
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

PİN ON DİSK METODU İLE B_4C ORANININ ALÜMİNYUM MATRİSLİ VE B_4C TAKVİYELİ TOZ METAL KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa Bayındırhan ÖZEKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2021

ETİK BEYAN

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

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

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

Mustafa Bayındırhan ÖZEKER

27/10/2021

PİN ON DİSK METODU İLE B_4C ORANININ ALÜMİNYUM MATRİSLİ VE B_4C TAKVİYELİ TOZ METAL KOMPOZİT MALZEMELERİN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa Bayındırhan ÖZEKER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2021

ÖZET

Bu çalışmada sıcak presleme ile Alumix-13 matrisli ve B_4C takviyeli metal matrisli kompozit (MMKp) üretilmiş ve pin-on disk metoduyla kuru kayma aşınma davranışı araştırılmıştır. Ağırlıkça % 5, 10 ve 15 oranında B_4C içeren karışım tozun karıştırma işlemi turbula cihazında gerçekleştirilmiştir. Karışım tozlar 50 MPa basınç altında ve 610 ^oC'de bir saat süreyle sıcak olarak preslenmiştir. Presleme sonrası yoğunluk, sertlik ölçümleri ve metalografik incelemesi yapılan toz metal kompozit malzemelerin aşınma testleri yapılmıştır. Testler TIRIBOMETER T10/20 cihazında ASTM G99-05 'standardına uygun olarak yapılmıştır. Aşınma testleri iki farklı parametrelerde yapılmış olup birinci parametrelerde kayma hızı 0,94 m/s, aşındırma mesafesi 2000 m olmak üzere değişik yükler altında (5-10-15 ve 20 N) tekrarlanmış ikinci parametrede kayma hızı 1,05 m/s, aşındırma mesafesi 150 m olmak üzere değişik yükler altında (5-10 ve 15 N) tekrarlanmıştır. Aşındırıcı karşı ortam olarak 52 HRc sertliğe sahip hardox 500 çelik diskler kullanılmıştır. Aşındırma testleri sonrası numunelerdeki ağırlık kayıpları 0,1 mg hassasiyette ölçüm yapabilen hassas terazide yapılmıştır. Sonuç olarak sıcak presleme ile yüksek yoğunlukta üretilen kompozit malzemede takviye elemanı ve miktarındaki artışın malzemenin aşınma ve diğer mekanik özelliklerinde iyileşme sağladığı tespiti yapılmıştır.

Bilim Kodu : 91528
Anahtar Kelimeler : Sıcak presleme, toz metal parça, pin-on-disk, aşınma davranışı
Sayfa Adedi : 135
Danışman : Prof. Dr. Halil ARIK

INVESTIGATION OF EFFECT OF B_4C RATIO ON THE WEAR BEHAVIOUR OF ALUMINUM MATRIX AND B_4C REINFORCED POWDER METAL COMPOSITE MATERIAL BY USING PIN-ON-DISC METHOD

(M. Sc. Thesis)

Mustafa Bayındırhan ÖZEKER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2021

ABSTRACT

In this study, Alumix-13 matrix and B_4C reinforced metal matrix composite (MMKp) were produced by hot pressing and wear behavior were investigated. The mixing process of the aluminum powder with B_4C at various ratios by weight (5, 10, and 15 %) was carried out in a turbulo device. Hot pressing process of mixture powders were performed under 50 MPa pressure and at 610 ^oC one-hour duration. After hot pressing, density, hardness measurements and metallographic examination of all of the samples were done. Wear tests of samples were performed according to ASTM G99-05 using TIRIBOMETER T 10/20. Dry sliding wear tests of composite were carried out in two different parameters. First parameter under the different load (5-10-15 and 20 N) and at 0,94 m/s sliding speed for 2000 m wear distance and second parameter under the different load (5-10 and 15 N) and at 1,05 m/s sliding speed for 150 m wear distance. During the wear tests, hardox 500 steel disk with 52 HRc hardness was used as abrasive materials. The weight lose of the samples after the wear tests were done using a precision scale which can measure 0,1 mg weight. Test results has shown that the composite materials have better wear resistance than Alumix-13 powder metal part. It was seen that adding B_4C into the Alumix-13 result in increase in dry sliding wear resistance and other mechanical properties of composite materials.

Science Code : 91528
Key Words : Hot pressing, powder metal parts, pin-on disk, wear behavior
Page Number : 135
Supervisor : Prof. Dr. Halil ARIK

TEŞEKKÜR

Tez çalışma dönemim boyunca, bana yol gösteren, engin bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Halil ARIK'a sevgi, saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLER LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. ALÜMİNYUM METALİ 7

2.1. Alüminyum Metalinin Genel Özellikleri 7

2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Endüstriyel Önemi 9

3. KOMPOZİT MALZEMELER 15

3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri 15

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 17

3.2.1. Polimer matrisli kompozitler (PMK) 18

3.2.2. Metal matrisli kompozitler (MMK) 19

3.2.3. Seramik matrisli kompozitler (SMK) 24

3.3. Kompozit Malzemelerin Üretimi 26

3.3.1. Sıkıştırmalı veya sıvı dövme döküm 27

3.3.2. Sıvı metal emdirmesi 28

3.3.3. Karıştırma (Vorteks) 30

3.3.4. Yarı katı döküm 31

3.3.5. Basınçlı infiltrasyon 33

Sayfa

3.3.6. Basınçsız infiltrasyon 34
3.3.7. Plazma püskürtme 34
3.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları 36
4. TOZ METALURJİSİ 41
4.1. Toz Metalurjisinin Tanımı ve Tarihi Gelişimi 41
4.2. Toz Metalürjisinin Avantajları ve Dezavantajları 45
4.3. Toz Metalurjisi ile Üretilen Parçaların Genel Özellikleri 46
4.4. Toz Üretimi 47
4.4.1. Mekanik yöntemler 48
4.4.2. Kimyasal yöntemler 50
4.4.3. Elektroliz ile üretim 51
4.4.4. Atomizasyon yöntemleri 52
4.5. Tozların Karıştırılması 54
4.6. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması) 55
4.6.1. Kalıpta presleme 57
4.6.2. Yüksek basınçlı presleme 58
4.6.3. Sıcak izostatik presleme 59
4.6.4. Soğuk izostatik presleme 60
4.6.5. Ekstrüzyon ile presleme 62
4.7. Sinterleme 64
4.8. Tam Yoğunluk İşlemleri 66
5. AŞINMA 71
5.1. Sürtünme ve Aşınmanın Tanımı 72
5.2. Aşınma Türleri 74
5.2.1. Adhesiv aşınma 75
5.2.2. Abrasiv aşınma 76

Sayfa

5.2.3. Yorulma aşınması 79
5.2.4. Tribo-kimyasal/korozif aşınma 80
5.3. Aşınma Ölçüm Yöntemleri 81
6. ABRASİV AŞINMA 85
6.1. Abrasiv Aşınmanın Tanımı 85
6.2. Pin-On-Disk Yöntemi ile Abrasiv Aşınma Davranışının Belirlenmesi 88
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 93
7.1. Malzeme ve Metot 93
7.2. Yaşlandırma Isıl İşlemi 98
7.3. Aşınma Testleri 98
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 101
8.1. Yoğunluk ve Sertlik 101
8.2. Mikroyapı 105
8.3. Aşınma Sonuçları 109
8.4. Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayısındaki Değişim 115
8.5. Aşınma Yüzey Karakteristiği ve Aşınma Mekanizması 117
9. SONUÇ VE ÖNERİLER 125
KAYNAKLAR 127
ÖZGEÇMİŞ 135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Toz metalürjisi uygulamalarını bilinen tarihi gelişimi 42

Çizelge 7.1. Alumix-13'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri 93

Çizelge 7.2. Karışım tozlar ve teorik yoğunlukları 94

Çizelge 8.1. Sertlik ölçüm sonuçları 103

Çizelge 8.2. Yaşlandırma ısıl işlemi gören toz metal numunelerin sertlik ölçüm sonuçları 104

Çizelge 8.3. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim 109

Çizelge 8.4. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim 111

Çizelge 8.5. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim 112

Çizelge 8.6. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim 113

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Alüminyum metalinin periyodik cetvelde gösterimi 10

Şekil 2.2. Boksit cevheri ve alümina maddesinin görünümü..... 11

Şekil 3.1. Sıkıştırmalı sıvı döküm yöntemi..... 27

Şekil 3.2. Vortex karıştırma döküm yöntem..... 30

Şekil 3.3. Basınçlı döküm yöntemi..... 34

Şekil 3.4. a) Osprey yöntemi b) Osprey yöntemi ile üretilen bir parça 35

Şekil 4.1. Toz metalurjisi işlem basamakları..... 44

Şekil 4.2. Toz metalurjisi ile malzeme üretimi..... 44

Şekil 4.3. Bilyalı öğütme cihazıyla mekanik toz üretim tekniği..... 48

Şekil 4.4. Demir tozu üretimi 51

Şekil 4.5. Elektroliz ile toz üretimi..... 52

Şekil 4.6. Atomizasyon ünitesi 53

Şekil 4.7. Atomizasyon işlemi ile toz üretim süreci 54

Şekil 4.8. Toz karıştırıcısı..... 55

Şekil 4.9. Toz presleme işleminin basamakları. 1) İşlem başlangıcı 2) Toz doldurma 3) Presleme işlemi 4) Presleme bitişi 5) Parçanın çıkarılması..... 58

Şekil 4.10. Sıcak izostatik presleme (HIP) 60

Şekil 4.11. Soğuk İzostatik Presleme (CIP)..... 61

Şekil 4.12. Ekstrüzyon presleme..... 63

Şekil 4.13. Sinterleme işlemi 65

Şekil 4.14. Toz sinterleme işlemi..... 66

Şekil 5.1. Temel aşınma teorisi..... 73

Şekil 5.2. Aşınma türleri..... 75

Şekil 5.3. Adhesiv piston aşınması örneği..... 76

Şekil 5.4. Abrasiv aşınma 77

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.5. Abrasiv aşınma örneği 78

Şekil 5.6. Yorulma aşınması örneği 79

Şekil 5.7. Erozyon aşınması 80

Şekil 5.8. Korozif aşınma 81

Şekil 6.1. Abrasiv aşınma esnasında partikül temas yüzeyi iğle sert faz boyutu ilişkisi 86

Şekil 6.2. Pin on disk cihazı gösterimi 90

Şekil 6.3. Pin on disk aşınma izi 91

Şekil 7.1. a) Sıcak preslemenin şematik gösterimi, b) Aşındırma testi numuneleri 95

Şekil 8.1. Toz metal parçalarda takviye elemanı oranına bağlı yoğunluk değişimleri ... 102

Şekil 8.2. Toz metal parçalarda B_4C miktarına bağlı sertlik değişimi 103

Şekil 8.3. Toz metal parçalarda ısıl işleme bağlı sertlik değişimi 104

Şekil 8.4. Toz metal parçalarda ısıl işleme bağlı sertlik değişimi 105

Şekil 8.5. Malzeme kompozisyonuna ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak aşındırma kayıplarındaki değişim 110

Şekil 8.6. Malzeme kompozisyonuna ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak aşındırma kayıplarındaki değişim 112

Şekil 8.7. Toz metal parçalarda B_4C takviye oranı ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak elde edilen aşınma kayıplarındaki değişimi 113

Şekil 8.8. Yaşlandırma ısıl işlemi görmüş toz metal parçalarda B_4C takviye oranı ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak elde edilen aşınma kayıplarındaki değişimi 114

Şekil 8.9. % 15 B_4C içeren numunelerin 5 N yük altında aşınma testlerindeki sürtünme katsayısı ve kuvvetlerindeki değişim 115

Şekil 8.10. % 15 B_4C içeren numunelerin 20 N yük altında aşınma testlerindeki sürtünme katsayısı ve kuvvetlerindeki değişim 116

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 7.1. Hassas terazi 93

Resim 7.2. Tozların karıştırıldığı turbula cihazı 94

Resim 7.3. Sıcak presleme yapılan hidrolik pres 95

Resim 7.4. a) Brinell sertlik ölçüm cihazının genel görünümü b) Sertlik ölçümü yapılmış bakalite alınmış numunelerin görünümü 96

Resim 7.5. a) Sıcak bakalite alma cihazı b) Otomatik parlatma cihazı 96

Resim 7.6. Alümix-13 ve kompozit toz metal parçaların bakalit içerisindeki görünümü 97

Resim 7.7. a) Leica DMI 5000M optik mikroskop b) Jeol SEM 6060 LV mikroskobu 97

Resim 7.8. Blok parçalar üzerinden tel erezyonla üretilen aşınma test numuneleri 98

Resim 7.9. TIRIBOMETR T 10/20 aşındırma test cihazı 99

Resim 8.1. Matris yapının (Alumix-13) mikroyapı resmi 105

Resim 8.2. % 5 B4C içeren kompozit toz metal numunelerde mikroyapı ve takviye elemanı partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımı. a) 750; b) 1000; c) 2000 ve d) 5000 büyültme 106

Resim 8.3. % 10 B4C içeren kompozit toz metal numunelerde mikroyapı ve takviye elemanı partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımı. a) 250; b) 500; c) 750; d) 7000 büyültme 107

Resim 8.4. % 15 B4C içeren kompozit toz metal numunelerde mikroyapı ve takviye elemanı partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımı. a) 250; b) 500; c) 750; d) 2500 büyültme 108

Resim 8.5. Alümix-13 toz metal numunelerde aşınma yüzey desenleri 117

Resim 8.6. % 5 B_4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey desenleri 118

Resim 8.7. %10 B4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey desenleri 119

Resim 8.8. %15 B_4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey deseleri 120

Resim 8.9. SEM-EDX görüntü ve sonuçları 121

Resim **Sayfa**

Resim 8.10. Disk üzerindeki aşınma ve numune üzerindeki kirlenme 122

Resim 8.11. %15 B_4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey desenleri 123

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
^{o}C	Santigrat Derece

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AMK	Alüminyum Matrisli Kompozit
CIP	Soğuk İzostatik Presleme
CVD	Kimyasal Buhar Çöktürme (Chemical Vapour Deposition)
EDS	Enerji Dağılımlı Spektroskop
HIP	Sıcak İzostatik Presleme
MIT	Massachusetts Enstitü ve Teknoloji
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MPa	Megapascal Pressure Unit (Pascal Cinsinden Basınç Birimi)
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
TM	Toz Metalürjisi

1. GİRİŞ

20. yüzyılda teknoloji hızla gelişmekte ve bunun doğal bir sonucu olarak sanayileşmenin temelini oluşturan malzeme ve malzeme biliminde de büyük gelişmeler yaşanmaktadır. Ancak yerkürede bulunan temel hammadde ve malzemelerin sınırlı olması sebebiyle, eldeki malzemelerin teknoloji alanında yaşanılan bu büyük gelişime ve ortaya çıkan ihtiyaca ayak uyduramamaktadır. Uzay çağının başlarında bilim adamları uzaya gönderilecek araçlar için hali hazırdaki malzemelerin özelliklerini daha da geliştirerek teknik olarak daha uygun malzemeleri daha ekonomik biçimde üretmenin yollarını aramaya başlamışlardır. Bu doğrultuda, yüksek dayanma gücüne sahip, hafif ve ekonomik malzemeler geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Bu kapsamda yapılan çalışmalar neticesinde farklı özelliklerdeki bileşenlerin farklı kombinasyonları bir araya getirilerek gelişmiş malzemeler ortaya çıkarılmaya başlanmıştır. Geliştirilen bu malzemeler arasında Kompozit Malzemeler büyük önem kazanmış ve endüstriyel kullanım alanlarında yaygın hale gelmiştir. Günümüzde yüksek mukavemet/ağırlık ve katılık (rijitlik)/ağırlık oranlarına sahip fiber takviyeli kompozit malzemeler ağılığa duyarlı birçok araç ve teknolojik sistemde kullanılmaktadır. Yakın zamana kadar metal saç ya da ahşaptan yapılan tekne, yat ve gemilerin yerini de polyester ve cam elyaf katkılı kompozit malzemelerden yapılmış modellerin almaya başlaması bu alanda yaşanan gelişmelerin en güzel örnekleridir.

Metalürji Bilimi olarak da adlandırılan Metal Malzeme Bilimi kapsamındaki araştırmalar malzeme özelliklerinin geliştirilmesi ve performanslarının artırılması için yapılmaktadır. Bu kapsamda mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından, malzeme üretim yöntemlerinin geliştirmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Gelişmeler her zaman geleneksel malzeme tasarımından başlayarak, "yüksek sıcaklıklara dayanabilen, daha sağlam, daha katı ve daha hafif" olmak üzere tasarlanmaktadır. Standart metotlarla üretilemeyen malzeme türlerini elde edebilmek için, yeni üretim metotlarından toz metalürjisi yöntemi geliştirilerek günümüz endüstriyel uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Modern çağın imalat sanayisinde birçok ürün kompozit malzemeler kullanılarak yapılmaktadır. Maliyet, etkinlik, çok yönlülük ve daha az çevresel kirlilik gibi faktörler

sebebiyle kompozit malzemelere olan talebin daha da artacağı değerlendirilmektedir. Bu gelişmiş malzemeler arasında metal matrisli kompozitler önemli bir yer tutmaktadır. Alüminyum, magnezyum, silisyum ve alaşımları metal matrisli kompozit malzeme üretiminde, hafiflikleri ve süneklikleri nedeniyle en çok tercih edilen matris malzemelerdir. Özellikle alüminyum ve alaşımları metal matrisli kompozit malzeme üretimi için en çok rağbet gören matris malzemesi durumundadır. Bu kapsamda, Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunlukları, yüksek korozyon dayanımları, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, kolay tedarik edilebilir ve işlenebilir olması gibi üstün özelliklere sahip olmaları alüminyum matrisli kompozit malzemeleri ön plana çıkarmaktadır. Bu tür malzemeler zamanla, düşük ağırlıkları, yüksek mukavemetleri, üstün aşınma özellikleri sayesinde birçok mühendislik uygulamasında kullanılan ana malzemeler haline gelmiştir.

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan Bor karbür ise, özellikle yüksek sertlik ve rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin birçoğunu barındırmakta olup alüminyum ve alaşımları için oldukça uygun bir takviye malzemesidir. Yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve rijitlik gibi üstün özellikleri sayesinde Al-B_4C kompozitleri, özellikle otomotiv sanayiinde fren, disk ve balata malzemeleri üretiminde tercih edilmektedir.

Alüminyum matrisli kompozit malzemeleri kullanılarak SiC, Al_2O_3, C, SiO_2, MgO, TiC ve B_4C gibi her türlü iklimsel ve fiziksel koşul altında kullanılabilecek üstün özellikli malzeme elde edilebilmektedir. Bu takviye malzemeleri arasından en çok kullanılanları SiC, Al_2O_3 ve B_4C'dür. Ancak, B_4C tozlarının üretim maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle diğerlerine oranla daha sınırlı sayıda kullanılmaktadır.

Dünya çapında yapılan çalışmalara göre makine parçalarının çoğunun kullanılmaz hale gelmesinin nedeni sürtünme işlemi ve sonuçta ortaya çıkan aşınma olmaktadır. Aşınmaya ilave olarak sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıpları da büyük masraflara yol açmaktadır. Bu nedenle aşınmanın makine tasarımlarındaki önemi büyüktür.
Bu kapsamda yapılan çalışmada, alüminyum esaslı ve B_4C (Bor karbür) takviyeli kompozit malzemelerin genel özellikleri ile bu tür metal yüzeylerde ortaya çıkan sürtünme ve aşınma olaylarının etkilerinin neler olduğunun incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışma, sekiz bölümden oluşmaktadır, çalışmanın genel çerçevesinin çizildiği giriş bölümünden sonra, birinci bölümde Alüminyum (Al)'un, ikinci bölümde de kompozit malzemelerin genel özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, toz metalürjisinden bahsedilmiş, beşinci bölümde metal yüzeylerde meydana gelen aşınma olayı, altıncı bölümde ise metal ve sert yüzeylerde oluşan abrasiv aşınma kavramları açıklanmıştır. Çalışmanın yedinci bölümde, alüminyum esaslı ve B_4C (Bor karbür) takviyeli kompozit malzemelerde meydana gelen aşınma olayının incelenmesi amacıyla deneysel bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda ise farklı yöntem ve karışım özellikleri ile elde edilen kompozit malzemelerin parametrik değerlerinden elde edilen bulgular karşılaştırılmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Orhan ve diğerleri (2007), sıcak presleme uygulanarak toz metalürjisi yöntemi ile üretilen ve ağırlık olarak farklı oranlarda B_4C içeren Al matrisli kompozit ürünlerin mekanik ve mikro yapılarını incelemek amacı ile bir çalışma yapmışlardır. İlk olarak soğuk presleme ile elde edilen kompozitlere daha sonra poroziteleri azaltabilmek için 500-550°C sıcaklık değerlerinde sıcak pres uygulamışlardır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanının matris içinde homojen dağıldığını, takviye elemanı oranı arttıkça kompozitin sertliğinin arttığını 550 °C 'de uygulanan sıcak presleme işleminde takviye elemanı arttıkça yoğunluğun azaldığını tespit etmişlerdir [1].

Kumdalı (2008), toz metalürjisi yöntemi ile değişik parametreler kullanılarak elde edilen Al-B_4C kompozitleri için uygulanan parametreler açısından optimum değerleri tespit edebilmek amacı ile bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında üretmiş olduğu kompozit numuneleri için takviye elemanı boyutunun, takviye elemanı oranının, uygulanan kurutma işleminin, presleme işleminde uygulanan basınç büyüklüğünün ve sinterleme uygulamasındaki sıcaklığın mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisini gözlemlemeye çalışmıştır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; optimum presleme basıncını 800 MPa ve optimum sinterleme sıcaklığını 590°C olarak tespit etmiştir. Kurutma işleminin sonucu etkilemediği, sinterleme sıcaklığı arttıkça numunelerin sertlik ve yoğunluklarının arttığı ve takviye ve matris elemanlarının tane boyutlarının farkının artmasının numunelerde topaklanmalara sebep olduğu çalışmada ulaşılan diğer sonuçlardandır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre takviye elemanı oranı %25 seviyesine kadar arttıkça numunelerin sertliği artmış %25

oranında ise azalmıştır. Ayrıca presleme basıncı 800 MPa'yı geçtikten sonra da numunelerin sertlikleri azalmaya başlamıştır [2].

Topçu ve diğerleri (2009), Al matrisli ve B_4C takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanı arttıkça sertliğin arttığını ve darbeye dayanıklılığın azaldığını, takviye elemanı oranı arttıkça aşınmanın azaldığını, sinterleme sıcaklığı ile numune yoğunluğunun doğru orantılı olduğunu ancak bu durumun %15 ve üzeri takviye elemanı içeren numuneler için geçerli olmadığını belirlemişlerdir [3].

Hasırcı ve diğerleri (2010), toz metalürjisi ile elde edilen Al matrisli ve B_4C takviyeli kompozitlerin kuru kayma ortamındaki aşınma durumlarını belirlemek amacı ile bir çalışma yapmışlardır. Bu amaç doğrultusunda, elde edilen numuneleri 10N ve 20N yük uygulayarak, 180 ve 400 Mesh zımparalar ile 0,2 m/s hız ile abrasif aşınma testlerine tabi tutmuşlardır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanı oranı arttıkça sertliğin arttığını belirlemişlerdir. Çalışma sürecinde %20 oranında takviye elemanı içeren numunenin sertliğinin en yüksek ve %10 takviye elemanı içeren numunenin aşınma direncinin en fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [4].

Taşcı ve diğerleri (2013), farklı oranlarda B_4C içeren AA2014 matris elemanlı ve toz metalürjisi ile elde edilen kompozit numunelerin mekanik yapılarını, mikro yapılarını ve aşınma davranışlarını incelemek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanı oranı arttıkça sertliğin arttığını, % 8 takviye elemanı oranında en yüksek sertliğe ulaşıldığını ve bu sertlik değerinin 90 HV olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca takviye elemanı oranı arttıkça numunelerde aşınmanın azaldığı ve takviye elemanının matris içerisinde homojen olarak dağıldığı çalışmada tespit edilen diğer sonuçlardandır [5].

Ayvaz ve Çetinel (2014), toz metalürjisi ile elde edilen Al matrisli ve B_4C takviyeli kompozitlerin yoğunlukların, sertliklerini ve mikro yapılarını farklı takviye elemanı oranı ve matris kompozisyonları açısından incelemek amacı ile bir çalışma yürütmüşlerdir. Ayrıca presleme basınç büyüklüklerinin ve sinterleme süresinin de etkisini belirlemeyi de amaçlamışlardır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; presleme basınç değeri

arttıkça sertliğin ve yoğunluğun arttığını, takviye elemenı oranı arttıkça yoğunluğun azalıp sertliğin arttığını belirlemişlerdir [6].

Çolak ve Turhan (2016), toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen Al-Si/B_4C kompozit numunelerin mekanik ve mikro yapı özelliklerini incelemek amacı ile bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanı oranı arttıkça numunelerin sertliğinin arttığını, %20 takviye elemanında sertliğin en yüksek değerde olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları SEM incelemeleri sonucunda ise; takviye elemanının matris içinde homojen dağıldığını gözlemlemişlerdir [7].

Çelik ve Seçilmiş (2017), toz metalürjisi ile elde edilen saf Al matrisli ve B_4C takviyeli kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında elde ettikleri numunelere farklı yükler altında ve farklı mesafelerde aşınma testleri uygulamışlar ve sertlik ölçümleri yaparak sonuçları değerlendirmişlerdir. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanı oranı arttıkça numunelerin sertliklerinin arttığını ve aşınma miktarının azaldığını tespit etmişlerdir. Çalışmada en yüksek sertlik değeri, %16 oranında takviye elemanı içeren numune için 68,1 HV, en düşük sertlik değeri ise saf Al için 48,5 HV olarak ölçülmüştür. Aşınma testlerinde uygulanan yük arttıkça aşınma miktarı artmış, takviye elemanı oranı arttıkça ise aşınma miktarı azalmıştır. Takviye elemanı oranı arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı gözlenmiş ve sürtünme katsayısı en yüksek Al 'da 0,577 olarak, en düşük sürtünme katsayısı ise %16 takviye elemanlı numunede 0,375 olarak saptanmıştır. Yaptıkları mikro yapı incelemelerinde takviye elemanının matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını ancak sinterleme atmosferik ortamda yapıldığında numunelerin dışlarında oksitlenme olduğunu gözlemlemişlerdir [8].

Gökmeşe ve Karadağ (2018), toz metalürjisi ile elde edilen AA2014 matris elemanlı ve B_4C ve SiC takviye elemanlı kompozitlerin mekanik yapılarını incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; sinterleme işlemi sonunda takviye elemanı oranı arttıkça sertliğin arttığını belirlemişlerdir. Çalışmalarında %15 oranında tek tür takviye elemanı içeren numunelerin sertliğinin B_4C-SiC takviye elemanı içeren hibrit numunelere göre kıyasla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Sertlik değerini en yüksek olarak %15 B_4C takviye elemanlı numunede 86 HV, en düşük olarak ise takviye elemanı olmayan AA2014 alaşımından 53 HV ölçmüşlerdir. Elde ettikleri numunelerin mikro yapı

incelemesinde de B_4C ve SiC takviye elemanlarının kümelenmeler oluşturduğunu gözlemlemişlerdir [9].

Javdani ve Sorkhabi (2018), toz metalürjisi ile elde edilen Al matrisli ve B_4C takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Tane boyutları ve hacim oranları olan kompozitleri 50 ve 100 MPa basınç uygulayarak soğuk presleme ile elde etmişlerdir. Matris elemanının tane boyutu 20-45-63 μm, takviye elamanının ise 45 μm olarak tespit edilmiştir. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanı oranı %10'u geçtiği zaman topaklanma meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca takviye elemanı oranı arttıkça sertliğin arttığını ancak %10 oranından fazla takviye elemanı içeren numuneler için çekme dayanımının azaldığı ve tane boyutu azaldıkça sertliğin arttığı çalışmada saptanan diğer sonuçlardandır [10].

Tinga (2019), toz metalürjisi ile elde edilen Al matrisli ve B_4C ve SiC takviyeli kompozitlerin işlenebilirlik özelliklerini ve mekanik yapılarını incelemek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; takviye elemanlarından olan B_4C oranı arttıkça çekme dayanımının azaldığını, her iki takviye elemanı içeren numunelerin çapraz kırılma dayanımlarının azaldığını, kesme hızı arttıkça kesme kuvvetinin azaldığını tespit etmiştir. Bunların yanında, takviye elemanı oranı arttıkça numunelerin yüzeylerinin daha kaliteli olduğu çalışmada elde saptanan bir diğer sonuçtur [11].

Bayraktar ve Turgut (2020), alüminyum levha üzerine istif edilen karbon fiber takviyeli kompozit numunelere delik açma işlemi için işlenebilirlik parametrelerin etkilerini incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. İşlenebilirlik testi uygulamasında uç açıları 90°-118°-135° olan üç farklı uç kullanmışlardır. Bu uçların kullanıldığı matkapla 100, 125 ve 150 m/dak kesme hızlarında ve dakikada 0,1; 0,2 ve 0,3 devir ilerleme durumunda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sürecindeki deneylerin sonucunda; delik giriş ve çıkışında meydana gelen hasarlar açısından matkap uç açısının, kesme hızının ve ilerleme miktarının önem arz ettiğini saptamışlardır. Çalışmalarından elde ettikleri sonuçlara göre kesme işlemi için optimum parametreler; ilerleme hızının düşük olması, kesme hızının yüksek olması matkap için uç açısının düşük olmasıdır [12].

2. ALÜMİNYUM METALİ

2.1. Alüminyum Metalinin Genel Özellikleri

Dünyada Silisyum ve Oksijen'den sonra en çok bulunan üçüncü element Alüminyum'dur. Alüminyum, demir, kurşun, kalay vb. diğer bazı metaller gibi, doğada bileşik halde bulunmaktadır. Alüminyumu oksit haldeki bileşikten ilk ayıran ve kişi, 1807'de, Sir Humprey Davy olmuştur. Ancak endüstriyel olarak üretimine 1886'da elektroliz yönteminin geliştirilmesiyle başlanmıştır. Hans Christian Oersted, Frederick Wöhler ve Henri Sainte-Clairre Deville, alüminyum üretimine yenilikler kazandırmışlardır. 1886 yılında ABD'de Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul T. Heroult'un aynı zamanda gerçekleştirdikleri elektroliz yöntemiyle Alüminyumun endüstriyel çapta üretimine başlanmıştır. Günümüzde halen kullanılmakta olan bu yöntemin, alüminyum endüstrisinin başlangıcı olduğu kabul edilmektedir. 1886'da yaşanan iki gelişme olan, Werner Von Siemens'in "dinamo keşfi" ve 1892'de K.J. Bayer tarafından boksitten alümina elde edilmesini sağlayan "Bayer Prosesini" geliştirilmesi ile alüminyumun tüm sanayi alanlarında üretilmesi kolaylaşmıştır. Böylece bu yeni metal türü, demir - çelikten sonra dünyada en fazla kullanılan ikinci metal olmuştur [13].

Alüminyum, tabiatta oksit halindeki bir bileşik olarak bulunmakta ve yerkabuğunun yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır. Alüminyum metali üretimi birincil ve ikincil üretim olmak üzere ikiye ayrılır. Birincil alüminyum üretimi boksit cevherlerinden elde edilir. İkincil alüminyum ise hurda alüminyumun geri dönüşümü yolu ile üretilir. Alüminyum üretiminin en önemli hammaddesi olan Boksit minerali %30-60 alüminyum oksit içermektedir. Bayer Prosesi ile üretilen Alüminyum oksitin (alümina - Al_2O_3) elektrolizi ile sıvı alüminyum üretilmektedir. Bu işleme "birincil alüminyum" üretimi denilmektedir. Yaklaşık 4 ton boksit mineralinden 2 ton alümina elde edilmekte ve bundan da 1 ton metal alüminyum üretilebilmektedir. Alüminanın elektrolizi yöntemiyle, ticari olarak alüminyum üretilmesi ancak 1888 yılında mümkün olmuştur. İlk önce elektrik kabloları ve dekorasyon ürünlerinde kullanılan alüminyum, 1939-1945 arasındaki II. Dünya Savaşı döneminde uçak sanayiinde yoğun olarak kullanılmıştır. 1960'larda alüminyumdan yapılmış sac ve levhalar inşaat sanayiinde kullanılmaya başlanmış, 1970 ve 1980'lerde ise, kutu ve ambalaj piyasasında

büyük talep görmüştür. Dünyada yaşanmış petrol krizleri neticesinde daha hafif otomobillerin üretilmesi amacıyla alüminyum kullanımı yaygınlaşmış ve otomotiv sektöründe hızla demir, çelik ve bakır yerini almaya başlamıştır [14].

Alüminyum (Al), periyodik tabloda kimyasal element olarak, bor grubu olarak bilinen Grup 13'te hafif ve gümüş beyazı bir metal şeklinde yer almaktadır. Kimyasal aktivite özellikleri sebebiyle, alüminyum doğada metal formunda asla oluşamamaktadır. Ancak bileşikleri hemen hemen tüm kayaçlarda, ayrıca bitki ve hayvanlarda az veya çok miktarda bulunmaktadır [15].

Tabiattaki en fazla elementlerden ve mühendislik alanında en çok kullanılan metallerden biri olan Alüminyumun yoğunluğu 2,71 g/cm3 ile çeliğin 7,83 g/cm3 olan yoğunluğunun üçte biri kadardır. Bazı alüminyum alaşım türlerinin akma sınırı değerleri de 500 MPa'yı geçmektedir. Bu değer pek çok çelik türünün akma sınırı değerinin üzerinde bulunmaktadır. Alüminyum alaşımları bu özellikleri sebebiyle, özellikle hafif olması arzu edilen uygulamalarda sık olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun elektrik ve ısı iletkenliği ise, bakıra göre daha az olmaktadır. Ancak, elektrik iletkenliği/yoğunluk ve ısı iletkenliği/yoğunluk oranları açısından karşılaştırıldığında bakırdan daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu sebeple, hava elektrik hatlarında kullanılmak üzere alüminyum ve alaşımları tercih edilmektedir. Ayrıca fiyat olarak da bakıra nazaran alüminyumun daha ucuzdur [16].

Alüminyumun yüzeyi korozif ortamlarda oksit tabakası ile kaplanmakta ve alüminyumun korozyona karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Bu özelliği nedeniyle alüminyum korozif ortamlarda da kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının bünyesindeki diğer maddelerin alüminyum ile galvanik pil oluşturma işlemine uygun olması sebebiyle, korozyona karşı alüminyumun mümkün olabildiği ölçüde saf olarak kullanılmaktadır. Ancak mekanik özelliklerindeki dayanaklığın (zayıflık) azlığı sebebiyle, mühendislik uygulamalarında saf Alüminyum kullanımı yaygın değildir. Alüminyum, sıcak ve soğuk işlemlerle şekillendirilme için de uygun bir metaldir. Ekstrüzyon yöntemiyle karmaşık geometrik şekiller içeren alüminyum profiller üretilmektedir. Kalınlığı mikron seviyesinde olan folyolar üretilerek paketleme işlemlerinde kullanılmaktadır. Gıda endüstrisinde kullanılan folyo ambalajlar saf alüminyumdan yapılmaktadır. Alüminyum, Eloksal ya da Anotlama

denilen elektrolitik işlemiyle oksitlendirilerek farklı renklerde üretilebilmektedir. Bu işlem ile korozyona dayanıklı ve değişik renklerdeki profiller üretilerek mimaride kullanılan pencere, kapı vb. eşyalar yapılmaktadır. Bazı özel kullanım alanları için sertliği ve dayanımı yüksek olan alüminyum alaşımlarının üzeri saf alüminyum tabakasıyla kaplanarak korozyona karşı dayanıklılığı artırılmaktadır [17].

Kimya biliminde aynı atom grubuna sahip maddelere element denilmektedir. En az biri metal olmak üzere iki veya daha fazla elementten oluşturulan yeni özelliklere sahip malzemelere ise alaşım denilmektedir. Endüstride kullanılan saf metallerin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Saf metallerin avantaj ve dezavantajları aşağıda gösterilmiştir [18].

Saf metallerin dezavantajları;

- Elde edilmeleri pahalı ve zordur.
- Hacimsel kütleleri fazladır.
- Akıcılıkları düşüktür.
- İhtiyaçlara göre belirli özellikleri sınırlıdır.
- Ergime sıcaklıkları yüksektir.
- Döküm ve kalıplama işlemleri zordur.

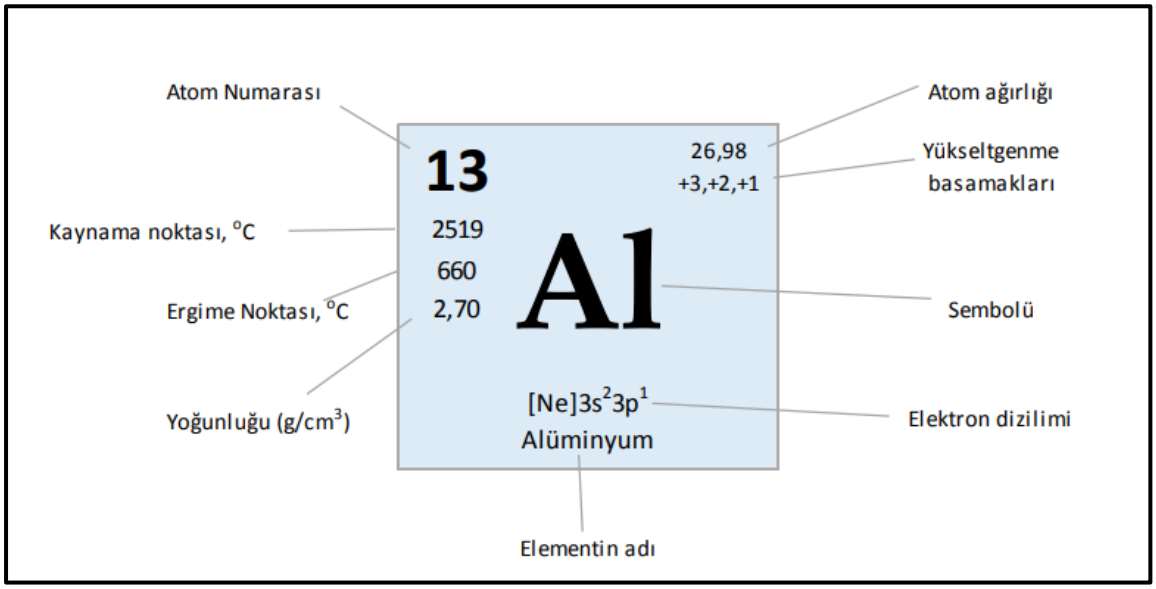
Metal alaşımları kullanımının faydaları;

- Katkı maddelerine bağlı olarak belirli özellikleri istenilen miktarda değiştirilebilir.
- Hacimsel kütleleri azdır.
- Ergime sıcaklıkları düşüktür.
- Akıcılıkları fazladır.

2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Endüstriyel Önemi

Endüstride farklı amaçlarla değişik alaşımlar kullanılmaktadır. Bu alaşımlarda kullanılabilen en önemli maddelerden biri Alüminyum'dur. Genel özellikleri itibariyle; özgül ağırlığı 2,7 kg/dm3, ergime derecesi 658 ^{o}C, beyazımsı gri, ısı ve elektrik iletimi yüksek, soğuk olarak şekillendirilebilen bir metaldir. Saf alüminyum doğada boksitten elde edilmektedir.

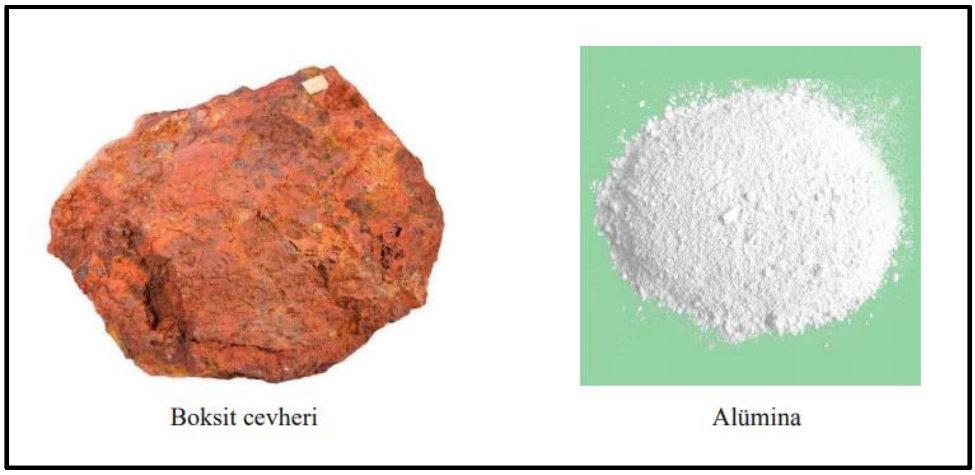
Bileşiğindeki ana elementi alüminyum olan alaşımlara “Alüminyum Alaşımları” denilmektedir. Bu tür alaşımlara hafif alaşımlar da denilmektedir. Alüminyum alaşımları bakır, çinko, silisyum, mağnezyum, manganez, demir, nikel, titan gibi elementler farklı oranlarda karıştırılarak üretilmektedir. Hafif olmaları, ısı ve elektrik iletkenlikleri, ısıl işlemlere uygun olmaları ve bazı kimyasal etkilere karşı dayanıklı olmaları bu alaşımların temel özellikleridir. Alüminyum alaşımları döküm ve kalıplama işlemleri için de elverişlidir. Ayrıca, dövme, çekme ve haddeleme ile biçimlendirilebilen alüminyum alaşımları da üretilmektedir. Korozyona dayanıklı olduklarından ve zehirlenme tehlikesi içermediklerinden dolayı ilaç ve gıda sanayinde koruma maddesi olarak da kullanılmaktadır [18].



Şekil 2.1. Alüminyum metalinin periyodik cetvelde gösterimi [19]

Dünya boksit rezervi toplamı 55-75 milyar ton olup, bunun yaklaşık 30 milyar tonu işletilebilir rezerv durumundadır. Dünyanın en zengin boksit rezervine sahip ülkesi olan Gine’de 7,4 milyar ton rezerv bulunmaktadır. Gine’nin ardından sırasıyla Avustralya (6 milyar ton), Vietnam (3,7 milyar ton), Brezilya (2,6 milyar ton) ve Jamaika (2 milyar ton) gelmektedir. Bu beş ülke toplamda dünya boksit rezervinin %73’üne (22 milyar ton) sahiptir. Yüksek miktarda rezerve sahip diğer ülkeler sıralamasında Endonezya ve Çin (1 milyar ton), Guyana (850 milyon ton), Hindistan (830 milyon ton) ve Rusya (500 milyon ton) yer almaktadır. Alüminyumun ana cevher kaynağı olan boksit üretimi genellikle açık ocak işletmeciliği şeklinde gerçekleştirilmektedir. Günümüzde hurda malzemelerden alüminyum

elde etmek için yapılan ikincil Alüminyum üretimi, birincil alüminyum üretiminde harcanan enerjiden çok daha az enerji tüketilmesi ve daha düşük maliyetlerle gerçekleştirilmesi nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Dünyada yapılan ikincil alüminyum üretiminin yaklaşık yarısı ABD'de gerçekleştirilmektedir [14].



Şekil 2.2. Boksit cevheri ve alümina maddesinin görünümü [19]

Boksitten elde edilen alümina 2017 yılına kadar son beş yıl içerisinde sürekli artış göstermiş 2018 yılında ise 130,42 milyon tona gerilemiştir. 2018 yılında alümina üretimindeki gerileme Güney Amerika ve Avustralya'dan kaynaklanmaktadır. Çin ise 2017'de 71 Milyon ton olan alümina üretimini 72 milyon tona çıkarmıştır. Dünya alümina üretiminde ilk sırayı %54'lük payı ile Çin almaktadır. Çini %15,41'lik pay ile Avustralya takip etmektedir. Boksit rezervleri açısından dünyanın en zengin rezervlerine sahip Gine ise alümina üretim tesisi olmaması sebebiyle alümina üretiminde pay sahibi değildir. Birincil alüminyum üretimi ise alümina ve boksitin aksine sürekli olarak artışına devam etmiş ve 2018 yılında da büyüme kaydetmiştir. 2018 yılında dünya birincil alüminyum üretimi 64 milyon ton seviyesine gelmiştir. Dünya birincil alüminyum üretiminin artışında iki bölge büyümenin öncülüğünü yapmaktadır. Bunlar Çin ve Körfez ülkeleridir. Özellikle Çin son beş yıl içerisinde 28,3 milyon ton olan üretimini 36,5 milyon tona çıkararak %28'luk bir büyüme kaydetmiştir. 2018 yılı itibarı ile Çin'in dünya birincil alüminyum üretiminden aldığı pay %56,71 seviyesine çıkmıştır [20].

Günümüzde çeşitli otomotiv motor bileşenlerinde alüminyum alaşımlı MMK'ler piyasaya sürülmüştür ve uygulama alanları giderek artmaktadır. Örnek olarak, Toyota firması

tarafından dizel motor pistonlarında, ağırlığı %5 ila %10 arasında, aşınmayı ise dört kat azaltan kısa alümina lifi ile güçlendirilmiş MMK malzemeler kullanılmaktadır. Honda firması dökme alüminyum silindir bloklarında %12 kısa alümina lifleri ile güçlendirilmiş malzemeler kullanmaktadır. Genel olarak %15 ila %30 oranında SiC içeren partikül takviyeli alüminyum alaşımlı MMK'ler, fren diskleri, kampanalar ve kaliperler dahil otomotiv sektöründe kullanımı için geliştirilmeye devam etmektedirler. Yeni Lotus Elise spor otomobiller, ön ve arka frenler için alüminyum MMK disklere sahiptir. Bu ürünlerde disk ağırlığı, alternatif dökme demire nazaran yaklaşık %50 azalmakta ve daha iyi termal yayılma, sürtünme yüzeyleriyle aşırı ısınmaya karşı direnç sağlamaktadır [21].

Alüminyum; hafifliği, düşük maliyeti ve kolay şekillenebilmesi nedeniyle, havacılık ve uzay sanayisi, mutfak eşyaları, tıbbi aletler ve gıda sektöründe yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu avantajlarının yanında alüminyumun ayrıca yüksek korozyon direnci bulunma özelliği de vardır. Bu durum, alüminyum yüzeyinin havayla temas etmesi sonucu meydana gelen ince oksit bir film tabakası sayesinde oluşur. Ancak doğal olarak kendiliğinden oluşan oksit filmin koruyuculuk değeri azdır. Endüstriyel olarak ise alüminyum yüzeye anodizasyon işlemi uygulanarak film tabakanın kalınlığı arttırılır. Anodizasyon işlemiyle alüminyumun yüzeyinde oluşan kalın oksit film tabakanın gözenekli yapısı sayesinde, değişik renklendirme uygulamaları da yapılabilir. Bu işlemlerde organik veya inorganik pigment maddeleri gözeneklerin içinde birikerek alüminyumun renginin değişmesini sağlarlar. Alüminyumun elektrolitik yöntemlerle renklendirilmesi, maliyeti, dayanımı, renk çeşitliliği gibi faktörler sebebiyle, diğer metotlara göre üstün olmakta ve sanayide yaygın biçimde kullanılmaktadır. Diğer yandan, günümüzde özellikle uzay-havacılık, gıda işleme ensüdtrisi, mutfak eşyaları ve tıbbı cihazların üretilmesi için kullanılan pek çok malzemede, "antibakteriyellik" kriterinin bulunması gerekmektedir. Antibakteriyel özellikli gümüş bazlı bileşiklerin, birçok mikroorganizmaya karşı önleyici etkisi bulunmaktadır. Alüminyumun bu konuda kullanılması amacıyla yapılan uygulamalar, malzeme yüzeyindeki oksit tabakanın gözenekli yapısının içerisine ince gümüş tozlarının biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda, yüksek konsantrasyonlu gümüş çözeltileriyle uzun süreli yapılan kaplama metotları kullanılmaktadır. Bu bağlamda düşük gümüş konsantrasyonlu ve kısa süreli kaplama yöntemleri kullanılmamaktadır [22].

Alümina (Alüminyum Oksit-Al_2O_3) alüminyumun oksitlenmiş halidir. Doğal alümina özellikle feldispat, silikat ve killerde bulunmaktadır. Boksit ise, diaspor, kriyolit, suliminat,

kyait, nefelit gibi minerallerde bulunmaktadır. Alüminanın bilimsel keşfi 20. Yüzyılda olmuştur. 1907'de bir patentle ilk ticari kullanımına başlanılmıştır. Yaygın olarak kullanımı ise 1920-1930 yıllarına kadar yapılamamıştır. İlk olarak kullanımı otomobil bujileri ve tıbbi laboratuvar malzemeleri olmuştur. Günümüzde kullanım alanları oldukça geniştir. Özellikle yüksek sıcaklık fırınları, kesici takımları, dişli ve yatak malzemeleri, tekstil endüstrisi, zırh yapımı, tıbbi implant ve protezler genel kullanım alanlarıdır. Alümina malzemeler slip döküm, ekstrüzyon, enjeksiyon, soğuk ve sıcak pres yöntemleriyle şekillendirilmektedir. Şekillendirmede polivinil, alkol, reçine, mum, lateks vb. bağlayıcı maddeler kullanılmaktadır. Alümina, asit ya da baz ilavesiyle defloküle su süspansiyonunda slip döküm işlemiyle de üretilmektedir. Çok ince haldeki toz ve saf alümina ise ancak sol-gel yöntemiyle üretilmektedir [23].

Alümina, yeryüzünde en çok kullanılan oksit maddeleri arasında yer almaktadır. Alümina üretiminin %90'dan fazlasını yüksek saflıktaki üretimin yapıldığı Bayer teknolojisi oluşturmaktadır. Hammadde olarak genellikle gibsitik ve böhmitik boksitler, nadir olarak da diyasporitik boksitler kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmelerle kil, kaolen, nefelin, alünit, şeyl gibi hammaddelerden de alümina üretilebileceği görülmüştür. Buna karşın daha ekonomik olması sebebiyle alüminyum sanayisinde hali hazırda boksit hammaddesi rakipsiz durumdadır. Günümüzde Bayer Prosesi ile boksit kullanılarak üretimi yapılan alüminanın yaklaşık %93'ü metalurjik alüminadır. Bazı Bayer Prosesi ile üretim yapılan tesislerde alüminyum üretimi için kullanılan alümina, özel alümina kimyasallarına ve kalsine alüminaya dönüştürülmektedir. Bu özellikteki alüminaların temel özellikleri Bayer Prosesi ile üretilen alüminayla aynıdır. Alüminyum metali üretimi haricindeki amaçlar için kullanılan alüminyum hidroksit ve alümina ürünlerine ise özel alümina adı verilmektedir. Arıtma işleminden geçtikten Boksit, sinterleme ve kombinasyon işlemlerinden sonra iki şekilde kullanılmaktadır. Bunlar ya alüminyum üretimi için kullanılmakta ya da çeşitli işlemlerden geçerek alüminyum hidroksit, aktif alümina ve kalsine alüminalara dönüştürülmektedir [24].

Seramik maddeler katı maddelerin en serti durumundadır. Alümina ve silisyum karbür (SİC) bu özellikleri nedeniyle en yaygın aşındırıcılardır. Aşındırıcı olarak kullanılan bu seramik malzemelerin sertlik değerleri alaşımlarla oluşturulmuş malzemelerden daha yüksektir. Bu durum yüksek sıcaklıklarda da seramik malzemeler lehine olmaktadır. İleri teknoloji

seramikler fonksiyonlarına göre elektriksel, mekaniksel, termal, kimyasal, optik, manyetik, biyolojik ve nükleer olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlardan en çok mekaniksel ve termal olanlar öne çıkmaktadır. Malzeme çeşidine göre ise oksit ve oksit olmayan olarak gruplandırılmaktadırlar. Oksit maddeler tekli veya çoklu olabilmektedir. Oksit olmayanlar ise; karbürler, nitrürler ve borürler'dir [25].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri

“Kompozit” terimi, sürekli bir fazda (matris) dağılarak, her birinin ayrı özelliklerinin birleşimiyle yeni yapının ayırt edici özelliklerinin belirlendiği bir malzeme sistemi olarak ifade edilmektedir. Kompozit malzemeler genel olarak, matris fazının temel fiziksel veya kimyasal yapısına göre sınıflandırılırlar. Örneğin polimer matrisi, metal matrisi ve seramik kompozit matrisler gibi. Bu gelişmiş malzemelerin yanında, Intermetallic-Matrix ve Carbon-Matrix Kompozitler de üretilmeye başlanmıştır. Alüminyum Metal Kompozitlerinde kurucu maddelerden birisi alüminyum ya da alüminyum alaşımı olup, matris fazı olarak adlandırılmaktadır. Diğer bileşenler alüminyum ya da alaşımlarının matrisine gömülü durumdadır. Genellikle metalik olmayan SiC ve seramik olan Al_2O_3 takviye görevi görmektedir. AMK'lerin takviyeli olmayan malzemelere nazaran temel avantajları aşağıdaki gibidir [26];

- Daha fazla güçlü olmaları,
- Geliştirilmiş sertlik değerleri,
- Düşük yoğunluk (ağırlık) miktarları,
- Geliştirilmiş yüksek sıcaklık değerleri,
- Kontrollü termal genleşme katsayıları,
- Termal / ısı yönetimleri,
- Özel elektrik performansları,
- Geliştirilmiş aşınma ve aşınma dirençleri,
- Kütle kontrolü özellikleri,
- Geliştirilmiş sönümleme yetenekleri.

AMK malzemeler, günümüzde mevcut hiçbir tek yapılı malzemenin sahip olmadığı üstün özellikler kombinasyonu sunmaktadırlar. Uzun yıllardır, AMK’ler değişik birçok mühendislik alanının yapısal ve işlevsel uygulamasında denenerek kullanılmıştır. Bu sektörlerde AMK’lerin kullanımı için, performans, ekonomiklik ve çevresel fayda unsurları itici güç olmaktadır. AMK’lerin otomotiv sektörüne sunduğu en önemli katkıları, düşük yakıt tüketimi, daha az gürültü ve hava emisyonu uygulamalarında görülmektedir. Çevreyi

korumaya yönelik yeni düzenlemeler ve yakıt ekonomisine yapılan vurgu nedeniyle otomotiv sektöründe AMK kullanımının önümüzdeki dönemlerde de kaçınılmaz olarak devam edeceği düşünülmektedir. AMK'lerin, gelecekte çeşitli uygulamalar ile alüminyum, demir ve titanyum alaşımları ile polimer bazlı kompozitler dahil olmak üzere monolitik malzemeleri ikame etmeleri hedeflenmektedir [26].

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin istenen özellikleri sağlayabilecek şekilde makro seviyede birleştirilmesi neticesinde elde edilen yeni ve teknolojik malzemelerdir. Makro düzeyde yapılan yapısal tanımlamaya göre kompozit malzemelerin temel karakteristikleri bulunmaktadır. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin her biri çoğu zaman kimyasal olarak farklı olmaktadır. Esasen kompozit malzemeleri oluşturan bileşenler birbirleri içerisinde çözülmemektedir. Kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenler yapı içerisinde kendi özelliklerini korumaktadır. Hatta fiziksel olarak belirlenebilir durumdadırlar ve bileşenler arasındaki ara yüzey (boşluk) kolaylıkla gözlenebilmektedir. Kompozit malzemeler genellikle, matris malzemesi ve takviye edici (güçlendirici) malzeme olmak üzere iki etmenden meydana gelmektedirler. Kompozit malzeme üretimi ile aşağıda belirtilen özellikler geliştirilebilmektedir [27];

- Dayanım (sertlik),
- Yorulma ömrü,
- Korozyon direnci,
- Sıcaklığa bağlı davranış,
- Aşınma direnci,
- Isı yalıtımı,
- Estetik özellik,
- Isıl iletkenliği,
- Ağırlık (hafiflik),
- Ses yalıtımı,

Yukarıda ifade edilen avantajların tamamını aynı anda gerçekleştirmek çok zor olmaktadır. Uygun matris ve takviye malzemesi seçiminin, yeni malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine büyük etkisi bulunmaktadır. Çünkü yükün kompozit malzeme içerisinde yer alan matris tarafından takviye elemanına aktarılması esnasında matris ile takviye

malzemesi arasında bulunan yüzey bağının kuvvetli olması zorunludur. Ara yüzey bağlantısının kuvvetli olması malzeme çiftinin uyumuna ve matrisin özelliğine bağlıdır. Ayrıca, takviye elemanlarının matris yapı içinde homojen dağılımı ve üretim yöntemi de malzeme çiftlerinin uygun bir şekilde seçilmesine bağlıdır. Kompozit malzemelerin Tüm avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar aşağıda verilmiştir [28];

- Üretimlerinin güç ve pahalı olması,
- İşlenme problemleri
- Gerekli yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesindeki güçlük,
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümlerinin yapılamaması,
- Kırılma uzamasının az olmasıdır.

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Günümüzde malzemelerle ilgili kabul edilen en yaygın sınıflandırma yöntemleri malzemelerin; yoğunluğuna, ergime sıcaklığına, mukavemetlerine, sertliğine vb. temel özellikler dikkate alınarak 3 ana başlıkta toplanmıştır. Bunlar metal malzemeler, plastik malzemeler ve seramik malzemelerdir. Bu malzemelerin birleşilmesiyle elde edilen kompozit malzemeler ise bir üst malzeme grubuyla anılmaktadır. Bu malzemelerin bazı özellikleri birbirlerine benzemekte ya da örtüşebilmektedir [29].

Özellikleri, avantaj ve dezavantajları, üretim metotları ve kullanım alanları kompozitleri belirli başlıklar altında gruplanmasına neden olmaktadır. Kompozitlerle ilgili iki genel sınıflandırma türü bulunmaktadır. Bu gruplandırma kompozit yapısını oluşturan malzemeye göre veya kompozit malzeme yapım yöntemine göre olmaktadır. Yapım yöntemine göre sınıflandırma, farklı özellikler gösteren kompozit malzemelerin aynı alt başlıkta yer almasına sebep olmaktadır. Bu nedenle kompozit malzemeler genellikle kullanılan matris malzemelerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu şekilde sınıflandırma ise; polimer matrisli kompozit malzemeler, metal matrisli kompozit malzemeler ve seramik matrisli kompozit malzemeler şeklinde olmaktadır [27].

3.2.1. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimerler çok karmaşık yapıdaki malzemelerdir. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla işlenebilir malzemelerdir. Diğer taraftan düşük elastik yapıları ve düşük kullanım sıcaklıkları bulunmaktadır. Polimer matrisler termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki gruba ayrılmakta ve genellikle sürekli fiberlerle kullanılmaktadır. En önemli PMK malzemeleri "sürekli fiberlerle takviye edilen polyester" ve "epoksi reçine matrislerdir". Epoksi reçine matrisli kompozitlerin önemli uygulama alanlarından birisi havacılık teknolojileridir. PMK malzemelerin kullanıldığı ortamlarda dikkat edilmesi gereken önemli faktörler sıcaklık ve nemdir. Özellikle bu iki faktörün birlikte etkili olduğu ortamlarda PMK'lerin mekanik özelliklerindeki "hidrotermal" etkiler nedeniyle kapasite düşüşleri meydana gelmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok kullanılanlar; elle sıvama, telle sarma, kese kalıplama, sıvı akış, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve ısıl oluşum yöntemleridir. Polimerlerde kullanılan takviye elemanlarından en önemlileri; cam fiber, kevlar fiber, karbon fiber ve bor fiberlerdir [29].

Polimer matrisli kompozitlerin üretimi, takviye malzemesinin doğru yöntemler kullanılarak matris malzemesine karıştırılması ve uygun atmosfer ve sıcaklıkta polimer temelli matris malzemesinin kürleşerek sertleşmesi esasına dayanmaktadır. Üretilecek ürünün kalitesi "polimerizasyon" adı verilen bu işlemde, basınç, sıcaklık ve zamanın uygun biçimde ayarlanmasına bağlı olmaktadır. Ayrıca, metal matrisli kompozitlerde olduğu gibi matrisin, takviye malzemesini yeteri kadar "ıslatabilmesi" ve takviye malzemesinin matris içerisinde doğru biçimde yapılandırılmış olması üretim bakımından dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Üretim teknikleri açık ve kapalı kalıpla üretmek olarak ikiye ayrılan polimer matrisli kompozitlerde, "el yatırma yöntemi" ile "püskürtme yöntemi" yaygın olarak kullanılan açık kalıpla üretim yöntemleridir. Pres veya transfer kalıplama, infüzyon, vakumla veya otoklavda kalıplama, filament sarma, pultruzyon, santrifüj, reaksiyonlu veya reçine enjeksiyon yöntemleri ise kapalı kalıpla üretim yöntemlerindendir. Görüldüğü üzere polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, çok çeşitli ve teknik açıdan belirli bir seviyeye ulaşmıştır. Metal ve seramik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri ise halen gelişim aşamasında bulunmaktadır [30].

Metal malzemelerin yanında seramik, cam ve polimerler malzemeler de gelişim göstermiş ancak, 1900'lerin ilk yarısına kadar üretimleri düşük düzeylerde kalmıştır. 1960'tan sonra dökme demir ve çelik gibi metal alaşımlardaki gelişim hızı yavaşlamış, diğer taraftan polimer ve kompozit sektöründe hızlı gelişimler yaşanmıştır [31].

3.2.2. Metal matrisli kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitlerde genellikle matris malzemesi olarak hafif metaller kullanılmaktadır. Bu tür kompozitlerde matris malzemesi olarak, alüminyum ve alaşımlarının kullanımı ilk sırada gelmektedir. Bu alaşımların tercih edilmesinin sebebi düşük yoğunluklarının ve düşük ergime sıcaklıklarının olmaları ve çoğu seramik takviye elemanıyla kolaylıkla işleme girebilmeleridir. Metal matrisli kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye elemanları ise Al_2O_3, SiC, B_4C, TiC ve karbondur [27].

Kompozit malzemeler takviye elemanının ismiyle anılmaktadır. Örneğin sürekli fiber ile güçlendirilmiş ise, sürekli fiber takviyeli MMK ya da kısa fiberler ile güçlendirilmiş ise kısa fiber takviyeli MMK malzemeler olarak adlandırılmaktadır Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak sürekli ve süreksiz (kısa) fiberler ile partiküller kullanılmaktadır [32].

MMK malzemelerin, yerlerine kullanıldıkları metal ve diğer bazı malzemelere nazaran küçümsenmeyecek üstünlükleri bulunmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemeler [27];

1. Yüksek elastik modüle sahiptirler,
2. Çekme, basma, aşınma, sürünme açısından yüksek mukavemet göstermektedirler,
3. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler,
4. Metallerde bulunan süneklik ve tokluk ile seramiklerde bulunan yüksek mukavemet özelliklerini birleştirirler,
5. Tekrar üretilebilir özellikleri bulunmaktadır,
6. Düşük yoğunluk değerleri vardır,
7. Sıcaklık değişiklikleri ya da ısıl şoklara karşı dayanıklıdırlar,
8. Yüksek yüzey dayanıklılığı ve yüzeydeki dalgalanmalara karşı düşük hassasiyetleri vardır,
9. Yüksek elektrik ve ısı iletkenlik değerleri vardır.

Kompoziti oluşturan önemli elaman matris malzemesidir. Matris kompozitin birçok özelliğini üzerinde taşımaktadır. Kompoziti oluşturan en önemli eleman olan matrisin takviye malzemesini bir arada tutmanın dışında birçok kritik görevi bulunmaktadır. Birçok takviye elemanı gevrek ya da kırılgan yapıdadır. Matris malzemesinin takviyelerin yüzeylerini kazıma aşınması gibi çatlaklara neden olan dış ve çevresel etkilere karşı korumakta ve dirençlerini arttırmaktadır. Kompozit malzeme üzerine yüklenen yükü ise takviye elemanı homojen olarak dağıtmakta ve kompozit içerisindeki hata riskini de azaltmaktadır. Metal matrisli kompozitler genel olarak iki bileşenden meydana gelmektedir. Bunlardan birisi metal matris ya da bir metal alaşım diğeri ise metaller arası bir bileşik oksit, karbür ya da nitrür olan takviye malzemesidir. Kompozitin üretilmesinde matris ve takviye malzemesi beraber karıştırılmaktadır. Bir kompoziti elde etmek için önce farklı elemanlar metal matris ve takviye malzemesi olarak seçilmektedir. Matris olarak saf metalin kullanılması nadir olarak görülmektedir. Çoğunlukla matris bir metal ya da metal alaşımı olmaktadır [29].

Metal matrisli kompozitler yüksek elastik yapıya, yüksek çekme-basma ve kayma mukavemetine, yüksek hizmet sıcaklığına sahiptirler. Ayrıca, metallerin süneklik ve tokluğunu, seramiklerin ise yüksek mukavemet ve elastik modül özelliklerini birleştirmeleri sebebiyle son derece önemli bir mühendislik malzemesi olmuşlardır. Bu üstün özelliklerinin yanında tekrar üretilebilir mikroyapı, mekanik özellikler ve düşük yoğunluk değerleri ile giderek artan bir önem kazanmışlardır. İhtiyaç duyulan takviye seramik malzemelerde yüksek elastik modül, düşük yoğunluk, yüksek ergime sıcaklığı ve düşük ısıl genleşme katsayısı aranan özelliklerdir. MMK malzemelerin en önemli özelliklerinden birisi matris alaşımlarına oranla daha yüksek ısı barındıran sistemlerde kullanılmalarıdır. Seramik takviye malzemesi ilavesi ile matris alaşımının yüksek sıcaklık mukavemetinin arttığı sonucu elde edilmiştir. MMK malzemelerin diğer bir avantajı da seramik takviye malzemesinin düşük yoğunluğu nedeniyle elde edilen kompozitin yoğunluğunun düşük olmasıdır [27].

Metal matrisli kompozit malzemeler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özelliklerin geliştirilmesi amacıyla, bir metal matris içine sürekli ya da kısa fiber, whisker ya da partikül şeklindeki takviye fazı eklenmesiyle oluşmaktadır. Günümüzde üç tür metal matrisli kompozit malzeme üretilmektedir. Bunlar [33];

- Elastik modülün, belirli oranda mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bağlayıcı matris içine partikül şeklinde takviye malzeme ilave edilmesiyle oluşturulan “partikül takviyeli” metal matrisli kompozitler.
- Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlere oranla daha büyük yük iletim yeteneği bulunan, yüksek dayanımlı “whisker” ya da “kısa fiber takviye” metal matrisli kompozitler.
- Yüksek performansı bulunan fiberin tüm özelliklerini barındıran “sürekli fiber” esaslı metal matrisli kompozitler.

Kompozit sistemlerinin her birinin ayrı üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Örneğin, partikül esaslı metal matrisli kompozitlerin düşük maliyetli olmaları ve sertliklerinin oldukça iyi seviyede olmasının yanında, yüksek oranda izotropik özellikler de göstermektedirler. Ancak, mukavemet alanındaki gelişmeleri sınırlı kalmıştır. Ayrıca kopma esnasındaki şekil değişiminin ve kırılma tokluk seviyesinin düşük olması bu tür kompozitlerin zayıf yönünü oluşturmaktadır. Whisker ya da kısa fiber katkılı metal matrisli kompozitler ise partikül esaslı kompozitlere nazaran daha pahalı, ancak daha dayanıklıdırlar. Sürekli fiber katkılı metal matrisli kompozitlerle, elastik özelliğin ve dayanıklılığın en iyi kombinasyonunun sağlanmasına karşın, bu kompozitlerin özellikleri anizotropiklik göstermekte ve kullanılmaları yönündeki zayıflık olarak, üretim maliyetlerinin yüksek ve kullanılan fiberlerinde oldukça pahalı olmasından kaynaklanmaktadır [33].

Belirli bir mühendislik uygulamalarında kullanılmak için en uygun kompozit malzemeyi üretebilmek amacıyla metal matrisli kompozitleri oluşturan bileşenlerle ilgili tam ve detaylı bilgilere sahip olunması gerekmektedir. Matris malzeme üretiminde kullanılacak takviye elemanıyla ilgili; cins, şekil, boyut, dağılım, yüzey özelliği, kimyasal yapı, dağılım miktarı, homojenlik gibi özgün ve yapısal özellikler çok önemlidir. Bütün bu özelliklerin yanında, ana eleman olan metal matrisin de nitelikleri amaca uygun olmalıdır. Kompozit malzemedeki Matris formu, takviye fazını bir arada tutmayı sağlayan bağlayıcı eleman gibi davranmakta olup, asıl işlevsel fonksiyonu katkı fazına yükü aktarmaktır. Yapıda bulunan takviye fazı ile matris alaşımının kimyasal olarak uyumlu olması da önem taşıyan bir konu olmaktadır [34].

Metal matrisli kompozitlerin üretim işlemleri, sıvı ve katı hal üretim yöntemleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin sıvı hal üretim uygulamalarında; genel olarak seramik parçacıklar farklı yöntemler kullanılarak matris malzemesine ilave edilmektedir. Metal matriksli kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak seçilen seramik malzemelerin ıslatılabilirlik gibi özellikleri önem taşıyan husustur. Seramik özellikteki birçok takviye malzemesinin eriyik içerisinde metal matris tarafından yeteri kadar ıslatılamaması sebebiyle, üretim süreci içerisinde bir ön işleme tabi tutulmalıdır. Metal matriksli kompozitlerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan teknikler şu şekildedir; sıvı metal emdirmesi tekniği, sıkıştırmalı döküm ya da dövme döküm tekniği, basınçlı infiltrasyon yöntemi, sıvı metal karışımı yöntemi, yarı katı karıştırma tekniği, plazma püskürtme tekniği, toz metalürjisi tekniği ve sıcak presleme tekniğidir [35].

Alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler

Günümüzde alüminyum matrisli kompozitler üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardaki amaç hafif ve üstün özellikleri bulunan malzemeler elde etmektir. Alüminyumun hafif bir metal olması sebebiyle bu tür kompozit malzeme araştırmalarında en çok kullanılan madde olmaktadır. Alüminyum metaline katılan SiC, TiC, Al_2O_3 vb. parçacıklar ile kompozit malzemenin çekme dayanımı, elastiklik değeri, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanımı gibi özellikleri istenilen seviyede geliştirilmektedir [35].

Alüminyum üşütün özellikleri sebebiyle, Metal Matrisli Kompozit (MMK)'lerde en yaygın kullanılan matris malzemesidir. Alüminyum alaşımlarının; düşük yoğunlukları, yüksek dayanıklılıkları, yüksek korozyon dayanımları, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri, kolay işlenebilirlikleri ve tedariklerinin de kolay olması sebebiyle, rekabet içinde olduğu diğer malzemelere oranla avantaj sağlamış ve gelişmiş uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum (Al) alaşımlarının yukarıda ifade edilen özellikleri, alüminyum matrisli kompozitler (AMK)'in içinde yer alan takviye malzemelerinin oranları değiştirilerek artırılabilmektedir. AMK'ler, günümüzde ağırlıklarının düşük olması, yüksek mukavemetlerinin ve üstün aşınma özelliklerinin bulunması sebebiyle birçok mühendislik uygulamasında kullanılan en teknolojik malzemeler olmuştur. AMK'ler, içinde barındırdıkları takviye malzemesinin geometrisine göre çeşitli gruplara ayrılmaktadır.

Alüminyum Matrisli Kompozit malzemeler genel olarak aşağıda belirtilen şekilde gruplandırılmaktadırlar [36];

- Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler,
- Visker ya da Kısa Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler,
- Sürekli Fiber Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler,
- Monofilament Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler.

Partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler: Partikül Takviyeli AMK'ler genellikle eşit eksene sahip seramik takviye malzemeler içermektedir. Bu tür kompozit malzemelerin üretimi için genellikle oksit, karbür veya borür kullanılmaktadır. Bu tür AMK'ler yapısal dayanım veya aşınma dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanıldıklarında %30 düzeyinde hacim oranıyla bulunmaktadırlar. Hem katı hem de sıvı durumda işlenerek üretilebilirler. Sürekli Fiber Takviyeli AMK'lere oranla üretim maliyetleri daha düşüktür. Mekanik özellikleri Visker, Kısa Fiber ve Sürekli Fiber Takviyeli AMK'lere oranla daha düşük, ancak takviyesiz alüminyum alaşımlarına oranla daha yüksektir. Ayrıca izotropik özellikler sergilemektedirler. Ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi ikincil şekillendirme işlemleri kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Visker/kısa fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler: Visker takviyeli kompozitler, toz metalurjisi ya da infiltrasyon yöntemleriyle üretilmektedir. Visker takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, partikül ve kısa fiber takviyeli kompozitlere oranla oldukça iyidir. Kısa fiber takviyeli AMK'ler, sürekli fiber ve partikül takviyeli AMK'lerin arasında değerlerde karakteristik özellikler göstermektedir.

Sürekli fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler: Sürekli Fiber Takviyeli AMK'lerde, çapı 20 μm'den küçük sürekli çubuk formunda takviye malzemeleri (Al_2O_3, SiC veya C) kullanılmaktadır. Fiberler, paralel şekilde ya da örgü formunda olmaktadırlar. Sürekli fiber takviyeli AMK'ler, üretim tekniğine göre %40 oranında hacme sahip olmaktadırlar.

Monofilament takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler: Monofilament Takviyeli AMK'ler, geniş çapta (100–150 μm) fiberlerden oluşmaktadırlar. Bu tür kompozitler Kimyasal Buhar Çöktürme (CVD) tekniğiyle üretilmektedir. Esneklikleri diğer türlere oranla daha düşüktür.

Kompozit malzemelerin üretim aşamalarından olan sinterleme işlemi sırasında Alumina oksiyen iyon hareketliliğine duyarlı iyonik bir bileşiktir. Bu malzemenin mikron seviyesindeki toz tanecikleri tam yoğun özelliklere sade hava veya hidrojen basıncı altında sinterlenerek ulaşmaktadır. Tam saydam yapısı ise genellikle 1600- 1700 ^{0}C sıcaklıklarda ve kuru hidrojenle basınçlandırılmasıyla elde edilmektedir. Tane boyutu, süre, sıcaklık, presleme yoğunluğu, katkı malzemeleri ve ısıtılma hızı gibi değişkenler sinterleme işleminde çok önem arz etmektedir. Ayrıca, %1 civarında MgO ya da NiO bileşiminin katkı maddesi olarak eklenmesiyle sinterleme işleminde tane büyümesi engellenebilmektedir [37].

3.2.3. Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler, metal ve metal olmayan elementlerin birleşiminden meydana gelen inorganik malzemelerdir. Düşük yoğunlukları, 2000°C ve üzeri yüksek sıcaklıklarda çalışabilmeleri ve yüksek elastik modül yapıları olması sebebiyle, matris malzemesi olarak seçilmeleri yönündeki önemli faktörlerdir. Fakat gevrek formlarının olması bu malzemeleri darbe ve şoklara karşı oldukça dayanıksız yapmaktadır. Seramiklerin kırılabilir yapılarının haricinde, özellikleri de değişkenlik gösterebilmektedir. Gerilme dayanıklığının düşük olması ile mekanik ve termal şoklara karşı hassaslıkları bu malzemelerin dezavantajları arasındadır. Seramik yapıda oluşabilecek çatlaklar, çizikler, içeride kalmış olabilecek mikro çatlak ve hava kabarcıkları bile ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu sebeple seramik matrisli kompozitlerle ilgili son yıllardaki çalışmalar, dayanıklığı artırılmış seramik kompozitlerin üretilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Seramiklerin takviye malzemeleriyle güçlendirilmeleriyle kullanım çeşitliliği yaygınlaşmış durumdadır. Seramik matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanları sürekli ve süreksiz fazlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sürekli fiberle takviye edilen seramiklerin tokluk değerlerinin daha iyi olması sebebiyle daha fazla tercih edilmektedir. En çok kullanılan seramik matrisli kompozit malzemeler aşağıdaki şekilde gruplanabilir [32]:

- Karbürler (Silisyum karbür - SiC vb.)
- Nitrürler (Silisyum nitrür - Si3N4 vb.)
- Oksitler (Alümina mullit - Al6Si2O13 vb.)
- Cam seramikler (lityum alüminasilikat vb.)

Seramik matrisli kompozitlerin içerisinde "karbon matrisli" olan türlerin ayrıca incelenmesinde fayda bulunmaktadır. Karbon, kompozit malzemelerde genellikle yine karbon elemanla takviye edilmekte ve karbon-karbon kompozit malzemeler oluşturulmaktadır. Karbon-karbon kompozit malzemelerin 2200°C'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanması ve bu sıcaklıklarda ilave dayanım kazanması özelliği nedeniyle diğer seramik matrisli kompozit malzemeler arasında ön plana çıkarmaktadır. Karbon-karbon kompozit malzemeler, ayrıca yüksek yorulma dayanıklığına ve boyutsal kararlılığa sahiptirler. Yüksek sıcaklıklara dayanabilmeleri ve özgül ağırlıklarının düşük olması nedeniyle özellikle roket motorlarında ve uzay mekiklerinde tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Yüksek sıcaklık uygulamalarının haricinde, karbon maddesinin kimyasal ve biyolojik açıdan inert olması ve insan bedeninde steril olarak kalabilmesi nedeniyle değişik tıp uygulamalarında kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik ya da benzeri alaşımlardan daha iyi bir şekilde korozyona ve kimyasallara karşı dayanabilmelerinden dolayı, günümüzde tıbbi cihazlarda implant olarak tercih edilmektedir. Ancak, karbon-karbon kompozit malzemelerin üretim maliyetleri çok yüksek olmaktadır [38].

Seramik matrisli kompozitlerin bir başka alt türü olan beton kompozitler ise yapı malzemeleri olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Sanayi atıklarından elde edilen malzemelerin beton malzemeyle karıştırılmasının yanında, ahşap, cam, polimer vb. malzemelerin de takviye edilmesiyle üretilen yüksek teknolojili beton kompozitler inşaat sektöründe farklı uygulamalarla ön plana çıkmaktadır. Özellikle cam materyallerin ilave edilmesiyle elde edilen beton, istenilen renkte, değişik doku ve formlarda üretilebilmektedir. Düşük ağırlıkları, ekonomik olmaları, pozitif yanmazlık ve akustik özellikleri sayesinde de demi takviyeyle yapılan betona karşı üstünlük sağlamaktadır. Seramik matrisli kompozit malzemelerin diğer kullanım alanları arasında yüksek sıcaklıklarda çalışan türbin motorları, ısı dönüştürücüler, otomobil fren diskleri, motor izolasyon parçaları, egzoz valfleri, yüksek korozyon dayanıklığı gerektiren endüstriyel uygulamalar ve askeri tanklarda kullanılan zırh sistemleri gösterilebilir [36].

Takviye elemanlarıyla güçlendirilen polimer malzemeler kompozit ürün olarak yaygın şekilde kullanılsa da, hidrokarbon formlarının doğasından dolayı bu tür malzemeler yüksek sıcaklıkların olduğu ortamlarda çalışamamaktadırlar. Yüksek sıcaklığın bulunduğu uygulamalarda polimer matrisli kompozit malzemeler yerine metal matrisli kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Seramik matrisli kompozitler ise hafiflikleri ve yüksek oksidasyon dirençleri nedeniyle metal matrisli kompozitlere iyi bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadırlar. Seramik malzemelerin sert ve kırılgan yapıları nedeniyle, düşük toklukları bulunmakta ve çok düşük kopma uzamasına sahip olmaktadırlar. Bu duruma rağmen çok yüksek elastiklik modüllerine sahiptirler ve çok yüksek sıcak ortamlarda çalışabilmektedirler. Termal şoklardan da kolaylıkla etkilenebilen malzemeler durumundadırlar. Sürekli veya süreksiz takviye malzemeleriyle güçlendirilen seramiklerde kullanılan takviye malzemelerinin çeşitleri, malzemelerin özelliklerinde olduğu gibi üretim tekniklerinde de belirleyici rol oynamaktadır. Seramik matrislerin üretimine yönelik yaygın olarak kullanılan yöntemleri arasında; şerit-bant döküm metodu, eriyik matris sıcak presleme metodu, enjeksiyon metodu, kimyasal buhar kaplama ve sızdırma metodu, toz metalürjisi teknikleri ve kimyasal reaksiyonla bağlama yöntemleridir [39].

3.3. Kompozit Malzemelerin Üretimi

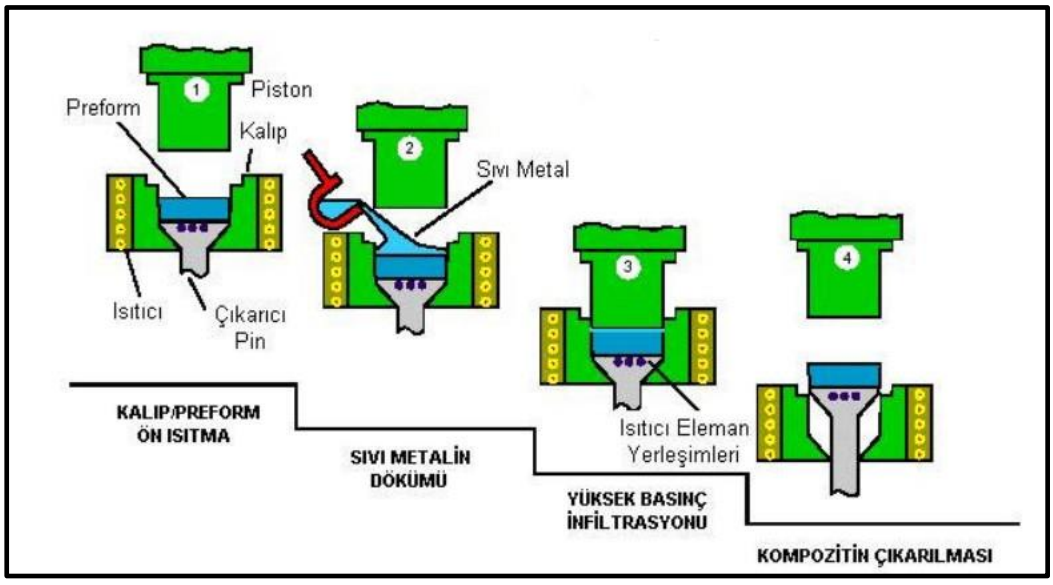
Her malzemenin kimyasal, fiziksel, mekanik kabiliyetleri ve üretilme yöntemi birbirinden farklı olmaktadır. Bu sebeple bir malzemenin bir ürüne dönüştürülmesi için, o malzemeye uygun üretim tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Bir malzemenin üretimi için uygun olan metot bir başka malzemeye uymayabilmektedir. Kompozit malzemelerin iki veya daha çok malzemenin bir araya gelmesiyle oluşması sebebiyle, bu malzemelerin üretim yöntemleri de farklı olmaktadır. Örnek olarak; metaller talaşlı işlemeye elverişlidir. Buna karşın, kompozit malzemelerin içinde bulunan takviye malzeme talaşlı işlemden zarar görebileceği için bu üretim yöntemine uygun olmamaktadır [61]. Kompozit malzemelerin metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli olmak üzere alt gruplara ayrılması sebebiyle, her grubun üretim metodu değişik olmaktadır [22].

Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerini üç ayrı başlık altında incelense de tüm kompozit malzeme türlerinde dolgu ve takviye elemanları, üretilmesi arzu edilen parça veya ürüne uygun olarak seçilmelidir. Bu seçimin, uygun bir mikro yapısal kalite ve makul üretim maliyetlerini taşıması gerekmektedir. Ayrıca, ürüne uygun doğru üretim tekniğinin

belirlenmesinde üretim miktarı, ürünün boyu, şekli ve üründen beklenen performans önemli rol oynamaktadır. Özellikle polimer kompozitlerin üretim teknikleri, teknik anlamda belirli bir seviyeye ulaşmış, ancak metal ve seramik matrisli kompozitlerin üretim teknikleri halen gelişmeye devam etmektedir [30].

3.3.1. Sıkıştırmalı veya sıvı dövme döküm

Sıkıştırma döküm yöntemi, Alüminyum Matrisli Kompozit malzemelerin üretiminde çok kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, metal malzemenin atmosfer şartları altında katılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu sayede hemen hemen her çeşit takviye malzemesi kullanılarak kompozit malzeme üretiminin gerçekleştirilebileceği belirtilmektedir. Ayrıca, sıkıştırma döküm yöntemiyle, basınçlı döküm ve şekillendirme prosesleri birleştirildiğinde, nispeten daha düşük maliyetli ve yüksek üretim hızında üretim sağlanabileceği ifade edilmektedir. Geliştirilen bu yöntem sayesinde arzu edilen seviyede yüzey özellikleri elde edilebilmektedir [40].



Şekil 3.1. Sıkıştırmalı sıvı döküm yöntemi [35]

Sıkıştırma döküm tekniğinde, takviye amacıyla kullanılan malzeme bir kalıp içerisine yerleştirilmekte ve döküm sıcaklığına çıkarılan sıvı metal belirli bir sıcaklıkta ısıtılan partikül veya fiber takviye malzemesi üzerine dökülmektedir. Daha sonra, katılaşma gerçekleşene kadar sıvı metal üzerine yüksek miktarda basınç uygulanmaktadır (Şekil 3.1.). Basınçla katılaştırma yapılarak takviye malzemesi ile matris metal arasında arayüzey bağ

dayanıklığının oldukça iyi seviyede gerçekleştiği belirtilmektedir. Katılaşma süresince uygulanan basınç dolayısıyla ince taneli, porozitesiz ve pürüzsüz yüzeyleri olan malzemeler elde edilmektedir. Bu işlemde yüksek basınca ihtiyaç duyulduğundan, parçanın ebatları sınırlayıcı bir etkendir. Diğer bir husus ise, yine yüksek basınç sebebiyle takviye malzemelerine mekanik olarak hasar verme riskinin olmasıdır. Üstün mekanik özellikler verecek sağlam bir yapı elde etmek amacıyla ergimiş durumdaki malzemeyle ilgili ön ısıtma sıcaklığı ve aşırı ısınma gibi parametreler kontrol altında tutulmalıdır. İdeal parametrelerin belirlenmesi; analiz, simülasyon, infiltrasyon ve katılaşma süreçlerinin modellenmesi ile sağlanmaktadır. Laboratuvarlardan sanayiye kadar, sıkıştırma döküm işlemlerinde, darbe kontrollü ve basınçlı döküm makineleri ile kompleks Alüminyum Matrisli Kompozit malzemelerin dökümleri başarıyla yapılmaktadır [35].

3.3.2. Sıvı metal emdirmesi

Alüminyum Matrisli Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemlerden biri sıvı infiltrasyon yöntemidir. Bu yöntem, sürekli fiber ya da kısa fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılmasının yanında, partikül takviyeli AMK'lerin üretim işlemlerinde de etkili sonuçlara ulaşılmaktadır. Diğer birçok üretim yönteminin yanı sıra, sıvı infiltrasyon yönteminin tercih edilmesinin ana nedenleri arasında yöntemin verimli olması, düzgün şekilli parçaların üretilmesine olanak tanıması ve yüksek üretim kalitesiyle ön plana çıkmaktadır. Sıvı infiltrasyon yöntemi, inert bir gaz kullanılarak ilk kez ALCOA şirketi tarafından denenmiştir. İlk çalışmalarda, vakum altında çalışan bir fırın kullanılarak, tabanında seramik bir preform bulunan bir potaya sıvı metal dökülmekte, üzerine de inert bir gazla basınç uygulanarak infiltrasyon gerçekleştirilmektedir. Daha sonraki yıllarda ise özellikle MIT (Massachusetts Institute of Technology)'de gerçekleştirilen araştırmalarda, infiltrasyon işlemindeki değişkenlerin ayrıntıları araştırılmış ve yöntem daha da geliştirilmiştir. Ayrıca, sürecin kontrol aşamaları, üretim ve katılaşma ortamına göre kompozit malzemenin nihai özelliklerinde yaşanan değişimler araştırılmıştır. Sıvı infiltrasyon tekniğiyle AMK üretiminde karşılaşılan önemli dezavantajlar [41];

a) Birbirine çok yakın durumdaki fiberler nedeniyle çok küçük boşluklara metalin ulaşamaması,
b) Fiber/matris arayüzeyinde arametal bileşiklerin meydana gelmesi,

c) Bazı durumlarda fiberlerin matris içinde homojen dağılımlarının bozuk olması şeklinde sıralanabilir.

İnfiltrasyon işleminin, mümkün olan en kısa sürede tamamlanması gerekmektedir. Bu sonuca ancak haricen uygulanan basıncın, seramik preform içindeki fiberlerin arasında kalan kılcal (kapiler) basıncı yenebilecek seviyede yüksek olarak seçilmesiyle sağlanabilmektedir. Ancak, infiltrasyon metodunda kompozit malzeme üretiminde uygulanacak basınç miktarının yanı sıra, temel olarak metal ve kalıp sıcaklığı gibi iki önemli değişkenin de kontrol altında tutulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. En uygun üretim şartı, seramik malzemelerin ısıtılabilmesini sağlayacak en az kalıp ve metal sıcaklığında çalışılmasıdır. Çok yüksek sıcaklıklarda fiber ve matris arasında kontrol edilemeyecek seviyede reaksiyon meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar neticesinde arayüzeylerde kompozit olma özellikleri bakımından yıkıcı etkilere neden olan kırılgan izole tabakaların oluşumuna yol açmaktadır [35].

Sıvı metalin seramik preforma infiltrasyonu esnasında, infiltrasyon verimine etki eden ya da bir başka ifadeyle, sıvı metalin preforma dolmasına engel olan en önemli faktörlerden biri, seramik ve metal arasındaki ara yüzeydeki enerji farklılığıdır. Genel olarak oluşum şu şekilde meydana gelmektedir; sıvı metal ilk önce preformdaki büyük boşlukları doldurmakta daha sonra da küçük boşluklara akmaya başlamaktadır. Artan infiltrasyon basıncıyla infiltrasyon hızı düşmektedir. Kılcal boşluk oranının fazla olması ya da fiberlerin birbirine temas halinde olması durumunda, gereken basıncın sonsuz olduğu ifade edilmektedir. İnfiltrasyon kinetiğine etki eden temel etkenler [42],

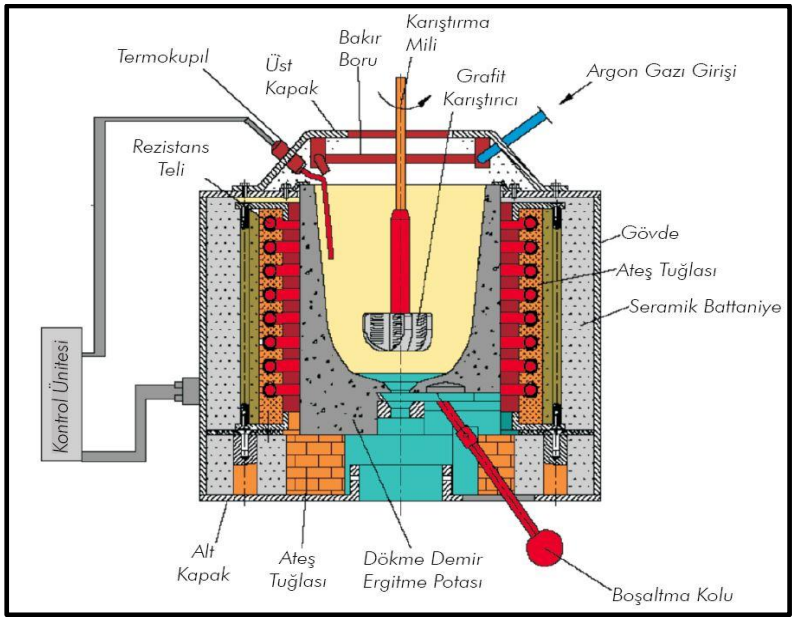
a) Fiberin hacim ölçüsü,
b) Fiberin ısı değeri,
c) Metalin ısı değeri,
d) Uygulanan basınç miktarıdır.

Bu yöntem hem kısa hem de sürekli elyaf takviyeli Metal Matrisli Kompozit üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde önce uygun bağlayıcı kullanılarak mastar hazırlanmaktadır. Kompozit malzeme için tasarlanan elyafın hacimsel içeriği bu aşamada hazırlanır. Hazırlanan model kalıba yerleştirilmekte ve ergimiş metal enjekte edilerek bu mastarın ıslanması sağlanmaktadır. Bu esnada organik bağlar yanmakta ve katılaşmaya

bırakılmaktadır. Ergimiş metali emdirme işlemi basınç altında da gerçekleştirilebilir. Bu durumda elyaflar arasına matrisin girmesiyle açığa çıkacak atıl gazlar da sistemden uzaklaştırılmaktadır. Örneğin, Boron elyafların SiC ile kaplama yapılması bu işlemle sağlanmaktadır [43].

3.3.3. Karıştırma (Vorteks)

Geleneksel karıştırma döküm (stir casting) tekniği, partikül takviyeli AMK'lerin üretiminde uzun sürelerdir kullanılmaktadır. AMK'lerin değişik döküm yöntemleri kullanılarak üretilmesi üzerinde yapılmış oldukça çok çalışma bulunmaktadır. Bu yöntemdeki en önemli problem, takviye malzemenin sıvı metal tarafından ıslatılamaması ve seramik partiküllerin homojen olarak dağılamamasıdır. Ayrıca, porozite, topaklaşma, oksit kalıntısı ve arayüzey reaksiyonları, döküm teknolojilerinde gözlenen istenmeyen durumlardır. Bazı araştırmacılar, partikül takviyeli AMK'lerin döküm yoluyla etkinlikle üretilebildiklerini belirtse de, kullanılan yöntemin detayları saklı tutulmaktadır. Karıştırmalı döküm tekniği, diğer sıvı durum işlemlerine nazaran, özellikle düşük maliyetleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Vortex karıştırma döküm yöntemi Şekil 3.2'de gösterilmiştir [44].



Şekil 3.2. Vortex karıştırma döküm yöntemi

Vorteks metodu olarak tanımlanan yöntemde kompozit malzeme, ergimiş metal matrisin içine daldırılan bir karıştırıcı kullanılarak oluşturulan girdabın üzerinden partikül haldeki

seramik takviye malzemeleri kontrollü olarak eklenerek elde edilmektedir. Bu metot ile, genellikle partikül takviyeli AMK'ler için daha uygun olmasına rağmen, kısa fiber ya da visker takviyeli kompozitlerin üretilmesi de mümkündür. Bu yöntemin, AMK üretim yöntemleri arasında en kolay ve ucuz yöntem olduğu belirtilmektedir. Ancak, küçümsenemeyecek ölçüde dezavantajları da olmaktadır. Öncelikle, karıştırma ve ilavelerin kontrollü atmosfer ortamında yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. İşlem 31 ayır değişkenin iyi bir şekilde kontrol edilmediği durumlarda porozite oranı %30'lara kadar çıkmaktadır. Vorteks yöntemi kapsamına kompozit döküm işlemini de katmak mümkün olmaktadır. Sıvılık-katılık arasında şiddetli bir şekilde karıştırılan alaşımın bünyesinde %60 kadar sıvı içerdiği durumda, karıştırma sebebiyle dendrit kolları kırılmakta ve alaşımın akışkanlığı artmaktadır. Bu durumda seramik takviye elemanları da alaşıma katılmaktadır. Seramik fiber ya da partiküllerin alaşıma ilave edilmesinden sonra alaşım ya yarı sıvı halde ya da reo-dökümde olduğu gibi geleneksel döküm sıcaklığı ayarlanıp döküm işlemi gerçekleştirilmektedir. Sistemin en büyük dezavantajı "sıkıştırma" dökümdeki gibi basınç altında katılaştırmaya ihtiyaç duyulmasıdır. Aksi takdirde yüksek oranlara varan poroziteli malzemeler üretilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir [35].

3.3.4. Yarı katı döküm

Yarı katı metal döküm tekniği 1971 yılında Massachusetts Enstitü ve Teknoloji'de (MIT) gerçekleştirilen bir doktora tezinin parçası olarak Davit Spenser tarafından ortaya konmuştur. David Spenser bu çalışmasında güçlü bir biçimde karıştırılan yarı katı metalin temelde rheolojik özelliklere sahip olduğunu keşfetmiştir. Yarı katı metal karakteristikleri; sıvı metalden daha az olan ısı içerikleri, kalıp dolumu esnasında yarı katı metal olarak bulunması, sıvı metalden daha yüksek viskositeleri (akışkanlık), katı metallerden daha az akış stresi olarak örneklendirilebilir. Bu özellikler değişik uygulamalar için potansiyel farklı faydalar doğurabilir. Yarı katı döküm, kısmen katılaşmış ve anti dendritik malzemelerin kullanıldığı bir döküm yöntemini ifade etmektedir. Bu iki karakteristik özellik alaşımlarda çok sayıdaki döküm işlemi avantajının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu avantajlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir [45].

- Yüksek nitelikli döküm işlemleri ile karşılaştırıldığı zaman, yüksek enjeksiyon hızlarındaki düzlemsel cephe ile dolum yapılarak an az hava ya da çekme boşluğu içeren

karmaşık, nitelikli, ısıl işleme uygun parça üretilmesi ve katılaşma esansında dökümü yapılan parçanın gelişmiş besleme özelliği kazanılır.

- Düşük metal ısı içeriği sebebiyle kalıp içindeki bekleme zamanı azalır.
- Düşük döküm sıcaklığı sebebiyle ortaya çıkan daha az termal şok ve yorulma neticesinde artan kalıp ömrü elde edilir.

Thixocasting ve rheodöküm yöntemleri, yarı katı metal malzemelerin üretimi için geliştirilen döküm teknolojileridir [45].

Thixocasting Prosesi: İnce, eş eksenli ve parçacık dağılımlı bir katı biyetin yarı katı alanda kısmen tekrar eğritilmesi ve hazne kısmına transfer edilerek yüksek basınçlı döküm makinesiyle kalıp içerisine enjekte edilmesi işlemine "Thixocasting Prosesi" adı verilmektedir.

Rheodöküm Prosesi: Bu işlem, alaşımın katılaşması esnasında karıştırılarak yarı katı çamur üretiminin yapılması ve bu yarı katı çamurun doğrudan kalıp içerisine enjekte edilmesidir. Rheodöküm işleminin Thixodöküm işleminden farklı birkaç avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar;

- Birçok ısıtma istasyonu ve robot transfer sistemine gerek duyulmaması nedeniyle kazanılan daha az işlem karmaşıklığı,
- Biyetin çap/yükseklik oranıyla ilgili bir sınırlama olmaması sebebiyle elde edilen büyük hazne boyutu esnekliğidir.

Yarı katı metal prosesleri ile ilgili yapılan alanyazın incelemesinde aşağıdaki genel uygulama sonuçlarının olduğu görülmüştür [44];

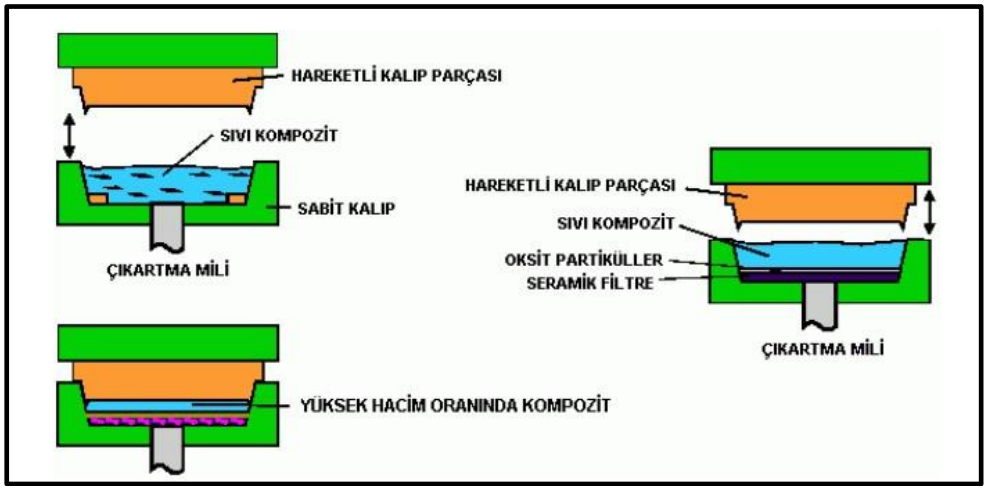
1. Yarı katı metal işlemleri ile otomotiv sanayinde önem verilen güvenli ve kritik parça ihtiyacı karşılanabilmektedir.
2. Yarı katı metal işlemleri ile üretilen malzemelerin mekanik özellikleri geleneksel döküm yolu ile üretilen parçalardan daha üstün olmaktadır.

3. Yarı katı metal işlemleri ile aynı dayanımdaki bir parça için daha az metal gereksinimi ve daha hafif parça üretimi mümkün olmaktadır. Bu sayede, otomotiv endüstrisine %10 oranında hafiflik ve %6-8 oranında yakıt tasarrufu avantajları kazandırılmıştır.
4. Yarı katı metal prosesinde ısıl işlem, işlenebilirlik, anodizing ve kaynak kabiliyeti mümkün olmaktadır.
5. Yarı katı metal prosesi ile üretilen parçaların kazandığı özellikler, geleneksel yöntemlerle elde edilememekte ya da çok yüksek maliyetle olmaktadır.
6. Yarı katı metal işlemi ile kalıp ömrü artmakta ve daha çok çevrim yapılarak maliyetler düşürülmektedir.
7. Yarı katı metal işleminde üretilen parçalarda porozite ve çekme boşluklarına bulunmamaktadır.

Diğer MMK'lerde olduğu gibi Al-B_4C kompozitlerinde de, klasik döküm yöntemleri düşük maliyetle üretim sunmaktadır. Fakat 1100 ^oC'nin altındaki sıcaklıklarda alüminyum ile bor karbür arasında düşük nitelikte ıslanma oluşmaktadır. Dolayısıyla ve bu sıcaklıklarda Al-B_4C kompozitlerinin, sıvı faz içinde tanecik karıştırma yöntemiyle üretilmesi zorlaşmaktadır. B_4C partiküllerin alüminyum üzerindeki ıslatabilirliğinin artırılması ve sıvı alüminyum ile birleşebilmesini sağlamak amacıyla, taneciklere genellikle ön ısı işlemi uygulanmaktadır [46].

3.3.5. Basınçlı infiltrasyon

Çok bilinen basınçlı infiltrasyon yöntemi (Şekil 3.3.), partikül ve viskerlerin, hızlı soğuma oranları sayesinde homojen dağılım gösterebilmeleri şeklinde karakterize edilmektedir. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin üretiminde, düşük basınçlı döküm yöntemleri de uygulanmaktadır. Bu yöntem, büyük ölçekteki parçaların üretimi için uygun bir metottur. Katılaşma zamanları kısa, döküm hatalarının oranı az ve takviye hacmi yüksek olabilmektedir. Bu işlemde kullanılan basınç genel olarak 15 MPa'nın altında olmaktadır [40].



Şekil 3.3. Basınçlı döküm yöntemi

3.3.6. Basınçsız infiltrasyon

Lanxide Corp. PrimexTM şirketi tarafından geliştirilen basınçsız infiltrasyon yönteminde, önceden şekillendirilen seramik partiküller, ergimiş Al-Mg alaşımının, azotlu atmosfer ve basınç altında uygulanmadan infiltrasyonuna dayanmaktadır. Kullanılan takviye malzeme oranı yaklaşık %55 seviyesindedir. İstenilen durumlarda ön alaşım ile seyreltme de yapılabilmektedir [47].

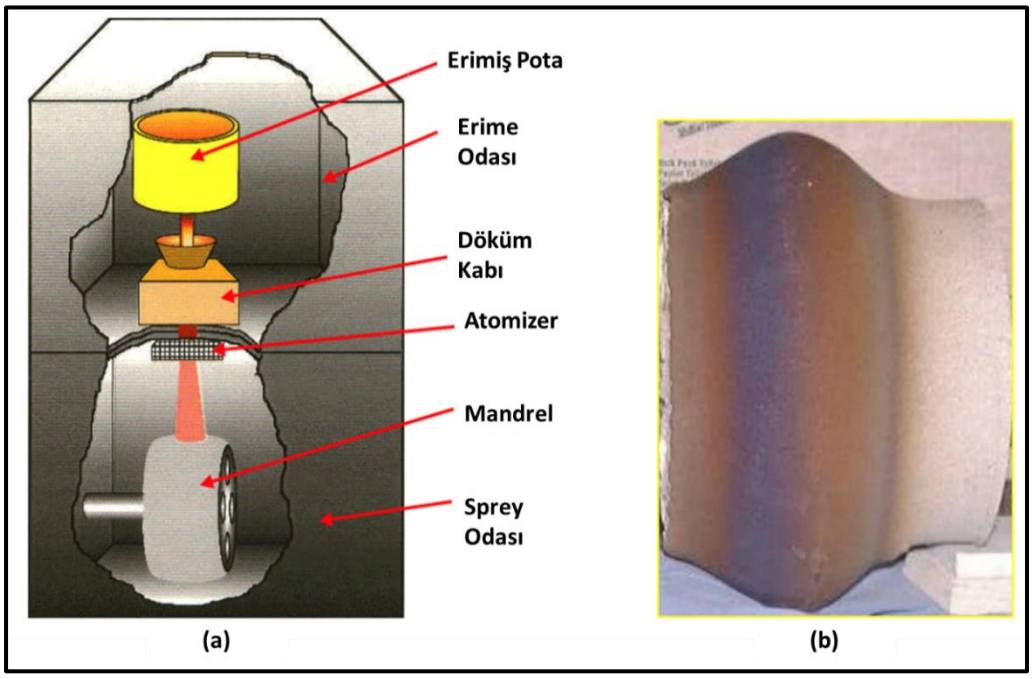
3.3.7. Plazma püskürtme

Püskürtme yöntemlerinde, damla şeklindeki sıvı metal ve partikül haldeki takviye elemanı bir alt tabakaya üzerine uygulanmaktadır. Matrisin hızlı katılaşması nedeniyle elde edilen mukavemet artışı ile takviye ve matris arasında gerçekleşen reaksiyon süresinin kısalığı, püskürtme yöntemlerinin üstün yönleri olarak gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, toz metalurjisi yöntemlerinde yaygın olarak uygulanan harmanlama işlemlerinin kaldırılmış olması, tekniğin diğer bir avantajı olmaktadır [35].

Yaygın olarak kullanılan plazma püskürtme yöntemleri aşağıda özetlenmiştir.

Osprey Yöntemi: Osprey yöntemi, sıvı alüminyumun, yoğun, iyi parçacık yapısına sahip, %0,2–2,0 arasında porozite özellikleri olan homojen bir ürüne tek aşamada dönüştürüldüğü bir metottur. Alaşım, indüksiyon ocağında, argon gazı kullanılarak ergitilerek, yüksek hızlı

nitrojen gazıyla da atomize edilmektedir. Osprey yönteminin geleneksel toz metalurjisi yöntemlerine nazaran üstünlüğü, atomizasyon ile birleştirme arasındaki birçok ara kademenin kaldırılması, böylece üretim maliyetlerinin düşürülmesidir. İngiltere'de bulunan Osprey Metals Ltd. şirketi tarafından geliştirilen bu teknik partikül takviyeli Alüminyum matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılabilmektedir. Yöntemde, ana işlem basamakları, gaz atomizasyonuna benzer biçimde ergiyik damlalarının oluşturulması ve püskürtme yönünde duran soğutulmuş alt tabakaya çarptırılması şeklindedir (Şekil 3.4). Takviye partiküller, atomize olmuş spreye doğrudan püskürtülebilir. Elde edilen yapı iyi tane yapısına sahip olmakta (ortalama 15 µm) ve teorik yoğunluğu %95-98 seviyesindedir. Bu teknikle elde edilen yarı mamuller, ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi sıcak işleme yöntemleriyle şekillendirilmektedir [48].



Şekil 3.4. a) Osprey yöntemi b) Osprey yöntemi ile üretilen bir parça

Düşük Basınç Plazma Çöktürmesi: Alüminyum toz ve takviye elemanı, düşük basınç plazmaya yüklenir. Plazma içerisinde, matris malzeme, ergime derecesinin üzerinde ısıtılırak, hızla hareket eden plazma gazlarıyla birleştirilir. Daha sonra oluşan damlalar, takviye partikülleriyle birlikte alt tabakaya itilir [40].

In Situ Yöntemleri: Takviye malzemenin ergiyik malzeme içinde çekirdeklendiği yöntemler olarak tanımlanan In Situ üretim yöntemleri, teknik bakımdan ve ekonomik yönden önemli

avantajlar sağlamaktadır. In situ üretim yöntemlerinde, partikülün miktar ve şeklinin kontrol edilmesi mümkün olmaktadır. Bu durum, kompozit malzemenin özelliklerinin iyileşmesini sağlar. Diğer üretim tekniklerinde görülen ıslatılabilirlik sorunu ile matris ve takviye eleman arasındaki arayüzey uyumsuzluğu, bu yöntemde görülmemektedir. Ergiyiğin bileşimi ve reaksiyon kimyası kontrol altına alınarak karbürler, nitrürler, oksitler, borürler ve silikatlar oluşturulabilir. Başlangıç malzemesine bağlı olarak reaksiyonlar genellikle sıvı-gaz, sıvı-katı ve sıvı-sıvı olarak kategorize edilebilir. Düşük ve yüksek sıcaklık alaşım sistemlerinde ergiyik faz içinde çekirdeklenerek meydana gelen takviye fazın bulunması, ana alaşım malzemenin dayanıklığını ve elastiklik modülünü olumlu yönde etkilemektedir. Yöntemin diğer bir avantajı da, yüksek sıcaklık performanslarını artırmasıdır. Genellikle, süreksiz takviyeli metalik veya intermetalik takviyeli in-situ kompozitlerinde takviye boyutu 0,5–5 μm arasında, hacim oranı ise %0–50 arasında olmaktadır. Bu yöntemde, kontrollü sıvı alaşım-gaz veya sıvı alaşım-katı reaksiyonları, alüminyum matris içerinde karbür, nitrür ya da borür partiküllerin oluşmasına imkan tanır [49].

Lanxide Yöntemi: Lanxide Corporation şirketi tarafından geliştirilen Lanxide Yöntemi, metal-seramik karışımlar elde etmek amacıyla (Al-Al2O3, Al-AlN vb.) ergiyik alüminyum alaşımlarının, dışarıdan kontrollü oksidasyonunu ve nitrasyonunu gerektirmektedir. Al_2O_3, TiB, B_4C vb. diğer takviye malzemeler de sıvı alüminyuma eklenebilmektedir [40].

XD-Yöntemi: Martin Marietta Corporation şirketi tarafından geliştirilen XD-Yöntemi'nde, seramik ve metal tozu karışımı, genellikle metalin ergime derecesinin üzerinde bulunan reaksiyon sıcaklığında ısıtılır. Bileşenler birbirleriyle reaksiyona girerek (tercihen egzotermik) matrisin içinde yeni bir seramik faz oluşurlar [50].

3.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler taşıdığı kendilerine has özeliklerine göre günümüz sanayiinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu alanlar aşağıda özetlendiği şekilde gruplandırılabilir [28].

Yüksek mukavemet: Kompozit malzemelerin çekme, eğilme, kopma vb. mukavemetleri, çok sayıdaki metalik malzemeye oranla oldukça yüksektir. Kaplama özellikleri nedeniyle, kompozitleri istenen bölgesinde gerekli mukavemet verilebilmektedir. Bu sayede malzemeden tasarruf sağlanarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilmektedir.

Kolay şekillendirme: Kompozit malzemelerin kullanılmasıyla büyük ve karmaşık parçalar, tek işlemle kalıplanabilmektedir. Böylece malzeme ve işçilikten kazanç sağlanmaktadır.

Elektriksel özellikler: Uygun malzemelerin seçilmesiyle, çok üstün elektriksel özellikleri bulunan kompozit malzemeler üretilebilmektedir.

Isıya ve ateşe dayanıklılık: Isı iletimi katsayısı düşük malzemelerden yapılan kompozitlerin ısı dayanıklılıkları, yüksek ısı ortamlarında kullanılmaya imkan tanımaktadır. Bazı özel katkı maddeleri kullanılarak kompozit malzemenin ısıya karşı dayanıklılıkları arttırılabilmektedir. Titreşim sönümleme: Kompozit malzemelerin sünekliği sebebiyle, titreşim sönümleme ve şok azaltabilme özellikleri verilmektedir. Bu sayede de çatlak yürümesi olayı engellenmektedir.

Kimyasal etkilere ve korozyona karşı dayanıklılık: Kompozit malzemeler, havanın ve çoğu kimyasal maddenin korozif etkilerinden zarar görmezler. Bu özellikleri sayesinde kimyasal madde tank, boru ve aspiratörleri ile tekne vb. deniz araçları yapımında tercih edilmektedir.

Kalıcı renklendirme: Üretim süreçleri esnasında kompozit malzemelere ilave edilen pigment maddeleri sayesinde istenen renkler verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmemektedir.

Bazı işlemlerden geçirilerek yeni şekillendirilen alüminyum malzemenin yüzeyi havayla temas ettiği sürece ince bir oksit filmle kaplanmaktadır. Bu film zarar gördüğü anda hızla yeniden oluşmaya başlar. Bu oksit filmin yararı ve önemi, metalik alüminyuma göre daha fazla hacimde olması ve yüzeyi koruyucu bir etkisinin bulunmasıdır. Alüminyumun aktif bir metal olmasının yanında günümüzde mühendislik alanında kullanılabilmesini sağlayan yüzeyde oluşan bu koruyucu oksit film tabakası olmaktadır [51].

Alüminyumun yüzeyine işlem uygulanması için kullanılan kromatlama vb. kimyasal dönüşüm işlemleri, sanayide yüzey kalitesi ve çeşitlilik bakımından anodizasyon işlemiyle kıyaslanamaz. Anodizasyon metoduyla elde edilen kaplamalar sadece mükemmel mekanik özellikler değil, aynı anda çok yüksek korozyon ve aşınma direnci sağlarlar. Bazı anodik oksit filmlerin porozite yapısı, organik boyaların ya da metalik pigmentlerin bu boşluklarda

biriktirilmesiyle malzemeye renklendirme işlemi yapılmasına izin vermektedir. Sonuçta dekoratif ve koruyucu yüzeyler elde edilmektedir [17].

Alüminyum malzemenin anot yapılarak bir elektrolit işlemiyle akım geçirilmesi durumunda, negatif yüklü anyon bir veya daha fazla elektronunu kaybettiği anoda doğru ilerler. Sulu bir çözeltide anyon, alüminyum malzemeye kimyasal şekilde bağlanmış oksijenden oluşmaktadır. Reaksiyonun sonucunda ortaya çıkan oksidin özelliği, elektrolitin türüne, akım miktarına, banyo sıcaklığına ve süresine bağlıdır. Anodizasyon işlemiyle elde edilen oksit tabakanın renklendirilmesi ise dekoratif amaçlı olarak yapılmaktadır. Son yıllarda renkli alüminyumun kullanımı özellikle mimarde, ev aletlerinde ve otomotiv sektöründe yaygınlaşmıştır. Örneğin, İngiltere'de inşaat sektörü için üretilen alüminyum malzemelerin %10'una renklendirme işlemi uygulanmıştır. ABD, Japonya ve bazı Avrupa ülkelerinde daha yüksek oranda renklendirme işlemi yapılmaktadır. Renklendirilmiş alüminyum malzemelerle sanat eseri ve anıt yapımı Almanya ve İtalya'da da tercih edilmektedir. Alüminyum renklendirme uygulamaları temelde aşağıdaki türlerde yapılmaktadır [22];

1. Organik asitlerle ve özel elektrolitlerle gerçekleştirilen renkli anodizasyon
2. Anodizasyon işlemi sonrasında yapılan işlemler
    a. Organik boya maddeleriyle boyama yapılması
    b. İnorganik pigmentler kullanılarak boyama yapılması
    c. Elektrolitik renklendirme.

Kompozit malzeme teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte, kompozitler endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda artan oranlarda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle otomotiv ve havacılık teknolojilerinin yanında birçok sektörde önemli ölçüde kompozitler kullanılmakta ve gelişimlerine yönelik bilimsel çalışmalar da yoğun bir şekilde devam etmektedir. Kompozit malzemeler yapıları ve özelliklerine göre çok değişik alanlarda kullanılmaktadır. Her sektörün farklı ihtiyaç ve beklentileri olmaktadır. Bu farklı kullanım alanları içerisinde kompozit malzemelerin, hafiflik, sağlamlık ve esneklikleri önemli avantajlar olarak öne çıkmaktadır. Kompozitler, farklı alanlarda hammadde olarak kullanıldığı gibi imalat sektöründe yardımcı ekipman olarak da kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı başlıca sektörler şu şekilde sıralanmaktadır [38]:

- Otomotiv Sektörü (kaporta, disk fren sistemleri vb.),
- Havacılık sektöründe (uçak gövde, kanat vb.)
- Uzay teknolojilerinde (uzay mekiği ısı koruma kalkanları vb.),
- Denizcilik sektöründe (tekne gövde sistemleri vb.),
- Tıbbi cihazların imalatında (tıbbi alet, protez, implant vb.),
- Robot teknolojisinde,
- Kimya sanayisinde,
- Elektrik-Elektronik teknolojilerinde,
- Müzik aletleri endüstrisinde,
- İnşaat ve yapı malzemeleri sektöründe,
- Savunma sanayinde (tank zırh yapımı vb.),
- Gıda ve Tarım Sektörü
- Spor malzemeleri imalatı (atlama sırıkları, tenis raketleri, sörf, kayak vb.).

4. TOZ METALURJİSİ

4.1. Toz Metalurjisinin Tanımı ve Tarihi Gelişimi

Toz Metalurjisi, insanlık tarihinde kayıp sanat olarak adlandırılmaktadır. Kil ve diğer seramik tabanlı malzemelerden farklı olarak, erken dönem tarihte dekoratif metalik nesnelerin üretilmesi için uygulanan döküm ve pişirme işlemlerinde uygulanmıştır. Metallerin sinterlenmesi işlemi, sonraki yüzyıllarda tamamen unutulmuştur. 18. yüzyılın sonunda Avrupa'da çeşitli platin tozu üretim yöntemlerinin tekrar uygulanmaya başlamasıyla tekrar canlandırılmıştır. Altın, bakır ve bronz gibi metal tozları ve demir oksit ve pigment olarak kullanılan diğer oksitler gibi oksit tozları, seramik, boya ve mürekkeplerde kullanılmıştır. En eski el yazmaları tarihte altın tozu kullanıldığını göstermektedir. Bu tozların nasıl üretildiği bilinmemektedir, ancak tozların metal eritildikten sonra granülasyon yoluyla elde edildiği düşünülmektedir. Düşük erime noktası ve oksidasyona karşı direnç (kararma) özelliğiyle bu gibi işlemlerde altın tozu tercih edilmiştir [52].

Bu tozların boya pigmentleri ve süs eşyaları için kullanılması, gerçek toz metalurjisi olmamaktadır, çünkü modern bilimin temel özellikleri, tozun üretilmesi ve erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta basınç ve ısı uygulanmasıyla katı bir formda birleştirilmesi işlemleridir. Erken dönemde, metal partiküllerinin çekiçlenerek birleştirilebileceği ve sağlam bir metalik yapı elde edileceği keşfedilmişti. Zamanla, fırınları nasıl inşa edeceğini ve metalleri eritmek için yeterli yüksek sıcaklıklar elde etmeyi, ayrıca bronz yapmak için bakır ve kalay gibi düşük erime sıcaklıkları olan alaşımları yapmayı öğrenmişlerdi. Tablo 4.1.'de toz metalürjisi uygulamalarının bilinen tarihi gelişim süreci yer almaktadır [53].

Çizelge 4.1. Toz metalürjisi uygulamalarını bilinen tarihi gelişimi

TARİH	GELİŞME	YER
M.Ö. 3000	Alet yapımı için “Sünger demir”	Mısır, Afrika, Hindistan
M.S. 1200	Platin taneleri yapıştırma	Güney Amerika (İnka’lar)
1781	Eriyebilir platin arsenik alaşımı	Fransa, Almanya
1790	Ticari platin arsenik kimyasal kapların üretimi	Fransa
1822	Platin tozu katı külçe haline getirildi	Fransa
1826	Platin tozu sıkıştırmanın ticari olarak yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi	Rusya
1829	Platin süngerden kompakt platin üretimi için Wollaston yöntemi (modern P / M tekniğinin temeli)	İngiltere
1830	Çeşitli metallerin sinterleme örnekleri	Avrupa
1859	Platin füzyon işlemi	Amerika Birleşik Devletleri
1870	Metal tozlarından yapılmış yatak malzemeleri için patent (kendinden yağlamalı yatakların öncüsü)	Amerika Birleşik Devletleri
1878-1900	Akkor lamba filamanları	Amerika Birleşik Devletleri
1900’ler	Kompozit metaller	Amerika Birleşik Devletleri
1915-1930	Güçlendirilmiş karbür	Almanya
1900’ler	Gözenekli metaller ve metalik filtreler	Amerika Birleşik Devletleri
1920’ler	Kendinden yağlamalı yataklar (ticari olarak kullanılır)	Amerika Birleşik Devletleri
1940’lar	Demir tozu teknolojisi	Avrupa
1950-1960	T/M dövme işleme	Amerika Birleşik Devletleri
1970’ler	Sıcak izostatik presleme, T/M çelik takımlar ve süper plastik süper alaşımlar	Amerika Birleşik Devletleri
1990’lar	Yarı metal ve metal matris kompozitler, sprey şekillendirme, nano ölçekli tozlar ve sıcak sıkıştırma	Amerika Birleşik Devletleri, İngiltere

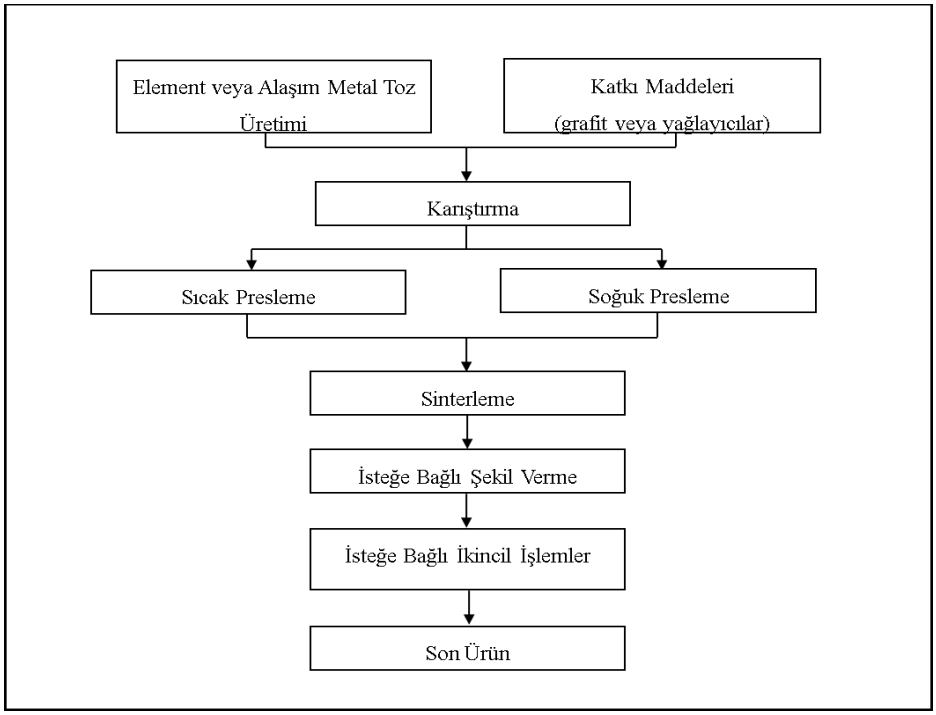
Kaynak: ASM Handbook, 1998

Toz metalurjisi işlemleri, toz metaller, seramikler, parçacık takviyeli kompozitler, plastik kalıplama ve metal dövme gibi birçok tekniğin sentezinden oluşmaktadır. Geniş uygulama alanı bulan seçeneklerden bir tanesi de kompozit oluşturmak amacı ile birbiri içerisinde çözünmeyen tozları çeşitli oranlarda karıştırmaktır. Fazların boyut, şekil ve miktarları bakımından mikroyapıyı kontrol ederek; bu malzemelerde istenilen özellikler sağlanabilmektedir. Ayrıca ilave olarak toz metalurjisi yöntemi; yağlama, süzme ve enerji dağıtımında faydalanılan gözenekli malzeme üretimine de izin vermektedir [48].

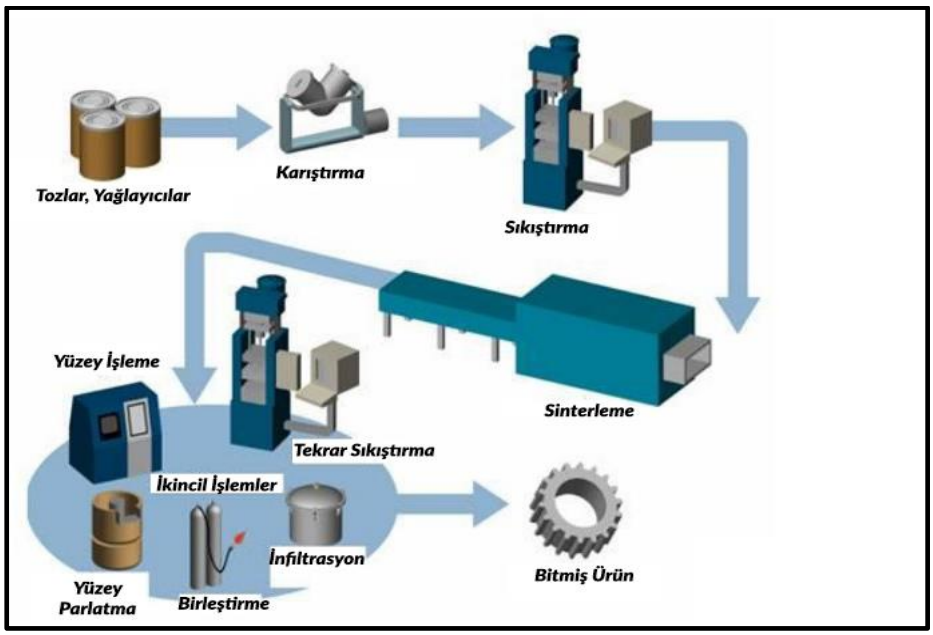
Toz metalurjisi, metal özellikteki toz ya da bu tozların şekillendirilerek sinerlenmesiyle elde edilen ürünlerin imalatını kapsamaktadır. Bir başka ifadeyle, toz metalürjisi; metal tozlarının, kendine has yöntemler kullanılarak küçük, girinti ve çıkıntılı, diğer klasik metalürji yöntemleriyle üretilmesi zor mühendislik parçaların seri olarak üretilmesine imkan tanıyan toz malzeme teknolojisidir. TM ile şekillendirmelerin ilk uygulamaları I. Dünya Savaşı yıllarında başlamıştır. Gözenekli malzemelerin, mıknatısların ve elektrik lamba flamalarının üretimi bu dönemde başlamış ve geliştirilmiştir. Otomobil endüstrisindeki gelişmelere paralel olarak toz metalürjisi üretim yöntemleri de artan bir şekilde gelişme göstermiştir. Günümüz sanayinde, bu yöntemle üretilen parçaların özellikle şekil ve ağırlık bakımından sağladığı avantajlar sebebiyle tercih edilmesi, bu yönde üretim ve araştırma yapan kuruluşların sayısını da artırmıştır. Ülkemizde 2005 yılında dördüncüsü yapılan Uluslararası Ulusal Toz Metalurjisi Konferanslarında, bu alandaki gelişmelerin devam edeceği vurgulanmıştır [33].

Toz metalurjisinin amacı, mekanik ve fiziko-kimyasal yöntemlerle metal ve metalik alaşımların tozlarının üretilmesi ve tozlardan da ergitme, basınç ve sıcaklık yardımıyla iş parçası üretilmesidir. Sinterleme denilen ısıl işlemlerle toz partiküllerinin birbirlerine bağlanması sağlanarak, malzemenin mekanik mukavemeti artırılmaktadır. Böylece daha dayanıklı malzeme elde edilmesi sağlanmaktadır. Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı metalin ergime sıcaklığının 2/3 ile 4/5 arasında olmaktadır. Çok bileşenli sistemlerin sinterlenmesinde ise genellikle metalik yapı içindeki düşük oranlı karışım elemanlarının ergimesi arzu edilmektedir [54].

Toz metalurjisi, istenilen şeklin elde edilmesine ve seri üretime uygun bir imalat tekniğidir. Toz metalürjisi işlemlerini gösteren akış diyagramı Şekil 4.1'de ve işlemin grafiksel gösterimi Şekil 4.2'de yer almaktadır.



Şekil 4.1. Toz metalurjisi işlem basamakları [54]



Şekil 4.2. Toz metalurjisi ile malzeme üretimi [55]

Toz metalürjisi üretim sürecinde ilk olarak metal tozları üretilmektedir. Devamında bu tozlar farklı yağlayıcı ve bağlayıcılarla karıştırılmaktadır. Yağlayıcı maddelerin buradaki işlevi pres işlemi esnasında sürtünmenin azaltılması, kalıp ömrünün uzatılması ve parçanın kalıp içerisinden kolaylıkla çıkarılmasının sağlanmasıdır. Bağlayıcıların görevi ise malzemenin ham dayanımını artırmaktır. Karıştırma işlemden sonra metal tozları kalıba dökülmekte ve sırasıyla presleme ve sinterleme işlemlerine gönderilmektedir. Sinterleme uygulaması, preslenmiş ham haldeki toz metal parçanın, ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ısıtılarak, toz parçacıkların arasında kuvvetli bir bağ oluşturulması işlemidir [56].

Sinterleme işleminden sonra genellikle parçanın imalat süreci tamamlanmış olmaktadır. Ancak bazı özel amaçlarla sinterleme sonrası talaşlı imalat, ısıl işlem ve birleştirme gibi ikincil işlemlere de ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu şekilde parçanın daha sağlam ve daha pürüzsüz olması sağlanmaktadır [57].

4.2. Toz Metalürjisinin Avantajları ve Dezavantajları

Toz metalurjisi yöntemiyle parça üretiminin avantaj ve dezavantajlarının daha iyi kavranabilmesi için, bazı üretim parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunlar; üretilen ürünün şekli, boyutları, malzeme türü, toleranslar, fiziksel ve mekanik özellikler ile maliyettir. Bu parametreler bilindiğinde, toz metalurjisi yönteminin, dövme ve döküm gibi yöntemlere göre bazı metal işleme süreçlerine göre avantajlarının yanında ve bazı üretim sınırlandırmalarının da mevcut olduğu söylenebilir. Bu bağlamda, TM yöntemlerinin avantaj ve deazavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [58].

Avantajlar:

- Dar boyut toleransı ve iyi yüzey kalitesi elde edilebilmesi,
- Dövme ve döküm yöntemlerine göre daha kaliteli ve daha ekonomik (yüksek dayanım, yüksek sertlik ve yoğunlukta) malzemeler üretilebilmesi,
- Parça üretimi sırasında ham malzemelerin %99'u kullanılarak malzeme kaybının ortadan kalkması,
- İstenilen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip gözenekli yapıdaki malzemelerin (kendinden yağlamalı yataklar, gözenekli kemik yapısı vb.) imal edilebilmesi,

- Yüksek termal dayanıma ve mukavemete sahip kristal ve amorf yapıların yalnızca bu yöntemle üretilebilmesi,
- Karmaşık yapıdaki küçük boyutlu şekillerin seri bir şekilde üretilebilmesi,
- Diğer yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan, yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakter (tantalyum, tungsten, molibden vs.) ve sert metallerin üretiminde tek ekonomik yöntem olması,
- Kompozit malzemelerin rahatlıkla üretilebilmesidir.

Dezavantajlar:

- Yüksek mukavemet gerektiren malzemelerde, infiltrasyon ve gözenek doldurma gibi ikincil işlem uygulanmazsa, diğer yöntemlere göre daha kötü mekanik özelliklerin elde edilmesi,
- Seri imalat yapılmazsa sıkıştırma ve sinterleme gibi toz metalurjisi ünitelerinin ilk yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olması,
- Metal tozların maliyetinin, ingot haldeki malzemeden daha pahalı olması,
- Çok büyük boyutlu parça üretiminin yapılamamasıdır.

4.3. Toz Metalurjisi ile Üretilen Parçaların Genel Özellikleri

Toz metalurjisiyle üretilen parçaların özellikleri; toz taneciklerin şekli, boyutu, bileşimi, presleme basıncı, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklığı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Kalıp içerisindeki toz yüksekliği, kullanılan yağlayıcılar, gerilme dağılımı ve sıkıştırma hızı; tozların preslenmesi işlemini önemli ölçüde etkilediğinden, üretilen malzemelerin özellikleri de bu parametrelere bağlıdır. Toz taneciklerinin sıkıştırılmasıyla elde edilen ham mukavemet, plastik deformasyon sonucu meydana gelir. Sıkıştırma esnasında başlangıçta gevşek olan tozlar, yeniden yerleşerek sıkı bir şekilde kenetleşir. Uygulanan presleme basıncının daha da artmasıyla, taneler arası temas alanı artarak taneler daha fazla plastik deformasyona uğrar. Taneler arası temas alanının artması da mukavemet değerini artırmaktadır. Bu yöntemle elde edilen parçaların yoğunlukları, çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Mekanik özellikler, yoğunluğa bağlı olup yoğunluk arttıkça artmaktadır. Sıcak veya soğuk izostatik presleme yöntemiyle dövme ürünlerin mekanik özelliklerine yakın, yüksek yoğunlukta malzemeler üretilebilmektedir [59].

Toz metal parçalardaki tanecik tipi, büyüklüğü, şekli, taneciklerin dağılımı ve gözenek miktarı parçaların mekanik özellikleri üzerine etki etmektedir. Gözeneklilik oranı düştükçe, toz metalurjisiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri iyileşmekte olup gözenek miktarı fazla olan parçalarının toklukları ve mukavemetleri daha düşük olmaktadır [60].

Yüksek yoğunluklu malzemelerde gözenek oranı %10'dan az olup dayanımı da yüksektir. Dişli, kama ve kavrama gibi çok çeşitli makina elemanları bu yöntemlerle üretilmektedir [61].

Gözeneklilik oranı %10-60 arasında olan toz metal parçaları çok gözenekli (düşük yoğunluklu) malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Gözeneklilik oranı %30-60 arasında olan parçalardan genellikle metalik filitreler üretilmektedir. Bronz, paslanmaz çelik veya saf demir esaslı olarak üretilen bu filtreler; yağ, su, hava veya yakıt devrelerinde kullanılmaktadır. Gözeneklilik oranı %18-50 arasında olan parçalar ise genellikle yağ emdirilerek kendinden yağlamalı yatak olarak kullanılmaktadır. %10-20 arasında gözenekli olan toz metal parçalar, orta yoğunluklu parçalar olup yatak özelliği istenmeyen orta dayanımlı parçalardır. Bu parçalara örnek olarak; mil kılavuzları, otomotiv amortisör pistonları, yağ pompa rotorları ve dişlileri gösterilebilir [62].

4.4. Toz Üretimi

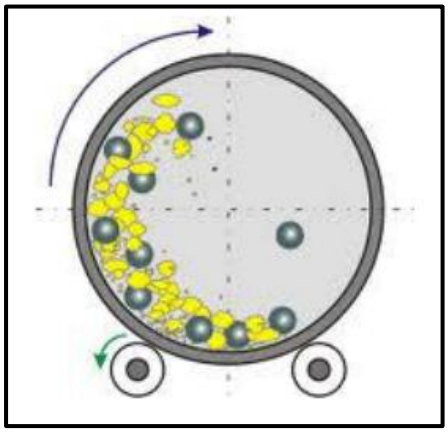
Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri toz metalurjisi yöntemidir. Seramik partiküllerin sıvı metal tarafından ıslatılmasında yaşanan güçlükler nedeniyle, toz metalurjisi ile kompozit malzeme üretimi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde genel olarak partikül ya da whisker formunda takviye elemanları ile toz haldeki metal kullanılarak, metal matrisli kompozit malzeme oluşturulmaktadır. Yaygın kullanılan takviye elemanları; silisyum karbür, grafit, titanyum karbürdür. En çok kullanılan matris malzemeleri ise; alüminyum, titanyum ve bakırdır [53].

Metal tozlarının üretiminde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Tozların imalinde kullanılan yöntemler, tozlara ait bazı özellikleri de tayin etmektedir. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda gösterilmiştir [63];

- Mekanik yöntemler
- Elektroliz ile üretim yöntemi
- Kimyasal yöntemler
- Atomizasyon yöntemleri

4.4.1. Mekanik yöntemler

Mekanik öğütme amacıyla dört ana yöntem tercih edilmektedir. Bunlar; darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basmadır. Darbe, malzemeye çekiçle vurma gibi anlık ve çok hızlı işlemleri içermekte ve malzeme çok küçük parçalara ayrılmaktadır. Aşındırarak öğütme, aşındırıcıların birbiri üzerinde sürtünme hareketi sayesinde parçacıkların boyutunun küçültülmesi işlemidir. Kesme, talaşlı imalatta olduğu gibi kesme işlemi ile malzemenin parçalanmasıdır. Sonuncu olarak basma ise, basma kuvvetleri ile bir malzemenin kırılma noktasına kadar deformasyona uğratılıp toz haline getirilmesi işlemidir. Mekanik yöntemlerle üretilen tozlar, düzensiz şekilli olup bu yöntemler; talaşlı imalat, öğütme, mekanik alaşımlama ve diğer darbeli yöntemler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bilyalı öğütme cihazıyla mekanik toz üretim tekniği Şekil 4.3'de gösterilmiştir [58].



Şekil 4.3. Bilyalı öğütme cihazıyla mekanik toz üretim tekniği

Yaygın olarak kullanılan diğer mekanik yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

Talaş Kaldırma Yöntemi: Talaş kaldırma yöntemi ile genellikle yüksek karbonlu çelik tozlar üretilmektedir. Değişik metal kaldırma yöntemi ile üretilmiş metal talaşı, kırma, öğütme vb. işlemlerle inceltilerek reaksiyona sokulmakta ve toz halinde üretilmektedir. Yeterli

gevreklikte olmayan metal parçalar içerisine katkı elemanı katılmak suretiyle gevrekleştirilerek kırılganlık sağlanır. Talaş kaldırma metodunda, bir önceki işlemden ve soğutma sıvısından kaynaklanan kirlenme ile oksitlenme problemleri görülebilir [33].

Bu teknikle, tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaş kaldırma teknikleri kullanılarak çok iri ve karmaşık tozlar üretilebilmektedir. Üretilen tozlar, öğütülerek daha ince tozlar haline getirilebilir. Toz malzemelerin özelliklerinin kontrolündeki zorluklar; oksitlenme, yağlanma, kir tutma ve diğer malzeme hurdaları ile karışarak kirlenme problemleri olabilmektedir. Yüksek karbonlu çelik tozları bu yöntemle üretilmektedir [53].

Değirmende Öğütme: Talaş kaldırma yöntemi ya da diğer darbe yöntemleri ile elde edilen tozlar, genellikle pul şeklinde, köşeli veya karmaşık formda olmaktadır. Bu tozlar öğütülerek inceltilebilmektedir. Öğütme işleminde, aşınmaya dayanıklı bilyeler ile birlikte iri taneli toz malzeme öğütücü değirmen içerisine konulur. Daha sonra değirmen döndürülerek sert bilyeler ile toz malzemenin çarpışması ve iri taneli toz malzemenin daha ince hale gelmesi sağlanır. Bu teknik ile karmaşık şekilli ve soğuk deformasyon sertleşmesi görmüş malzeme tozları üretilebilir. Değirmende öğütme işleminde, değirmen içerisine konulacak malzeme miktarı ile değirmenin dönme hızının belirli sınırlar içinde olması gerekmektedir. Bu yöntemin dezavantajları arasında, öğütücü bilyelerden kopan parçacıklar nedeniyle, tozlarda meydana gelen kirlenme, sıvanma problemiyle sünek malzemelerin öğütülememesi ve gürültülü bir yöntem olması sayılabilir [33].

Öğütülen malzeme gevrek olursa, bilyelerle çarpışmanın etkisiyle çok küçük tozlara bölünebilir. Eğer öğütülen malzeme sünek parçacıklardan oluşuyor ise, çarpışma sonucunda şekil değiştirerek yassılaşırlar. Homojen bir karışım için kaba konulacak bilyelerin hacmi ile öğütülecek malzemenin miktarı çok önemlidir. Bilyelerin hacmi kap hacminin yaklaşık yarısı kadar ve öğütülecek malzeme miktarı da kap hacminin yaklaşık % 25'i oranında olmalıdır. Demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum vb. kırılgan malzemeler bilyeli değirmenlerde mekanik olarak öğütülürler [61].

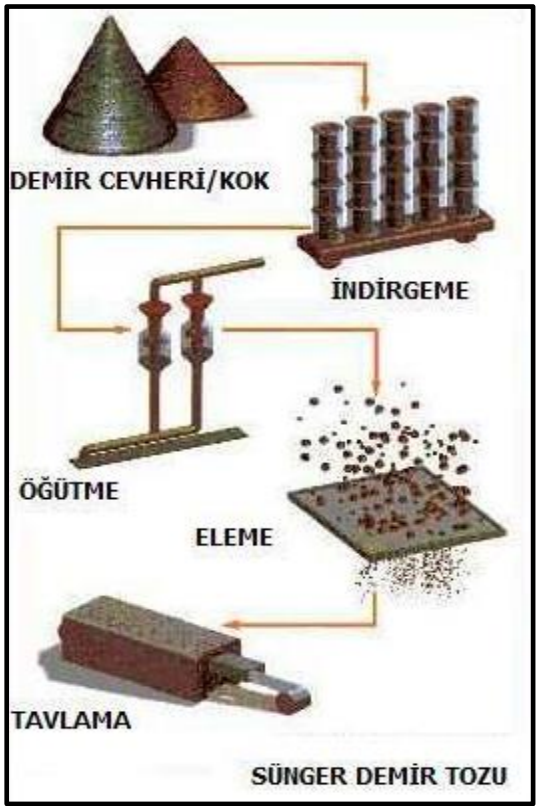
Mekanik Alaşımlama: Mekanik alaşımlama yöntemiyle, kuru ve katı haldeki tozlar önce birbirlerine kaynaklanır ve sonra tekrar bu kaynakların kırılarak daha ince ve homojen bir mikro yapıya sahip olması ve yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin üretilmesi sağlanır.

Mekanik alaşımlama tekniğinde tozlar kapalı bir kap içerisine konulmakta ve şaft döndürülmektedir. Şaft kolları ve bilyeler yardımı ile tozlar deforme edilirek, kırılma ve soğuk kaynaklaşmalar meydana getirilmektedir [62].

4.4.2. Kimyasal yöntemler

Metal tozlarının kimyasal yöntemle üretilmesi, metal oksitlerin (demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt) CO ya da hidrojen gibi indirgeyici gazlarla Oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesi işlemidir. Kimyasal yöntemle üretilen sünger-demir tozu bu tekniğin önemli bir uygulama örneğidir. Sünger-demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu işlemde Magnetit (Fe_3O_4) bileşimi, kok ve kireç taşı ile karıştırılarak seramik kaplara doldurulur. Karışım seramik kaplar içerisinde 1260 °C sıcaklıkta 68 saat fırınlanır. İndirgenmenin tamamlanması ile sünger-demir elde edilir. Elde edilen sünger-demir külçeleri yüksek sıcaklıkta birbirine kaynaklanmış tozlardan oluştuğundan öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne getirilir. Daha sonra Hidrojen gazı kullanılarak 870 °C'de tavlanma işlemiyle oksijen ve karbondan mümkün olduğu oranda arıtılır ve son olarak elekten geçirilir [64].

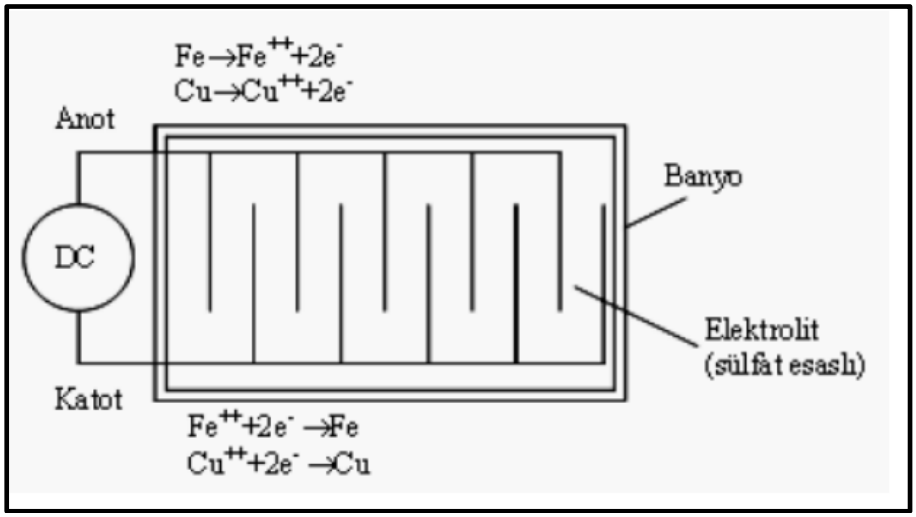
Metal tozları üretmek için kimyasal işlemlerde ilk önce kimyasal indirgeme uygulanır. Bazı kimyasallar, metali serbest bırakmak için metal oksidin oksitini azaltmada kullanılır. Ürün çok yüksek saflıkta metal tozları içerir. Oksidi azaltılmış bu tozlar, partiküller içinde bulunan gözenekler nedeniyle genellikle "süngerimsi" olarak karakterize edilir. Çözelti ile çökeltilmiş tozlar, dar partikül boyutu dağılımları ve yüksek saflık sağlayabilir. Termal ayrışma en çok karbonilleri işlemek için kullanılır. Bu tozlar öğütüldükten ve tavlandıktan sonra %99,5 saflığı aşar. Çöktürme yöntemleri ile tuzların içindeki metaller suda çözülerek metal tozları halinde üretilebilmektedir. Kimyasal yöntemlerle demir, bakır, nikel, kobalt, berilyum, tantal, titanyum gibi çeşitli metal tozları üretilebilir [55].



Şekil 4.4. Demir tozu üretimi [65]

4.4.3. Elektroliz ile üretim

Elektroliz yönteminde, oksitlerden oluşan tozlar katot uca akım verilerek elektrolitik banyoda çökertilir veya iyi kırılabilme özelliğiyle katot da toplanır. Banyo teknesi kurşunla kaplanmıştır. Elektrolitik olarak bakır sülfat ve sülfürik asit kullanılmaktadır. Anot bakır, katot ise antimuanlı kurşundur. Elektroliz yöntemi ile genel olarak bakır tozları imal edilmektedir. Örnek bir elektroliz ile toz üretim sistemi Şekil 4.5'de gösterilmiştir [53].

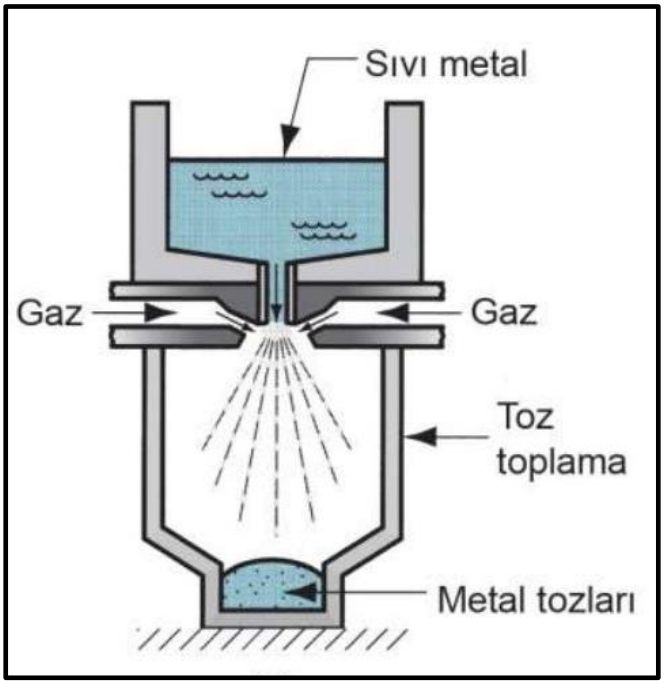


Şekil 4.5. Elektroliz ile toz üretimi

Elektroliz yönteminde, elektrolitik banyoda çökertilen ya da katotta toplanan metal kolaylıkla öğütülerek ince toz haline getirilir. Üretilen tozlar yıkanarak elektrolitten iyice temizlenir. Kurutma işlemi asal gazlar altında yapılarak oksitlenme süreci önlenir. Elektroliz sırasında oluşan parçacıklar dendritik bir yapı gösterirlerse de, daha sonraki işlemlerle bu yapı yok edilir. Elektrolitik tozların en büyük avantajı yüksek saflıkları, dolayısıyla iyi sıkıştırabilme özelliklerinin bulunmasıdır [64].

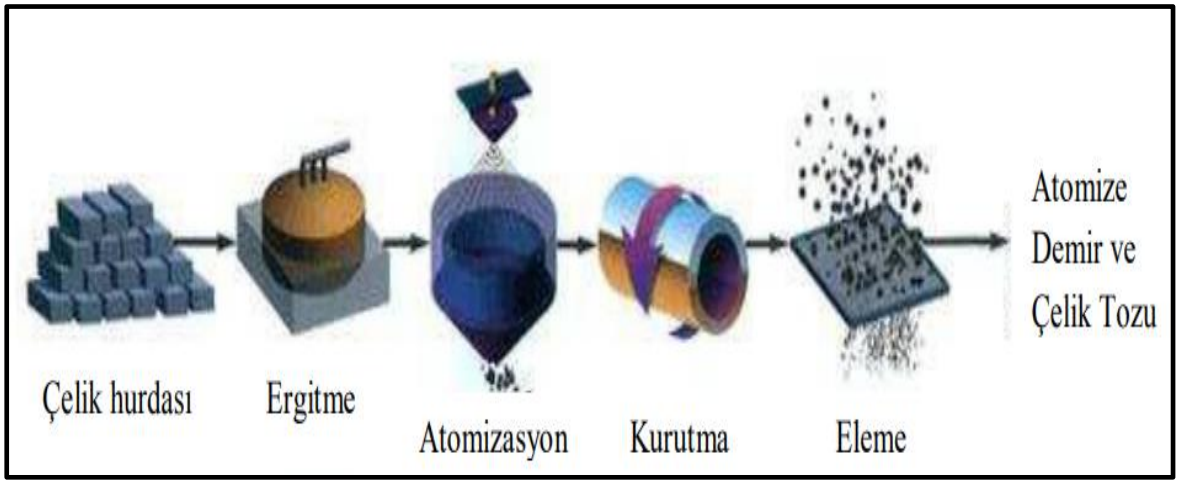
4.4.4. Atomizasyon yöntemleri

Atomizasyon yöntemi, bir sıvı demetinin değişik boyutlarda ve çok sayıdaki parçacıklara bölünmesi işlemi olarak tanımlanır. Atomizasyon yöntemiyle üretilen bir tozun ortalama boyutu, tane boyut dağılımı, toz yüzey kompozisyonu da dahil olmak üzere, kimyasal bileşimi ve mikro yapısı kontrol edilebilmektedir. Sıvı metalin gaz jeti ile parçalanması; gaz atomizasyonu, su jeti ile parçalanması ise su atomizasyonu olarak ifade edilmektedir. Atomizasyon ile toz üretimi kapsamında en yaygın kullanılan bu iki yönteme ilave olarak, merkezkaç kuvvetlerinin kullanılması olarak bilinen santrifüj atomizasyon toz üretim tekniği de bulunmaktadır. Bu işlemde kullanılan temel üretim elemanı olan atomizasyon ünitesinin iç yapısı Şekil 4.6'da gösterilmiştir [53].



Şekil 4.6. Atomizasyon ünitesi

Atomizasyon işlemi, akışkan metalin mekanik olarak ya da belirli bir hıza sahip sıvı veya gaz akımı ile parçalanması işlemidir. Diğer toz üretim tekniklerine göre atomizasyon yöntemleri, metal ve alaşım tozlarının üretiminde en çok tercih edilen yöntem olup metalik tozların %90'ı bu yöntemle üretilmektedir. Bu yöntemin temel prensibi, eriyik haldeki metalin çok ince bir şerit halinde akıtılması ve bu sırada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulmasıdır. Azot, argon ve hava en sık kullanılan gazlar iken, su ise en sık tercih edilen sıvıdır. Bu üretim yöntemi üç temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; ergitme, atomizasyon, katılaşma ve soğumadır. Atomizasyon işlemi ile toz üretim süreci Şekil 4.7'de görselleştirilmiştir [58].



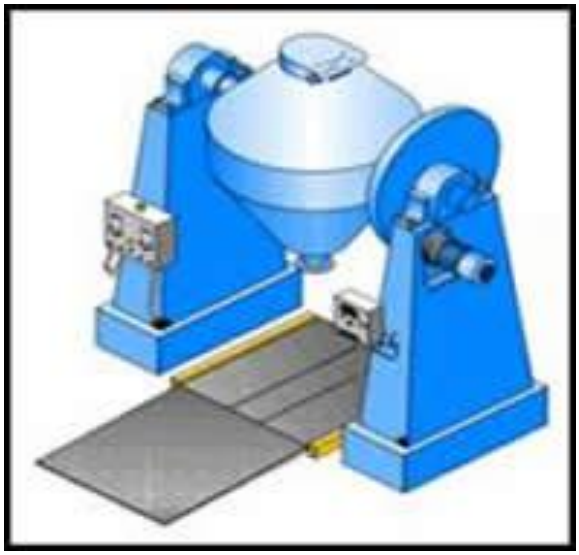
Şekil 4.7. Atomizasyon işlemi ile toz üretim süreci

4.5. Tozların Karıştırılması

Metal tozlarının karıştırılmasına yönelik yayınma ile karışım; dönen silindir içerisinde, konveksiyon ile karışım; vidalı karıştırıcıda ve kesme ile karışım ise; bıçaklı karıştırıcıda yapılmaktadır. Yayınma ile karışım, parçacıkların toz kütle içerisinde hareketi ile oluşmaktadır. Toz yatak düzlemi dış kenarda kırılarak yüzeyden akışın gerçekleşmesini sağlamaktadır. Sürekli dönen silindir taze tozları ve kesme düzlemlerini ortaya çıkarmakta ve bu böylece parçacıkların birbiri içerisinde karışımları teşvik edilmektedir. Konveksiyon karışım toz gruplarının bir yerden başka bir yere taşınması ile karışımlarını içermektedir. Vida küçük toz grubunu alt yüzeyden alarak, karışım içerisinde üst kısımlarda bir yere taşımaktadır. Kesme ile karıştırmada sürekli ayrışma ve tozların kayma düzlemleri üzerinde akmalar oluşur. Tozun karıştırılmasında bazı olumsuz durumlar söz konusu olmaktadır. Karıştırma özellikle sert parçalarda kirlenmeyi artırmaktadır. Yanlış tasarlanmış karıştırma süreci parçacık ayrışmasına neden olacağından, iki tozun arasındaki boyut, şekil ve yoğunluk farkı arttıkça sorunlar ortaya çıkmaktadır [33].

Kuru tozlar için yaygın olarak kullanılan karıştırıcılar toz-bağlayıcı karışımlarının hazırlanması için uygun olamamaktadır. Eriyik bağlayıcıların tozlarla karıştırılması amacıyla kullanılan bileşik hazırlayıcıları parti tipi ya da süreklidirler. Parti karıştırıcı, tozu ve polimeri ısıtırken yüksek darbeli kesme hareketleri uygularlar. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere parti karıştırıcının pedalları Z şekilli kanatçıklardan oluşmaktadır. Normal bir parti 50 kg kadar olabilmektedir. Karıştırma esnasında oluşan homojensizlikler sonradan

problemlere neden olmaktadır. Karışımın her kesiminde aynı toz miktarı bulunmalı ve tozun parçacık boyut dağılımı da her bir kesimde aynı olmalıdır. Karışımın iyi olmadığı bir alanın viskozitesi daha yüksek olmaktadır. Bu sebeple homojenliğin en iyi ölçüsü genellikle viskozite olmaktadır [62].



Şekil 4.8. Toz karıştırıcısı

Metal tozlarının karıştırılması V veya Y tipi karıştırıcılar adıyla bilinen, çift borulu ve çift konili karıştırıcılarla yapılmaktadır. Karıştırma işlemi, tozların tane boyutu ve şekline göre yığılmasını önlemekte, akma hızını ve görünür yoğunluğunu da değiştirmektedir. Karıştırma işleminin uzun tutulması tanelerin kırılarak küreselleşmesine ve önemli oranda deformasyona uğramasına sebep olabilmektedir. Buda tozun sıkıştırılabilme özelliğini azaltarak, şekillendirme sırasında gerekenden çok soğuk işlemi gerektirmektedir. Sinterleme dahil bütün işlem basamaklarının değerlendirilmesi yapılmadan, yeterli seviyede karıştırma yapılıp yapılmadığına karar vermek oldukça güç olmaktadır [64].

4.6. Tozların Preslenmesi (Sıkıştırılması)

Bir toz kütlesindeki toz parçacıklarının hepsi aynı boyutta ve şekilde değildir. Bu sebeple sıkıştırma öncesi tozların homojen dağılımlarının elde edilmesi amacıyla tozların yağlayıcılarla birlikte belirli bir süre karıştırılması gerekmektedir. Yağlayıcı kullanılmasındaki amaçlar, tozların şekillendirilmesi esnasında toz kütlesinin kalıp duvarlarını daha az aşındırması, kalıptan daha kolay çıkarılması ve toz taneleri arasındaki

sürtünmelerin azaltmasıyla tozların akışının kolaylaştırılması ve meydana gelecek enerji kayıplarının azaltmasıdır. Yağlayıcıların düşük yoğunluklarının olması sebebiyle çok az miktarda toza ilave edildiklerinde çok büyük bir hacim işgal edebilirler. Grafit tozu, metal tozlara yağlayıcı olarak %1-1,5 oranında ilave edilebilir. Kalıplama sonrası parçanın kalıptan çıkartılması için gerek duyulan sıyırma basıncının düşük olmasını sağlayan yağlayıcılar iyi tür yağlayıcılardır. Yağlayıcı ve toz ideal bir sürede karıştırılmalıdır. Çok karıştırma, düşük ergime derecesi olan yağlayıcıların ısınarak yapışkan bir hal almasına neden olabileceği gibi, az karıştırma ile yağlayıcılardan beklenen özellikler karışıma yansıyamaması sonucu doğabilmektedir. Bazı yağlayıcı türlerinin yapıştırıcı görevi görmesiyle mukavemet artışının olduğu gibi, bazıları da sinterleme sırasında yanarak gözenek artışına neden olabilir ve böylece sinterleme ile artması gereken yoğunluk düşebilir [33].

Yağlayıcı ile karıştırılan metal tozları, üretilecek malzemenin sinterleme öncesinde son şeklini almak ve istenen miktarda gözeneklik sağlamak amacıyla, üretilecek parça modeline uygun hazırlanmış kalıp içerisinde presle sıkıştırırlar. Sıkıştırmada kullanılan kalıp ve pimler tungsten karbürden, alt ve üst zımbalar ise yüksek kaliteli takım çeliğinden yapılmalıdır. Şekillendirme işleminden önce tozların yoğunluğu yaklaşık olarak görünür yoğunluğa eşit olmaktadır. Uygulanan basıncın artmasıyla tanecikler arasındaki nokta temas yüzeyi bozulur ve gözeneklik azalır. Başlangıç temas sayıları, tanelerin yeniden düzenlenerek kayma meydana gelmesiyle artar. Artan basınçlarda plastik deformasyon oluşmasıyla temas yüzeylerinde ve yoğunlukta artış meydana gelir. Böylece, basınç temas yüzeylerinde deformasyona neden olur. Deformasyon esnasında ortaya çıkan soğuk kaynak, sıkıştırma sonrası ham dayanıklılık artışına neden olur. Artan basınçla birlikte gözeneklik azalır ve temas sayısı çoğalır. Bu sayede bütün toz taneleri soğuk deformasyon sertleşmesine uğrar [63].

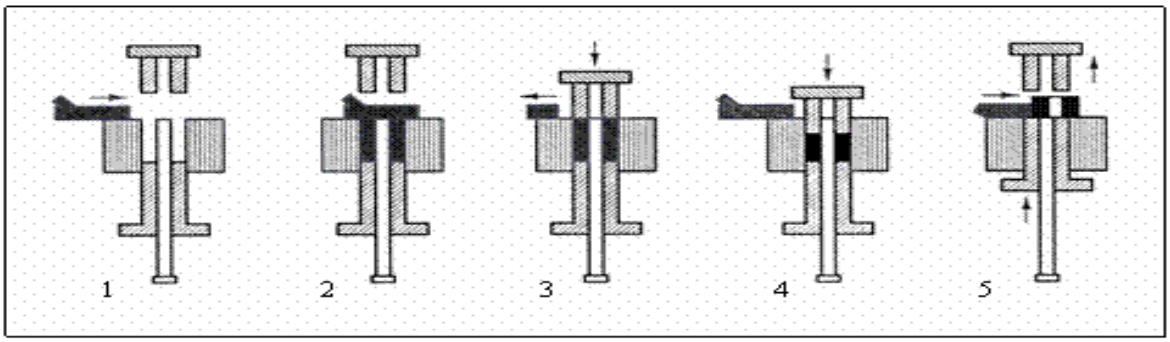
Sıkıştırma esnasında tozların kalıp içerisinde kütlesel bir hareketi meydana gelmektedir. Sıkışma, genel olarak basınç kuvveti doğrultusunda ve kalıp yan yüzeylerine doğru oluşur. Düşük yoğunluklu tozlarda temas yüzeyinin az olması sebebiyle, toz kütle hareketi daha kolay sağlanacaktır. Sıkıştırma sırasında plastik deformasyonla birlikte tozlardaki gözenek miktarı azalmakta ve yoğunluk artmaktadır. Artan pres kuvvetine bağlı olarak, presleme sonrasında toz numunelerin mikro sertliklerinde sağlanan artış, plastik deformasyon sertleşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Yoğunluk artışı, kütle içerisindeki hava

boşluklarının yerini toz tanelerinin almasıyla gerçekleşir. Artan basınç ile birlikte havanın bir kısmı yapıyı terk etmez ve gözenekler içerisinde kalır. İç cephe hasarlarına neden olan hava, yüksek basınçlarda artması gereken dayanıklılığın düşmesine neden olabilir. Sıkıştırma işleminde oluşan önemli bir sorun da toz ile kalıp duvarları arasındaki sürtünmedir. Tozun kalıp içerisindeki derinliği arması sırasında, toz ile kalıp arasındaki sürtünen yüzey ve buna paralel olarak da sürtünme kuvveti artar. Sonuçta uygulanan basınç ile toz üzerine aktarılan basınç, sürtünme kuvveti nedeniyle farklı olacaktır. Kalıp duvarlarının yağlanması, sürtünmeyi azaltarak sıkıştırmaya yardımcı olacaktır. Sıkıştırma neticesi meydana gelen toz tanecikleri arasındaki bağlanma işlemi ham mukavemeti meydana getirir [61].

4.6.1. Kalıpta presleme

Basıncın tek ya da çift yönlü biçimde uygulanabildiği kalıpta sıkıştırma, yaygın kullanılan toz şekillendirme yöntemidir. Tek yönlü sıkıştırmada, toz üst zımbanın hareketi ile sabit alt zımbaya doğru sıkıştırılır. Bu teknikte, tozlar tanecikleri ve tanecikler ile kalıp duvarı arasındaki sürtünme, düzensiz bir basınç dağılımına sebep olacağından, sıkıştırılan malzemedeki yoğunluk homojen bir dağılım göstermez. Yoğunluk hareketli zımba tarafında daha çok, ancak sabit zımbaya doğru gittikçe daha az olmaktadır. Çift yönlü preslemede, toz alt ve üst zımbaların birbirine doğru hareketi ile sıkıştırılmaktadır. Bu yöntemle preslenen malzemedeki yoğunluk dağılımı, tek yönlü preslemeyle üretilen malzemelerin yoğunluk dağılımından daha homojen olmaktadır [57].

Birçok durumda preslemeden önce tozlar 400-800 °C arasında bir ısıtma işlemine de tabi tutulmaktadır. Bu sayede oksit, rutubet, karbon, kükürt, fosfor vb. istenmeyen maddeler mümkün olduğunca ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca, ısıl işlemle tozların sertlikleri de azaltılır. Böylece tozların sıkıştırılabilirliği artar. Tavlama sıcaklığı arttıkça ve oksijen azaldıkça sıkıştırılabilme özelliği artar. Presleme sıcak veya soğuk olarak yapılabilir. Şekil 4.9'da tek eksenli bir presleme işlemine ait işlem basamakları görülmektedir [64].



Şekil 4.9. Toz presleme işleminin basamakları. 1) İşlem başlangıcı 2) Toz doldurma 3) Presleme işlemi 4) Presleme bitişi 5) Parçanın çıkarılması

Kalıpla presleme bir yük altında serbest yapıdaki toz taneciklerinin istenilen şekle dönüştürülmesi amacıyla yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. Tozların preslenmesindeki ana amaç, ham yoğunluk ve dayanıklılığın sağlanmasıdır. Bu işlem için genellikle hidrolik, mekanik ve pnömatik presleme üniteleri kullanılır. Preslerin uyguladıkları basınç değerleri 70-700 MPa arasında olmaktadır. Pratikte kullanılan ortalama basınç değerleri genellikle 145-450 MPa arasındadır [45].

4.6.2. Yüksek basınçlı presleme

En yaygın sıkıştırma yöntemi, çelik gibi sert bir metal kalıp içerisinde basınç altında eksenel presleme yapılmasıdır. Tek bir işlemle kompleks parçaları yüksek üretim hızında (ortalama dakikada 25 birim) üretmek mümkün olmaktadır. Presleme sonrasında parça kalıptan çıkarılabilecek ve sinterleme öncesinde taşınabilecek kadar mukavemete sahip olmaktadır [66].

Yüksek preslenebilme özelliğindeki demir tozları 800 MPa basınç altında 7.3 g/cm3 (ya da %93 teorik yoğunluk) yoğunluk değerine ulaşabilmektedir. Ilık presleme kullanılarak, özel yağlayıcı katılmış tozlar 130 ºC, kalıp ise 150 ºC ısıtılır. Yoğunluk soğuk preslemeye mazaran 0.2 g/cm3 daha artırılabilir. Ilık olarak preslenen parçalar sinterleme öncesinde talaşlı imalat için gerekli dayanalılığa sahiptir. Ham parçaların talaşlı imalatı kesici takımların aşınmasını ortadan kaldırmaktadır [64].

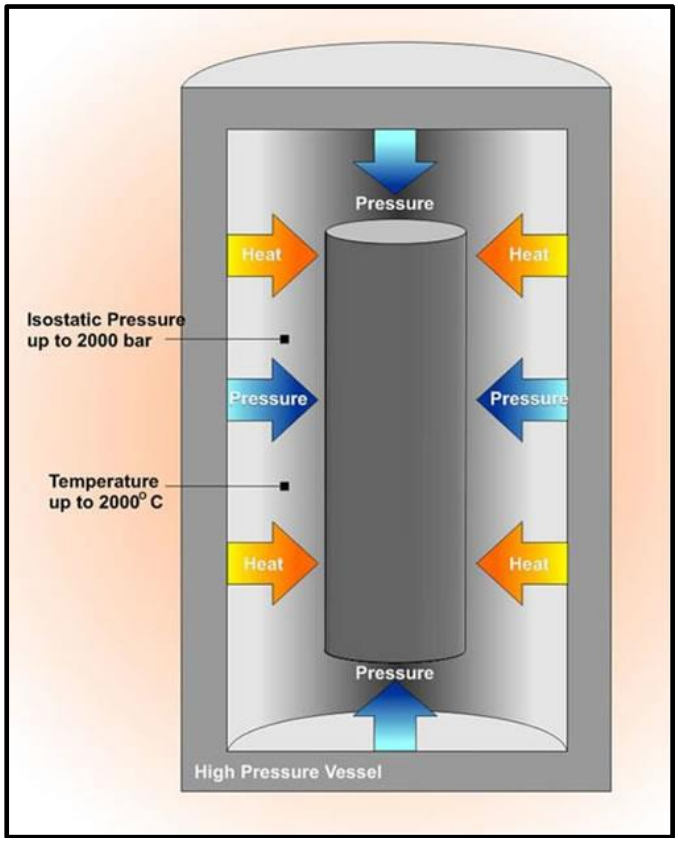
Preslerin büyük bir kısmının kapasitesi 100 ton civarındadır. Günümüzde 200-300 ton kapasiteli pres üniteleri yapılmıştır. Presleme kapasitesi 3000 ton olan modeller de

bulunmaktadır. Toz metalurjisi ürünlerinin kesit alanı maksimum 2000 mm² olmaktadır. Ancak, yüksek kapasiteli pres ünitelerinin kullanılması ile bu değer 6500 mm'²ye kadar çıkabilmektedir. Uygulamaların çoğunda, toz karışımı, yerçekimi etkisiyle kalıbı doldurulmakta, fazla kısımlar alınmakta ve tozu sıkıştırmak için pres kapatılmaktadır. Toz miktarı için hacim ya da ağırlık esasına göre bir başlangıç ölçüsü oluşturulur. Pinomatik ve mekanik sistemlerin yanında patlayıcı ile sıkıştırma uygulanan teknikler de geliştirilmiştir. Bu yöntemde çok yüksek bir basıncın kısa sürede uygulanması sağlanmaktadır. Basınç süresi 50 μs ile 50 ms arasında değişmektedir [66].

4.6.3. Sıcak izostatik presleme

Sıcak izostatik presleme (HIP), yoğun malzemeleri üretmek için bir veya birden çok parçaya izostatik olarak yüksek basınçlı gaz ile basınç uygulanmasını içeren bir yöntemdir [67].

Bu işlemde, metal gözenekleri tamamen kapandığı için uygun bir yoğunluğa ulaşmak amacıyla parçalar ön sinterleme işlemine tabi tutulurlar. Bu süreç, HIP işlemleri için malzemeyi uygun hale getirir. Yüksek sıcaklık ve basınç, plastik deformasyona, sürtünmeye ve difüzyona neden olur. metaldeki gözenekliliği ortadan kaldırmak için hassas döküm parçalarına sıcak izostatik presleme işlemi uygulanarak malzeme hataları giderilir ve malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır. Sıcak izostatik presleme, toz metalürjisinde önemli bir araçtır. Katı durumdaki tozu tam yoğun parçalara dönüştürmek için kullanılır. Böylece, geleneksel eritme, presleme ve sinterleme üretim teknolojileriyle elde edilenden daha iyi fiziksel özelliklere ulaşılır. Sıcak izostatik presleme, katı veya toz formunda iki veya daha fazla malzemenin bir arada bağlanmasına veya kaplanmasına da olanak sağlar [68].



Şekil 4.10. Sıcak izostatik presleme (HIP)

HIP üniteleri ile 200 MPa basınca kadar ulaşılabilir. Bu yüzden sıcak presleme işlemine kıyasla üretim sıcaklığı bir miktar düşüktür. Sıcaklıktaki düşme, elmasın zarar görebileceği 1100 °C'yi aşağıya çekeceğinden yeni teknolojik fırsatlar sunar. Son yıllarda HIP teknolojisi kullanılarak elmaslı boncuk tellerin üretiminde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Sıcak izostatik presleme, iç gözenekliliği ortadan kaldırarak dökümlerin mekanik özelliklerini geliştirir. Yüksek basınç, sıcaklık ve süre malzemenin katı halde akmasını ve atomik seviyede bağlanmasını sağlar. Aynı ilke, metal, seramik, kompozit veya polimer tozlardan tam yoğunlukta malzemelerin üretiminde kullanılır [69].

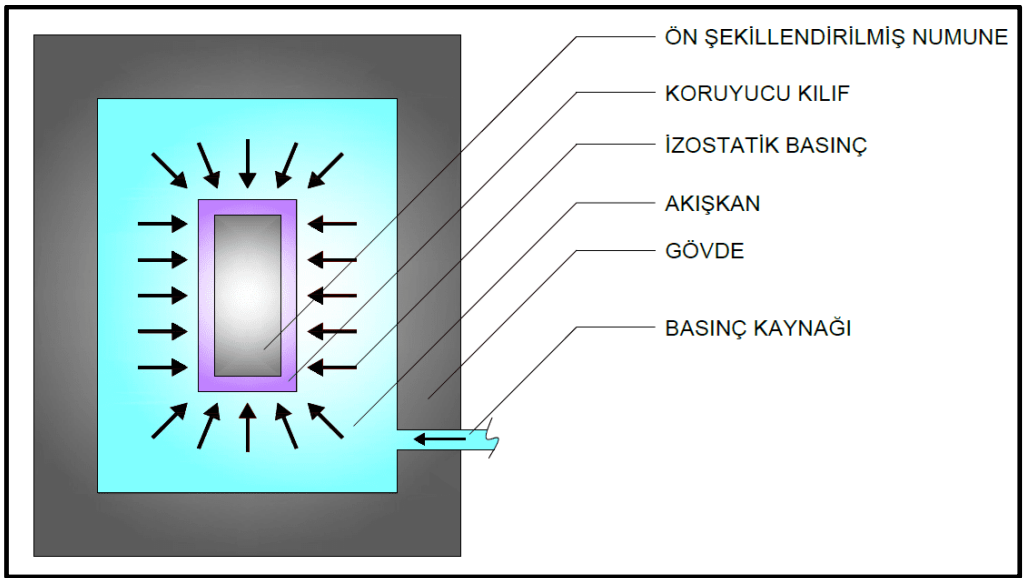
4.6.4. Soğuk izostatik presleme

Soğuk izostatik presleme (CIP); metal, seramik, kompozit ve/veya polimer tozların, içinde, daha sonraki işlem aşamalarında alınması gereken herhangi bir bağlayıcı olmadan, ham işlem diye de bilinen, mekanik olarak sıkıştırılması işlemidir. Basınç tüm yönlere, tek eksenli preslemeyle üstün özellikler elde ederek kalıp duvarı yağlayıcıları ile kirlenme

olasılığını ortadan kaldırarak eşit olarak uygulanır. CIP, düşük paketleme faktörlü tozların kapsülleme ve HIP için yeterli yoğunlukta elde etmesini sağlar [68].

İzostatik (eş eksenli) soğuk presleme yöntemi toz tanecik içeren kapsülün her noktasından eşit oranda basınç uygulanarak toza şekil verilmesi işlemidir. Basınç uygulanması sırasında yırtılma veya patlamaya karşı dayanıklı bir kalıp kullanılmaktadır. Yöntem ıslak ya da kuru torba olmak üzere iki çeşide ayrılır. Islak torba metodunda tozla doldurulan kalıp, sıvı ya da yağ içeren bir kazan içerisine daldırılarak basınca maruz bırakılır ve parçaya şekil verilir. Islak torba metodu daha büyük ve kompleks şekilli parçaların üretilmesi için idealdir. Kuru torba metodunda ise esnek kalıp yine bir basınç kazanının içerisine yerleştirilir ve kalıp sabitlenir. Uygulanan basıncın etkisiyle parçaya istenilen şekil verilir. Kuru torba metodu ıslak torba metoduna nazaran seri üretim için daha uygundur. Ancak bu yöntemde basıncın kontrol edilememesi ya da işlem sonunda basıncın hızlı bir şekilde parçanın üstünden ayrılması katmanlaşma ya da çatlak oluşumuna neden olabilir [70].

Metal, seramik, polimer ya da kompozit tozların izostatik bir ortamda su ya da yağ basıncı ile sıkıştırılma işlemi Şekil 4.5.'te gösterilmiştir. Tek eksenli preslemeye nazaran üstün özellikler elde edilir. Bu yöntemde basınç tüm yönlere eşit dağılır, kalıp duvarı yağlayıcıları ile kirlenme olasılığı ortadan kaldırılır, eşit bir şekilde her yönden homojen yük dağılımı sağlanır [71].



Şekil 4.11. Soğuk İzostatik Presleme (CIP)

Toz metalürjisi prensibine dayanan bu imalat tekniğinde, tozun sıkıştırılması ile kalıpta yoğunlaştırma işlemi yapılır. Uzunluk/çap oranı büyük olan karmaşık şekiller veya vida, somun vb. oyuklu ürünler için soğuk CIP yöntemi tercih edilmektedir. CIP yöntemi genel olarak 350MPa basınç altında uygulanmaktadır. Bu yöntemde genellikle yağlayıcılar kullanılmaz. Bununla birlikte, sert metallerin ham yoğunluğunun arttırılması amacıyla bazı parafinler ilave edilebilir. 1400MPa'a kadar sıkıştırma basınçlarının mümkün olmasına rağmen, soğuk izostatik preslemede genellikle 420MPa civarındaki basınç değerleri kullanılır. Malzeme yüksek basınç altında izostatik olarak sıkıştırılarak, sinterleme öncesinde en fazla ham graviteye ulaşılır. Soğuk izostatik presleme sırasında, "Pascal Prensibi" gereğince toz malzemeye her doğrultuda eşit oranda basınç uygulanmaktadır. Preslerin kullanıldığı sistemlerden farklı olarak pres ile kalıp duvarı arasında sürtünmeden doğan kalıcı gerilmeler oluşmamaktadır. Bu işlemden sonra sıkıştırılarak gravitesi arttırılan malzemenin yoğunluk vb. istenen son özelliklerin verilmesi amacıyla sinterleme işleminin yapılması gerekmektedir [71].

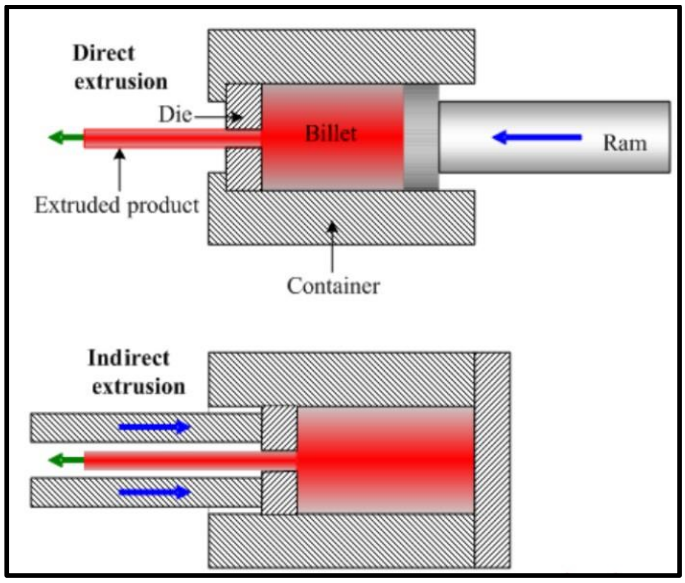
4.6.5. Ekstrüzyon ile presleme

Metal tozlarının şekillendirilmesinde sınırlı bir şekilde kullanılan ekstrüzyon yönteminde tozlar kapalı bir kap içine doldurulduktan sonra, kabın havası vakumla alınır. Kabın içerisindeki tozlar ısıtılarak ekstrüzyon yoluyla parça üretim işlemi gerçekleştirilir. Ekstrüzyon tekniği ile üretilen parçalarda yüksek yoğunluk elde edilmektedir. Ekstrüzyon öncesi tozlar ısıtılırsa ayrıca sinterleme işlemine gerek kalmamaktadır. Ekstrüzyon işlemi genellikle daha önce izostatik presleme ile yoğunlaştırılmış metal tozlarına uygulabilir. Bu teknik en çok takım çeliklerinin üretiminde kullanılmaktadır. Ekstrüzyonda seramik toz karışımında plastisiteyi artırmak için %25-30 oranında organik bağlayıcı eklenerek yapışkanlık sağlanır. Karışımın iyice karıştırılmasından sonra uygun şekildeki kalıptan ekstürize edilir. Bağlayıcı miktarı fazla olduğu için şekillendirme sonrası bağlayıcı giderme işlemi yapılır. Ekstrüzyon yönteminin kullanım alanları [72];

- Uzunluğu genişliğinden fazla olan çubuk ya da tüp şeklindeki seramik parçalar,
- Alumina, mullit, zirkonya fırın tüpleri,
- Yalıtım malzemeleri,
- Tüp şeklindeki kapasitörler,

- Çubuklar,
- Tuğla, fayans gibi sabit kesitli ve simetriye sahip ürünlerin üretiminde kullanılır.

Toz ekstrüzyonu ilk defa tungsten tellerinin üretim işleminde kullanılmıştır. Dekstrin veya şeker gibi organik bir madde ile karıştırılan tungsten tozu plastik hale getirilir ve sonra ekstrüzyon işlemiyle tel halinde çekilir. Daha sonra hidrojenle ısıtılarak nem ve organik maddeleri buharlaştırılır. Sinterleme işlemi sonrasında daha yüksek yoğunlukta tungsten filamanlar üretilmiştir. Günümüz toz metalurjisi teknolojisinde plastifiyon takviyesiyle metal tozlarının ekstrüzyonu oldukça sınırlı kalmaktadır. İnce kesitli tungsten karbür tüpler ile poroz yapılı paslanmaz çelik tüplerin üretiminde kullanılmaktadır. Sinterleme sırasında plastifiyanın uzaklaştırılması sonucunda önemli ölçüde çekmenin meydana gelmesi nedeniyle boyut kontrolü zor olmaktadır. Bir seramik toz bağlayıcı karışımının, bağlayıcı eriyene kadar ısıtılması ve daha sonra parçanın istenilen şekli alarak yeniden katılaştığı bir kalıbın içerisine basınçla doldurulması enjeksiyon kalıplama tekniğinin temel prensibini oluşturmaktadır. Doldurulmuş kalıbın soğutulması ile katılaştırılan polimer seramik karışımından polimerin kontrollü olarak uzaklaştırılmasıyla sinterlemeye hazır, karmaşık şekilli parçalar üretilir. Enjeksiyonla kalıplama işleminin geçmişi 1869 yılına dayanmaktadır. Metal tozların ilk kez enjeksiyonla kalıplanması ise 1977 yılında yapılmıştır. Geleneksel toz metalurjisi yöntemleri ile şekillendirilmesi mümkün olmayan boşluklu parçalar ve et kalınlığı < 0,6 mm-5 mm arasında olan kompleks parçaların enjeksiyonla kalıplanmaları mümkün olmaktadır [71].



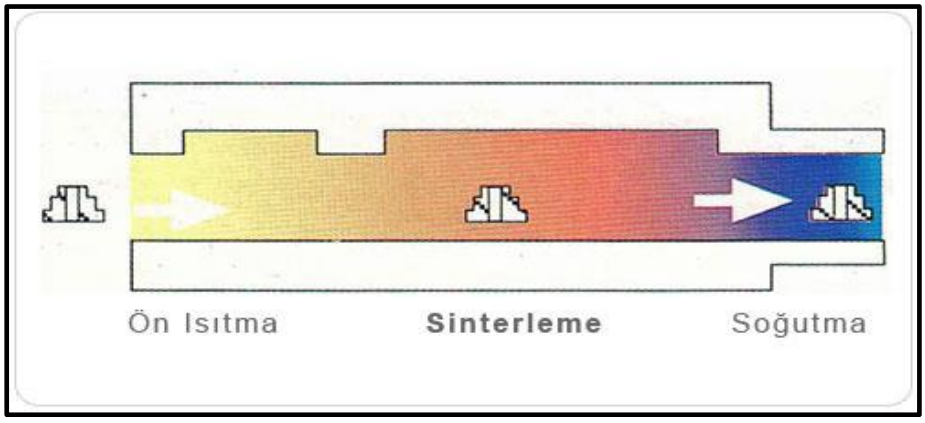
Şekil 4.12. Ekstrüzyon presleme

Hassas dökümle ya da talaşlı işlemlerle üretilen küçük ve karmaşık parçalar artık günümüzde metal tozlarının termoplastik bir malzeme ile karıştırılarak ardından plastik bir form oluşturana kadar ısıtılması ve basınç altında kalıp boşluğuna enjeksiyonu ile üretilebilmektedir (Şekil 4.12.). Toz enjeksiyon kalıplama yöntemleri polimer üretim süreçlerine oldukça benzemektedir. Plastik ve akışkan özellikler kazandırmak amacıyla tozlara hacim olarak %8-20 oranlarında termo-plastik polimer bağlayıcılar ya da sentetik mumlar katılmaktadır. En çok kullanılan bağlayıcılar polipropilen veya parafin mumlarıdır. Metal toz, organik bir bağlayıcı ile karıştırılarak akışkan ve homojen bir malzeme haline getirildikten sonra, 135-205°C sıcaklık aralığında bir piston aracılığıyla enjeksiyon makinesine yüklenerek, 2000 Psi (140 MPa) değerinde bir basınçla küçük bir boşluktan geçirilmeye zorlanır ve bir kalıba doldurulur. Kalıplama periyodu parça boyutuna bağlı olarak 10-90 sn. arasında olmaktadır [72].

Kalıptan çıkarılan parçalardaki bağlayıcı malzeme daha sonra solvent ekstraksiyonu ya da kontrollü ısıtma tekniğiyle buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Son olarak uygulanan sinterleme sürecinde parçalarda %20-25 oranında hacimsel büzülme oluşur ve yoğunluk %95'e kadar artar. Bağlayıcının uzaklaştırılması bu işlemin en pahalı ve zaman alıcı yönünü oluşturmaktadır [71].

4.7. Sinterleme

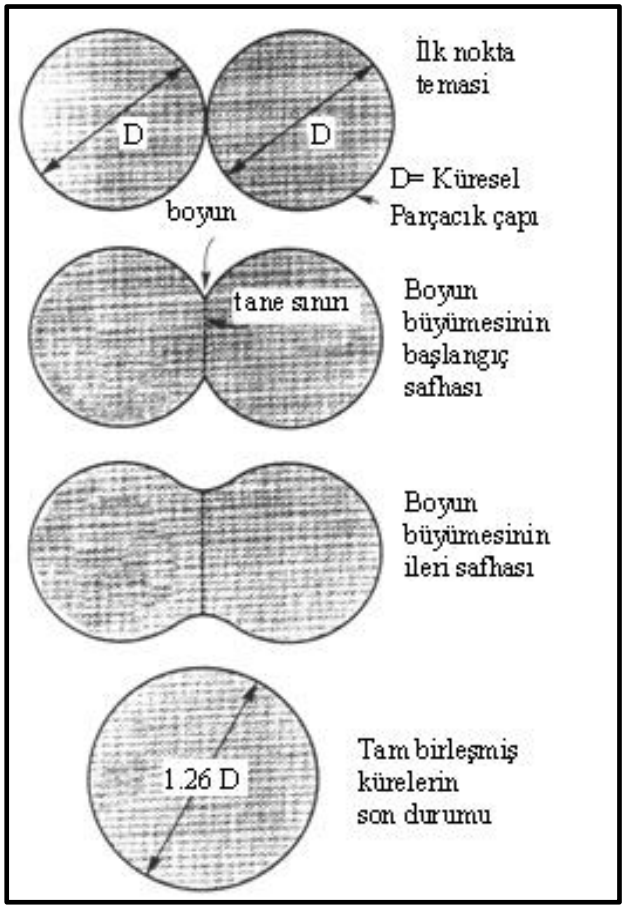
Sinterleme, toz taneciklerinin birbirlerine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde dayanıklılık artışına ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesini sağlayan ısıtma işlemidir. Bu kapsamda, ergime sıcaklığının altında bir noktada katı haldeki atom hareketiyle işlem gerçekleşir. Ancak bu sonuçlar çoğu durumda sıvı faz oluşumuyla birlikte meydana gelir. Mikro yapıda, temas eden tanecikler arasında boyunlaşma kendini gösterir. Bu boyunlaşma olayıyla dayanıklığın ham mukavemete oranla artması ve diğer bazı özelliklerde iyileşme sağlanır [21].



Şekil 4.13. Sinterleme işlemi

Sinterleme işlemi, yüksek sıcaklıkta atomların yayılması ve küçük taneciklerin yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Toz üretimi malzemeye enerji vererek yüzey alanı ya da yüzey enerjisi yaratma işlemidir. Sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilmektedir. Birim hacmindeki yüzey enerjisi tanecik boyutuyla ters orantılıdır. Bu sebeple, daha yüksek özgül yüzey alanına sahip küçük tanecikler daha yüksek enerjiye sahip olmakta ve daha hızlı sinterlenmektedir. Ancak yüzey enerjisinin tamamı sinterlenme işlemine harcanmaz. Kristal formlu katı malzemelerde hemen hemen bütün tanecik temas noktası sınırlarını enerjiye sahip olan tane sınırı oluşturmaktadır. Bu sayede boyun büyümesi yüzey enerjisini azaltırken, tane sınırı enerjisini artırmaktadır. Doğal olarak bu olay yalnızca yüzey enerjisindeki azalmanın parçacık sınırının enerjisinde meydana gelen artıştan yüksek olması durumunda oluşur [33].

Sinterleme, gözenekli bir yapı kazandırılmış tozların yüzey alanının küçülmesi, tanecik temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesini sağlar. Gözenek hacminin küçülmesini sağlayan ısı, aktive edilmiş malzeme taşınımı olarak nitelenebilir. Sıkıştırılmış toz tanecikler arasındaki yapışma, mekanik kitlenme ve benzeri türden zayıf bağlar olarak, kristal yapı içerisindeki bağ dayanımına oranla çok zayıf kalmaktadır. Bu nedenle; sıkıştırılmış ham yoğunluktaki malzemeler dayanıklık ve yüksek yoğunluk kazandırmak için ergime noktasının altında ısıl işleme tabi tutulur. Sinterlemenin başlaması noktasal olarak temas halinde bulunan toz taneciklerinin katı-hal bağına dönüşmesi ile oluşur. Sinterleme işlemi esnasında, nokta teması ile başlayan, ara tanecik bağının gelişmesi ile devam eden sisteme çift-küre sinterleme modeli denilmektedir (Şekil 4.14). Bu modelde, tanecik teması neticesinde meydana gelen boyun büyümesiyle yeni bir tane sınırı oluşmakta ve iki tanecik tek bir tanecik oluşturacak biçimde birleşmektedir [64].



Şekil 4.14. Toz sinterleme işlemi

Sinterleme işlemindeki sıcaklık, tek bileşenli malzemelerde metalin ergime sıcaklığının 2/3 ya da 4/5'i alınarak tespit edilmektedir. Birden fazla bileşenli malzemelerde ise sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığı fazla olan bileşenin ergime sıcaklığının altında, ergime sıcaklığı az olan bileşenin ergime sıcaklığının üzerinde seçilmektedir. Demir alaşımları 1000-1300 °C, refrakter metaller 2000-2900 °C arasında sinterlenir. Sinterleme süreleri kullanılan malzemeye göre değişim gösterir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça sinterleme süresi kısalmaktadır. Sahip oldukları büyük yüzeyler sebebiyle toz kütlelerinde yüzey enerjisi meydana gelir. Sinterleme esnasında tozların birbiriyle kaynaşma ve toz yüzeylerinin düzelmesiyle yüzey alanları ve dolayısıyla yüzey enerjileri azalmaktadır [53].

4.8. Tam Yoğunluk İşlemleri

Sinterlenmiş malzemenin yoğunluğunu ve doğruluğunu daha da arttırmak ya da ilave şekillendirme gerçekleştirmek amacıyla ikincil işlemler denilen süreçler gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamdaki tam yoğunluk işlemleri aşağıda listelenmiştir [73].

- Yeniden Presleme: Sinterlenen kısma kapalı olarak baskı yaparak yoğunluğu artırma ve malzeme özelliklerini geliştirme uygulamalarıdır.
- Boyutlandırma: Malzeme özelliklerini iyileştirmek için sinterlenmiş parçaya boyutsallık kazandırmaktır.
- Kaplama: Sinterlenen parça yüzeyine presleme işlemiyle yeni yüzey ekleme uygulamasıdır.
- İşleme: Dişler, yan delikler, diğer vb. elde edilemeyen geometrik özellikler oluşturulmak amacıyla yapılan işlemlerdir.

Üretilen yeni kompozit malzemede oluşan gözeneklik, toz metalurjisi teknolojisinin doğal bir sonucudur. Oluşan gözenek alanını yağ, polimer ya da metallerle doldurarak özel ürünler oluşturulabilir. Yaygın kullanılan iki yöntem aşağıda özetlenmiştir [72].

1. Emdirme (Emprenye): Sinterlenmiş bir parçanın gözeneklerine yağ ya da başka bir sıvı doldurulması olarak kullanılan terimdir. Emdirme işlemleriyle;
   - Yağla emprenye edilmiş rulmanlar, dişliler vb. bileşenler üretilir.
   - Gözenek boşluklarına önce basınçla sızdırılarak ve daha sonra sızdırmaz kısmı oluşturmak için katılaştırılarak, sıvı polimer reçineleri emprenye edilir.
2. Sızdırma: Toz metalürjisi ile üretilen parçanın gözeneklerinin erimiş bir metalle doldurulmasıdır. Sızdırma işleminde;
   - Dolgu, metalinin erime noktasının altında olmalıdır.
   - Dolgu, metalinin sinterlenmiş bileşenle temas ederek ısıtılmasını içerir, bu sayede kılcal yapı dolguyu gözeneklere doğru çeker.
   - Elde edilen formun nispeten gözenekliği azdır. İçeri sızdırılan kısmın daha iyi bir yoğunluğu ve ayrıca geliştirilmiş tokluk ve dayanıklılığı bulunmaktadır.

Sinterleme işleminden sonra, bahse konu ikincil işlemler özel şartlarda yerine getirilmelidir. Yoğunluğun artırılması ve son ölçüt toleranslarının korunması amacıyla boyutlandırma ya da presleme gibi çok sayıda işlem bulunmaktadır. İstenilen özellikteki mikro yapıyı elde etmek amacıyla buharlı işleme, sertleştirme, karbonlama, nitrasyon, indüksiyon sertleştirme vb. ısıl işlemler gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler genellikle temperleme işlemiyle uygulanır. Sürekli sinterleme işlemi, bileşenin sertleşmesine izin veren yaklaşık 2,5 ile 5 °C/sn'lik bir soğuma oranına sahip olan soğutma bölgesinde ilave hızlı soğutma avantajı

sunmaktadır. Bu işlem, sinterleme ve sertleştirme olayını tek bir uygulamada birleştirdiği için sinter-sertleştirme işlemi olarak tanımlanır. Yukarıda ifade edildiği gibi, tüm bu sertleştirme işlemleri (sinter-sertleştirme) 200-300 °C arasında temperleme ile yapılır. Sertleşme esnasında meydana gelen gerilmelerin giderilmesini ve martensitik mikro formun ilk temperlenmesini kapsayan bileşenlerin tokluğu iyileştirilir. Uygulama esnasında çelik parçalarda oluşan boyutsal dengesizlik, optimize edilmiş temperleme ile önlenebilir. İhtiyaca göre yağ emdirme, işleme, bileme, honlama ve taşlama gibi diğer işlemler de uygulanabilir [74].

Dişli üretimi gibi uygulamalarda, yorulma özellikleri çok önemli bir faktördür. Küçük orandaki kusurlar bile normal dişli çarklarının performansı bakımından zararlı olmaktadır. Bu sebeple, toz metalurjisi çeliklerinde gözeneklerin varlığı, malzeme özelliklerinin gerilme yoğunlukları üzerinde benzeri görülmemiş bir etki yapmaktadır. Gözeneklik seviyesi %5'i aştığında birbirine bağlı gözenekler baskın olmaktadırlar. Yorulma çatlakları bu gibi gözenekler ve gözenek kümeleri yoluyla başlamakta ve büyümektedir. Sinter yoğunluğu ne kadar iyi olursa ya da gözeneklerin boyutu çok küçükse, yorulma özelliklerindeki etkinin daha az olması beklenir. Etkili indirgemeyi sağlamak için, gerekli mikro iklimlendirme koşullarının sinterleme sırasında yaratılması önemlidir. Yüksek sıcaklıklarda vakumlamayla yapılan sinterleme işlemi, yüksek yoğunluklu büyük bileşenler için göz önünde bulundurulması gereken bir seçenek olmaktadır [72].

Toz Metalurjisi endüstrisinin sürekli gelişimi için, yüksek yoğunluk seviyelerine ulaşılması önemlidir. Son on yıldaki yüksek yoğunluklu TM malzemelerin kullanımında artış eğilimi görülmektedir. Alaşım tasarımı, makine geliştirme, sıkıştırma teknikleri ve sıvı faz sinterlemesinde yaşanan gelişme ve yenilikler sayesinde, yoğunlukta ve genel malzeme özelliklerinde önemli bir artış sağlanmıştır. TM'nin gelecekteki gelişimini ve diğer üretim süreçleriyle rekabet edebilirliğini sürdürmek tam yoğunluğa ulaşmak için kilit bir faktördür. TM alanı içinde, artan yoğunluk seviyelerini elde etmek için tek başına ya da kombinasyon halinde kullanılabilecek çeşitli işlemler bulunmaktadır. Bu işlemlerden bazıları; sıkıştırma esaslı, sinterleme bazlı ve hibrit yaklaşımlar olarak sınıflandırılabilir. Aşağıda belirtilen yöntemleri içermektedirler [69];

- Sıcak sıkıştırma,
- Sıcak kalıp sıkıştırma,

- Çift basma ve çift sinterlemesi,
- Yüksek hızlı sıkıştırma,
- Soğuk İzostatik Presleme,
- Toz Dövme,
- Yüksek sıcaklık sinterlemesi,
- Sıvı faz sinterlemesi,
- Eklemeli imalat
- Sıcak izostatik presleme.

Sinterleme işleminden sonra son ürün dediğimiz malzemeye, arzu ettiğimiz özellikler doğrultusunda ilave bazı işlemler uygulanabilmektedir. Eğer malzemeye yoğunluk kazandırılmak isteniyorsa; tekrar sıkıştırma, yüzey parlatma, birleştirme, yüzey kaplama, yüzey sertleştirme, yağ emdirme, yeniden boyutlandırma gibi son ve ikincil işlemler uygulanmaktadır [75].

Sinterleme sonrası yapılan ikincil işlemler arasında buharla işlem (steam treating) denilen ve buharla oksitleyici olarak da bilinen yöntemde uygulanabilmektedir. Bu yöntem, aşırı ısıtılmış çelik parçalarının nispeten düşük sıcaklık olan 540 C^0 deki buhara 1-2 saat maruz bırakıldığı bir ısıl işledir. İşlem esnasında buhar demir yüzeyine yapışmakta ve koruyucu bir bluegrey demir okside (Fe_3O_4) dönüşmek üzere reaksiyona girmektedir. Buhar, poroziteye nüfuz edebileceğinden, oksit tabakası 0.020 ila 0.050 inç olabilmektedir. Ancak bu oksit tabakasının oluşumu, malzeme sistemine ve işleme koşullarına bağlı olarak çekme dayanımını ve sünekliği %10 ila 20 azaltmaktadır. Buharla işleme sonucu üründe aşağıdaki geliştirmeler sağlanmaktadır [76];

- Aşınma direncinin arttırılması,
- Yüzey sertliğinin arttırılması,
- Korozyon direncinin arttırılması,
- Sıkıştırma verim gücünün arttırılması,
- Düşük basınçlı sızdırmazlık sağlanmasıdır.

5. AŞINMA

Aşınma, birbiriyle temas halinde olan elemanlar arasında, mekanik, fiziksel ve kimyasal etkenler nedeniyle taneciklerin kopması şeklinde meydana gelen malzeme kaybı ya da istenmeyen yüzey değişikliğidir. Aşınma olayı sonucunda malzeme kaybının yanında, malzemelerin yüzey şekillerinin bozularak iş yapma kabiliyetlerinin azalması ve zamanla yok olması meydana gelir. Buna örnek olarak matkapla delme işlemi ya da freze ile bir malzemeden talaş kaldırma işlemi esnasında matkap veya freze çakısında meydana gelen malzeme kayıpları gösterilebilir. Bu sonuç aslında istenmeyen bir durumdur [75].

Triboloji kavramı farklı şekillerde tarif edilmekte olup, malzemeler üzerindeki yağlama, sürtünme ve aşınma ile ilgili bir bilim dalı olarak 19. ve 20. yy. da sanayide yaşanan gelişmeler sonucu doğmuştur [69]. Ancak insanoğlu sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı önlemek için her zaman gayret sarf etmiştir. Bu bağlamda çok eski dönemlerden itibaren çömlek üretiminde kullanılan çark millerinde oluşan sürtünmenin azaltılması amacıyla zift kullanılmıştır. Triboloji alanındaki çalışmalar incelendiğinde, mühendislik anlamında malzeme yüzeylerindeki sürtünmenin konu edildiği durumlarda sürtünme ve aşınmadan kaynaklı malzeme kayıplarının asgariye indirilmesi amaçlanmaktadır. Triboloji alanındaki çalışmalarla, daha iyi verim, daha iyi performans, daha az bozunma ve tasarruf elde edilmesi hedeflenmiştir [77].

Triboloji, oldukça geniş bir alanda pek çok konuyu içine alan ve mühendislikte büyük önem taşıyan bir bilim daldır. Kapsadığı konular, makine mühendisliği, malzeme bilimi, mekanik, yüzey kimyası, yüzey fiziği, yüzey karakteristiği, sürtünme, aşınma, yatak malzemeleri, yağlayıcılar, yağlama sistemleri örnek gösterilebilir. Tribolojik sistem; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevre olmak üzere 6 değişkenden teşkildir. Aşınma çiftini ana ve karşı malzeme oluşturmakta, az ya da çok yük altında, bunlar arasında bir ara malzeme bulunması durumunda, hareketle birlikte aşınma meydana gelmeye başlamaktadır [78].

Triboloji biliminde yuvarlanan veya kayan yüzeyli modern teçhizatlar büyük önem taşımaktadır. Uygulama sahasına göre bazı durumlar için sürtünme olayı gerekli olurken bazı durumlarda çok düşük olması istenmektedir. Örneğin; fren, debriyaj, tahrik tekerlekleri, somunlar ve vidalar sürtünmenin gerekli olduğu parçalar durumundadır. Diğer taraftan,

sürtünmenin minimuma indirilmesi gereken uygulamalar; içten yanmalı motorlar, uçak motorları, dişliler, eksantrikler, yataklar ve sızdırmazlık elemanları olmaktadır [79].

5.1. Sürtünme ve Aşınmanın Tanımı

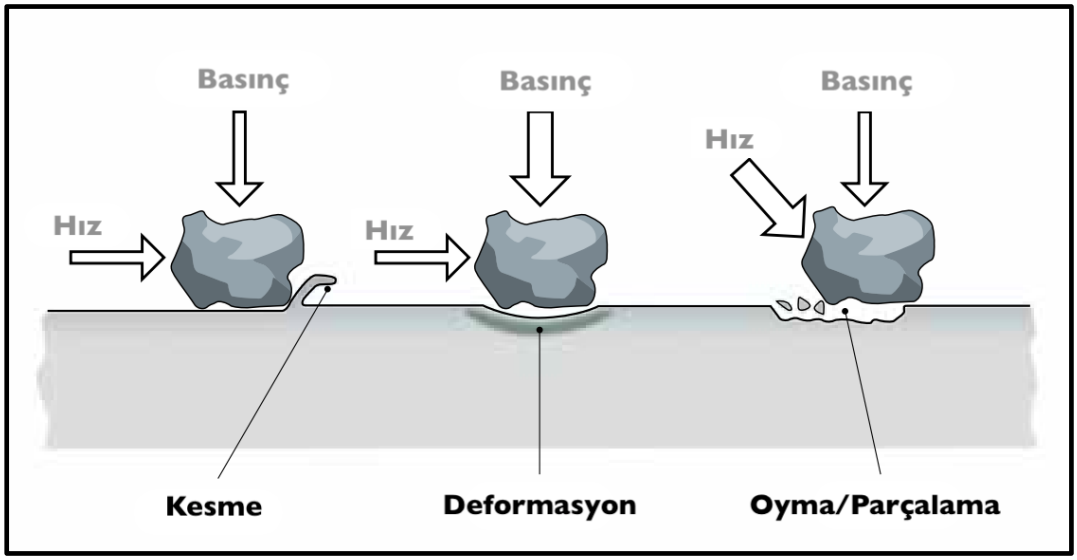
Aşınma olayını açıklayan birçok tanımlama yapılmıştır. Bunlardan bazıları şu şeklidedir.

DIN 50320 normuna göre aşınma; "Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucunda, mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulmasıdır" şeklinde tanımlanmaktadır [80].

Aşınma, "Malzeme yüzeylerinin, daha çok mekanik zorlanmalar nedeniyle, bazı hallerde de kimyasal etkilerle küçük parçacıklar ayrılarak meydana gelen değişimdir" [75] .

Bir başka tanıma göre aşınma; "Malzeme yüzeylerinde katı, sıvı ve gazların etkisiyle malzeme yüzeyindeki mikro parçacıkların kopması sonucu oluşan yüzey bozulmasıdır" [81].

Aşınan ve aşındırılan malzemeler "aşınma çifti" olarak adlandırılmaktadır. Aşınma çiftini oluşturan ana cisim ve karşıt cisim, aralarında belirli bir ara cisim varken, az veya çok yük altında hareket ettirildiklerinde aşınma olayı meydana gelmektedir. Aşınma çifti arasındaki ara malzeme sert taneli, sıvı ya da gaz halinde olabildiği gibi, aşınma sırasında malzemelerden kopan taneciklere ara malzeme olacak şekilde aktif olarak katılmaktadırlar [75].



Şekil 5.1. Temel aşınma teorisi [82]

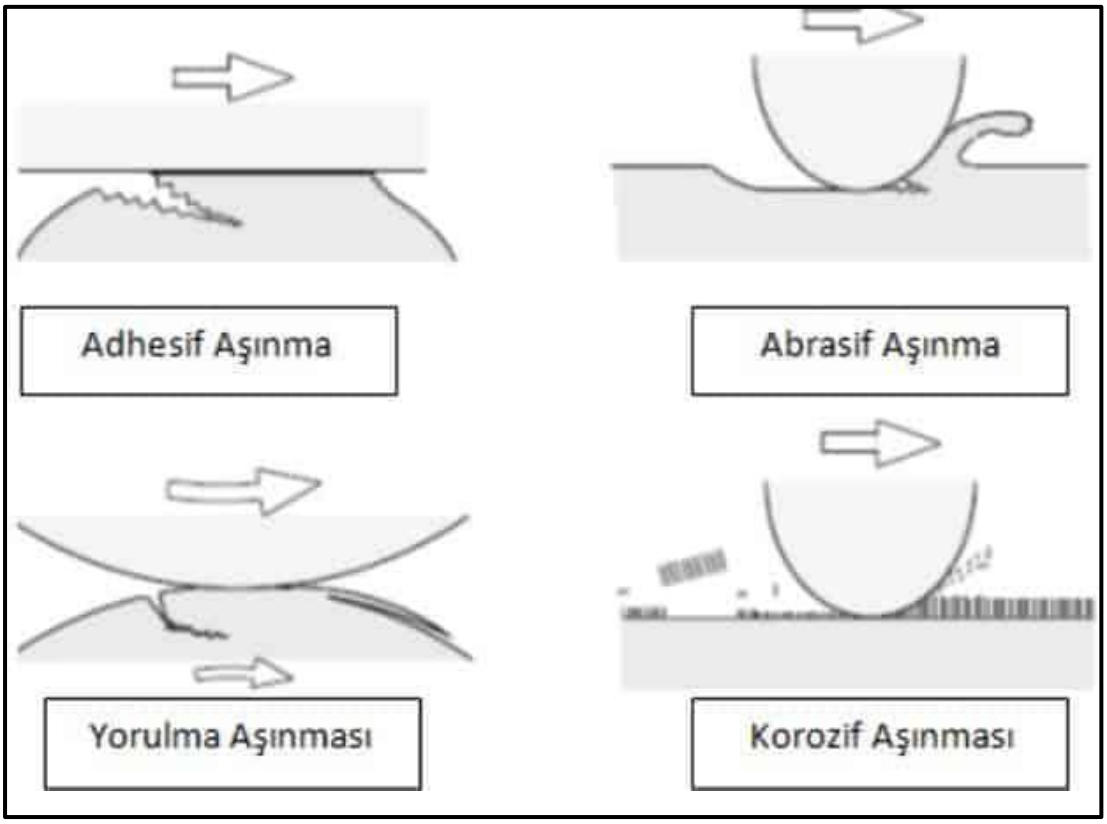
Aşınma olayının gerçekleşmesi için sürtünmenin olması gerekmektedir. Sürtünen iki malzemenin temas yüzeyi, görünen temas yüzeyinden küçüktür. En hassas işleme yöntemlerinde bile işlenen katı malzemelerin yüzeyi düz olmamaktadır. Malzeme üretim yöntemlerinde pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi imkansız olmaktadır. Yüzeylerin temas etmesi halinde ise yüzeylerdeki pürüzler karşılıklı etkileşir. İlk temas, pürüz tepeler arasında oluşur. Pürüz tepeleri arasındaki girintili yüzeyler temas etmezler. Gerçek temas yüzeyi, temasta bulunan pürüzlerin toplam alanıdır. Yüklemenin şekli de yük temas alanının büyüklüğünü etkiler. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzlerin şekli değişime uğrar, ezilir ve bunun neticesinde kısa boyutlu yeni pürüzler birbiriyle temasa geçer. Yüklemenin temas etmesi ile pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görünen temas alanına yaklaşır. Yüzey pürüzlüğünün artışı ile aşınma direnci azalır. Temasta olan cisimlere bağıl hareket verebilmek için sisteme giren enerji yük ve hareket şeklinde olur. Temas yüzeyindeki giriş ve çıkış arasındaki fark, mekanik titreşim, ısı, ses, sürtünme enerjisi ve aşınmaya dönüşmektedir [76].

Metallerin sürtünmesi esnasında oldukça karmaşık bir durum ortaya çıkmaktadır. Kuru ortamda yağlama olmadan sürtünme oluşması “kuru sürtünme” olarak tarif edilmektedir. Bu olayda, metal yüzeyindeki fiziksel ve mekanik özellikler ve kristal yapı, yüzeydeki molekül tabakaları etki altına almaktadır. Yani sürtünmeye etki eden başlıca faktörler, yüzey özellikleri, yüzeylerin birbirine olan uygunluğu, yüzey sertliği ve pürüzlüğü, pürüz uçlarının birbirine kaynaması, oksidasyon ya da korozyon nedeniyle kimyasal yapısının değişmesi

veya tamamen hasara uğraması durumlarıdır. Metallerin yüzeyleri parlak ve düz bir görünüşe sahip olmasına karşın mikroskobik açıdan pürüzlü olmaktadır. Temas durumu, eğer iki yüzey sürtünürse pürüz uçları arasında meydana gelmektedir. Statik ortamda iki pürüzlü yüzey dikkate alındığında, durgun halde her iki temas yüzeyinin birbirine göre hareketine statik sürtünme denilir. Bu sürtünme olayında, sürtünme katsayısı en yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Çünkü temas yüzeyleri arasında yağlayıcı bulunmamaktadır. Hareket olayı, yapışma-kayma şeklinde devam ederek yalnızca pürüzlerin uç kısımlarında oluşmaktadır. Bundan dolayı sürtünme katsayısı da azalışa geçmektedir. Bu duruma ise dinamik sürtünme denilmektedir [83].

5.2. Aşınma Türleri

Aşınma olayı genel anlamda, temas eden yüzeyden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma miktarı malzemenin türüne, sürtünen yüzeylerin biçimine, sürtünme koşullarına ve çevrenin kimyasal etkilerine bağlı olmaktadır. Ekonomik kayıplara sebep olması nedeniyle bu konuda yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Aşınmayı bütünüyle ortadan kaldırmak imkansızdır. Fakat aşınmayı yakından tanımak, etkileyen faktörleri iyi biçimde saptamak bu olayı en düşük düzeyde tutma yönünde çok faydalı olacaktır. Seramikler için genelde iki önemli mekanizmadan bahsedilmektedir. Bunlar; “yapışma aşınması” ve “mikro kırılma aşınması”dır. Yapışma aşınması, yüksek sıcaklık ortamında seramiklerde, iki yüzeyin temas halindeki noktalarında atomik bağ oluşturup, hareket sırasında da birinin diğerinin yüzeyinden parça koparmasıyla oluşmaktadır. Mikro kırılma ise en sık görülen aşınma durumudur. Bu aşınma mekanizması kendi içinde 4 ayrı başlıkta incelenir. Bunlar; “abrasiv aşınma”, “adhesiv aşınma”, “yorulma aşınması” ve “tribo-kimyasal/korozif aşınma”dır [85].



Şekil 5.2. Aşınma türleri [86]

5.2.1. Adhesiv aşınma

Kayma ya da yapışma aşınması olarak da bilinen adhesiv aşınma katı iki düzgün cismin yağlamalı veya yağlamasız ortamda teması ile oluşmaktadır. Adhezyon ara yüzeydeki pürüzlerin teması ile meydana gelmekte ve bu temas noktaları kayma ile kesilmektedir. Bu aşınmada ile yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilirler ve kayma olayı da devam ettiğinde diğer yüzeye yapışmış olan parçalar tekrar ana yüzeye yapışabilir. Bir başa şekilde de her iki yüzeyden bağımsız yapışık partiküller olabilir [75].

İki ayrı metal yüzey basınç altında bir araya geldiği durumda, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı püzrüzler gerek sürtünme sebebiyle oluşan ısı, gerekse soğuk kaynaklaşma etkisiyle birbirlerine bağ yapabilirler. Oluşan bu bağ, birleşme yapan çıkıntıların diğer kesimlerindeki bağ özelliğinden daha kuvvetli olabilir. Yüzeylerin birbirine karşı yaptığı hareketin devamı neticesi birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopacaktır. Bu kopmanın kaynak noktasında meydana gelmediği zamanlarda, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi meydana gelmektedir. Bu sürecin çalışma koşullarında çok

defa tekrarlamasıyla kendisini hissettirecek boyutlarda adhesiv aşınma meydana gelebilmektedir [76].

Adhesiv aşınma iki katı yüzey arasında kayma esnasında birbirleriyle etkileşime girmesiyle oluşmaktadır. Adhezyon (ya da bağlanma) yüzeydeki pürüzlü yapının birbirine bağlanmasıyla oluşmaktadır. Kayma kuvvetiyle oluşan yüzeydeki kesme gerilmelerinin etkisiyle temas noktalarında kopmalar meydana gelerek malzeme kaybına neden olur. Adhesiv aşınma esnasında, yüzeydeki pürüzlü noktalar birbirlerine kaynamakta ve bunun ardından oluşan bağlantı noktalarında kopmalar meydana gelmektedir. Kopan parçacıklar iki yüzey arasında ikincil temasların oluşmasını sağlamakta ve kopan parçacıkların birbirleriyle temaslarının artmasıyla topaklanmaktadır. Topaklanan bu tanecikler kayan iki yüzey arasında hareket etmekte ve iki yüzey arasında büyüyen parçalar da yükün etkisiyle levha haline gelmektedir. Sonuç olarak, yüzeylere yapışmış durumda ve kayma yönünde levha tipi aşınma partikülleri oluşmaktadır [79].

Motor yataklarında yaşanan sarma olayı adhesiv aşınma şeklinde gerçekleşmektedir [87].

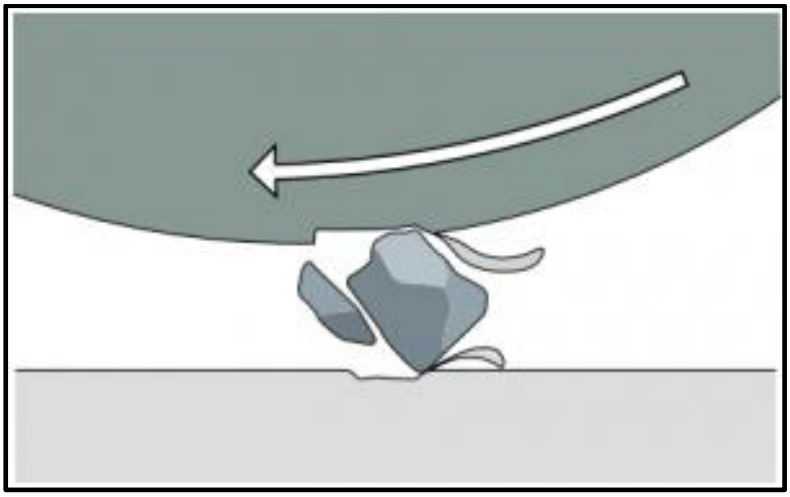


Şekil 5.3. Adhesiv piston aşınması örneği [88]

5.2.2. Abrasiv aşınma

Yırtılma ya da çizilme aşınması olarak bilinen abrasiv aşınma, mekanizmada hızla hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınma malzeme yüzeylerinin basınç etkisiyle daha sert olan taneciklerle etkileşmesiyle sert taneciklerin malzeme yüzeyinden

parça koparması şeklinde tanımlanmaktadır. Bu sürece örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz taneciklerinin ya da bir motorda oluşan yanma işleminin neden olduğu aşınmalar gösterilebilir. Bu tür aşınmada sert ve keskin olan tanecik, malzeme yüzeyinden mikron ölçüde talaş kaldırma etkileri gösterir. Abrasiv aşınma; iki elemanlı, üç elemanlı veya erozyon aşınması şeklinde olabilir [85].



Şekil 5.4. Abrasiv aşınma [86]

İki elemanlı abrasiv aşınma, pürüzlü bir yüzeyin ya da sabit aşındırıcı parçacıkların hareketiyle yüzeyden malzeme kaldırılmasıdır. Üç elemanlı aşınma, iki yüzey arasındaki kayma ya da yuvarlanma etkisiyle aşındırıcı taneciğin yüzeyden malzeme kaldırmasıdır. Erozyon aşınması ise, serbest bir şekilde akan parçacıkların yüzeyden malzeme kaldırmasıdır (boru içinden akan sıvı vb. gibi). Abrasiv aşınma genel olarak malzemelerin yüzey sertliğiyle orantılıdır. Ancak mikro yapıda aşınma da önemlidir. Aşınma direnci sadece taneciklerin ve yüzeyin sertliklerinin oranına bağlı olmamakta, aynı zamanda malzemenin dayanıklılığına, şekline ve tane boyutuna da bağlıdır [75].



Şekil 5.5. Abrasiv aşınma örneği [89]

Aşınma gerçekleşen iki yüzey arasında, sert taneciklerin daha yumuşak malzeme yüzeyinde plastik deformasyon veya kırılma meydana getirmesi abrasiv aşınma şeklinde adlandırılmaktadır [90].

Abrasif aşınma esnasında, yüzeyden plastik deformasyon oluşması ve malzeme kaybı farklı deformasyon şekillerinde görülmektedir. Bunlar, pullaşma, kama düzeni ve kesme biçimindedir. Bu tür aşınmaların hesaplanması için denklem 2.1'de gösterilen matematiksel işlem kullanılmaktadır [91].

$$v = kWx / H \qquad (2.1)$$

v: Aşınma hızı,
k: Aşınma katsayısı,
W: Uygulanan yük,
x: Kayma mesafesi,
H: Aşınan yüzeyin sertliğidir.

Buna göre, aşınma hızı, sistemdeki yük ve kayma mesafesi ile artmakta, malzemenin sertliğinin artmasıyla da aşınma hızı azalmaktadır. Malzeme sertliği ve uygulanan yük gibi değişkenlere ilave olarak, hekzagonal paket yapısı bulunan metal malzemelerin, kübik metal malzemelere nazaran daha düşük aşınma ve sürtünme gösterdikleri tespit edilmiştir. Çok kristalli metal malzemelerdeki tanecik sınırları da sürtünmeyi, adhezyonu ve aşınmayı etkilemektedir.

5.2.3. Yorulma aşınması

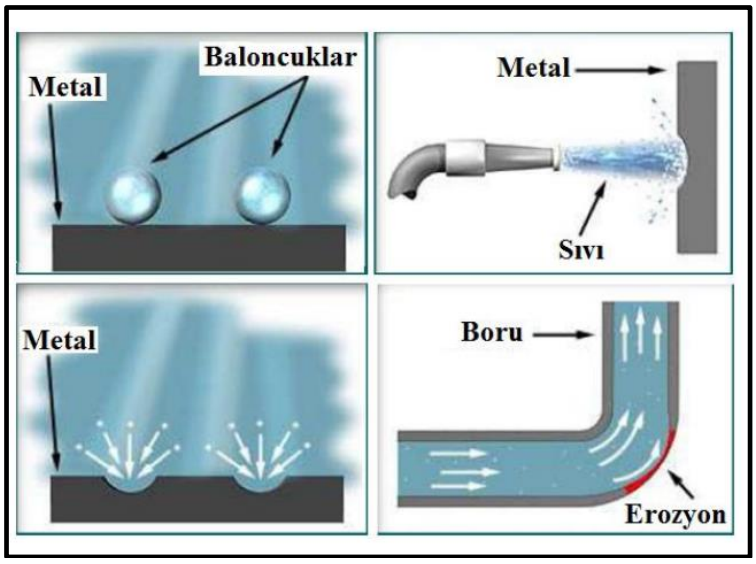
Yorulma aşınması, sürtünme esnasında meydana gelen gerilimin kırılmayla sonuçlandığı aşınmadır. Sünek elemanlarda yüzeysel kırılma aşınması meydana gelmektedir. Sürtünmenin sebep olduğu alanlarda plakalar oluşmaktadır. Gevrek malzemelerde kırılmalar, yüksek çekme gerilimlerinin olduğu yüzeylerde meydana gelir. Tribolojik zorlanmaların genellikle yüzeylerde görülen mekanik gerilmeler neticesi oluşması sebebiyle, yorulma aşınması birçok aşınma sürecinde görülmektedir. Malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşmakta ve bu böylece de parçacıkların ayrılması, çukur veya oyukların meydana gelmesine neden olmaktadır. Yorulma aşınması genellikle dişlilerde, rulmanlı yataklarda, demiryolu raylarında, soğuk ya da sıcak haddeleme işlemlerinde görülür [75].



Şekil 5.6. Yorulma aşınması örneği [92]

Yorulma aşınmasına oldukça benzeyen ve literatürde erozyon aşınması olarak tanımlanan bir aşınmadan da söz edilebilir. Erozyon aşınması, akışkan içersinde bulunan aşındırıcı partiküller, yüksek hızla hareket eden sıvı damlacıkları ve yüksek hızdaki gaz kabarcıkları tarafından oluşturulan bir aşınma türüdür. Sıvılar ve gazlar akış esnasında temas halinde oldukları parçanın sınır yüzeylerine çarpma etkisi yaparak yüzeyden parçacıklar koparırlar

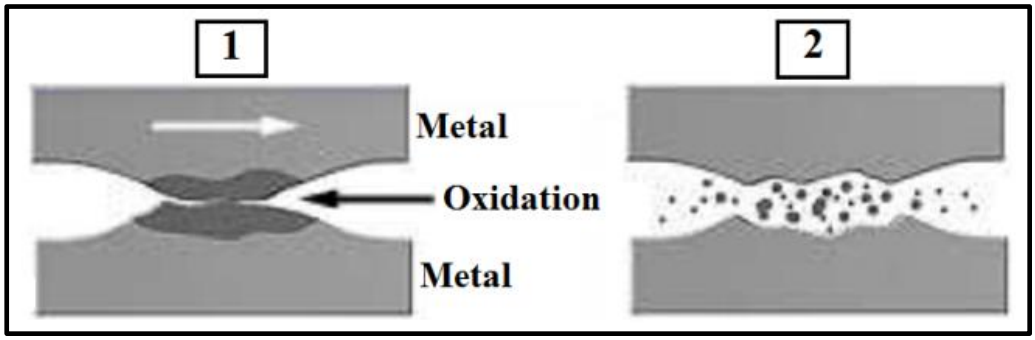
ve girdaplar etkisiyle dalgalı yüzey meydana getirirler. Böylece aşınma daha da hızlanır. Şekil 5.7'da görüldüğü üzere bu tür aşınmalar genellikle pompalarda, pervanelerde, fanlarda, nozullarda, boru ve tüplerin dirsek kısımlarında görülmektedir [93].



Şekil 5.7. Erozyon aşınması

5.2.4. Tribo-kimyasal/korozif aşınma

Aşınma malzemeleri arasında kaymanın meydana gelmesi durumunda gaz ya da sıvı korozyon özelliği ile reaksiyon neticesi kimyasal veya elektrokimyasal etkileşimle yüzey üzerinde aşınma olayı gerçekleşir. Reaksiyon işlemi yüzeyde etki eden güce bağlı olarak ana malzeme gibi davranabilir. Korozif ortamda katı malzemelerin birbiriyle etkileşimi reaksiyon ürünlerinin şekillenmesini ortaya çıkarmaktadır. Kimyasal aşınmanın bu şekli korozyon aşınması olarak ortaya çıkmaktadır. Korozif aşınma genellikle aşınmanın hafif bir şeklidir, Ancak yüksek sıcaklıklarda ve nemli ortamda aşırı bir etki gösterebilir. Malzemelerin yüksek sıcaklık ve gaz ortamında oksitlenmesi ile kimyasal korozyon, çözelti ortamlarında oluşan oksitlenmede ise elektrokimyasal korozyon ortaya çıkar. Korozyon aşınması özellikle metallerde etkili olan bir aşınma türü olmaktadır [75].



Şekil 5.8. Korozif aşınma [86]

5.3. Aşınma Ölçüm Yöntemleri

Sanayide kullanılan alet ve makinelerde aranılan özelliklerden biri de bu ekipmanların kullanım ömürleridir. Makine parçalarının hızla aşınması makinenin ömrünü kısaltmakta maliyetini artırmakta ve onarım için geçen sürede de üretimin önemli ölçüde aksamasına sebep olmaktadır. Bu nedenle makine üretiminde aşınmaya maruz kalan bölümlerde aşınma direnci iyi malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Bu malzemelerin belirlenmesi için çok sayıda laboratuvar testinin yapılması gerekmektedir. Aşınma oranını ölçülmesi amacıyla kullanılan tekniklerden bazıları aşağıda özetlenmiştir [75].

Ağırlık Farkı Metodu: Ekonomikliği ve ölçülen büyüklüğün duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçüm için yerinden çıkarılarak ölçüm yapılması, diğer bir ifadeyle numune sökülmeden üzerinden ölçüm yapılamaması bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10-3 g ya da 10-4 g hassasiyetinde duyarlı bir teraziyle yapılmaktadır. Aşınma miktarı gram ya da miligram cinsinden ifade edilirse, metre ya da kilometre olarak tespit edilen sürtünme izine göre birim sürtünmeye karşılık olan ağırlık kaybı miktarı g/km veya mg/m ile ifade edilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesaplanacaksa g/cm^2 birimi kullanılır. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istenirse, ağırlık kaybı esas alınarak kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden ağırlık hesaplanarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybı belirlenir.

İz Değişimin Ölçülmesi Metodu: Sürtünme yüzeyinde geometrisi belirli bir iz (daire vb.) oluşur ve test sürecince bu izin boyut veya çapının değişimi ölçülür. Uygulamada en çok

kullanılan alet vickers sertlik ölçme cihazıdır. Oluşan izin köşegenlerinin değişimi mikroskop kullanılarak ölçülebilir.

Optik Metotla Aşınmanın Tespiti: Optik metotla aşınmayı ölçmeye yönelik birçok metot bulunmaktadır. Bunlardan biri yüzey üzerine boyutu belirli mikro bir sertlik çukuru oluşturarak, aşınma sonrasında bu çukurun boyutundaki azalmayı incelemek şeklinde yapılır. Optik yöntemin yatay ölçülebilirlik sınırı 4-10 cm civarında olup 1/5 meyilde bir çukur (iz) için 5-10 cm'lik bir derinlik sınırı söz konusu olmaktadır. Bu sayede profilometre yönteminin sınırlarıyla aynı oranda aşınma ölçümü yapılabilir.

Aşınmanın Radyo-İzotoplarla Ölçülmesi: Diğerlerine göre daha yeni, ancak hassasiyet bakımından oldukça iyi bir tekniktir. Sürtünme yüzeyinin proton ya da yüklü α tanecikleri ile bombardıman edilmesiyle radyoaktif hale getirilmesi temeline dayanmaktadır. Aşınma neticesi radyoizotopların yüzeyden ayrılmasıyla ortaya çıkacak aktivite değişimi ölçülür. Diğer yöntemlere oranla yaklaşık 1000 kat daha fazla hassas olması, yöntemin en önemli özelliği durumundadır. Radyo metrik yöntemlerle ölçmek, otomobil sanayi gibi teknik sistemlerde ve diğer yöntemlerin uygulanmadığı durumlarda, ekonomik olmaktadır. Ancak bu yöntem de çok ucuz ve teknik uygulama bakımından yaygın olamamaktadır.

Mekanik Ölçüm Yöntemi İle Aşınmanın Tespiti: Genellikle mekanik ölçüm otomobil motoru silindirleri gibi büyük boyutlu kayar parçalara uygulanmaktadır. Saptanabilen en az aşınma miktarı çok daha büyük olabilmektedir. İş makinelerinin büyük ve sürekli aşınmaya maruz kalan parçalarının kontrolünde iş şartları için uygulanabilen en iyi yöntemdir. Bu yöntem ile özellikle aşınma dar bir hat üzerinde meydana gelmekteyse, bir profilometre ile şeridin bir profili çıkartılmakta ve kazınmış malzeme miktarı tahmin edilmektedir. 3 cm uzunluk, 2-10 cm genişlik ve 10 mikro inçlik bir şeritte 5-10 g'lık bir ağırlık kaybı saptanabilir.

Kalınlık Farkı Metodu: Başlangıç değeriyle malzeme üzerinde oluşan aşınma sırasında meydana gelen boyut değişikliğinin karşılaştırılması sonucu kalınlık farkı elde edilmektedir. Kalınlık farkı olarak bulunan bu değerden hareketle hacimsel kayıp ve birim hacimdeki aşınma oranı hesaplanmaktadır. Kalınlık, hassas ölçüm aletleriyle ±1μm duyarlıkta ölçülmelidir.

Ultrasonik Yöntemle Aşınmanın Tespiti: Ultrasonik aşınma yöntemi, yüzey kalınlığı ölçülecek malzemeye yüksek frekansta ses dalgaları gönderilmesiyle yapılmaktadır. Dalgaları gönderme ve alma esnasında geçen zaman kalınlığı belirlemektedir. Bu yöntem bazı avantajlara sahiptir. Parçaları temizlemek zaman kaybına yol açmaktadır (özellikle kovan ve pabuçlarda). Bu yöntem ile parça etrafında biriken kirlenmelere bağlı olarak ölçme hataları önlenir. Teknik elemanlar arasındaki ölçme yöntemi farklılıklarına bağlı olarak oluşan hatalar giderilir. Çok sayıda parça için bilgi depolanır. Otomatik aşınma yüzdelerinin ve belirlenen ömür sürelerinin hesaplanması için bilgisayar programları bulunmaktadır.

6. ABRASİV AŞINMA

6.1. Abrasiv Aşınmanın Tanımı

Abraziv aşınma, sert bir malzeme ya da sert bir taneciğin, karşı malzeme yüzeyinden çizerek ya da kazıyarak parça koparmasıyla oluşmaktadır. Bu tür aşınma etkiler ortadan kalkana kadar ya da malzeme tükeninceye kadar kararlı biçimde devam eder. Abrasiv aşınmayı etkileyen parametreler şu şekilde sıralanmaktadır; mekanik etkiler, titreşim, kayma miktarı, yük, frekans, temas şekli, darbeli-kazımalı aşınma, son yüzey işlemi, kalıntı gerilmeler. İki yüzey arasına giren sert taneciklerin aşındırma etkisi, taşlama ve parlatma süreçleri bakımından endüstride kullanılmaktadır. Çok iyi parlatılmış ve sertleştirilmiş yüzeylerde abrasiv aşınma en düşük düzeyde gerçekleşir. Abrasiv aşınmanın etkisi, aşınan ve aşındıran yüzeylerin yüzey şekline ve formuna bağlı olmaktadır. Metal kesme işlemleri ve toprak kazıma işlemleri abrasiv aşınmanın büyük oranda yaşandığı örneklerdir [77].

Abraziv aşınma türünde, ortak malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon neticesi oluşan sert taneciklerin ya da dış ortamdan gelen toz, talaş vb. maddelerin etkisiyle yüzeylerde bozulma oluşmaktadır. Bu sert tanecikler, malzeme yüzeylerinde kazıyıcı etki yapmakta ve malzeme kaybının yaşanmasına neden olmaktadır Benzer şekilde, çok sert taneciklerin daha yumuşak bir yüzeye batmasıyla da bu tür aşınmalar oluşabilmektedir. Neticede yumuşak malzeme yüzeyinde zamanla çizikler meydana gelmektedir. Malzeme yüzeylerinde oluşan abrasiv aşınmayı önlemek için alınacak tedbirler özetle [94];

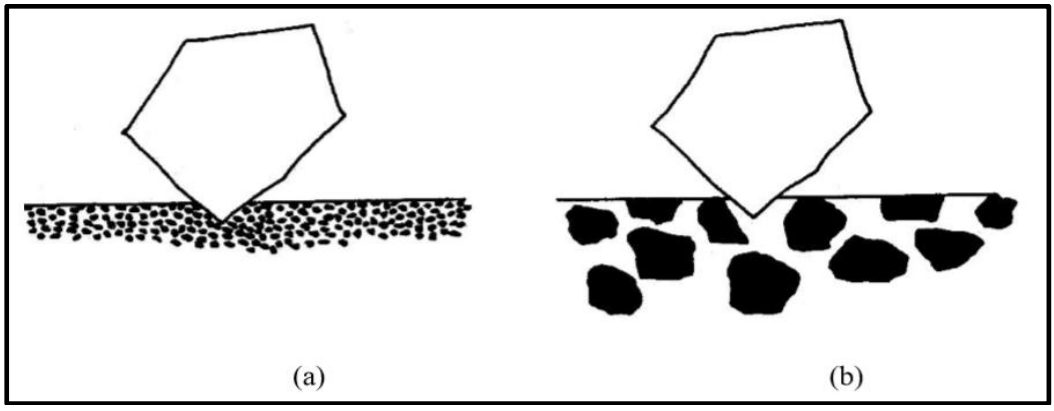
- ➢ Malzeme yüzeylerine sertleştirme uygulanması,
- ➢ Makine ve sistemlerin talaş ve diğer yabancı maddelerden temizlenmesi
- ➢ Yabancı ve sert maddelerin kayma ve temas yüzeyleri arasına girmesinin önlenmesidir.

Genellikle sıcaklık dalgalanmaları ve karşılıklı kaymanın sık olarak durup-başlama hareketleri neticesinde yüzey kenarlarında çatlaklar veya kırılmalar meydana gelmektedir. Yorulma büyük bir çatlağı tetikleyebilir ve malzeme kayma yüzeylerinden taneciklerin kırılmasına ya da kopmasına neden olabilir. Küçük çatlakların kayma yüzeylerinin altında çekirdeklendiği tabakalaşma aşınmada ise çatlaklar mikroskobik ölçekte olmaktadır Yüzeylerin hava ile reaksiyona girmesiyle aşınmanın şiddetli olmasını engelleyen

oksitlenme meydana gelmektedir. Bunun yanında, özellikle kimyasal madde barındıran ortamlarda ince ve sert tabakalar oluşur. Uygulanan yükün değişimiyle bu sert tabaka kırılır ve sert tanecikler düşerek aşınma parçacıklarını oluşturur. Sert tabaka, temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon ile tekrar tekrar kırılır ve bu durum birbirinin devamı şeklinde sürer.

Abrasiv boyutuna bağlı aşınma sonuçlarını değerlendirmek üzere Hutchings (1992), "temas alanı boyutu" kavramını geliştirmiştir. Abrasiv aşınmaya maruz bırakılan kompozitlerin tepkisi, takviye ve abrasiv tane boyutu arasındaki orana bağlı olmaktadır. Bu durum Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekilde; (a) malzemenin homojen şekilde (b) malzemenin heterojen şekilde davrandığını göstermektedir [91].

Abrasiv temas boyutunun takviye partikül boyutundan önemli bir şekilde büyük olması durumunda, aşındırıcı malzeme homojen katı olarak davranmakta ve abrasiv tane ile takviye arasındaki etkileşim az olmaktadır. Diğer yandan, abrasif temas boyutu ile takviye boyutunun yakın değerlerde bulunması durumunda malzeme heterojen olarak davranmaktadır [95].



Şekil 6.1. Abrasiv aşınma esnasında partikül temas yüzeyi iğle sert faz boyutu ilişkisi

Yapılan çalışmalarda abrasiv aşınma hızlarının genel olarak büyük abrasiv boyutlarıyla arttığı bulunmuştur. Hacimce %10 Al_2O_3 fiber takviyeli kompozitlerin aşınma oranlarına abrasif partikül boyutunun etkisi, takviyesiz matris alaşımlardan daha fazla olmaktadır. Fiber hacimlerinin oranıyla aşınma hızının değişimi, başlangıç ve kararlı hal aşınma hızlarıyla oldukça benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. 600 grit (20 μm) SiC abrasiv zımparaların kullanıldığı testlerde, aşınma hızı, artan fiber hacim oranı ile azalmaktadır. Bununla birlikte,

400 (38 μm), 280 (50 μm) ve 240 (60 μm) abrasiv zımparalarının kullanıldığı testlerde; aşınma hızları hacimce %15 oranına kadar artan fiber hacim oranı ile azalmıştır ve bu takviyeden sonraki hacim oranlarında artmış göstermiştir. Bu etki iri abrasivlerde de gözlenmiş olup, kırılma ve takviye fiber bağın ayrılması nedeniyle gerçekleştiği değerlendirilmiştir [96].

Basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilen %60 hacimli ve 13 ve 37 μm boyutundaki SiC partikül takviyeli Al matrisli kompozitlerin abrasiv aşınma davranışlarının belirlenmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada abrasiv tane boyutu 85 ila 250μm arasında değişen Al_2O_3 zımpara bantları kullanılmış ve malzemeye 28N yük uygulanarak aşınma direncine yönelik incelemeler yapılmıştır. Kompozitler 150μm'lik abrasiv tane boyutuna karşılık gelen geçiş noktasının altında ve üzerinde farklı aşınma hızları göstermiştir. Kompozitlerin aşınma yoğunlukları abrasiv tane boyutunun artmasıyla artmıştır. Bu artış; daha fazla deformasyona ve malzeme transferine sebep olan temas gerilme noktalarının artışına bağlanmaktadır. 150μm'den küçük ince abrasiv taneleri üzerindeki aşınma, aşınma hızı artan SiC partikül boyutu ile düşmüştür. Buna karşılık büyük abrasiv taneler üzerindeki aşınma, aşınma hızı azalan SiC partikül boyutu ile azalmıştır. İri abrasiv tane boyutlu zımparalar ile aşınma esnasında kaba SiC partiküllerinin (37 μm) kırılması kompozitin aşınma direncini düşürmüştür [97].

Bir başka çalışmada ise Al2O3 fiber takviyeli kompozitler, abrasiv boyutları 5 ila 200 μm arasında değişen SiC ve abrasiv boyutları 75 ila 200 μm arasında değişen flint üzerinde test edilmiştir. 75 μm'den daha büyük abrasivler için kompozitlerin aşınma hızı direnci takviye maddesiz alaşımlardan daha düşük olmuştur. 75 μm'den daha küçük SiC abrasivlerde, fiber takviyesi, takviyesiz alaşımlara nazaran aşınma direncini iyileştirmiştir. Yumuşak flint abrasivlerde ise, 150 μm'den küçük abrasivler için kompozitler, takviye maddesi olmayan alaşım malzemelere oranla daha iyi aşınma direnci seggilemiştir [98].

Yapılan incelemeler sıcaklığın abrasiv aşınmaya etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu etkiler ortam sıcaklığı ve plastik deformasyon sonucu temas yüzeyinde oluşan sıcaklık artışı şeklinde iki türde ortaya çıkmaktadır. Genel olarak sıcaklık arttıkça malzemenin sertliği azaldığı için aşınma direnci de düşmektedir. Abrasiv aşınma esnasında plastik deformasyon nedeniyle oluşan sıcaklık artışı özelikle yüksek kayma hızlarında etkili olmaktadır. Bu

durumda, sıcaklık artışı öncelikle aşınan malzemenin sertlik değerini düşürmekte, aşındırıcı maddeye de önemli ölçüde etki etmektedir. Neticede yumuşak bir malzemenin sert bir malzemeyi aşındırması da mümkün olmaktadır [99].
Abraziv aşınma türünde, malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon nedeniyle oluşan sert parçacıkların ya da dış ortamdan kayma yüzeyleri arasına giren toz, talaş vb. maddelerin etkisiyle yüzeylerin bozulması gerçekleşir. Bahsedilen sert tanecikler, yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yapmakta ve yüzeyde malzeme kaybı meydana gelmektedir [100].

Benzer şekilde, çok sert parçacıkların daha yumuşak bir yüzeye batma etkisi göstermesiyle de bu tür aşınma meydana gelmektedir. Bu sayede yumuşak malzeme yüzeyinde zamanla çizikler meydana gelmektedir. Malzeme yüzeylerin havayla reaksiyona girmesi neticesinde aşınmanın daha şiddetli olmasını engelleyen oksit tabakası meydana gelmektedir. Bununla birlikte, özellikle kimyasal maddelerin bulunduğu ortamlarda ince sert tabakalar artmaktadır. Uygulanan yükle bu sert tabaka kırılır ve sert tanecikler düşerek aşınma yüzeylerini oluşturur. Sert tabakalar, temiz kalan temas yüzeylerinde değişken yük altında tekrar kırılır ve bu durum birbirinin devamı şeklinde gerçekleşir [101].

Parçaların yüzeyleri ile çalışma ortamı arasındaki etkileşim önemli rol oynamaktadır. Korozif aşınmada, yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelmekte ve temas halindeki yüzeylerde bulunulan ortamla reaksiyona girmektedir. Sonrasında ise, abrazif etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğramakta veya temas noktasında çatlaklar oluşmaktadır [94]. Korozif aşınmayı engellemek amacıyla oksidasyonu önleyici özel yağlama maddeleri (molibden disülfit vb.) kullanılmaktadır [100].

6.2. Pin-On-Disk Yöntemi ile Abrasiv Aşınma Davranışının Belirlenmesi

Birbirine göre ters yönde hareket eden cisimlerin yüzeylerinden istenmeyen bir şekilde malzeme kopması ile aşınma olayı meydana gelmektedir. Dişliler, kamalar, kayış ve kasnak sistemleri, yataklar, burçlar, fren ve kavrama sistemleri gibi makine parçalarında aşınma önemli bir problem olmaktadır. Aşınma sorunları nedeniyle makine elemanları görevlerini yerine getirememekte ve böylece zaman ve para kaybı ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple birlikte çalışan makine parçalarındaki sürtünme ve aşınmalarda yüzey kayıplarını azaltmak tasarımcıların öncelikleri arasında yer almaktadır. Bu yüzden farklı malzemeler üzerine farklı aşınma deneyleri yapılmaktadır. Çalışma koşulları aşınma deneyine ne kadar

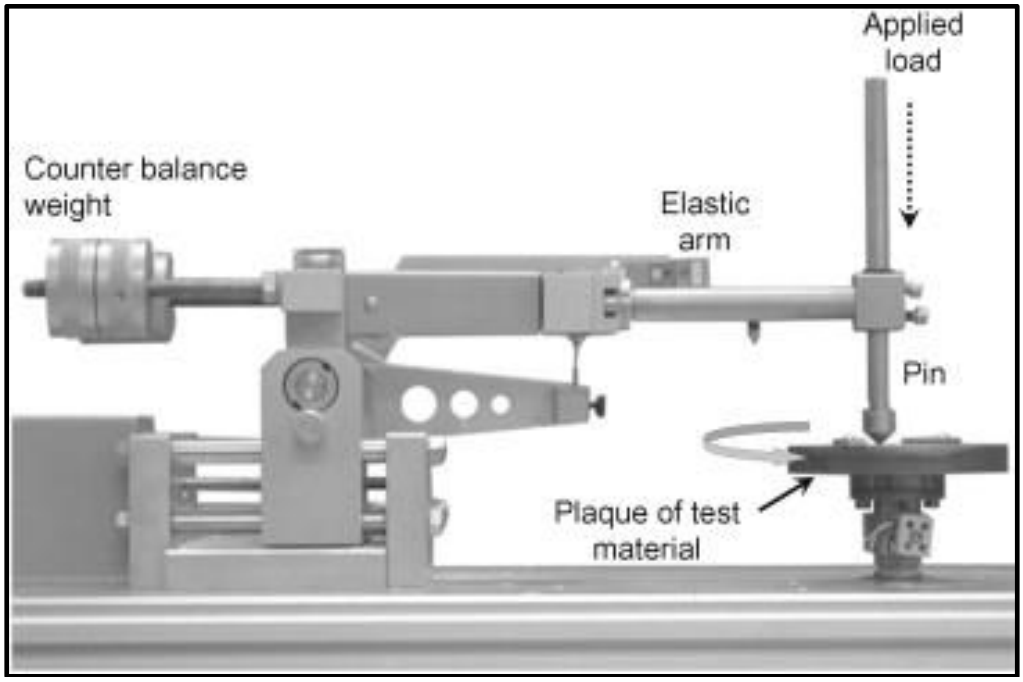
uyarlanabilirse aşınma deneyleri o kadar tutarlı olmaktadır. Yapılan araştırmalarda farklı aşınma özellikleri için farklı deney ekipmanları kullanılmıştır. Üretilen bu aşınma deney cihazlarında malzemelerin değişik yüklerde, değişik kayma hızlarında ve değişik kayma mesafelerinde; kuru veya yağlı koşullar altında sürtünme oranları ile aşınma davranışları incelenmektedir [102].

Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makine parçalarının çoğunun kullanılmaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Aşınmaya ilave olarak sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıpları da büyük miktarda masrafa yol açmaktadır. Bu sebeple aşınmanın makine tasarımındaki önemi büyük olmaktadır. Bu olayları engellemek için alınacak önlemlerin başında yağlama gelmektedir. Aşınma ve sürtünme olaylarının meydana geldiği mekanizmalara tribolojik sistemler denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin aşınma ve sürtünme davranışlarının belirlenmesinde tribolojik sistemler önem arz etmektedir. Diğer bir ifadeyle aşınma ve sürtünme olayı bir bütün olarak ele alınmalıdır. Aşınma olayında, farklı tribolojik etkilerle oluşan ve istenmeyen malzeme kayıpları yaşanmaktadır. Böylece yüzeylerin ilk şekilleri bozulmakta, parçalar arasındaki boşluk büyümekte ve istenilen fonksiyonu yerine getirememektedir. Sürtünme, aşınma, yağlama ilişkisini inceleyen bilim dalı triboloji olmaktadır. Triboloji bilimi bu olayları teorik ve deneylere dayanarak incelemekte ve uygulamada bu kayıpların önlenmesi için öneriler sunmaktadır. Bu sebeple değişik malzemeler üzerine bazı deneylerin yapılması gereklidir. Alanyazın araştırmasına göre; Ünlü vd. (2009), çalışmalarında yaygın olarak alüminyum esaslı yatak malzemelerinin aşınma özelliklerini incelemek amacıyla radyal kaymalı yatak aşınma cihazını kullanmıştır. Miyajima vd. (2013) MoS_2 yüzey kaplamalı Al-Sn-Si alaşımlarının aşınma özelliklerini git-gel aşınma cihazında araştırmıştır. Dwivedi (2006), ötektiküstü Al-Si alaşımlarının aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla pin-on-disk türü aşınma cihazını kullanmıştır [103].

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlardan ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri vb. aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimlerdir. Aşındıran malzeme; metal, mineral, plastik, ağaç vb. olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilmektedir. Ara malzemeler ise; yağlar, aşınma parçacıkları vb. olabildiği gibi hiçbir maddede olmayabilir. Çevre; çalışma ortamıdır. Yükleme; darbeli, darbesiz, sabit, değişken vb. şeklinde ya da bunların bir arada bulunması şeklinde olabilir. Hareket ise; kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe vb. şeklinde olabilir. Tribolojik sistemde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları da farklılık göstermektedir. Adhesiv aşınma, abrasiv aşınma,

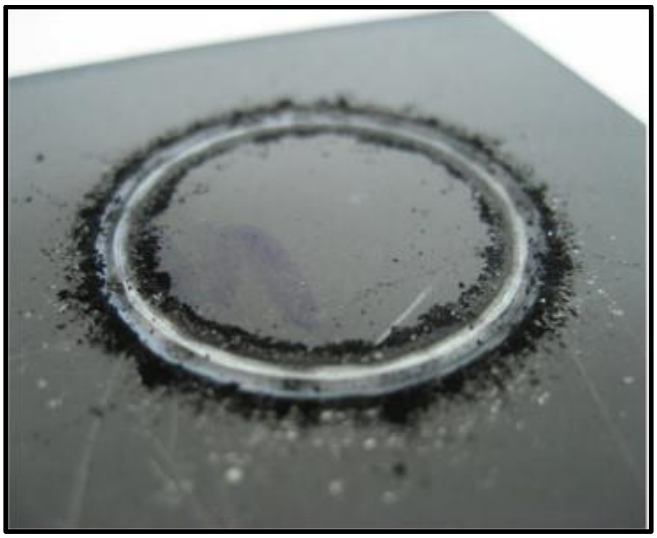
yorulma aşınması, korozyon aşınması gibi mekanizmalarla tanımlanan aşınma, tribolojik sistem içerisinde genellikle tek başına gerçekleşmez. Fakat etkili olan aşınma sistemine göre önlemler yoğunlaştırılabilir. Araştırmacılar genellikle inceledikleri sistemi göz önüne alarak çalışmalarında kullanacakları aşınma test cihazını seçer veya tasarlarlar. Aşınma test cihazları kısmen standartlaşmıştır. Fakat standart test cihazlarında her sistemin şartlarının bulunması mümkün olamamaktadır. Aşınmanın gerçek sistemlerde tespitinin zorluğu, bir kısmı standartlaştırılan model cihazların geliştirilmesin sağlamıştır. Deney cihazlarında tribolojik sistemi oluşturan unsurların, gerçek sisteme uyumlu biçimde oluşturulması ve sonuçların tekrarlanabilir olması bu cihazlardan beklenen temel özelliklerdir [103].

Kayma sırasındaki sürtünme ve aşınmayı belirlemek için en çok kullanılan test yöntemlerinden biri, disk on pin sistemidir. Bu test sisteminde, sabit disk biçimli bir bilye gövde üzerinde belirli koşullar altında kayar. Numune örneği, dikey ve aşağı doğru bir yük uygulayan Z eksenli taşıyıcıya bağlanır. Sabit bir yükü korumak için doğru bir kuvvet/yük sensörü kullanılarak disk üzerine 0,2-20 N arasında kuvvet uygulanır. Alt dönme hareketli tahrik motoru 0,001 ile 1000 dev/dak arasında dönebilmektedir. Test sırasında, disk hem tek yönlü (saat yönünde) hem de çift yönlü (saat ve saat yönünün tersinde) döndürülebilir [104].



Şekil 6.2. Pin on disk cihazı gösterimi

Şekil 6.2.'de örnek bir Disk-on-Pin cihazının tasarımı görülmektedir. Ölçümü yapılacak örnek belirlenen bir hızda döndürülür. Elastik kol, sabit bir temas noktası ile numunede sürtünme izi oluşturur. Kinetik sürtünme katsayısı test sırasında elastik koldaki sapmasının ölçülmesiyle ya da torktaki dönme noktası ile kolun dönme noktasında bulunan bir sensör tarafından doğrudan ölçülebilir. Pin ve disk yönteminde aşınma oranları, test esnasında ortaya çıkan malzemenin hacmi ya da ağırlığından hesaplanmaktadır [105].



Şekil 6.3. Pin on disk aşınma izi

Şekil 6.3.'te bir test plakasındaki iz ve aşınma kalıntılarını gösterilmektedir. Bu makine ile hız, temas basıncı ve zaman gibi test parametreleri kontrol edilmektedir. Doğru çevresel ortamda, nem, sıcaklık ve atmosferik etkiler de kontrol edilebilir veya ölçülebilir. Disk-on-pin ölçümü, genellikle ASTM G99-05 Standart Test Yöntemine göre yapılmaktadır [105]. Kimyasal veya korozif aşınma olarak da tanımlanan "oksidatif aşınma", ilk olarak Archard ve Hirst (1956) tarafından ortaya atılmıştır. Bu aşınma türü, oksitlenmiş aşınma kalıntıları ile karakterize edilmektedir. Bu tür aşınma çevre ile özellikle de oksijenle reaksiyona girmeyi içermektedir. Ayrıca, oksidatif aşınma sistemi, kayma yüzeylerinin termal oksidasyona maruz kalmasıyla da oluşmaktadır. Genel olarak bu oksidatif kalınlık kritik bir seviyeye eriştiğinde, oksit tabakası koparak kırılmakta ve metalik yüzey üzerinde yeni bir oksit tabakası oluşmaktadır. Oksit tabaka kırıldıktan sonra, tabakadan ayrılan oksit partikülleri yeni tabakanın delaminasyonu ya da parçalanmasıyla koruyucu bir tabaka oluşturmak üzere topaklanabilir. Pin On Disk türü deney cihazları oksit tabaka aşınmalarının ölçülmesi için kullanılabilecek en etkili ekipmanlardır. Pin On Disk sistemiyle, malzemeye

etki eden yük ve kayma hızı arasındaki orana göre malzeme yüzeyinde meydana gelen aşınma hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, malzeme ve test koşullarında parametrik değişimler yapılarak deneysel çalışmalar yapılmaktadır [104].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Malzeme ve Metot

Bu çalışma ile partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzeme (MMKp) üretiminde matris yapıyı oluşturan ön alaşımlı Alumix-13 tozu ECKA Granules firmasından temin edilmiş olup, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 7.1'de görülmektedir.

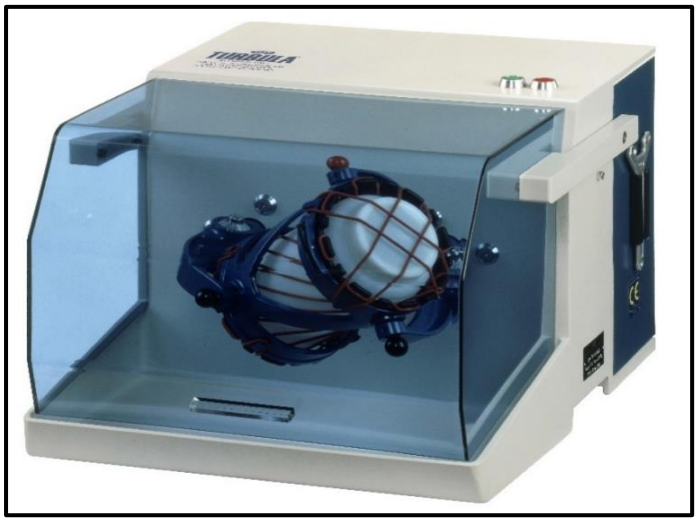
Çizelge 7.1. Alumix-13'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel özellikler		Kimyasal kompozisyon (% ağırlıkça)	
Görünür Yoğunluk	1,05-1,15 g/cm^3	Al	94,35 - 95,35
Akışkanlık	Max 30 s	Cu	4,2 - 4,8
		Si	0,05-0,25
		Mg	0,40 – 0,60

Kompozit toz metal malzeme üretiminde takviye elemanı olarak B_4C tozu kullanılmış olup, Nurol firmasından temin edilmiştir. Tozların hassas terazide (0,1 mg tartım hassasiyetinde) tartımı sonrası, karıştırma işlemleri üç boyutlu TURBULA cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 7.1). Karışım tozların Alümix-13/B_4C oranları ve teorik yoğunlukları Çizelge 7.2'de verilmiştir.



Resim 7.1. Hassas terazi



Resim 7.2. Tozların karıştırıldığı turbula cihazı

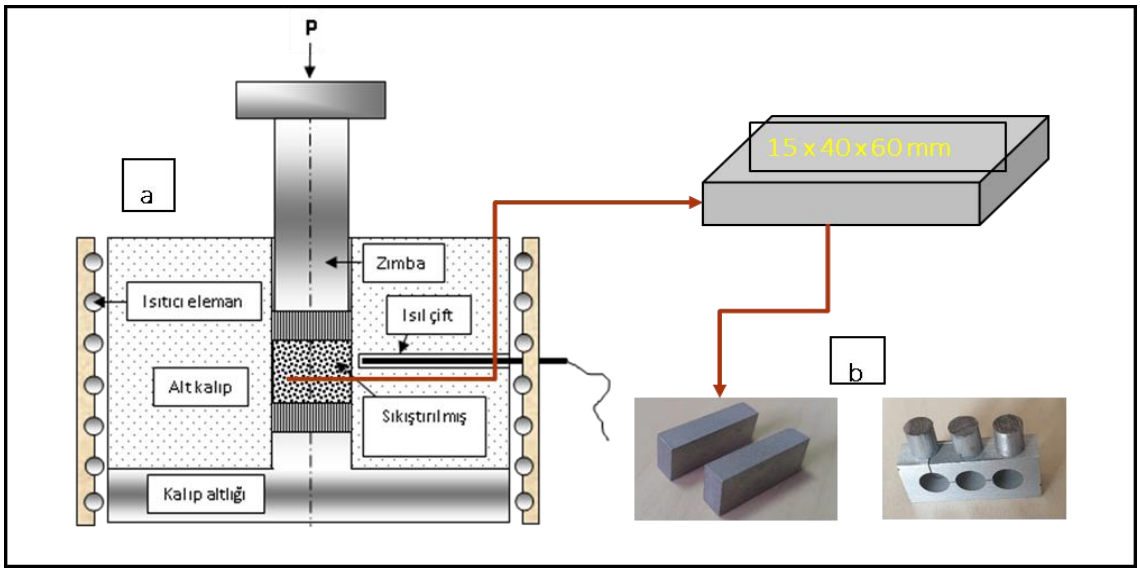
Çizelge 7.2. Karışım tozlar ve teorik yoğunlukları

Numune	Karışım toz (% Ağırlıkça)	Teorik yoğunluk (g/cm^3)
1	Alumix-13 (Matris malzeme)	2,775
2	Alumix-13 + % 5 B_4C	2,761
3	Alumix-13 + % 10 B_4C	2,747
4	Alumix-13 + % 15 B_4C	2,733

Kompozit parça üretiminde, karışım tozdan önceden belirlenen miktarda tartılarak alınan toz kalıp içerisine beslenmiş, daha sonra 50 MPa basınç altında ve 610 ^oC 'de bir saat süreyle sıcak olarak preslenmiştir (Resim 7.3). Presleme süresi bitiminde uygulanan yük kaldırılarak kompozit numune kalıp içerisinde ortam sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Presleme işleminin gerçekleştirildiği kalıp ve elemanları ile Şekil 7.1'de şematik olarak gösterilmiştir.

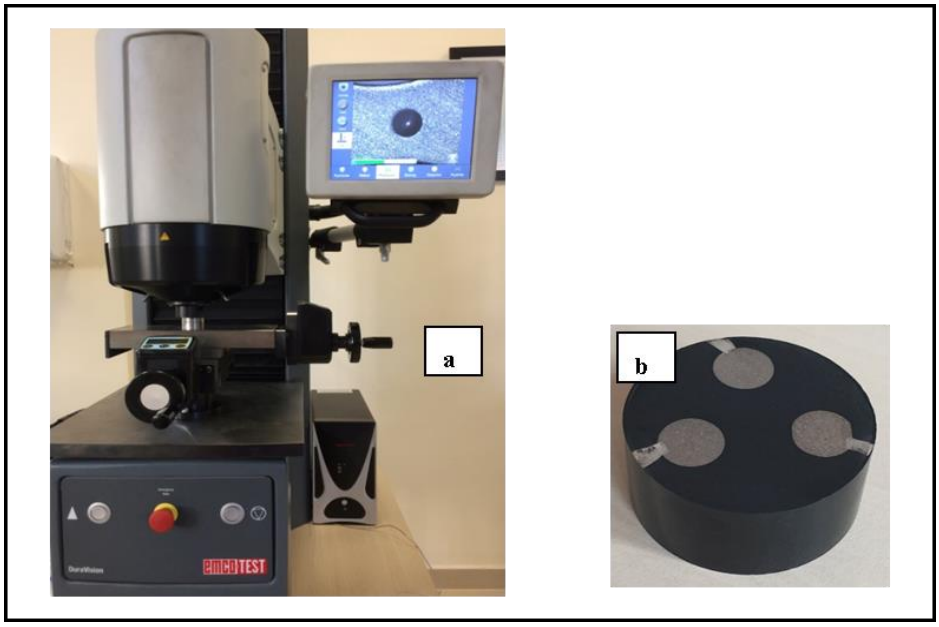


Resim 7.3. Sıcak presleme yapılan hidrolik pres



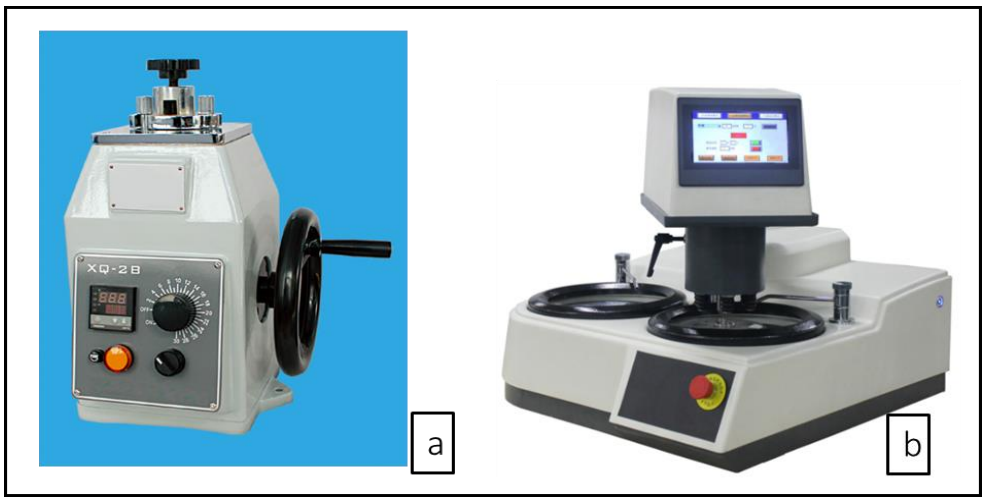
Şekil 7.1. a) Sıcak preslemenin şematik gösterimi, b) Aşındırma testi numuneleri

Presleme sonrası üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk ölçümleri 0,1 mg hassasiyette tartım yapabilen hassas terazide yoğunluk kiti yardımıyla Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Numunelerin brinell sertlik ölçümleri 31,5 kgf yük altında ve 2,5 mm WC bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her numune yüzeyinden beş ayrı ölçüm yapılmış olup, ortalaması numunenin sertlik değeri olarak alınmıştır (Resim 7.4).



Resim 7.4. a) Brinell sertlik ölçüm cihazının genel görünümü b) Sertlik ölçümü yapılmış bakalite alınmış numunelerin görünümü

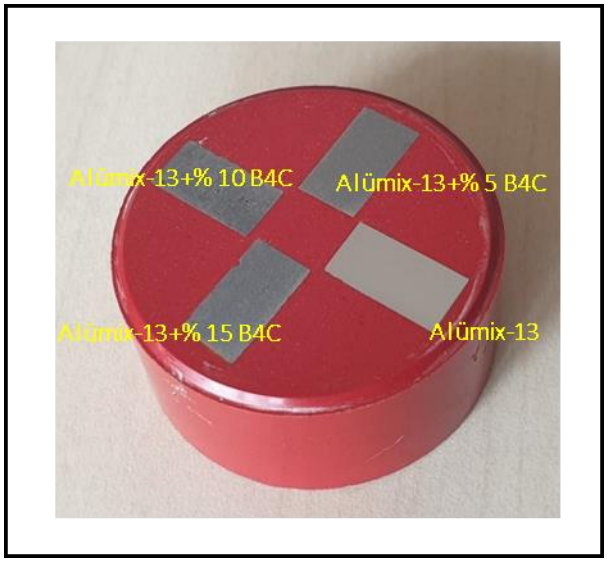
Üretilen kompozit malzemelerden metalografik inceleme için alınan numuneler sıcak bakalite gömülerek yüzeyleri kademeli olarak 320-1200 Mesh SiC zımpara ile zımparalandıktan sonra 6 -3 ve 1 µm boyutunda elmas solüsyonla parlatılmıştır (Resim 7.5).



Resim 7.5. a) Sıcak bakalite alma cihazı b) Otomatik parlatma cihazı

Metalografik hazırlık sonrası numune yüzeylerinden alınan optik ve SEM görüntüleri ile kompozitteki sinterleşme, gözenek durumu ve B_4C partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımı incelenmiştir (Resim 7.6). Mikroyapı incelemelerinde optik mikroskop olarak

Leica DMI 5000M, Taramalı elektron mikroskobu (SEM) olarak Jeol SEM 6060 LV Taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır (Resim 7.7).

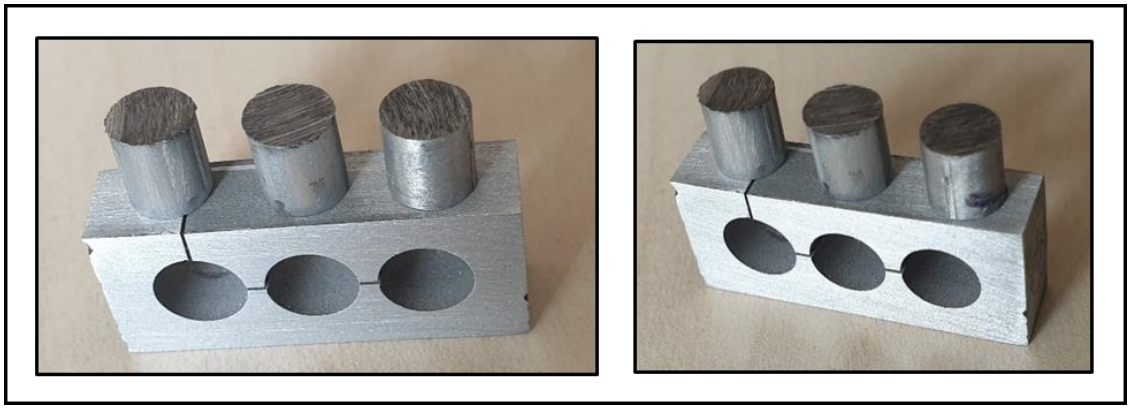


Resim 7.6. Alümix-13 ve kompozit toz metal parçaların bakalit içerisindeki görünümü



Resim 7.7. a) Leica DMI 5000M optik mikroskop b) Jeol SEM 6060 LV mikroskobu

Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk, sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri sonrası blok parçalar üzerinden tele erezyon yöntem ile 6 mm çapta ve 12 mm boyda silindirik aşınma testi numuneleri üretilmiştir (Resim 7.8).



Resim 7.8. Blok parçalar üzerinden tel erezyonla üretilen aşınma test numuneleri

7.2. Yaşlandırma Isıl İşlemi

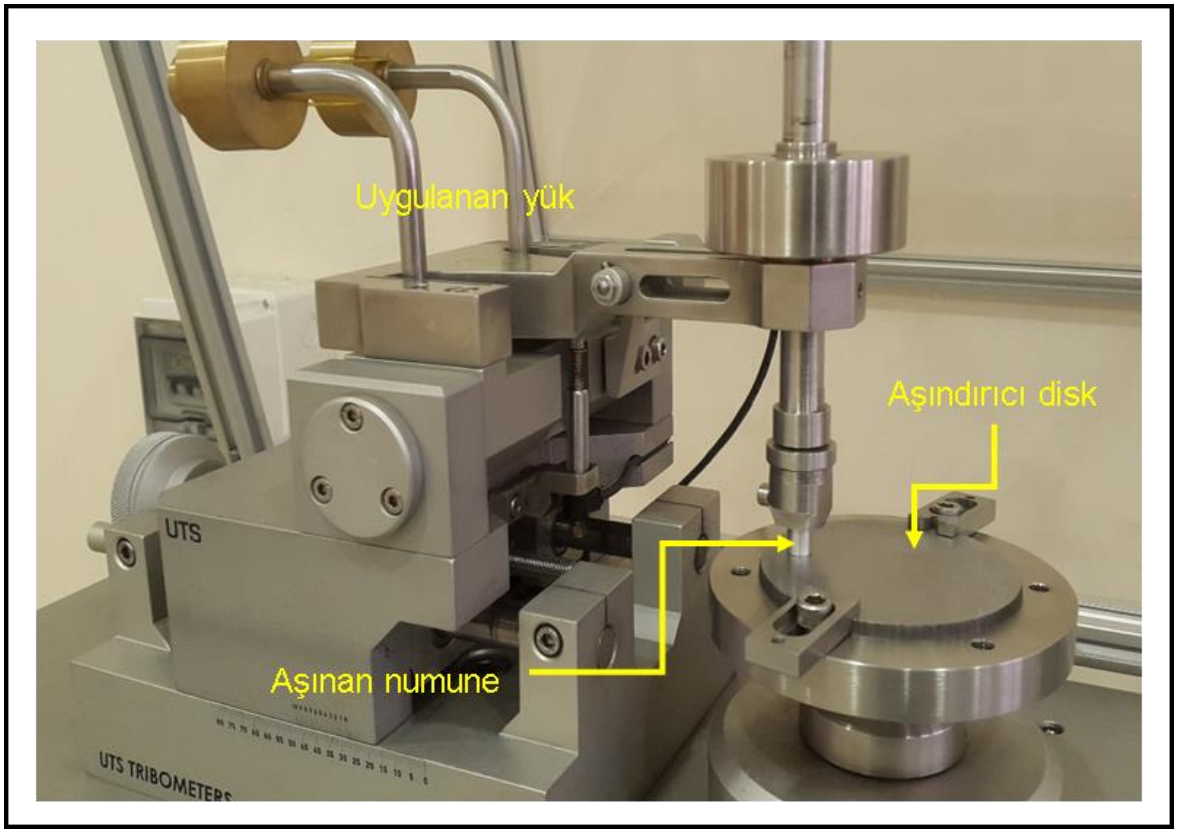
Yaşlandırma ısıl işlem uygulaması sıcak presleme ile üretilen toz metal kompozit malzemelerin sertlik ve aşınma davranışı üzerine etkisini belirleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Yaşlandırma ısıl işleminde numunelere öncelikle 530 ^{o}C sıcaklıkta 3 saat süre ile çözeltiye alma (solüsyona alma) ısıl işlemi uygulanmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında su verme işlemi uygulanmıştır. Çözeltiye alma ve su verme işlemi uygulanan kompozit malzemeler daha sonra 160 ^{o}C'de 12 saat süre ile yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yapay yaşlandırma işlemi uygulandıktan sonra kompozit malzemeler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

7.3. Aşınma Testleri

Aşınma testleri iki bölüm halinde gerçekleştirilmiştir. Birinci bölümde aşınma testleri, tel erezyonla yöntemiyle üretilen 6 mm çapındaki aşınma test numuneleri kayma hızı 0,94 m/s, aşındırma mesafesi 2000 m olmak üzere değişik yükler altında (5-10-15 ve 20 N) yapılırken, aşındırıcı karşı yüzey olarak 52 HRc sertliğe sahip hardox 500 çelik diskler kullanılmıştır. İkinci bölümde ise aynı aşındırma diskleri kullanılarak 150 m mesafede ve 1,05 m/s kayma hızında 5-10 ve 15 N yükler altında kuru kayma aşındırma testleri yapılmıştır. Bütün aşındırma testleri *UTS* TIRIBOMETER T 10/20 cihazında ASTM G99-05 'standardına uygun olarak yapılmıştır (Resim 7.9).

İkinci defa yapılan kısa mesafeli testlerin amacı aşındırma süresince mesafe artarken aynı iz üzerinde aşındırılan numunelerin disk yüzeyini çizmeleri bu sebeple ilerleyen mesafelerde

diskin aşındırma potansiyelinin artması sonucu testler arası aşınma kayıplarının değerlendirilmesinde ortaya çıkabilecek tutarsızlığı ortadan kaldırmaya yöneliktir. Kısa mesafeli aşındırma testlerinde disk yüzeyi bozulmadan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarını yorumlayabilmenin daha sağlıklı olacağı düşünülmüştür.



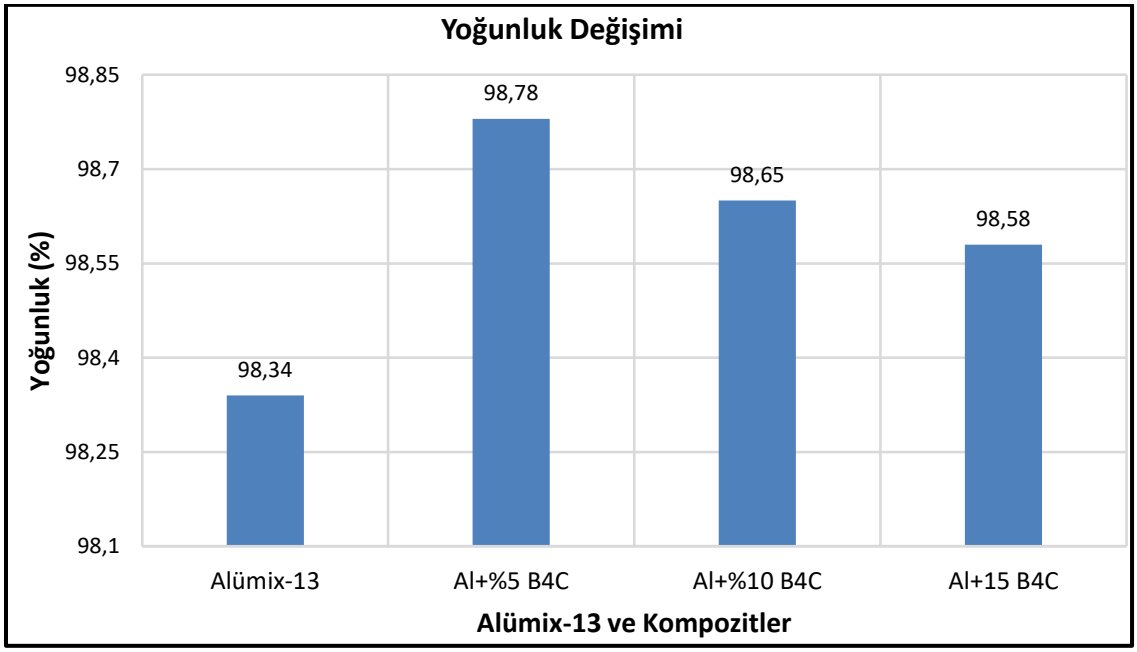
Resim 7.9. TIRIBOMETR T 10/20 aşındırma test cihazı

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. Yoğunluk ve Sertlik

Sıcak presleme sonrası Alümix-13 ve B_4C takviye elemanı içeren kompozitlerin ölçülen yoğunluk değerleri Şekil 8.1'de verilmiştir. Matris numunenin yoğunluğu % 98,34 iken % 5; % 10 ve % 15 B_4C içeren kompozit numunelerin yoğunlukları sırayla % 98,78 ; % 98,65 ve % 98,58 olarak ölçülmüştür. Sıcak preslemenin en önemli avantajlarından birisi de sıcak presleme ile yüksek yoğunluklarda toz metal parça üretebilmektir. Matris yapıyı oluşturan Alümix-13 ten üretilen numunenin yoğunluk değeri soğuk presleme ve ardından sinterleme ile elde edilen literatürdeki benzer çalışma sonuçlarına göre daha yüksek iken özellikle presleme basıncının düşük tutulması yoğunluğun daha da yüksek olmasını engellemiştir. Çünkü literatürde görülen benzer çalışmalarla sıcak presleme ile % 100'e kadar yoğunluklarda toz metal parça üretilebildiği görülmektedir. Bazı durumlarda kullanılan tozun partikül yüzeyinde oluşan oksit tabakası da toz partiküller arası sinterleşmeyi ve sonuç olarak yoğunluk artışını sınırlandıran bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sırayla % 5, % 10 ve % 15 B_4C içeren kompozit numunelerin yoğunluk değerleri % 98,78; % 98,65 ve % 98,58 olarak bulunmuştur. Bu numunelerin yoğunluk değerlerinde matris malzemeye göre çok küçük artışlar görülürken takviye elemanı oranındaki değişime bağlı yoğunluk değerlerinde birbirine yakın değerlerdir. Bütün numunelerde mevcut şartlar altında takviye elemanı ve miktarına bağlı kayda değer bir sertlik değişimi olmadığı görülmektedir. Her şeyden önce toz metal parçalarda yoğunluk, mikroyapı ve mekanik özellikler bakımından yüzde yüz homojenite sağlamak mümkün değildir. Takviye elamanının matris yapı içerisindeki dağılımdaki, kalıp içerisindeki sıkıştırma kuvvetlerindeki dağılıma ve ısıdan etkilenmedeki farklılıklara bağlı olarak kompozit malzemede her yönden tam homojenite sağlayabilme imkânımız düşüktür. Bununla birlikte mevcut şartlar altında toz metal parçaların tamamında hedeflenen ve kabul edilebilir yoğunluk değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Literatürde görülen benzer çalışmalarda daha yüksek presleme basınçları altında yoğunluk değerlerinin % 100'e kadar çıkabildiği çalışmalar mevcuttur.

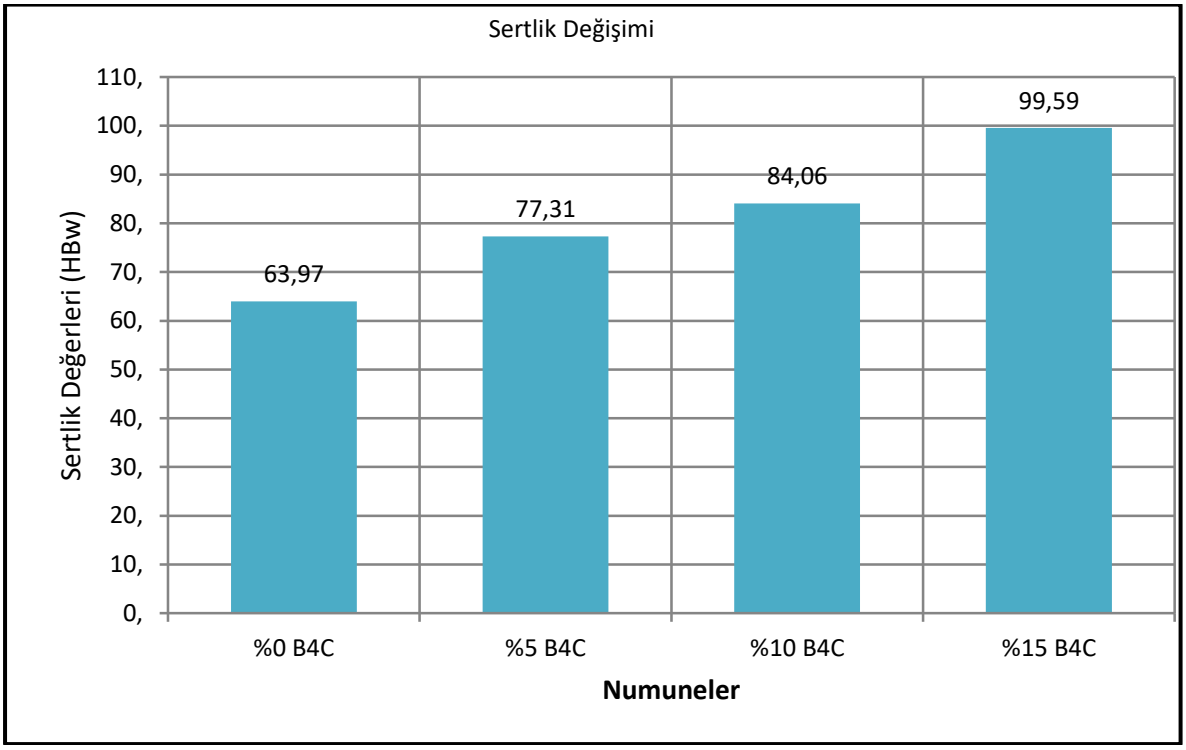


Şekil 8.1. Toz metal parçalarda takviye elemanı oranına bağlı yoğunluk değişimleri

Alümix-13'göre B_4C takviyeli kompozit malzemelerde takviye elemanı artarken sertlik değerleri de önemli ölçüde artmıştır. Alumix-13 toz metal parçanın ortalama sertlik değeri 63,97 HBw iken % 5; % 10 ve % 15 B_4C takviye elemanı içeren kompozit numunelerde sertlik değerleri sırayla 77,31; 84,06 ve 99,59 HBw olarak ölçülmüştür (Şekil 8.2). Matris yapıya göre en yüksek sertlik artışı % 55,6 artışla % 15 B_4C içeren kompozit numunede ölçülmüştür. Elde edilen sertlik artışları literatürde görülen benzer çalışmalarla uyumlu olup, genel olarak toz metal kompozit malzemelerde takviye elemanı oranı artarken kompozitin matris malzemeye göre sertliği artmaktadır [Çizelge 8.1]. Kompozit malzemelerde matris yapı içerisindeki daha sert yapıda olan takviye elemanı miktarı artarken yoğunluk, gözenek oranı ve takviye elemanının homojen dağılımında bir problem yaşanmıyorsa sertliğin takviye oranı ile doğru orantılı olarak artması beklenene bir durumdur.

Çizelge 8.1. Sertlik ölçüm sonuçları

Malzeme	Brinell sertlik ölçüm değerleri (HBw)	
	Setlik Ölçüm Değerleri	Ortalamaları
Alumix-13	63,67-63,99-64,05-64,13-64,01	63,97
Alumix-13+ % 5 B_4C	77,55-76,98-77,84-77,42-76,76	77,31
Alumix-13 + % 10 B_4C	83,56-83,92-84,49-84,22-84,11	84,06
Alumix-13 + % 15 B_4C	99,68-99,72-99,43-99,37-99,75	99,59



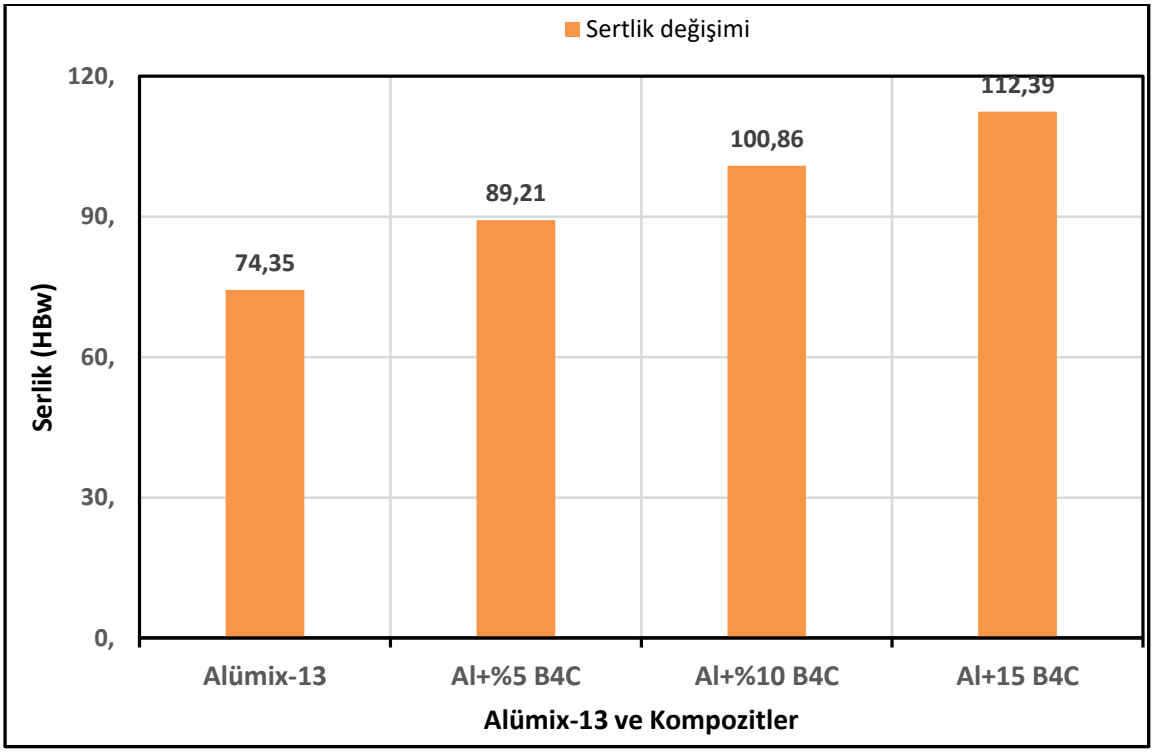
Şekil 8.2. Toz metal parçalarda B_4C miktarına bağlı sertlik değişimi

Yaşlandırma ısıl işlemi sonrası numuneleri ölçülen sertlik değerleri Şekil 8.3'te verilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi sonrası bütün numunelerde sertlik artışları ortaya çıkmıştır [Çizelge 8.2]. Bu ısıl işlemin başta sertlik olmak üzere bu tip malzemelere uygulanma sebebi malzemede mekanik özellikleri artırmaktır.

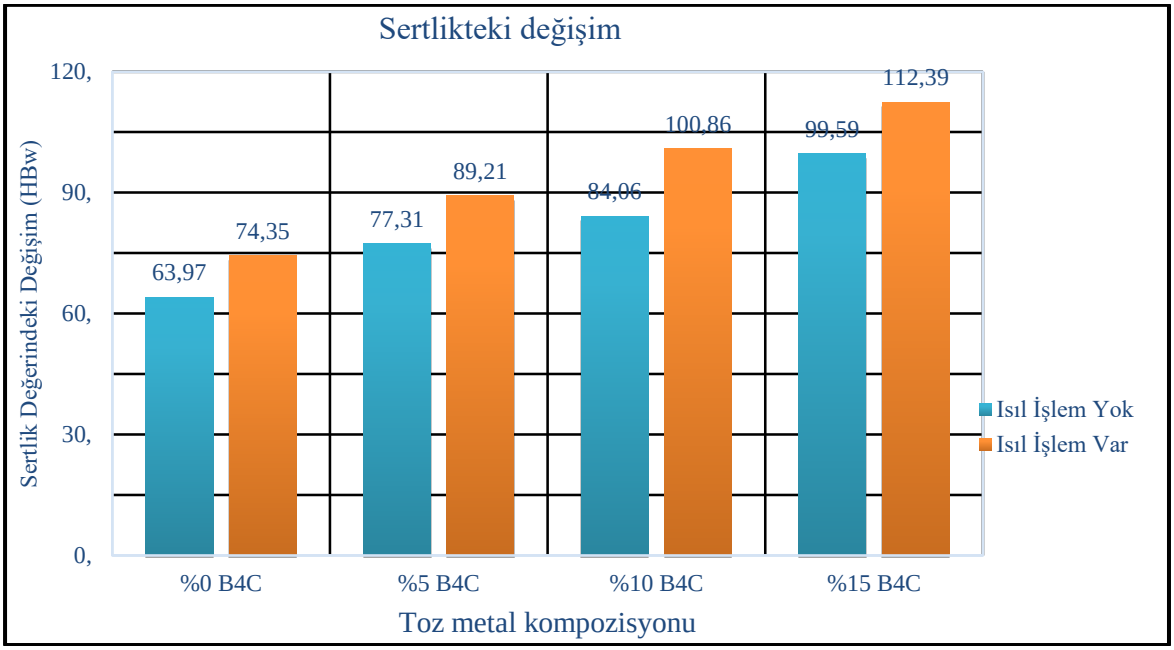
Şekil 8.3'te ısıl işlem gören ve görmeyen numunelerin sertlik ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre sırayla yaşlandırma ısıl işlemine bağlı olarak numunelerde %16,22; %15,39; %19,98 ve % 12,85 artış görülmüştür.

Çizelge 8.2. Yaşlandırma ısıl işlemi gören toz metal numunelerin sertlik ölçüm sonuçları

Malzeme	Brinell sertlik ölçüm değerleri (HBw)	
	Setlik Ölçüm Değerleri	Ortalamaları
Alumix-13	74,17-75,02-74,68-73,98-73,87	74,35
Alumix-13+% 5 B_4C	89,67-90,12-88,79-88,94-88,53	89,21
Alumix-13+% 10 B_4C	102,03-100,45-99,56-101,12-101,14	100,86
Alumix-13+% 15 B_4C	111,65-111,94-113,11-112,55-112,73	112,39



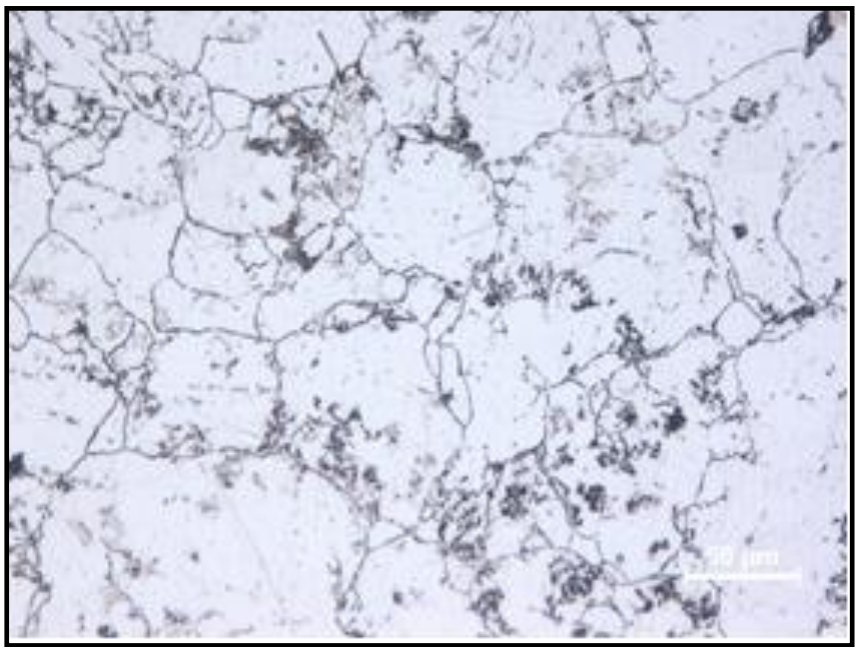
Şekil 8.3. Toz metal parçalarda ısıl işleme bağlı sertlik değişimi



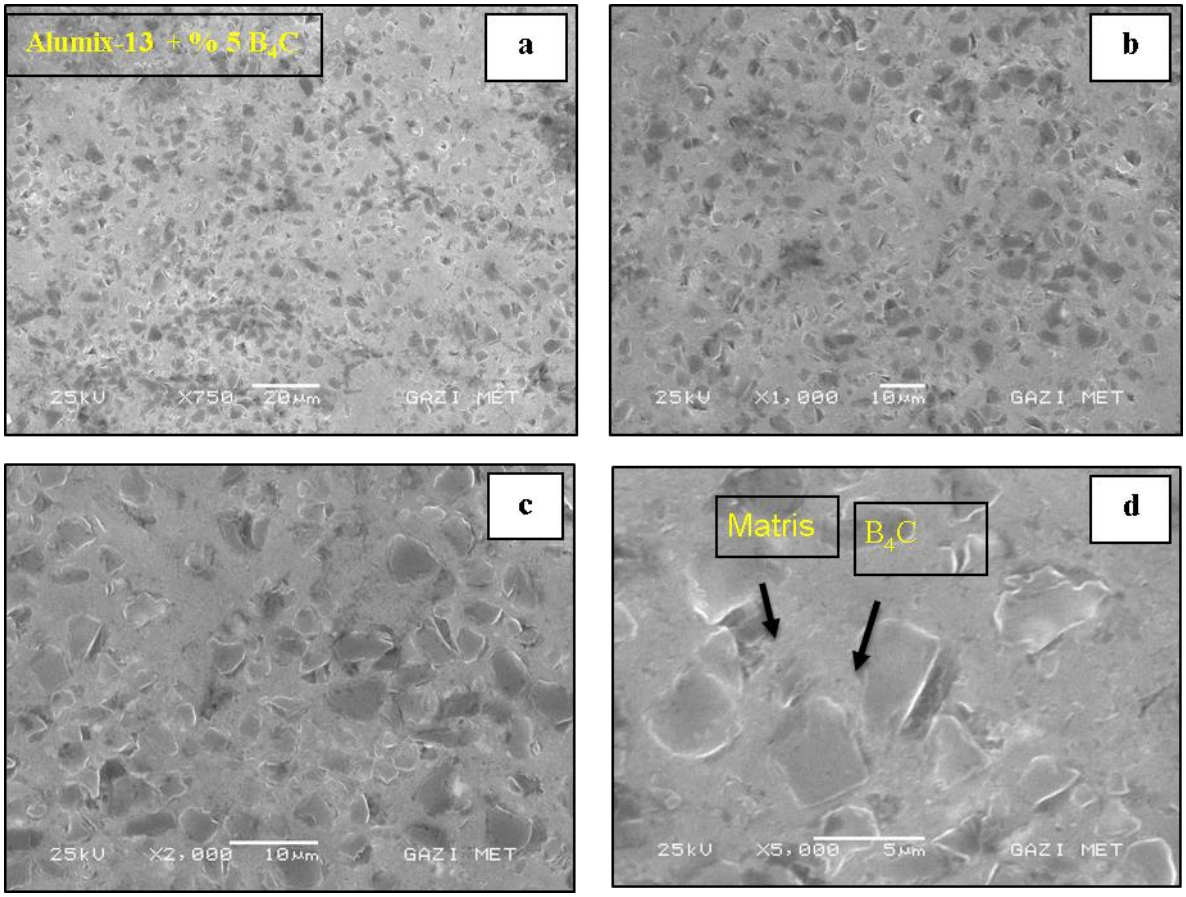
Şekil 8.4. Toz metal parçalarda ısıl işleme bağlı sertlik değişimi

8.2. Mikroyapı

Mikroyapı incelemelerinde yoğunluk değerlerini destekler yönde görüntüler alınmıştır. Alumix-13 üzerinden alınan görüntüler ön alaşımlı Alümix-13 toz tanelerinin birbirine tamamen sinterlenmiş ve gözenek miktarının yok denecek derecede azalmış olduğu görülmektedir (Resim 8.1).



Resim 8.1. Matris yapının (Alumix-13) mikroyapı resmi

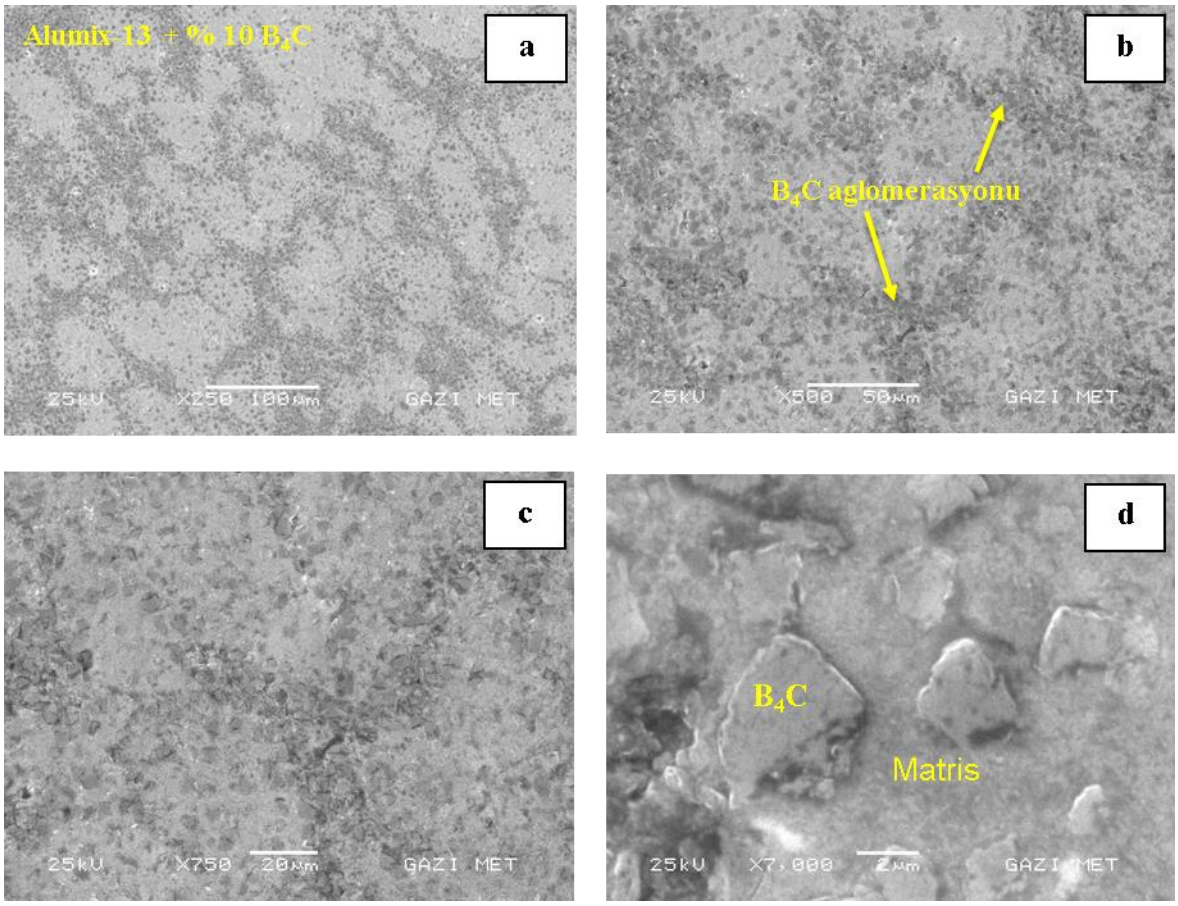


Resim 8.2. % 5 B4C içeren kompozit toz metal numunelerde mikroyapı ve takviye elemanı partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımı. a) 750; b) 1000; c) 2000 ve d) 5000 büyültme

Resim 8.2. a'da verilen sem görüntüleri B_4C takviye elemanı partiküllerin genel matris yapı içerisinde homojen şekilde dağıldığını göstermektedir. Partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde toz metal parçaların bütün kısmında ve kesitinde homojen özelliklerin elde edilmesinde takviye elemanı konumundaki partiküllerin homojen dağılımı çok büyük öneme sahiptir. Şekil 8.2. b'deki görüntü matris yapı içerisinde gözenek olmadığını sıcak presleme sürecinde basınç ve ısı tesiri altında tam bir sinterleşme ve yoğunluk artışı olduğu görülmektedir. Şekil 8.2. c ve d resimlerindeki görüntüler takviye elemanları ve matris arayüzeyinde yüksek oranda bir bağlanma olduğunu ve arayüzey boşlukları oluşmadığını göstermektedir.

% 10 B_4C takviye elemanı içeren toz metal kompozit numunelerin Resim 8.3. te verilen SEM resimlerinde takviye elemanının matris yapı içerindeki dağılımında homojenitenin bozulduğu ve daha çok Alumix-13 toz partiküllerin parçacık sınırlarında takviye elemanlarının yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun temel sebebi turbula cihazındaki

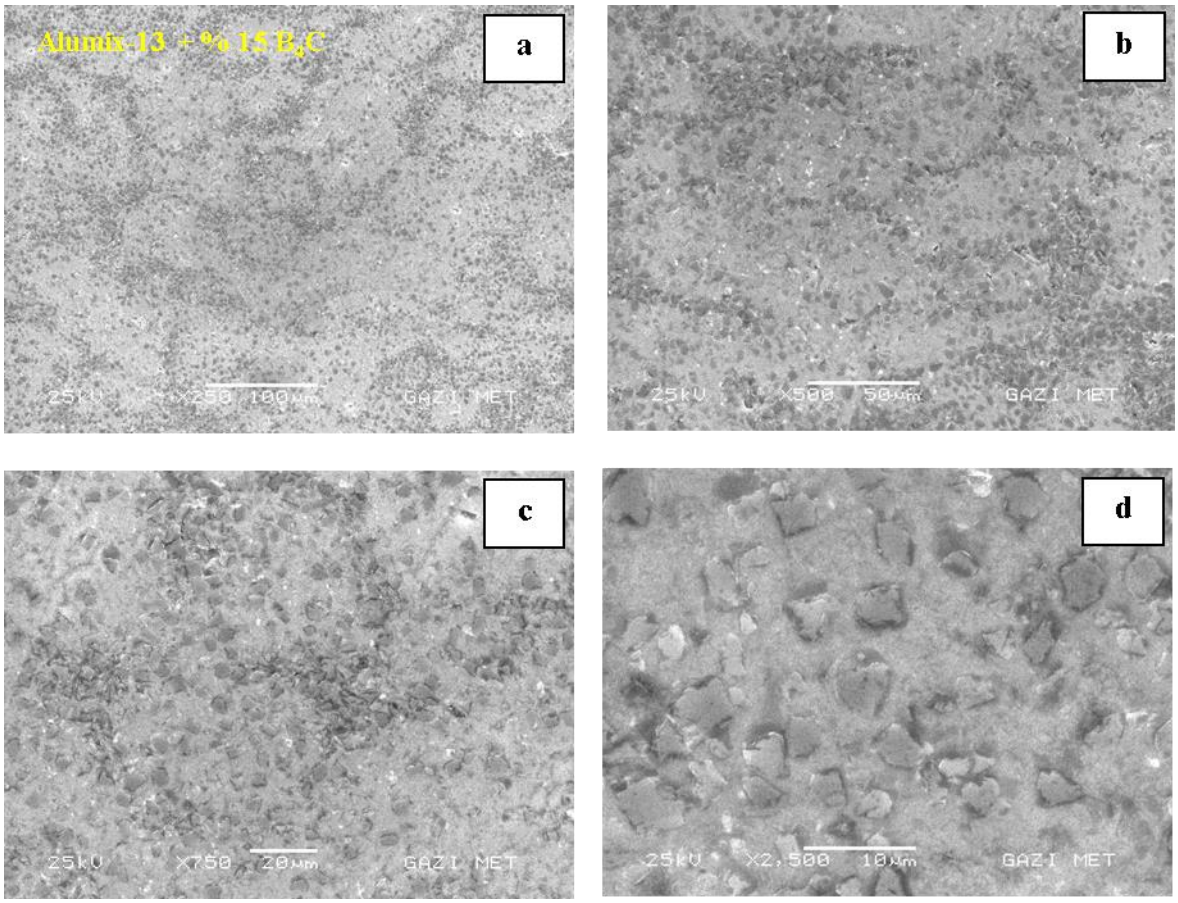
karıştırma sürecinde B_4C partiküllerinin aglomera olarak parçacık ara yerlerinde kümeleşmeleridir. Bu sorunu aşmanın yolu karışım tozun karıştırma işlemlerinin öğütücü bilye içeren ortamlarda karıştırma işleminin yapılmasıdır.



Resim 8.3. % 10 B4C içeren kompozit toz metal numunelerde mikroyapı ve takviye elemanı partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımı. a) 250; b) 500; c) 750; d) 7000 büyültme

Takviye elemanı olarak bulunan B_4C partiküllerinin matris yapı içerisindeki düzensiz dağılımı ve daha çok toz parçacık sınırlarında yoğunlaşması sıcak preslemeden dolayı kompozit malzemenin yoğunluk ve sertlik değerlerinde ciddi bir düşüşe neden olmazken mekanik özelliklerde mutlak azalmalara sebebiyet verecektir. Örneğin kırma veya eğme testlerinde kompozit malzeme bu bölgelerden kırılma davranışı sergileyebilir. B_4C parçacıkların birbirine sinterleşerek bağlanmasının zor olması bu ihtimali daha da artıracaktır.

Resim 8,4'te verilen SEM görüntüleri de B_4C'ün matris yapı içerisindeki aglomera olma ve düzensiz dağılımının artarak devam ettiğini göstermektedir. Literatürde görülen benzer çalışmalarda bu sorunun bu surunu en aza indirmek için karıştırma işlemlerinin çelik ya da seramik bilye içeren değirmenlerde veya yüksek enerjili adritör cihazlarında gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu gibi bilyalı ortamlarda yapılan karıştırma işlemleri koruyucu ortamda dikkatli bir şekilde yapıldığında toz partikülleri üzerinde deformasyona bağlı depolanmış enerjinin kompozit malzemenin sinterleşebilme davranışına pozitif katkı yaptığı bilinmektedir.



Resim 8.4. % 15 B4C içeren kompozit toz metal numunelerde mikroyapı ve takviye elemanı partiküllerin matris yapı içerisindeki dağılımı. a) 250; b) 500; c) 750; d) 2500 büyültme

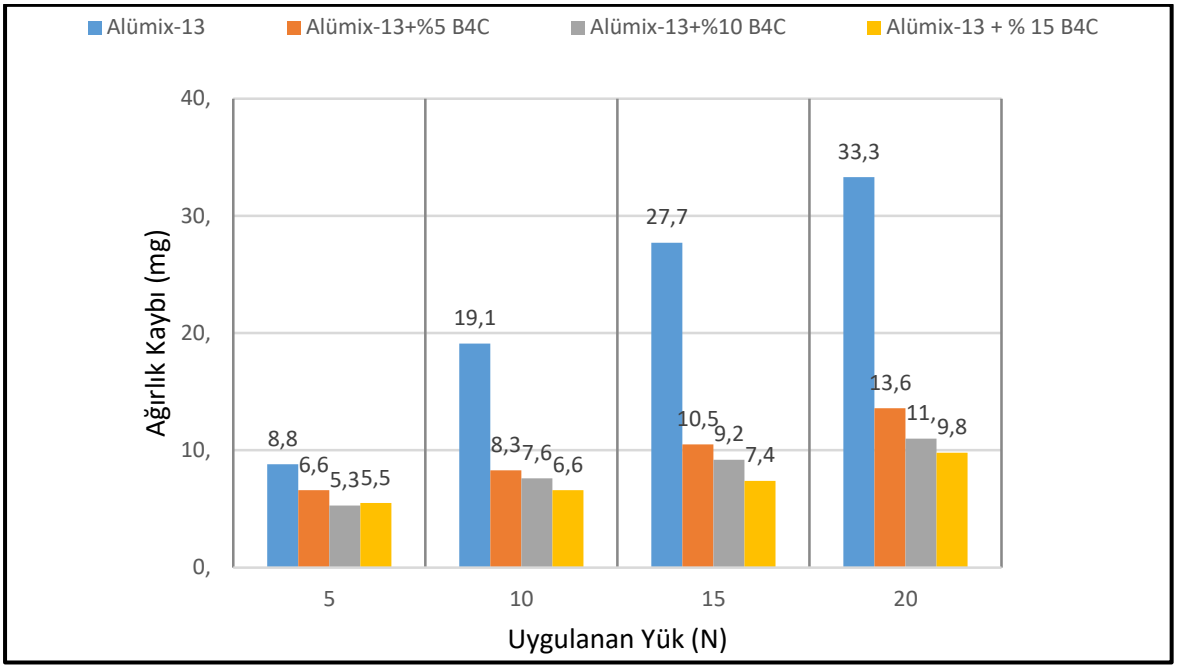
Elde edilen SEM görüntüleri Turbula cihazında yapılan karıştırma sonrası B_4C oranı artarken matris yapı içerisindeki dağılımın bozulduğunu göstermiştir. Katı hal yöntemiyle yapılan kompozit üretiminde bu sorunu gidermek için bilyalı değirmen ya da da karıştırıcılarda karıştırma işleminin yapılması gerektiği görülmektedir.

8.3. Aşınma Sonuçları

Aşındırma test sonuçları Alümix-13 ten elde edilen toz metal parçanın 5 N yük altında 8,8 mg aşındığını, bu değer 10 N yük altında % 17 artarak 19,1 mg'a, 15 N yük altında % 214 artarak 27,7 mg'a ve 20 N yük altında ise % 278 artarak 33,3 mg değerine yükselmiştir. Kompozit numunelerde de aynı şekilde yükteki artışa paralel olarak aşınma kaybı değerlerinde artış görülmektedir ancak bu değerler matris malzemesi alümix-13 'e göre oldukça azalmış durumdadır. Örneğin Alümix13'te 20 N yük altında ortaya çıkan 33,3 mg aşınma değeri aynı şartlar altında % 5 B_4C içeren kompozitte 13,6 mg'a, %10 B_4C içerende 11 mg 've % 15 B_4C içeren numunede ise 9,8 mg değerine gerilemiştir (Şekil 8.5). Bu sonuçlar Alumix-13 matris malzemesine göre değişen oranlarda B_4C içeren kompozit numunelerde aşında dayanımın ciddi ölçüde iyileştiği görülmektedir.

Çizelge 8.3. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim

Numune	Yük (N)	Kayma Hızı (m/s)	Dönüş Hızı (rpm)	Kayma Mesafesi (m)	İlk Ağırlık (gr)	Son Ağırlık (gr)	Ağırlık Kaybı (gr)
Alumix-13	5	0,94	375	2000	0,4852	0,4764	0,0088
Alumix-13	10	//	//	//	0,4682	0,4491	0,0191
Alumix-13	15	//	//	//	0,4653	0,4376	0,0277
Alumix-13	20	//	//	//	0,4758	0,4425	0,0333
Al+ %5B_4C	5	//	//	//	0,5239	0,5173	0,0066
Al+ %5 B_4C	10	//	//	//	0,5213	0,5105	0,0083
Al+%5 B_4C	15	//	//	//	0,5307	0,5202	0,0105
Al+%5 B_4C	20	//	//	//	0,5163	0,5027	0,0136
Al+%10B_4C	5	//	//	//	0,5367	0,5314	0,0053
Al+%10B_4C	10	//	//	//	0,5380	0,5304	0,0076
Al+%10B_4C	15	//	//	//	0,5336	0,5235	0,0092
Al+%10B_4C	20	//	//	//	0,5187	0,5026	0,0116
Al+%15B_4C	5	//	//	//	0,5312	0,5257	0,0055
Al+%15B_4C	10	//	//	//	0,5298	0,5232	0,0066
Al+%15B_4C	15	//	//	//	0,5270	0,5216	0,0074
Al+%15B_4C	20	//	//	//	0,5245	0,5147	0,0098



Şekil 8.5. Malzeme kompozisyonuna ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak aşındırma kayıplarındaki değişim

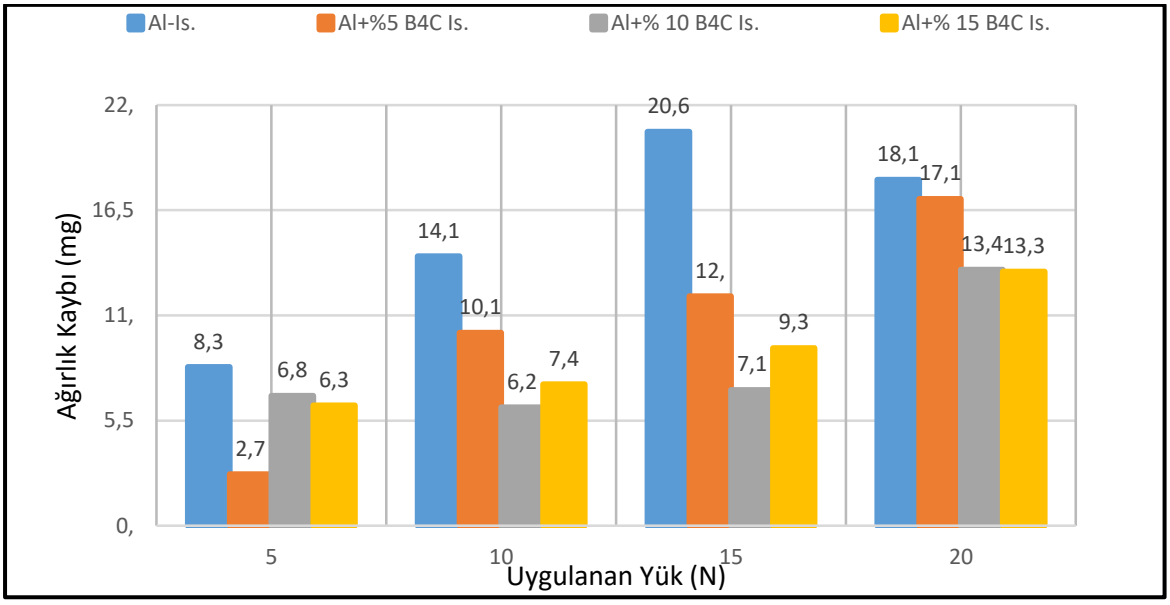
Sıcak presleme ile üretilen numunelerin bir bölümüne uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında kompozit numunelerin sertlik değerlerinde ciddi artışlar görülmüştü. Aynı şartlar altında yapılan aşındırma testleri sonrasında ise matris malzemelerde önemli iyileşmeler görülmüştür. Çizelge 8.4 'te görüldüğü gibi ısıl işlem gören numunelerde görmeyen numunelere göre 5 N yük altında yapılan aşındırma testi sonrası aşınma değeri 8,8 mg yerine 8,3 mg; 10 N yük altında yapılan testlerde 19,1 mg yerine 14,1 mg; 15 N yük altında 27,7 mg yerine 20,6 ve 20 N yük altında 33,3 mg yerine 18,1 mg ağırlık kayıpları görülmüştür.

Bu numunelerde yaşlandırma ısıl işleminin net bir şekilde toz metal parçaların aşındırma davranışını iyileştirdiği görülürken B4C içeren numunelerin aşındırma test sonuçlarında elde edilen sonuçlara göre kesin bir hüküm vermek mümkün olmamıştır. Isıl işlem gren bazı numunelerde aşınma değerlerinde azalma görülürken bazılarında artış görülebilmiştir. Tam bir hüküm verebilmek için daha fazla adet testlerin yapılmasına ihtiyaç vardır.

Genel olarak değerlendirdiğimizde kompozit malzemelerde uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin numunelerin aşınma performansını düşürdüğü söylenebilir (Şekil 8.6).

Çizelge 8.4. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim (ısıl işlem görmüş)

Numune	Yük (N)	Kayma Hızı (m/s)	Dönüş Hızı (rpm)	Kayma Mesafesi (m)	İlk Ağırlık (gr)	Son Ağırlık (gr)	Ağırlık Kaybı (gr)
Alumix-13	5	0,94	375	2000m	0,5165	0,5082	0,0083
Alumix-13	10	//	//	//	0,5111	0,4970	0,0141
Alumix-13	15	//	//	//	0,5118	0,4912	0,0206
Alumix-13	20	//	//	//	0,5075	0,4894	0,0181
Al+%5 B_4C	5	//	//	//	0,5470	0,5443	0,0027
Al+%5 B_4C	10	//	//	//	0,5535	0,5434	0,0101
Al+%5 B_4C	15	//	//	//	0,5506	0,5386	0,0120
Al+%5 B_4C	20	//	//	//	0,5440	0,5269	0,0171
Al+%10 B_4C	5	//	//	//	0,5281	0,5213	0,0068
Al+%10 B_4C	10	//	//	//	0,5225	0,5163	0,0062
Al+%10 B_4C	15	//	//	//	0,5177	0,5106	0,0071
Al+%10 B_4C	20	//	//	//	0,4890	0,4656	0,0234
Al+%15B_4C	5	//	//	//	0,5320	0,5257	0,0063
Al+%15B_4C	10	//	//	//	0,5079	0,5005	0,0074
Al+%15B_4C	15	//	//	//	0,5159	0,5066	0,0093
Al+%15B_4C	20	//	//	//	0,5250	0,5117	0,0133

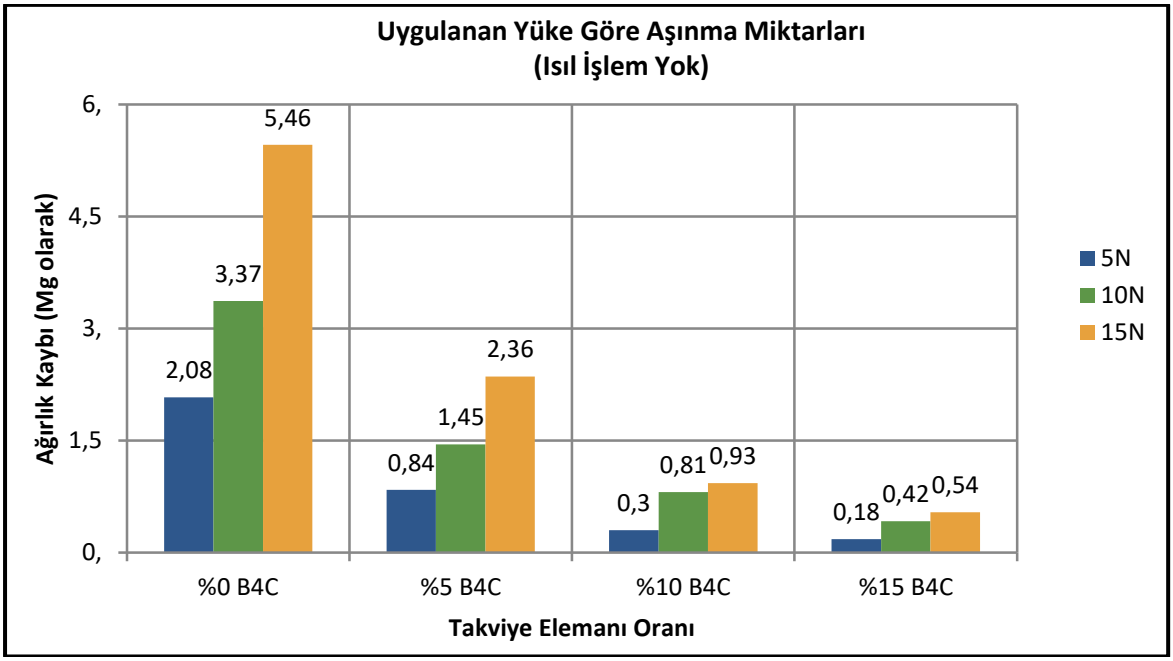


Şekil 8.6. Malzeme kompozisyonuna ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak aşındırma kayıplarındaki değişim

Özellikle ısıl işlem görmüş ve görmemiş numunelerin farklı şartlar altında bir seri daha aşınma testleri yapılarak yaşlandırma ısıl işleminin malzemenin aşınma özellikleri üzerine olan etkiler ortaya konmaya çalışılmıştır. Testler 5; 10 ve 15 N yükler altında aynı çelik diskler üzerinde kuru kayma aşındırma testleri şeklinde yapılmıştır. Ancak aşındırma yolu 2000 m yerine daha kısa 150 m olarak alınmıştır. Elde edilen Sonuçlar Çizelge 8.5 ve Çizelge 8.6 'da verilmiştir.

Çizelge 8.5. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim

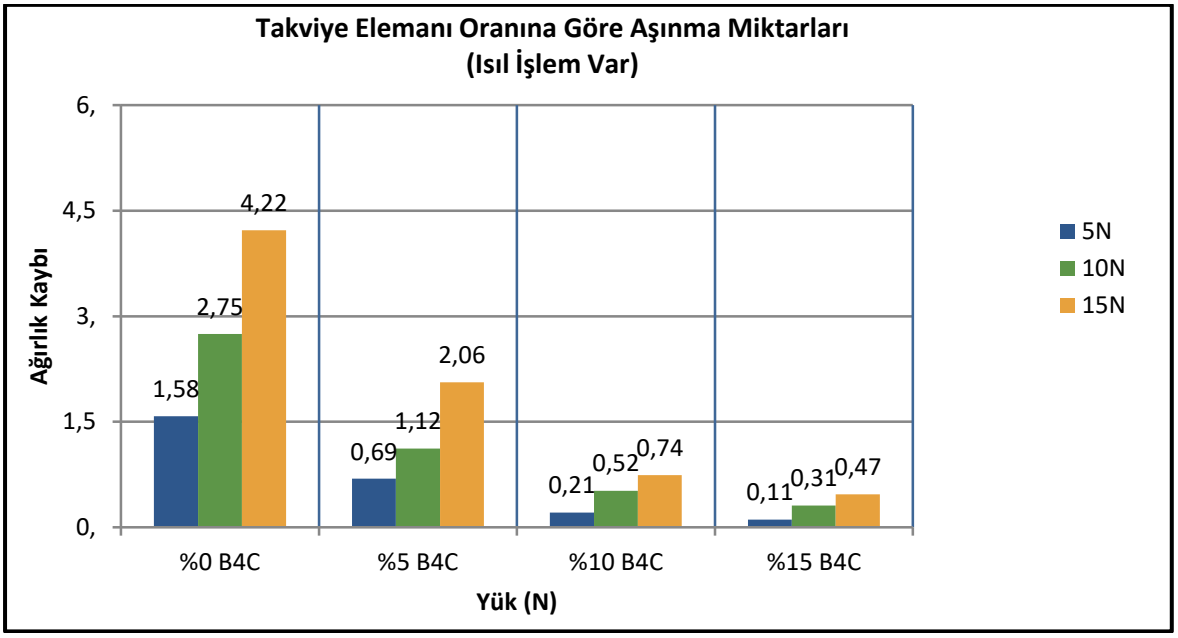
Kayma mesafesi (m)			150		
Kayma hızı (m/s)			1,05		
Uygulanan yük (N)			5N	10N	15N
Malzeme kompozisyonu	Alumix-13	Ağırlık Kayıpları (mg)	2,08	3,37	5,46
	Alumix-13+% 5 B_4C		0,84	1,45	2,36
	Alumix-13+% 10 B_4C		0,3	0,81	0,93
	Alumix-13+% 15 B_4C		0,18	0,42	0,54



Şekil 8.7. Toz metal parçalarda B_4C takviye oranı ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak elde edilen aşınma kayıplarındaki değişimi

Çizelge 8.6. Toz metal parçalarda uygulanan yüke ve malzeme kompozisyonuna bağlı aşınma kayıplarındaki değişim (Isıl işlem görmüş)

Kayma mesafesi (m)		150			
Kayma hızı (m/s)		1,05			
Uygulanan yük (N)			5N	10N	15N
Malzeme kompozisyonu	Alumix-13	Ağırlık Kayıpları (mg)	1,58	2,75	4,22
	Alumix-13+% 5 B_4C		0,69	1,12	2,06
	Alumix-13+% 10 B_4C		0,21	0,52	0,74
	Alumix-13+% 15 B_4C		0,11	0,31	0,47



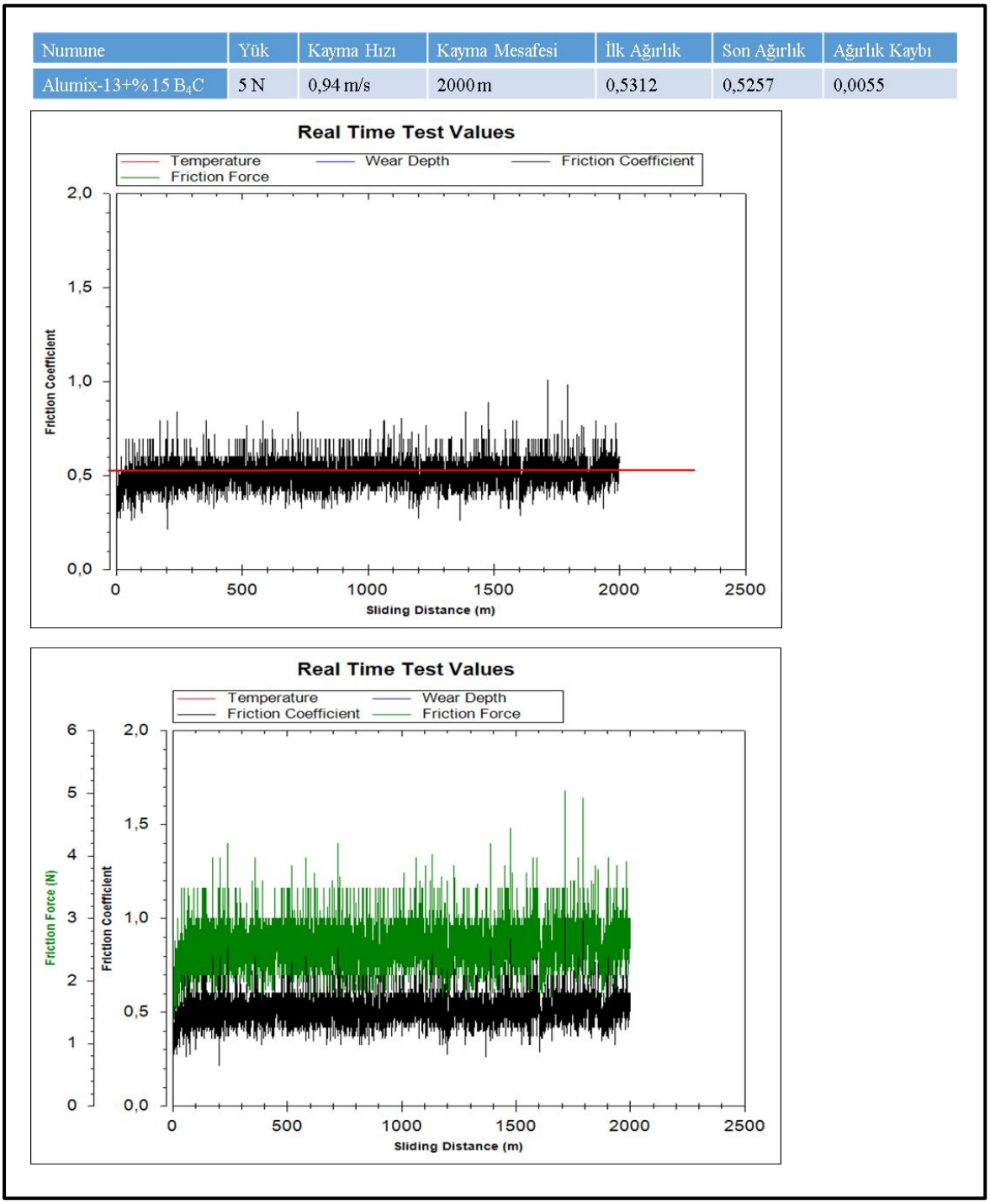
Şekil 8.8. Yaşlandırma ısıl işlemi görmüş toz metal parçalarda B_4C takviye oranı ve uygulanan aşındırma yüküne bağlı olarak elde edilen aşınma kayıplarındaki değişimi

Daha kısa mesafeli yapılan kuru kayma aşındırma testlerinde yaşlandırma ısıl işlemi gören bütün numunelerde ısıl işlem görmeyen numunelere göre daha düşük aşınma değerleri elde edilmiştir. 2000 m mesafede yapılan testlere göre 150 m mesafede yapılan testlerin sonuçlarının ısıl işlem gören numunelerin aşınma değerlerini daha düşük vermesinin temel sebebi şu şekilde açıklanabilir. Yaşlandırma ısıl işlemi gören numunelerin görmeyen numunelere göre sertlik değerlerinin artmış olması aşındırma sürecinde karşı aşındırıcı diski daha fazla aşındırmakta ve karşı diskin mesafe arttıkça aşındırılan numuneye daha fazla aşındırma etkisi yaptığı şeklinde yorumlanmıştır. Özellikle B_4C takviye elemanının karşı diski aşındırması ve diskin aşındırma performansının artmış olması aşındırılan numunelerin bir süre sonra başlangıçtaki pürüzsüz çelik disk üzerinde aşındırılması yerine adeta bir zımpara kâğıdı üzerinde abrasif aşınma teste tabi tutulduğu şartlar ortaya çıkmaktadır.

Bu nedenle sert seramik partikül takviye elemanı içeren kompozit numuneleri çelik disk üzerinde aşındırırken mümkünse daha kısa mesafelerde ve sürekli yeni yüzeyde aşındırma yaparak daha sağlıklı neticeler alınabileceği görülmektedir.

8.4. Sürtünme Kuvveti ve Sürtünme Katsayısındaki Değişim

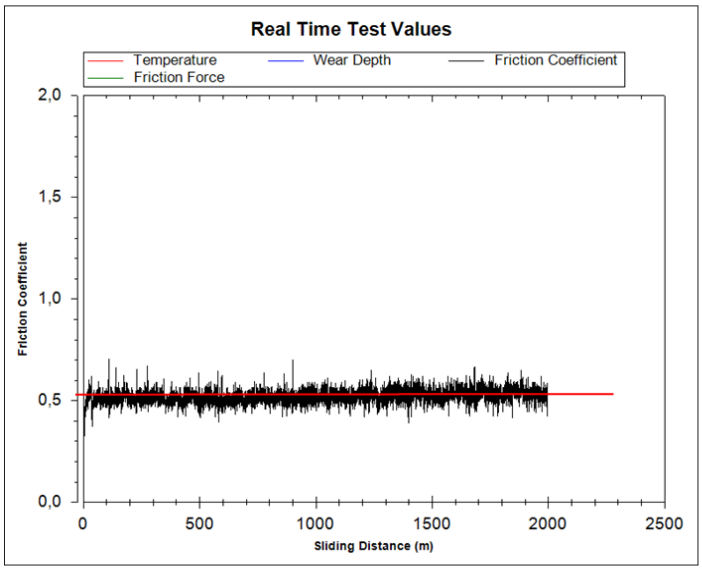
İlk bölümde 2000 m mesafeli ve 5 N yük altında yapılan aşındırma testlerinde sürtünme katsayısı yaklaşık 100 m mesafeye kadar artış gösterirken ilerleyen mesafelerde ortalama 0,5 olarak kaldığı görülmekte (Şekil 8,9).

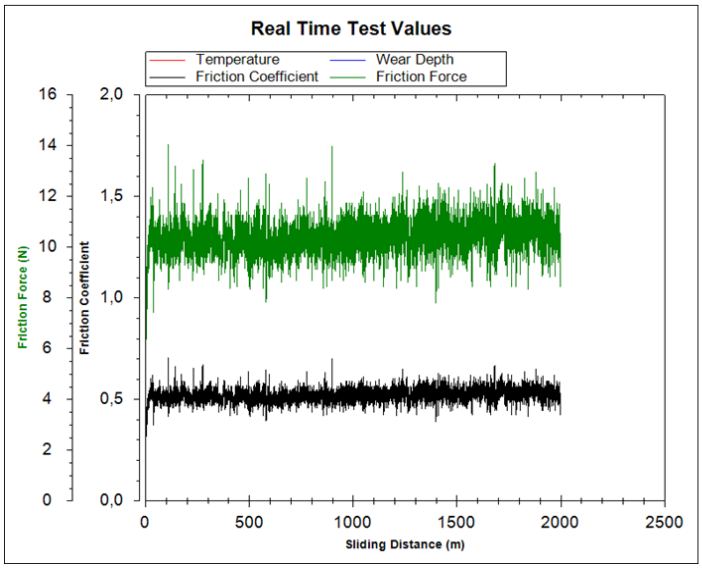


Şekil 8.9. % 15 B_4C içeren numunelerin 5 N yük altında aşınma testlerindeki sürtünme katsayısı ve kuvvetlerindeki değişim

Artan yükler altında yapılan testlerde ise artan mesafelerde disk yüzeyindeki bozulmadan kaynaklı sürtünme kuvvetinin ve aşınma katsayısının azda olsa arttığı görülmekte (Şekil 8,10).

Numune	Yük	Kayma Hızı	Kayma Mesafesi	İlk Ağırlık	Son Ağırlık	Ağırlık Kaybı
Alumix-13+%15 B_4C	20 N	0,94 m/s	2000 m	0,5245	0,5147	0,0098

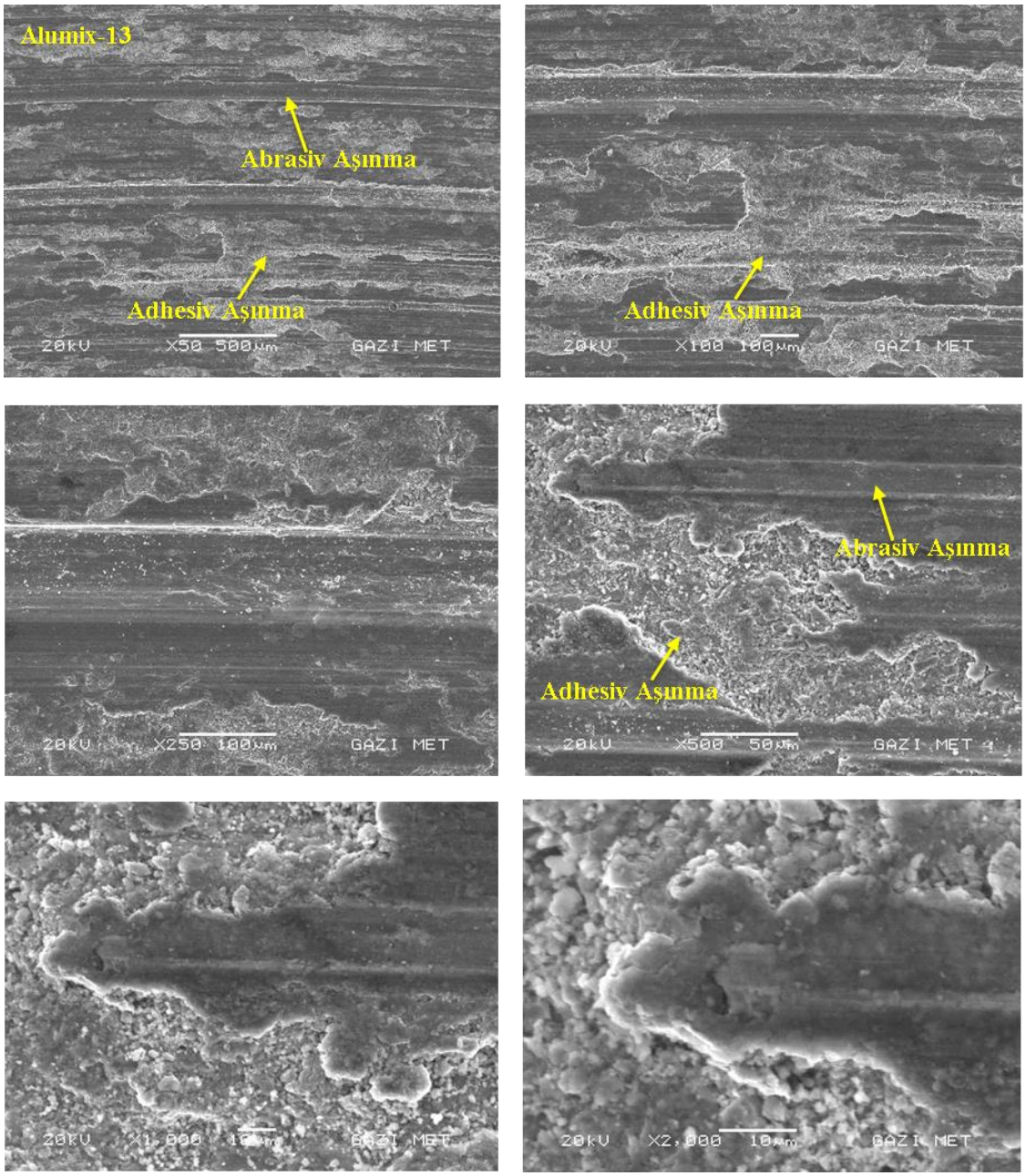




Şekil 8.10. % 15 B_4C içeren numunelerin 20 N yük altında aşınma testlerindeki sürtünme katsayısı ve kuvvetlerindeki değişim

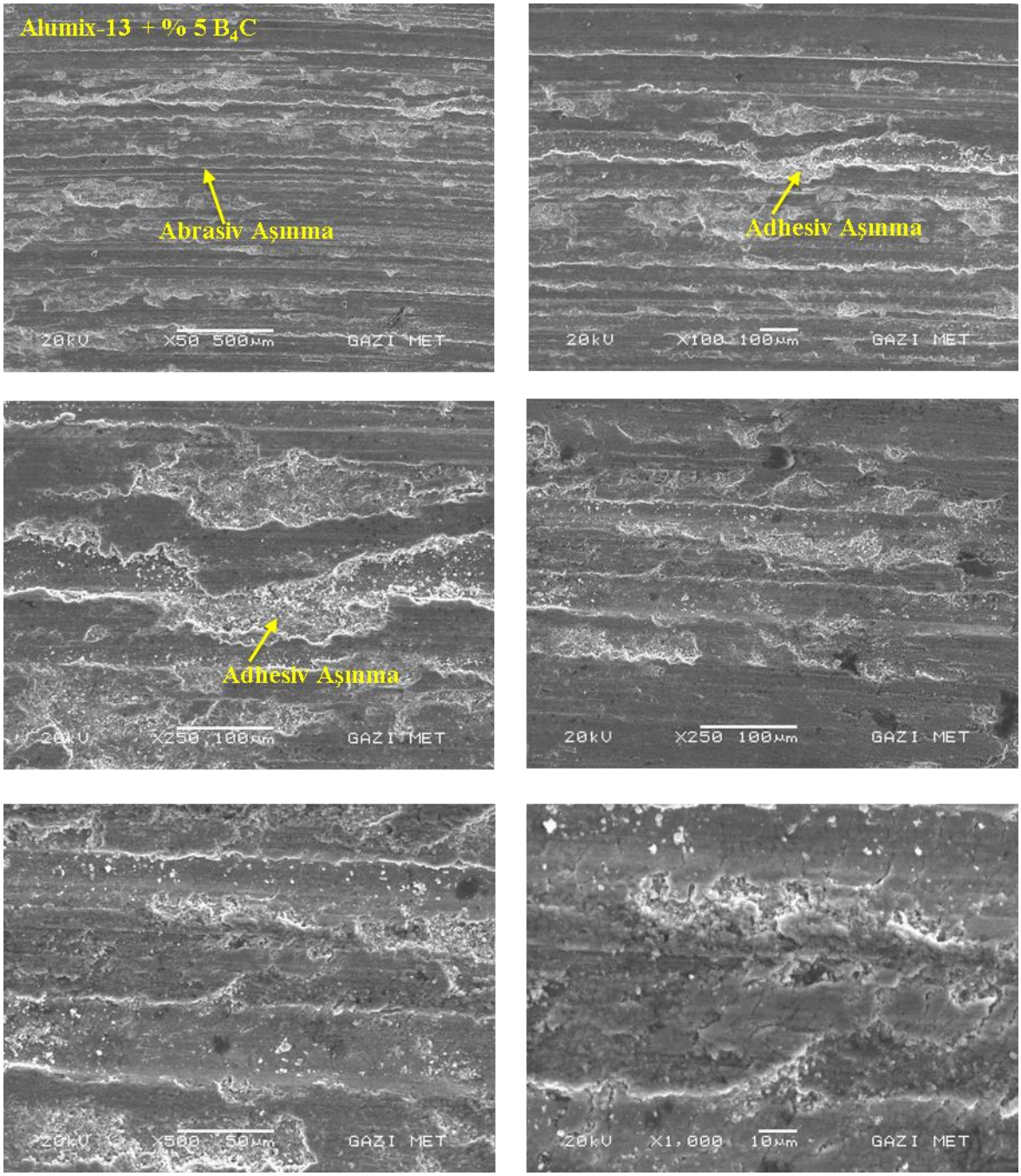
8.5. Aşınma Yüzey Karakteristiği ve Aşınma Mekanizması

Matris malzemesinden elde edilen toz metal parçanın 20 N yük altında 2000 m mesafeli kuru kayma aşındırma testleri sonrası elde edilen numune aşınma yüzeyi Resim 8.5'te görülmektedir. SEM görüntüleri numune yüzeyindeki aşınmanın abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmaları tesi altında gerçekleştiğini göstermektedir. Aşındırma yükü artarken adhesiv aşınmanın daha da artmış olduğu görülmüştür. Bu aşınma mekanizmaları işlerken numunelerde ciddi ağırlık kayıpları meydana gelmiştir.



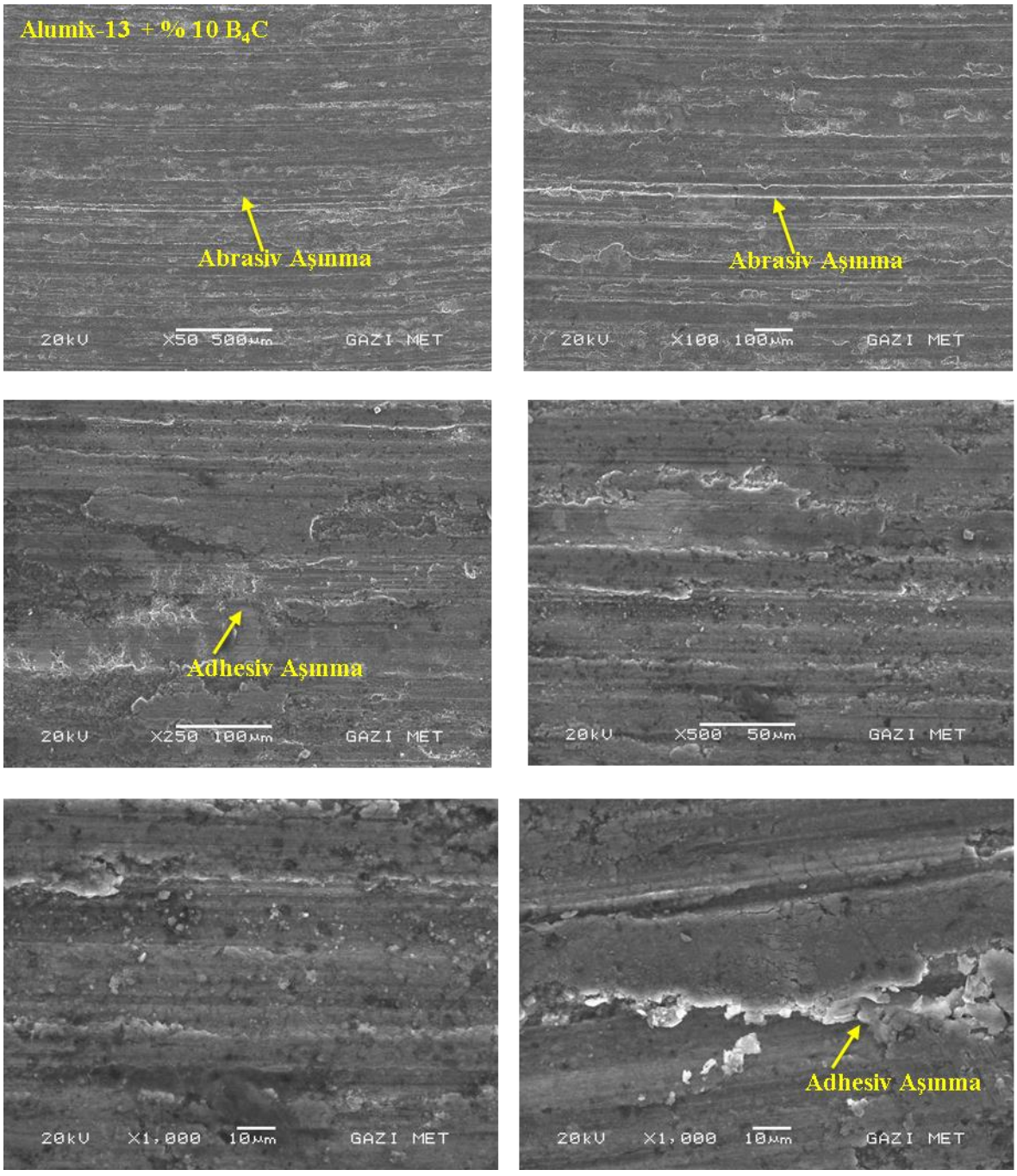
Resim 8.5. Alümix-13 toz metal numunelerde aşınma yüzey desenleri

% 5 B4C içeren kompozt numunelerin aşınma yüzey desenleri incelendiğinde matris malzemeye göre abrasiv aşınmanın arttığı fakat halen aşınma kayıplarında her iki aşınma mekanizmasının da etkili olduğu görülmekte. Kompozit malzemede takviye elemanına bağlı olarak ciddi değerlerde ağırlık kayıpları azalırken artan yüklerde aşınma kayıplarınında arttığı görülmektedir.



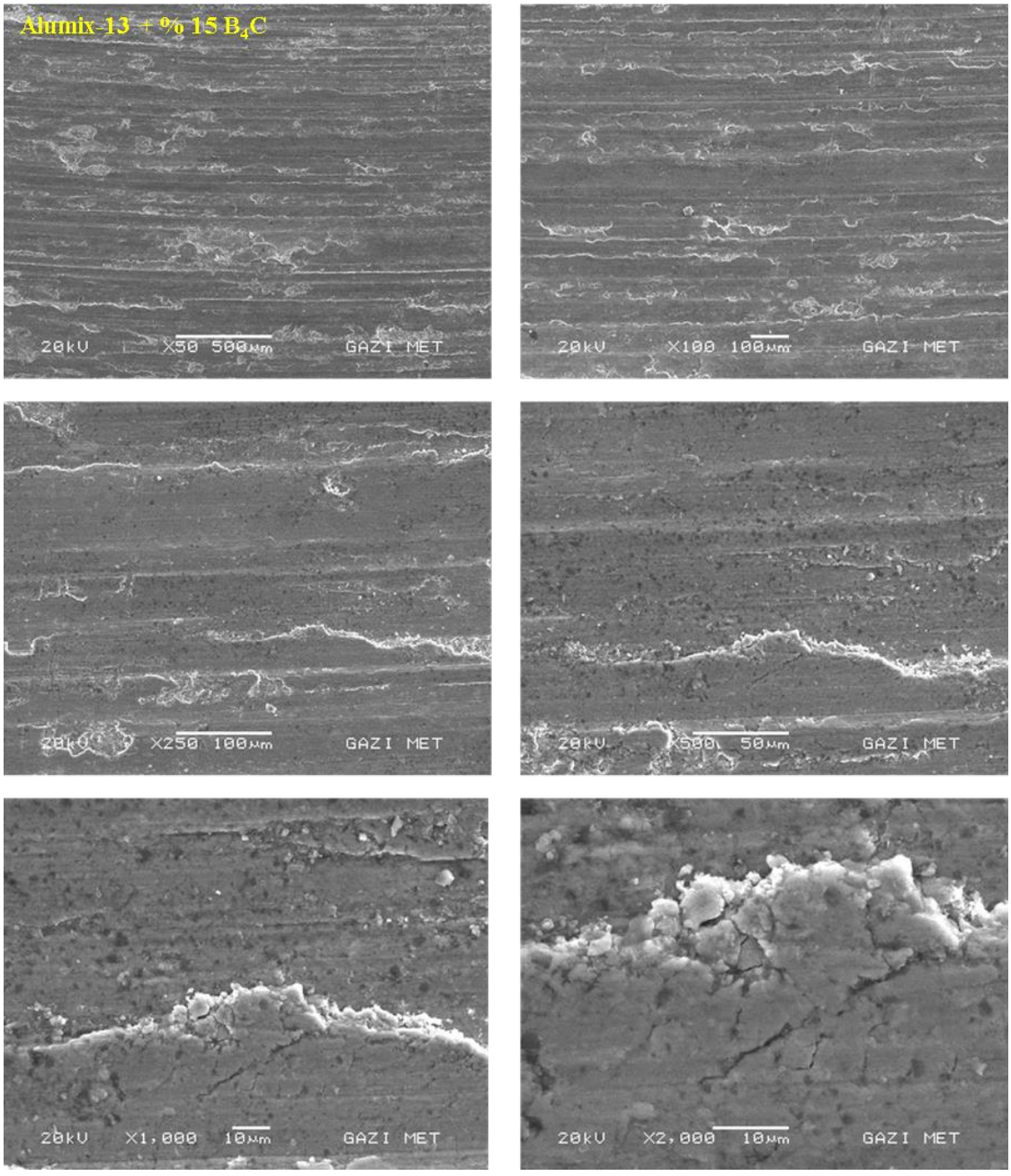
Resim 8.6. % 5 B_4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey desenleri

%10 B_4C içeren kompozit numunelerin tamamında bütün yükler altında matris yapıyla karşılaştırıldığında aşınma kayıplarında önemli azalmalar görülürken aşındırıcı disk yüzeyinin B_4C'ün aşındırıcı etkisi altında ciddi anlamda bozulduğu görülmüştür. Disk özerindek aşındırıcı yüzeyin bozulması numune yüzeylerinde abrasiv aşınma mekanizmasını ün plana çıkarırken, adhesivi aşınınmanın önemli ölçüde azaldığı görülmüştür.

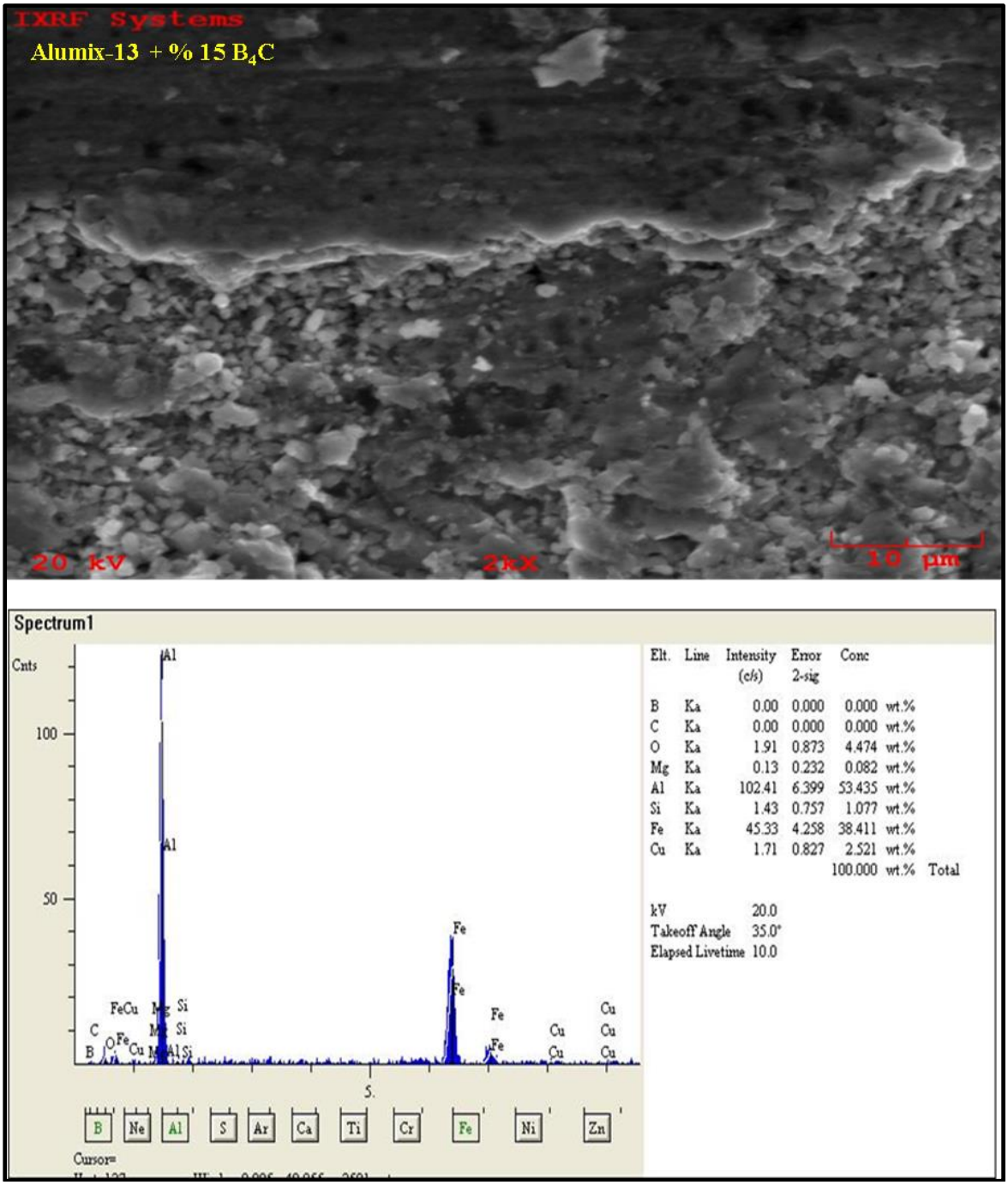


Resim 8.7. %10 B4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey desenleri

% 15 B_4C içeren toz metal kompozit malzemelerde en düşük aşınma kayıpları tespit edilirken numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri adhesiv ve abrasiv her iki aşınma mekanizması görülürken kompozit malzemenin yoğun şekilde diskin abrasiv aşındırma etkisi altında aşınmış olduğu görülmüştür. Seramik esaslı takviye elemanı içeren kompozit malzemelerin kuru kayma pin-on-disk metodu ile aşındırma uygulamasında takviye lemanının boyutunun küçülmesi ve kompozit yapı içerisindeki homojen dağılımı diskin aşındırıcı yüzeyinin takviye elemanı tarafınından bozulmasını azaltabilir.



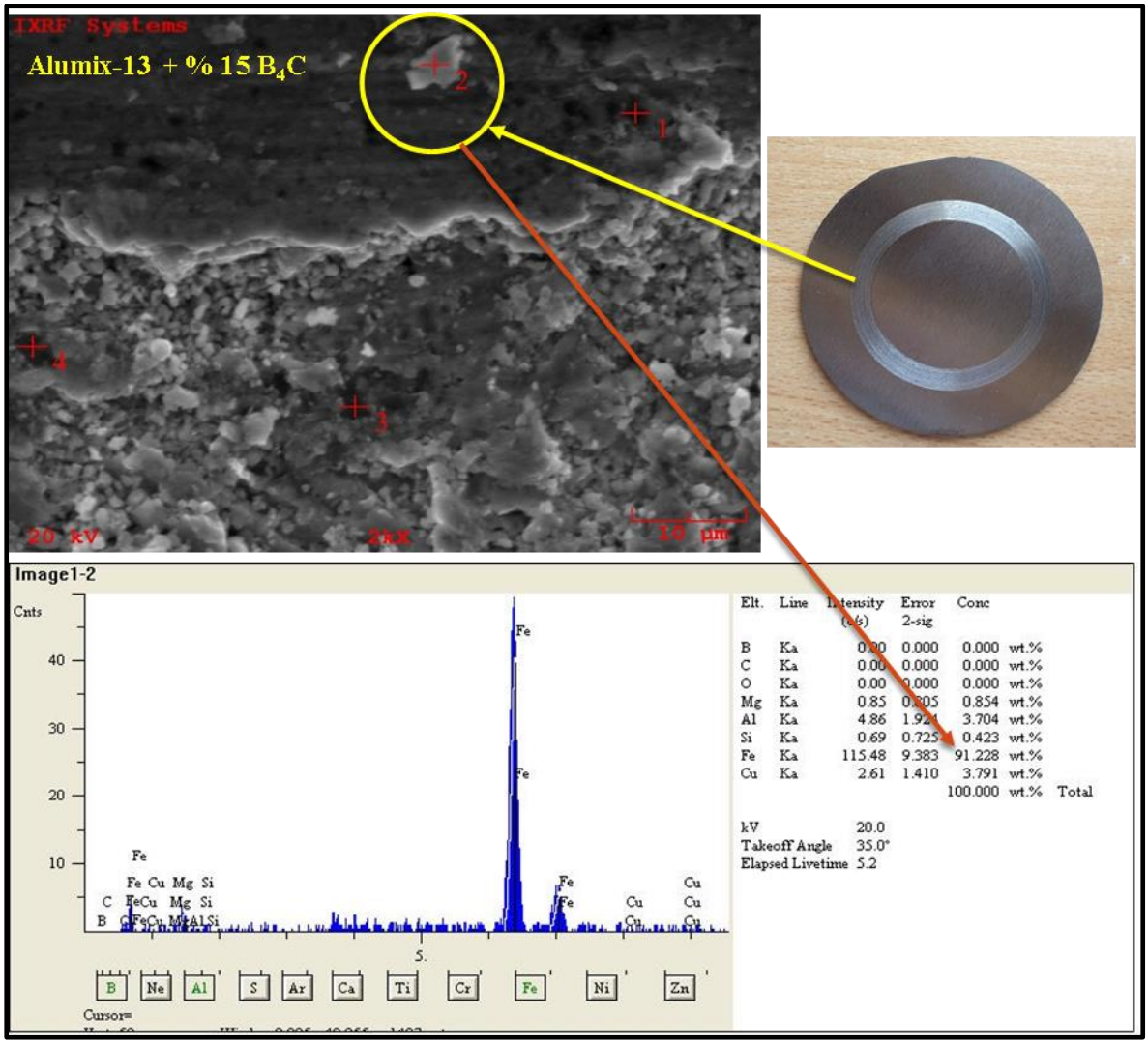
Resim 8.8. %15 B_4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey deseleri



Resim 8.9. SEM-EDX görüntü ve sonuçları

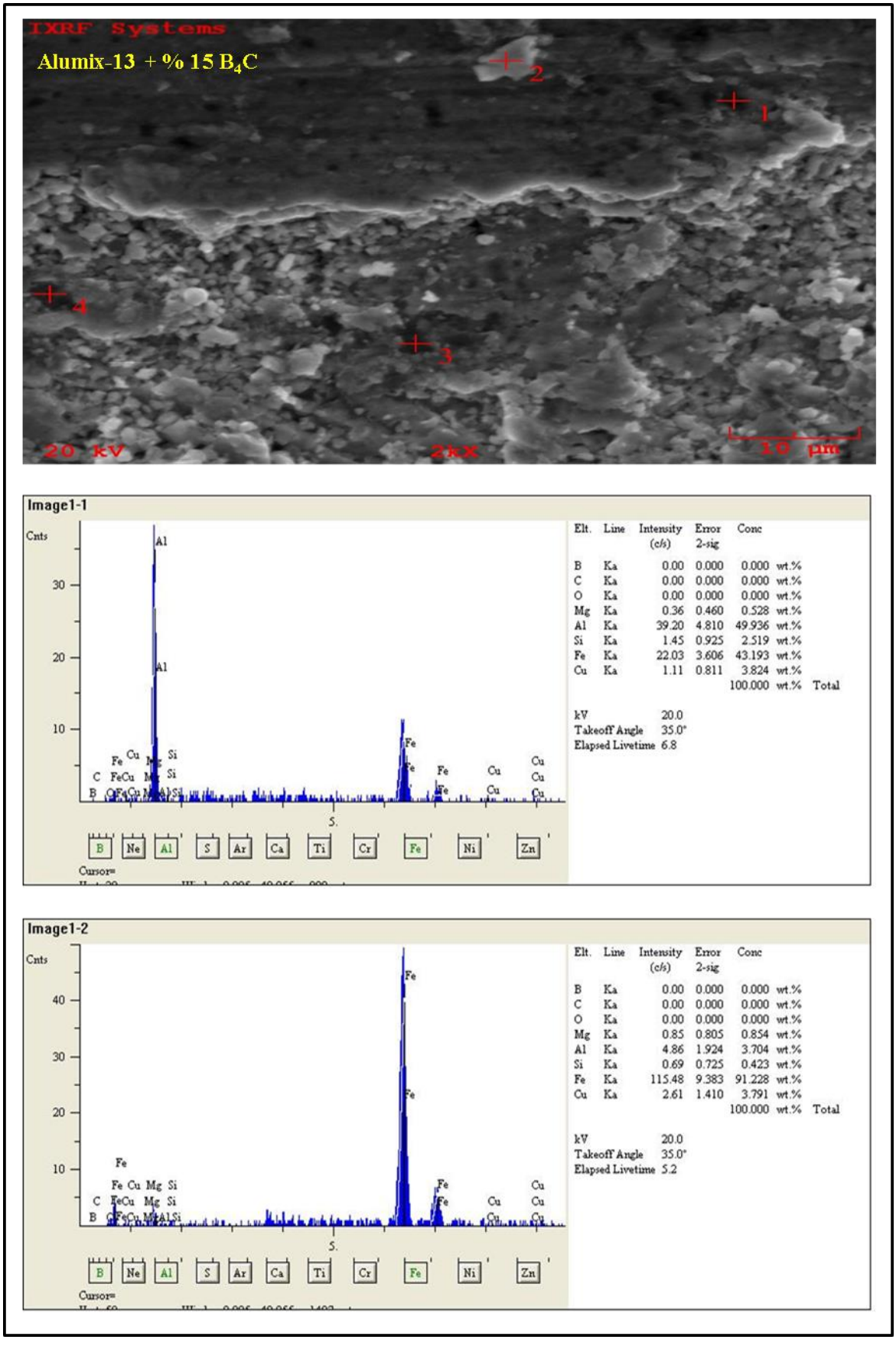
Aşınmış numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları matris malzemesine bağlı alüminyum, bakır, silisyum ve mağnezyum dışında ağırlıkça tespit edilen % 38,41 değerindeki demirin aşındırıcı yüzeyin aşınmasıyla ortaya çıkan atık olduğu ve aşınan numune yüzeyini kirletmiş olduğu görülmekte. Kompozitte bulunan seramik esaslı B4C takviye elemanının matris yapıya göre daha sert olan karşı aşındırıcı diski aşındırıp yüzey kalitesini bozarken diskin toz metal kompozit malzemeyi daha fazla aşındırdığı ve

normal olarak bu durumun standart dışı olduğunu söyleyebiliriz. Yani aşındırıcı disk yüzeyi aşınan numuneden etkilenmeden test süresince yüzey kalitesini koruyup aşındırma potansiyelini test süresince koruyabilseydi kompozit numunelerin aşınma kayıpları daha az ve aşınma performansları daha yüksek çıkabilecekti. Bu durumda B_4C takviye elemanı içeren kompozit toz metal malzemelerin elde edilen sonuçlardan daha iyi aşınma dayanımlarına sahip olduklarını söyleyebilmek yanlış olmayacaktır.



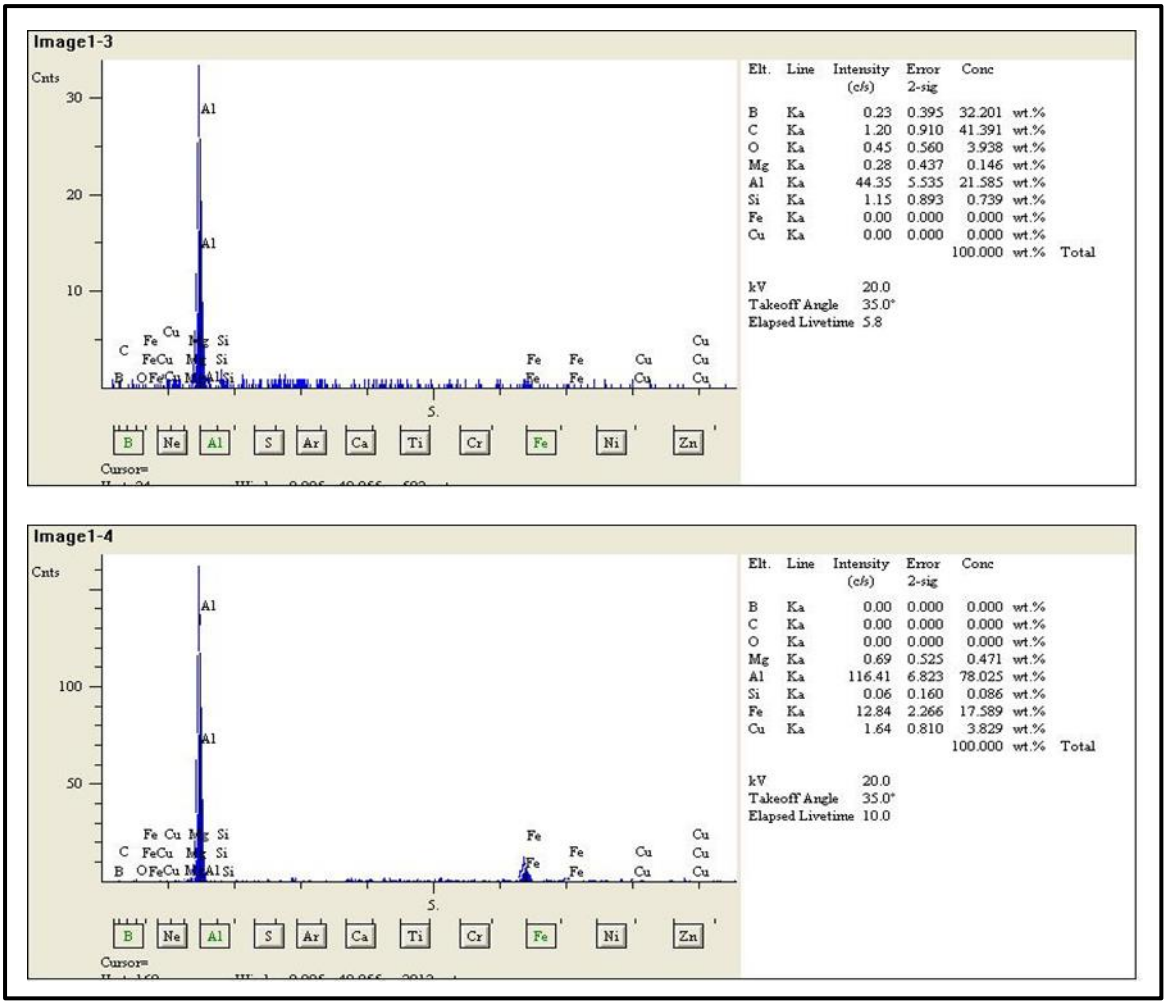
Resim 8.10. Disk üzerindeki aşınma ve numune üzerindeki kirlenme

%15 B_4C içeren numunelerin 20 N yük altında aşındırma testinde kompozit yapıda bulunan takviye elemanının aşındırıcı diski önemli ölçüde aşındırdığı görülmekte. Diskin aşınması sonucu açığa çıkan çelik atık yapınıon aşındırılan numune yüzeylerini kirletmesi çok küçük değerlerde de olsa numunelerdeki gerçek ağırlık kayıplarını azaltıcı etkiye sahip olabilir.



Resim 8.11. %15 B_4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey desenleri

%15 B_4C içeren numunelerin 20 N yük altında aşındırma testinde kompozit yapıda bulunan takviye elemanının aşındırıcı diski önemli ölçüde aşındırdığı görülmüştür. Bu durum diskin kompozit malzemeyi aşındırma etkisini daha da artırırken ağırlık ölçümleri ile bulunan aşınmaya bağlı ağırlık kayıplarından bağımsız olarak kompozit malzemelerin matris yapıya göre daha fazla aşınma direnci göstermekte olduğu sonucuna varılabilmektedir.



Resim 8.11. (Devam) %15 B_4C içeren kompozitin malzemenin 20 N yük altına aşınma yüzey desenleri

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Turbula cihazında gerçekleştirilen karıştırma sonrası % 5 oranında B_4C içeren kompozit malzemede B_4C'ün matris yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülürken % 10 ve 15 B_4C içeren kompozit malzemelerde B4C tozların yer yer aglomera olarak matris yapının tane sınırlarında yoğunlaştığı görülmüştür.
2. Sıcak presleme sonrası bütün numunelerde % 98 üstü yüksek yoğunluk değerleri elde edilebilmiştir.
3. Matris yapıya göre B_4C içeren kompozit malzemelerin tamamında sertlik artışı meydana gelirken, matris malzemeye göre en yüksek sertlik artışı % 55,68 ile %15 B_4C içeren kompozit malzemede elde edilmiştir.
4. Yapılan yaşlandırma ısıl işlemi sonrası bütün numunelerde sertlik artışı meydana gelirken, matris malzemesine göre 112,39 HBw değeri ile en yüksek sertlik artışı % 15 B_4C içeren numunede elde edilmiştir.
5. Aşındırma test sonuçlarına göre uygulanan yük artarken aşınma kayıpların da artış görülmüştür.
6. Aşındırma sonrası kompozit malzemelerde B_4C'e bağlı olarak matris malzemeye göre özellikle artan yükler altında önemli ölçüde ağırlık kayıplarında azalma meydana gelmiştir.
7. Uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonrası matris malzemesi ve kompozit malzemelerde önemli sertlik artışları meydana gelirken, aşınma kayıplarında da önemli azalmalar görülmüştür.
8. 2000 m mesafedeki aşındırma testinde yaşlandırma ısıl işlemi gören numunelerde aşınma kayıplarında ciddi azalma olmazken 150 m mesafede yapılan aşındırma testlerinde tüm numunelerde aşınma kayıplarının azaldığı görülmüştür.

Yapılan bu çalışma ve elde edilen çıktılar ışığında daha sonra yapılabilecek çalışmalar hakkında önrileri şu şekilde özetleyebiliriz.

1. Yaşlandırma ısıl işleminin seramik takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerinmikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerinin araştırılması.

2. Seramik takviyeli toz metal kompozit parçaların pin-on-disk metodu ile aşındırma testlerinde disk yüzeyindeki yıpranmanın aşındırılan malzemenin aşınma davranışı üzerine etkilerinin araştırılması.

KAYNAKLAR

1. Orhan, A., Gür, A. K., ve Çalıgülü, U. (2007). Al Matrisli B_4C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi,* 4, 8-13.

2. Kumdalı, F. (2008). *Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiile Üretimi.* Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-10.

3. Topcu, I., Gulsoy, H. O., Kadioglu, N., and Gulluoglu, A. N. (2009). Processing and mechanical properties of B4C reinforced Al matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 482(1-2), 516-521.

4. Hasırcı H., ve Gül, F. (2010). B4C /Al Kompozitlerin Takviye Hacim Oranına Bağlı Olarak Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *SDU International Technologic Science, Mechanical Technology,* 2 (1), 15-21.

5. Taşcı, U., Gökmeşe, H., ve Bostan, B. (2013). AA 2014 Al Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mikro Yapı ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1(4), 161-168.

6. Ayvaz, M., ve Çetinel, H. (2014). Farklı Matris Kompozisyonları ve Takviye Oranları İçin Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 45-53.

7. Çolak, N. Y., ve Turhan, H. (2016). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Al-Si/B4C Kompozit Malzemenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 259-266.

8. Çelik, Y. H., and Seçilmiş, K. (2017). Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B4C rate produced by powder metallurgy method. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2218-2224.

9. Gökmeşe, H., ve Karadağ, H. B. (2018). Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(2), 385-398.

10. Javdani, A., and Daei-Sorkhabi, A. H. (2018). Microstructural and mechanical behavior of blended powder semisolid formed Al7075/B4C composites under different experimental conditions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(7), 1298-1310.

11. Tinga, S. (2019). AA6061 *Matrisli B4C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-12.

12. Bayraktar, Ş., and Turgut, Y. (2020). Determination of Delamination in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Carbon Matrix Composites/Al 6013-T651 Stacks. *Measurement*, 154, 107493.

13. İnternet: Her Yönüyle Alüminyum. URL: https://www.assanaluminyum.com/tr-tr/surdurulebilirlik/her-yonuyle-aluminyum, Son Erişim Tarihi: 14.03.2019.

14. İnternet: Alüminyum Raporu. URL: http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=115&tipi=5&sube=0, Son Erişim Tarihi: 14.03.2019.

15. İnternet: Aluminum. URL: https://www.britannica.com/science/aluminum, Son Erişim Tarihi: 14.03.2019.

16. İnternet: Al ve Alaşımları. URL: http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum_ve_Aluminyum_Alasimlari.pdf, Son Erişim Tarihi: 20.03.2019.

17. Ay, S. (1980). *Alüminyum Oksit Tabakasının Elektrolitik Renklendirilmesi*, Yüksek lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5-12.

18. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2005). Aliminyum Alaşımları Modülü, *MEB*, Ankara, 10-13.

19. Eroğlu, G., ve Şahiner, M. (2018). *Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum*. Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, 12-15.

20. İnternet: Dünya Alüminyum Pazarı ve Ticaretinde Türkiye'nin Yeri, URL: https://tr.linkedin.com/pulse/d%C3%BCnya-al%C3%BCminyum-pazar%C4%B1-ve-ticaretinde-t%C3%BCrkiyenin-yeri-k-mert-demirci, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

21. Clyne, T. W. and Withers, P. J. (1993). *Metal Matrix Composites*. Cambridge University Press, 459.

22. Baloğlu, A. (2008). *Alüminyum Alaşımlarına Anodik Oksit Filmi İçerisine Gümüş Katılması Yolu İle Antibakteriyel Özellik Kazandırılması.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 14-22.

23. İnternet: Alümina Teknolojisi ve Üretimi, URL: http://www.kuark.org/2014/09/alumina-teknolojisi-ve-uretimi/, Son Erişim Tarihi: 15.03.2019.

24. İnternet: Özel Alüminalar-1: Kalsine Alüminalar. URL: https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi141/d141_2530.pdf, Son Erişim Tarihi: 20.03.2019.

25. Engineering Ceramics. (1994). *U.S. Materials, Applications, Markets*. Tecnomics Pub. Com. Inc, Lancaster, Pennsylvania, 38-52.

26. Surappa, K. M. (2003). Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities. *Sadhana*, 28(1), 319-334.

27. Ekinci, Ş. V. (2007). *Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 17-25.

28. İnternet: Kompozit Malzemeler Ders Notu. URL: https://docplayer.biz.tr/12475078-Sakarya-meslek-yuksekokulu-makina-ve-metal-teknolojileri-bolumu-metalurji-programi-kompozit-malzemeler-ders-notu.html, Son Erişim Tarihi: 22.03.2020.

29. Mazumdar, S. K. (2001). *Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering*, CRC Press, USA, 44-45.

30. Hull. D., and Clyne, T.W. (1996). *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Pres, Cambridge, UK, 68-70.

31. Ashby, M. F. (2005). *Materials Selectin Mechanical Design*. Amsterdam; Boston: Butterworth-Heinemann, 112-114.

32. Sönmez, M. (2009). *Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi Ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 7-14.

33. Gülüzade, R. (2011). *Alüminyum ve Çelik Testere Talaşlarından Sinterleme İle Üretilen Metal Matriks Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Ve Kırılma Davranışları*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 6-11.

34. Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit Malzeme*. İstanbul: Literatür Yayıncılık, 11-15, 95-116.

35. Toptan, F. (2006). *Alüminyum Matrisli B_4C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi İle Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 9-11, 30-41.

36. Kato, A. and Yoshida, H. (1992). Advanced Ceramics Production and Markets in Japan. *Industrial Ceramics*. 12(1). 22-27.

37. German, M. R. (1996). *Sintering Theory and Practice*. John Willey&Sons Inc. New York, 24-25.

38. İnternet: Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler. URL: http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genelbilgiler.pdf, Son Erişim Tarihi: 20.03.2019.

39. İnternet: Composite Materials Handbook, Ceramic Matrix Composites. URL: http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-175.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.05.2019.

40. Froyen, L. and Verlinden, B. (1994). Aluminium Matrix Composites Materials. *Training in Aluminium Application Technologies (TALAT) Lecture 1402*. European Aluminium Association. 13-24.

41. İnternet: Metal Matriks Kompozitlerin Üretim Yöntemleri. URL: https://metaldunyasi.com.tr/index.php?page=tr/arsiv/2011/11/metal-matriks-kompozitlerin-uretim-yontemleri.html, Son Erişim Tarihi: 21.03.2019.

42. Akbulut, H. (1994). *Alümina Fiber Takviyeli Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı-Özellik ilişkilerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13-19.

43. İnternet: Metal Matrisli Kompozit Malzemeler. URL: https://slideplayer.biz.tr/slide/2007898/, Son Erişim Tarihi: 21.03.2019.

44. Sur, G., Şahin, Y., ve Gökkaya, H. (2005). Ergimiş Metal Karıştırma ve Basınçlı Döküm Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Tanecik Takviyeli Kompozit Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2). 233-238.

45. Şenel, L., Akcakale, N., ve Gül, F. (2015). Otomotiv Parçalarının Üretimi İçin Yarı Katı Metal Proses Teknolojisi. 2. *Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 13-15.

46. Kennedy, A. R. and Brampton, B. (2001). The Reactive Wetting and Incorporation of B4C Particles into Molten Aluminium. *Scripta Materiala*, 44, 1077-1082.

47. Kerti, I. Ç. (1998). *Gaz Enjeksiyon ve Elementel Karbon İlavesi Yöntemleri ile TiC Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi.* Yayımlanmamış Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 14-38.

48. German, R. M. (2007). *Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri*. Çeviri Editörleri, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu N., Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 60-80.

49. Metin, Ö., ve Gavgalı, M. (2015). In Sıtu Alüminyum Metal Matrisli Kompozitler Ve Sıcak Presleme İle Üretimleri. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(2), 63-73.

50. Jian-ying, F. U. (2008). Study on the Technic Process of TiC/2618 Composite Prepared by XD Method [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 6, 1-4.

51. Wernick, S., Pinner, R., and Sheasby, P. G. (1987). The *Surface Treatment and Finishing of Aluminium and its Alloys, Finishing Publications*. Trowbridge, 12-13.

52. Samal, P., and Newkirk, J. (2015). *History of powder metallurgy*. ASM Handbook, 7, 3-8.

53. ASM Handbook (1998). *Powder Metal Technologies and Applications*, ASM International, USA, 22-54.

54. Nazik, C. (2013). *Alüminyum Matrisli B_4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 20-35.

55. İnternet: Metal Powder Production; Gas Atomization and Other Methods, URL: https://mechanicalbase.com/metal-powder-production-gas-atomization-and-other-methods, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

56. İnternet: Metal Matrisli Kompozit Malzemeler. URL: https://slideplayer.biz.tr/slide/2007898/Son Erişim Tarihi: 21.03.2019.

57. Avşar, E. (2009). *Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Sinterleme İle Birleştirilmesi.* Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 21-27.

58. Ayata, A. (2014). *Toz metal alüminyum malzemelerin mikrodalga enerjisi ile sinterlenebilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 32-36.

59. Tunay, R. F., Varol, R., ve Yılmaz, S.S. (2002). Borlamanın T/M çeliklerin mekanik özelliklerine etkisi. *3. Uluslararası Toz Metalürjisi Konferansı*, 1221-1228.

60. Yılmaz, S. S., Ünlü. B. S., ve Varol, R. (2005). Borlanmış demir esaslı FeCu-Grafit T/M malzemenin aşınma ve mekanik özellikleri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3, 11-21.

61. Babayev, Y. (2007). *Bir Kompresör Gövdesi İmalatının Toz Metalurjisi Ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Uygulanarak Optimizasyonu.* Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 12-18.

62. Meriç, C., Atik, E., ve Türüdü, T. (2005). Kaynakla birleştirilmiş demir esaslı toz metal parçaların kaynak bölgesinin incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 1-11.

63. Metal Powder Industries Federation (1995). *Powder Metallurgy Design Manual*, USA, 2, 8-15.

64. İnternet: Toz Üretim Teknikleri. URL: http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html, Son Erişim Tarihi: 21.03.2019.

65. Sarıçiçek, N. (2012). *Östemperlenmiş toz metal çeliklerin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-17.

66. Froes, F. H., Ward C. M., Taylor, P. R., and Baeslack, W. A. (1995). *P/M in Aerospace, Defense and Demanding Applications*. F.H. Froes, Ed. Metal Powder Industries Federation, 3-4.

67. Conway, J. J., and Rizzo, F. J. (2004). *Hot isostatic pressing of metal powders, Powder Metal Technologies and Applications,* ASM Handbook, USA, 30-55.

68. Aba, S. (2017). T/M *Yöntemiyle Üretilen Alaşımların (85/15 Bronz) Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Co Ve Ni Elementleri İle Sinterleme Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 22-28.

69. Bose, A., and Eisen, W.B. (2003). *Hot Consolidation of Powders and Particulates*. MPIF, Princeton, NJ, 22-32.

70. Karataş, A. (2014). *İkili Seramik Malzemelerin Birlikte Presleme-Sinterleme, Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Karakterizasyonu.* Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 8-15.

71. İnternet: Soğuk İzostatik Presleme Nedir? URL: https://malzemebilimi.net/soguk-izostatik-presleme-nedir-nasil-uygulanir.html, Son Erişim Tarihi: 21.03.2019.

72. İnternet: Pekiştirme ve Presleme Teknikleri. URL: http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/48939/35354/toz_%C5%9Fekillendirme_2015.pdf, Son Erişim Tarihi: 21.03.2019.

73. İnternet: Fundamentals of Modern Manufacturing. URL: http://www.me.nchu.edu.tw/lab/CIM/www/courses/Manufacturing%20Processes/Ch16-PowderMet-Wiley.pdf, Son Erişim Tarihi: 21.03.2019.

74. Sundaram, V. M. (2017). *Processing Methods for Reaching Full Density Powder Metallurgical Materials.* Chalmers Unıversity Of Technology. İsveç. 12-16.

75. Topuz, A. (2012). *Döküm ve Toz Metalurjisi Yöntemleri İle Üretilen AA 2014-Al_4C_3 Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-15.

76. Koçer, T. (2002). *Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Al_2O_3 ve SiC Partikül Takviyeli Al-Mg Metal Matriksli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13-24.

77. İnternet: Triboloji Prensipleri ve Uygulama Örnekleri. URL: http://www.yildiz.edu.tr/~kaleli/TribolojiPrensipleriveUygulamalar.pdf, Son Erişim Tarihi: 01.05.2019.

78. Halling, J. (1977). Tribology Science and Practise. *Physics in Technology*, 8, 116- 122.

79. Brushan, B. (1999). *Principles and Applications of Tribology*. Wiley Interscience Publication, San Francisco, ABD, 271-321.

80. İnternet: Aşınma Nedir? URL: https://www.uslularhadde.com/asinma-nedir, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

81. İnternet: Malzeme Bilgisi, URL: http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

82. İnternet: Aşınma Nedir? Aşınma Tipleri Nelerdir? URL: https://weldwolf.com/asinma-nedir-asinma-tipleri-nelerdir, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

83. Palacı, Y. (2001). *Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi.* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 32-38.

84. Wakeel S., Saleem M., and Nemat A. (2017). A Review on The Mechanical Properties of Aluminium Based Metal Matrix Composite via Powder Metallurgy, *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 5, 15-19.

85. Güler, O. (2015). *Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Za27 Esaslı Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 7-18.

86. Kato, K., and Adachi, K., (2001). *Modern Tribology Handbook,* Wear Mechanisms, CRC Press LLC, London, 18-24.

87. Owsalou, R. G. (2012). *Aşınmaya Maruz Kalan Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 9-15.

88. İnternet: Arıza Bilgisi, URL: https://yenmak.com.tr/Upload/tr-21072020-112043.pdf, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

89. İnternet: Abrasive Wear, URL: http://reiloyusa.com/processing-tips/screw-barrel-wear/abrasive-wear, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

90. Brushan, B. (2001). *Modern Tribology Handbook*. CRC Press, Boca Raton, ABD, 37-74.

91. Hutchings, I.M. (1992). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. CRC Press, London, 15-22.

92. İnternet: Triboloji, URL: https://www.wikiwand.com/tr/Triboloji, Son Erişim Tarihi: 13.06.2021.

93. Yıldız, T., ve Gür, A.K. (2006). *Aşınma Sistemleri,* Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 86-91.

94. Yılmaz, M. (2013). *Kompozitlerin Kuru Kaymadaki Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 41-44.

95. Hutchings, I. M., Imbeni, V., and Breslin, M. C. (1999). *Abrasive Wear Behaviour Of An Al2o3-Al Co-Continuous Composite.* Wear. 233, 462-467.

96. Wang, A. G., and Hutchings, I. M. (1989). Wear Of Alumina Fibre-Aluminum Metal Matrix Composites by Two Body Abrasion. *Materials Science and Technology*, 5, 71-76.

97. Candan, E., Ahlatçı, H., and Çimenoğlu, H. (2001). Abrasive Wear Behaviour Of Al-Sic Composites Produced By Pressure Infiltration Technique. *Wear*, 247, 133-138.

98. Axen, N., Alahelistan, A., and Jacobson, S. (1994). Abrasive Wear Of Alümina Fibre Reinforced Aluminum. *Wear*. 173, 95-104.

99. Koraman, E. (2011). *Al-Fe-V-Si Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 12-18.

100. Akkurt, M. (1982). *Makine Elemanları,* Birsen Kitapevi Yayınları, İstanbul, 44-48.

101. Özkan, S. (2007). *Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi Ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-18.

102. Ünlü, B. S., Durmuş H., and Akgün S. (2009). Tribological and Mechanical Properties of Al Alloyed Bearings. *Journal of Alloys and Compounds,* 487, 225-230.

103. Kumay, S., and Sen S. S. (2014). Wear and Friction in Journal Bearing: A Review. *International Journal of Engineering and Management Research*, 4, (4), 250-263.

104. Andres, R. M. (2015). *Tribological Behaviour Of Dp600 Dual Phase Steel On Uni- And Bi- Directional Discontinuos Sliding Wear*. Doktora Tezi. Universidad Complutense De Madrid Facultad De Ciencias Fisicas. İspanya, 40-45.

105. McKeen, L. W. (2010). *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and* Elastomers *(Second Edition)*. Plastics Design Library. 25-38.



GAZİ GELECEKTİR..