faktörler 38
Şekil 2.16. a) SPEX tipi öğütücü, b) Tungsten karbür değirmen..... 39
Şekil 2.17. Atritörde yapılan mekanik alaşımlama işlemi ve mikro yapıdaki değişim..... 39
Şekil 2.18. Çift yönlü preslenmede tozların preslenmesi aşamaları 41
Şekil 2.19. Soğuk izostatik presleme ünitesi..... 42

Şekil 2.20. Ekstrüzyon yöntemi ile toz şekillendirme 43
Şekil 2.21. Sıcak preslemenin şematik çizimi..... 44
Şekil 2.22. Spark plazma sinterleme yöntemi şematik çizimi 45
Şekil 2.23. Kalıp içerisinden geçirilen elektrik akımı..... 47
Şekil 2.24. Sinterleme çeşitlerinin faz diyagramında gösterimi 48
Şekil 2.25. Katı faz sinterleme işlemi aşamaları 49
Şekil 2.26. Sinterleme aşamalarının yoğunluğa olan etkisi 50
Şekil 2.27. Sıvı faz sinterleme aşamaları 51
Şekil 3.1. Hareket halindeki iki yüzeyin teması ile gerçekleşen tribolojik süreç 54
Şekil 3.2. Tribolojik sistemin şematik gösterimi 55
Şekil 3.3. Aşınmanın zaman ile değişimi..... 57
Şekil 3.4. Aşınma mekanizmaları 58
Şekil 3.5. Abrazif aşınma tipleri 59
Şekil 3.6. Abrazif aşınma mekanizmaları 60
Şekil 3.7. Abrazif aşınmış parça 61
Şekil 3.8. Adhezif aşınma oluşumu 62
Şekil 3.9. Adhezif aşınmaya uğramış parça 63
Şekil 3.10. Yüzeyde yorulma sonucu çatlak oluşumu ve yorulma aşınması 64
Şekil 3.11. Delaminasyon aşınması 65
Şekil 3.12. Erozif aşınmanın oluşumu 65
Şekil 3.13. Türbinde meydana gelen erozif aşınma a) türbin dışında, b) türbin içinde 66
Şekil 3.14. Korozif aşınma mekanizması..... 67
Şekil 4.1. Al-Cu denge diyagramı..... 69
Şekil 4.2. Al-Cu denge diyagramında %4 Cu içeren bileşim için seçilen sinterleme sıcaklıkları a) 600°C, b) 560°C, c) 520°C..... 71
Şekil 4.3. Al-4Cu bileşimi için yaşlandırma süresi ve sıcaklığıyla akma mukavemetinin değişimi..... 72
Şekil 4.4. Saf a) Al, b) Cu, c) SiC, d) Gr tozlarının SEM görüntüleri 73
Şekil 4.5. Mekanik alaşımlama işleminde kullanılmış olan a) Ni bilyeler, b) Polipropilen karıştırma kabı 74
Şekil 4.6. MSE-TEC marka bilyeli değirmen 75
Şekil 4.7. a) Sinterleme işleminde kullanılan grafit kalıp, zımbalar ve grafit kağıtlar, b) sinterlenme işlemine hazır durumda olan kalıp 76
Şekil 4.8. DIEX marka sıcak pres cihazı 76
Şekil 4.9. Sinterleme işleminde kullanılan sinterleme-zaman grafiği a) 520°C, b) 560°C, c) 600°C 77
Şekil 4.10. AND marka hassas terazi..... 78
Şekil 4.11. Isıl işlemlerde kullanılan Linn marka yüksek sıcaklık ergitme fırını 79
Şekil 4.12. Metkon marka zımparalama-partlatma cihazı 80
Şekil 4.13. Wolpert marka Brinell sertlik cihazı..... 81
Şekil 4.14. NANOVEA marka tribometre aşınma cihazı 81
Şekil 4.15. a) Aşınma testinin uygulanışı, b) aşınma testi uygulanmış numune..... 82
Şekil 4.16. Olympus marka optik mikroskop 83
Şekil 4.17. JEOL taramalı elektron mikroskobu..... 83

Şekil 5.1. Farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilen yoğunluk değerleri a) Al-4Cu-5SiC bileşimi, b) Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimi, c) Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimi 84
Şekil 5.2. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin a) Al-4Cu-5SiC bileşiminin, b) Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşiminin, c) Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşiminin sertliğine olan etkisi 86
Şekil 5.3. Sinterleme sıcaklığının ve Gr takviye miktarının a) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış, b) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerlerine etkisi 88
Şekil 5.4. Al-4Cu-SiC bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 20x büyütmede optik mikroskop görüntüleri 90
Şekil 5.5. Al-4Cu-SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 20x büyütmede optik mikroskop görüntüleri 91
Şekil 5.6. Al-4Cu-SiC-1Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 20x büyütmede optik mikroskop görüntüleri 92
Şekil 5.7. Al-4Cu-SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri 93
Şekil 5.8. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC bileşiminin aşınma oranına etkisi 95
Şekil 5.9. Al-4Cu-SiC bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri 96
Şekil 5.10. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşiminin aşınma oranına etkisi 97

Şekil 5.11. Al-4Cu-SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri 98
Şekil 5.12. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşiminin aşınma oranına etkisi 99
Şekil 5.13. Al-4Cu-SiC-1Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri 100
Şekil 5.14. 600°C'de sinterlenen numunelerin aşınma oranına grafit takviye miktarının ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisi 101
Şekil 5.15. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC bileşimine sahip a) yaşlandırılmamış numunenin, b) yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri 103
Şekil 5.16. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) yaşlandırılmamış numunenin, b) yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri 103
Şekil 5.17. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimine sahip a) yaşlandırılmamış numunenin, b) yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri 104
Şekil 5.18. 560°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimine sahip yaşlandırılmış numunenin SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX analizleri 105
Şekil 5.19. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimine sahip yaşlandırılmamış numunenin SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX analizleri 106

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Makine parçalarında meydana gelen aşınmanın aşınma türüne göre dağılımı 58
Tablo 4.1. Tez çalışmada kullanılan toz bileşimleri 74
Tablo 4.2. Numunelerin sinterleme sıcaklıkları 77
Tablo 4.3. Numunelere uygulanan ısıl işlemler 79
Tablo 4.4. Aşınma testinde kullanılan aşınma parametreleri 82
Tablo 5.1. Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları 85
Tablo 5.2. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerde meydana gelen sertlik değişim oranları 87
Tablo 5.3. Numunelerin aşınma oranı değerleri 94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

cm	: Santimetre
g	: Gram
HB	: Brinell ölçeğinde sertlik
kg	: Kilogram
m	: Metre
mbar	: Milibar
mm	: Milimetre
Mpa	: Megapascal
N	: Newton
nm	: Nanometre
r	: Yarıçap
rpm	: Revolution Per Minute (Dakikadaki devir sayısı)
µm	: Mikrometre
°	: Derece
°C	: Santigrat derece

Kısaltmalar

Al	: Aluminyum
Al_2O_3	: Aluminyum Oksit
B_4C	: Bor Karbür
CO	: Karbonmonoksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
$CuSO_4$	: Bakır Sülfat
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
EDX	: Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
Fe	: Demir
Gr	: Grafit
H_2SO_4	: Sülfürik Asit
INCO	: International Nickel Company
Mg	: Magnezyum
M.Ö	: Milattan Önce
M.S	: Milattan Sonra
Ni	: Nikel
NVH	: Noise, Vibration, Harshness (Gürültü, Titreşim, Sertlik)
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
Si_3N_4	: Silisyum Nitrür

Sn	: Kalay
Ti	: Titanyum
vb	: Ve Benzeri
Zn	: Çinko

TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN Al-4Cu-5SiC-xGr KOMPOZİT MALZEMESİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE SİNTERLEME SICAKLIĞININ VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİNİN ETKİLERİ

ÖZET

Aluminyum hafifliği, korozyon direnci, yüksek mekanik özellikleri ve düşük maliyetli olması nedeniyle metal matrisli kompozit malzemelerde ana matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilebilen aluminyum matrisli kompozit malzemeler, otomobil pistonlarında, yataklarda ve silindir gömlekleri gibi yapısal parçalarda kullanılmaktadır. Sürtünme kuvvetlerinden dolayı bu parçalarda zamanla aşınmalar meydana gelmektedir. Aşınmanın azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için aluminyum matrise çeşitli takviye elemanları eklenmektedir. Aluminyumun aşınmasının azaltılması ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle elementel tozlar kullanılarak Al-4Cu-5SiC bileşimi hazırlanmış, ardından ağırlıkça %0, 0,5, 1 Gr tozları ilave edilerek mekanik alaşımlama işlemi uygulanmıştır. Mekanik alaşımlama işleminden sonra elde edilen toz karışımlarına vakum atmosferi altında sıcak pres cihazı ile üç farklı sinterleme sıcaklığında (520°C, 560°C, 600°C) sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterlenen numunelerin dayanımının arttırılması için ergitme fırınında yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Sinterleme sıcaklığının, grafit takviye miktarının ve yaşlandırma ısıl işlemin numunelerin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin belirlenmesi için numunelere yoğunluk testi, sertlik testi ve aşınma testi uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda yüksek sıcaklıkta sinterleme işleminin, yaşlandırma ısıl işleminin ve grafit takviyesinin aluminyumun aşınma davranışını ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Aluminyum, Aşınma, Kompozit Malzeme, Toz Metalurjisi, Yaşlandırma.

EFFECTS OF THE SINTERING TEMPERATURE AND AGING HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AL-4Cu-5SiC-xGr COMPOSITE MATERIAL PRODUCED BY POWDER METALLURGY

ABSTRACT

Aluminum is used as the matrix material in metal matrix composite due to its lightweight, corrosion resistance, high mechanical properties, and low cost. Aluminum matrix composite materials which can be produced by powder metallurgy method are used in structural parts such as automobile pistons, bearings and cylinder liners. These parts wear out over time, due to the frictional forces. Various reinforcement components are added to the aluminum matrix to reduce wear and improve mechanical properties. Various experimental studies have been conducted in order to reduce wear and improve the mechanical properties of aluminum. For this purpose, Al-4Cu-5SiC compound was prepared by using elemental powders, and then 0, 0,5, 1% by weight of Gr powders were added and mechanical alloying process was applied. After mechanical alloying process, obtained powder mixtures were sintered at three different sintering temperature (520°C, 560°C, 600°C) with using hot press device under vacuum atmosphere. Aging was applied in the melting furnace to improve the resistance of the sintered samples. The density test, hardness test and wear test were applied to the samples in order to determine effects of sintering temperature, amount of graphite reinforcement and aging heat treatment on the mechanical properties of samples. As a result of these studies, it was seen that the sintering process at high temperature, aging heat treatment, and graphite reinforcement improve wear behavior and mechanical properties of aluminum.

Keywords: Aluminum, Wear, Composite Material, Powder Metallurgy, Aging.

GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve artan üretim miktarları ile birlikte otomotiv, uzay, havacılık endüstrilerinin ve makine üreticilerinin üretim maliyetlerinin azaltılması, verimliliğin arttırılması, ağırlığın azaltılması gibi istekleri yeni malzemelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Kompozit malzemelerin tarihi M.Ö 1500'lere dayansa da bu isteklere bağlı olarak son 100 yıldır oldukça hızlı gelişmiştir. Üretim maliyetlerini ve verimliliği etkileyen faktörlerden birisi olan aşınmanın azaltılması ve önlenmesi için çeşitli araştırmalar yapılmış olup, kompozit malzemelerin gelişimiyle birlikte aşınmaya karşı dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi sağlanmaktadır [1, 2].

Aluminyum yüksek mekanik özellikleri, korozyon direnci, düşük maliyetli olması ve düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak tercih edilmektedir. Aluminyum matrisli kompozitlerin sertlik ve aşınma gibi mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için çeşitli takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Aluminyumun özelliklerinin geliştirilmesi için Cu, SiC ve Gr takviye malzemeleri tercih edilmektedir. Bakır takviyesi ile yaşlandırılabilirlik özelliği kazanan aluminyum kompozit malzemede hasar toleransları arttırılarak daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmektedir. SiC takviyesi ile sertlikte artış ve aşınma miktarında azalma sağlanırken, Gr takviyesi ile aluminyuma kendinden yağlayıcı özelliği kazandırılarak aşınma miktarında azalma sağlanmaktadır. Takviye malzemeleri ile güçlendirilen aluminyum matrisli kompozit malzemeler, uçak gövdesinin yapısal parçalarında, otomobil pistonlarında, yataklarda ve silindir gömlekleri gibi sürtünerek çalışan parçalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerde takviye malzemelerinin matris içerisinde dağılımına ve mikroyapısına göre mekanik özellikler değişmektedir. Kompozit malzemelerin üretiminde, homojen yapıya sahip parçaların üretilebilmesi, fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin kontrol edilebilmesi, düşük üretim maliyetleri ve nihai boyuta yakın parça üretimi gibi avantajlarından dolayı toz metalürjisi yöntemi tercih edilmektedir.

1. KOMPOZİT MALZEMELER

Havacılık ve otomobil gibi endüstrilerin daha gelişmiş malzemelere olan ihtiyacının karşılanması için yeni malzemelerin geliştirilmesi araştırmaları yapılmaktadır. Kompozit malzemeler, birbirinden farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklere sahip malzemeler üretmek amacıyla tek bir malzeme içerisinde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Kompozit malzemeleri oluşturan malzemelerin kimyasal özellikleri genellikle birbirinden farklı olmaktadır [1].

Sistemlerin maliyetlerin düşürülmesi, verimliliğinin arttırılması ve daha yüksek verimlilik için sistem ağırlığının azaltılması isteği yeni kompozit malzemelerin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Endüstrinin ihtiyaçları olan ağırlık azaltma, maliyet azaltma, fiziksel ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi gibi ihtiyaçlardan dolayı araştırmacılar kompozit malzemeler hakkında çalışmalar yapmaktadırlar [1].

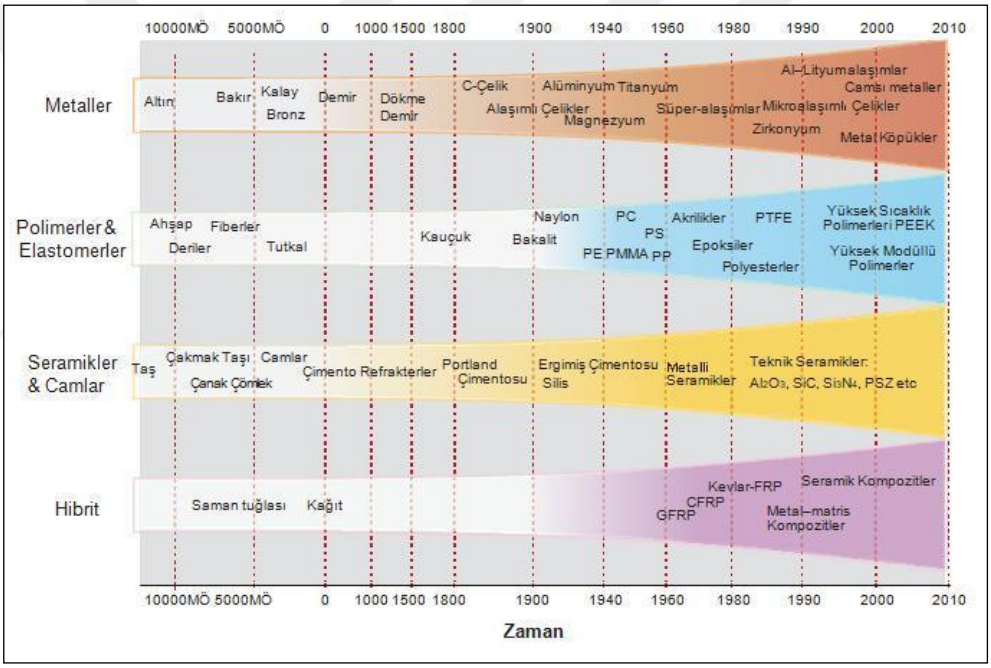
Genel olarak kompozit malzemeler, bir matris malzemesi ve matris içine yerleştirilmiş takviye malzemelerinden oluşmaktadır. Takviye malzemeler, kompozit malzemenin genel mekanik özelliklerini geliştirirken, matris malzemesi ise takviye malzemelerini kompozit içerisinde istenilen şekilde bir arada tutulmasını sağlar. Kompozit malzemeler, uygun bir şekilde tasarlanıp üretildiğinde, içerisindeki her bir malzemenin sahip olduğu mekanik özelliklerden daha iyi bir mekanik özellikler gösterirler. Kompozit malzemeler ana matrisin genel özelliklerine sahip olsalar da takviye malzemelerinin etkisiyle ana matristen daha üstün özelliklere sahiptirler [2].

1.1. Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Kompozit malzemelerin tarihte ilk kullanımı M.Ö. 1500'lere kadar dayanmaktadır. Mısırlı ve Mezopotamyalı yerliler, güçlü ve dayanıklı binalar inşa etmek için kompozit haline getirilmiş çamur ve saman karışımı kullanmışlardır [2]. Romalılar ise dayanıklı binalar inşa etmek için tuğla parçaları, taşlar, kum, volkanik kül ve kireçtaşı içeren bir çeşit betonu üreterek kompozit malzemelerin temellerini

oluşturmuşlardır. M.Ö. 1500'lü yıllarda insanlar porselen yemek takımı üretmişler ve porseleni oluşturmak için çeşitli mineralleri su ile karıştırarak yapıştırıcı özelliği olan kompozit bir porselen malzeme üretmişlerdir [3].

M.S. 1200'lü yıllarda Moğollar, ilk kompozit malzemeden yapılan yayı icat etmişlerdir. Moğollar, tahta, kemik gibi malzemeleri hayvani kaynaklı yapıştırıcı kullanılarak birleştirmişler, elde edilen yayı huş ağacı kabuğu ile kaplayarak son derece güçlü ve hassas yayların üretimini gerçekleştirmişlerdir [2]. M.S. 1700'lü yılların sonlarına doğru ise takma diş üretimi için seramik kompozit malzemeler tercih edilmiştir [3]. Şekil 1.1'de kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi görülmektedir.

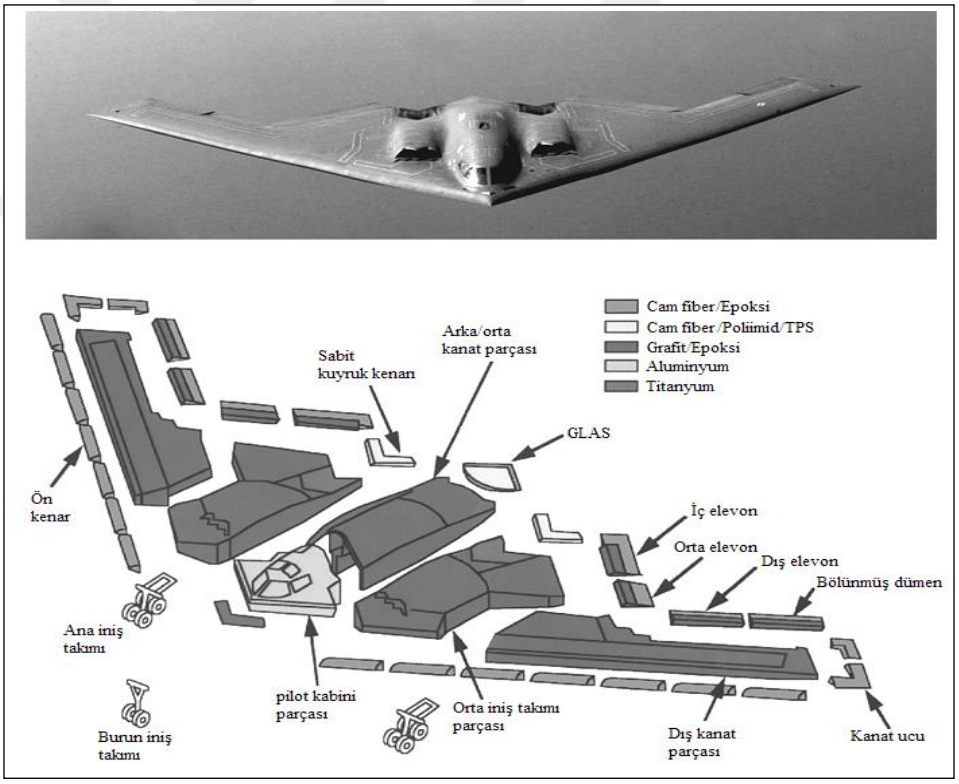


Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi [4]

Modern anlamda kompozit malzemelerin üretimi ise, plastik malzemelerin geliştirilmesi ile başlamaktadır. 1900'lerin başında, vinil, polistiren, fenol ve polyester gibi plastikler geliştirilmiştir. Bu zamana kadar yapıştırıcı ve bağlayıcı olarak bitkilerden ve hayvanlardan elde edilen doğal reçineler kullanılırken, artık sentetik malzemeler kullanılır hale gelmiştir. Plastik malzemeler tek başlarına kullanıldıklarında yapısal uygulamalar için gerekli olan sağlamlığı gösterememişlerdir. Plastik malzemelerin güçlerini ve sağlamlıklarını arttırılması için farklı malzemeler tarafından takviye edilme ihtiyacı doğmuştur. 1935 yılında

piyasaya sürülen cam elyafı, polimerler ile birleştirilerek hafif ve oldukça güçlü bir kompozit yapı oluşturulmuştur [2]. 1900'lü yıllarda mühendislik malzemelerinin toz haline getirilebilmesi, partikül takviyeli komopozit malzemelerin gelişimini hızlandırmıştır. Partikül takviyeli kompozitler, yataklarda, lamba filamanlarında ve aşındırıcı parçaların üretiminde kullanılmaya başlanmıştır [3].

Kompozit malzemelerin tarihi eski zamanlara dayansa da, son 100 yıldır oldukça hızlı bir şekilde gelişmiştir. Sonsuz sayıda farklı malzemenin üretimini sağlayan kompozit malzemeler, güçlü, sert, korozyona, yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya dayanıklı parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir. Kompozit malzemeler, motor parçalarında, biyomedikal parçalarda, metal kesici takımlarda, optik cihazlarda, elektronik cihazlarda sıklıkla tercih edilen bir malzeme grubu haline gelmiştir [3]. Şekil 1.2'de uçak parçalarında kullanılan kompozit malzemeler gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Uçak parçalarında kullanılan kompozit malzemeler [5]

1.2. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemelerin, kendisini oluşturan bileşenler en iyi özelliklerini alarak üstün özellikler sergilemesi amaçlanır. Kompozit malzemelerden istenen özelliklerin

sağlanabilmesi ve geliştirilebilmesi için kompozit malzeme tasarımının iyi olması gerekmektedir [6].

Kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerine etki eden en önemli etken, kompozit malzemenin kullanılacağı yere uygun matris ve takviye malzemesinin kullanımı ve bu bileşenlerin birbirleriyle olan uyumudur. Malzemeye etki eden kuvvetler matris malzemesine etki etse de, kuvvetler matris malzemesi tarafından takviye malzemesine aktarılır. Kuvvet aktarımının gerçekleştirilmesi için takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki güçlü bağlara sahip ara yüzey bağlarının olması gerekmektedir. Ara yüzey bağlarının güçlü olması, kullanılan malzemelerin uyumuna ve matrisin takviye malzemesini ıslatabilmesine bağlıdır. Güçlü ara yüzey bağları kompozit malzemeyi rijit hale getirirken aynı zamanda daha kırılgan hale getirir. Ara yüzey bağları, yorulma özelliklerini, sıcaklık ve nem şartlarına karşı direncini etkilemektedir. Kompozit içerisinde homojen dağılmış takviye malzemesinin varlığı kompozit malzemenin özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir [7].

Kompozit malzemelerin üretilmesi ile malzemelerin geliştirilen özellikleri aşağıda verilmektedir.

- Dayanım
- Sıcaklıkla değişen davranışlar
- Aşınma direnci
- Sertlik
- Ağırlık
- Korozyon direnci
- Yorulma ömrü
- Isıl iletkenlik
- Ses geçirgenliği

Geliştirilmek istenen bu özelliklerin tümü doğal olarak aynı anda gerçekleştirilemez. Kompozit malzemeler kullanılacağı sistemde istenen özelliklere göre tasarımı yapılması gerekmektedir [6, 7].

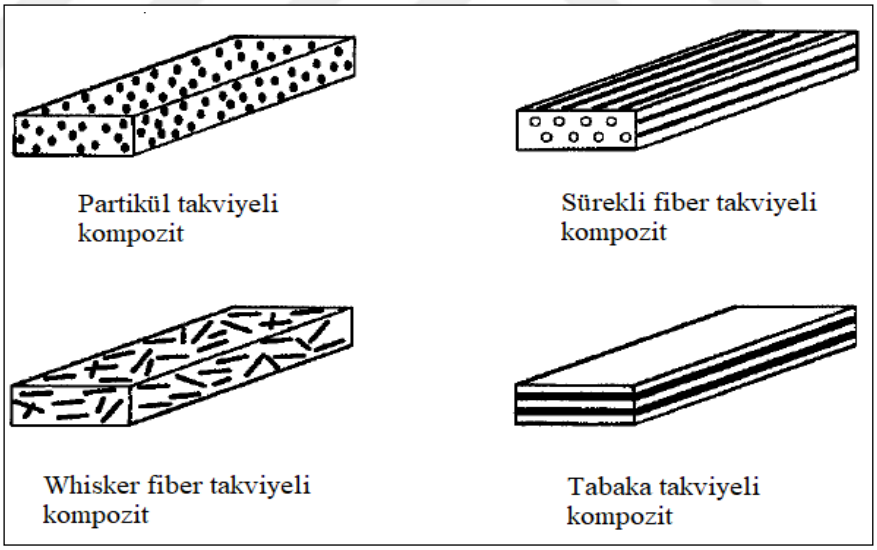
Çeşitli avantajlara sahip olan kompozit malzemeler, avantajlarının yanında bazı dezavantajlara sahiptir. Yüksek üretim maliyetleri, kullanılan malzemelerin geri dönüşümünün zorluğu, üretim zorlukları, kırılma uzamasının az olması gibi dezavantajlar kompozit malzemelerin kullanımını sınırlamaktadır [7].

1.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler takviye çeşitlerine ve matris malzemesine göre iki farklı şekilde sınıflandırılmaktadır.

1.3.1. Takviye çeşitlerine göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemeleri, kompozitten istenen özelliklere bağlı olarak farklı boyu ve şekillerde kullanılmaktadır. Takviye elemanları, fiber, tabaka ve partikül şeklinde olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmaktadır. Şekil 1.3'te kompozit malzemelerde kullanılan takviye çeşitleri görülmektedir.



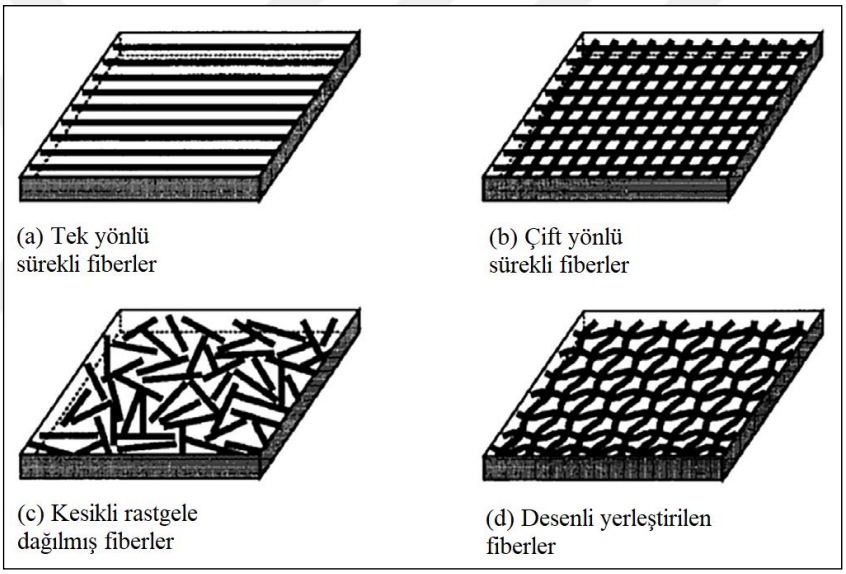
Şekil 1.3. Kompozit malzemelerde kullanılan takviye çeşitleri [8]

1.3.1.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemete ve elastik modülüne sahip fiberlerin, matris malzemesi içerisine gömülerek matris malzemesiyle ara yüzeylerde bağlanmasıyla oluşturulan kompozit malzeme çeşididir. Üretilen kompozitteki fiberler ve matris malzemesi, fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyarak daha üstün

özelliklerdeki malzemeyi oluştururlar. Fiberler matriste yük taşıma elemanı olarak kullanılmaktadır. Matris ise fiberleri bir arada tutarak gelen kuvvetleri fiberlere iletir. Ayrıca matris, fiberleri yüksek sıcaklık ve nemden oluşan çevresel zararlardan koruyucu özelliği bulunmaktadır [9].

Kompozit malzemelerde kullanılan fiber takviyeleri, sürekli uzunlukta, kesikli kısa uzunluklarda ve belirlenen fiber deseni olarak kullanılabilmektedir. Şekil 1.4'te fiber takviyelerinin kompozit malzemede uygulanış türleri görülmektedir. Fiber takviyeleri boyutları ve malzemeleri uygulamada istenen özelliklere göre değişmektedir. Fiber takviyeler cam, karbon, polimer, bor, silisyum karbür, aluminyum oksit ve metalik malzemelerde üretilebilmektedir [9].

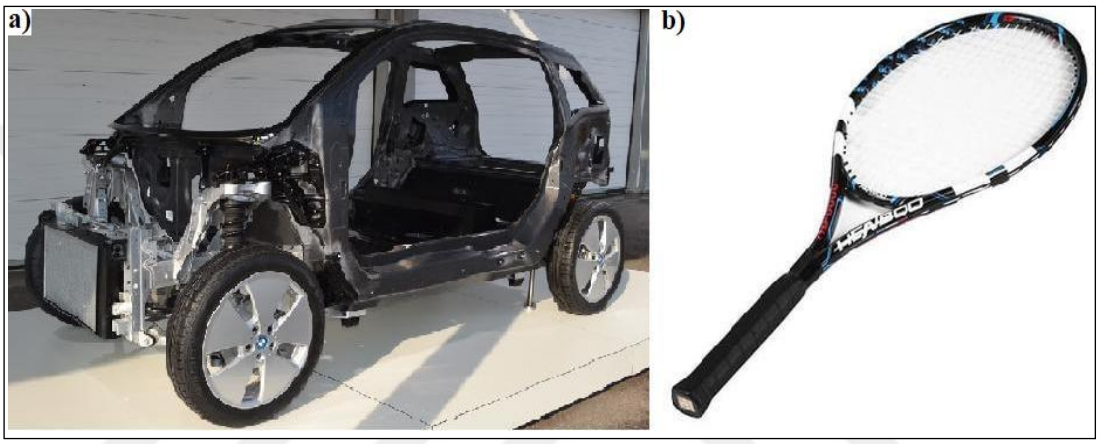


Şekil 1.4. Fiber takviyelerinin matriste yerleşim şekilleri [10]

Çelik ve aluminyum alaşımları gibi geleneksel metaller, tüm doğrultularında yönden bağımsız olarak aynı veya oldukça yakın özellikler gösterdikleri için izotropik malzemeler olarak adlandırılırlar. Fakat fiber takviyeli kompozitlerin özellikleri genellikle kuvvetin etki ettiği doğrultuya bağlı olarak değişmektedir ve fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropik malzemelerdir. Tek yönde sürekli fiberlerde gerilme dayanımı fiberin yerleştirildiği doğrultuda maksimum değer görülürken, fiber yönüne dik kuvvetlerde dayanımın azaldığı görülür. Fiber yönleriyle birlikte fiberlerin sayısı ve boyutlarıyla da bu özelliklerde değişimler görülmektedir. Aynı şekilde darbe dayanımı, ısıl genleşme katsayısı ve ısıl iletkenlik gibi mekanik ve ısıl özellikler de açısal bağımlılığa sahiptir. Çok yönde

yönlendirilmiş fiber takviyelerinin kullanımı, kompozitin daha dengeli bir mekanik özellikler göstermesini sağlar [9].

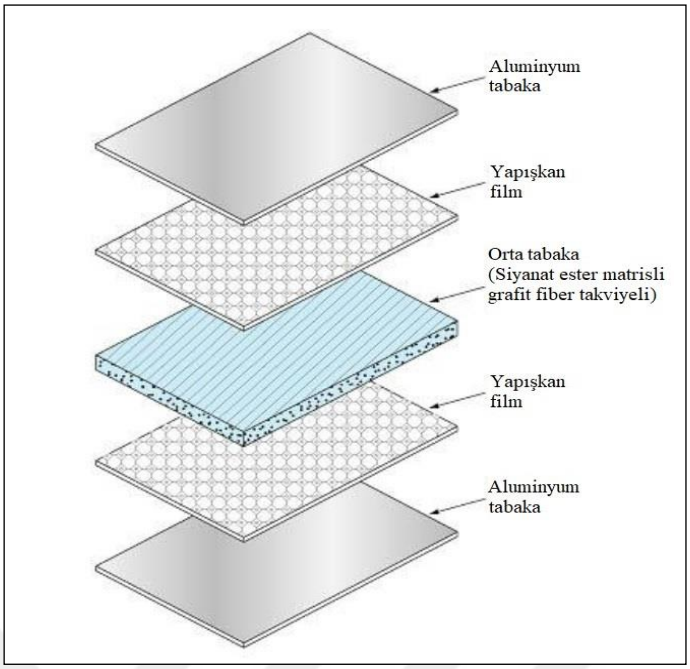
Fiber takviyeli kompozitlerin bir başka avantajı ise yüksek ses ve darbe sönümleme kapasitesidir. Bu özelliğinden dolayı bu tür malzemeler otomobillerde, gürültü, titreşim ve sertliğin (NVH) azaltılması ve ağırlık azaltılması için tercih edilen malzemelerdir. Yüksek sönümleme kapasitesi özelliğinden dolayı birçok spor ekipmanın üretiminde tercih edilmektedirler [9].



Şekil 1.5. Fiber takviyeli kompozitler kullanılarak üretilen ürünler a) fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilen otomobil gövdesi b) fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilen tenis raketi [11, 12]

1.3.1.2. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla katmanın birleştirilmesi ile oluşturulan kompozit malzemelerdir. Tabakaların birleştirilmesi için kullanılan yapışkan filmler, üstün özelliklerdeki tabakaları birbirine bağlayarak istenen özellikte kompozit malzemelerin üretilmesini sağlarlar. Tabakalı kompozit malzemeler genel olarak yüksek mukavemetli, düşük ağırlıklı, korozyon karşı dirençli, aşınma karşı dirençli, ses ve ısıl yalıtım özelliğine sahip malzemelerdir. Kompoziti oluşturan tabakaların malzemeleri ise metaller, lamine camlar, polimer esaslı bileşikler ve fiber takviye edilmiş katmanlar gibi çeşitli malzeme grupları olabilmektedir [6]. Şekil 1.6'da tabakalı kompozit malzemelerin birleşimi görülmektedir.



Şekil 1.6. Tabakalı kompozit malzemelerin bir araya getirilmesi [13]

1.3.1.3. Partikül takviyeli kompozit malzemeler

Partikül takviyeli kompozit malzemeler, takviye elemanı olarak nano veya mikron boyutundaki toz partiküllerinin kullanıldığı kompozit malzemelerdir. Kompozit içerisinde kullanılan toz partikülleri, küresel, köşeli veya dendritik gibi partiküllerin üretim yöntemlerine göre değişen şekilde takviye edilebilmektedir. Kullanılan toz partiküllerinin boyutları, şekli ve yüzeyi kompozit malzemeden elde edilen özellikleri doğrudan etkilemektedir [14].

Partikül takviyeli kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişmemekle birlikte, kompozitin her bir doğrultusundaki özellikler aynı veya birbirine oldukça yakındır. Partiküllerin kompozit içerisinde kullanılması ile malzemenin sıcaklık davranışı, sertlik, aşınma direnci, korozyon direnci gibi özellikler geliştirilmektedir. Kompozit içerisinde kullanılacak partikülün malzemesi kompozitten beklenen özelliklere göre belirlenmektedir [15]. Üretimi için en çok tercih edilen yöntemlerden birisi de toz metalurjisi yöntemidir [14].

1.3.2. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler matris malzemelerinin türüne göre üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

1. Polimer matrisli kompozit malzemeler
2. Seramik matrisli kompozit malzemeler
3. Metal matrisli kompozit malzemeler

olarak sınıflandırılmaktadır.

1.3.2.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler

Matris malzemesi olarak polimer malzemelerin kullanıldığı kompozit malzemelere polimer matrisli kompozit malzemeler denilmektedir. Polimer malzemeler, metal ve seramik gibi malzeme türleriyle yapısal olarak karşılaştırıldığında daha karmaşık yapıdadırlar. Düşük maliyetlere sahip ve kolay tedarik edilebilirlik gibi avantajlara sahip olan polimerler dezavantaj olarak düşük elastik modülüne ve düşük işletim sıcaklıklarına sahiptir. Polimer malzemeler termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki grupta incelenmektedirler. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanları genellikle sürekli fiberlerdir [7].

Endüstriyel olarak üretilen ilk polimer matrisli malzemelerinden birisi fenolik matrisli kompozitlerdir. Polimer malzeme grubundan olan fenolik reçineler, iyi sıkıştırılabilirlik, iyi su direncine, kimyasal dirence sahiptir. Katkı maddeleri kullanılmadan katılaşabilme özelliğine sahip olan fenolik reçineler yüksek basınç altında şekillendirilerek kompozit malzeme haline getirilmektedirler. Düşük kırılma uzamasına sahip olan fenolik reçineler kırılgan yapıya sahiptirler. Takviye elemanları ile düşük bağlanmaya sahip olan fenolik reçineler bu özelliğinden dolayı daha çok partiküller veya kısa fiberlerle takviye edilirler [16].

Polimer matris malzemesi olarak en çok kullanılan polimerler termoset polimerler grubundan olan polyester ve epoksi reçinelerdir. Daha çok cam fiber kompozit malzemelerin üretiminde doymamış polyester reçineler, oldukça iyi özelliklere sahiptir. Oda sıcaklığında sertleşebilen bu reçineler, yüksek basınçlara gerek olmadan şekillendirme yapılmaktadır. Fenolik reçinelerle karşılaştırıldığında daha

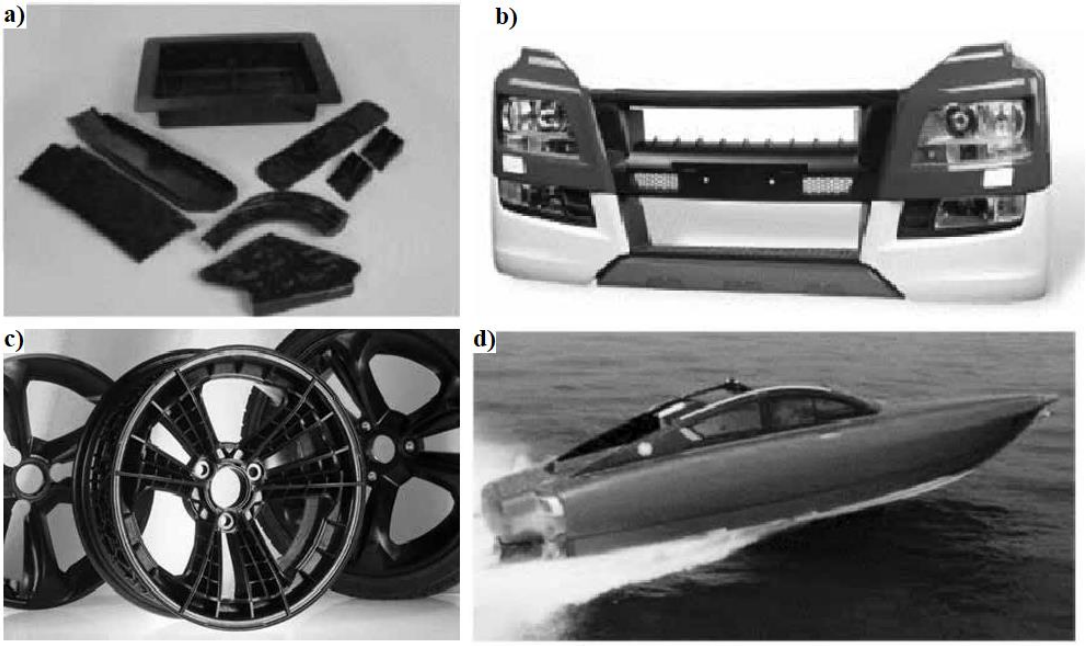
düşük mekanik özelliklere sahip olan doymamış polyester reçineler, düşük ısıl dirence ve yüksek sertleşme büzülmesine sahiptirler [16].

1930'lu yıllarda kullanımına başlanan epoksi malzemeler 1940'lı yıllarda endüstriyel olarak kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise yaygın olarak kullanılmaktadır. Epoksi reçineler, yüksek bağlanma özelliğine sahip olup yüksek mekanik dayanım, iyi dielektrik davranışı ve iyi kimyasal dirence sahiptir. Karbon fiber ve bor fiber takviyeli olarak üretilen epoksi matrisli kompozit malzemeler geniş uygulamalara sahiptir [16]. Epoksi matrisli kompozitler havacılık sektöründe çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [7].

Gelişen polimer bilimi ile bir dizi yeni polimer reçineler geliştirilmiştir ve geliştirilen her bir polimerin kendine özgü özellikleri bulunmaktadır. Yüksek ısıl dirence ve elektriksel özelliklere sahip kompozit üretimi için dialil fitalat reçine, korozyon direnci ve yüksek elektriksel özellikler için polidifenil eter reçine, uzun süreli yüksek sıcaklık dayanım performansı için polimid reçineler kullanılmaktadır. Son zamanlarda polieter sülfon, polifenilen sülfit ve polieter keton gibi termoplastik reçineler de matris malzemesi olarak kullanılmaktadır [16].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler; elle sıvama, sıvı akış tekniği, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, telle sarma gibi çeşitli tekniklerdir. Polimerler matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak cam fiber, kevlar fiber, bor fiber ve karbon fiberler kullanılmaktadır [7].

Polimer matrisli kompozit malzemeler son zamanlarda özellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlığı sahip olmasından dolayı ulaşım araçlarının üretiminde temel öneme sahiptirler. Otomotiv, havacılık, denizcilik ve askeri alanlarda sıkça tercih edilen bir malzeme grubudur [17]. Şekil 1.7'de polimer matrisli kompozit malzemelerin bazı uygulamaları görülmektedir.



Şekil 1.7. Polimer matrisli kompozit malzemelerle üretilen a) uçak pencere çerçeveleri, braketler, bağlantı parçaları klipsler, b) termoplastik esaslı kamyon tamponu c) cam fiber takviyeli polimer otomobil jantı, d) sürat teknesi gövdesi [17]

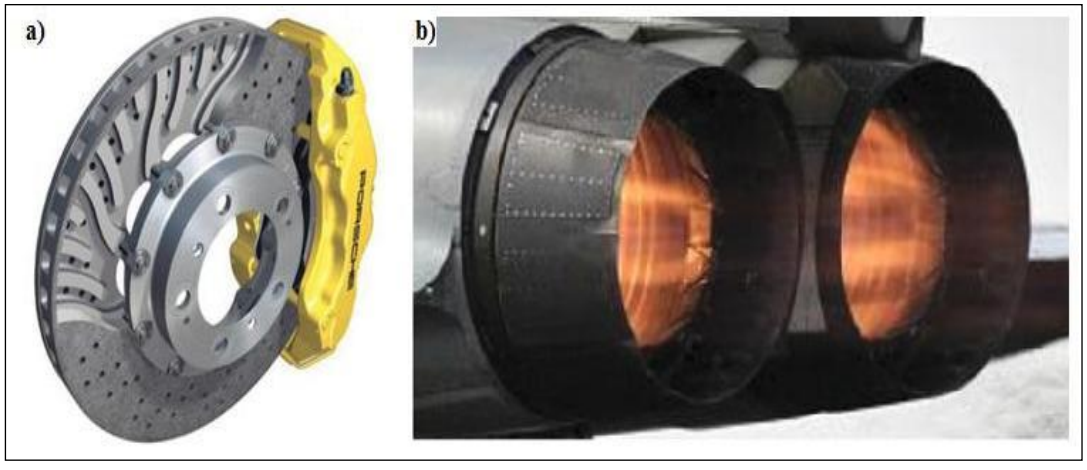
1.3.2.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Matris malzemesi olarak seramik esaslı malzemelerin kullanıldığı kompozit malzemelere seramik matrisli kompozit malzemeler denilmektedir. Seramik malzemeler, genellikle metalik olmayan ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olan inorganik bir malzeme türüdür. Son 40 yıldır yapılan çalışmalar sonucunda büyük ilerlemeler kaydedilen seramik malzemeler iki farklı grupta incelenmektedir. Geleneksel seramikler olarak adlandırılan birinci grup malzemeler, genellikle tuğla, porselen, süs eşyaları, vitrifiye, karo ve fayans üretiminde kullanılmaktadır. İkinci grup seramikler ise mühendislik seramikleri veya ileri teknoloji seramiklerdir. İleri teknoloji seramikler, özel kimyasal işlemlerden geçirilerek üretilen ve üstün özelliklere sahip seramik grubudur. Bu seramiklere örnek olarak, aluminyum, silisyum, titanyum ve zirkonyum ve benzeri malzemelerin oksitli, nitritli veya karbürlü bileşikleri verilebilmektedir [18].

İleri teknoloji seramikler, çok yüksek sıcaklıklara bile dayanıklı, kimyasal maddelere, aşınmaya karşı dayanıklı malzemelerdir. Sahip oldukları bu avantajlar, bu tür seramiklerin üretimini zorlaştırmakla beraber üretim maliyetlerini arttırıcı etkiye sahiptir. Seramik matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak ileri

teknoloji seramik gurubu tercih edilmektedir. Bu tür seramiklerin matris malzemesi olarak kullanılmasıyla yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu, yüksek sertliğe sahip, kimyasal olarak kararlı, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve aşınmaya karşı dirençli kompozit malzemelerin üretimi mümkündür. Üstün özelliklerine rağmen seramikler gerilme ve darbelere karşı dirençli değildirler. Metallerin aksine seramikler plastisite özelliği göstermezler ve düşük kırılma tokluğuna sahiptirler. Mekanik etkiler ve termal şoklar altında seramik matrisli kompozitlerde hasarlanmalar görülmektedir [18].

Seramik matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak Al_2O_3, SiC, Si_3N_4, B_4C gibi malzemeler sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca alumina, aluminyum nitrat, bor karbür ve silisyum karbürler seramik zırh malzemesi olarak kullanımları bulunmaktadır. Seramik matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak genellikle seramik fiberler kullanılmaktadır. Seramik fiberlerin kullanımı ile kompozitin mukavemet değerlerinde artış sağlanmaktadır. Seramiklerin en büyük problemlerinden olan çatlak oluşumu ise fiber takviyelerin kullanımı ile çatlak yönü değişimi sağlanabilmekte ve tokluk değerleri arttırılabilmektedir. Seramik matrisli kompozit malzemeler biyomedikal uygulamalarda, havacılık ve uzay endüstrisinde, roket ve turbojet motorlarında, otomobillerde fren diskleri ve egzoz parçalarında tercih edilmektedir [19].



Şekil 1.8. Seramik matrisli kompozit malzemelerin uygulamaları a) seramik fren diski, b) jet motoru dış kapak parçası [20]

1.3.2.3. Metal matrisli kompozit malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler, matris malzemesi olarak metal veya metal alaşımlarından oluşan, takviye elemanı olarak partikül, sürekli fiber veya kesikli fiberlerin kullanıldığı kompozit malzemelerdir [21]. Dayanıklı, hafif ve sert malzemeler için duyulan ihtiyaçlar metal matrisli kompozitlere olan ilgiyi artırmıştır. Son otuz yıldır metal matrisli kompozitler, geliştirilen dayanımı, yüksek elastisite modülü ve geleneksel alaşımlı malzemelere göre artan aşınma direnci nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Metal matrisli kompozitlerin endüstride kullanımı teknolojik gelişmelerle eş zamanlı olarak artmaktadır [22].

Matris malzemesi seçilirken kompozitin, kullanılacağı uygulamalarda gerekli olan dayanım, yoğunluk, maliyet ve çalışma sıcaklığına uygunluğu göz önünde bulundurulur. Matris ve matris içinde kullanılacak takviye elemanlarının seçiminde en önemli faktörlerden birisi de matris ile takviye arasındaki uyumluluktur. Matris ile takviye arasındaki arayüzeylerde istenmeyen kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi kompozitten beklenen özelliklerin elde edilememesine sebep olur. Kompozit içerisinde görülen uyumsuzluklar matrise etki eden kuvvetlerin takviye elemanlarına aktarımını engellediği gibi çatlak çekirdeklenme bölgelerini oluşturup kırılmasına sebep olmaktadır [5].

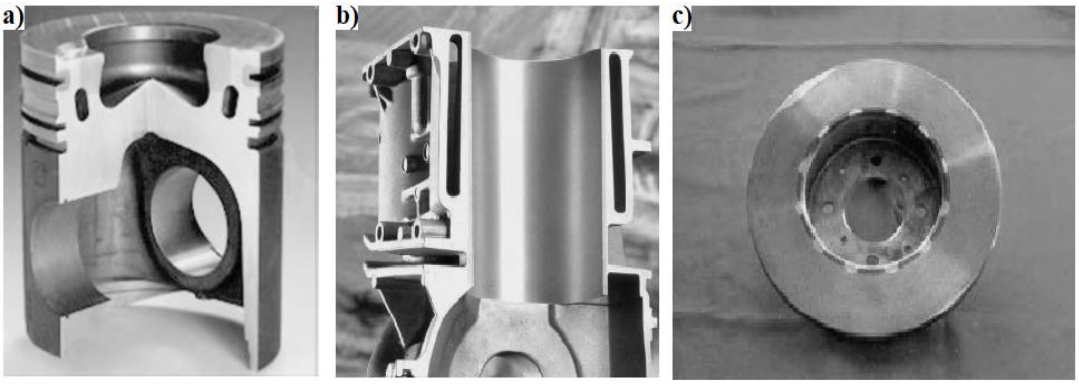
Metal matrisli kompozit malzemelerde aluminyum, titanyum, bakır, magnezyum, nikel, demir, çinko, kurşun gibi elementler ve bu elementlerin alaşımları kullanılmaktadır. Endüstri tarafından en çok tercih edilen metal matris malzemeleri aluminyum, bakır, titanyum ve magnezyumdur [14]. Aluminyumun sahip olduğu düşük yoğunluk, ısıl iletkenlik, iyi korozyon direnci, tokluk ve iyi mekanik özellikler, aluminyum ve alaşımlarını matris malzemesi olarak kullanımını arttırmaktadır. Aluminyum matrisli kompozit malzemeler otomotiv ve havacılık endüstrisi tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Otomotiv ve havacılık sektörünün düşük ağırlığa sahip parçalara olan ihtiyacı metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Düşük ağırlığa sahip parçaların üretilmesi için kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak düşük yoğunluklu hafif metaller tercih edilmektedir. Takviye elemanlarının kullanımı ile kompozit

malzemelerin özellikleri geliştirilmektedir. Hafif metal matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesi ile:

- Oda sıcaklığı ve üstündeki çalışma sıcaklıklarında gerilme mukavemeti ve akma dayanımında artış,
- Yüksek çalışma sıcaklıklarında sürünme direncinde ve yorulma mukavemetinde artış,
- Termal şok direncinin iyileştirilmesi,
- Elastisite modülünde artış,
- Termal uzamasının azaltılması,
- Düşük süneklik,
- Korozyon direncinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır [23].

Metal matrisli kompozit malzemeler otomobillerde piston, piston pimi, silindir kafası, krank mili, motor bloğu gibi motor parçalarında, fren disklerinde, tahrik milinde ve araç gövdesinde kullanılmaktadır. Şekil 1.9'da metal matrisli kompozit malzemelerin kullanıldığı bazı otomobil parçaları görülmektedir. Şekil 1.9.a'da kesikli Al_2O_3 fiber takviye edilmiş aluminyum piston, Şekil 1.9.b'de SiC partikül takviyeli aluminyum karter parçası, Şekil 1.9.c'de SiC fiber ve partikül takviyeli aluminyum fren diski görülmektedir [23]. Metal matrisli kompozit malzemeler, çeşitli üretim yöntemleriyle üretilebilmektedir. Partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretimi için genellikle toz metalurjisi yöntemi tercih edilmektedir [14].



Şekil 1.9. Metal matrisli kompozit malzemelerin otomobilde kullanıldığı bazı parçalar a) piston, b) karter parçası, c) fren diski [23]

2. TOZ METALURJİSİ

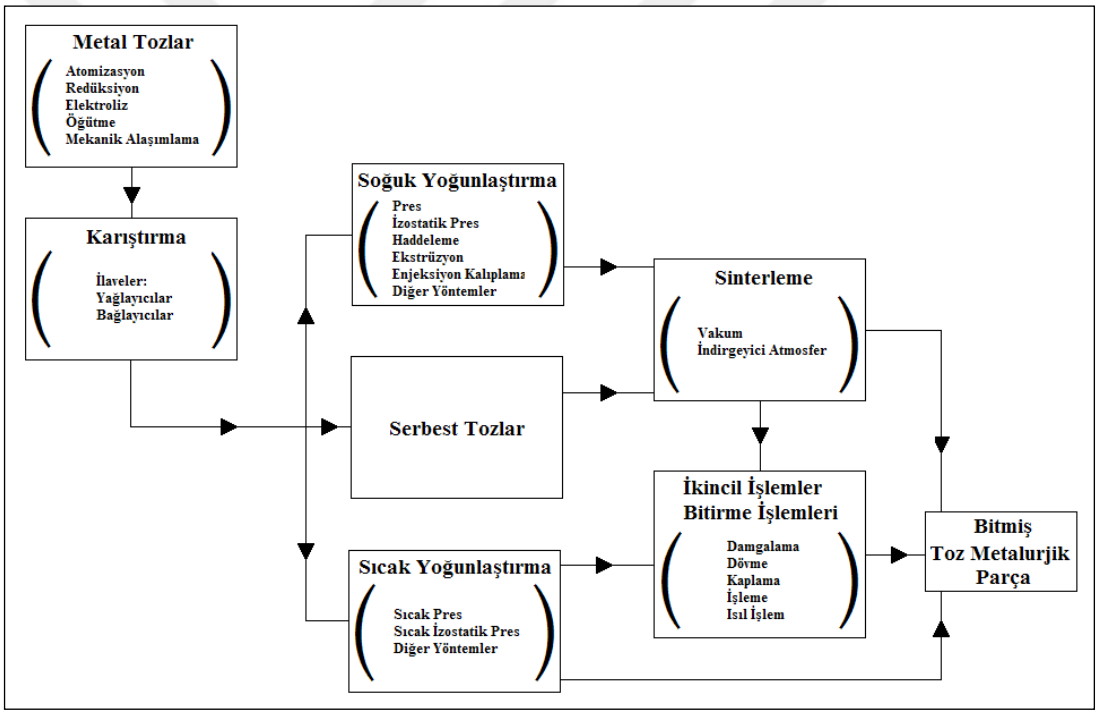
2.1. Toz Metalurjisi Yöntemi

Toz metalurjisi, özel üretilmiş tozlar kullanılarak istenen geometride parça üretilmesini sağlayan bir üretim bilimidir. Element veya alaşım halindeki tozların belirli oranlarda alınıp karıştırılması, homojen karışmış tozların bir kalıp yardımıyla sıkıştırılması ve ardından tozların metalurjik bağlanmasını sağlamak için kontrollü atmosfer ortamında sinterlenmesi prensibine dayanır. Homojen yapıya sahip parçaların üretilebilmesi, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin kontrol edilebilir olmasını sağlamaktadır. Tarihi çok eski zamanlara dayanan toz metalurjisi yöntemi, özellikle son 30 yıldır çeşitli uygulamalarda yüksek kaliteli parçaların üretimi için üstün özelliklerinden dolayı en uygun yöntem olarak görülmektedir [24].

Toz metalurjisi yöntemi döküm, presleme ve talaşlı şekillendirme gibi diğer imalat yöntemlerine göre üstün özelliklere sahiptir. Presleme, basınçlı döküm gibi yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan ve mukavemet, aşınma direnci, yüksek üretim sıcaklığına sahip parçaların üretimi için en uygun yöntem olarak toz metalurjisi öne çıkmaktadır. Döküm yönteminde karşılaşılan gaz boşlukları, çekme, kalıntılar gibi hatalarının önüne geçilmektedir. Toz metalurjisi yöntemi, istenen net boyutta parça üretimini sağlar, daha hassas üretim imkanı sunar. Buna bağlı olarak döküm yöntemiyle üretilmiş parçaların istenen ölçüye getirilmesi için yapılması gereken son işlemlerin çoğunu ortadan kaldırmakta, işlem sürelerini azaltmaktadır. Toz metalurjisi yüksek adetli üretime uygun yöntemdir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olmasından dolayı ancak seri üretim gerçekleştirildiğinde ekonomik bir yöntem olmaktadır [25].

Günümüzde toz metalürjisinin en çok kullanıldığı endüstri otomotiv endüstrisidir. Makine parçaları, elektronik ürünler, tarım ve bahçe ekipmanları, iş makinesi parçaları, spor ekipmanları ve askeri ürünlerin üretiminde toz metalürjisinin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [25].

Toz metalurjisi işlemi genellikle dört temel adımdan oluşur: tozun üretimi, tozun karıştırılması, tozun sıkıştırılması ve sinterleme işlemidir. Şekil 2.1'de toz metalürjisi akış şeması gösterilmektedir. Sıkıştırma işlemi genellikle oda sıcaklığında yapılır ve yüksek sıcaklıklarda yapılan sinterleme işlemi genellikle atmosferik basınçta gerçekleştirilir. Toz metalurjisi sürekli gelişmekte ve bu temel adımların birleştirildiği yeni üretim yöntemleri ortaya çıkmıştır. Sinterleme işleminden sonra ürünlere isteğe bağlı ikincil işlemler uygulanabilir. İkincil işlemler ürünlere daha üstün özellikler veya gelişmiş hassasiyet elde etmek için sıklıkla uygulanmaktadır. Toz metalurjisi yönteminin kullanılması ile üreünlerin üretiminde, ek olarak talaşlı imalat işlemlerinin kullanılmasına gerek kalmamakta ve böylece üretim maliyetleri azaltılabilmektedir [26].



Şekil 2.1. Toz metalürjisi yönteminin akış şeması [25, 26]

2.2. Toz Metalurjisi Tarihçesi

Toz metalurjisi yöntemi tarihte bilinen en eski metal üretim yöntemlerinden birisidir. Toz metalurjisi yönteminde toz halindeki metal malzemenin ergitilmeden toz halindeyken şekillendirilmesi en önemli özelliklerinden birisidir. Bu özelliğinden dolayı, eski uygarlıkların metalik nesnelerinin çoğunun, toz metalurjisi yönteminin birer uygulanması olduğu kabul edilmektedir [27].

İlk insanlar bilinen geçmiş zamanlardan beri altın, bakır, bronz ve demir oksit tozu gibi metal tozlarını, dekoratif amaçlı olarak seramiklerde, boya ve mürekkeplerin içerisinde kullanmışlardır. Bulunan ilk el yazmaları, altın tozları kullanılarak yazıldığı bilinmektedir [28]. M.Ö. 14.yüzyılda yaşadığı bilinen Mısır Firavunu Tutankhamun'un mezarında altın tozları ile süslenmiş hançer bulunmuştur [27]. Kullanılan bu metal tozlarının nasıl üretildiği tam olarak bilinmese de metallerin ergitildikten sonra parçacıklar haline getirildiği tahmin edilmektedir [28].

Mısırlılar M.Ö. 3000'li yıllarda el aletlerinin yapımında sünger demiri kullanmışlardır. Toz metalurjisinin tarihte kullanımına başka bir örnek ise M.S. 300'lü yıllarında Hindistan'da yapılan Delhi sütunlarıdır. 6.5 ton ağırlığında olan bu sütunlar indirgenmiş demir oksit tozları kullanılarak yapılmıştır. Toz metalurjisi, 1492 yılında Amerika kıtasını keşfinden önce İnkalar tarafından platin yapımında kullanılmıştır. Avrupa'da 18. ve 19.yüzyıllarda platin gereçlere olan ihtiyaçtan dolayı platin üretim yöntemlerinin geliştirilmesine neden olmuştur [28]. 1768°C'de ergiyen platinin üretimi için yüksek sıcaklıklara çıkılmadan üretilmesini sağlayan toz metalurjisi yöntemi en uygun üretim yöntemi olarak benimsenmiştir. Rusya'da 1826 yılında Sobolevsky tarafından platin tozları kullanılarak platin bozuk para üretilmiştir. Bu gelişme toz metalurjisinin en önemli gelişmelerinden birisi olup, ilk seri üretim toz metalurjik parça olarak kabul edilmektedir [27].

Toz metalurjisi modern uygulamaları 1879 yılında Thomas Edison'un elektrik ampullerini icat etmesi, ardından 1906 yılında Coolidge'in tungsten tozlarını preste sıkıştırıp sinterledikten sonra dayanıklı ampul filamanları üretmesiyle başladığı kabul edilmektedir. Bu gelişmelerden sonra 1920'li yıllarda sıvı faz sinterlenmesi prensibini kullanan ağır alaşımlar, semente çoklu karbürler, kontak malzemeleri, poroz bronz yataklar, filtreler, elektrotlar vb. birçok ürün geliştirilmiştir [27].

Otomotiv endüstrisinde seri üretimin artması, demir ve bakır tozlarının büyük miktarlarda kullanılmasını ve modern toz metalurjisinin gelişmesini sağlamıştır. Toz metalurjisinin ilk ticari uygulaması 1927 yılında toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kendinden yağlamalı yatağın otomobilde kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. II. Dünya Savaşı ile birlikte demir tozu teknolojisinde gelişmeler görülmüş ve toz metalurjisi daha etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır. II. Dünya Savaşı'nın sona erdikten sonra

havacılık ve nükleer teknolojisinde yaşanan gelişmeler, tungsten, molibden, niyobyum, titanyum, tantalyum gibi refrakter metallerin ve berilyum, uranyum, zirkonyum ve toryum gibi nükleer metallerin toz metalurjisi ile üretilmesinin önünü açmıştır. 1950 ve 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalar, maliyetleri daha düşük ve teknik olarak daha iyi olan toz metalurjik üretim tekniklerinin gelişimi sağlanmıştır. 1970 ve 1980'lerde homojen dağılmış ince taneli, gözeneksiz, yüksek alaşımlı bir yapı elde edilmesi ve istenen ölçülerde parça üretilmesi avantajlarından dolayı toz metalurjisi yöntemi daha fazla tercih edilmiştir. Günümüzde nükleer, uzay elektrik ve manyetik uygulamaların çoğunda, otomotiv sektöründe toz metalürjik malzeme kullanımı artarak devam etmektedir [28].

2.3. Toz Metalurjisinin Avantaj ve Dezavantajları

Toz metalurjisi yöntemini diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırılırsa bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar [24, 29, 30];

- İstenen kimyasal özelliklere sahip parçalar üretilebilmektedir.
- Metaller, birbiri içinde çözünebilen ve çözünemeyen metal alaşımları, seramikler, polimerler, kompozitler gibi farklı türde ve özellikte malzemenin üretimi mümkündür.
- Diğer üretim yöntemlerinde üretilmesi zor olan gözenekli yapının kontrollü üretimi yapılabilmektedir.
- Gözenekli yapıda malzeme üretilebildiğinden, kendinden yağlamalı yatakların üretimi için en uygun yöntemlerden biridir.
- Geliştirilebilen manyetik özelliklere sahip malzemeler üretilebilmektedir.
- İstenen ölçülere yakın ve dar boyutsal toleransa sahip parçaların üretimi, diğer üretim yöntemlerine göre daha kolaydır.
- Seri üretimle parça üretimi mümkündür.
- Gerilim altında titreşim absorbe etme özelliğine sahip malzemeler üretilebilmektedir.
- Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip malzemeler üretilebilmektedir.
- Yüksek boyutsal hassasiyete ve iyi yüzey kalitesine sahip parçalar üretildiği için üretimden sonra talaşlı şekillendirme gibi ek işlemlere gerek yoktur.
- Üretilen parçalar uzun ömürlü olmaktadır.

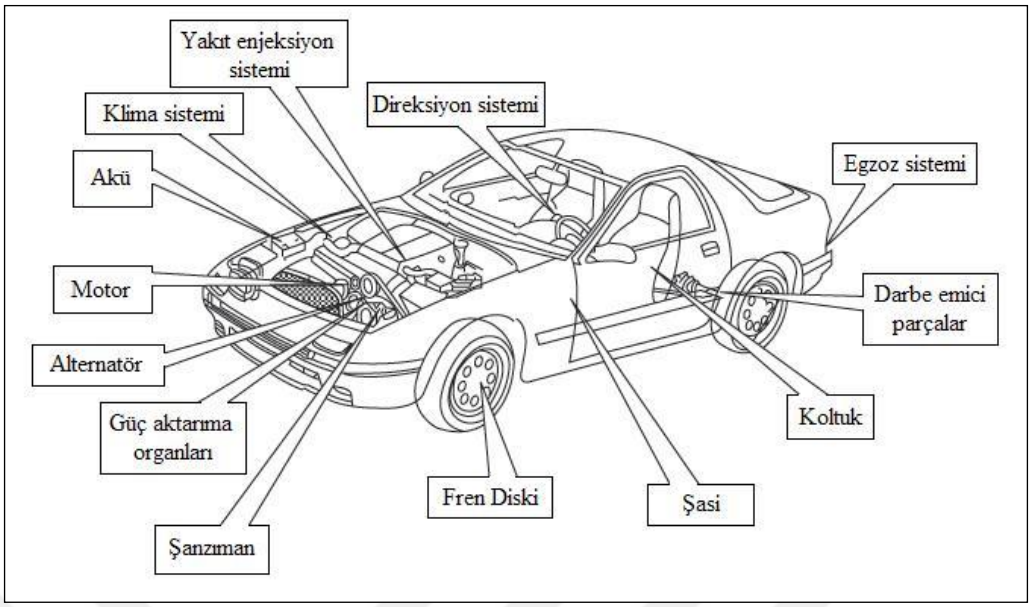
- Diğer yöntemlere göre malzeme kaybı çok azdır. Malzeme kaybının az olması ve üretimin hızlılığından dolayı düşük maliyetli üretim mümkündür.
- Diğer üretim yöntemleriyle üretilmesi zor olan sert metallerin ve yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakter metallerin üretimi daha kolaydır.

Toz metalurjisi yöntemini diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırılırsa bazı dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlar [29, 30];

- Kullanılan tozların kirlenmemesi ve oksitlenme gibi kimyasal reaksiyonlara girememesi için hava ile temas etmemesi ve tozların korunaklı bir ortamda saklanması gereklidir.
- Yüksek saflıktaki tozların üretim maliyetleri yüksektir.
- Kullanılan takım ve ekipmanların pahalı olmasından dolayı yüksek üretim adetlerinde daha karlı bir üretim yöntemidir.
- Karmaşık şekilli parçaların üretimi zordur. Preslenen parçaların kalıptan bozulmadan çıkarılacak geometride olması gerekmektedir.
- Gözenekli yapıdan dolayı oksitlenme riskine ve düşük plastik özelliklere sahiptir.
- Büyük geometrili parçaların üretimi için tozların yüksek basınçta preslenmesi gerekmektedir.

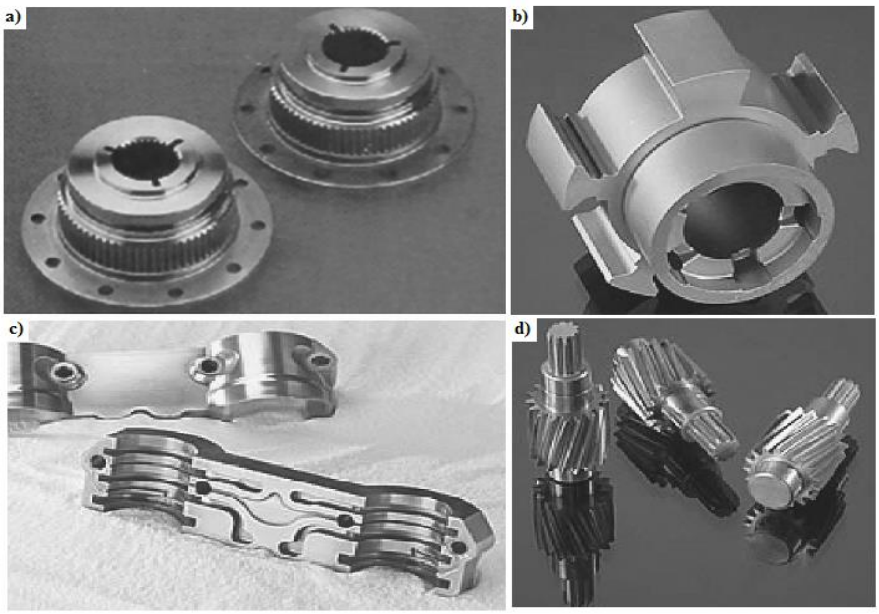
2.4. Toz Metalurjisinin Kullanım Alanları

Toz metalurjisi, net şekilde bileşenlerin üretilmesi için geliştirilmiş bir yeşil üretim teknolojisidir. Malzeme kaybının az olması, seri üretimde maliyetinin düşük olması, yüksek kalitede hassas parçaların üretilebilmesi gibi avantajlarından dolayı toz metalurjisi otomotiv endüstrisi için oldukça cazip bir yöntem olmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi; otomobillerde, otobüslerde, kamyonlarda ve benzeri araçların motor, şanzıman, şasi parçalarında ve diğer önemli bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır [31].



Şekil 2.2. Toz metalürjisi yönteminin otomobillerde kullanımı [31]

Toz metalurjisi yöntemi otomotiv endüstirisi dışında spor ekipmanları, elektronik cihaz parçaları, biyomedikal, uzay ve havacılık bileşenleri gibi oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Aluminyum, bakır, alaşımlı çelikler, paslanmaz çelik, bronz, refrakter metaller, titanyum alaşımları ve kompozitleri toz metalurjisi kullanılarak üretilebilmektedir [29].



Şekil 2.3. Toz metalurjisi ile üretilen a) tork konvertör gövdesi, b) değişken valf zamanlayıcısı rotor adaptörü, c) aluminyum kam mili yatak kafası, d) helisel dişli [32]

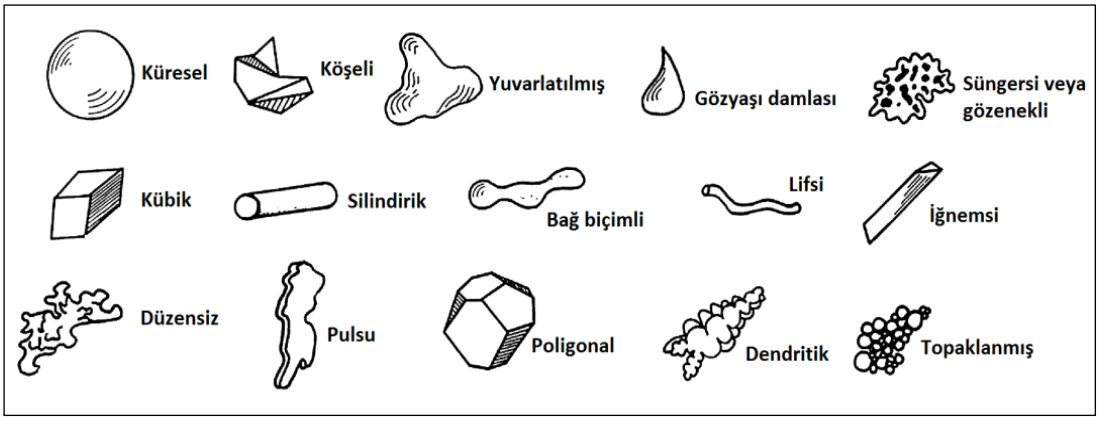
Diğer yöntemlerle üretilmesi zor olan gözenekli yataklar, filtreler, bileşik oluşturamayan alaşımlar, manyetik özellikli parçaların üretiminde toz metalurjisi kullanılmaktadır. Ayrıca uçak fren balatası, jet motoru parçaları, yakıt ve kimyasal sentezleme ekipmanları, elektrotlar, dekoratif ürünlerde ve silah parçalarının üretiminde de kullanılmaktadır [29].

2.5. Toz Üretim Yöntemleri

Toz metalurjisi yönteminde istenen özelliklere sahip ürünlerin eldesi için kullanılan tozların özellikleri çok önemlidir. Kullanılan tozların kimyasal bileşimi ve saflığı ürün özellikleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olmakla birlikte partiküllerin şekli, partikül boyutu ve boyut dağılımı gibi değişkenler de etki etmektedir. Kullanılacak tozun o ürün için uygunluğu da önemlidir ve uygunluğu belirlemek için tozlara basit testler uygulanabilmektedir. Tozun belirli bir kalıbı doldurma ve boşaltma süresi tozun akış hızını belirler ve toz akıcılığı hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Tozun kalıbı tam olarak doldurabilmesi ve istenen özellikte ürün elde edilmesi için akıcılık özelliği yüksek olan toz tercih edilmektedir [33].

Tozların yüzey şekli, şekillendirme sırasındaki akıcılık davranışlarını etkilemektedir. Toz şeklinin küresel ve küresele yakın şekilde olması istense de genelde tozların şekilleri düzensizdir. Küresel şekilli tozların pulsu gibi düzensiz toz şekillerine göre akış davranışları ve kalıp doldurma özellikleri daha iyi olmaktadır. Küresel bir tozun pulsu şekilli tozlara göre presleme işleminde kalıp içindeki basıncı daha etkili ilettiği bilinmektedir. Tozların fiziksel ve mekanik özellikleri tozun sıkıştırılabilirlik özelliğini ve sinterleme davranışını etkilemektedir [34].

Kullanılan tozun şekli ürünün özelliklerini etkilediği bilinmektedir ve toz şeklini belirleyen en önemli faktör tozun üretim yöntemidir. Toz üretiminde en çok görülen toz şekilleri Şekil 2.4'deki gibidir [35].



Şekil 2.4. Toz üretiminde karşılaşılan toz şekilleri [35]

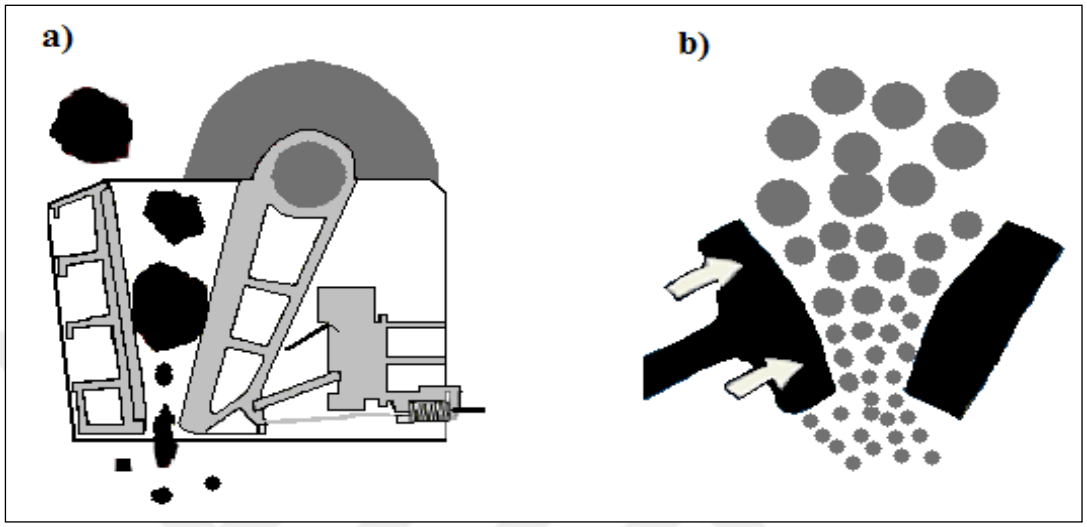
Hemen hemen tüm malzemeler toz şeklinde üretilebilir, ancak toz üretim yönteminin seçimi malzemeye özgü özelliklere bağlıdır. Toz üretimi mekanik üretim yöntemleri, elektrolizle üretim teknikleri, kimyasal üretim teknikleri ve atomizasyon teknikleri olarak dört ana grupta toplanmaktadır. Bu yöntemler dışında bazı malzeme türleri için özel toz üretim teknikleri de kullanılmaktadır.

2.5.1. Mekanik üretim yöntemleri

Mekanik yöntemler, mekanik hareket enerjisinin tozlara etki etmesi ve bu enerji kullanılarak tozların mekanik olarak kırılması, parçalanması prensibine dayanan yöntemlerdir. Toz boyutunun küçültülerek düzgün veya karmaşık şekilli tozların elde edilmesi veya farklı metal tozlarının alaşım oluşturması için kullanılmaktadır. Tozların mekanik olarak tane boyutlarının azaltılması tozlara darbe, kayma kuvvetleri uygulanarak tozların sıkıştırılması ve tozların aşındırılması gibi işlemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler berilyum ve metal hidritler gibi reaktif malzemeler, saf antimon, bizmut, nispeten sert ve kırılgan metal alaşımları ve seramikler gibi kırılması kolay olan malzemelerin toz partikülleri haline getirilmesi için de tercih edilmektedir. Mekanik yöntemler pulsu toz şeklinde üretilmesi istenen aluminyum ve demir gibi metallerin toz haline getirilmesinde kullanılmaktadır [25].

İri taneli metal tozların parçalanması ve boyutlarının küçültülmesi için çeneli ve çekiçli kırıcılar kullanılmaktadır. Çeneli kırıcılarda, sabit bir çene ve hareketli bir çene arasına konulan iri metal parçaların sıkıştırılması, metalin parçaların daha ufak parçalara ayrılması ile kaba metal tozları elde edilmektedir. Elde edilen kaba tozların istenen küçük tane boyutlarına indirilmesi için çekiçli kırıcılar tercih edilmektedir.

Çekiçli kırıcılar, rotora monte edilen bir çekicin malzemeye darbe kuvveti uygular ve darbelerin etkisiyle tozlar ezilir, tozlar daha küçük tanelere ayrılır. Çeneli ve çekiçli kırıcılarda elde edilen tozların boyutları yaklaşık bir milimetre boyutunda olup kaba metal tozları üretiminde kullanılmaktadır [36].

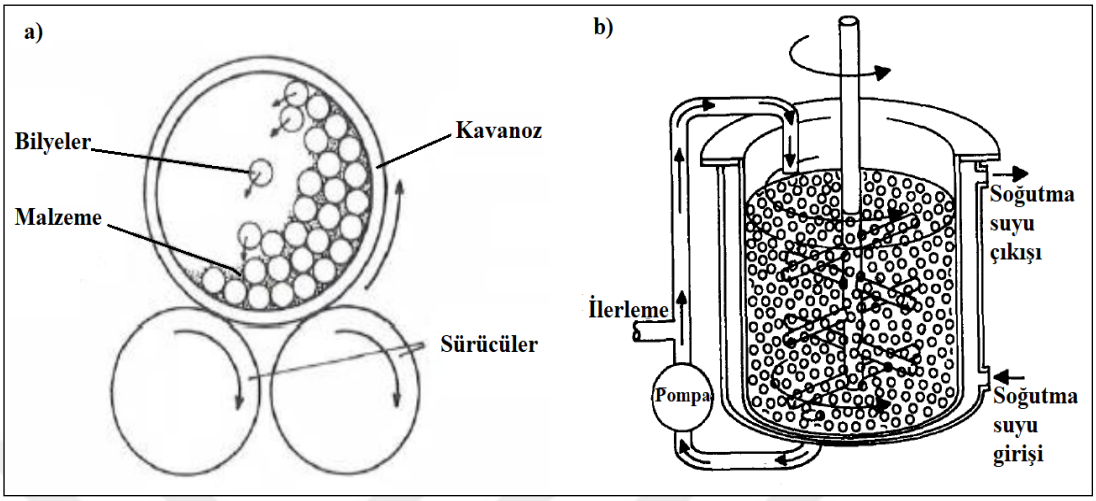


Şekil 2.5. Toz üretiminde kullanılan kırıcılar a) çeneli kırıcı, b) çekiçli kırıcı [36]

Mekanik toz üretim yöntemlerinden olan öğütme, sert bilyelerin veya çubukların toz partiküllerine darbe uygulaması ile küçük boyutlu tozların elde edilmesi işlemidir. Öğütme işlemi için kullanılan en basit mekanizma bilyeli değirmendir. Bilyeli değirmen içerisine aşınmaya karşı dayanıklı öğütücü bilyelerin ve öğütülecek tozun konulduğu silindirik bir kaptan oluşmaktadır. Silindirik kap, sürücü millerin dönmesi ile döner ve kap içerisindeki bilyeler tozlara sürekli çarpar. Bilyelerin tozlara uyguladığı kuvvetler tozların parçalanmasına ve toz boyutlarının azaltılmasına sebep olur. Şekil 2.6 a'da bilyeli değirmen mekanizması görülmektedir [37].

Bir toz öğütme yöntemi olan atritörde öğütme değirmende öğütmeye göre üstünlüklere sahiptir. Atritör, soğutma işlemi yapabilen özel bir kap, öğütücü bilyeler, soğutma sıvısı, sıvının hareketini sağlayan bir pompa mekanizması ve içerisinde karıştırma kollarına sahip dönebilen bir milden oluşmaktadır. Atritör içine konulan tozlar, karıştırma milinin dönmesiyle hareket eden bilyeler tozları küçük parçalara ayrılır. Öğütücü bilyeler tozları parçalarken açığa çıkan sıcaklık atritör üzerinden kontrol edilebilmektedir. Öğütme işlemi soğutma sıvısı kullanmadan kuru öğütme olarak veya soğutma sıvısı kullanarak ıslak öğütme yapılabilmektedir. Islak öğütmede kullanılan soğutma sıvısı genellikle sudur. Kullanılan bilyeler bilyeli

değirmende kullanılan bilyelerden daha düşük boyuttadır. Atritörde öğütmede bilyeli değirmende öğütme işlemine göre öğütme yoğunluğu daha fazladır [38].



Şekil 2.6. Öğütme işlemi a) silindirik değirmende öğütme işlemi, b) atritör kullanarak öğütme [37, 38]

Öğütme işleminde kullanılan toz parçacıkları çarpışan bilyeler arasında sıkışır ve şiddetli bir plastik deformasyona uğrar. Değirmende karıştırılan ve bilyelerin arasında sıkıştırılan tozlar daha ufak tanelere parçalanır. Bilyelerin toz partiküllerine uyguladığı kuvvet tozların soğuk kaynaklanmasına neden olur. Yüksek plastik deformasyon yüksek yoğunluklu kafes hatalarının oluşmasına ve dislokasyonların oluşumuna neden olur. Bilyeli öğütme işlemi sırasında bilyeler arasında sıkışan tozların sıcaklıkları anlık olarak artar ve kafes hatalarının yardımıyla bileşenler arası malzeme difüzyonu gerçekleşmektedir [39].

Öğütme işlemi gevrek malzemelerin boyutlarının azaltılması için uygun bir yöntemdir. Sünek malzemeler için öğütme oldukça zordur, çünkü sünek malzemeler kap içerisinde kırılarak parçalanma yerine şekil değiştirir, soğuk kaynaklanır ve topaklanır. Öğütme işleminde kavanozun dönme hızı, bilyelerin miktarı ve boyutları, öğütülecek malzeme miktarı ve boyutları önemli değişkenlerdir [37].

İri toz parçacıklarını kırmak için daha az darbe gerilmesi gereklidir. Öğütme sırasında toz boyutu küçüldükçe kırmak için gerekli olan gerilme değeri artar. Sonuç olarak kap içerisindeki toz boyutları bir süre sonra en az bir boyuta ulaşır ve daha uzun süre çalışılması toz boyutunu değiştirmez. En uygun öğütme için bilyelerin hacminin kap hacminin yarısı kadar olmalı ve öğütülen malzeme miktarı kap

hacminin dörtte biri kadar olması gerekmektedir. Ayrıca bilye çapının öğütülecek tozların boyutunun yaklaşık otuz katı kadar olması tavsiye edilmektedir [37].

2.5.2. Kimyasal üretim yöntemleri

Çeşitli kimyasal üretim yöntemleriyle çoğu malzeme toz halinde üretilebilmektedir. Tozların boyutları ve şekilleri kimyasal tepkimenin değişkenlerine bağlı olarak değişmekte ve kontrol edilebilmektedir. Kimyasal yöntemlerle toz üretimi için farklı yöntemler bulunmaktadır [37].

Metal tozları üretmede kullanılan kimyasal yöntemlerden birisi de oksit indirgemesidir. Katı veya gaz halindeki bir indirgeme maddesi kullanılarak metal bileşiklerinin indirgenmesi, metal tozu üretiminin en önemli yöntemlerinden birisidir. Demir, bakır, tungsten ve molibden tozları oksit indirmesi ile üretilebilen malzemelerdir [28].

Oksit indirgeme işlemi demir oksit gibi saflaştırılmış küçük boyutlardaki metal oksitleri ile başlamaktadır. Oksitli metal, grafit ve kireç taşı gibi indirgeyici malzemelerle birlikte ısıtılır ve karıştırılır. Oksitli malzeme, karıştırma ve ısıtma işlemi sonucu indirgeyici malzemelerden oluşan CO gazı gibi gazları içeren reaksiyonlar sonucu indirgenir. Oksit indirgeme, oksitli metalin doğrudan hidrojen gazı ile reaksiyonu sonucu elde edilebilmektedir. Volfram veya molibden gibi refrakter metallerin indirgenmesi için yüksek sıcaklıklar kullanılır. Düşük sıcaklıkta yapılan indirgeme işlemi daha uzun sürede gerçekleşmektedir [37]. Oksit indirgenmiş tozlar, karakteristik olarak oksit uzaklaşmasından dolayı her toz içinde gözenekler bulundurur. Bu nedenle oksit indirgenmiş tozlar sünger tozları olarak adlandırılmaktadır. İyi sıkıştırılabilirlik ve sinterlenebilirlik için sünger tozların gözeneklerinin miktarı ve büyüklüğü kontrol edilmelidir [28].

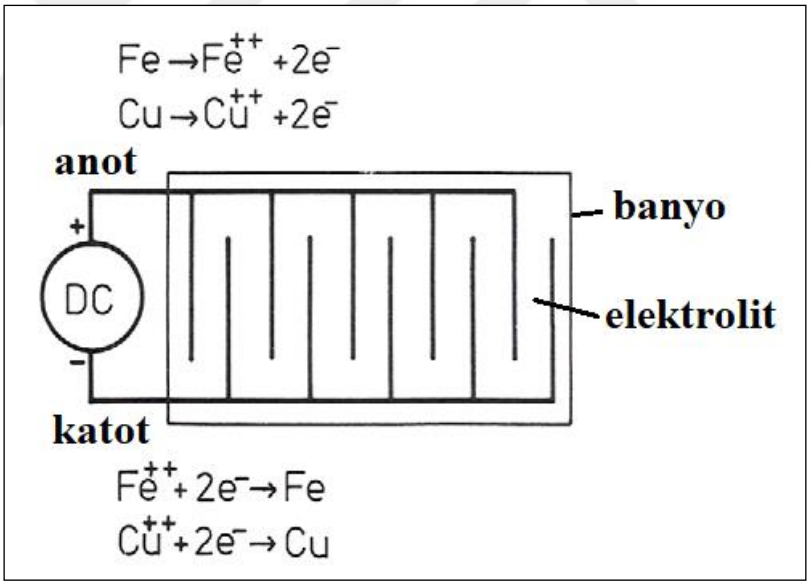
Metal tozları sıvı bileşikten indirgenerek elde edilebilmektedir. Metal iyonları su çözeltilerinden indirgenebilir ve böylece katı, sıvı veya gaz halindeki indirgeyici maddeler ve elektrik akımının yardımı ile dağınık halde metal tozları elde edilebilmektedir. Örneğin $CuSO_4$ metal iyonu sulu hidrojen çözeltisi içinde ısıtılır ve hidrojenle tepkimeye girer. Tepkime sonucu H_2SO_4 ve Cu tozu gibi metal çökeltileri

elde edilebilmektedir. Bakır, nikel ve kobalt tozlar %99,8 saflık oranında ve 10 nm - 20µm boyutların arasında oluşturulabilir [37].

Metal tozları gaz fazından çökeltilerek indirgenebilmektedir. Bu kimyasal yöntem pahalı bir üretim yöntemidir fakat yüksek saflıkta ve istenen şekilde nano boyutta tozların elde edilmesi mümkündür. Titanyum, bakır, gümüş volfram, nikel, kobalt, molibden tozları gaz fazından indirgenerek elde edilebilmektedir [37].

2.5.3. Elektrolizle üretim

Elektroliz yöntemi, düşük enerji tüketimi, düşük yatırım ve işletme maliyetleriyle birlikte metal tozu üretimi için oldukça uygun bir yöntemdir. Elektroliz yöntemi ile %99,9 gibi yüksek saflıkta metal tozu üretimi yapılabilmektedir. Diğer toz üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında düşük oksijen içeriğine sahip ve yüksek sıkıştırılabilirlik özelliğine sahip tozların üretimi gibi avantajlara sahiptir [40].



Şekil 2.7. Elektrolitik hücresi ve metal tozu üretimi [41]

Yöntemde anot malzemesi, toz halinde üretilmek istenen malzemedir. Anot ve katot malzemeler, elektrolitik banyonun içine yerleştirilir ve belirli bir gerilim uygulanır. Uygulanan gerilim etkisiyle anot malzeme elektrolitik banyo içerisinde çözünür ve ardından katot malzemede birikir. İşlem bittikten sonra katot elektrolitik banyodan alınır. Katot üzerindeki tozlar temizlenir ve üzerindeki tozlar alınır, ince toz haline getirilir [41]. Bakır ve demir için anot ve katotta meydana gelen tepkimeler Şekil 2.7'de verilmiştir.

Bakır, berilyum, demir, çinko ve nikel tozlarının hazırlanmasında elektroliz yöntemi yaygın olarak kullanılır. Elektroliz yöntemiyle üretilen metal tozları çoğunlukla dendritik veya süngerimsi şekle sahiptir [37]. Üretilen tozların özellikleri, kullanılan anot ve katodun boyutuna, şekline, kullanılan elektrolitin bileşimine, sıcaklığına, akım yoğunluğuna, elektrot aralığına bağlı olarak değişmektedir [41]. Akım yoğunluğunun artması durumunda üretilen tozların partikül boyutları azalmakla birlikte katot üzerinde daha fazla anot malzemesi biriktirilebilmektedir [40].

2.5.4. Atomizasyon yöntemiyle üretim

Atomizasyon yöntemi; aluminyum, demir, pirinç, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri, süper alaşımlar, titanyum alaşımları ve diğer alaşımların toz boyutuna indirilmesi için kullanılan oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Atomizasyon, toz üretim yöntemleri içerisinde en çok kullanılan ve üretim hacmi en yüksek olan yöntemdir. Bu durumun nedeni önceden alaşımlandırılmış malzemelerin toz hale getirilmesi sadece atomizasyon yöntemi ile yapılabilmekte ve bu avantajına bağlı olarak toz üretimi yöntemleri içerisinde en baskın yöntem olmaktadır. Atomizasyon ile üretilen alaşım tozlarının her bir tozun bileşimi birbirleriyle aynı olmaktadır [28].

Atomizasyon işlemi, toz haline getirilmek istenen malzemenin ergitilerek sıvı hale getirilmesi ile başlar. Sıvı haldeki malzeme, gaz veya sıvı bulunan bir ortam içerisine püskürtülür. Sıvı malzeme püskürtülen ortamda küçük damlacıklar haline gelir. Damlacıklar ortam yüzeyine çarpmadan ve birbirleriyle birleşmeden püskürtülmeyle eş zamanlı olarak hızlı soğutulmasıyla katı tozlarının üretimi gerçekleşmiş olur [42].

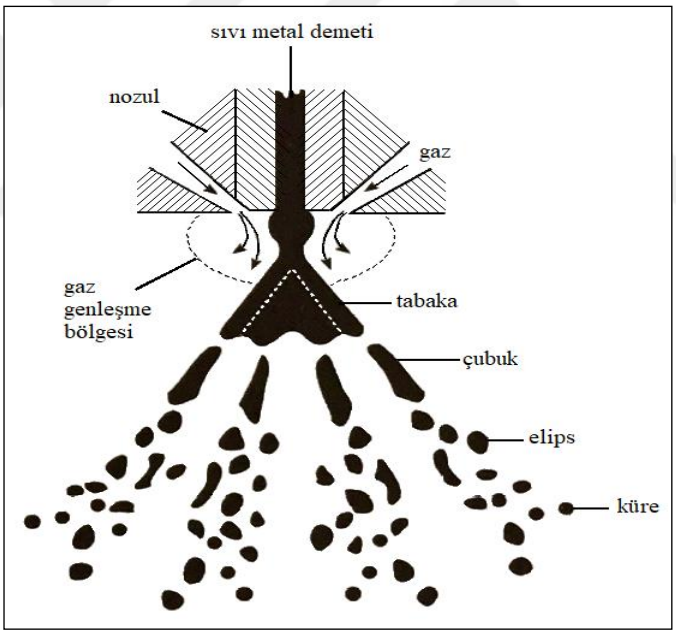
Üretilen toz partiküllerinin boyut, şekil vb yapısal özellikleri; ergitme sıcaklığı, sıvı malzemenin viskozitesi ve yüzey gerilimi, soğutma koşulları gibi atomizasyon koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Sıvı malzemenin aşırı ısıtılması ve sıvı malzemeye uygulanan mekanik enerjinin arttırılmasıyla, toz boyutunun azaldığı ve ince tozların üretilebildiği bilinmektedir [36].

Atomizasyon ile tozların üretimi için farklı teknikler kullanılmaktadır. Atomizasyon çeşitleri;

1. Gaz Atomizasyon Yöntemi
2. Su Atomizasyon Yöntemi
3. Savurmalı Atomizasyon Yöntemi
4. Döner Elektrot Atomizasyon Yöntemi
5. Vakum Atomizasyon Yöntemi

2.5.4.1. Gaz atomizasyon yöntemi

Gaz atomizasyonu yöntemi prensip olarak, ergitilerek sıvı hale getirilen malzemenin gaz ile çarptırılarak küçük toz partiküllerinin elde edilmesine dayanmaktadır [43]. Şekil 2.8'de gaz atomizasyonu ile toz malzeme üretim aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.8. Gaz atomizasyonu ile sıvı malzemeden damlacık oluşum aşamaları [37]

Gaz atomizasyon yönteminde atomize edilecek malzemenin türüne göre hava, azot, argon, helyum gibi gazlar kullanılmaktadır. Sıvı malzemenin, gaz jetlerinin üflediği yüksek hızlı gaz ile çarptırılması ile sıvı metale enerji aktarılır. Kararlı haldeki sıvı malzeme aldığı enerji ile kararsız hale geçer ve sıvı metalin gazla çarpıştığı yüzey boyunca yüzey bozunmaları oluşur. Yüzey şekli değişiminin artması ile sıvı metal bütünlüğünü kaybederek küçük sıvı parçacıkları oluşur. İlk zamanda oluşan bu

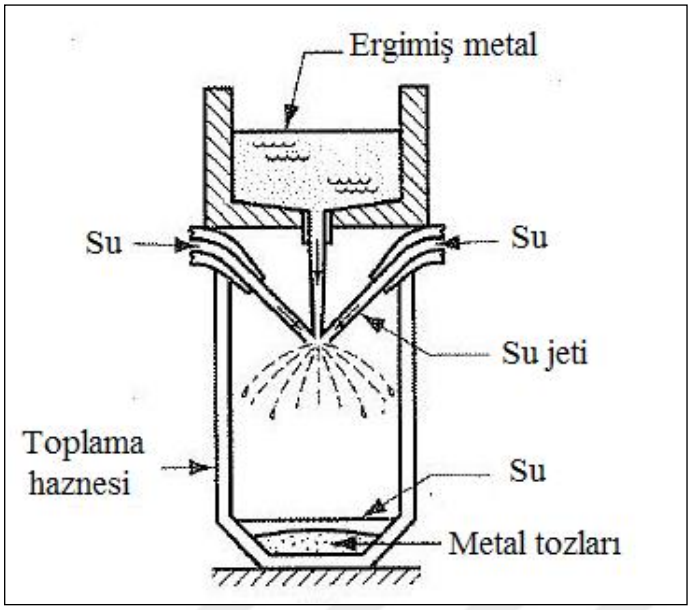
parçacıkların şekilleri çubuk veya pulsu şekildedir. Sıvı metal, yüksek hızlı gazdan enerji almaya devam eder ve parçacıklar parçalanarak küçük küresel damlacıklar haline gelir. Atomizasyon ünitesinde ilerleyen damlacıklar soğuyarak katılaşır ve küresel toz taneleri elde edilmiş olur [43].

Küresel toz üretmek için kullanılan en yaygın toz üretim yöntemi gaz atomizasyon yöntemidir [43]. Gaz atomizasyon yöntemiyle aluminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, çinko, kalay, kurşun, nikel alaşımları ve benzeri değerli metallerin tozlarının üretiminde kullanılmaktadır. Gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen tozların boyutları ortalama 10-300 μm arasında değişmektedir [44]. Gaz atomizasyonu ile üretilen tozların özellikleri, gazın tipine, gaz hızına, gaz sıcaklığına, gaz basıncına, atmosfere, sıvı malzemenin bileşimine, sıvı malzemenin sıcaklığına, hızına ve viskozitesine, nozul geometrisine bağlı olarak değişmektedir [36].

2.5.4.2. Su atomizasyon yöntemi

Su atomizasyon yöntemi çalışma prensibi olarak gaz atomizasyon yöntemine benzerdir. Aralarındaki fark sıvı metalin atomizasyonu gaz yerine basınçlandırılmış su ile gerçekleşmektedir. Su atomizasyonunda suyun basıncı, gaz atomizasyonundaki gazın basıncına göre daha yüksektir. Su atomizasyonu, bakır, bakır alaşımları, nikel, nikel alaşımları, paslanmaz çelikler, takım çelikleri, presleme ve sinterleme için yumuşak manyetik tozların üretimi için kullanılmaktadır [28].

Ergime sıcaklığı 1600°C'den düşük olan az reaktif malzemelerin toz haline getirilmesi için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.9'da su atomizasyon ünitesi görülmektedir [45]. Su atomizasyon yönteminde sıvı metalin atomizasyonu için genellikle su kullanılmakla birlikte bazı malzeme türleri için yağ da kullanılmaktadır. Su jetlerinin ürettiği yüksek basınçlı su, sıvı metal demetiyle çarpışır ve sıvı metalin parçalanıp katılaşmasını sağlar. Su atomizasyon ünitelerinde birden fazla su jeti kullanılmaktadır [37].



Şekil 2.9. Su atomizasyon ünitesi [45]

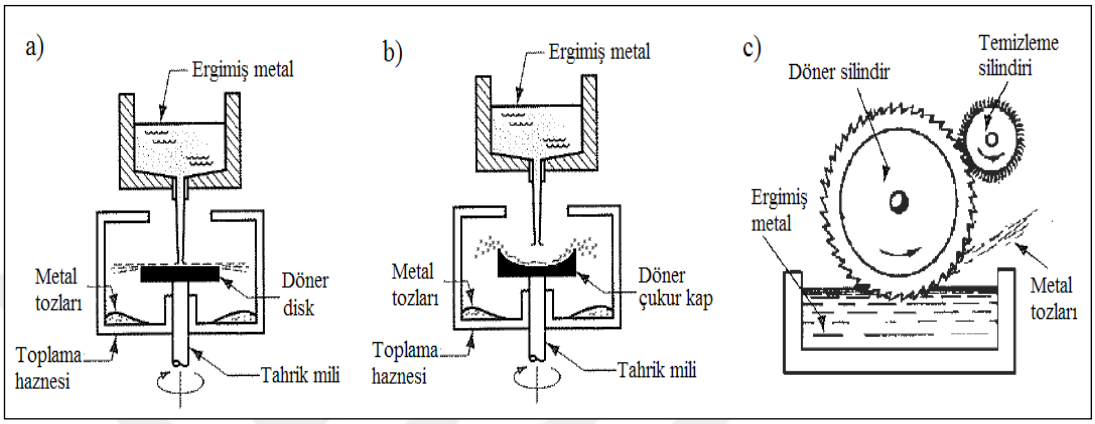
Sıvı metalin soğuma hızı gaz atomizasyon yöntemine göre daha hızlıdır ve hızlı soğumaya bağlı olarak elde edilen tozların şekilleri düzensizdir. Yöntemin dezavantajı ise su kullanımından dolayı toz partiküllerinin yüzeyleri oksidasyona uğramasıdır. Yöntemde su yerine yağ kullanılması durumunda tozların oksidasyona uğrama riski engellenir fakat yağ kullanımından dolayı üretim maliyetleri artmaktadır [45].

Genel olarak su atomizasyon yöntemi diğer atomizasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında üretim maliyetleri daha azdır. Maliyetlerin az olmasının nedeni, atomizasyonda gazın basınçlandırılması için gereken enerjinin suya göre daha fazla olması, kullanılan suyun maliyetinin az olması ve su atomizasyonun verimliliğinin daha fazla olmasıdır [28]. Su atomizasyonu yönteminde elde edilen tozların özelliklerini birçok etken etki etmektedir. Bu değişkenler, nozul çapı, metalin yoğunluğu, ergiyik metalin yüzey gerilimi, ergiyik metalin viskozitesi, suyun basıncı, su jetinin geometrisi ve su püskürtme açıları, atomizasyon ortamı ve benzeri değişkenlerdir [46].

2.5.4.3. Savurmalı atomizasyon yöntemi

Savurmalı atomizasyon yöntemi, ince metal tozlarının üretimi için ideal atomizasyon yöntemlerinden birisidir. Savurmalı atomizasyon yönteminde tozlar, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle üretilmektedir. Savurmalı atomizasyon yöntemine santrifüj

atomizasyon yöntemi de denmektedir. Dikey eksende dönen bir disk, çukur bir kap veya bir silindir üzerine dökülen ergitilmiş metalin, dönme hareketinden dolayı küçük damlacıklar halinde etrafa saçılması ve damlacıkların saçılırken soğuyup katılaşması sonucu küçük toz partikülleri üretilmektedir. Şekil 2.10'da savurmalı atomizasyon yönteminin farklı uygulamaları görülmektedir [47].



Şekil 2.10. Savurmalı atomizasyon yönteminin farklı uygulamaları a) döner disk, b) döner çukur kap, c) döner silindir [45, 46]

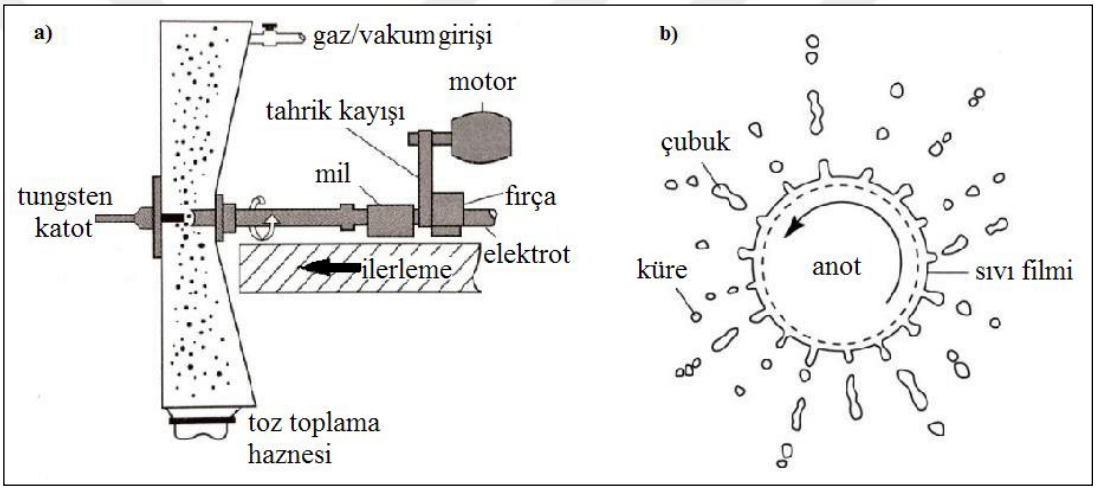
Atomizasyon sonucu ince taneleri tozların üretilmesi için ergitilmiş metalin diskin üzerinde ince sıvı film tabakası olarak yayılması gerekmektedir. Diskin yüzeyini tamamen ıslatan ergiyik metal, disk yüzeyinde serbestçe akar ideal dönme hızına ulaşıldığında ergimiş metal disk kenarından damlacıklar halinde saçılır. Bu ince metal damlacıklarının atomizasyon ünitesi duvarına çarpmadan önce soğuyarak katılaşması gerekmektedir. Bu yöntem ile Sn, Pb, Al, Mg, Zn, Ti, Ni ve bu malzemelerin alaşımları toz halinde üretilebilmesi mümkündür [47].

Savurmalı atomizasyon yöntemleri, gaz ve su atomizasyon yöntemlerine göre enerji verimliliği daha yüksek bir üretim yöntemidir. Bu yöntemle üretilen toz partiküllerinin boyut dağılım aralığı oldukça dardır [28]. Üretilen toz partiküllerinin boyutları birbirlerine yakındır. Genellikle üretilen tozların şekilleri küreseldir [37].

2.5.4.4. Döner elektrot atomizasyon yöntemi

Döner elektrot atomizasyon yönteminde tozun üretimi, anot katot reaksiyonları ile gerçekleşmektedir. Yöntemde katot malzemesi tungsten, tüketilen anot ise toz halinde üretilmek istenen malzemedir. Döner elektrot atomizasyon ünitesi Şekil 2.11.a'da görülmektedir. Anot elektrot bir mil tarafından döndürülmekte ve

uygulanan bir plazma arkı veya sabit tungsten katodun uyguladığı voltaj ile ergitilir. Anot elektrotun ergimesi, anot elektrotun ucunda damlacıkların oluşumu ile gerçekleşir ve dönmenin etkisiyle damlacıklar etrafa saçılır. Saçılan damlacıkların oksidasyonunu önlemek için reaksiyon asal gazın bulunduğu ortamında veya vakum altında gerçekleştirilir. Saçılan damlacıklar bu koruyucu ortam içerisinde soğuyarak katılaşır ve toplama haznesinde biriktirilir. Anot elektrot ergidikçe kullanılan mekanizma ile hazne içerisine doğru beslenir. Elektrota voltajın uygulanması hazne dışındaki sürtünme fırçası ile gerçekleştirilir. Şekil 2.11.b'de saçılan damlacığın yüzeyinde oluşan sıvı filmin merkezden dışarıya doğru yayılması ve dönmenin etkisiyle saçılması şematik olarak gösterilmiştir [48].



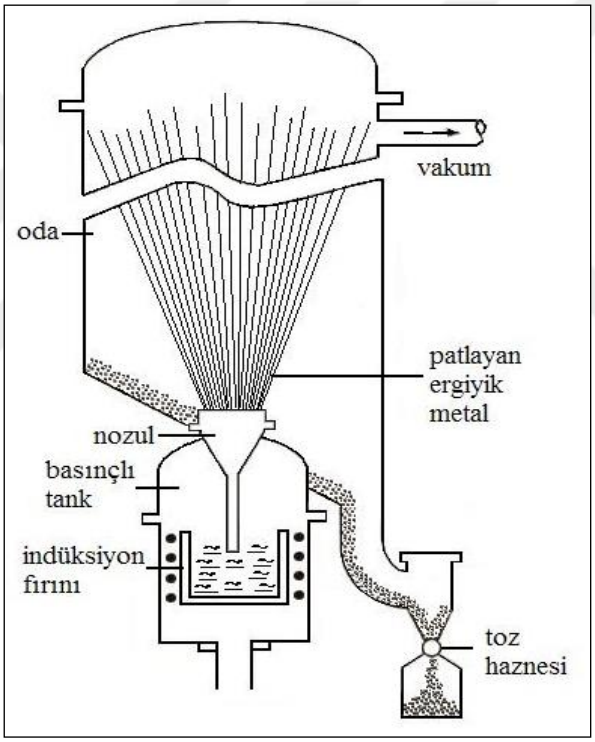
Şekil 2.11. a) Döner elektrot atomizasyon işlemi, b) damlacık davranışı [48]

Döner elektrot atomizasyon yönteminde üretilen tozlar genellikle küresel şekillidir ve ortalama 250 µm boyutlarındadır. Küçük boyutlu tozların üretimi, anodun yüksek hızda döndürülmesi ve ergitildiğinde düşük yüzey enerjisine sahip metallerin kullanımı ile gerçekleşmektedir. Yöntemin dezavantajları ise yüksek donanım ve işletme maliyetleri, düşük üretim hızı ve büyük toz partikül boyutlarıdır [37].

2.5.4.5. Vakum atomizasyon yöntemi

Vakum atomizasyonu ya da diğer adıyla ergiyik patlatma atomizasyon yöntemi, ergimiş metalin gaz çözünürlülüğünün basınç değişikliğine bağlılığını kullanarak toz üretimi yapılan bir yöntemdir. Bu yöntemle elde edilen tozların partikül şekilleri ve partikül boyut dağılım özellikleri gaz atomizasyon yöntemiyle elde edilen tozlara benzer özelliktedir [38].

Vakum atomizasyon ünitesi Şekil 2.12'de görüldüğü gibi üstte atomizasyon odasının, altta ise metal ergitme potasının bulunduğu iki bölümden oluşmaktadır. Bu iki bölüm, üzerinde sıvı metalin geçebileceği boruların bulunduğu bir plaka ile ayrılmıştır. Toz haline getirilmek istenen metal indüksiyon fırınında ergitilir, ardından ergimiş metal hidrojen gazı kullanılarak basınçlandırılır ve vakum atomizasyon odasına doğru püskürtülür. Plakanın üzerinde bulunan borulardan geçerek vakum ortamına giren basınçlı ergimiş metal, hızlı basınç değişime uğrar. Basınç değişimine bağlı olarak ergimiş metalin hidrojenden ayrışır ve parçalanarak küçük damlacıklar halinde saçılır. Oluşan küçük damlacıklar katılaşır ve ardından toz biriktirme haznesinde toplanır [37].



Şekil 2.12. Vakum atomizasyon ünitesi [37]

Vakum atomizasyon yöntemi ile nikel, bakır, kobalt, demir ve aluminyum bazlı alaşım tozları üretilebilmektedir. Elde edilen tozlar diğer üretim yöntemlerine göre elde edilen tozlara göre daha temiz, küresel ve yüksek saflıktadır. Vakum atomizasyonu ile elde edilen tozların uygulamaları, gaz türbin disklerinin üretiminde ve karmaşık parçaların enjeksiyonlu kalıplama yöntemiyle üretimi gibi ürünlerdir [25].

2.6. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama yöntemi, harmanlanmış elementel toz karışımlarından homojen bileşime sahip malzemelerin üretilmesine olanak sağlayan bir toz işleme tekniğidir. Mekanik alaşımlama yöntemi, 1966 yılında, International Nickel Company (INCO)'e bağlı Paul D. Araştırma Laboratuvarında John Benjamin ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir. Araştırmacılar, gaz türbinlerinde kullanılması için nikel bazlı bir süper alaşım üretmek için çalışmalar yapmışlardır ve bu çalışmalar sonucunda mekanik alaşımlama yöntemini ortaya çıkarmışlardır [49].

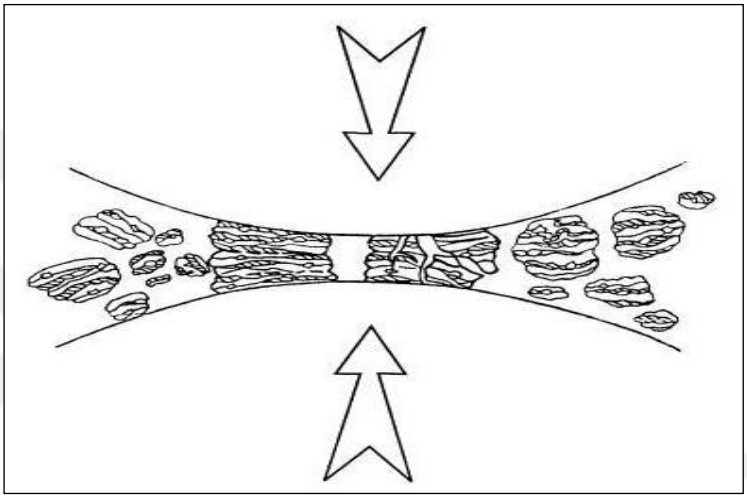
Mekanik alaşımlama yönteminin temel prensibi, öğütme yöntemine benzerdir. Bu iki yöntem birbirinden başlangıçta kullandıkları toz karışımının durumuna ve işlem adımlarına göre ayrılmaktadır. Öğütme yönteminde amaç toz boyutunun küçültülmesidir ve bu amaçla başlangıç tozu aynı kimyasal bileşime sahip tozudur. Mekanik alaşımlama yönteminde ise farklı kimyasal bileşime sahip metallerden, seramiklerden veya alaşımlardan oluşan tozların birlikte öğütülerek toz boyutlarının küçültülmesini ve tozların birbirleriyle alaşım oluşturmasını sağlayan bir yöntemdir [50].

Mekanik alaşımlama tekniği ile üretim çeşitli avantajlar sunmaktadır. Mekanik alaşımlama, hem denge hem de denge dışı fazlarını sentezlenmesi için basit ve kullanışlı bir yöntemdir. Yöntem sağladığı teknik üstünlüklerle birlikte aynı zamanda ekonomiktir. Tozların katı halde işlendiği mekanik alaşımlamada faz diyagramların getirdiği sınırlamalar mekanik alaşımlama yönteminde geçerli değildir. Bu özelliğinden dolayı mekanik alaşımlamanın en önemli avantajlarından birisi, başka yöntemlerle alaşımlandırılması mümkün olmayan elementlerin alaşımlandırılmasıdır. Ergime dereceleri birbirinden oldukça farklı olan malzemelerin alaşımları oluşturulabilmektedir. İşlem sonunda homojen dağılmış ve nano boyuttaki tozlar elde edilmektedir. Basit ama etkili olan bu toz işleme tekniği metallere, seramiklere, polimerlere ve kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır [28].

2.6.1. Mekanik alaşımlama mekanizması

Mekanik alaşımlama yönteminin prensibi, bir kap içerisine öğütücü bilyelerle konulan harmanlanmış elementel veya önceden alaşımlandırılmış toz partikülleri,

kabın döndürülmesiyle bilyelerin tozları ezmesi ile yüksek deformasyona uğrarlar. İşlem sırasında toz partikülleri yassılaşır ve tozlar birbirleriyle soğuk kaynaklanır. Soğuk kaynaklanan tozlar deformasyonlar kırılır, ardından tekrar soğuk kaynaklanırlar. Bu soğuk kaynaklanma ve kırılma döngüsü sonucunda alaşımlanmış toz partikülleri elde edilir. Tozların soğuk kaynaklanma ve kırılma döngüsü, genellikle başlangıçta kullanılan tozların deformasyon karakteristiğine göre değişmektedir [50]. Şekil 2.13'de mekanik alaşımlama işleminde iki bilye arasında kalan toz partikülleri görülmektedir.



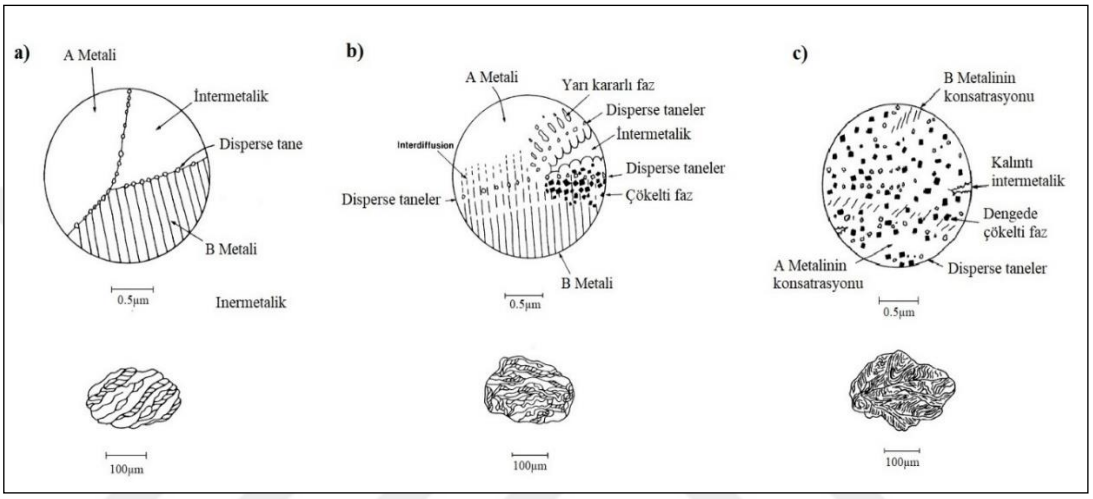
Şekil 2.13. Mekanik alaşımlama işleminde bilyelerle tozların çarpışması [50]

Mekanik alaşımlama işleminde meydana gelen fiziksel değişimi anlaşılması için alaşımlama sürecini üç aşamada incelenmesi gerekmektedir. Alaşımlamanın ilk aşamalarında, toz partikülleri yumuşak yapıdadır ve yumuşak toz partikülleri birbirleriyle soğuk kaynaklanır. Soğuk kaynaklanma sonucu tozlar birleşerek daha büyük boyutlu, katmanlı yapıdaki toz partikülllerini oluştururlar. Oluşan katmanlı yapının boyutları, başlangıçtaki toz boyutlarının üç katına kadar çıkabilmektedir [50].

Alaşımlamanın orta aşamalarında, tozlar arasında soğuk kaynaklanma ve kırılma mekanizmaları görülür. Soğuk kaynaklanma ve kırılmalar sonucunda tozlarda dislokasyonların, kafes boşluklarının ve tane sınırlarının sayısında artış meydana gelir. Bu artış, tozlar sertleşerek deformasyon sertleşmesi gerçekleşir. Bilyelerin tozlarla çarpışması sonucu tozlar enerji kazanır, tozların sıcaklıkları artar ve tozların

difüzyonu kolaylaştırır. Difüzyonun kolaylaşması ile birlikte yeni fazların oluşumu meydana gelmektedir [50].

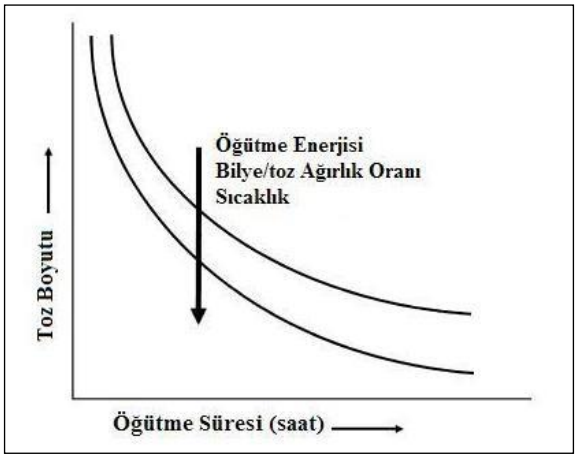
Alaşımlamanın son aşamasında, soğuk kaynaklanma ve kırılma mekanizmaları denge haline gelir. Toz katmanları daha ince hale gelir ve homojen bileşime sahip alaşımlanmış tozlar elde edilerek kararlı yapı elde edilir. Şekil 2.14'te mekanik alaşımlama aşamaları görülmektedir [50].



Şekil 2.14. Mekanik alaşımlamanın aşamaları a) başlangıç aşaması, b) orta aşama, c) son aşama [50]

Homojen yapıda malzemelerin üretilmesinde önemli role sahip olan mekanik alaşımlama yöntemi, alaşımla süresince çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Alaşımlama için kullanılan öğütücünün tipi, bilyelerin büyüklükleri ve bilye malzemesi, alaşımlama atmosferi, alaşımlama için eklenen ilaveler, bilye-toz ağırlık oranı, alaşımlama sıcaklığı ve alaşımlama süresi elde edilen tozların özelliklerini etkilemektedir [49].

Bu faktörlere ek olarak uzun sürelerde mekanik alaşımlama yapılması durumunda öğütücü içinde kirlenmeler meydana gelebilir ve istenmeyen fazlar oluşabilir. Bu durumu engellemek için tozların alaşımlanması için süre iyi ayarlanmalıdır [50]. Şekil 2.15'de bazı faktörlerin toz boyutuna nasıl etki ettiği gösterilmektedir.



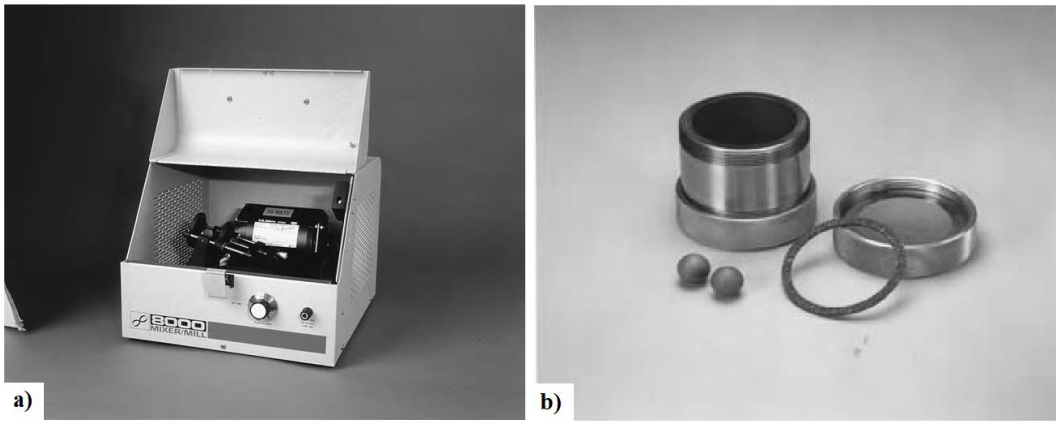
Şekil 2.15. Toz boyutuna etki eden bazı faktörler [50]

2.6.2. Mekanik alaşımlama ekipmanları

Mekanik olarak alaşımlandırılmış tozların üretilebilmesi için farklı tiplerde yüksek enerjili öğütücü ekipmanları kullanılmaktadır. Bu öğütücüler tasarımları, kapasiteleri, öğütme verimleri bakımından birbirlerinden ayrılmaktadırlar [50]. Alaşımlama için kullanılan öğütücü çeşitleri, SPEX öğütücüler, gezegen tipi öğütücüler ve atritör tipi öğütücülerdir. Mekanik alaşımlamada kullanılan ekipmanlar daha önce bahsedilen toz öğütücü ekipmanlarıyla hemen hemen aynıdır.

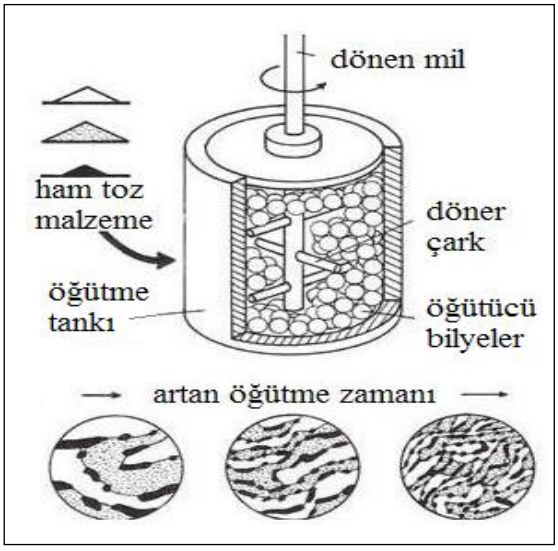
Tek işlemde yaklaşık 10-20g civarında toz öğütebilen SPEX öğütücüler, araştırmacılar tarafından laboratuvarlarda en çok tercih edilen öğütücü tipidir. SPEX öğütücüler, başlangıç tozlarının ve bilyelerin içine konacağı bir kavanozdan, sızdırmazlığı sağlamak için kilit mekanizmasından ve alaşımlamayı sağlayan sarsıntıyı üreten cihazdan oluşmaktadır. İleri geri hareket eden kavanoz, yanal hareketlerle birleşerek 8 şeklinde bir hareket sergilemektedir. Uygulanan çalkalama hareketi sonucunda kavanoz içindeki bilyeler tozlarla çarpışır ve alaşımlama işlemi gerçekleştirilir. SPEX değirmenleri, tungsten karbür, silisyum nitrür, paslanmaz çelik, plastik gibi farklı malzemelerden imal edilmektedir. Şekil 2.16'da SPEX tipi öğütücü ve değirmen görülmektedir [49].

Mekanik alaşımlama yapmak için kullanılan bir başka öğütme tipi de gezegen tipi öğütücülerdir. Gezegen tipi öğütücüler, birkaç yüz gram tozun aynı anda öğütülmesine imkan vermektedir. Bu yöntem adını kavanozun gezegen hareketi yaparak alaşımlama yapmasından almaktadır [51].



Şekil 2.16. a) SPEX tipi öğütücü, b) Tungsten karbür değirmen [50]

Mekanik alaşımlama için kullanılan atritör değirmenleri, soğutma işlemi yapabilen özel bir kap, öğütücü bilyeler, soğutma sıvısı, sıvının hareketini sağlayan bir pompa mekanizması ve içerisinde karıştırma kollarına sahip dönebilen bir milden oluşmaktadır. Atritör içine konulan tozlar, karıştırma milinin dönmesiyle hareket eden bilyeler tozları küçük parçalara ayrılır. Öğütücü bilyeler tozları parçalarken açığa çıkan sıcaklık atritör üzerinden kontrol edilebilmektedir. Şekilde 2.17'de atritörde mekanik alaşımlama işlemi ve mikro yapıda görülen değişiklikler gösterilmektedir [38].



Şekil 2.17. Atritörde yapılan mekanik alaşımlama işlemi ve mikro yapıdaki değişim [51]

2.7. Tozların Şekillendirilmesi

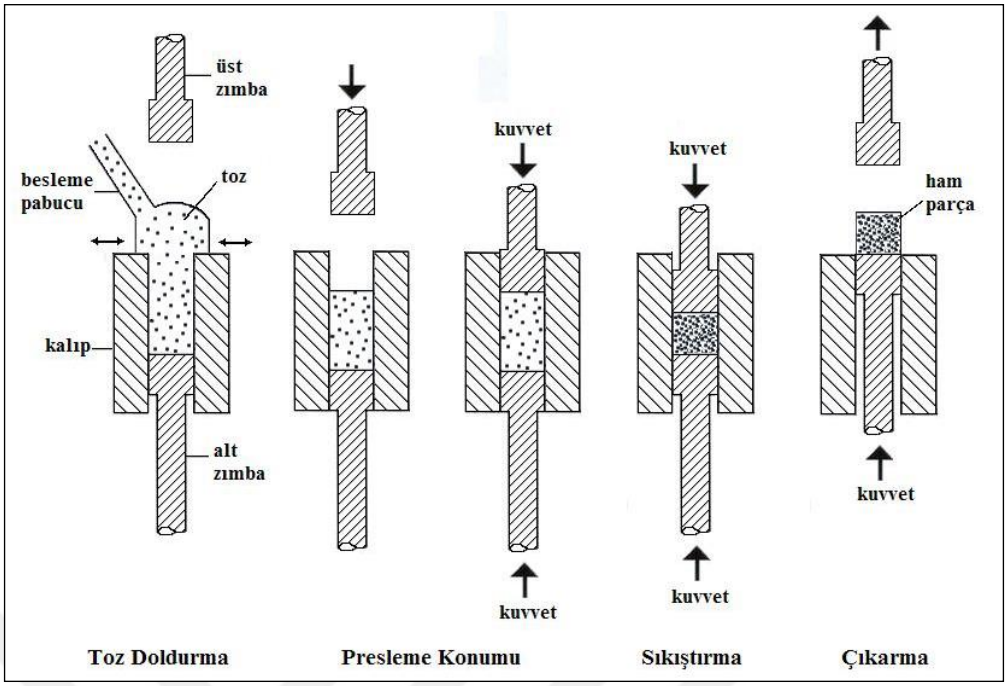
Tozların şekillendirilmesi, toz partiküllerinin istenilen şekle dönüştürülmesi için belirlenen basınç altında yoğunluk kazandırma işlemidir. Tozların sıkıştırılması işleminde kalıp içerisine konulan tozlar, basıncın etkisiyle kalıp içerisinde hareket ederler. Düşük yoğunluğa sahip tozların temas yüzeyleri az olduğu için tozların hareketi daha kolay olmaktadır. Sıkışma, genellikle presleme kuvveti doğrultusunda ve kalıbın yan yüzeylerinde meydana gelir. Sıkıştırma işlemi uygulanırken, tozlara plastik deformasyon uygulanır. Plastik deformasyona bağlı olarak tozlarda bulunan boşlukların sayısı azalarak tozların yoğunluğu artar. Presleme kuvvetinin artışı ile tozlarda plastik deformasyon sertleşmesi görülür ve sıkıştırma sonrası elde edilen ürünlerin mikro sertliklerinde artış gözlemlenir [52].

Şekillendirme işlemi sonunda tozlar, istenen nihai boyutlara yakın boyutlarda ve şekilde ürün elde edilir. Şekillendirilmiş olan ürün, şekillendirmeden sonra uygulanacak işlemler için yeterli dayanıklılığa sahip olur [25]. Tozlar farklı teknikler kullanılarak şekillendirilebilmektedir.

2.7.1. Kalıpta presleme

Kalıpta presleme yöntemi, kullanımı en yaygın olan konvansiyonel şekillendirme yöntemidir. Kalıpta preslemeden sonra sıkıştırılmış tozlarda, %90'a varan teorik yoğunluk elde edilebilmektedir. Bu işlemin süresi, küçük parçalar için birkaç saniye gibi oldukça düşük sürelerdir [25]. İşlem sonucunda üretilen sıkıştırılmış toza ham parça adı verilir. Presleme sonrası ölçülen yoğunluğa ham yoğunluk, mukavemete ise ham mukavemet denilmektedir [37].

Presleme sistemi alt zımba, üst zımba ve kalıptan oluşmaktadır. Yöntem uygulanan basıncın tek veya çift yönlü etki etmesine göre değişmektedir. Basıncın sadece üst zımbaya uygulandığı presleme işlemine tek yönlü presleme denilmektedir. Tek yönlü preslemede alt zımba ve kalıp sabit olup, üst zımba hareketlidir. Basıncın alt ve üst zımbaların her ikisinden de uygulandığı toz presleme işlemine çift yönlü presleme denilmektedir. Çift yönlü preslemede sadece kalıp sabit olup, zımbalar hareketlidir [37].



Şekil 2.18. Çift yönlü preslenmede tozların preslenmesi aşamaları [53]

Şekil 2.18'de çift yönlü presleme işlemi aşamaları görülmektedir. Üretilmek istenen parçaya göre tasarlanan kalıp, prese montajı yapılır. Toz partikülleri kalıp boşluğuna besleme pabucu yardımıyla doldurulur ve doldurulan tozların kalıba düzgün bir şekilde yerleşmesi için titreşim uygulanır. Üst zımba tozları preslemek için kalıp boşluğuna konumlandırılır. Bir sonraki aşamada alt ve zımbanın uyguladığı kuvvet ile kalıp içerisindeki tozların sıkıştırılması gerçekleştirilir. Zımbalara uygulanan kuvvetin etkisiyle tozlar, belirli bir mukavemet ve yoğunluk kazanarak birleşir. Son aşamada mukavemet ve yoğunluk kazanan ham parça alt zımbanın hareketiyle kalıp içerisinden çıkarılarak işlem tamamlanır [53].

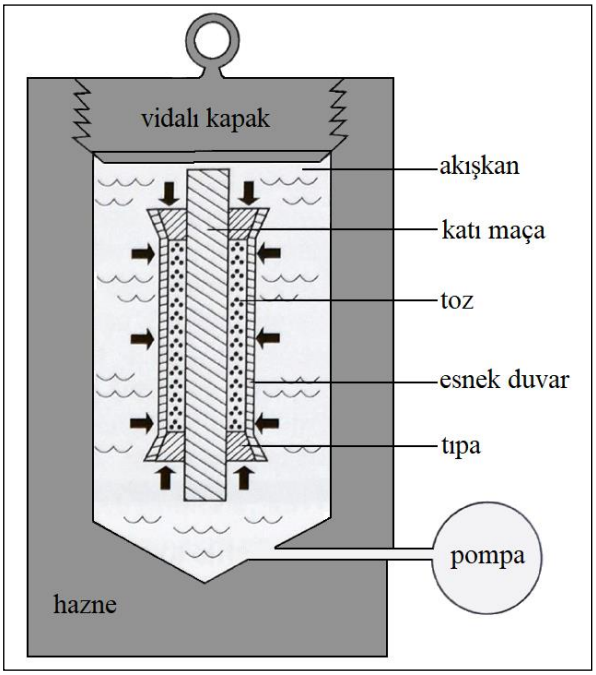
Kalıpta presleme hızlı ve basit bir toz şekillendirme yöntemidir. Elde edilen ham parça belirli bir yoğunluk kazanır fakat parçanın yoğunluğu kendi içerisinde farklılık göstermektedir. Ham parçanın alt ve üst bölgelerinde yüksek yoğunluk elde edilirken, parçanın merkezinde nispeten daha düşük yoğunluklu nötr bölge elde edilir [25].

2.7.2. İzostatik presleme

İzostatik presleme, sıkıştırılabilen esnek ve sızdırmaz bir malzemeden yapılmış kalıp içerisine konulan toz partiküllerinin, kalıbın tüm yüzeylerinden uygulanan yüksek

basınç ile sıkıştırılarak şekillendirilmesi işlemidir. Bu yöntemle üretilen parçaların yoğunluğu parçanın uzunluk çap gibi boyutlarından bağımsız olarak her yerinde eşittir. Homojen yoğunluk dağılımı, kalıbın tüm yüzeylerinden homojen olarak etki eden basınçtan ve kalıp duvarında sürtünmelerin olmamasından dolayı sağlanmaktadır. Karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi için oldukça uygun bir yöntemdir. Soğuk izostatik presleme ve sıcak izostatik presleme olmak üzere iki farklı şekilde uygulanma biçimi bulunmaktadır [54].

Soğuk izostatik presleme işleminde, sıkıştırma işlemi su veya yağ gibi bir akışkan kullanılarak gerçekleştirilir. Esnek bir kalıp içerisine konulan toz partikülleri, hazne içerisinde bulunan akışkan içine yerleştirilir. Akışkan, pompa kullanılarak basınçlandırılır ve oluşan bu basınç esnek kalıba etki ederek kalıp içindeki tozun sıkıştırılmasını sağlar. Bu şekilde 1400 MPa'a kadar sıkıştırma basıncı elde edilebilirken, işlem genellikle 350 MPa'ın altındaki basınçlarda gerçekleştirilir [25]. İşlemde kullanılan kalıp genellikle polivinil klorür, kauçuk veya elastomer gibi esnek malzemelerden yapılmaktadır. Esnek kalıp kullanımı yöntemi, karmaşık şekilli parçaların üretimi için uygun bir yöntem hale getirmektedir [54]. Kalıp maliyetleri kauçuk kullanımından dolayı oldukça düşüktür [25].

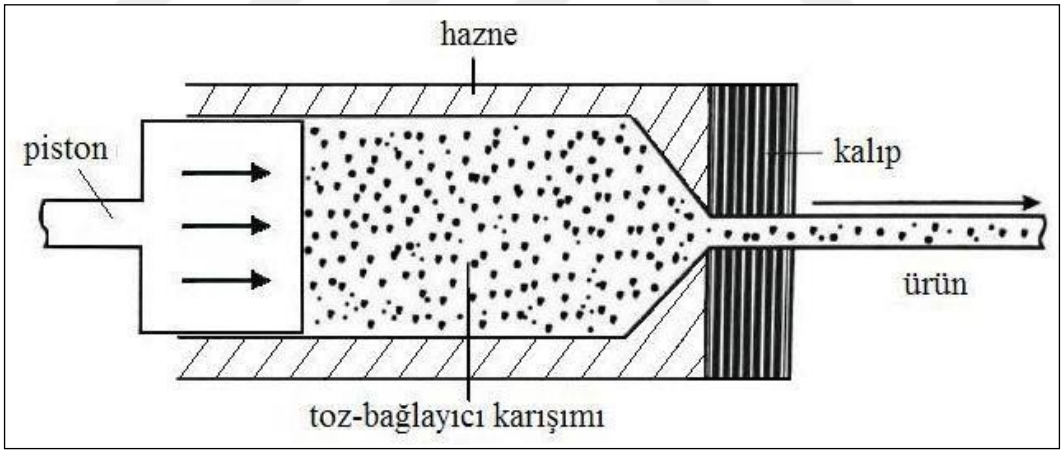


Şekil 2.19. Soğuk izostatik presleme ünitesi [37]

Sıcak izostatik presleme yönteminin soğuk izostatik yönteminden farkı, hazne içerisinde tozun preslenmesi için sıvı yerine Argon gibi bir soy gaz kullanılmasıdır. Yöntemde, 100-330 MPa aralığında basınçla presleme yapılabilirken sıcaklık 1750°C'ye kadar çıkabilmektedir [55]. Sıcak izostatik presleme ile teorik yoğunluğa yakın yoğunlukta, iyi yüzey kalitesine sahip, korozyona karşı dayanıklı, iyi derecede metalürjik bağlanmış ve çok iyi derecede mekanik özelliklere sahip ürünler üretilebilmektedir. Yöntem havacılık endüstrisi için parça üretiminde tercih edilmektedir [36, 54].

2.7.3. Ekstrüzyon ile presleme

Ekstrüzyon ile tozların şekillendirilmesi daha çok, kapasitör, kaynak çubukları, tüpler, matkap uçları gibi ürünlerin üretilmesi için tercih edilen bir yöntemdir [37]. İşlem oda sıcaklığında veya sinterleme sıcaklığı gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.20'de ekstrüzyon ile presleme yöntemi gösterilmektedir.



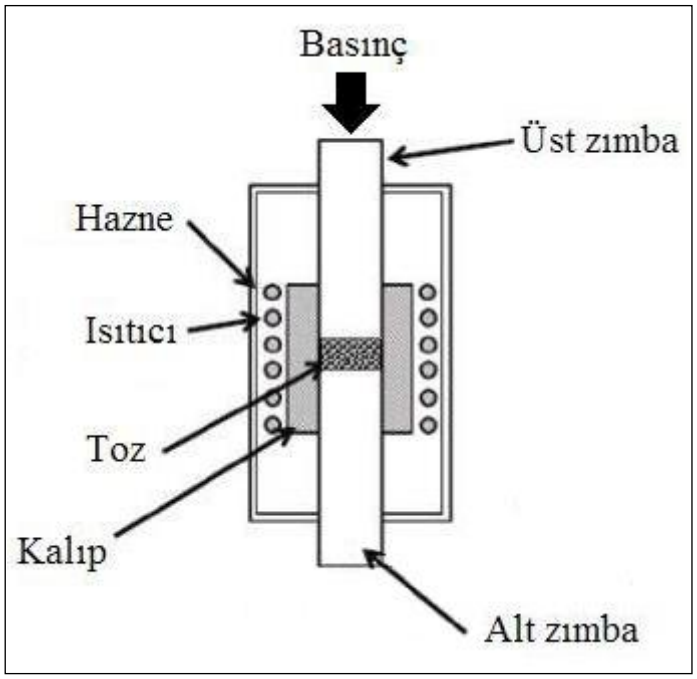
Şekil 2.20. Ekstrüzyon yöntemi ile toz şekillendirme [37]

Yöntemde toz partikülleri, metil selüloz, sentetik reçine ve mum içerikli organik bağlayıcı maddelerle karıştırılarak hazne içerisine yerleştirilir. Piston hazne içerisindeki toz karışımını kalıba doğru sıkıştırarak toz karışımının şekil alması sağlanır. Üretilen parçanın şekli, kalıbın şekli değiştirilerek ayarlanmaktadır. Üretilen parçaya sinterleme işlemi uygulanacaksa, sinterlemeden önce bağlayıcıların parçadan uzaklaştırılması sağlanır. Bu yöntemle yüksek yoğunluğa sahip parçaların üretilmesi mümkündür. Ekstrüzyon yöntemi, toz metalurjik işlemler kullanılarak üretilebilen

tüm malzemeler için uygun bir yöntemdir. Yüksek sıcaklıkta yüksek sertliğe sahip mühendislik seramikleri, yüksek hız çelikleri, paslanmaz çelikler, Al, Mg, Ti gibi malzemelerden parça üretilebilmektedir [36].

2.7.4. Sıcak presleme

Sıcak presleme işlemi, kalıp içerisindeki toz partiküllerine sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulandığı toz şekillendirme yöntemidir. Toz malzemenin preslenmesi ve sinterlenmesi bu yöntemde aynı anda gerçekleştirilir [56]. Şekil 2.21'de sıcak presleme yönteminin şematik çizimi görülmektedir. Sıcak presleme işlemi kapalı bir hazne içerisinde gerçekleşmektedir. Toz partikülleri, genellikle grafitten yapılan kalıp ve zımbaların içine konur, ardından kalıp hazneye yerleştirilir. Hazne atmosferi elektrik kaynaklı ısıtıcılar kullanılarak ısıtılır ve kalıp içerisindeki toz partikülleri, zımbaların uyguladığı basınç ile sıkıştırılır. Basınç ve sıcaklık presleme işlemi süresince uygulanır, işlem sonunda parça kalıptan çıkarılarak yüksek yoğunluğa sahip parça üretimi geçekleşmiş olur. Sıcak presleme ile yüksek işlem sıcaklıklarına çıkılabilirken, haznenin yüksek sıcaklığa çıkması için uzun ısıtma süresi gerekmektedir. 2500°C'ye kadar ısıtma kapasitesine sıcak presleme ünitesi, 50 MPa basınçla presleme yapabilmektedir [57].



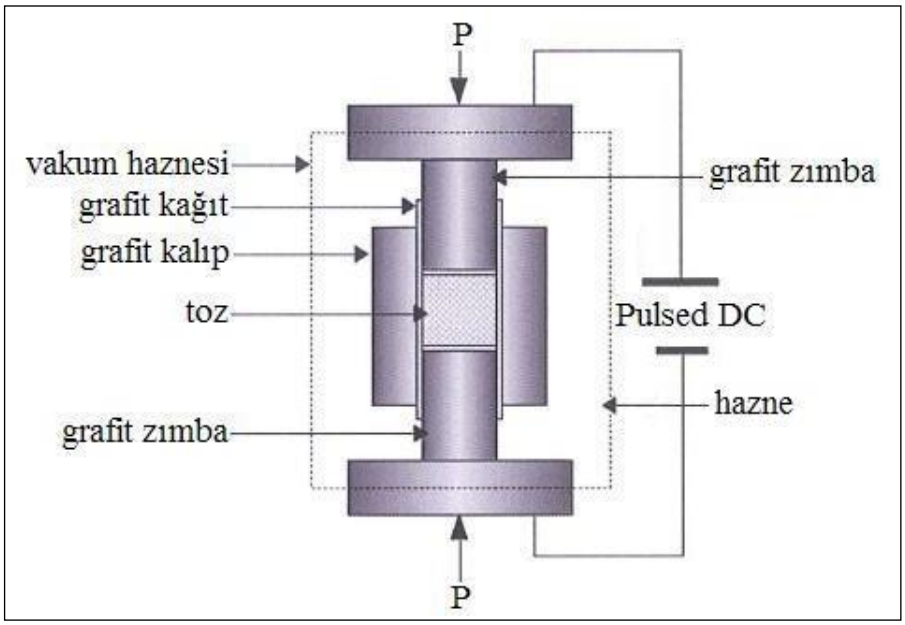
Şekil 2.21. Sıcak preslemenin şematik çizimi [57]

Tozların preslenmesini ve sinterlenmesini tek bir işlemde birleştiren sıcak presleme yöntemi, geleneksel toz birleştiricilere göre birçok avantaj sunmaktadır. Sıcaklık ve basıncın eş zamanlı uygulanmasıyla, teorik yoğunluğa oldukça yakın yoğunluk değerleri elde edilebilmektedir. Kalıp malzemesi, düşük genleşme katsayısı, üretim kolaylığı ve düşük maliyetinden dolayı genellikle grafit tercih edilmektedir [25].

Sıcak presleme yöntemiyle üretilen toz metalürjik parçaların özellikleri, üretimde kullanılan basınç, sıcaklık, zaman, üretim atmosferi gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklığın artışı ile metal toz partiküllerinin plastik deformasyona karşı direncinin azalmasından dolayı sıcak presleme yönteminde toz şekillendirme için çok daha düşük basınçlar yeterli olmaktadır. Yüksek hız takım çelikleri, süper alaşımlar, berilyum ve refrakter metaller, aluminyum ve bakır alaşımları sıcak presleme yöntemiyle üretilebilmektedirler [25].

2.7.5. Spark plazma sinterleme

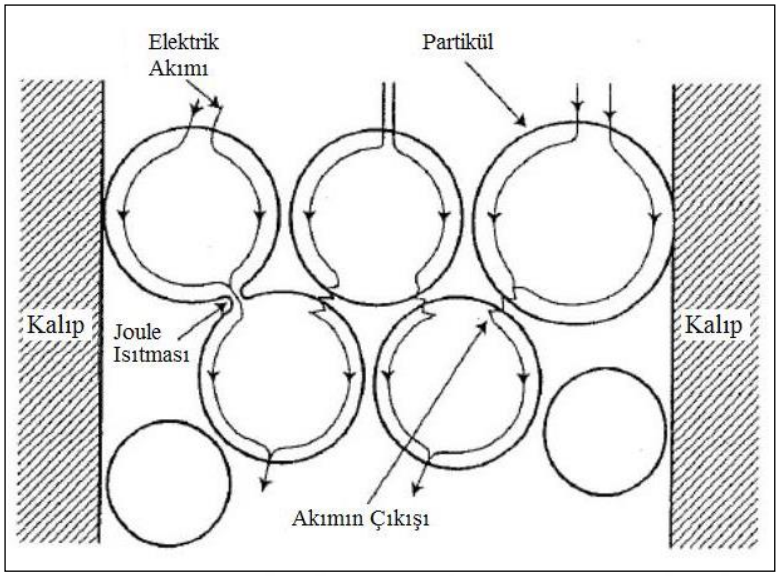
Spark plazma sinterleme yöntemi, toz malzemeye elektrik akımı uygulanarak sinterlemenin daha düşük sıcaklıkta ve sürede gerçekleştirildiği ve sinterleme işlemi ile eş zamanlı olarak tozlara uygulanan basınçla preslemenin yapıldığı bir toz şekillendirme yöntemidir [58]. Şekil 2.22'de spark plazma sinterleme yönteminin şematik çizimi görülmektedir.



Şekil 2.22. Spark plazma sinterleme yöntemi şematik çizimi [59]

Yöntemin keşfi, 1930'lu yılların sonlarına doğru Amerika Birleşik Devletlerinde sinterleme için elektrik enerjisinin kullanılmasıyla gerçekleşmiştir. 1960'lı yıllarda Japon bilim adamları, elektrik akımının kesintili olarak toz malzemeye uygulayarak sinterleme gerçekleştirilmiş ve yöntemin geliştirilmesinde önemli rol oynamışlarıdır. Günümüzde gelişmeye devam eden yöntem, yüksek yoğunlukta parça üretimi ve malzeme özelliklerinin ayarlanabilir olmasından dolayı en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir [58]. Spark plazma sinterleme yöntemi prensip olarak sıcak presleme yöntemine benzemektedir. Spark plazma sinterlemede, sıcak presleme yönteminden farklı olarak tozların ısıtılması harici ısı kaynağı kullanılması yerine toz partiküllerine doğru akım verilmesi ile sağlanır. Bir diğer fark ise spark plazma sinterleme yönteminde ısıtma hızı daha yüksektir. Yöntem argon gazı gibi soy gaz bulunan veya vakum atmosferindeki bir hazne içerisinde gerçekleşmektedir. Grafit kalıp içerisine konulan toz partikülleri grafit zımbalara tek eksende uygulanan basınçla kalıp içerisinde sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemiyle eş zamanlı olarak akım iletebilen grafit zımbalara aralıklı doğru akım uygulanarak tozların içerisinden yüksek yoğunluklu doğru akım geçmesi sağlanır. Toz partikülleri, hem kalıptan geçen hem de tozların içinden geçirilen akımla hızlı bir şekilde ısıtılabilmektedir. İşlem sonucunda sinterlenmiş ve yüksek yoğunluğa sahip parçalar elde edilebilmektedir [60].

Toz partiküllerinin içinden ve kalıp üzerinden geçen akım sayesinde kalıp homojen olarak ısıtılarak sinterleme işlemi daha verimli bir şekilde yapılabilmektedir. Yöntemde uygulanan akımla, kalıp içerisindeki toz partiküllerinin temas noktalarında veya kalıp içi boşluklarda arkların ve sparkların oluşumu gözlenir. Kalıp içi boşluklarda meydana gelen Joule ısıtması ile beraber kalıp içerisinde anlık ve bölgesel olarak yüksek sıcaklık artışı meydana gelmesine sebep olur. Oluşturulan sıcaklık artışı, toz partiküllerinin ergimesine, birbirine yaklaşan taneler arasında boyun oluşumunu sağlar [59]. Şekil 2.23'de kalıp içerisinden geçirilen elektrik akımı ve boyun oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.23. Kalıp içerisinden geçirilen elektrik akımı [59]

Spark plazma sinterleme yöntemi ile diğer yöntemlerle şekillendirilmesi zor olan intermetalik bileşikler, sert metaller, fiber veya partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler, seramikler, polimerler ve manyetik özelliğine sahip malzemelerin üretimi yapılabilmektedir [59].

2.8. Sinterleme

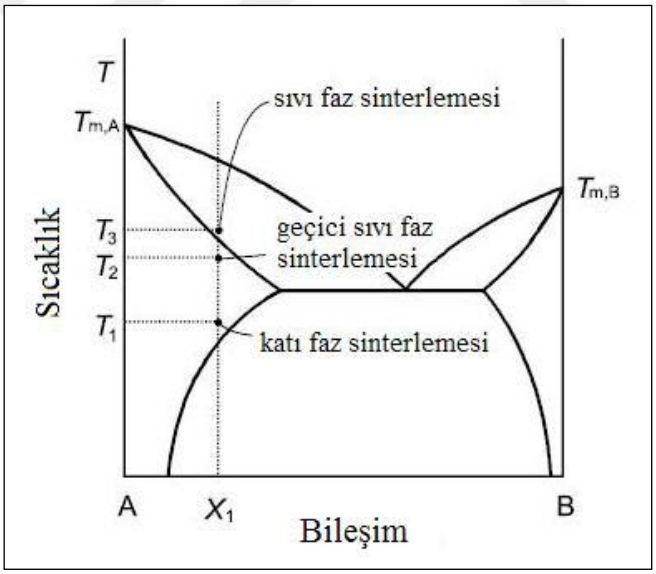
Toz metalurjisinin en önemli üretim adımlarından birisi de sinterleme işlemidir. Sinterleme işlemi, metal veya seramik tozlarına ısı enerjisi uygulanması ile toz partiküllerinin, birbirine bağlanmasını ve dayanım kazanmasını sağlayan, malzemelerin yoğunluk kazandırılması için kullanılan bir toz işleme tekniğidir. Toz metalürjisi yönteminin gelişmesi ile birlikte sinterlemenin de önemi giderek artmaktadır [61].

En eski üretim teknolojilerinden biri olan sinterlemenin geçmişi ilk insanların yaşadığı çağlara kadar gitmektedir. Sünger demirden aletlerin üretimi malzemenin sinterlemesi ile sağlanmıştır. 1940'lı yıllardan itibaren araştırmacılar sinterleme işlemini benimseyerek hakkında bilimsel çalışmalar yapmaya başlamışlardır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarla birlikte sinterleme hakkında önemli gelişmeler yaşanmıştır. Gelişmeler sonucunda toz metalürjik parçaların ve seramik bileşenli malzemeler de dahil olmak üzere her türlü sinterlenmiş parçanın üretimi yapılabilmektedir. Sinterleme genel olarak, işlem değişkenlerinin kontrolü ile

önceden belirlenebilen mikroyapıya sahip parçaların üretimi amaçlanmaktadır. Mikroyapı kontrolü ile tane boyutlarının ayarlanabilmesini, sinterleme işlemi sonunda elde edilecek parça yoğunluklarının ve oluşan fazların dağılımının kontrol edilebilmesini sağlamaktadır [61]. Sinterleme işlemi uygulanan malzemelerin özelliklerinde bazı değimler meydana gelmektedir. Malzemede gerçekleşen bu değişimler genellikle:

- Malzemenin kristal yapısı ve kimyasal bileşimi
- Malzeme içindeki gözeneklerin boyutları ve şekilleri
- Gözeneklerin malzeme içindeki dağılımı
- Malzemedeki ortalama tane sayısı, tanelerin boyutları ve şekilleri
- Tane sınırlarının şekilleri
- Malzemenin dayanımı, elastik modülü, sertliği ve kırılma tokluğu
- Termal ve elektrik iletkenliği
- Sıvı ve gaz geçirgenliği

gibi istenen veya istenmeyen değişimlerdir [51].

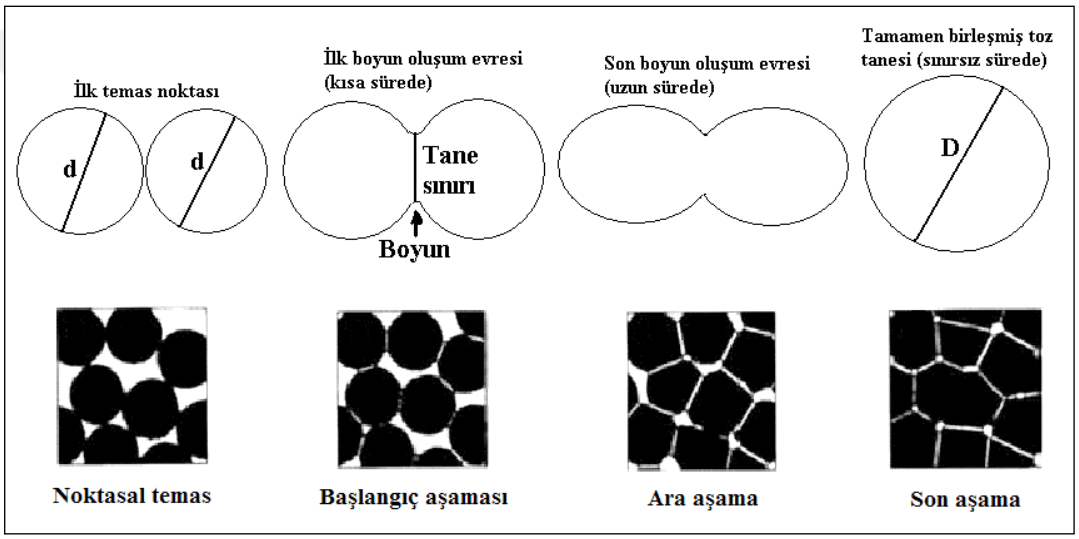


Şekil 2.24. Sinterleme çeşitlerinin faz diyagramında gösterimi [61]

Temel olarak sinterleme işlemi katı hal sinterlemesi ve sıvı faz sinterlemesi olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmektedir.

2.8.1. Katı faz sinterlemesi

Katı faz sinterleme tekniği, tanelerin difüzyonu ve malzemenin taşınımı ile gerçekleşmektedir. Malzemenin difüzyonu yüksek sıcaklıklarda daha kolay olduğu için sinterleme için yüksek sıcaklıklar tercih edilmektedir. Sinterleme işlemi boyunca içyapıda herhangi bir sıvı faz oluşturulmaz, difüzyon ve yoğunluk artışı gibi malzeme içindeki değişimler katı fazda gerçekleştirilir. Malzeme içyapısında, boyun bölgesiyle tanenin yüzeyi arasındaki serbest enerji farkı katı faz sinterlemesi için gereken itici gücü oluşturmaktadır [62]. Katı faz sinterleme işlemi üç aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu aşamalar Şekil 2.25'te görülmektedir.



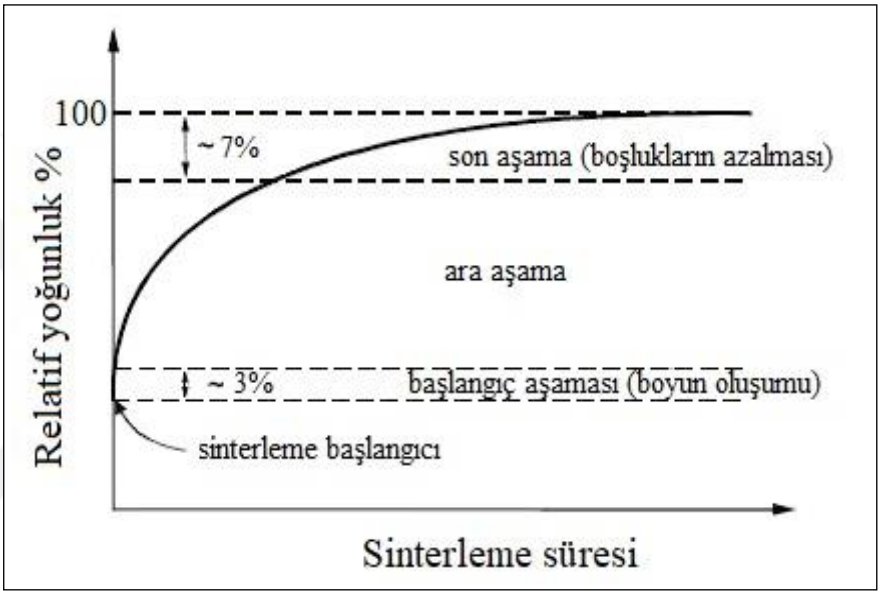
Şekil 2.25. Katı faz sinterleme işlemi aşamaları [53, 62]

Katı faz sinterlemesi, tanelerin birbirleriyle noktasal olarak temas etmesi ile başlamaktadır. Başlangıç aşamasında, tanelerin hareket etmesi ile tanelerin birbirine teması artar. Zamanla temas halindeki taneler arasında boyun adı verilen sinterleme köprülerinin oluşumu gözlenmeye başlar. Bu aşamada toz taneleri temas halinde olsalar bile hala ayrık durumdadırlar. Başlangıç aşamasının son evrelerinde, boyun oluşumu gözlemlenen tanelerin merkezleri birbirlerine yaklaşması ile hacimsel olarak küçülmüş tanelerin oluşumu gözlemlenir [38].

Sinterlemenin ara aşamasında, taneler arasında oluşan boyunların boyutlarında artış meydana gelir. Boyun genişliğinin belirli bir genişlik değerini aştığı zaman, taneciklerin şekilleri değişmeye başlar. Tane içi ve taneler arası boşluklarda azalmalar görülür. Boşlukların azalması ile birlikte malzemede büzülmeler

gerçekleşir. Ara aşamanın sonlarına doğru tanelerin birleşmeye başlamasıyla tane büyümesi meydana gelir [38].

Sinterlemenin son aşamasında, küçük boşluklar küçülmeye devam etmesiyle malzemede yoğunluk artışı gerçekleşir. Tanelerin birleşmesi tamamlanarak küresele yakın tanelerin oluşumu görülür. %90-99 teorik yoğunluğa sahip parça elde edilmektedir [38]. Şekil 2.26'da katı faz sinterleme aşamalarının yoğunluğa olan etkisi görülmektedir.

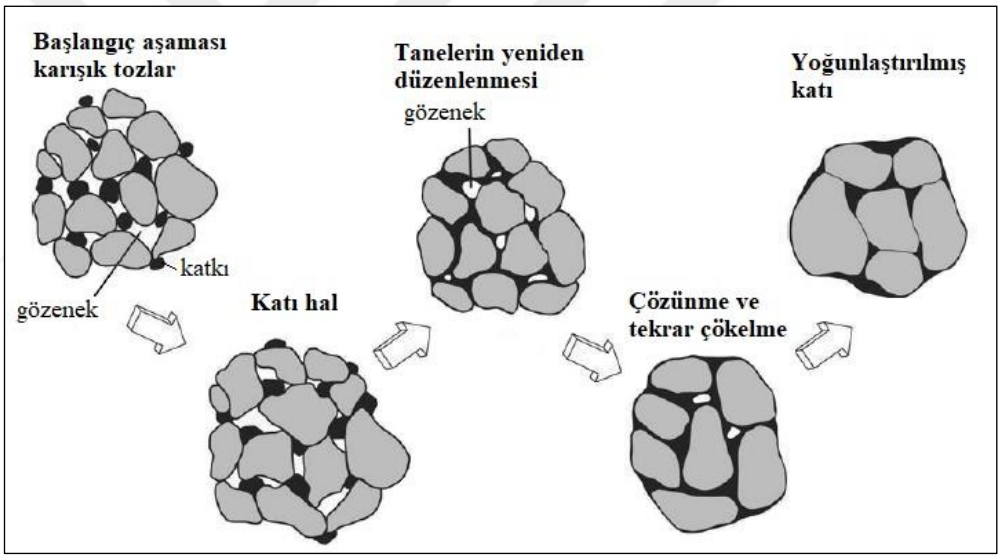


Şekil 2.26. Sinterleme aşamalarının yoğunluğa olan etkisi [61]

2.8.2. Sıvı faz sinterleme

Sıvı faz sinterlemesinde sinterleme işlemi, içerisinde birden fazla alaşım elementi bulunduran bileşimlerde, en düşük ergime sıcaklığına sahip alaşım veya alaşımların, ergime sıcaklıklarının üzerinde bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Sıvı faza geçen alaşım elementi malzeme taşınımını kolaylaştırarak mikroyapıda hızlı değişiklikler meydana getirir. Parça içerisindeki boşluklar sıvı fazdaki alaşım tarafından doldurularak parçada ani büzülmeler meydana gelir. Oluşan sıvı fazın miktarı malzeme ile oranlandığında %20'nin altında olması istenir. Sıvı faz sinterlemesi ile istenen yoğunlukta ve iyi mekanik özelliklere sahip toz metalurjik parçaların üretimi yapılabilmektedir. Yöntemin en önemli avantajı ise sinterleme hızıdır [34].

Sıvı faz sinterlemesi, farklı sıcaklıklarda ergiyen alaşımlara ve kompozitlere uygulanmaktadır. Sinterleme işleminde, katı fazdaki taneler sıvı faz içerisine çözünmesi ile katı faz sıvı faz tarafından ıslatılmaktadır. Islatmanın etkisi ile katı faz ile sıvı faz arasında kapiler kuvvetler oluşur ve bu kuvvet tanelerin birbirine tutunmasını sağlar. Daha yüksek sıcaklıklarda sinterleme yapıldığı durumlarda ise katı faz yumuşayarak daha yoğun bir malzeme elde edilmesini sağlanır. Oluşturulan sıvı faz, katı fazın daha kolay hareket edebilmesini sağlar [63]. Katı tanelerin sıvı içerisindeki çözünürlüğü tane boyutuyla ters orantılı olarak değişmektedir. Sıvı fazda çözünme ilk önce küçük tanelerin çözünmesi ile başlar, daha sonra çözünmemiş daha iri tanelerin çözünmesi ile devam eder. Sinterlemenin sonlarına doğru tane sayısı azalır, malzemede tane irileşmesi oluşur [34]. Şekil 2.27'de sıvı faz sinterlemesi aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.27. Sıvı faz sinterleme aşamaları [63]

Sıvı faz sinterleme yönteminin başka bir uygulaması ise geçici sıvı faz sinterleme yöntemidir. Geçici sıvı faz sinterlemesi, sıvı faz sinterleme yöntemi ile katı faz sinterleme yönteminin birleşimidir. Yöntemin uygulanabilmesi için sinterlenecek malzeme iki farklı bileşenden oluşması gerekmektedir. Ergime sıcaklığı düşük olan bileşenin ergime sıcaklığının üstüne ısıtılan malzemede bir sıvı faz oluşur. Oluşan sıvı faz, tanelerin arasındaki boşlukları doldurur. Sinterleme süreci ilerledikçe, sıvı fazın katı parçacıklar içinde çözünerek sıvı faz ortadan kalkar. Bu aşamadan sonra sinterleme süreci, katı faz sinterleme yöntemi gibi devam ederek sinterlenmiş toz metalürjik parça üretimi gerçekleşmiş olur. Geçici sıvı faz sinterleme ile Cu-Al, Cu-

Sn, Fe-Al, Fe-P, Fe-Si, Fe-Ti, Ni-Cu ve Ni-Ti gibi bileşenlerin sinterlenmesi mümkündür [35].

3. AŞINMA

Aşınma hakkında birçok tanımlama yapılmakla beraber genel olarak aşınma, bir katı cisme temas eden katı, sıvı veya gaz fazındaki malzemelerin mekanik etkenler nedeniyle katı cisim yüzeyinden malzeme sökmesiyle oluşan malzeme hasarıdır [64]. Aşınma, malzeme israfının ve sistem verimliğini düşüren en önemli etkendir. Sürtünme ise aşınma ve enerji kayıplarının temel sebebidir [65].

Sürtünmenin kontrolü ile aşınmada azalma ve önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Tek bir makinada aşınma kaynaklı zararlar önemsizmiş gibi gözükse de Dünyadaki milyonlarca makinada tekrarlandığında maliyetler ciddi boyutlardadır. Sürtünme kontrolü ile Dünyadaki mevcut enerji kaynaklarını 1/3'ü kadar enerji tasarrufu elde edilebileceği kabul edilmektedir [65]. Sürtünme kaynaklı enerji kayıpları ve diğer kayıplar nedeniyle dizel motorlarda yakılan yakıtın sadece %30'u doğrudan tekerleklere aktarılabilmektedir. Yapılan araştırmalara göre sürtünme ve aşınma kaynaklı malzeme bozulması, Almanya'da gayri safi yurtiçi hasılasının %5 ile %8 aralığında bir kayba neden olmaktadır. Sadece tek bir adet deniz uçağı için meydana gelen toplam aşınma maliyeti uçuş saati başına 243 dolar olduğu tahmin edilmektedir [66].

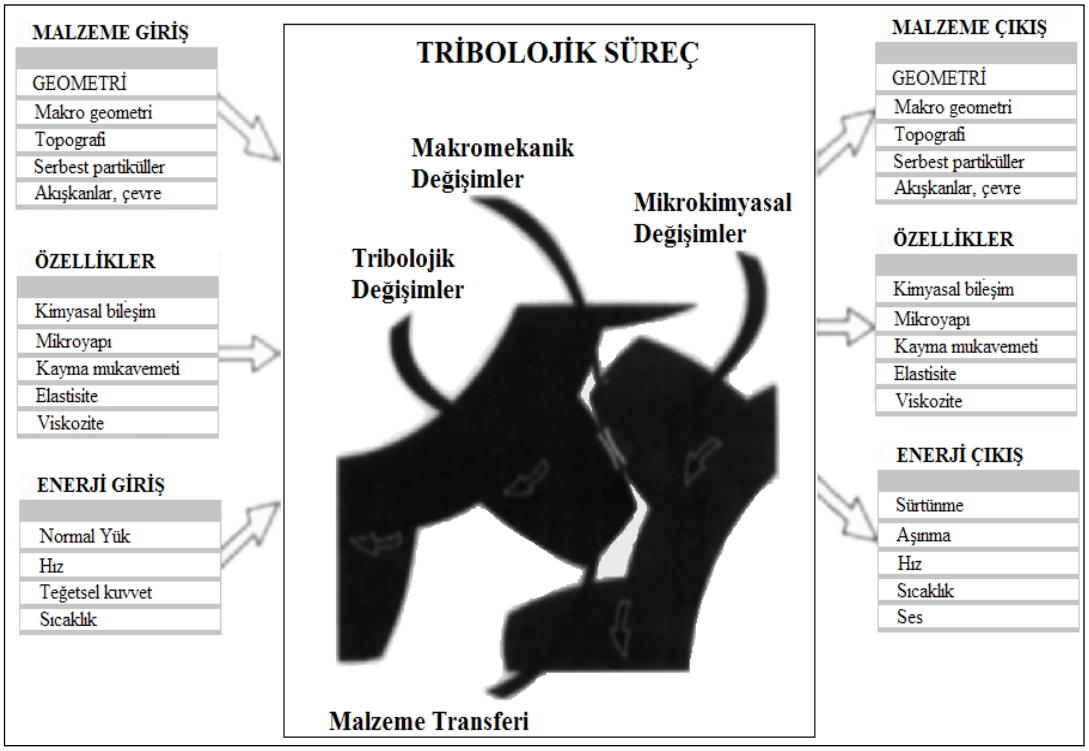
Parçada oluşan aşınma hasarının incelenmesi ve değerlendirme sonucunda gerekli önlemler alınmalıdır. Parça yüzeylerinde meydana gelen aşınmaların azaltılması ve önlenmesi için alınacak önlemler, parçanın kullanıldığı sistemin özelliklerine göre belirlenmektedir. Parçada görülen her hasar aşınma olarak kabul edilmemektedir. Parça yüzeylerinde gerçekleşen hasara aşınma denilebilmesi için bazı koşulların gerçekleşmiş olması gerekmektedir [67]. Bunlar;

1. Mekanik bir etken olması
2. Sürtünmenin olması
3. Yavaş ve devamlı olması
4. Parça yüzeyinde değişiklik meydana gelmesi
5. İstenmeyen zamanlarda meydana gelmesi [67].

Yaşanan ekonomik kayıplardan dolayı aşınmanın azaltılması ve aşınma kontrolü gelişen teknoloji ile birlikte en önemli araştırma konusu olmaktadır [68]. Aşınma miktarı parça yüzeyi özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Aşınmanın azaltılması için parça yüzeyi aşınmayı azaltıcı kaplamalarla kaplanmaktadır [66]. Ayrıca uygun sistem tasarımı, malzeme kullanımı ve yağlayıcı kullanımı ile aşınma kaynaklı hasarlar azaltılabilmektedir. Aşınmaya karşı dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi için araştırmacılar çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar [65]. Aşınmanın azaltılması veya ortadan kaldırılması için tribolojik sistem davranışlarının incelenmesi gerekmektedir.

3.1. Triboloji

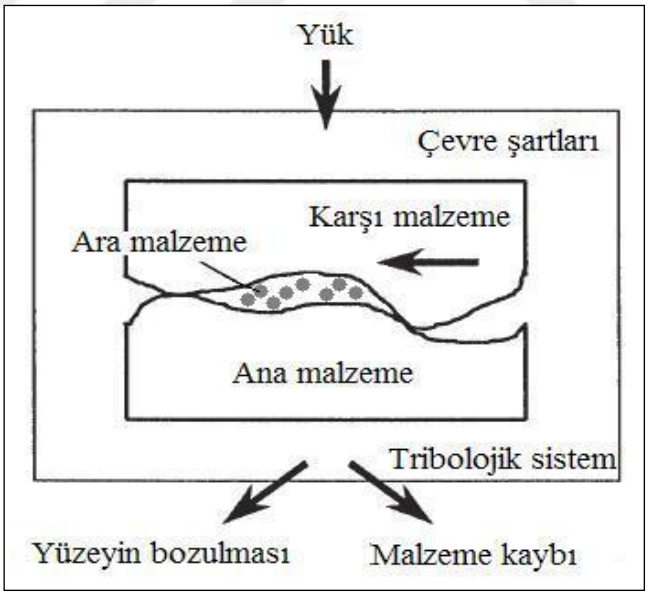
Triboloji, birbiriyle etkileşim halinde bulunan yüzeyleri aşınma, sürtünme ve yağlama açısından inceleyen bir bilim dalıdır. Yunancada sürtünme ve aşınma anlamına gelen tribos kelimesinden türeyen triboloji, bilinen tarihin başlangıcından beri var olmaktadır. 1967'de Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü'nün bir komitesi tarafından tanımlanmasıyla, triboloji resmi bir bilim dalı haline gelmiştir. Triboloji, aşınmayı azaltmaya çalışan ve buna bağlı olarak cihazların güvenirliliğini arttırmaya çalışan bir bilim dalıdır [65].



Şekil 3.1. Hareket halindeki iki yüzeyin teması ile gerçekleşen tribolojik süreç [69]

Çok eski zamanlardan beri bilinen tribolojik olaylar, ilk olarak Leonardo da Vinci tarafından sürtünme kanunu ilan etmesi ile anlaşılır hale gelmeye başlamıştır. Leonardo da Vinci'nin ağırlığın ve sürtünen parçaların yüzey alanının sürtünmeyi etkilediğini bulduktan sonra Amonton ve Coulomb da benzer sonuçlara ulaşmıştır. Günümüze kadar yapılan çalışmalar sonucunda triboloji biliminin temelleri oluşturulmuştur. Tribolojik sistemde temas halindeki malzemelerde meydana gelen değişimleri gözlemlemişlerdir [70].

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi tribolojik bir süreç içerisinde sürecin başlangıcı ile sonu arasındaki fark sürtünme enerjisi, aşınma, ses ve açığa çıkan ısı olarak görülmektedir. Aşınma enerjinin farklı şekilde dönüşümü ile gerçekleşmektedir. Şekil 3.2'de tribolojik sistem şematik olarak gösterilmektedir. Tribolojik olaylar bir çevre içerisinde gerçekleşmektedir. Ana malzeme, ana malzeme üzerinde yük altında hareket eden karşı malzeme ve aralarında bulunan ara malzemeden oluşan tribolojik sisteme çeşitli çevre şartları etki etmektedir. Tribolojik sistemde ana malzemeye etki eden etkenler, ana malzemede aşınmaya ve yüzeyin bozulmasına sebep olmaktadır [71].



Şekil 3.2. Tribolojik sistemin şematik gösterimi [71]

Tribolojik etkiler hayatımızı bilinenden çok daha fazla etkilemektedir. Doğada yaşayan canlılar da tribolojik etkilerden korunmak için zamanla içgüdüsel olarak savunma mekanizmaları geliştirmişlerdir İnsan cildinin terlemesi ile insan cildinde

meydana gelecek zararların önlenmesi tribolojik etkilere karşı alınan doğal tedbire örnektir. Endüstriyel olarak cihazlarda yaşanan arızaların nedeni genellikle tribolojik etkilere dayanmaktadır. Evlerde kullanılan cihazlardan uzay araçlarına kadar bakım ihtiyaçlarının azalması ve maliyetlerin düşürülmesi için triboloji bilimi, sistemleri inceleyerek çözüm aramaktadır [65].

3.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Malzemelerin aşınma davranışını, birçok parametre etki etmektedir. Genel olarak, çalışma koşulları, temas eden yüzeylerin topografisi, parça geometrisi, hız, etki eden yük ve sürtünme katsayısı aşınmaya etki etmektedir. Ayrıca malzeme bileşimi, çevre, malzeme sertliği, sıcaklık, malzeme elastikliği, malzemenin termal özellikleri ve malzemenin yüzeyi aşınmayı etkilemektedir [72].

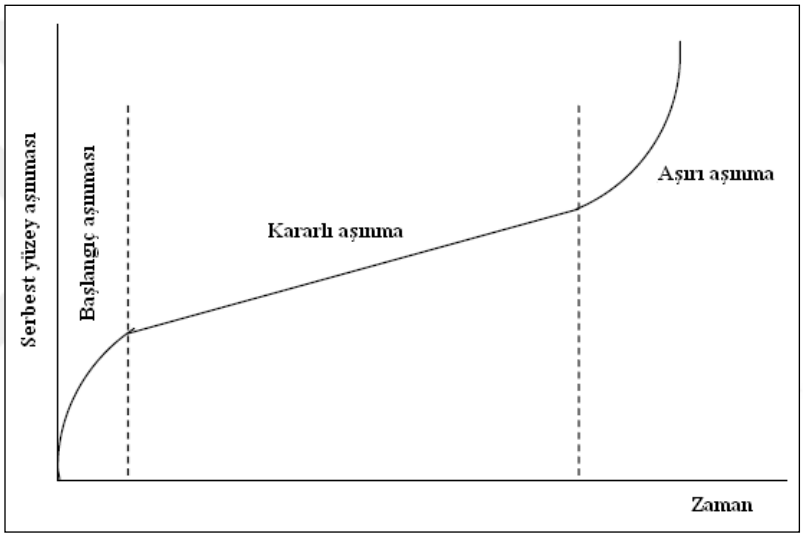
Aşınmayı etkileyen en önemli faktörlerden birisi de malzemenin yüzeyidir. Malzemenin aşınma davranışını sahip olduğu bileşimle birlikte yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Aynı bileşime sahip iki malzemenin yüzey karakteristiğinin farklı olması, aşınma davranışlarının da farklı olmasına neden olur. Malzeme yüzeyinin modifikasyonu ile aşınma miktarının azaltılabilmektedir [66].

Malzemelerde aşınmanın gerçekleşmesi için yüzeyde sürtünmenin olması gerekmektedir. Sürtünmede önemli olan etken ise yüzey alanıdır. Sürtünen iki yüzeyin temas alanı ve buna bağlı olarak aşınmayı etkileyen bir başka etken ise yüzey pürüzlülüğüdür. Hassas işleme yöntemleri ve diğer üretim teknikleriyle malzemelerin yüzeyleri hazırlansa da hiçbir teknikle tamamen düz ve pürüzsüz yüzey elde edilememektedir. Elde edilen yüzeyler farklı büyüklüklerde pürüz tepeleri ve girintilerden oluşmaktadır. Pürüzlü yüzeylerin ilk teması pürüz tepeleri arasında gerçekleşir ve yüzeylerin gerçek temas alanı bu pürüz tepelerinin oluşturduğu toplam alandır. Temas eden pürüzler sürtünmenin etkisi ile küçülerek gerçek temas alanına ulaşılır [73].

Uygulanan yük ve kayma mesafesi tribolojik sisteme enerji girişine neden olan etkenlerdir. Tribolojik sistemde artan enerji, sürtünme etkisiyle aşınmayı artırdığı için uygulanan yük kayma mesafesi aşınma miktarı ile doğru orantılıdır. Uygulanan

yükün çeşidi (titreşim, çarpma, yuvarlanma vb.), karşı malzemenin türü (katı, sıvı, gaz) gibi çevresel faktörler aşınma miktarını etkilemektedir [66].

Şekil 3.3'de aşınmanın zamana göre değişimi görülmektedir. Aşınmanın başlangıç aşamasında başta aşınma hızı fazladır. Temas halindeki yüzeylerdeki pürüzler zaman geçtikçe azalarak yüzeyler birbirine daha uyumlu hale gelir ve aşınma hızındaki artış sabit bir değere ulaşır. Kararlı aşınma aşamasında aşınma doğrusal olarak devam ederken yüzeyin yorulması ve kopan partiküllerin etkisiyle zaman geçtikçe aşınma hızı artar, aşırı aşınma meydana gelir. Aşırı aşınma sonucunda ise yüzeylerdeki hasar kritik seviyeye ulaşmış olur [73, 74].



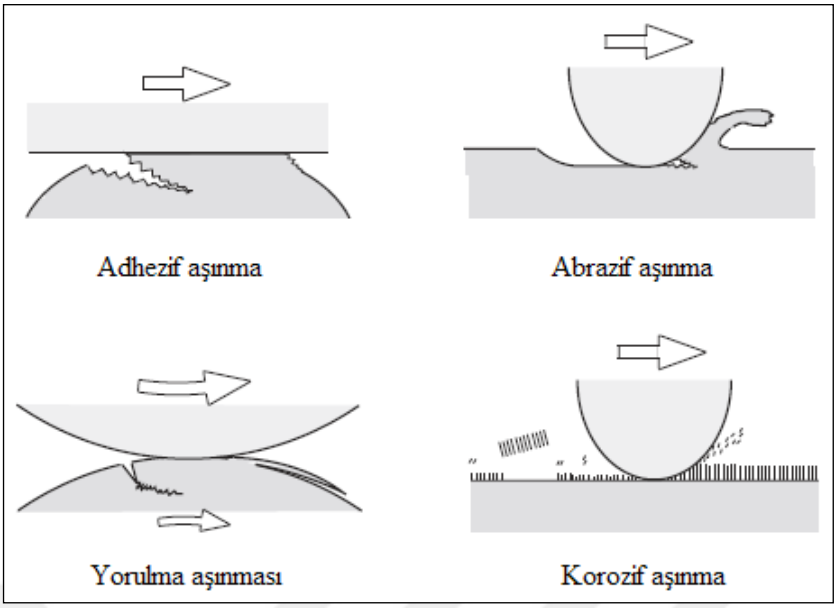
Şekil 3.3. Aşınmanın zaman ile değişimi [74]

3.3. Aşınma Mekanizmaları

Araştırmacılar, yaptıkları çalışmalar sonucunda malzemelerde meydana gelen aşınmayı farklı şekilde sınıflandırmışlardır. Aşınma çeşitleri

1. Abrazif aşınma
2. Adhezif aşınma
3. Yorulma aşınması
4. Erozif aşınma
5. Korozif aşınma

olarak bilinmektedir.



Şekil 3.4. Aşınma mekanizmaları [68]

Şekil 3.4'de bazı aşınma çeşitleri görülmektedir. Tablo 3.1'de makine parçalarında görülen aşınma kaynaklı bozulmalarda aşınma mekanizmalarının dağılımı görülmektedir.

Tablo 3.1. Makine parçalarında meydana gelen aşınmanın aşınma türüne göre dağılımı [66]

Aşınma türü	**Makine parçası %**
Abrazif	50
Adhezif	15
Erozif	8
Fretting	8
Korozif	5
Birleşimi (Abrazif, adhezif, erozif, korozif)	14

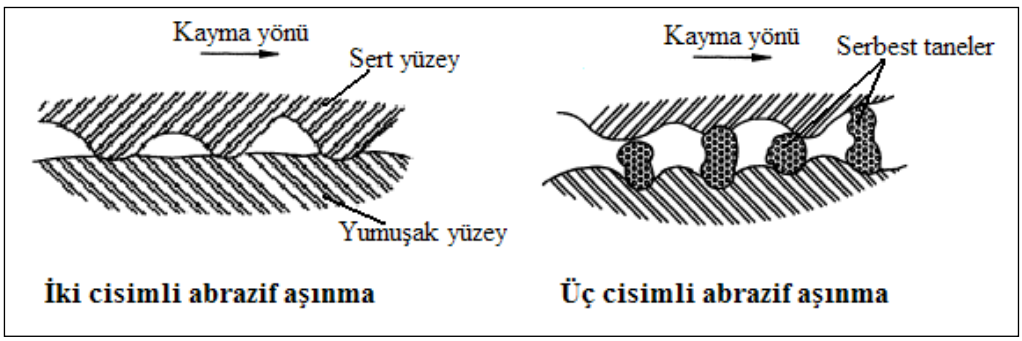
3.3.1. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma, sıklıkla karşılaşılan ve aynı zamanda çok ciddi zararları olan bir aşınma türüdür. Birbiriyle temas halinde olan ve sertlik değerleri farklı olan iki yüzeyin yük altında birbiri üzerinde kaymasıyla oluşan aşınmaya abrazif aşınma denmektedir. Kayma esnasında sert yüzeydeki sert pürüz tepeleri, yumuşak yüzeyin içine girerek yumuşak yüzeyde çizilmelere ve plastik deformasyona sebep olur [75].

Abrazif olarak aşınan malzemelerin özellikleri aşınma direncini doğrudan etkilemektedir. Malzemelerin sertlikleri, sünekliği, mikroyapısı, dayanımı, mekanik kararlılığı, elastik modülü gibi özellikler abrazif aşınmayı etkilemektedir. Malzemelere uygulanan ısıl işlemler aşınma direncini arttırıcı yönde etki etmektedir [75]. Ayrıca abrazif aşınma miktarı iki yüzey arasındaki aşındırıcı tanelerin varlığına, kayma hızına ve diğer çevre koşullarına bağlı olarak değişmektedir [76].

Abrazif aşınmada temas halindeki malzemelerin her ikisinde de aşınma meydana gelmektedir. Makine parçalarında meydana gelen aşınmaların yarısı abrazif aşınma kaynaklıdır. Bundan dolayı abrazif aşınmadan dolayı meydana gelen maddi kayıplar oldukça fazladır. Bir ülkedeki abrazif aşınma kaynaklı maddi kayıpların, o ülkedeki gayri safi milli hasılasının %1-4'ü arasında olduğu tahmin edilmektedir. Abrazif aşınmanın etkisi toprak ve kayanın taşındığı tarım, madencilik endüstrisinde ve üretim endüstrisinde oldukça fazladır [76].

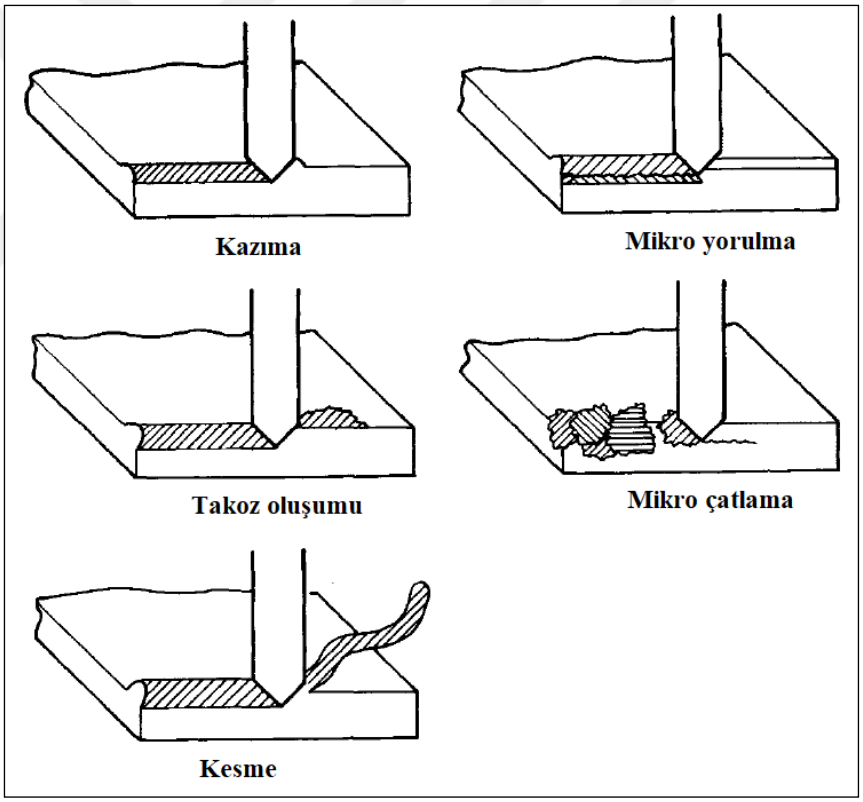
Aşınma davranışlarındaki faklılıklardan dolayı abrazif aşınmada iki cisimli abrazif aşınma ve üç cisimli abrazif aşınma olmak üzere iki farklı aşınma tipi bulunmaktadır. Şekil 3.5'de abrazif aşınma tipleri görülmektedir. İki cisimli abrazif aşınmada, Aşınma yüzeyinde sabit duran sert pürüz tepeleri veya yüzeye gömülmüş sabit duran sert parçacıkların diğer yüzeyle teması ile gerçekleşmektedir [77]. Diğer yüzeye temas ederek kayan sert parçacıklar, yüzeyde çizikler oluşturmakla birlikte yüzeyde mikro boyutta kesiklere neden olur. Düşük gerilme altında gerçekleşen iki cisimli abrazif aşınma süresince, sert parçacıklar yüzeyden malzemelerin kopmasına sebep olur. İki cisimli abrazif aşınma, hafriyat ekipmanlarında, eleklerde, matkaplarda ve zımpara kağıdı kullanılan işlemlerde görülmektedir [70].



Şekil 3.5. Abrazif aşınma tipleri [77]

Üç cisimli abrazif aşınmada ise aşındırıcı parçacıklar yüzeye bağlı olarak değil iki yüzey arasında serbest halde bulunmaktadır [77]. Yüksek gerilmeli aşınma olarak bilinen üç cisimli abrazif aşınmada, yüksek basınç uygulanması durumunda aşındırıcı parçacıkların parçalanmasına sebep olabilmektedir. Üç cisimli abrazif aşınmada aşınma daha hızlı gerçekleşmektedir. Yataklarda, bilyeli değirmende, fren disklerinde ve zincir dişlilerde meydana gelen aşınmalar üç cisimli abrazif aşınma olarak bilinmektedir [70].

Aşınma sırasında malzemenin yüzeyden nasıl çıkarıldığını açıklanması için çatlama, yorulma ergime gibi çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır. Şekil 3.6'da aşındırıcı ucun yüzeyle teması ile gerçekleşebilecek abrazif aşınma mekanizmaları görülmektedir [64].



Şekil 3.6. Abrazif aşınma mekanizmaları [64]

Abrazif aşınma kazıma şeklinde gerçekleştiğinde ucun geçtiği bölgedeki malzeme, aşınma oluğundan kenarlara doğru ilerleyerek yer değiştirir ve malzeme kaybına neden olmaz. Soğuk deformasyon sonucu malzeme yüzeyine yakın bölgelerde dislokasyon yığılması gerçekleşir. Soğuk deformasyona uğramış yüzey tekrar

deformasyona uğraması durumunda yüzeyde mikro yorulmalara yol açar. Yüzeydeki mikro yorulma sonucu malzeme kaybı gerçekleşmektedir [76].

Temas arayüzeyinin kayma dayanımı malzemenin kayma dayanımına oranı yüksek bir değere (0,5 ile 1,0 arası) ulaştığında aşındırıcı ucun önünde malzeme takoz benzeri bir şekilde yüzeyden ayrılır. Takoz şeklinde yüzeyden ayrılan malzeme miktarı, oluk kenarına giden malzeme miktarından daha fazla olmaktadır. Takoz oluşumu ile gerçekleşen aşınma abrazif aşınmanın orta şiddetli bir şeklidir. Sünek malzemeler için en şiddetli aşınma tipi kesme aşınmasıdır. Kesme aşınmasında, aşındırıcı uç Şekil 3.6'da görüldüğü gibi yüzeyden malzemenin koparılmasına sebep olmaktadır [76]. Abrazif aşınmaya karşı dayanıklı malzemelerin kullanımı, yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, yağlayıcı kullanımı ve aşındırıcı partiküllerin yüzeyler arasına girmesi engellenerek abrazif aşınma engellenebilmektedir



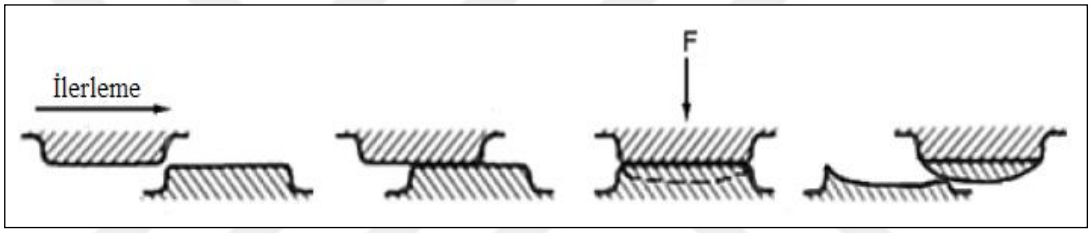
Şekil 3.7. Abrazif aşınmış parça [78]

3.3.2. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma, birbiri üzerinde kayarak hareket eden iki yüzey arasında yüzeylerdeki pürüz tepelerinin uygulanan kuvvetin etkisiyle soğuk kaynaklanarak pürüzlerin bir yüzeyden diğer yüzeye soğuk kaynaklanarak kopması olayıdır. Yüzeye soğuk kaynaklanan parçacıklar, yüzeyde geçici veya kalıcı olarak bağlanırlar. Benzer özellikteki metalik yüzeylerdeki pürüzlerin birleşmesi ile oluşan yapı, kaynaklanma sırasında meydana gelen sertleşmeden dolayı metalik yüzeylerden daha sağlam bir

yapı oluşmaktadır. Adhezif aşınma ile malzeme kaybı, temas eden bir yüzeyde olabileceği gibi iki yüzeyde de meydana gelebilmektedir [64, 70].

Şekil 3.8'de adhezif aşınmanın oluşumu görülmektedir. Malzemelerin temas halindeki yüzeylerdeki pürüzlerde uygulanan yüksek basıncın etkisiyle soğuk kaynak bağları oluşumu görülür. Temas yüzeyleri arasındaki devam eden kayma hareketi, oluşan bağların kopmasına neden olur. Bağların kopması ile yumuşak yüzeydeki pürüzler koparak sert yüzeydeki pürüzlere soğuk kaynaklanmış olarak yüzeyden ayrılır. Uygulanan yük, kayma hızı, malzemelerin sıcaklıkları adhezif aşınmanın şiddetini belirlemektedir. Uygulanan yükün artması, ortam sıcaklığının yükselmesi ve temas noktalarındaki sıcaklık artışı parçacıklar arasında oluşan bağların oluşumunu kolaylaştırmaktadır [79].



Şekil 3.8. Adhezif aşınma oluşumu [80]

Adhezif aşınma, metalik malzemeler, seramikler, polimerler arasında veya bu malzeme gruplarının kombinasyonları arasında gerçekleşmektedir. Adhezif aşınnan malzemelerin türüne göre aşınma miktarları farklılık gösterir. Yüzeylerdeki oksit tabakalarının varlığı, yağlayıcıların ve yüzey filminin varlığına göre adhezif aşınma miktarını azaltıcı yönde etki etmektedir [64].

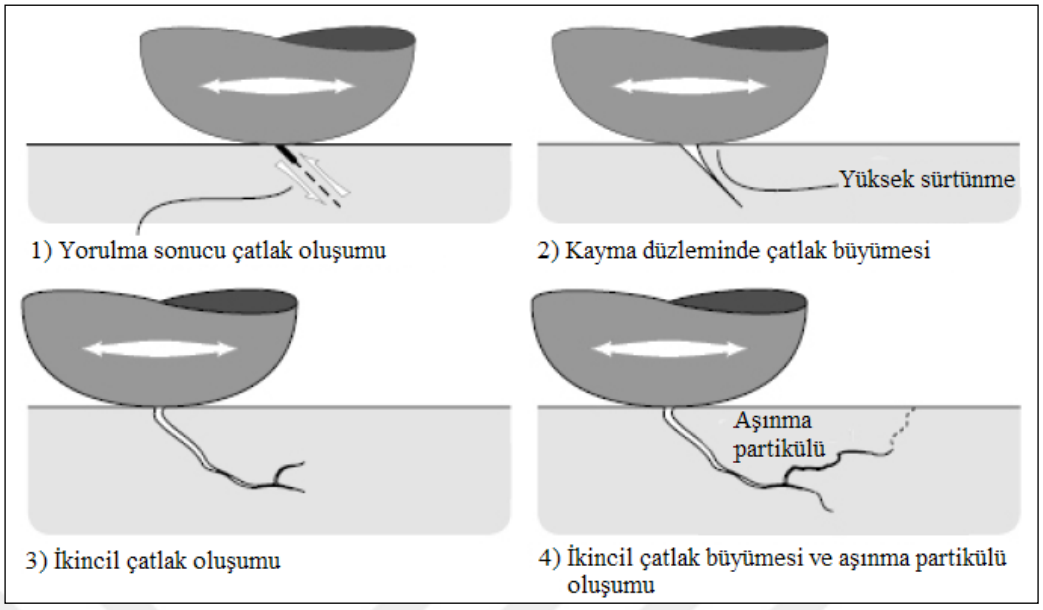
Adhezif aşınmanın azaltılması veya engellenmesi için, malzemelerin sertliklerinin yüksek olması gerekmektedir. Adhezif aşınma, özellikleri birbiriyle benzer ve alaşım oluşumu kolay olan malzemeler arasında gerçekleşmektedir. Bundan dolayı sistemde kullanılacak malzemelerin adhezif aşınmaya uğramaması için sertlikleri farklı ve alaşım oluşturmayacak malzemelerden seçilmesi gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılması, yüzeye etki eden temas basınçlarının azaltılması ve yüzey modifikasyonu yaparak yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi adhezif aşınmayı azaltıcı yönde etki etmektedir. Ayrıca yüzeyler arasında yağlayıcı kullanımı, adhezif aşınmayı azaltmaktadır [81].



Şekil 3.9. Adhezif aşınmaya uğramış parça [78]

3.3.3. Yorulma aşınması

Yorulma, bir malzemenin tekrarlı yüklemeye maruz kalması sonucu meydana gelen ve zamanla artan yapısal hasardır. Temas eden yüzeylere uygulanan tekrarlı yüklerin neden olduğu aşınmaya yorulma aşınması denmektedir [66]. Yorulma aşınması, bilyalı ve rulmanlı yataklarda, dişli temas noktalarında ve benzeri temas halindeki makine parçalarının kullanım ömrünü sınırlayan bir hasar mekanizmasıdır. Yüzeyde temas eden noktalarda Hertz basıncı oluşur ve bu basınç temas bölgesinin altında malzemede kayma gerilmesinin oluşumuna sebep olur. Oluşan gerilmelerin etkisiyle malzemenin yüzeye yakın bölgelerinde yorulma gerçekleşir. Kayma gerilmesinin maksimum olduğu bölgelerde malzemede küçük boşlukların oluşumu görülür. Yükün tekrarlı olarak etki etmesi ile boşlukların kenarlarında çatlak çekirdeklenmesi meydana gelir. Çatlakların malzemede ilerleyerek diğer çatlaklarla birleşerek yüzeyden malzemenin kopmasına sebep olur. Yüzeyden kopan parçaların yerinde 1-2 mm çapında çukurların oluşumu görülür ve yüzey hızlı bir şekilde hasarlanarak malzeme kullanılamaz hale gelir [82]. Şekil 3.10'da yorulma aşınmasında çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi sonucu aşınmanın meydana gelmesi görülmektedir.

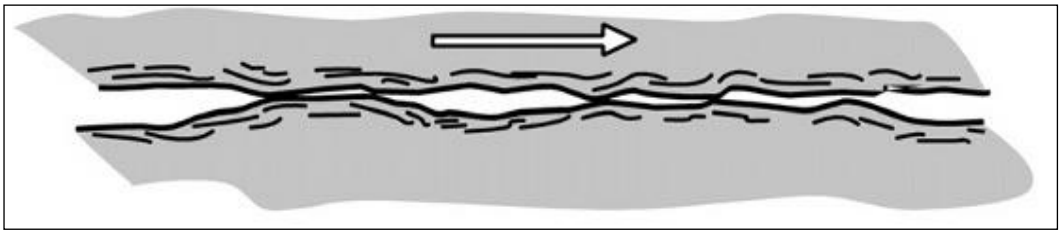


Şekil 3.10. Yüzeyde yorulma sonucu çatlak oluşumu ve yorulma aşınması [81]

Aşınan yüzeydeki malzemenin kırılma tokluğu, yorulma aşınmasını etkileyen önemli bir parametredir. Malzemenin kırılma tokluğu, malzemenin çatlak ilerleme hızını etkileyerek, malzemenin yorularak aşınmasını etkilemektedir [66]. Malzemede yorulmanın gerçekleşebilmesi için, yüzeyde oluşan kayma gerilmelerinin, malzemenin eşik değerinin üzerinde olması gerekmektedir. Malzemenin dayanabileceği kayma gerilmesinin üzerinde bir kayma gerilmesi oluştuğunda yorulma aşınması gerçekleşir. Yataklarda, rulmanlarda, dişlilerde, raylarda, tekerleklerde ve haddeleme esnasında yorulma aşınması ile karşılaşılabilmektedir. Oluşan hasarlar gözle görülebilecek hasarlardır. Yüzeyde oluşan çukurcuklar başta küçük boyutta olup, zaman geçtikte çukurların boyutları artarak malzemeler kullanılamaz hale gelmektedir [83].

Malzemede yorulma sonucu delaminasyon aşınması da gerçekleşebilmektedir. Malzeme yüzeyinde başka bir malzeme yüzeyinin tekrarlı bir şekilde kayması sonucu mikroskobik ölçekte gerçekleşen yorulma aşınmasına delaminasyon aşınması denir. Uygulanan tekrarlı yükler sonucu yüzeyin altında küçük çatlak çekirdeklenmeleri oluşur fakat bu çekirdeklenmeler yüzeye yakın bölgelerde oluşmaz. Artan yükleme ve deformasyonla birlikte çatlakların büyümesine ve birleşmesine sebep olur. Oluşan çatlaklar yüzeye paralel bir şekilde ilerleme eğilimindedir ve bu durum yüzeyden malzemenin ince uzun tabakalar şeklinde

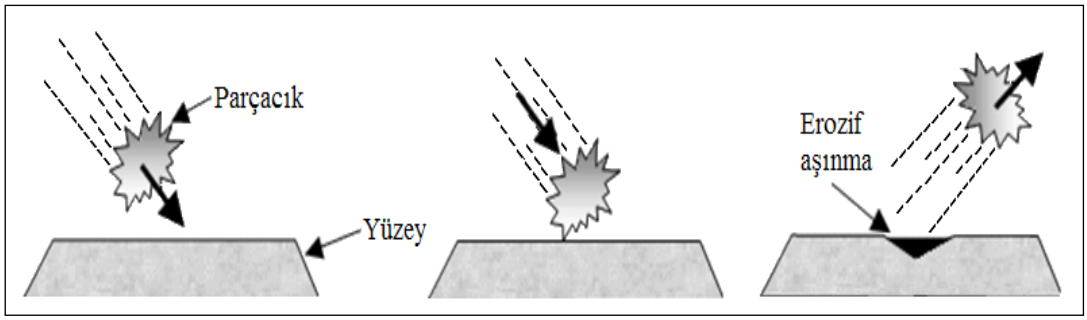
kopmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.11'de delaminasyon aşınmasının oluşumu görülmektedir [82].



Şekil 3.11. Delaminasyon aşınması [82]

3.3.4. Erozif aşınma

Erozif aşınma, bir yüzeye belirli bir hız ve açıyla çarpan sert katı parçacıkların çarptıkları yüzeyde malzeme kaybına sebep olması ile gerçekleşen aşınma türüdür. Erozif aşınmanın şiddetini hem yüzeye çarpan parçacıkların özellikleri hem de aşınan yüzeyin özellikleri etkilemektedir. Aşındırıcı parçacıkların şekli, sertliği ve tokluğu erozif aşınma şiddetini etkilemektedir. Yüzeye çarpan parçacıkların kütlesi ve çarpma hızı artıkça erozif aşınma miktarı artmaktadır. Aşınan yüzeylerin sertliklerindeki artış, erozif aşınma miktarını azaltıcı etkiye sahiptir [68]. Erozif aşınma, abrazif aşınmaya mekanizma olarak benzese de aralarındaki temel fark, erozif aşınmada sert parçacıklar yüzeyi kazıyarak değil, çarparak yüzeyden malzeme kaybına sebep olmaktadır [66].

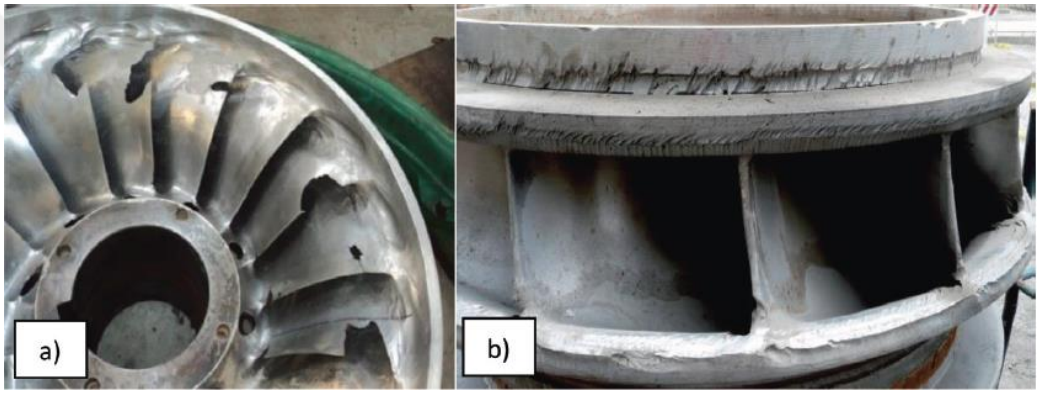


Şekil 3.12. Erozif aşınmanın oluşumu [84]

Erozif aşınmada, katı partiküllerin yüzeye gelme açıları, malzeme yüzeyindeki oluşan hasarı etkilemektedir. 0° ile 90° arasında çarpma açılarına sahip olan partiküller, malzeme türlerine göre farklı aşındırma davranışları göstermektedirler. Parçacıklar saf metaller gibi sünek malzemelerden oluştuğunda, düşük çarpma açılarında (15°-30°) erozif aşınma miktarı maksimum değerde olmaktadır. Eğer

parçacıklar seramik gibi sert bir malzemeden oluşuyorsa, yüksek çarpma açılarında (90°) yüzeyde oluşan erozif aşınma miktarı maksimum olmaktadır. Parçacığın çarpma açısı 0° olduğunda ise erozif aşınma miktarı minimum değerdedir [64].

Erozif aşınma, sıvı ve gaz akışı olan sistemlerde, sıvı veya gazın içerisindeki katı parçacıkların yüzeylere çarpmasıyla da meydana gelebilmektedir. Erozif aşınma, türbinlerde, sıvı taşıyan boru hatlarında, pnömatik taşıma sistemlerinde, boruların dirsek kısımlarında, egzoz borularında, yağmur bulutlarının arasından yüksek hızla geçen uçak gövdesinde meydana gelebilmektedir [66]. Şekil 3.13'de türbinde meydana gelen erozif aşınma kaynaklı hasar görülmektedir.

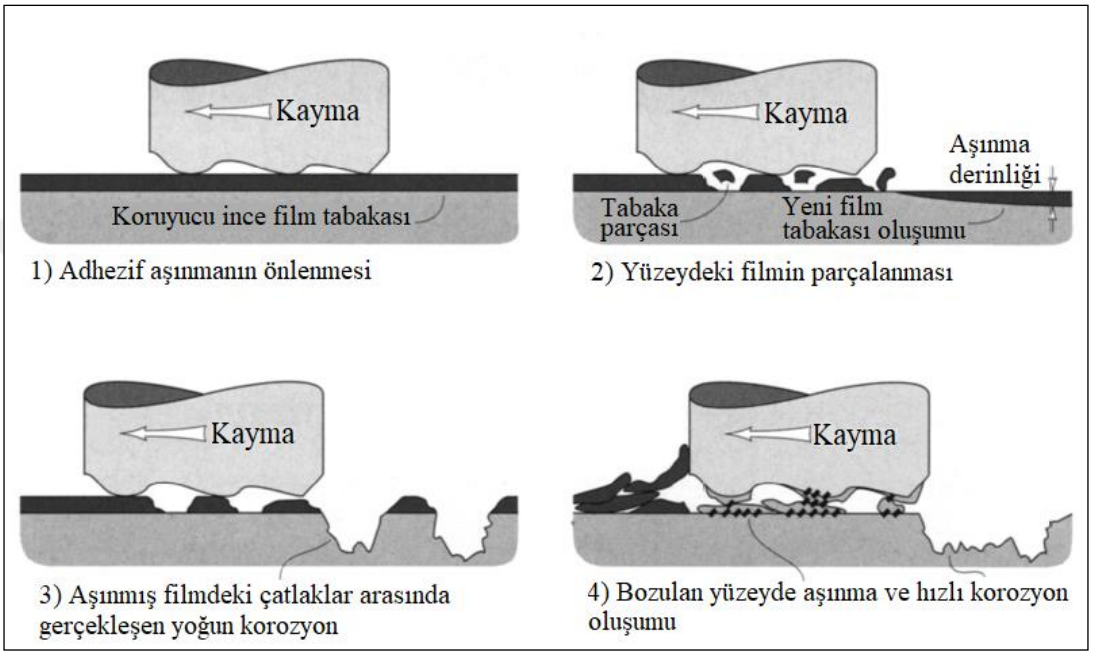


Şekil 3.13. Türbinde meydana gelen erozif aşınma a) türbin dışında, b) türbin içinde [84]

3.3.5. Korozif aşınma

Korozif aşınma, hem korozyon mekanizmalarının hem de aşınma mekanizmalarının bir araya geldiği, malzemelerin bozulmasıyla sonuçlanan bir aşınma çeşididir. Tek başına aşınma veya korozyona uğramış malzemelere göre korozif aşınan malzemelerde çok daha fazla miktarda malzeme kaybı yaşanmaktadır [76]. Korozif aşınmanın oluşumunun temel nedeni, aşınan malzeme ile malzemenin bulunduğu ortamdaki hava veya yağlayıcı gibi kimyasallarla girdiği kimyasal reaksiyondur. Kimyasal reaksiyonlar sonucu malzeme yüzeylerinde malzemeler için önemli yararlara sahip korozif tabakaların oluşumu gözlemlenir [65]. Oluşan bu koruyucu film tabakası yüzeyi aşınmaya karşı koruyucu özelliğe sahiptir. Koruyucu film tabakasına uygulanan kayma hareketi, koruyucu film tabakasına zarar vererek parçalanmasına sebep olur. Böylece malzemede aşınmanın meydana gelmesi daha

kolay hale gelir. Aşınan yüzey, ortamla kimyasal etkileşime girerek tekrar koruyucu film tabakasının oluşumu görülür. Tekrarlı kayma hareketinin uygulanması ile yüzeyde koruyucu tabakanın oluşumu için yeterli zamanın olması gerekmektedir. Parçalanan koruyucu tabaka parçaları aşınma sistemine katılarak aşınmanın daha hızlı gerçekleşmesini sağlar [83]. Şekil 3.14'de korozif aşınma mekanizması görülmektedir.



Şekil 3.14. Korozif aşınma mekanizması [65]

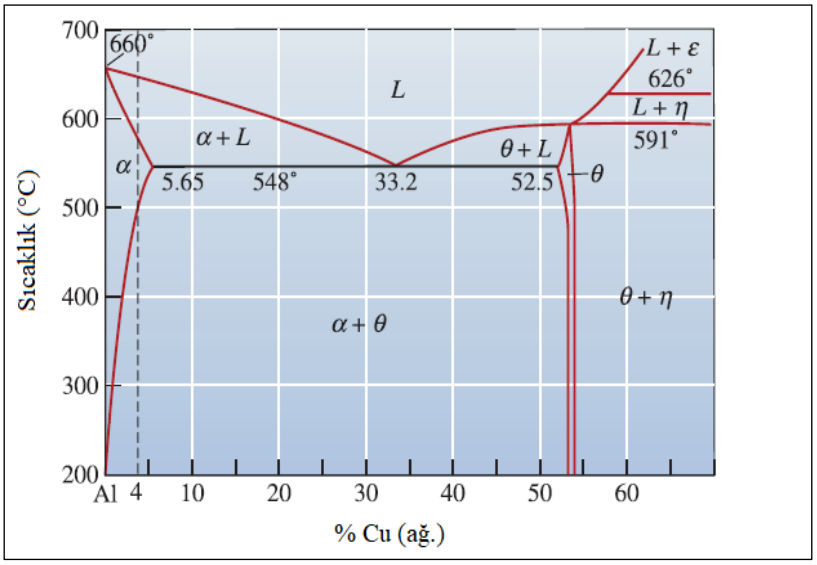
4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi

Aluminyum hafifliği, korozyon direnci, yüksek mekanik özellikleri ve düşük maliyetli olması olmasından dolayı metal matrisli kompozitlerde ana matris malzemesi olarak kullanımı için uygun bir malzemedir. Aluminyum matrisli kompozitler, geleneksel aluminyum alaşımlarına kıyasla oldukça düşük bir termal genleşme katsayısına, yüksek mukavemete, aşınma direncine ve yüksek ısıl direncine sahiptir [85]. Aluminyum matrisli kompozitlerin özelliklerinin geliştirilmesi için çeşitli takviye malzemeleri kullanılmaktadır.

Aluminyum matrisli kompozit malzemelere takviye malzemesi olarak bakırın kullanımı oldukça yaygındır. Takviye malzemesi olarak bakırın kullanılması, aluminyum matrisli kompozit malzemenin hasar toleranslarını arttırıcı yönde etki etmektedir. Geliştirilen bu özelliğinden dolayı Al-Cu alaşımları ve kompozitleri, uçak gövdesinin yapısal parçalarında ve sürtünerek çalışan parçalarda ana yapısal parçalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca saf bakır tozunun aluminyum içerisine eklenmesiyle malzemenin elektriksel ve termal iletkenlikleri geliştirilmektedir. Aluminyum matrise bakırın takviye edilmesiyle, malzemenin yüksek sıcaklık özellikleri, yorulma özellikleri, ısıl iletkenliği, işlenebilirliği, mekanik ve elektriksel özellikleri geliştirilir [1].

Parçaların hasarlanıp kullanılamaz hale gelmesinin en önemli nedeni olan aşınmanın azaltılması ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için Al-Cu kompozitlerine ısıl işlemler uygulanmaktadır. Al-Cu kompozitlerine malzemelerin mukavemetinde ve sertliğinde artış sağlanması, aşınmaya karşı dayanıklı bir yapı oluşturulması amacıyla yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmaktadır. Yapılan çalışmalara [22, 86-90] ve Şekil 4.1'de bulunan Al-Cu denge diyagramına bakıldığında, uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonucu malzemede çökelti sertleşmesinin meydana gelmesi için aluminyum içerisinde ağırlıkça %4 Cu bulunmasının yeterli olacağı düşünülmüştür.



Şekil 4.1. Al-Cu denge diyagramı [90]

Aluminyum matrisli kompozitlere SiC takviyesi ile malzemelerde daha düşük termal genleşme katsayısı, daha iyi termal iletkenlik, çok yüksek sertlik, korozyona karşı direnç ve termal şoklara karşı daha yüksek direnç elde edilebilmektedir [1]. Ayrıca aluminyum matrise SiC partiküllerinin eklenmesiyle malzemenin hem mekanik dayanımı hem de aşınma direnci arttırılabilmektedir. SiC takviyesiyle artan sertlikten dolayı malzemenin işlenebilirliği azalmaktadır [91].

Yapılan çalışmalara [92-98] bakıldığında SiC takviyesiyle aluminyum matrisli kompozitlerde sertlik artışı ve aşınma direncinin arttırıldığı görülmektedir. Ancak yapılan çalışmalarda [1, 97] Al içerisinde ağırlıkça %5 ve %7,5 SiC kullanılması durumunda aşınma oranını en düşük değerde olduğu, %5 SiC takviyesinin üzerinde sürtünme katsayısında artış meydana geldiği görülmektedir. Çalışma kapsamında Al-Cu kompozitine ağırlıkça %5 SiC takviyesi mekanik özelliklerde yeterli artışın sağlanabileceği düşünülmüştür.

Aluminyum matrisli kompozitlere grafit takviyesi ile sınır sürtünme koşulları altında malzemeye kendinden yağlayıcılık özelliği kazandırılabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı grafit takviyeli aluminyum matrisli kompozitlerin tribolojik uygulamalarda kullanılması için aday malzeme olmaktadır. Kendinden yağlayıcı olan grafit takviyeli kompozit malzemeler, düşük sürtünme katsayısına, aşınmaya karşı yüksek dirence, gelişmiş işlenebilirlik özelliği, aşınma temas yüzeyinde düşük sıcaklık artışı gibi üstün özelliklere sahiptir. Grafit partikül takviyeli aluminyum alaşımları, sahip

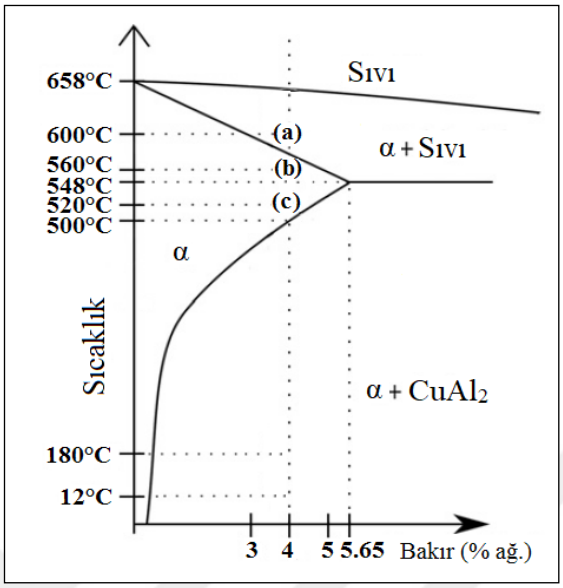
oldukları düşük ısıl genleşme ve yüksek sönümleme karakteristiği gibi malzemelerden beklenen üstün özelliklerinden dolayı pistonlarda, silindir gömleklerinde ve yataklarda tercih edilen malzemelerdir [85].

Yapılan çalışmalara [85, 89, 94, 99-101] bakıldığında Gr takviyesinin aluminyum matrisli kompozitlerin aşınma direncini arttırdığı, fakat sertliklerinde azalma olduğu görülmektedir. Grafit takviye miktarının ancak belirli bir oranda kullanıldığında aşınmayı azalttığı ve belirli grafit miktarının üzerinde bir değerde takviye edildiğinde aşınma miktarının artabileceği görülmüştür. İstenen özelliklerin elde edilmesi için takviye edilmesi gereken grafit takviye miktarının malzeme bileşimine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Yapılan literatür araştırmaları ve bu tez çalışmasından önce yaptığımız deneysel çalışmalar sonucu Al-4Cu-5SiC kompozitine daha düşük miktarda grafit takviyesinin yeterli olabileceği düşünülmüştür. Çalışma kapsamında farklı grafit takviye miktarlarının (ağırlıkça %0, 0,5, 1) kompozitin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Oluşturulan toz karışımlarına tane boyutlarının küçültülmesi ve tozların birbirleriyle alaşım oluşturması için mekanik alaşımlama işlemi uygulanmıştır. Mekanik alaşımlama süresi yapılan literatür araştırmalarına göre [98, 102-107] belirlenmiştir. Literatür araştırmalarına göre mekanik alaşımlama süresi arttıkça toz boyutlarının azaldığı, mikrosertliğin arttığı görülmüştür. Toz boyutları mekanik alaşımlama süresi arttıkça azalsa da, belirli bir mekanik alaşımlama süresinden sonra boyutların çok fazla değişmediği görülmüştür. Ancak uzun mekanik alaşımlama sürelerinde artan sertliğe ve küçülen toz boyutlarına bağlı olarak tozların sıkıştırılabilirliğinin azalmakta olduğu görülmüştür. Literatür çalışmaları sonucunda tez çalışmasında mekanik alaşımlama süresinin 15 saat olmasının yeterli olacağı düşünülmüştür.

Tez çalışmasında kullanılan sinterleme sıcaklıkları Şekil 4.2'deki Al-Cu denge diyagramında ağırlıkça %4 Cu oranı kullanılarak seçilmiştir. Şekil 4.2'de görülen Al-Cu denge diyagramında ağırlıkça %5,65 Cu içeren aluminyum bileşiminde ilk sıvı fazın 548°C'de oluştuğu görülmektedir. Aluminyum içerisinde Cu ağırlıkça %4 oranında bulunsa da aluminyum içerisinde Cu oranı fazla olan bölgeler bulunmaktadır. Bu bölgeler 548°C'nin üzerinde sıvı faza geçebilmektedirler. Bu

durumdan dolayı Al-Cu sisteminde 548°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yapılan sinterlemenin sıvı fazda veya geçici sıvı fazda gerçekleştiği kabul edilebilmektedir.

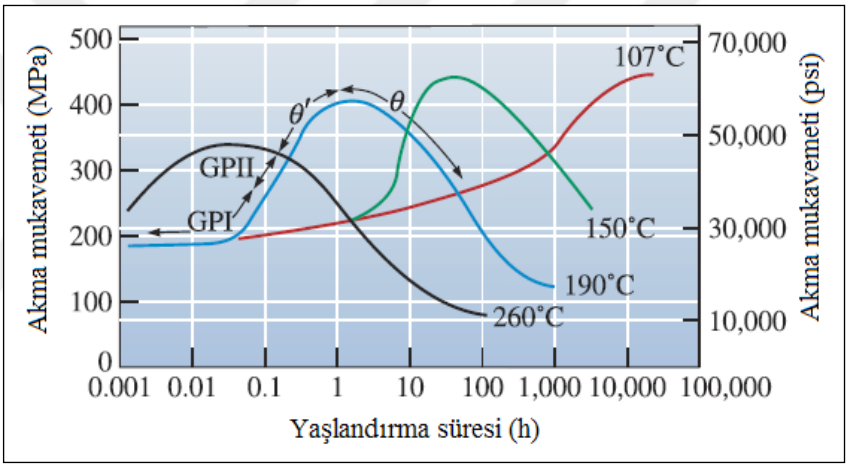


Şekil 4.2. Al-Cu denge diyagramında %4 Cu içeren bileşim için seçilen sinterleme sıcaklıkları a) 600°C, b) 560°C, c) 520°C [86]

Tez çalışması kapsamında farklı sinterleme sıcaklıkları (520°C, 560°C, 600°C) kullanılarak sinterleme sıcaklığının malzemenin mekanik özelliklerine olan etkilerinin ortaya çıkarılması istenmiştir. 520°C'de sinterlenen numunelere katı faz sinterlemesi, 560°C'de sinterlenen numuneler Şekil 4.2'de katı faz sinterlemesi olarak görünse de yüksek Cu içeren bölgelerden dolayı sıvı faz sinterlemesi, 600°C'de sinterlenen numuneler ise sıvı faz sinterlemesi uygulanmıştır. Çalışmada katı fazda sinterlenmiş numunelerin mekanik özellikleriyle sıvı fazda sinterlenmiş numunelerin mekanik özelliklerinin hangi ölçüde etkilediğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Isıl işlem uygulanabilen aluminyum alaşımlarına ve kompozitlerine yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilmektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile malzemenin mukavemetinde ve sertliğinde artış sağlanmaktadır. Çökelme sertleşmesi olarak da bilinen yaşlandırma işlemi üç aşamada uygulanmaktadır. İlk aşamada çözeltiye alma, ikinci aşamada hızlı soğutma ve ardından üçüncü aşamada malzemenin belirli bir sıcaklıkta tutulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Çözeltiye alma ısıl işlemi solvüs sıcaklığı ile östenitik sıcaklığın arasında bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Al içerisinde ağırlıkça %4

Cu içeren bileşimler için bu sıcaklıklar 500°C ile 548°C arasında değişmektedir. Çözeltiye alma işleminden sonra aşırı doymuş bir yapının oluşturulması için hızlı soğutma uygulanır. Ardından malzemeyi solvüs sıcaklığının altında bir sıcaklıkta tutarak matris içerisinde uyumlu çökeltilerin oluşturulması sağlanır [90]. Şekil 4.3'de Al-4Cu bileşimi için yaşlandırma ısıl işleminde yaşlandırma süresinin akma mukavemetine etkisi görülmektedir. Şekil 4.3 yaşlandırma süresi ve yaşlandırma sıcaklıklarının Al-4Cu bileşiminin mekanik özelliklerinin değişimi hakkında bilgi verebilmektedir. Yaşlandırma süresinin belirli bir süreyi geçtiği zaman Al-4Cu bileşiminin aşırı yaşlandırılarak mekanik özelliklerinin kötüleştiği görülmektedir. Şekil 4.3 tez çalışmasında kullanılacak yaşlandırma süresi hakkında bilgi verebilmektedir.



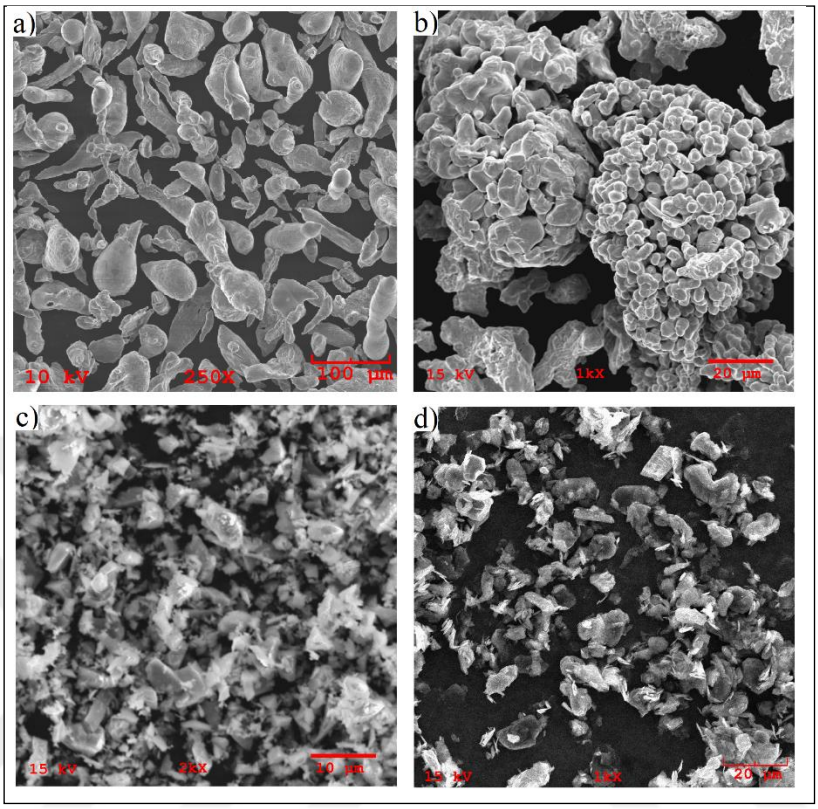
Şekil 4.3. Al-4Cu bileşimi için yaşlandırma süresi ve sıcaklığıyla akma mukavemetinin değişimi [90]

Numuneler uygulanan ısıl işlem parametreleri yapılan çalışmalardan [22, 90, 93, 108-111] ve Şekil 4.3'den yararlanılarak, 500°C'de 4 saat çözeltiye alma, ardından suda hızlı soğutma, daha sonra aşırı yaşlanmanın oluşmaması için 200°C'de 8 saat yaşlandırma olarak uygulanmıştır. Numunelere uygulanan bu ısıl işlemler ile mekanik özelliklerde artışın meydana gelmesi istenmiştir.

4.2. Kullanılan Tozların Özellikleri

Bu tez çalışmasında ticari saflıkta Al, Cu, SiC ve Gr tozları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan Al tozları Gürel Makina A.Ş. firmasından, geri kalan tüm tozlar Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Toz Metalurjisi Labolartuvarı'ndan

temin edilmiştir. Kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobunda çekilen görüntüleri Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Saf a) Al, b) Cu, c) SiC, d) Gr tozlarının SEM görüntüleri

Şekil 4.4'deki SEM görüntülerine göre Al tozunun partikül büyüklüğünün ~30-100 µm aralığında olduğu, Cu tozunun partikül büyüklüğünün ~10 µm'nin altında büyüklüklerde olduğu, SiC tozunun partikül büyüklüğünün ~5 µm'nin altında büyüklüklerde olduğu, Gr tozunun partikül büyüklüğünün ~20 µm'nin altında büyüklüklerde olduğu görülmektedir. SEM görüntülerinde Cu, SiC ve Gr tozlarının topaklanmış olarak bulunduğu görülmektedir.

4.3. Toz Bileşiminin Hazırlanması

Çalışmada kullanılacak toz bileşimini hazırlarken, Al, Cu, SiC ve Gr tozları kullanılmıştır. Toz bileşimleri % ağırlıkça Al-4Cu-5SiC-xGr olacak şekilde hassas terazide tartılarak bir araya getirilmiştir. Matris malzemesi olarak Al tozları kullanılmıştır. Toz bileşiminde Cu ve SiC miktarı (% ağırlıkça) sabit olup, oluşturulan bileşime grafit takviyesinin etkilerinin belirlenmesi için ağırlıkça %0,

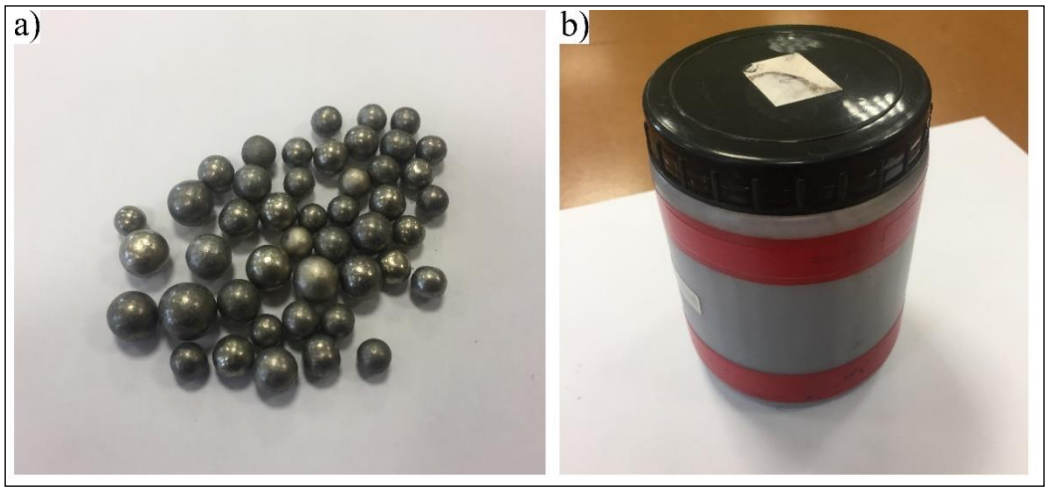
%0,5 ve %1 gibi değişken oranlarda grafit tozları kullanılmıştır. Tablo 4.1'de çalışma için hazırlanan toz bileşimleri görülmektedir. Her bir toz bileşimi için 40 g toz karışımı hazırlanmıştır.

Tablo 4.1. Tez çalışmada kullanılan toz bileşimleri

Numune kodları	**Toz bileşim oranları (% ağırlıkça)**			
	Al	Cu	SiC	Gr
01, 02, 03, 04, 05, 06	91	4	5	0
51, 52, 53, 54, 55, 56	90,5	4	5	0,5
11, 12, 13, 14, 15, 16	90	4	5	1

4.4. Mekanik Alaşımlama

Bileşimi Tablo 4.1'deki gibi hazırlanan toz karışımlarına, her bir bileşim ayı ayrı plastik karıştırma kapları içerisinde mekanik alaşımlama işlemi uygulanmıştır. Mekanik alaşımlama işlemi için, polipropilen kap içerisine her bir bileşim için bilye/toz oranı 5/1 olacak şekilde değişik çaplara sahip (7mm - 14mm) Ni bilyeler kullanılmıştır. Şekil 4.5'de kullanılan Ni bilyeler ve kullanılan karıştırma kabı görülmektedir.



Şekil 4.5. Mekanik alaşımlama işleminde kullanılmış olan a) Ni bilyeler, b) Polipropilen karıştırma kabı

Mekanik alaşımlama işlemi Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan, Şekil 4.6'da görülen MSE-TEC marka bilyeli değirmen cihazında gerçekleştirilmiştir. İçerisine toz karışımı ve bilyelerin konulduğu plastik kap, 400 rpm'de 15 saat süre ile döndürülerek mekanik alaşımlama işlemi uygulanmıştır. Üç farklı toz bileşimi için aynı mekanik alaşımlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

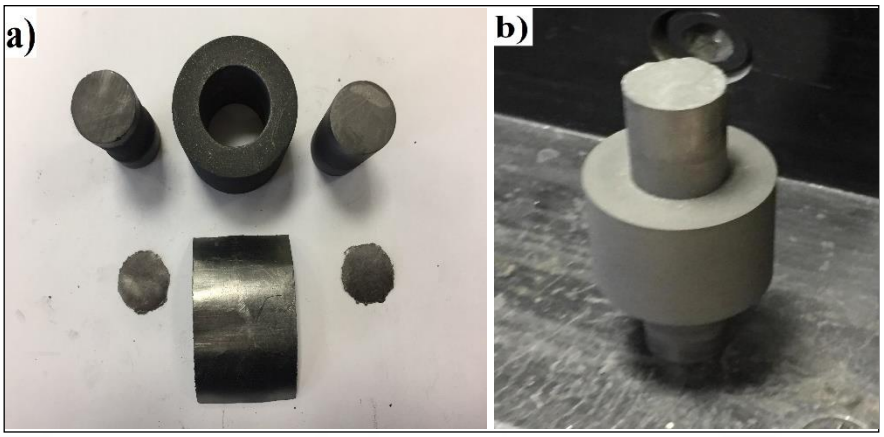


Şekil 4.6. MSE-TEC marka bilyeli değirmen

4.5. Tozların Sıcak Pres ile Sinterlenmesi

Mekanik alaşımlama işlemi uygulanan tozlar, grafit kalıplar kullanılarak Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan sıcak pres cihazı ile sinterleme işlemi yapılmıştır. Sıcak preste kalıp malzemesi olarak yüksek elektrik ve ısıl iletkenliğinden dolayı grafit kalıplar kullanılmaktadır. Kalıp ömrünün arttırılması ve elde edilecek sinterlenmiş numunelerin istenen boyutlarda üretilebilmesi için kalıp iç duvarını ve zımbaların kalıp içerisinde kalan yüzeylerini kaplayacak şekilde grafit kağıtlar kesilerek kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 4.7'de kullanılan grafit kalıp ve grafit kağıtlar görülmektedir. Kullanılan grafit kağıtların kalınlığı 0,20 mm olup, elde edilecek numunelerin yarıçapı r=10 mm olacak şekilde kalıp ölçüleri ayarlanmıştır. Grafit kağıt grafit kalıp içerisine yerleştirildikten sonra kalıp içerisine, 20 mm çapında 5 mm kalınlığında numune elde edilebilecek kadar toz ilave edilmiştir. Toz ilavesinden

sonra grafit kağıt ile üzeri kapatılıp zımba ile sıkıştırılarak sinterlemeye hazır hale getirilmiştir.



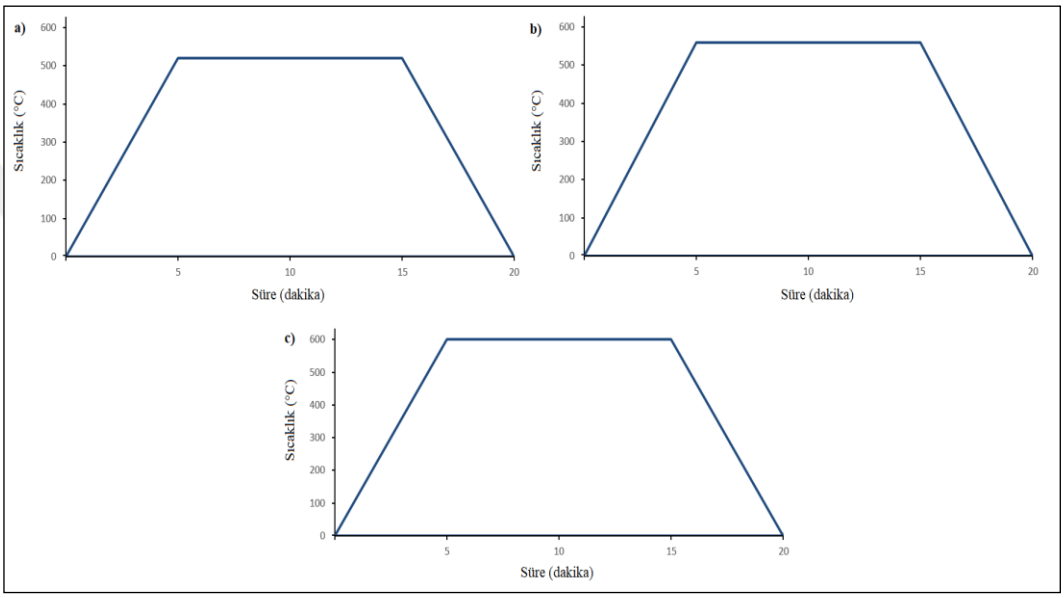
Şekil 4.7. a) Sinterleme işleminde kullanılan grafit kalıp, zımbalar ve grafit kağıtlar, b) sinterlenme işlemine hazır durumda olan kalıp

Grafit kalıba yerleştirilen tozlara DIEX marka sıcak pres ile sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi sırasında toz bileşiminin ortam atmosferinden etkilenmemesi için sinterleme işlemi 10^{-4} mbar vakum atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8'de DIEX marka sıcak pres cihazı görülmektedir.



Şekil 4.8. DIEX marka sıcak pres cihazı

Toz karışımlarının sinterlenmesi üç farklı sinterleme sıcaklığında (520°C, 560°C, 600°C) gerçekleştirilmiştir. Her bir toz bileşimi için bu üç sinterleme sıcaklığında sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi, 5 dakikada sinterleme sıcaklığına ısıtma, 10 dakika sinterleme sıcaklığında bekleme ve 5 dakika sinterleme sıcaklığından soğuma olarak uygulanmıştır. Sinterleme işlemi 45 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9'da sinterleme işleminde kullanılan sıcaklık-zaman grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.9. Sinterleme işleminde kullanılan sinterleme-zaman grafiği a) 520°C, b) 560°C, c) 600°C

Tablo 4.2. Numunelerin sinterleme sıcaklıkları

Malzeme bileşimi	**Sinterleme sıcaklığı (°C)**	**Numune kodları**
Al-4Cu-5SiC	520°C	01, 02
	560°C	03, 04
	600°C	05, 06
Al-4Cu-5SiC-0,5Gr	520°C	51, 52
	560°C	53, 54
	600°C	55, 56
Al-4Cu-5SiC-1Gr	520°C	11, 12
	560°C	13, 14
	600°C	15, 16

4.6. Toz Ağırlığı ve Numune Yoğunluğunun Belirlenmesi

Toz bileşimini hazırken tozların tartılmasında ve sinterlenmiş numunelerin yoğunluğunu ölçülmesinde Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan AND marka GR-200 model hassas terazi kullanılmıştır. Şekil 4.10'da kullanılan hassas terazi görülmektedir. Numunelerin yoğunluk ölçümü Arşimet prensibinden yararlanılarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. AND marka hassas terazi

4.7. Numunelere Uygulanan Isıl İşlemler

Numunelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için numunelere çözeltiye alma ısıl işlemi ve ardından yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlemler Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Isıl İşlem Laboratuvarı'nda bulunan Linn marka High Term VMK 1600 tipi yüksek sıcaklık ergitme fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11'de ısıl işlemlerde kullanılan fırın görülmektedir.



Şekil 4.11. Isıl işlemlerde kullanılan Linn marka yüksek sıcaklık ergitme fırını

Numunelere uygulanan çözeltiye alma ısıl işlemi, 500°C'de 4 saat fırında tutularak gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alma ısıl işlemi tamamlandıktan sonra numuneler suda hızlıca soğutulmuştur. Yapılan bu ısıl işlemden sonra numuneler fırına konularak 8 saat süre ile 200°C'de yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma ısıl işleminden sonra numuneler oda sıcaklığında soğutulmuştur.

Tablo 4.3. Numunelere uygulanan ısıl işlemler

Malzeme bileşimi	**Sinterleme sıcaklığı**	**Isıl işlem uygulanan numuneler**	**Isıl işlem uygulanmayan numuneler**
Al-4Cu-5SiC	520°C	01	02
	560°C	03	04
	600°C	05	06
Al-4Cu-5SiC-0,5Gr	520°C	51	52
	560°C	53	54
	600°C	55	56
Al-4Cu-5SiC-1Gr	520°C	11	12
	560°C	13	14
	600°C	15	16

4.8. Numunelerin Metalografik İncelemelere Hazırlanması

Sinterlenen numunelerin metalografik incelemelere hazırlanması için numune yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Numune yüzeyleri Metkon marka Forcipol 2V model zımparalama-parlatma cihazında hazırlanmıştır. Zımparalama işlemi, sırasıyla 320, 600, 1000, 2500 gridlik zımparalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalanan yüzeylerin parlatma işlemi, 3 µm'lik elmas pasta kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12'de kullanılan zımparalama ve partlatma cihazı görülmektedir.



Şekil 4.12. Metkon marka zımparalama-partlatma cihazı

4.9. Mekanik Testler

4.9.1. Sertlik ölçümü

Numunelere uygulanan farklı sinterleme sıcaklıklarının ve ısıl işlemlerin etkilerinin belirlenmesi için numunelere sertlik testi yapılmıştır. Sertlik ölçümleri Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüm Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan Wolpert marka Brinell sertlik ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Brinell sertliği, 2,5 mm çapında bilyenin numune yüzeyine 15 saniye yük uygulanarak ölçülmüştür. Şekil 4.13'de Wolpert marka Brinell sertlik cihazı görülmektedir.



Şekil 4.13. Wolpert marka Brinell sertlik cihazı

4.9.2. Aşınma testi

Numunelerin aşınma karşı davranışlarını belirlemek için Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuarında bulunan NANOVEA marka ball on disk tipi tribometre ile aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'de aşınma deneyinde kullanılan NANOVEA marka tribometre aşınma cihazı görülmektedir.

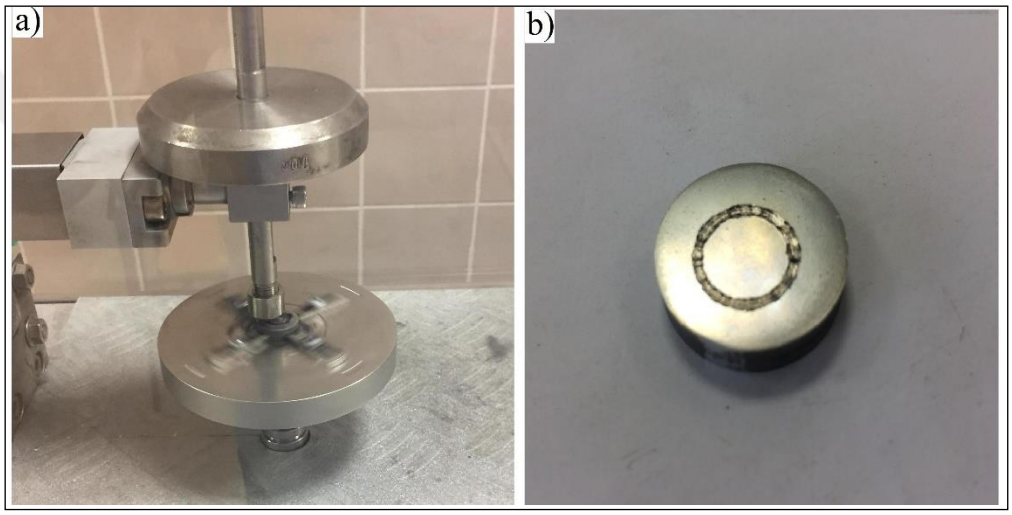


Şekil 4.14. NANOVEA marka tribometre aşınma cihazı

Aşınma testi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testinde uygulanan yük, dönme hızı, kullanılan aşındırıcı bilye, kayma mesafesi ve aşınma çapı gibi belirlenen parametreler Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Aşınma testinde kullanılan aşınma parametreleri

Uygulanan yük	**Dönme hızı**	**Kullanılan bilye**	**Kayma mesafesi**	**Aşınma çapı**
10 N	150 rpm	6mm çapında 100Cr6 Çelik bilye	200 m	10 mm

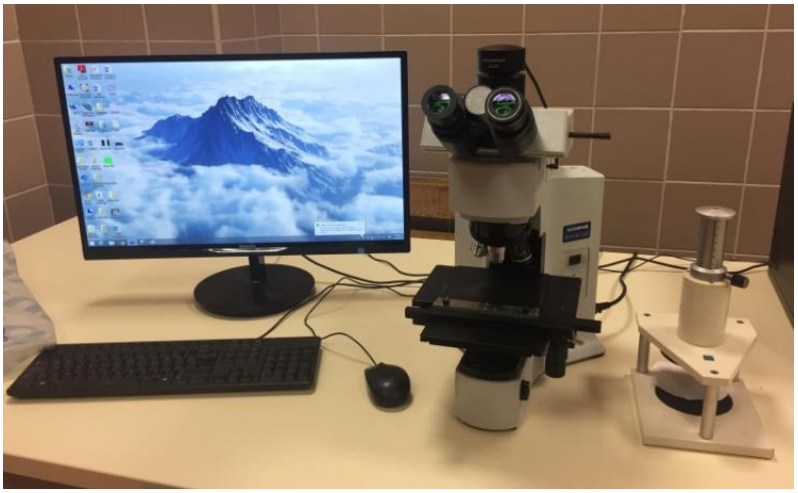


Şekil 4.15. a) Aşınma testinin uygulanışı, b) aşınma testi uygulanmış numune

4.10. Numunelerin Mikroyapısal Karakterizasyon

4.10.1. Optik mikroskop ile karakterizasyon

Numunelerin içyapı özelliklerinin anlaşılabilmesi için Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü elektron ve Işık Mikroskobisi Laboratuvarı'nda bulunan Olympus marka BX41M-LED model optik mikroskop kullanılmıştır. Şekil 4.16'da Olympus marka optik mikroskop görülmektedir.



Şekil 4.16. Olympus marka optik mikroskop

4.10.2. SEM ve EDX ile karakterizasyon

Numunelerin içyapı özelliklerinin ve aşınma izlerinin incelenmesi için Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü elektron ve Işık Mikroskobisi Laboratuvarı'nda bulunan JEOL marka JSM-6060 model SEM ve EDX analizi yapabilen taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 4.17'de JEOL taramalı elektron mikroskobu görülmektedir.

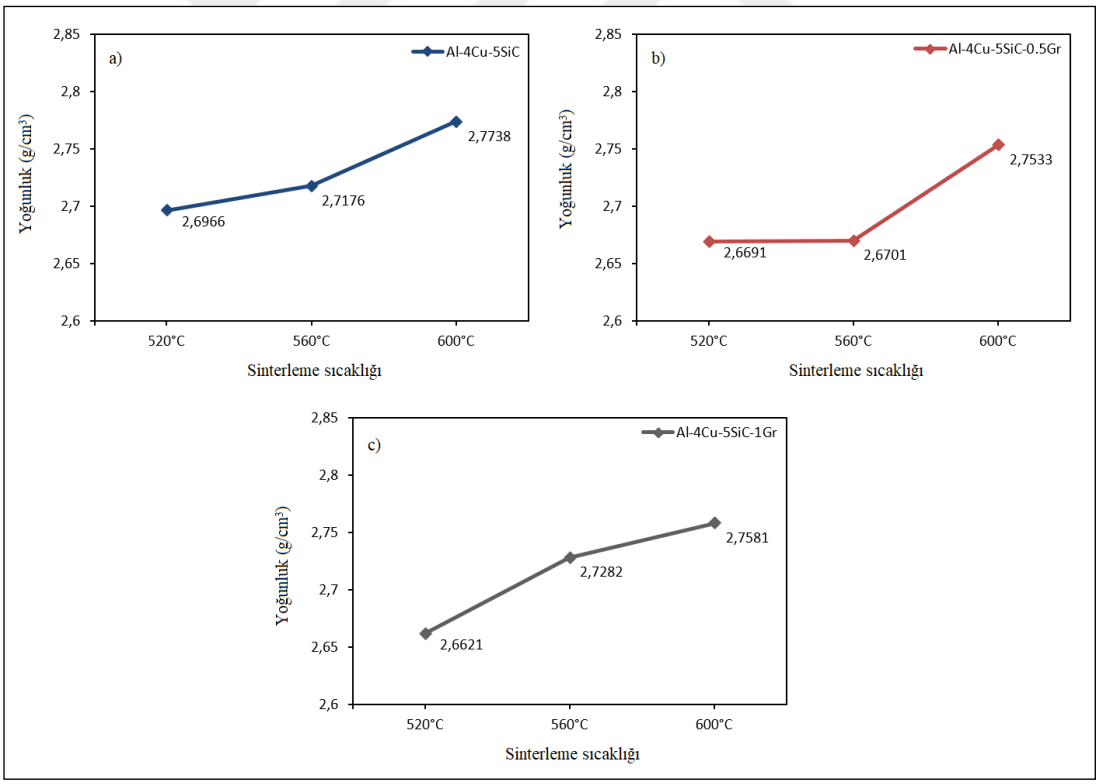


Şekil 4.17. JEOL taramalı elektron mikroskobu

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Yoğunluk Sonuçları

Sinterleme işlemi uygulanmış malzemelerin, içinde gözenekler bulundurmaması istenmektedir fakat teorik yoğunluğa sahip malzemelerin üretimi mümkün olmamaktır. Çalışmada toz metalurjisi yöntemi kullanılarak teorik yoğunluğa yakın malzemelerin üretilebilmesi amaçlanmaktadır. Tez çalışması kapsamında sinterleme işlemi sonrasında Arşimet prensibi ile numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. Elde edilen yoğunlukların sinterleme sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi belirlenmiştir. Şekil 5.1'de Al-4Cu-5SiC bileşimi, Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimi ve Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimi için yoğunluk değerleri görülmektedir.



Şekil 5.1. Farklı sinterleme sıcaklıklarında elde edilen yoğunluk değerleri a) Al-4Cu-5SiC bileşimi, b) Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimi, c) Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimi

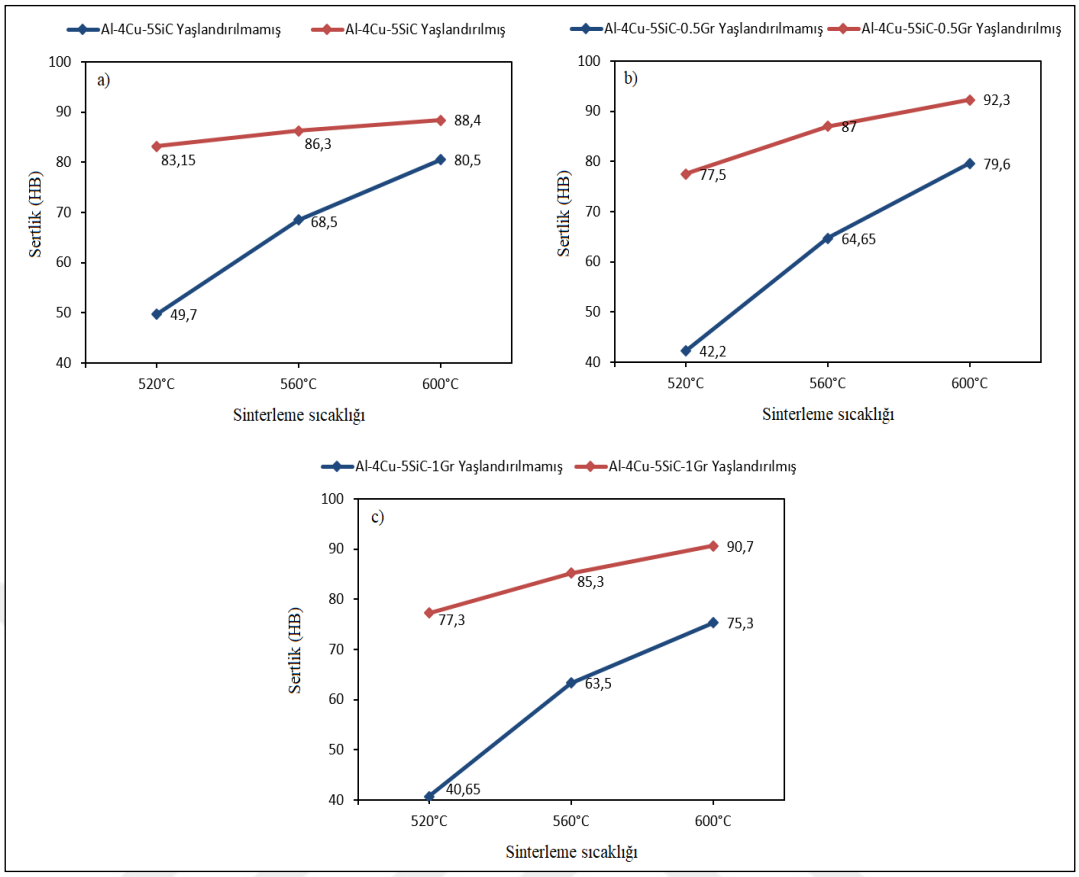
Her bir malzeme bileşimi için en düşük yoğunluk değeri 520°C'de sinterlenmiş numunelerde, en yüksek yoğunluk değerleri ise 600°C'de sinterlenen numunelerde görülmüştür. 560°C'de sinterlenen numunelerden elde edilen yoğunluk değerleri 520°C'de sinterlenen numunelerden daha yüksek olsa da, 600°C'de sinterlenen numunelere göre daha küçük değerlere sahiptir. Ölçümler göstermektedir ki, sinterleme sıcaklığının artışı ile yoğunluğu daha yüksek olan parçalar elde edilebilmektedir. 600°C'de sinterlenen numunelerden elde edilen yoğunluk değerlerinin yüksek olmasının nedeninin sinterleme işleminde Cu tozlarının sıvı faza geçmesi ile yapıda sıvı faz sinterlemenin gerçekleşmesi olduğu düşünülmektedir. Fakat 600°C'de sinterlenen numunelerden elde edilen yoğunluk değerleri Tablo 5.1'de görülen teorik yoğunluklara yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Elde edilen yoğunluk değerlerine göre 600°C'de sinterlemede sıvı faz sinterlemesinin etkileri daha açık olarak görülebilmektedir. Elde edilen yoğunluklar teorik yoğunluğa göre relatif yoğunlukları hesaplandığında, numunelerin relatif yoğunluklarının %95,167 ile %99,064 arasında değiştiği görülmüştür.

Tablo 5.1. Üretilen numunelerin teorik yoğunlukları

Malzeme bileşimi	**Teorik yoğunluk (g/cm^3)**
Al-4Cu-5SiC	2,8
Al-4Cu-5SiC-0,5Gr	2,7973
Al-4Cu-5SiC-1Gr	2,7945

5.2. Sertlik Sonuçları

Sinterleme sıcaklığının, grafit takviye miktarının ve yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC bileşimi üzerine etkisinin belirlenmesi için numunelere sertlik testleri uygulanmıştır. Numunelerin sertlik ölçümü için Brinell sertlik yöntemi kullanılmıştır. Yaşlandırma ısıl işleminin malzeme sertliğine etkilerinin belirlenmesi için numuneler, ısıl işlem uygulanmadan önce sertlik değerleri ölçülmüş olup, ısıl işlem uygulandıktan sonra tekrar sertlik değerleri ölçülmüştür. Numune sertlikleri, her bir numunenin beş farklı bölgesinden yapılan sertlik ölçümlerinin ortalamasına göre belirlenmiştir. Şekil 5.2'de numunelerden elde edilen sertlik değerleri görülmektedir.



Şekil 5.2. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin a) Al-4Cu-5SiC bileşiminin, b) Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşiminin, c) Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşiminin sertliğine olan etkisi

Şekil 5.2'de görülen sertlik değerlerine göre Al-4Cu-5SiC, Al-4Cu-5SiC-0,5Gr, ve Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimleri için, 520°C'de sinterlenen numunelerin en düşük sertliğe sahip numuneler olduğu, 560°C'de sinterlenen numunelerin ise 520°C'de sinterlenen numunelere göre daha yüksek sertliğe sahip oldukları görülmüştür. 560°C'de sinterlenen numunelerde 520°C'de sinterlenen numunelere göre malzeme bileşimine bağlı olarak sertliklerinde %38 ile %56 arasında artış olduğu gözlenmiştir. En yüksek sertlik değerlerine sahip numunelerin ise 600°C'de sinterlenen numuneler olduğu görülmüştür. 600°C'de sinterlenen numunelerde 560°C'de sinterlenen numunelere göre malzeme bileşimine bağlı olarak sertliklerinde %14 ile %28 arasında artış olduğu görülmüştür.

Şekil 5.2'de görülen sertlik değerlerine göre, numunelere yaşlandırma ısıl işlemi uygulandıktan sonra Al-4Cu-5SiC, Al-4Cu-5SiC-0,5Gr, ve Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimlerine sahip tüm numunelerin sertliklerinde artış gözlemiştir. Yaşlandırma ısıl

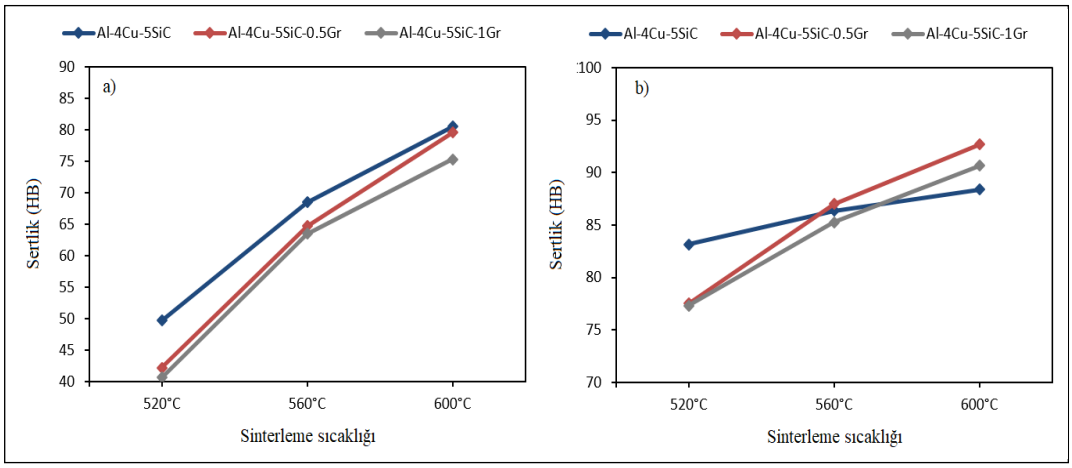
işlemi ile sertlikte meydana gelen artış oranları Tablo 5.2'de yaklaşık olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.2. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerde meydana gelen sertlik değişim oranları

Malzeme bileşimi	**Sertlik artış oranı**		
	520°C sinterleme sıcaklığında	**560°C sinterleme sıcaklığında**	**600°C sinterleme sıcaklığında**
Al-4Cu-5SiC	%67	%26	%11
Al-4Cu-5SiC-0,5Gr	%83	%34	%15
Al-4Cu-5SiC-1Gr	%90	%34	%20

Elde edilen sonuçlara göre en fazla sertlik artışı 520°C'de sinterlenen numunelerde olduğu, 560°C'de sinterlenen numunelerde ise 520°C'de sinterlenen numunelere göre sertlik artış oranının daha az olduğu görülmüştür. 600°C'de sinterlenen numunelerde ise sertlik artış oranının daha az olduğu görülmüştür. Sertlik artış oranının ağırlıkça %1 grafit içeren numunelerde, ağırlıkça %0,5 grafit içeren numunelere göre aynı veya daha fazla olduğu görülmüştür. Grafit içermeyen numunelerde görülen sertlik artışının grafit içeren numunelere göre daha az olduğu görülmüştür.

Şekil 5.2'de görülen sertlik değerlerine göre yaşlandırma işleminden sonra da en yüksek sertlik değerleri 600°C'de sinterlenen numunelerde olduğu görülmüştür. 520°C'de sinterlenen numunelerde ise yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilen yüksek sertlik artış oranlarına rağmen sertlik değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Sinterleme sıcaklığının arttırılması ile sertlik değerlerinin arttığı ve yaşlandırma ısıl işlemi ile sinterleme işlemi sonrası elde edilen sertliklerin daha da arttırılabileceği görülmüştür.



Şekil 5.3. Sinterleme sıcaklığının ve Gr takviye miktarının a) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmamış, b) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerlerine etkisi.

Şekil 5.3'de grafit takviyesinin Al-4Cu-5SiC kompozitinin sertlik değerlerine etkileri görülmektedir. Şekil 5.3.a'da Al-4Cu-5SiC, Al-4Cu-5SiC-0,5Gr, ve Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimleri yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmadan önce elde edilen sertlik değerleri görülmektedir. 520°C'de, 560°C'de ve 600°C'de sinterlenen numunelerde grafit takviyesi sertliği azaltıcı yönde etki ettiği görülmüştür. Grafit takviyesinin malzeme sertliğini azaltıcı yönde etki ettiğini yapılan çalışmalar [85, 89, 100, 101] bu durumu desteklemektedir. Sinterlenen numuneler içerisinde en yüksek sertlik değeri 600°C'de sinterlenen ve grafit takviyesi içermeyen içeren numunede görülmekle beraber ağırlıkça %0,5 grafit takviyesi bulununan numuneden elde edilen sertlik değeri de bu değere oldukça yakın bir değerdir.

Şekil 5.3.b'de Al-4Cu-5SiC, Al-4Cu-5SiC-0,5Gr, ve Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimleri yaşlandırma ısıl işlemi uygulandıktan sonra elde edilen sertlik değerleri görülmektedir. 520°C'de sinterlenen ve yaşlandırılmış numuneler içerisinde en yüksek sertlik değeri grafit içermeyen numune olsa da, aynı malzeme bileşimi 600°C'de sinterlenmesi ve yaşlandırılması durumunda diğer numuneler içerisinde en düşük sertlik değerine sahip olmuştur. 600°C'de sinterlenen ve yaşlandırılan numuneler içerisinde grafit takviyesine sahip numunelerin sertlikleri grafit içermeyen numuneye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm numuneler içerisinde en yüksek sertlik değeri 92,3 HB ile 600°C'de sinterlenen ağırlıkça %0,5 grafit içeren yaşlandırılmış numune olduğu görülmüştür. Grafit takviyesine sahip bileşimlerde

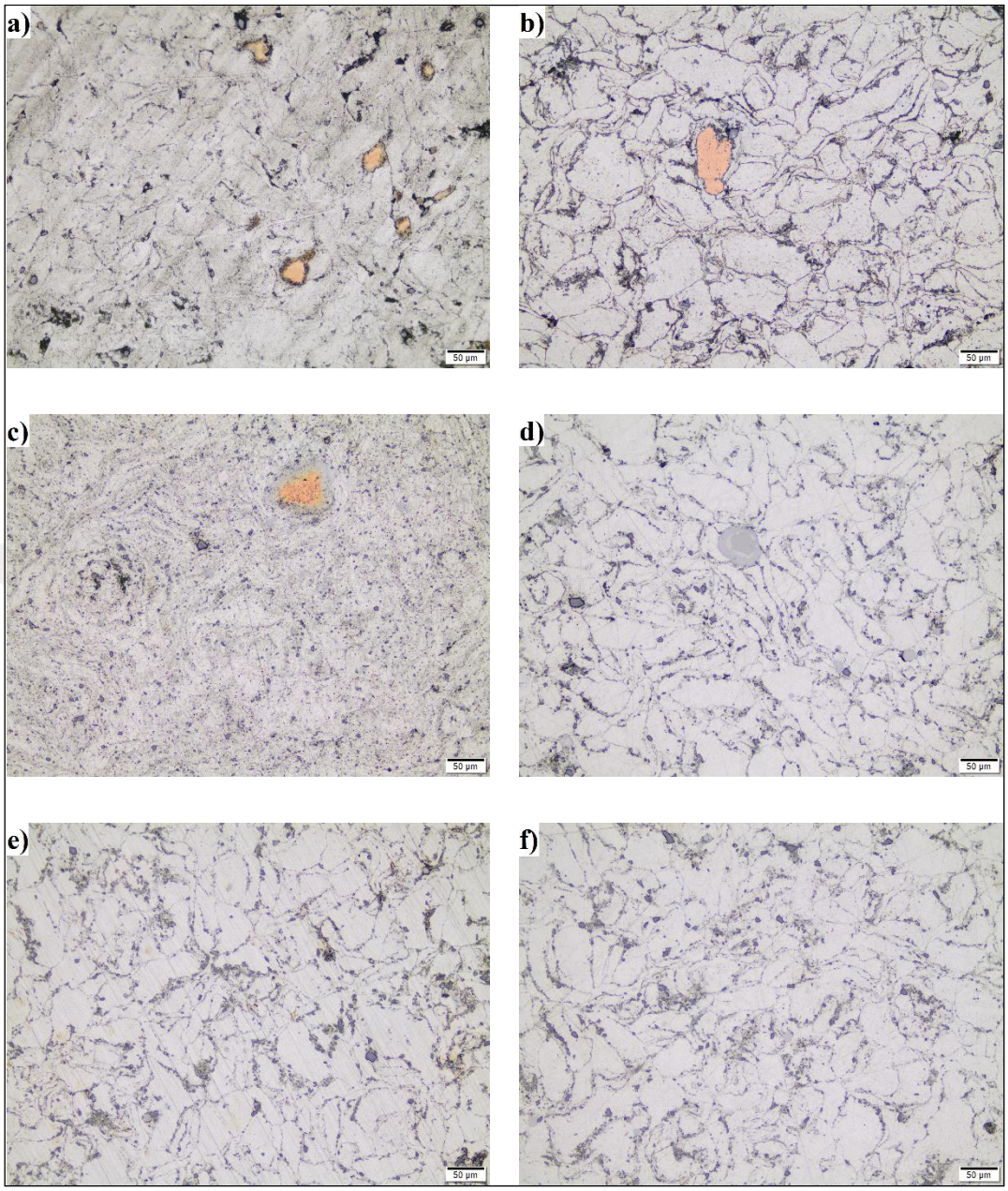
grafit takviyesi olmayan bileşime göre yaşlandırma ısıl işlemi uygulanması ile daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılabileceği görülmüştür.

Hu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada grafit takviye miktarının artışına bağlı olarak sertlik değerlerinin düştüğünü ancak yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde grafit takviyesi fazla olan numunelerin sertliği grafit takviyesi düşük olan numuneden daha fazla çıkabileceğini gözlemlemiştir. Al-Gr arayüzeylerinin, ikincil fazın çökelme hızını arttırıcı yönde etki edebileceği ve artan çökeltilerin etkisiyle sertliğin daha fazla çıkabileceğini belirtmişlerdir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan grafit takviyeli numunelerde Al-Gr arayüzeyinin, en yüksek sertliği elde edilebilecek yaşlandırma süresinin azaltıcı yönde etki edebileceğini belirtmiştir. Grafit partiküllerinin neden olduğu yüksek dislokasyon yoğunluğunun yaşlanma işlemini hızlandırdığını belirtmiştir. Artan dislokasyon yoğunluğunun malzeme sertliğini arttırıcı yönde etki ettiği belirtilmiştir [94].

Şekil 5.3.b'de 560°C'de ve 600°C'de sinterlenen grafit takviyeli numunelerde yaşlandırma sonucu sertliklerin daha fazla çıkmasının Hu ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada belirttikleri etkilere dayandığı düşünülmektedir.

5.3. Optik Mikroskop ile Numunelerin İncelenmesi

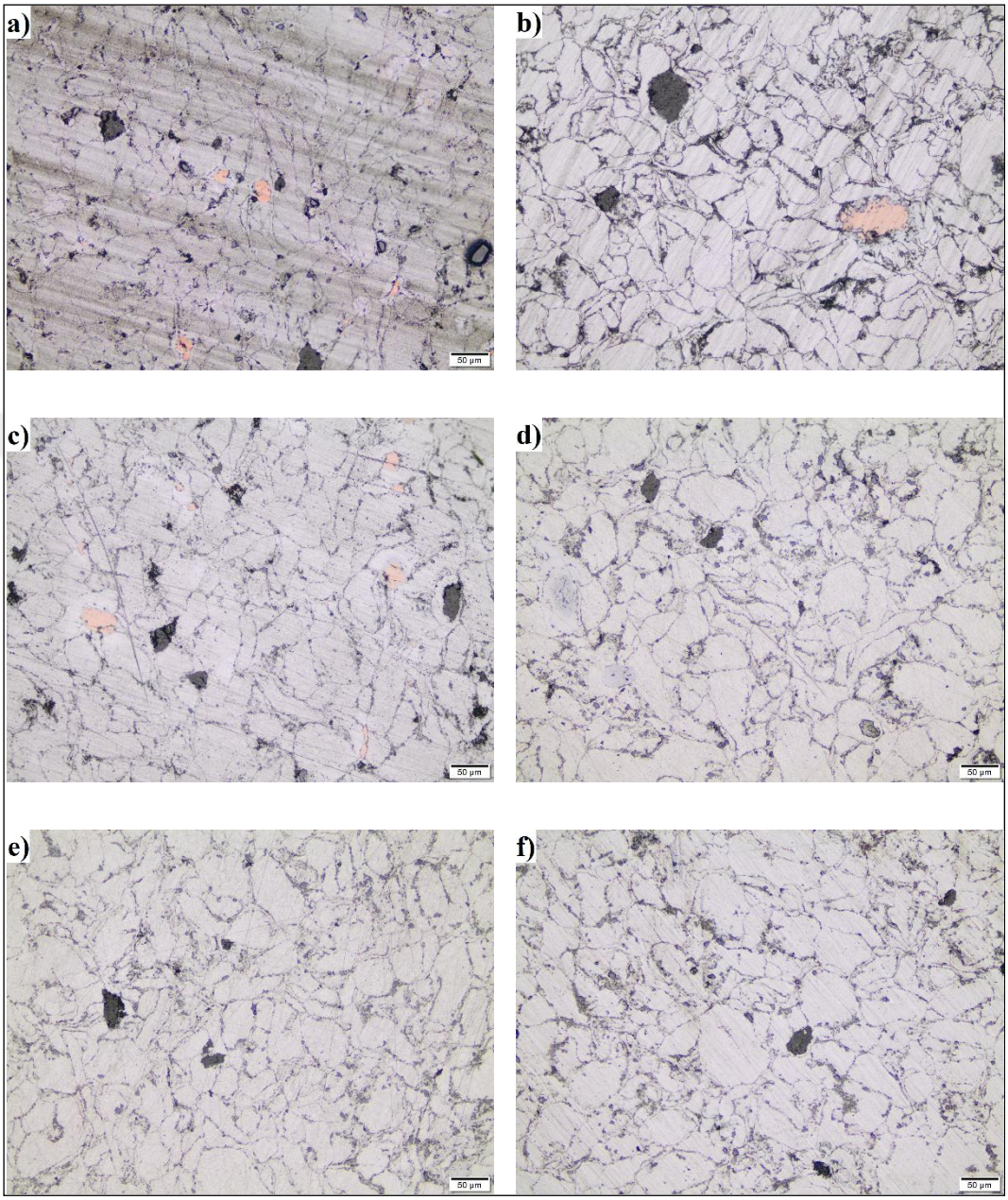
Şekil 5.4'te Al-4Cu-SiC bileşimine sahip numunelerin optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.4'teki optik mikroskop resimlerine bakıldığında açık gri renkli ve köşeli olarak görülen SiC tozlarının matris içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. Aluminyum tozlarının kenarlarında oksitlenmeler görülmüştür. Toz kenarlarındaki oksitlenme 520°C'de sinterlenen numunelerde daha belirgin olarak görülmektedir. Aluminyum tozlarının sinterleme sıcaklığının artışıyla daha iyi bağlanabildiği ve tane sınırlarındaki oksitlenmenin daha az görüldüğü düşünülmektedir.



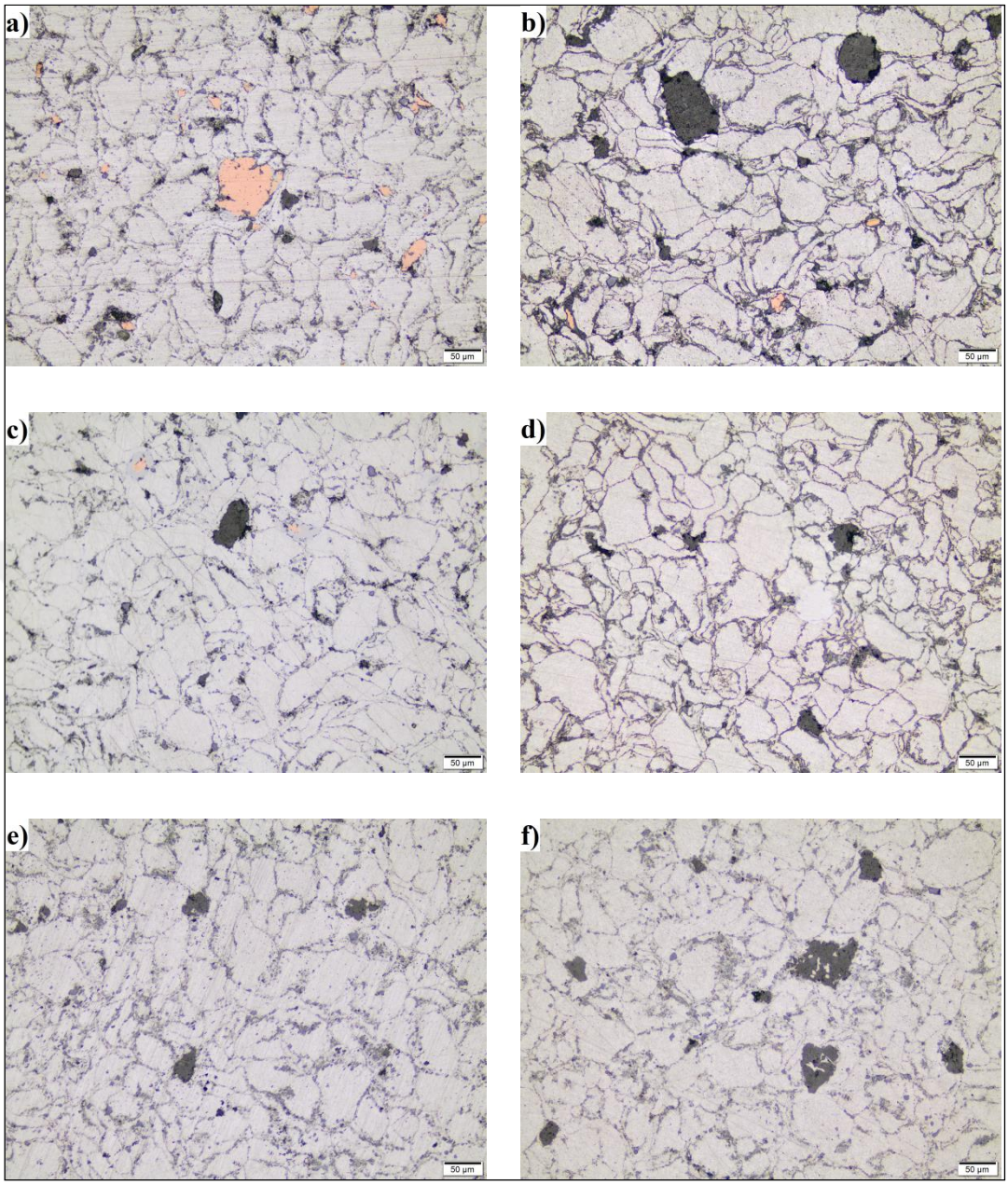
Şekil 5.4. Al-4Cu-SiC bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 20x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5.4'e bakılarak, 520°C'de sinterlenen numunelerde turuncu renkte görülen bakırın aluminyum ile yeni bir faz oluşturmadan matris içerisinde bulunduğu, 560°C'de sinterlenen numunelerde bakırın etrafında görülen gri renkli bölgede Al_2Cu fazının oluştuğu ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisiyle Al_2Cu fazı oluşturmamış Cu Al_2Cu fazına geçtiği düşünülmektedir. Şekil 5.4.e ve Şekil 5.4.f'ye bakılarak 600°C'de sinterlenen numunelerde bakır tozlarının matris içerisinde

belirgin bir şekilde görülmediği, bakırın sıvı faz sinterlemenin etkisiyle işlemiyle matris içerisinde çözündüğü ve Al_2Cu fazına geçtiği düşünülmektedir.



Şekil 5.5. Al-4Cu-SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 20x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

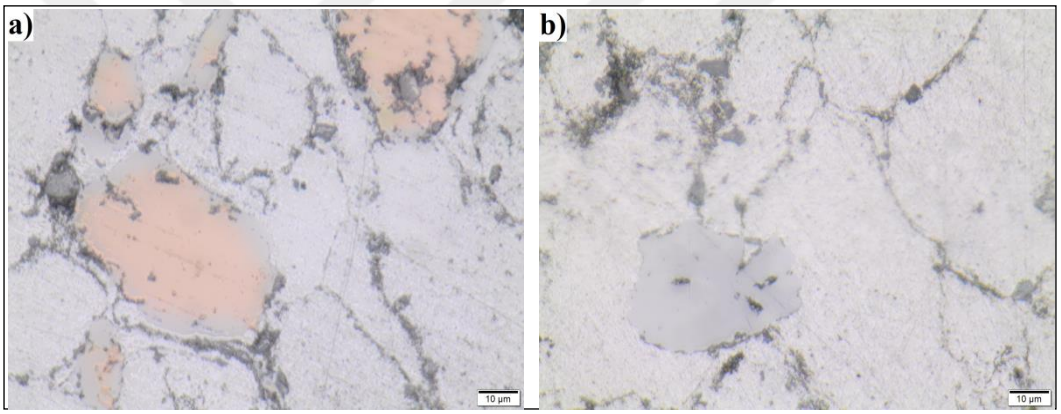


Şekil 5.6. Al-4Cu-SiC-1Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 20x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5.5'te Al-4Cu-SiC-0,5Gr bileşimine sahip numunelerin, 5.6'da ise Al-4Cu-SiC-1Gr bileşimine sahip numunelerin optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki optik mikroskop resimlerine bakıldığında aluminyum tozlarının kenarlarında oksitlenmeler bu numuneler için de görüldüğü, açık gri renkli ve köşeli olarak görülen SiC tozlarının matris içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. Grafit

tozlarının matris içerisinde koyu gri renkli olarak görüldüğü ve matris içerisinde homojen dağıldığı görülmektedir.

Şekil 5.5 ve 5.6'ya bakılarak, 520°C'de sinterlenen numunelerde bakırın aluminyum ile yeni bir faz oluşturmadan matris içerisinde bulunduğu, 560°C'de sinterlenen numunelerde ise bakırın etrafında görülen gri renkli bölgede Al_2Cu fazının oluştuğu ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisiyle Al_2Cu fazı oluşturmamış bakır çökelerek Al_2Cu fazına geçtiği düşünülmektedir. Şekil 5.7'de bakır etrafında oluşan açık gri renkli faz ve yaşlandırma sonucu oluşan açık gri renkteki faz görülebilmektedir. Şekil 5.5.e-f ve Şekil 5.6.e-f'ye bakılarak 600°C'de sinterlenen numunelerde bakırın sıvı faz sinterlemenin etkisiyle işlemiyle matris içerisinde çözündüğü ve Al_2Cu fazına geçtiği düşünülmektedir.



Şekil 5.7. Al-4Cu-SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Grafit içeren numunelerin optik mikroskop görüntülerine bakıldığında, numune yüzeylerini metalografik görüntüleme için hazırlanırken grafit tozlarının bir kısmında dökülmeler meydana geldiği görülmüştür. Numunelerin optik mikroskopta çekilen görüntülerine bakılarak 520°C'nin sinterleme için yeterli olmadığı, 560°C'de daha iyi bir yapı elde edilebileceği fakat sinterleme işlemi için 600°C'nin daha uygun olduğu, tozların bağlanmasını daha iyi olduğu düşünülmektedir.

5.4. Aşınma Sonuçları

Sinterleme sıcaklığının, grafit takviye miktarının ve yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC bileşiminin tribolojik özelliklerine etkisinin belirlenmesi için numunelere aşınma testleri uygulanmıştır.

Aşınma testi sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen aşınma miktarlarının karşılaştırılabilmesi için her bir numune için aşınma oranı hesaplanmıştır. Numunelerin aşınma oranları, her bir numune için ağırlık kaybı değerleri ve yoğunluk değerleri Denklem 5.1'de yerlerine yazılarak hesaplanmıştır. Tablo 5.3'de numunelerin hesaplanan aşınma oranı değerleri görülmektedir.

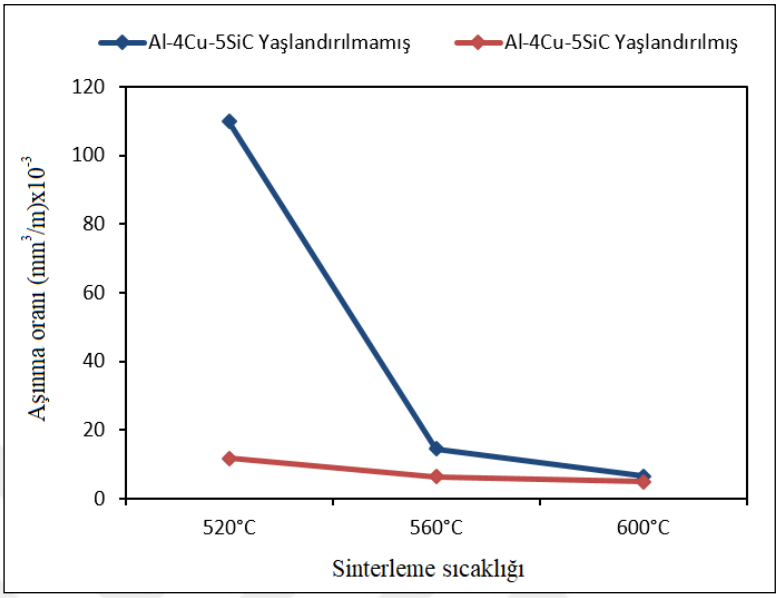
$$W=\frac{\Delta M}{\rho.D} \tag{5.1}$$

Burada W aşınma oranı (mm^3/m), ΔM aşınma sonucu numunedeki ağırlık kaybı (g), ρ numunenin ölçülen yoğunluğu (g/mm^3), D kayma mesafesi (m)'dir.

Tablo 5.3. Numunelerin aşınma oranı değerleri

		Aşınma oranı (mm^3/m)	
Malzeme bileşimi	**Sinterleme sıcaklığı (°C)**	**Yaşlandırılmamış**	**Yaşlandırılmış**
Al-4Cu-5SiC	520°C	109,95	11,905
	560°C	14,535	6,361
	600°C	6,489	5,055
Al-4Cu-5SiC-0,5Gr	520°C	39,714	9,193
	560°C	47,189	5,114
	600°C	6,174	4,703
Al-4Cu-5SiC-1Gr	520°C	13,148	8,614
	560°C	12,462	8,203
	600°C	12,146	8,172

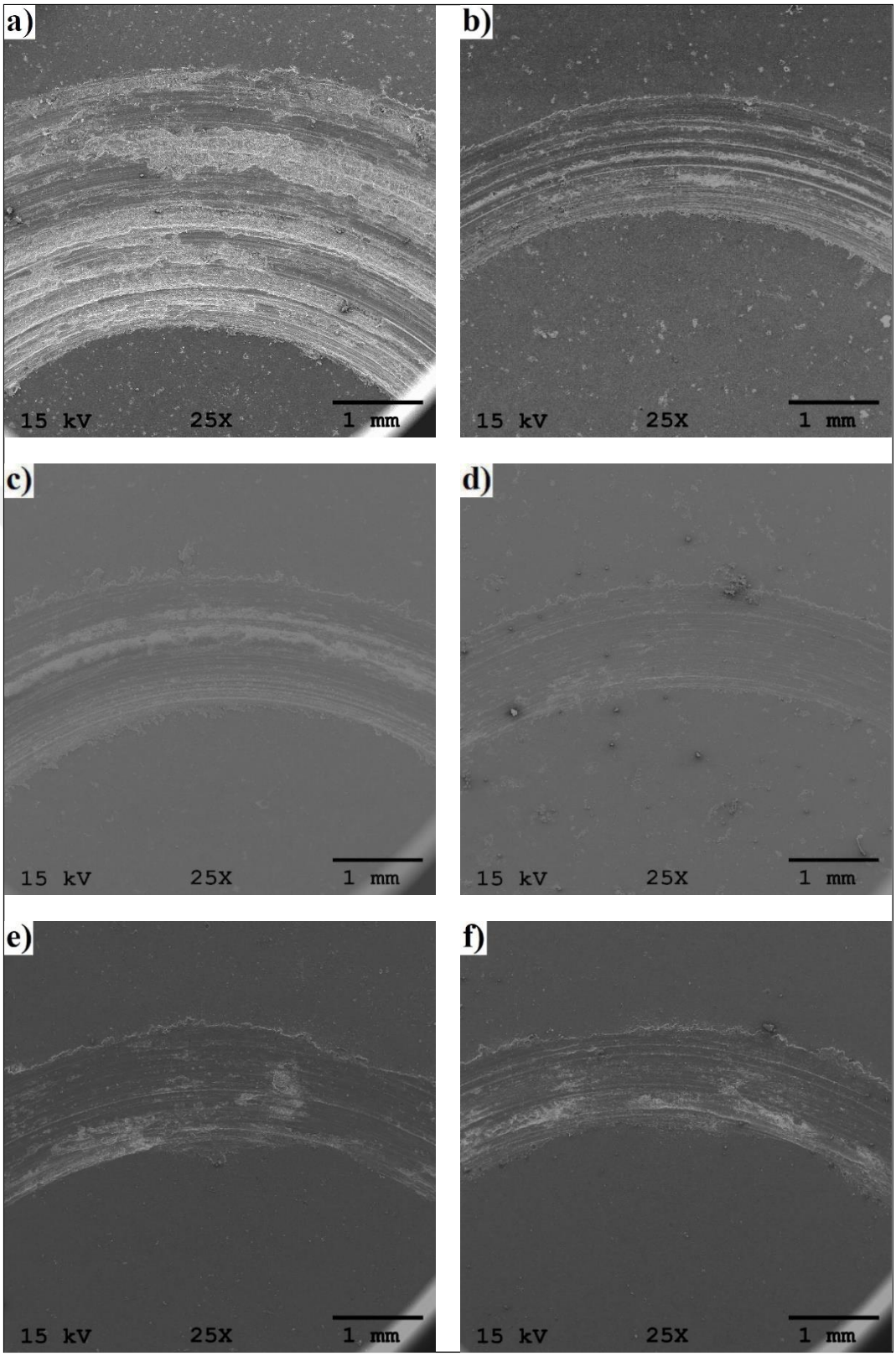
Şekil 5.8'de Al-4Cu-5SiC bileşimine sahip numunelere uygulanan aşınma testi sonucu numunelerden elde edilen aşınma oranları görülmektedir.



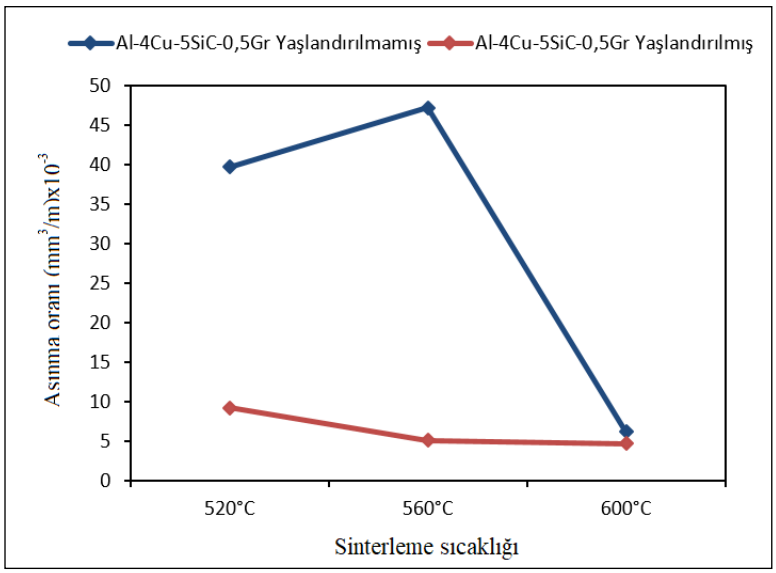
Şekil 5.8. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC bileşiminin aşınma oranına etkisi

Şekil 5.8'e bakıldığında 520°C'de sinterlenen numunenin aşınma oranının diğer numunelere göre oldukça yüksek bir değerde olduğu, 560°C'de sinterlenen numunenin aşınma oranının daha az olduğu, 600°C'de sinterlenen numunede ise 6,489 $(mm^3/m)x10^{-3}$ aşınma oranı ile diğer numunelere göre daha düşük bir değerde olduğu görülmüştür. Al-4Cu-5SiC bileşimi için sinterleme sıcaklığının artışına bağlı olarak aşınma oranının azaldığı görülmüştür.

Al-4Cu-5SiC bileşimine sahip numunelere uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda her bir numunenin aşınma oranının azaldığı görülmüştür. Yaşlandırılmış numuneler içerisinde en düşük aşınma oranı 5,055 $(mm^3/m)x10^{-3}$ değeri 600°C'de sinterlenen numunede olduğu ve bu numune için yaşlandırma ısıl işlemi uygulanması sonucu aşınma oranında %22 azalma olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.9'da Al-4Cu-SiC bileşimine sahip numunelerin aşınma yüzeyleri görülmektedir. Şekil 5.9 incelendiğinde numunelerin aşınma genişliği, elde edilen bu verileri desteklediği düşünülmektedir.



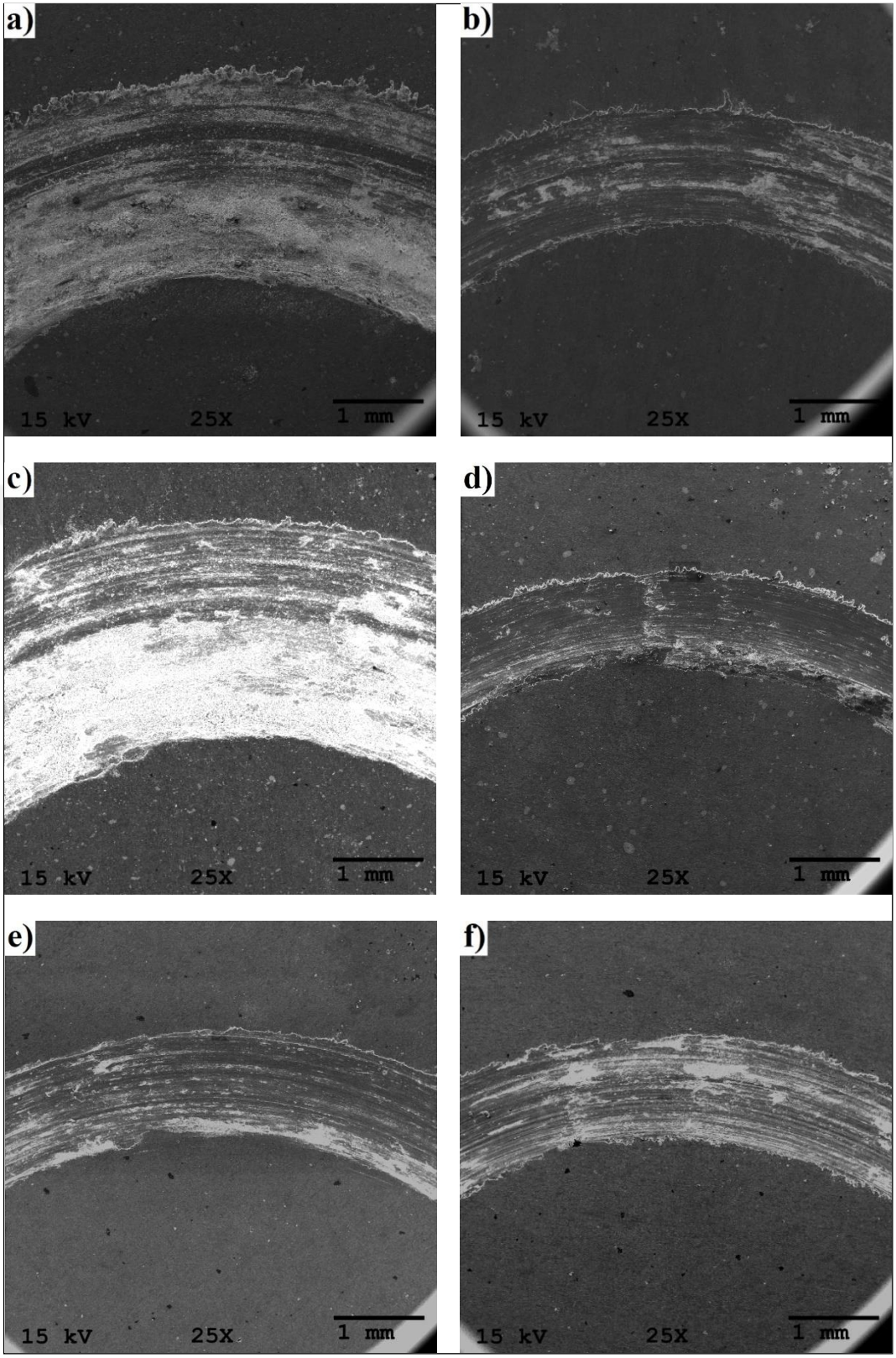
Şekil 5.9. Al-4Cu-SiC bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



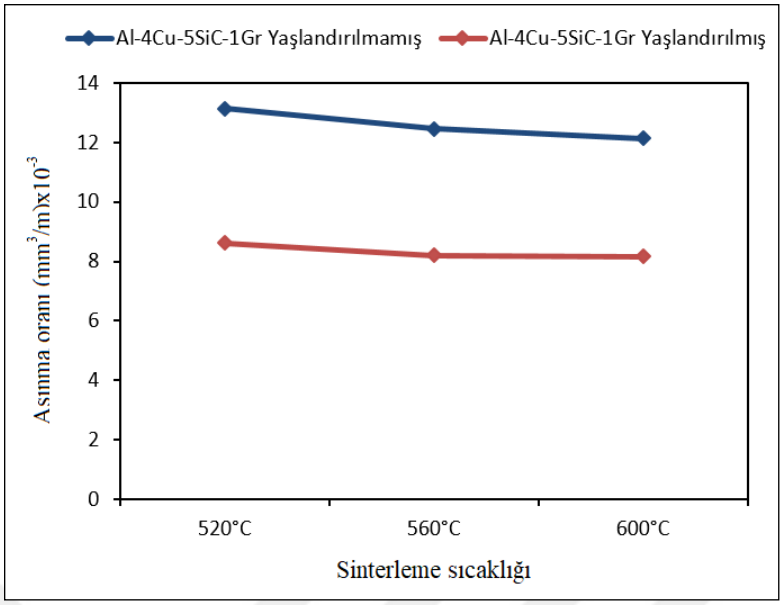
Şekil 5.10. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşiminin aşınma oranına etkisi

Şekil 5.10'a bakıldığında 560°C'de sinterlenen numunenin aşınma oranının diğer numunelere göre daha yüksek bir değerde olduğu, 520°C'de sinterlenen numunenin aşınma oranının daha az olduğu daha az olduğu, 600°C'de sinterlenen numunede 6,174 $(mm^3/m)x10^{-3}$ aşınma oranı ile diğer numunelere göre daha düşük bir değerde olduğu görülmüştür. 560°C'de sinterlenen numunede aşınma oranının daha fazla çıkmasının sebebi, numune yüzey özelliklerine bağlı olarak yüzeyin diğer numunelere göre daha kısa sürede yorulması sonucu delaminasyon aşınmasının daha fazla gerçekleşmesi ve bunun sonucunda yüzeyden kopan aluminyum parçalarının oksitlenerek aşınmayı arttırıcı özellik göstermesi olduğu düşünülmektedir.

Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimine sahip numunelere uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda her bir numunenin aşınma oranının azaldığı görülmüştür. Yaşlandırılmış numuneler içerisinde en düşük aşınma oranı 4,703 $(mm^3/m)x10^{-3}$ değeri 600°C'de sinterlenen numunede olduğu ve bu numune için yaşlandırma ısıl işlemi uygulanması sonucu aşınma oranında %24 azalma olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.11'de Al-4Cu-SiC bileşimine sahip numunelerin aşınma yüzeyleri görülmektedir. Şekil 5.11 göre numunelerin aşınma genişliği, elde edilen bu verileri desteklediği düşünülmektedir.



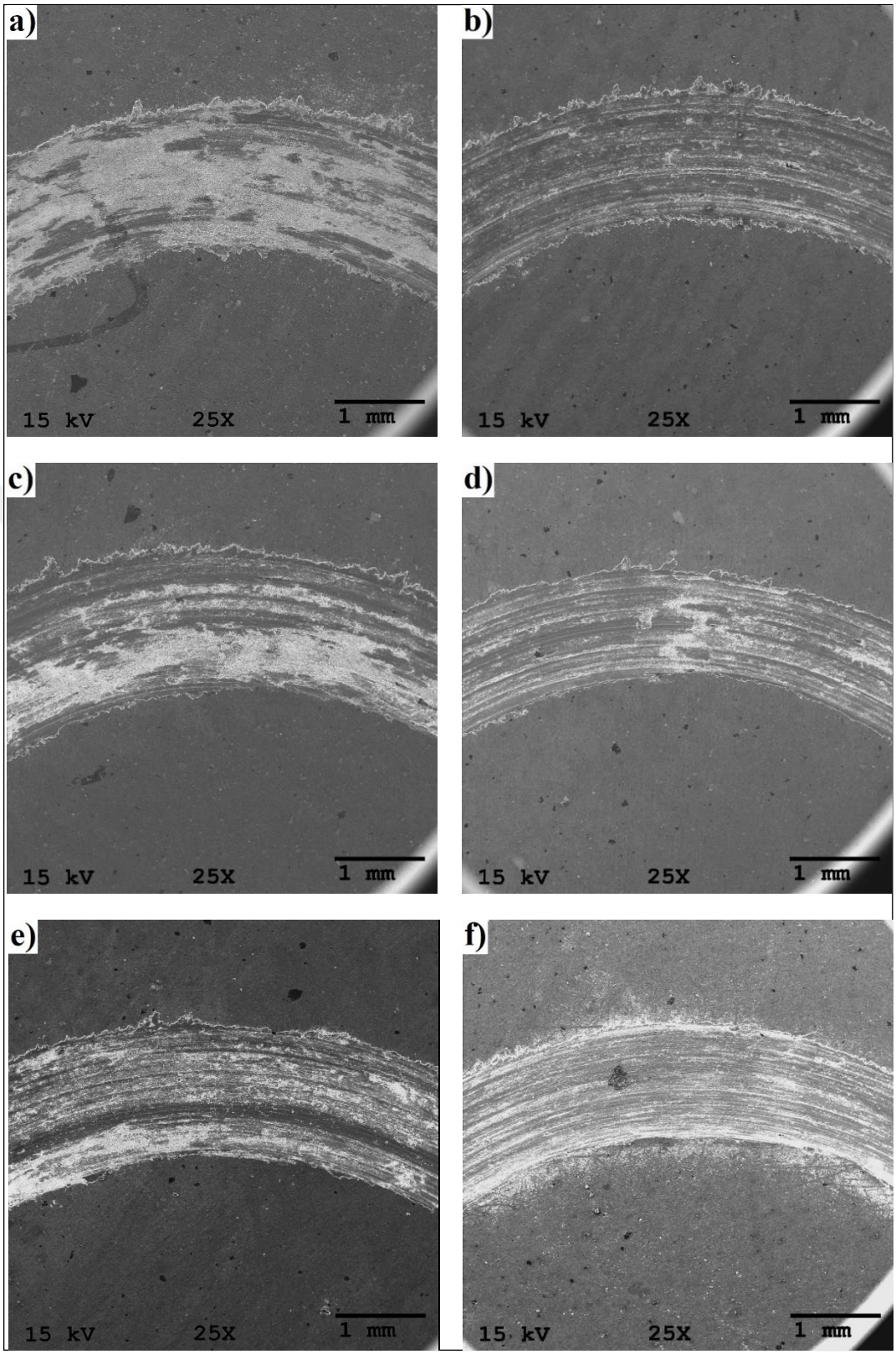
Şekil 5.11. Al-4Cu-SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.12. Farklı sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşiminin aşınma oranına etkisi

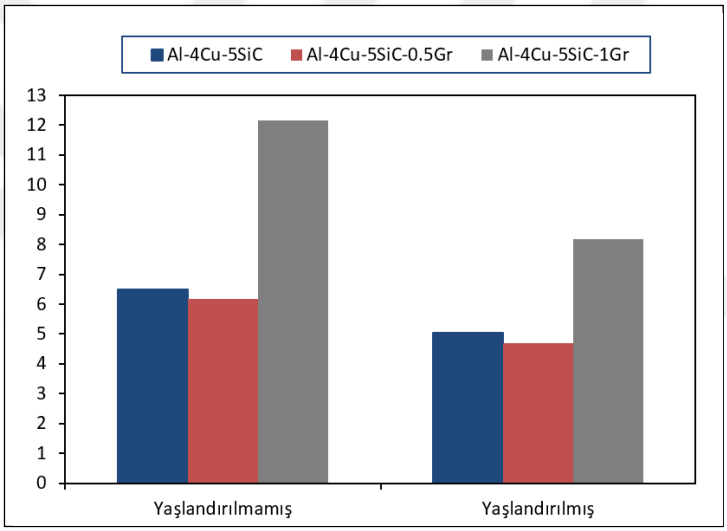
Şekil 5. 12'e bakıldığında 520°C'de sinterlenen numunenin aşınma oranının diğer numunelere göre daha fazla olduğu, 560°C'de sinterlenen numunenin aşınma oranının daha az olduğu, 600°C'de sinterlenen numunede ise 12,146 $(mm^3/m)x10^{-3}$ aşınma oranı ile diğer numunelere göre daha düşük bir değerde olduğu görülmüştür. Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimi için sinterleme sıcaklığının artışına bağlı olarak aşınma oranının azaldığı görülmüştür.

Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimine sahip numunelere uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda her bir numunenin aşınma oranının azaldığı görülmüştür. Yaşlandırılmış numuneler içerisinde en düşük aşınma oranı 8,172 $(mm^3/m)x10^{-3}$ değeri 600°C'de sinterlenen numunede olduğu ve bu numune için yaşlandırma ısıl işlemi uygulanması sonucu aşınma oranında %32 azalma olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.13'te Al-4Cu-SiC-1Gr bileşimine sahip numunelerin aşınma yüzeyleri görülmektedir. Şekil 5.13'e göre numunelerin aşınma genişliği, elde edilen bu verileri desteklediği düşünülmektedir.



Şekil 5.13. Al-4Cu-SiC-1Gr bileşimine sahip a) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, b) 520°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, c) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, d) 560°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin, e) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmamış numunenin, f) 600°C'de sinterlenen yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

Aşınma testi sonucunda elde edilen verilere göre aşınma oranının malzemenin üretim parametrelerine göre farklı değerlerde olduğu, 600°C'de sinterlenen numunelerde aşınma direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Sinterleme sıcaklığının 520°C olması durumunda düşük toz bağlanması ve düşük sertlikten dolayı aşınma direncinin düşük olduğu düşünülmektedir. Yaşlandırma ısıl işleminin uygulanması ile tüm numunelerde aşınma oranının azaldığı görülmüştür. Yaşlandırılmış numunelerin sertliğinin daha yüksek olması aşınma direncini arttırıcı yönde etki ettiği düşünülmektedir. Yaşlandırılmamış numunelerin aşınma yüzeylerinde meydana gelen oksidasyonun yaşlandırılmış numunelere göre genel olarak daha fazla gerçekleştiği belirlenmiştir. Şekil 5.14'te 600°C'de sinterlenen numunelerin aşınma oranına grafit takviye miktarının ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisi görülmektedir.



Şekil 5.14. 600°C'de sinterlenen numunelerin aşınma oranına grafit takviye miktarının ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisi

Şekil 5.14'e göre 600°C'de sinterlenmiş yaşlandırılmamış numunelerde en az aşınma ağırlıkça %0,5 grafit içeren numunede olduğu, en fazla aşınan numunenin grafit içermeyen numune olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %0,5 grafit içeren numunede kendinden yağlayıcı özelliği gören grafit katkısının aşınma oranını azaltıcı yönde etki ettiği ve bundan dolayı grafit içermeyen numuneye göre daha düşük aşınma oranına sahip olduğu düşünülmektedir. Ağırlıkça %1 grafit içeren numunede ise ağırlıkça %0,5 grafit içeren numuneye göre yağlayıcı görevi gören grafit katkısının daha fazla olmasına rağmen aşınma daha fazla gerçekleşmiştir. Grafit katkısı elde edilen sertlik değerlerinden de görülebileceği gibi malzemenin sertliğini düşürücü yönde etki

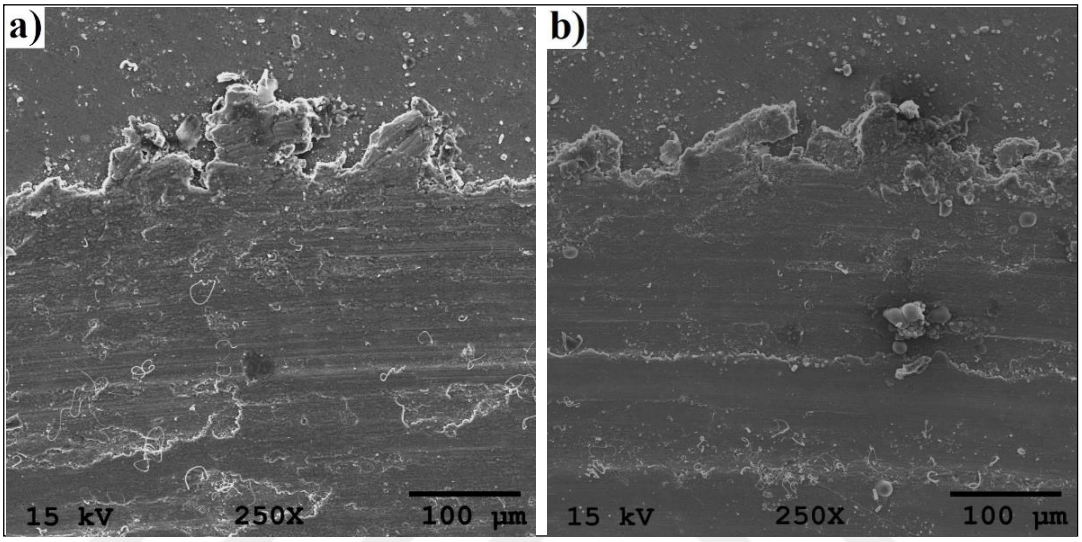
etmektedir. Diğer numunelere göre daha düşük sertliğe sahip olan ağırlıkça %1 grafit içeren numune, yağlayıcı görevi gören grafit katkısına rağmen düşük sertliğinden dolayı daha yüksek aşınma oranına sahip olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.14'e göre 600°C'de sinterlenmiş yaşlandırılmış numunelerde en az aşınma ağırlıkça %0,5 grafit içeren numunede olduğu, en fazla aşınan numunenin ağırlıkça %1 grafit içeren numune olduğu görülmüştür. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numuneler için malzeme içerisine ağırlıkça %0,5 grafit katkısının yüzeyde film oluşturarak yağlayıcı özelliği göstermesi için yeterli bir oran olduğu, bu değerin üzerine çıkıldığında grafitin yağlayıcı özelliğini tam olarak gösteremediği, grafitin bölgesel laminasyonu ve yüzeydeki sürtünmenin etkisiyle grafitin yüzeyden sökülerek dökülebileceği, yüzeyden sökülen partiküllerin aşınmayı arttırıcı yönde etki edeceği düşünülmektedir.

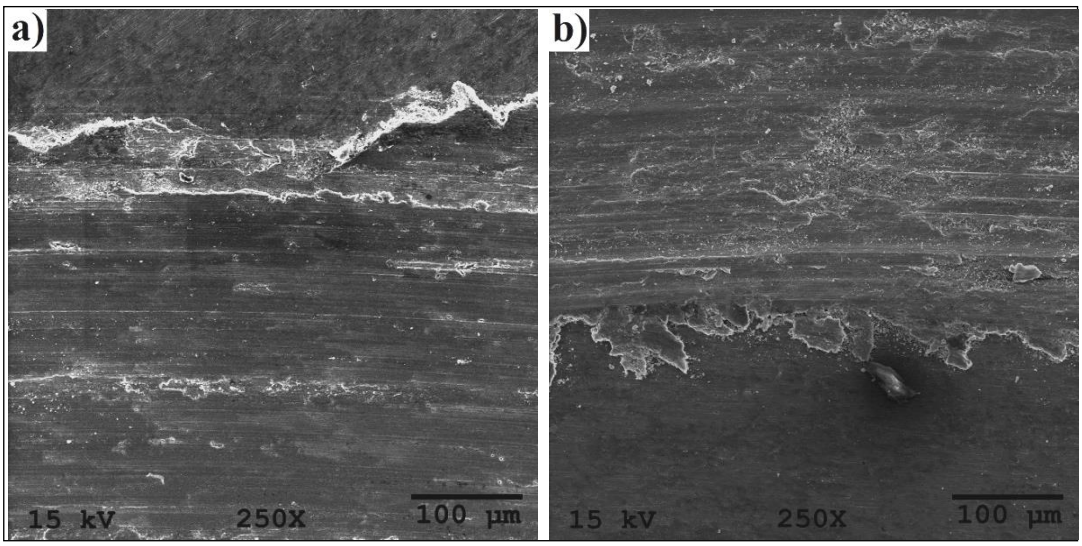
Aluminyumun yüzeyinde oluşan oksit tabakası aşınmanın başlangıcında aşınmayı azaltıcı yönde etki etmektedir. Ancak zamanla oksit tabakası sürtünme kuvvetinin etkisiyle parçalanarak yüzeyden sökülür. Sökülen oksitli aluminyum parçacıkları, numunenin aşınma yüzeyi ile bilye arasına girmesiyle aşınma mekanizmasına aşındırıcı ara madde olarak katılmaktadırlar ve bu durum aşınmanın artmasına sebep olmaktadır. Bilyenin aşınma yüzeyi üzerinde sürtünmesi malzemenin sıcaklığının artmasına, gerçekleşen sıcaklık artışı da aluminyumun oksidasyona uğramasına sebep olmaktadır. Aşınma nedeniyle yüzeyden kopan ve oksitlenerek yüksek sertliğe sahip olan aluminyum parçacıkları, bilyenin sıkıştırmasıyla nispeten daha yumuşak olan aşınma yüzeyine yapışarak gömülebilmektedir. Yüzeye gömülen parçacıklar zamanla yüzeyde adhezif aşınmaya sebep olabilmektedir. Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de görülen aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerine bakıldığında oksitlenmiş aluminyum parçacıklarının aşınma yüzeyinin bazı bölgelerinde gömülü halde bulunduğu görülmüştür.

Ball on disk yöntemi ile yapılan aşınma testlerinde, bilyenin numune yüzeyine noktasal temasından dolayı yüzeyde abrazif izler görülmektedir. Aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerine bakıldığında, abrazif izlerin bilyenin ilerleme yönüne paralel yönde oluştuğu görülmektedir. Aşınma sırasında aşınma yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri nedeniyle yüzeyde çatlak oluşumu gerçekleşmektedir.

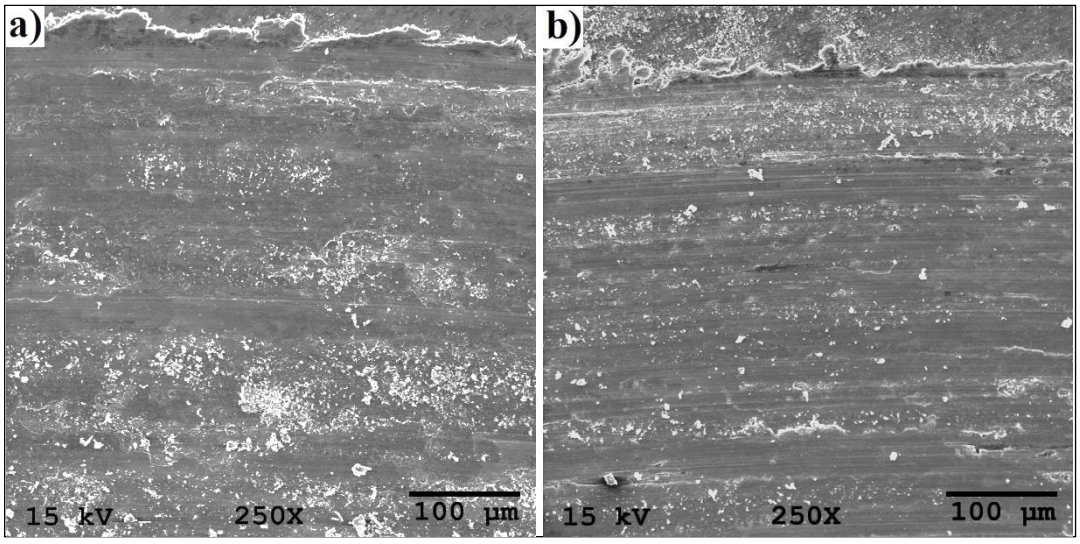
Yorulma gerilmesi nedeniyle oluşan bu çatlaklar bilye ilerleme yönüne dik yönde meydana gelmektedir. Artan gerilmelerle birlikte çatlakların ilerlemesi ve sonuç olarak yüzeyden tabakalar halinde parçaların koparak yüzeyde hasarlanmalar gerçekleşmektedir. Delaminasyon olarak adlandırılan bu mekanizma Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de görülen aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerinde görülmektedir.



Şekil 5.15. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC bileşimine sahip a) yaşlandırılmamış numunenin, b) yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

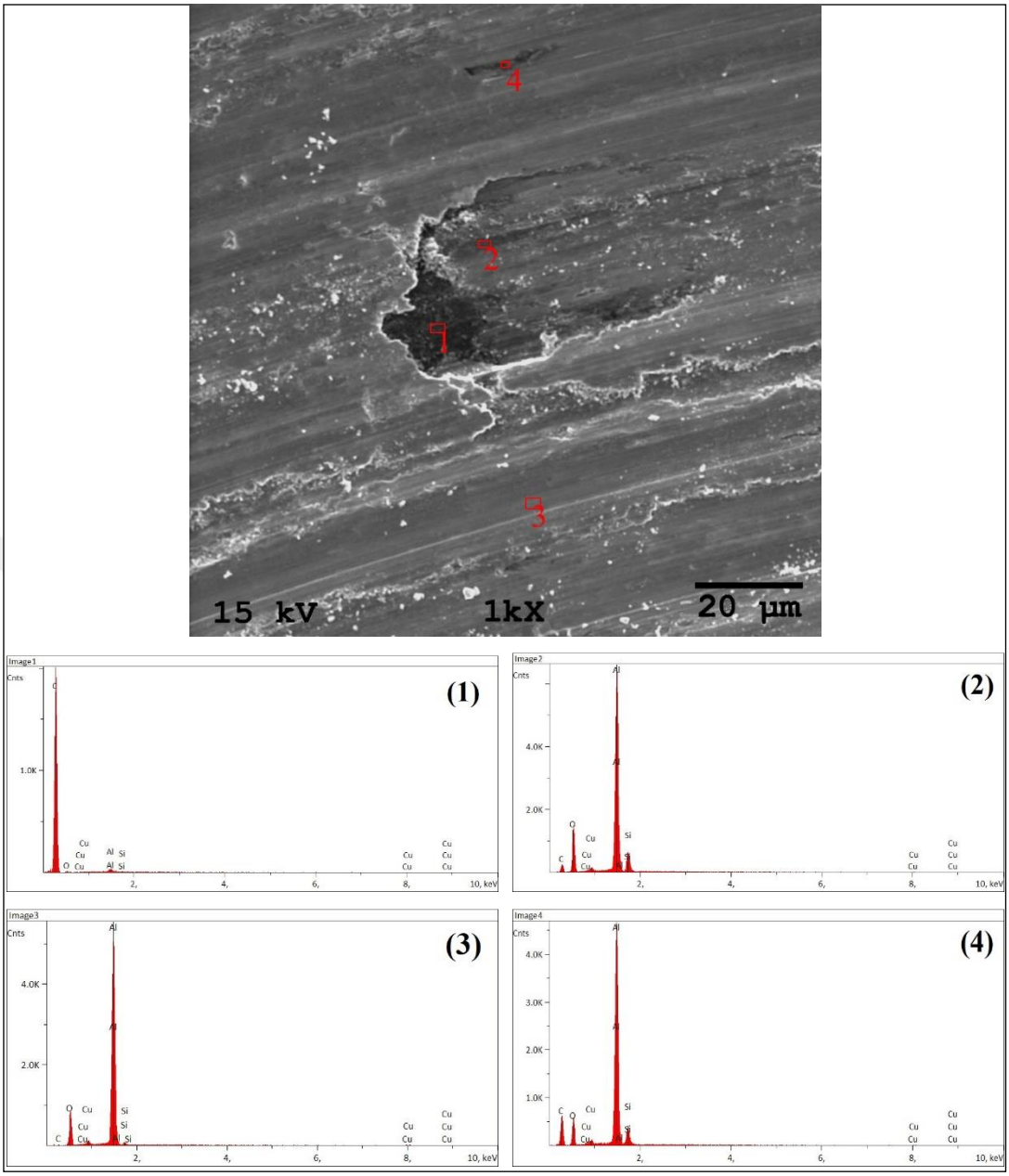


Şekil 5.16. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimine sahip a) yaşlandırılmamış numunenin, b) yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.17. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimine sahip a) yaşlandırılmamış numunenin, b) yaşlandırılmış numunenin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

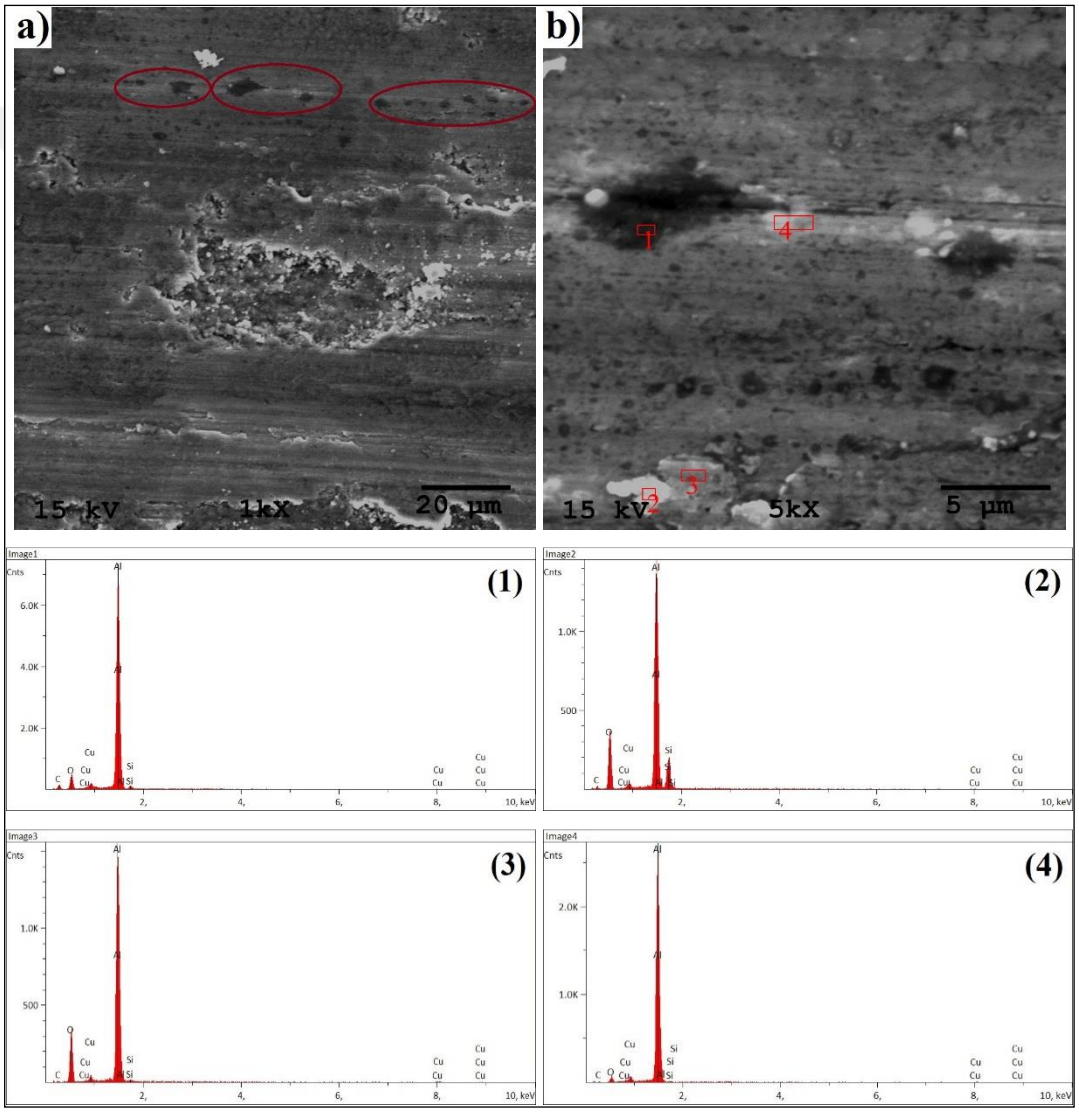
Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'deki SEM görüntülerine bakıldığında tüm numunelerin aşınma yüzeylerinde abrazif izlerin oluştuğu ve abrazif aşınma mekanizmasının etkin olduğu görülmektedir. Ayrıca görüntülere bakıldığında, yoğun plastik deformasyona bağlı olarak aşınma izi kenarlarında yığılmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Meydana gelen yığılmaların daha düşük sertliğe sahip olan yaşlandırılmamış numunelerde daha fazla miktarda olduğu tespit edilmiştir. Zamanla bu yığılmalar artan yüzey sıcaklığının etkisiyle oksitlenerek yapıdan ayrılmaktadır. Gerçekleşen bu durum malzemenin aşınmasını arttırdığı bilinmektedir. Yaşlandırılmamış numunelerin aşınma yüzeylerinde görülen oksidasyonun, yaşlandırılmış numunelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Grafit içeren numunelerin aşınma yüzeylerinde grafit tozları etrafında sürtünmenin etkisiyle yüzeyde bölgesel grafit filmi oluştuğu belirlenmiştir. Aşınma yüzeylerinde oluşan grafit filminin tespiti için örnek olarak Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da görülen SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.18. 560°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-1Gr bileşimine sahip yaşlandırılmış numunenin SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX analizleri

Şekil 5.18 incelendiğinde SEM görüntüsünde 1 numaralı nokta ile gösterilen bölgede EDX analizine göre yüksek miktarda C tespit edilmiş olup, bölgenin grafit tozundan oluştuğu belirlenmiştir. 2 numaralı nokta ile gösterilen bölgede EDX analizine göre yüksek oranda Al ve bir miktar C, O, Cu, Si elementleri tespit edilmiştir. 1 numaralı noktada bulunan grafitin sürtünmenin etkisiyle 2 numaralı noktaya taşındığı ve 2 numaralı bölgede yüzeyde grafit filminin oluştuğu, EDX analizlerinde görünen diğer elementlerin grafit filminin altından gelen sinyallerle tespit edildiği düşünülmüştür.

Abrazif izin bulunduğu 3 numaralı nokta ile gösterilen bölgede EDX analizine göre yüksek oranda Al, düşük oranda Cu ve O tespit edilmiş olup, bölgenin oksitlenmiş Al-Cu bileşiminden oluştuğu düşünülmüştür. 4 numaralı nokta ile gösterilen bölgede EDX analizine göre yüksek oranda Al ve C bulunduğu, bir miktar O, Cu, Si elementlerinin bulunduğu tespit edilmiştir. 4 numaralı nokta ile gösterilen bölgede grafitin bulunduğu ve sürtünmenin etkisiyle çevresinde grafit filminin oluştuğu, EDX analizlerinde görünen diğer elementlerin grafit filminin altından gelen sinyallerle tespit edildiği düşünülmüştür.



Şekil 5.19. 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimine sahip yaşlandırılmamış numunenin SEM görüntüsü ve farklı bölgelerden alınan EDX analizleri

Şekil 5.19.a incelendiğinde kırmızı daire içine alınan bölgede bulunan siyah renkli yapılar incelenmiş olup Şekil 5.19.b'de görülen noktaların EDX analizi sonucunda siyah renkli yapıların aşınma yüzeyinde oluşan grafit filmi olduğu belirlenmiştir. 1 numaralı nokta ile gösterilen bölgede EDX analizine göre yüksek miktarda aluminyum tespit edilmiş olup bir miktar C, O, Cu, Si elementleri tespit edilmiştir. 1 numaralı bölgede yüzeyde grafit filminin oluştuğu, EDX analizlerinde görünen diğer elementlerin grafit filminin altından gelen sinyallerle tespit edildiği düşünülmüştür. 2 numaralı noktada SiC tozunun, 3 ve 4 numaralı noktalarda ise oksitlenmiş aluminyum bulunduğu düşünülmüştür.

Grafit içeren numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde 520°C'de sinterlenen numunelerde grafit filmi oluşmadığı, 560°C'de ve 600°C'de sinterlenen numenelerde ise grafit filminin oluştuğu gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %0,5 grafit içeren numunelerde grafit filmi oluşumunun daha iyi olduğu düşünülmektedir. Yapılan grafit katkısının yağlayıcı görevini yerine getirdiği, aşınmaya karşı direnci arttırdığı belirlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-4Cu-5SiC bileşimine grafit takviye miktarının, sinterleme sıcaklığının ve uygulanan yaşlandırma ısıl işlemin malzemenin özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan denseysel çalışmalarla mekanik özellikleri daha iyi olan ve aşınmaya karşı daha dirençli aluminyum matrisli kompozit malzeme geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmalar sonucunda numunelerin özelliklerinde gelişme sağlanmıştır.

Sinterleme işlemi sonrasında yapılan yoğunluk ölçümleri sonucunda malzeme bileşimi fark etmeksizin en düşük yoğunluk değeri 520°C'de sinterlenmiş numunelerde, en yüksek yoğunluk değerleri ise 600°C'de sinterlenen numunelerde görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre teorik yoğunluğa yakın yoğunluk değerleri elde edebilmek için sinterleme işlemi için yüksek sıcaklıkların daha uygun olduğu düşünülmüştür. Bu çalışmada Al-4Cu-5SiC-xGr bileşimleri için teorik yoğunluğa yakın yoğunluğa sahip parçaların üretilmesi için sinterleme işleminin 600°C'de gerçekleştirilmesinin daha uygun olduğu ve bu sinterleme sıcaklığında relatif yoğunluğu %99,064 olan numuneler üretilebileceği belirlenmiştir.

Numunelere uygulanan sertlik deneyleri sonucunda en yüksek sertlik değerleri 600°C'de sinterlenen numunelerde görülmüştür. 560°C'de sinterlenen numunelerin sertliklerinin 600°C'de sinterlenen numunelere göre daha düşük değerlerde olduğu, 520°C'de sinterlenen numunelerin ise en düşük sertliğe sahip numuneler olduğu belirlenmiştir.

Numunelere uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda tez amacına uygun olarak tüm numunelerde sertlik artışı gerçekleşmiştir. 600°C'de sinterlenen numunelerde %20'e varan sertlik artışı sağlanırken, 560°C'de sinterlenen numunelerde %34'e varan, 520°C'de sinterlenen numunelerde %90'a varan sertlik artışı elde edilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi sonucu elde edilen sertlik artış oranının malzeme bileşimine bağlı olarak farklı değerlerde olduğu, grafit içeren numunelerde sertlik artış oranının

daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Malzeme içerisindeki grafit miktarının artışıyla yaşlandırma sonucu elde edilen sertlik artış oranının genel olarak arttığı belirlenmiştir.

Aynı sinterleme sıcaklığında sinterlenen numuneler karşılaştırıldığında grafit içeren numunelerin sertliğinin daha düşük olduğu, grafit içermeyen numunelerin sertliğinin diğer numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Grafit takviyesinin malzemenin sertliğini azaltıcı yönde etki ettiği ve grafit oranı arttıkça malzemenin daha yumuşak bir yapıda olduğu belirlenmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulandıktan sonra yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik en yüksek sertliğe sahip numunenin 600°C'de sinterlenen Al-4Cu-5SiC-0,5Gr bileşimine sahip numune olduğu ve elde edilen en yüksek sertlik değerinin 92,3 HB olduğu görülmüştür. Sertlik sonuçlarına bakıldığında başarılı sertlik sonuçları elde edildiği görülmektedir.

Numunelerin optik mikroskop görüntülerine bakıldığında, SiC ve grafit tozlarının aluminyum matris içerisinde homojen dağıldığı belirlenmiştir. 520°C'de sinterlenen numunelerde bakır tozlarının aluminyum ile yeni bir faz oluşturmadan matris içinde bulunduğu, 560°C'de sinterlenen numunelerde bakır tozlarının etrafında yeni bir fazın oluştuğu belirlenmiştir. 600°C'de sinterlenen numunelerde ise bakır tozlarının içerisinde tamamen çözündüğü düşünülmüştür. Görüntülere bakıldığında tozların kenarlarında oksitlenmelerin meydana geldiği, 520°C'de sinterlenen numunelerde oksitlenmenin daha fazla gerçekleştiği belirlenmiştir.

Aşınma sonuçları incelendiğinde, aşınma direnci en yüksek olan numunelerin 600°C'de sinterlenen numuneler olduğu belirlenmiştir. 520°C'de ve 560°C'de sinterlenen numunelerden daha zayıf aşınma özellikleri elde edilmiştir. Uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi ile tüm numunelerin aşınma oranlarının büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Grafit takviyesinin malzemenin aşınma direncini arttırıcı yönde etki ettiği görülmüştür. Al-4Cu-5SiC bileşimine ağırlıkça %0,5 grafit takviyesinin malzemenin aşınma özelliklerini geliştirdiği, aşınma oranının düştüğü belirlenmiştir. Grafit takviyesinin ağırlıkça %1 takviye edilmesinin malzemenin aşınma özelliklerini kötüleştirdiği belirlenmiştir. Uygun miktarda grafit takviyesi ile aşınma özelliklerinin iyileştirilebileceği görülmüş olup, çalışma sonucunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Selvakumar V., Muruganandam S., Senthilkumar N., Evaluation of Mechanical and Tribological Behavior of Al-4% Cu-x% SiC Composites Prepared Through Powder Metallurgy Technique, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, **70**(5), 1305-1315.

[2] Nagavally R. R., Composite Materials History Types Fabrication Tecniques Advantages and Applications, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2017, **5**(9), 82-87.

[3] German R. M., Par*ticulate Composites Fundamentals and Applications*, 1st ed., Springer International Publishing, Basel, 2016.

[4] Ashby M. F., *Materials Engineering Science Processing and Design*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007.

[5] Miracle D. B., Donaldson L. S., Henry S. D., Moosbrugger C., Anton G. J., Sanders B. R., …& Scott Jr W. W., *ASM Handbook Volume 21 Composites*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2001.

[6] Jonas R. M., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., CRC Press, New York, 1999.

[7] Ekinci V. Ş., Alüminat Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 212775.

[8] Chawla N., Chawla K. K., *Metal Matrix Composites*, 1st ed., Springer Science Business Media, New York, 2006.

[9] Mallick P. K., *Fiber-Reinforced Composites Materials Manufacturing and Design*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 2007.

[10] Tawfik B. E., Leheta H., Elhewy A., Elsayed T., Weight Reduction and Strengthening of Marine Hatch Covers by Using Composite Materials, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2016, **9**(2), 185-198.

[11] http://en.carbonfiber-china.com/Advantages-of-carbon-fiber-composite-sports-equipment-id3822365.html (Ziyaret tarihi: 30 Nisan 2019).

[12] https://www.guideautoweb.com/galeries/22365/bmw-i3-2015-reinventer-laroue/?im=15 (Ziyaret tarihi: 30 Nisan 2019).

[13] https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/materials/6720 (Ziyaret tarihi: 30 Nisan 2019).

[14] Günay M., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-Si/SiC_p Kompozitlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009, 245636.

[15] Acun S., SiC Partikül Takviyeli Alüminyum Alaşım Matrisli Kompozit Malzemelerde Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2007, 200603.

[16] Wang R. M., Zheng S. R., Zheng Y. P., *Polymer Matrix Composites and Technology*, 1st ed., Woodhead Publishing, Cambridge, 2011.

[17] Koniuszewska A. G. Kaczmar J. W., Application of Polymer Based Composite Materials in Transportation, *Progress in Rubber Plastic and Recycling Tecnology*, 2016, **32**(1), 1-24.

[18] Chawla K. K., *Ceramic Matrix Composites*, 1st ed., Springer Science Business Media B. V., Malta, 1993.

[19] Ateş E. A., Toz Metalurjisi ile Üretilen AA2014-Al_4C_3 Sistemlerine Yaşlandırma Isıl İşleminin Uygulanması ve Mikroyapısal Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 321609.

[20] Bansal N. P., Lamon J., *Ceramic Matrix Composites Materials Modelling and Technology*, 1st ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2014.

[21] Chawla K. K., *Composite Materials Science and Engineering*, 3rd ed., Springer Science Business Media, London, 2012.

[22] Yamanoğlu R., Karakulak E., Zeren A., Zeren M., Effect of Heat Treatment on the Tribological Properties of Al-Cu-Mg/nanoSiC Composites, *Materials & Design 49*, 2013, 820-825.

[23] Kainer K. U., *Metal Matrix Composites Custom Made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, 1st es., Wiley-VCH, Weinheim, 2006.

[24] Panda A., Dobransky J., Jancik M., Pandova I., Kacalova M., Advantages and Effectiveness of The Powder Metallurgy in Manufacturing Technologies, *Metalurgija*, 2018, **57**(4), 353-356.

[25] Upadhyaya G. S., *Powder Metallurgy Technology*, 1st ed., Cambridge International Science Publishing, Cambridge, 2002.

[26] Meena K. L., Khandelwal M., Synthesis and Analysis of Alumina Zirconia and Alumina Toughened Zirconia Composites, *International Journal of Computer &Mathematical Sciences*, 2015, **4**(10), 108-113.

[27] Ramakrishnan P., History of Powder Metallurgy, *Indian Journal of History of Science*, 1983, **18**(1), 109-114.

[28] Lee P. W., Trudel Y., Iococca R., German R. M., Ferguson B. L., Eisen W. B., Moyer K., Madan D., Sanderow H., *ASM Handbook Volume 7Powder Metal Technologies and Applications* , 9th ed., ASM International, Ohio, 1998.

[29] Angelo P. C., Subramanian R., *Powder Metallurgy: Science Technology and Applications*, 1st ed., PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2008.

[30] Shabudeen S., Chapter-5 Powder Metallurgy 5.1 Introduction Powder Metallurgy, Editors: Shabudeen S., *Engineering Chemistry II*, KCT, Coimbatore, 5.1-5.26, 2010.

[31] Chang I., Zhao Y., Advances in Powder Metallurgy: *Properties Processing and Applications*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Philadelphia, 2013.

[32] James W. B., Powder Metallurgy Methods and Applications, *ASM Handbook*, 2015, 7, 9-19.

[33] Totten G. E., Xie L., Funatani K., *Handbook of mechanical alloy design*, 1st ed., Marcel Dekker Inc., New York, 2003.

[34] Palavar O., Toz Metalurjisi ile Üretilen Inconel Süper Alaşımlarda Yaşlanma Parametrelerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2014, 364001.

[35] Gökçe A., Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Cu alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2013, 354276.

[36] Skotnicova K., Kursa M., Szurman I., *Powder Metallurgy University Textbook*, Technical University of Ostrava, Ostrava, 2014.

[37] German R. M., Sarıtaş S., Türker M., Durlu N., *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*, Birinci Basım, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 2007.

[38] Thummler F., Oberacker R., An Introduction to Powder Metallurgy, 1st ed., The Institue of Materials, Cambridge, 1993.

[39] Enayati M. H., Aryanpour G. R., Ebnonnasir A., Production of Nanostructured WC-Co Powder by Ball Milling, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, **27**(1), 159-163.

[40] Orhan G., Gezgin G. G., Effect of Electrolysis Parameters on the Morphologies of Copper Powders Obtained at High Current Densities, Serbian Chemical Society, 2012, **77**(5), 651-665.

[41] Söyler M., Toz Metalurjisi ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, 2007, 237006.

[42] Kuhn H. A., Lawley A., *Powder Metallurgy Processing New Techniques and Analyses*, 1st ed., Academic Press, New York, 1978.

[43] Kayalı Y. E., Ünal R., Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretiminde toz boyutunun sayısal çözümleme ile belirlenmesi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2018, **33**(3), 1135-1144.

[44] Wagner C., Luidold S., Antrekowitsch H., Rimmer K., Application of New Gas Atomization System for Alloys and Chalcogenides, *In Proceeding of the International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials*, 2010.

[45] Groover M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials Processes and Systems*, 4th ed., John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2010.

[46] Neikov O. D., Stanislav S. N., *Dowson G., Handbook of Non-Ferrous Metal Powders Technologies and Applications*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2009.

[47] Tian L., Anderson I., Riedermann T., Russell A., Production of Fine calcium Powders by Centrifugal Atomization with Rotating Quench Bath, *Powder Technology*, DOI:10.1016/j.powtec.2016.12.011.

[48] Karagöz Ş., Yamanoğlu R., Atapek Ş. H., Atomize Tozlarda Katılaşma ve Mikroyapısal Karakterizasyon, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2009, **15**(3), 309-316.

[49] El-Eskandarany M. S., *Mechanical Alloying for Fabrication of Advanced Engineering Materials*, 1st ed., Noyes Publications, Norwich, 2001.

[50] Suryanarayana C., *Mechanical Alloying and Milling*, 1st ed., Marcel Dekker, New York, 2004.

[51] Söyler A. U., Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y_2O_3 Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 223111.

[52] Kalaycıoğlu A. S., SiC Tane Katkılı Aluminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi ile Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2010, 283593.

[53] Alev E., Otomobil Endüstrisinde Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Parça Kullanımı ve Performansının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2011, 283802.

[54] Hammes G., Binder C., Galiotto A., Klein A. N., Al-Qureshi H. A., Relationship Between Cold Isostatic Pressing and Unaxial Compression of Powder Metallurgy, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

[55] Chattopadhyay R., *Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes*, 1st ed., Kluver Academic Publishers, Dordrecht, 2004.

[56] Sonber J. K., Murthy T. C., Subramanian C., Hubli R. C., Suri A. K., Processing Methods for Ultra High Temperature Ceramics for Extreme Environments, Editors: Low I. M., Sakka Y, Hu C. F., *MAX Phases and Ultra-High Temperature Ceramics for Extreme Enviroments*, 1st ed., IGI Global, Pennsylvania, 180-202, 2013.

[57] Dobrzanski L. A., Dobrzanska-Danikiewicz A. D., Achtelik-Franczak A., Dobrzanski L. B., Hajduczek E., Matula G., Fabrication Technologies of the Sintered Materials Including Materials for Medical and Dental Application, Editors: Dobrzanski L. A., *Powder Metallurgy Fundamentals and Case Studies*, 1st ed., Intech Open, 17-52, 2017.

[58] Tokita M., Mechanism of Spark Plasma Sintering, *Proc of the International Symposium on Microwave Plasma and Thermochemical Processing of Advanced Materials*, 1997, 69-76.

[59] Yamanoğlu R., Atomizasyon Teknikleri ile Toz Üretimi, Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 290440.

[60] Shen Z., Johnsson M., Zhao Z., Nygren M., Spark Plasma Sintering of Alumina, *Journal of the American Ceramic Society*, 2002, **85**(8), 1921-1927.

[61] Kang S. L, *Sintering Densification Grain Growth and Microstructure*, 1st ed., Elsevier, Oxford, 2005.

[62] Denizalp F., Yüksek Safiyette Molibden Tozunun Spark Plazma Sinterleme Yöntemi ile Şekillendirme Şartlarının Belirlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 349640.

[63] German R. M., Suri P., Park S. J., Review Liquid Phase Sintering, *Journal of Materials Science*, 2008, **44**(1), 1-39.

[64] Davis J. R., *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2001.

[65] Stachowiak G., Batchelor A. W., *Engineering Tribology*, 3rd ed., Elsevier Butterworth Heinemann, Oxford, 2005.

[66] Chattopadhyay R., *Green Tribology Green Surface Engineering and Global Warming*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2014.

[67] Ataç A. M., Çinko-Alüminyum (ZA) Alaşımlarının Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Karakterizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011, 312750.

[68] Bhushan B., *Modern Tribology Handbook Volume One*, 1st ed., CRC Press, Florida, 2001.

[69] Holmberg K., Matthews A., *Coating Tribology Properties Techniques and Applications in Surface Engineering*, 1st ed., Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1994.

[70] Chattopadhyay R., *Surface Wear Analysis Treatment and Prevention*, 1st ed., ASM International, Ohio, 2001.

[71] Wimmer M. A., Kaup T., Hanni M., Schneider E., Gogolewski S., Alini M., Tribology Approach to the Engineering and Study of Articular Cartilage, *Tissue Engineering*, 2004, **10**(9-10), 1436-1445.

[72] Al-Samarai R. A., Haftirman, Ahmad K. R., Al-Douri Y., Effect of Load and Sliding Speed on Wear and Friction of Aluminium-Silicon Casting Alloy, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, **2**(3), 1-4.

[73] Topuz A., Döküm ve Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Üretilen AA 2014-Al_4C_3 Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 321582.

[74] Çakır M., Özdemir K., Kesme Parametrelerinin Başlangıç Aşınmasına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(2), 2008.

[75] Stolarski T. A., *Tribology in Machine Design*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.

[76] Totten G. E., Batchelor A. W., Liang H., Lim C. Y. H., Lim S. C., Podgornik B., Scharf T. W., Heide E. V. D., *ASM Handbook Volume 18 Friction Lubrication and Wear Technology*, 1st ed., ASM International, Ohio, 1992.

[77] Bayer R. G., *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*, 2nd ed., Marcel Dekker Inc, New York, 2004.

[78] https://malzemebilimi.net/asinma-nedir-adhezif-ve-abrazif-asinma-nedir.html (Ziyaret tarihi: 12 Mayıs 2019).

[79] Gahr K. H. Z., *Microstructure and Wear of Materials*, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, 1987.

[80] Gnecco E., Meyer E., *Fundamentals of Friction and Wear on the Nanoscale*, 1st ed., Springer, Leipzig, 2007.

[81] Şafak H. E., Yüzeyi PVD Yöntemiyle Kaplanmış Metallerde Tribolojik Özelliklerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008, 216105.

[82] Holmberg K., Matthews A., *Coating Tribology Properties Techniques and Applications in Surface Engineering*, 2nd ed., Elsevier Science B. V., Oxford, 2009

[83] Dodiya V. K., Parmar J. P., A Study of Various Wear Mechanism and Its Reduction Method, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2016, **2**(9), 242-248.

[84] Shibe V., Chawla V., A Review of Surface Modification Techniques in Enchancing the Erosion Resistance of Engineering Components, *The International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology*, 2014, **4**(2), 92-95.

[85] Zeren A., Effect of the Graphite Content on the Tribological Properties of Hybrid Al/SiC/Gr Composites Processed by Powder Metallurgy, *Industrial Lubrication and Tribology*, 2015, **67**(3), 262-268.

[86] Gökçe A., Fındık F., Kurt A. O., Effects of Mg Content on Aging Behavior of Al4CuXMg PM Alloy, *Materials and Design*, 2013, **46**, 524-531.

[87] Wang Z., Li C., Wang H., Zhu X., Wu M., Li J., Jiang Q., Aging Behavior of Nano-SiC/2014Al Composite Fabricated by Powder Metallurgy and Hot Extrusion Techniques, *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, **32**(10), 1008-1012.

[88] Mandal A., Maiti R., Chakraborty M., Murty B.S., Effect of TiB_2 Particles on Aging Response of Al-4Cu Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2004, **386**(1-2), 296-300.

[89] Ravindran P., Manisekar K., Narayanasamy P., Selvakumar N., Narayanasamy R., Application of Factorial Techniques to Study the Wear of Al Hybrid Composites with Graphite Addition, *Materials and Design*, 2012, **39**, 42-54.

[90] Askeland D. R., Fulay P. P., Wright W. J., *The Science and Engineering of Materials*, 6th ed., Cengage Learning, Connecticut, 2010.

[91] Suresha S., Sridhara B. K., Effect of Addition of Graphite Particulates on the Wear Behaviour in Aluminium-Silicon Carbide-Graphite Composites, *Materials and Design*, 2010, **31**(4), 1804-1812.

[92] Ogel B., gurbuz R., Microstructural Characterization and Tensile Properties of Hot Pressed Al-SiC Composites Prepeared from Pure Al and Cu Powders, *Materials Science and Engineering: A*, 2001, **301**(2), 213-220.

[93] Pal S., Mitra R., Bhanuprasad V. V., Aging Behaviour of Al-Cu-Mg Alloy-SiC Composites, *Materials Science and Engineering: A*, 2008, **480**(1-2), 496-505.

[94] Hu C. J., Yan H. G., Chen J. H., Bin S., Microstructures and Mechanical Properties of 2024/Al/Gr/SiC Hybrid Composites Fabricated by Vacuum Hot Pressing, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, **26**(5), 1259-1268.

[95] Sharifi H., Borujeni H.R., Nasresfahari M. R., The Influence of Volume Fraction on SiC Particles on the Properties of Al/SiCp Nanocomposites Produced by Powder Metallurgy with High Energy Ball Milling, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016, **57**(7), 728-733.

[96] Hassan A. M., Mayyas A. T., Alrashdan A., Hayajneh M. T., Wear Behaviour of Al-Cu and Al-Cu/SiC Components Produced by Powder Metallurgy, *Journal of Materials Science*, 2008, **43**(15), 5368-5375.

[97] Ravindran P., Manisekar K., Rathika P., Narayanasamy P., Tribological Properties of Powder Metallurgy-Processed Aluminium Self Lubricating Hybrid Composites with SiC Additions, *Materials and Design*, 2013, **45**, 561-570.

[98] Keneshloo M., Paidar M., Taheri M., Role of SiC Ceramic Particles on the Physical and Mechanical Properties of Al-4% Cu Metal Matrix Composite Fabricated via Mechanical Alloying, *Journal of Composite Materials*, 2017, **51**(9), 1285-1298.

[99] Ravindran P., Manisekar K., Narayanasamy R., Narayanasamy P., Tribological Behaviou of Powder Metallurgy-Processed Aluminium Hybrid Composites with the Addition of Graphite Solid Lubricant, *Ceramics International*, 2013, **39**(2), 1169-1182.

[100] Mahdavi S., Akhlaghi F., Effect of the Graphite Content on the Tribological Behavior of Al/Gr and Al/30SiC/Gr Composites Processed by in Situ Powder Metallurgy (IPM) Method, *Tribology Letters*, 2011, **44**(1), 1-12.

[101] Mosleh-Shirazi S., Akhlagi F., Li D. Y., Effect of Graphite Content on the Wear Behavior of Al/2SiC/Gr Hybrid Nano-Composites Respectively in the Ambient Environment and an Acidic Solution, *Tribology International*, 2016, **103**, 620-628.

[102] Jamal N. A., Farazila Y., Ramesh S., Anuar H., Role of Mechanical Alloying Parameters on Powder Distribution of Al/Cu Composite, *Materials Research Innovations*, 2014, **18**(6), 190-195.

[103] Toozandehjani M., Matori K. A., Ostovan F., Aziz S. A., Mamat M. S., Effect of Milling Time on the Microstructure Physical and Mechanical Properties of Al-Al_2O_3 Nanocomposite Synthesized by Ball Milling and Powder Metallurgy, *Materials*, DOI: 10.3390/ma10111232.

[104] Zebarjad S. M., Sajjadi S. A., Dependency of Physical and Mechanical Properties of Mechanical Alloyed Al-Al_2O_3 Composite on Milling Time, *Materials and Design*, 2007, **28**(7), 2113-2120.

[105] Candido G., Guido V., Silva G., Cardoso K. R., Effect of the Reinforcement Volume Fraction Mechanical Alloying of AA2124-SiC Composite, *Materials Forum*, 2010, **660**, 317-324.

[106] Karabulut H., Çıtak R., Çinici H., Mekanik Alaşımlama Süresinin Al+%10 Al2O3 Kompozitlerde Eğme Dayanımına Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2013, **28**(3), 635-643.

[107] Akhlaghi F., Mosleh-Shirazi S., Effect of SiC Nanoparticles Content and Milling Time on the Characteristics of Al/SiC Nanocomposite Powders Produced via Mechanical Milling, *Advanced Materials Research*, 2014, **829**, 505-509.

[108] Jin P., Xiao B. L., Wang Q. Z., Ma Z. Y., Liu Y., Li S., Effect of Solution Temperature on Aging Behavior and Properties of SiC_p/Al-Cu-Mg Composites, *Materials Science and Engineering: A*, 2011, **528**(3), 1504-1511.

[109] Guo J., Yuan X., The Aging Behavior of SiC/Gr/6013Al Composite in T4 and T6 Treatments, *Materials Science and Engineering: A*, 2009, **499**(1-2), 212-214.

[110] Sun C., Shen R., Song M., Effects of Sintering and Extrusion on the Microstructures and Mechanical Properties of a SiC/Al-Cu Composite, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, **21**(3), 373-38.

[111] Leng J., Jiang L., Zhang Q., Wu G., Sun D., Zhou Q., Study of Machinable SiC/Gr/Al Composites, *Journal of Materials Science*, 2008, **43**(19), 6495-6499.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Summak E. C.**, Zeren A., Al/Cu/SiC Hibrit Kompozitine Sinterleme Sıcaklığının Tribolojik Özelliklerine Etkisi, *3. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 4-5 Mayıs 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Kocaeli'de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kocaeli'de tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2015 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2016 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2019 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı.