



**TOZ METALURJİ METODU İLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM MATRİSLİ
VE ALÜMİNA TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMENİN ABRASİV
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Furkan YALÇINKAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2018

Furkan YALÇINKAYA tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİ METODU İLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM MATRİSLİ VE ALÜMİNA TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMENİN ABRASİV AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Halil ARIK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mustafa BOZ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Adem KURT

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 25/05/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Furkan YALÇINKAYA

17/05/2018

TOZ METALURJİ METODU İLE ÜRETİLEN ALÜMİNYUM MATRİSLİ VE
ALÜMİNA TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMENİN ABRASİV AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Furkan YALÇINKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

ÖZET

Bu çalışmada, sıcak presleme ile alüminyum matrisli, ağırlıkça % 5, 10 ve 15 alümina takviyeli kompozit malzemeler üretilmiş ve pin-on-disk cihazı ile abrasiv aşınma özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, alümina parçacık takviyesinin Al metal matrisin abrasiv aşınma davranışına etkilerini araştırmaktır. Takviye malzemesi olarak parçacık boyutu -32 μm ve saflığı % 99,52 olan alumina tozu, matris malzemesi olarak -160 μm boyutta ve % 99,7 saflıkta alüminyum tozu kullanılmıştır. Alüminyum ve alümina tozlarının birbiri içerisinde homojen dağılımını sağlamak için, bu tozlar 12 mm çapında çelik bilye içeren yüksek enerjili atritörde iki saat boyunca karıştırılmıştır. Alüminyumun bilyelere ve karıştırma tankı duvarlarına sıvanmasını önlemek için yağlayıcı olarak ağırlıkça % 1,5 çinko sterat karışım toza eklenmiştir. Mekanik karıştırmadan sonra 8 mm çapında ve 18 mm boyunda aşınma testi numuneleri üretmek için 400 MPa basınçta ve 580 °C’de 1 saat süreyle tek yönlü ekstenel kalıpta sıcak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kompozit blok parçaların mikroyapı incelemeleri, yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Abrasiv aşınma testleri pin-on-disk cihazı kullanılarak 200 m mesafede değişen yükler (2-8 N) altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde aşındırıcı karşı taraf olarak 320-600 mesh arası SiC zımparalar kullanılmıştır. Sonuçlar mekanik karıştırma sonrası matris yapıda alüminanın homojen olarak dağıldığını göstermiştir ve bu durum kompozit malzemenin mekanik özelliklerine pozitif katkı sağlamıştır. Pin-on-disk aşınma testinde sonuçlar ağırlık kayıplarına göre hesaplanmış ve test sonuçları kompozitin aşınma direncinin alüminyum toz metal parçaya göre daha iyi olduğunu göstermiştir. En iyi aşınma testi sonuçları % 15 alümina içeren kompozit numuneden elde edilmiştir. Bu malzemenin 8 N yük altındaki aşınma testlerinde matris malzemeye göre ağırlık kaybının % 65-80 aralığında azaldığı ve sertliğinin % 107 artmış olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91528

Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, sıcak presleme, alüminyum-alümina, kompozit malzeme, aşınma

Sayfa Adedi : 113

Danışman : Prof. Dr. Halil ARIK

INVESTIGATION OF ABRASIVE WEAR BEHAVIOUR OF ALUMINUM MATRIX
AND ALUMINA REINFORCED COMPOSITE MATERIAL PRODUCED BY
POWDER METALLURGY METHOD

(M. Sc. Thesis)

Furkan YALÇINKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2018

ABSTRACT

In this study, aluminum matrix reinforced by adding 5;10 and 15 % wt. alumina composite materials were produced via hot pressing process and its abrasive wear properties using pin-on-disc machine were investigated. This study is an attempt to investigate the effects of adding alumina as reinforcement particles to abrasive wear behavior of Al metal matrix. As reinforcement materials, alumina powder with -32 μm particle size and 99.52 purity and as matrix materials aluminum powder with - 160 μm and 99.7 % purity were used. To homogenously distribute aluminum and alumina powders in each other, both powders were mixed in a high-energy attritor containing steel ball in 12 mm diameter for two hours. To prevent sticking of aluminum to ball and to wall of the milling tank, 1.5 % wt. zinc stearate was added to the mixture as a process control agent. After the mechanical mixing of powders, to produce wear test sample in 8 mm diameter and 18 mm length hot pressing process were performed under 400 MPa pressure at 580 °C for 1 hour in axial die by using a single action press. Then microstructural examination, density and hardness measurements of composite block samples were done. Abrasive wear tests using pin-on-disc machine were performed under the varying load for 200 m distance. During the wear tests, SiC sandpapers between 320-600 mesh were used as abrasive materials. The results showed that after the mechanical mixing, homogenously distribution of alumina in the matrix structure was obtained and this situation positively affected the mechanical properties of the composite material. The results were evaluated based on weight loss in pin-on-disc wear tests and test results have shown that the composite has better wear resistance than aluminum powder metal part. The best wear test results were obtained in composite specimens containing 15% alumina. The test results show that wear loss of this composite material under the 8 N load reduced by 65-80 % compared to aluminum matrix material and the hardness value increased by 107 %.

Science Code : 91528

Key Words : Powder metallurgy, hot pressing, aluminum-alumina, composite material, wear

Page Number : 113

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.

Laboratuvar çalışmalarında ihtiyaç duyduğum zamanlarda her türlü desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Görkem KIRMIZI ve Arş. Gör. İrem Burcu ALGAN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tez yazım kısmındaki yardımlarından dolayı Gülçin SARI'ya, bu zorlu dönemde sevgi ve desteği ile hep yanımda olan Melike ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Her anımda beni destekleriyle yalnız bırakmayan sevgili arkadaşlarım Ezgi YAZICI, Hande AYDEMİR, Hatice Kübra YERLİ, Fatih KURUL, Mesut YILMAZ, Ashkan EZZATKHAHBASTANI, Orçun ORHAN, Yavuz Selim KILIÇARSLAN, Salih TERYAKİ ve Serkan EGE'ye sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımda her zaman yanımda olup, beni yetiştirip bu günlere gelmemdeki emekleri, sabır ve desteklerinden dolayı sevgili aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1.GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM (Al) VE ALÜMİNANIN (Al ₂ O ₃) ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri	5
2.2. Alüminanın Özellikleri	6
2.3. Alüminyum Esaslı Metal Matrisli Kompozitler	7
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	9
3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri.....	9
3.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	10
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	14
3.3.1. Polimer matrisli kompozitler (PMK).....	18
3.3.2. Metal matrisli kompozitler (MMK).....	19
3.3.3. Seramik matrisli kompozitler.....	20
3.4. Kompozit Malzemelerin Üretimi.....	21
3.4.1. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm.....	22
3.4.2. Sıvı metal emdirmesi.....	23

	Sayfa
3.4.3. Karıştırma (Vorteks).....	24
3.4.4. Yarı katı döküm.....	25
3.4.5. Basıncılı infiltrasyon.....	26
3.4.6. Basıncısız infiltrasyon.....	26
3.4.7. Plazma Püskürtme.....	26
4. TOZ METALURJİSİ (TM)	29
4.1. Toz Üretimi.....	30
4.1.1. Mekanik yöntemler.....	31
4.1.2. Kimyasal yöntemler.....	34
4.1.3. Elektroliz ile üretim.....	35
4.1.4. Atomizasyon yöntemleri.....	36
4.2. Tozların Karıştırılması.....	39
4.3. Tozların Preslenmesi	42
4.3.1. Kalıpta presleme.....	44
4.3.2. Yüksek basınçlı presleme.....	45
4.3.3. Soğuk izostatik presleme (SIP).....	45
4.3.4. Ekstrüzyon ile presleme.....	46
4.4. Sinterleme	47
4.5. Tam Yoğunluk İşlemleri.....	49
5. AŞINMA	51
5.1. Sürtünme ve Aşınmanın Tanımı.....	51
5.2. Aşınma Türleri.....	52
5.2.1. Adhesiv aşınma.....	52
5.2.2. Abrasiv aşınma.....	53

	Sayfa
5.2.3. Yorulma aşınması.....	53
5.2.4. Korozyon aşınması.....	54
5.2.5. Erozyon aşınması.....	54
5.3. Aşınma Testleri ve Ölçüm Yöntemleri.....	55
6. ABRASİV AŞINMA.....	57
6.1. Abrasiv Aşınmanın Tanımı	57
6.2. Pin-on-disk Yöntemi ile Abrasiv Aşınma Davranışının Belirlenmesi	60
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	63
7.1. Malzeme	63
7.2. Karışım Tozların Eldesi	63
7.3. Karışım Tozların Karakterizasyonu.....	65
7.4. Karışım Tozlardan Sıcak Presleme ile Blok Malzeme Üretimi	65
7.5. Yoğunlukların Ölçümü	70
7.6. Aşınma Numunelerinin Kesilmesi	70
7.7. Sertlik Ölçümleri	71
7.8. Metalografik İnceleme.....	72
7.9. Aşınma Testi.....	73
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	75
8.1. Toz Tane Morfolojisi ve Boyutu	75
8.2. Karışım Tozun Karakterizasyonu.....	76
8.3. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları.....	79
8.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları	80
8.5. Metalografik İnceleme Sonuçları	81
8.6. Aşınma Testi Sonuçları.....	90

	Sayfa
8.7. Aşınma Yüzeyleri	99
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	113



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Al özellikleri.....	5
Çizelge 2.2. Al ₂ O ₃ 'nın özellikleri.....	7
Çizelge 2.3. Al esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.....	8
Çizelge 3.1. Kompozit malzemelerin kullanım alanları.....	13
Çizelge 3.2. Tipik metal matris malzemeleri.....	20
Çizelge 3.3. Bazı seramiklerin tipik özellikleri.....	21
Çizelge 4.1. Bazı yağlayıcıların özellikleri.....	41
Çizelge 4.2. Bazı tozlar için presleme basınçları.....	43
Çizelge 4.3. Bazı malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ve süreleri.....	47
Çizelge 4.4. Basınçlı sinterleme ile kazanılan bazı özellikler.....	49
Çizelge 5.1. Tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve aşınma mekanizmaları.....	55
Çizelge 7.1. Kullanılan Al tozunun kimyasal kompozisyonu.....	63
Çizelge 8.1. Ortalama toz tane boyut ölçüm sonuçları.....	77
Çizelge 8.2. Yoğunluk ölçüm sonuçları.....	79
Çizelge 8.3. Sertlik ölçüm sonuçları.....	80
Çizelge 8.4. 320 numara SiC zımparada ağırlık kayıpları.....	90
Çizelge 8.5. 400 numara SiC zımparada ağırlık kayıpları.....	91
Çizelge 8.6. 600 numara SiC zımparada ağırlık kayıpları.....	92

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması.....	14
Şekil 3.2. Parçacık takviyeli kompozitin yapısı.....	15
Şekil 3.3. Değişik şekilli elyaf takviyeli kompozitler.....	16
Şekil 3.4. Tabakalı bir kompozitin yapısı.....	17
Şekil 3.5. Petek dolgulu bir sandviç panel yapısının şematik görünüşü.....	17
Şekil 3.6. Sıkıştırılmalı döküm yönteminin şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.7. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm işleminin aşamaları.....	23
Şekil 3.8. Karıştırma metodunda kullanılan mekanik karıştırma sistemi.....	24
Şekil 3.9. 357(Al-7Si-0,5Mg) alaşımı.....	25
Şekil 3.10. Basınçlı infiltrasyon.....	26
Şekil 3.11. Basıncsız infiltrasyon.....	27
Şekil 3.12. Osprey yöntemi.....	28
Şekil 4.1. Toz üretim yöntemleri.....	30
Şekil 4.2. Değirmende öğütme işlemi.....	31
Şekil 4.3. İri taneli tozların inceltmesinde kullanılan darbeli kırıcılar.....	32
Şekil 4.4. Soğuk akış yaklaşımında çarptırma ile toz boyutu küçültme işlemi.....	32
Şekil 4.5. Mekanik alaşımlama işlemi.....	33
Şekil 4.6. MA işlemi sırasında bilye-toz çarpışması.....	34
Şekil 4.7. Elektroliz ile toz üretimi.....	36
Şekil 4.8. Düşey gaz atomizasyon ünitesi.....	37
Şekil 4.9. Su atomizasyon işlemi.....	38
Şekil 4.10 (a) Döner elektrot işlemi, (b) damlacık davranışı.....	39
Şekil 4.11. Toz karıştırma mekanizmaları.....	40

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. Yüksek enerjili atritör şematik gösterimi.....	40
Şekil 4.13. Tozların preslenmesinde işlem sırası.....	42
Şekil 4.14. Presleme basıncı ile teorik yoğunluk arasındaki ilişki.....	43
Şekil 4.15. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı.....	44
Şekil 4.16. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı.....	44
Şekil 4.17. Tek ve çift yönlü presleme şematik gösterimi.....	45
Şekil 4.18. Soğuk izostatik preslemenin gösterimi.....	46
Şekil 4.19. Ekstrüzyon ile presleme işlemi.....	46
Şekil 4.20. Sinterleme aşamaları ve gözenek yapı gelişimi.....	48
Şekil 4.21. Sinterlemede difüzyon mekanizmaları.....	48
Şekil 5.1. Temas halindeki iki yüzeyin hareket ettirilebilmesi için gerekli kuvvet.....	51
Şekil 5.2. Adhesiv aşınmanın şematik gösterimi.....	53
Şekil 5.3. Yorulma aşınması.....	54
Şekil 5.4. Erozyon aşınması.....	55
Şekil 6.1. Abrasiv aşınma mekanizmaları.....	57
Şekil 6.2. Pin-on-disk yöntemi şematik gösterimi.....	60
Şekil 7.1. Yüksek enerjili atritör ile mekanik karıştırma düzeneği.....	65
Şekil 7.2. Sıcak presleme işlem sırası.....	66
Şekil 7.3. Preslemede kullanılan kalıp ve zımba detayları.....	66
Şekil 7.4. Sıcak preslemede kalıp yerleşimi kesit görünüş.....	68
Şekil 7.5. Sıcak presleme aşamaları.....	69
Şekil 8.1. Al toz tane boyut dağılımı.....	76
Şekil 8.2. % 5 Al ₂ O ₃ + Al karışım tozun parçacık boyut dağılımı.....	78
Şekil 8.3. % 10 Al ₂ O ₃ + Al karışım tozun parçacık boyut dağılımı.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 8.4. % 15 Al_2O_3 + Al karışım tozun parçacık boyut dağılımı.....	78
Şekil 8.5. Takviye oranındaki artışın yoğunluk değişimine etkisi.....	79
Şekil 8.6. Takviye oranındaki artışa bağlı sertlikteki değişim.....	81
Şekil 8.7. 320 numara aşındırıcıda meydana gelen ağırlık kayıpları.....	90
Şekil 8.8. 400 numara aşındırıcıda meydana gelen ağırlık kayıpları.....	91
Şekil 8.9. 600 numara aşındırıcıda meydana gelen ağırlık kayıpları.....	92
Şekil 8.10. Alüminyumda zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları.....	93
Şekil 8.11. %5 Al_2O_3 +Al'da zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları...	93
Şekil 8.12. %10 Al_2O_3 +Al'da zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları.	94
Şekil 8.13. %15 Al_2O_3 +Al'da zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları.	94
Şekil 8.14. 320 numaralı zımparada 2N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayı..	95
Şekil 8.15. 320 numaralı zımparada 4N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayı..	95
Şekil 8.16. 320 numaralı zımparada 6N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayı..	96
Şekil 8.17. 320 numaralı zımparada 8N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayı..	96
Şekil 8.18. 320 numaralı zımparada 2N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvveti..	97
Şekil 8.19. 320 numaralı zımparada 4N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvveti..	97
Şekil 8.20. 320 numaralı zımparada 6N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvveti..	98
Şekil 8.21. 320 numaralı zımparada 8N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvveti..	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. İletken kabloların kurulu olduğu güç taşınımı kuleleri.....	12
Resim 7.1. Yüksek enerjili atritör.....	64
Resim 7.2. Hidrolik pres.....	68
Resim 7.3. Sıcak preslemeyle üretilen blok parçalar.....	69
Resim 7.4. Yoğunluk kiti yerleştirilmiş hassas terazi.....	70
Resim 7.5. Tel erozyon ile kesilmiş aşınma test numuneleri.....	71
Resim 7.6. Sertlik ölçüm cihazı.....	71
Resim 7.7. Leica DMI 5000M optik mikroskop.....	73
Resim 7.8. Tribometer T10/20 aşınma test cihazı.....	73
Resim 7.9. Abrasiv aşındırıcı zımparanın aşınma testi öncesi ve sonrası görüntüsü.....	74
Resim 8.1. Kullanılan Al tozunun optik mikroskop görüntüleri.....	75
Resim 8.2. Al_2O_3 tozunun optik mikroskop görüntüsü.....	75
Resim 8.3. MK sonrası % 5 Al_2O_3 + Al tozunun optik resimleri.....	76
Resim 8.4. MK sonrası % 10 Al_2O_3 + Al tozunun optik resimleri.....	77
Resim 8.5. MK sonrası % 15 Al_2O_3 + Al tozunun optik resimleri.....	77
Resim 8.6. Saf alüminyum toz metal parçanın optik mikroskop görüntüleri.....	81
Resim 8.7. % 5 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın optik mikroskop görüntüsü.....	83
Resim 8.8. % 10 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın optik mikroskop görüntüsü.....	83
Resim 8.9. % 15 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın optik mikroskop görüntüsü.....	84
Resim 8.10. % 5 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın SEM görüntüsü.....	85
Resim 8.11. % 10 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın SEM görüntüsü.....	85
Resim 8.12. % 15 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın SEM görüntüsü.....	86
Resim 8.13. Al_2O_3 partiküllerinin matris içerisindeki görünümü.....	86

Resim	Sayfa
Resim 8.14. % 5 Al ₂ O ₃ + Al kompozit parçada partikül üzerinden alınan EDS.....	88
Resim 8.15. % 10 Al ₂ O ₃ + Al kompozit parçadan genel olarak alınan EDS.....	89
Resim 8.16. % 15 Al ₂ O ₃ + Al kompozit parçadan EDS harita.....	89
Resim 8.17. Saf alüminyumda abrasiv aşınma izleri.....	99
Resim 8.18. % 5 Al ₂ O ₃ + Al kompozitte abrasiv aşınma izleri.....	99
Resim 8.19. % 10 Al ₂ O ₃ + Al kompozitte abrasiv aşınma izleri.....	100
Resim 8.20. % 15 Al ₂ O ₃ + Al kompozitte abrasiv aşınma izleri.....	100
Resim 8.21. Alüminyumun aşınma yüzeyinin genel olarak EDS analizi.....	101
Resim 8.22. Alüminyumun aşınma yüzeyinde 1 numaralı bölgede EDS analizi.....	101
Resim 8.23. % 5 Al ₂ O ₃ içeren kompozitte aşınma yüzeyi EDS analizi.....	102
Resim 8.24. % 5 Al ₂ O ₃ içeren kompozitte 1 numaralı bölge EDS analizi.....	103
Resim 8.25. % 10 Al ₂ O ₃ içeren kompozitte aşınma yüzeyi EDS analizi.....	103
Resim 8.26. % 10 Al ₂ O ₃ içeren kompozitte 1 numaralı nokta EDS analizi.....	104
Resim 8.27. % 15 Al ₂ O ₃ içeren kompozitte aşınma yüzeyi EDS analizi.....	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alümina
SiC	Silisyum karbür
TiC	Titanyum karbür
TiB₂	Titanyum diborür
Si₃N₄	Silisyum nitrür
mg	Miligram
MPa	Mega paskal
GPa	Giga paskal
µm	Mikro metre
N	Newton
F_T	Teğetsel kuvvet
F_N	Normal kuvvet
ρ	Yoğunluk
T6	Çözeltiyeye alma ve yaşlandırma ısıtma işlemi
ml	Mili litre

Kısaltmalar

Açıklamalar

BHw	Brinell Sertlik Değeri
EDS	Enerji Dağılımı Spektrometresi
MK	Mekanik Karıştırma
MA	Mekanik Alaşımlama
MMK	Metal Matrisli Kompozit
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen

Kısaltmalar**Açıklamalar****PET**

Polietilen Tereftalat

PMK

Polimer Matrisli Kompozitler

PP

Polipropilen

PS

Polistren

PTFE

Politetrafloretilen

PVC

Polivinilklorür

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

SIP

Soğuk İzostatik Presleme

TM

Toz Metalurjisi

YMK

Yüzey Merkezli Kübik

1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv, savunma sanayi, enerji, ulaşım, uzay ve havacılık gibi alanlarda yeni malzemelere olan ihtiyaç ve günlük yaşantımızı kolaylaştıracak üstün özelliklerin yanında ekonomik avantajları da olan malzeme arayışı giderek artmaktadır. Malzemelerde korozyon, aşınma, yorulma, sürünme, darbe dayanımı ve ısı iletkenlik, ısı genleşme gibi özellikler aranır. Bütün bu özelliklerin hepsinin birden aynı malzemede bulunması söz konusu değildir. Metal, seramik ve polimer esaslı malzemeler özelliklerinin iyileştirilmesi ve yeni özellikler göstermeleri için bir araya getirilerek kompozit malzemeler elde edilir. Kompozit bir malzeme matris ve takviye elemanı olarak iki kısımdan oluşur. Kompozit malzemelerde genellikle matris yumuşak, sünek ve dayanımı düşük iken, takviye elemanı sert, rijit ve dayanımı yüksektir. Bir kompozit malzemede takviye elemanının temel görevi; maruz kalınan yükün taşınması, matrisin rijitlik ve dayanımının yükseltilmesidir. Matrisin görevi ise elyafa yükü iletme, gevrek ve kırılabilir olan takviye elemanlarını dış ve çevresel etkilere karşı korumaktır. Matris malzemesi olarak metaller, seramikler ve polimerler kullanılırken, takviye elemanı olarak cam elyaf, karbon, grafit ve seramik parçacıklar kullanılır [1-3].

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler, metal matris içerisine parçacık, uzun fiber, kısa fiber veya kılcal (whisker) fiber şeklinde seramik takviyesi ile elde edilirler. Matris malzemesi olarak saf alüminyum veya alüminyum alaşımları kullanılabilir. Takviye elemanları arasında Al_2O_3 , SiC, TiC, TiB_2 , Si_3N_4 gibi sert seramik malzemeler en çok kullanılanlardır. Metal matrisli kompozit malzemelerin özellikleri arasında dayanımın, rijitliğin, tokluğun, elastik modülünün, yorulma, aşınma direncinin yüksek olması ve ısı genleşmenin düşük olması sayılabilir. Özellikle otomotiv endüstrisinde arzu edilen bu özellikleri sağlama amacıyla metal matrisli kompozitler yaygın bir kullanıma sahiptir. Alüminyum alaşımları ve alüminyum kompozit malzemeler; yoğunluğun düşük olması, dökümünün kolay olması, ısı işlem kabiliyeti, üretim esnekliği, mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyi olması gibi özelliklerinden dolayı üzerinde yoğun olarak çalışılan malzemelerdir. Al matrisli kompozitlere temin edilmesi kolay ve ucuz olan SiC, Al_2O_3 ve Si_3N_4 gibi seramik sert parçacık veya kısa fiberler takviye edilerek elde edilen kompozitler araştırmalarda önemli bir yere sahiptir [4].

Kompozit malzeme üretiminde “Ergiyik Metal Yöntemleri” ve “Toz Metalurjisi Yöntemi” olmak üzere iki temel yöntem mevcuttur. Ergiyik metal yöntemlerine örnek olarak; sıvı

metal emdirmesi, yarı katı döküm, basınçlı ve basınçsız infiltrasyon, sprey çöktürme, karıştırma yöntemleri verilebilir. Ergiyik metal yöntemlerinin temel prensibi; ergiyik metal içerisine takviye partiküllerinin ilave edilerek ve dışarıdan bir kuvvet uygulanarak karışım malzeme elde edilmesine dayanır [4]. Toz metalurjisi yöntemi ise tozların bir karıştırıcıda karıştırılarak bir araya getirilmesi, kalıpta presleme ile şekil kazanımı ve sinterleme ile mukavemetlenme prensiplerine dayanır.

Kompozit malzemelerde istenilen özellikleri elde edebilmek için matris ve takviye elemanı arasında güçlü bir ara yüzey bağı olmalıdır. Ara yüzey bağının güçlü olması matris ile takviye elemanı arasındaki uyumun dışında üretim yöntemine de bağlıdır [3]. Genellikle kompozit malzeme üretiminde meydana gelen problemlerin başında matris ile takviye elemanı arasında güçlü bir ara yüzey bağının oluşmaması gelmektedir. Bu kapsamda ergiyik metal yöntemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda üretim yapmaya olanak sağlayan toz metalurjisi sayesinde ara yüzey bağının özellikleri istenilen seviyelere ulaşabilir [5].

O.Yılmaz ve S.Buytoz yaptıkları çalışmada Al_2O_3 takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin abrasiv aşınma dirençlerini Pin-on-disk yöntemi ile incelemişlerdir. 1200'lük abrasiv aşındırıcı ile yüzey temizliği yapıp 10,20,30 ve 40 N yük altında 80 ve 220'lik aşındırıcı disk ile 320 devir dakikada testleri gerçekleştirmişlerdir. Matrisdeki Al_2O_3 parçacıklarının oranının artması ile aşınma direncinin arttığı, Al_2O_3 parçacık büyüklüğünün artmasıyla aşınma oranının azaldığı ve 80'lik SiC aşındırıcı disk ile yapılan test sonucu, 220'lik SiC aşındırıcı ile yapılan test sonucuna göre aşınma direncinin daha az arttığı sonucuna varmışlardır [6].

B.S. Ünlü yaptığı çalışmada Al matrisli % 3 Al_2O_3 ve SiC, % 6 Al_2O_3 ve SiC parçacık takviyeli, döküm ve TM ile kompozit malzemeler üretmiş ve Pin-on-disk yöntemi ile aşınma davranışını incelemiştir. 10 N yük altında 50 rpm (0,628 m/s) kayma hızında ve 1130 m kayma mesafesinde aşınma testlerini gerçekleştirmiş ve aşınma dayanımının döküm ile üretilen numunelerde TM ile üretilen numunelere göre 2 kat daha iyi olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca en düşük aşınma kaybı % 6 Al_2O_3 ve % 6 SiC takviyeli numunelerde olmuştur [7].

M.Kök ve K.Özdin vorteks metodu ile ürettikleri 2024 Al alaşımı ile % 10,20 ve 30 Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemelerin Pin-on-disk yöntemi ile aşınma davranışını incelemişlerdir. 2 ve 5 N yük altında, 2 m/s kayma hızında ve 450 m kayma mesafesinde

yürüttükleri testler ile; 2024 Al alaşımasının abrasif aşınma dayanımının Al_2O_3 takviyesi ile önemli ölçüde iyileştiği, kompozitin aşınma direncinin Al_2O_3 partikül içeriğinin ve büyüklüğünün artması ile arttığı, matris alaşımı ve kompozitlerin aşınma hacim kayıplarının, kayma mesafesi ile doğru orantılı olarak arttığı sonuçlarına varmışlardır [8].

Karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş SiC takviyeli Al 5083 alaşımasının Pin-on-disk yöntemiyle, 1,57 m/s hızında, 1000 m mesafede, 10, 20 ve 30 N yük altında aşınma testlerini gerçekleştiren V.J.Prasad ve arkadaşları karıştırma yöntemiyle matris içinde SiC parçacıklarının homojen olarak dağıldığı, artan SiC oranının kompozitin sertliğini 62.4 HV'den 73.5 HV'ye çıkarttığı ve aşınma direncini artırdığı sonuçlarına ulaşmışlardır [9].

H.Kurt, H.Arık ve C.Bağcı yaptıkları çalışmada; farklı karıştırma yöntemleriyle hazırladıkları % 10 Al_2O_3 +Al tozlardan TM ile numune üretmiş ve abrasiv aşınma davranışını incelemişlerdir. Pin-on-disk yöntemiyle 10,20 ve 30 N yüklerinde, 10,25 m mesafe ve 0,2 m/sec hızlarında aşınma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Aşağıdaki eşitlik yardımıyla aşınma oranını hesaplayıp en düşük aşınma oranını Turbula ile karıştırılan numunede bulmuşlardır. En yüksek aşınma oranını ise yüksek enerjili atritör göstermiştir [10].

$$Wa = \frac{\Delta G}{dMS} mm^3 / N.m \quad (1.1)$$

Burada;

Wa: Abrasyon oranı,

ΔG : Ağırlık kaybı,

d: Yoğunluk,

M: Uygulanan yük,

S: Kayma mesafesi

Otomotiv endüstrisinde en çok karşılaşılan problemlerin başında aşınma gelmektedir ve bu endüstride yaygın bir kullanıma sahip olduğu için metal matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışları önemli bir araştırma konusu olmuştur [4]. Aşınma malzemelerde sürtünme sonucu meydana gelen ve yüzeyden parçacık ayrılması ile görülen bir hasar durumudur. Aşınma farklı yollarla meydana gelebilmektedir. Bunlar adhezyon aşınması, delaminasyon, yüzeysel yorulma, korozyon, abrasif aşınma türleridir. Aşınma ile meydana

gelen kayıplar gelişmiş veya gelişmekte olan endüstriyel ülkelerin gayri safi milli hasılanın % 1-% 4 arasında bir maliyete neden olmaktadır ve aşınma türleri arasında bu maliyete en çok sebep olanı % 36 ile abrasif aşınmadır [11,12].

Bu çalışmada matris malzemesi olarak % 99,7 saflıkta ve partikül boyutu 160 μm altı olan atomize alüminyum tozu kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak ağırlıkça % 5, 10 ve 15 Al_2O_3 tozu kullanılmıştır. Matris ve takviye elemanı durumundaki tozların birbiri içerisinde homojen dağılımını sağlamak için atritörde mekanik karıştırma ve toz metal parçada yüksek yoğunluk elde etmek için sıcak presleme uygulamaları gerçekleştirilmiştir.



2. ALÜMİNYUM (Al) VE ALÜMİNANIN (Al₂O₃) ÖZELLİKLERİ

2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri

Periyodik tablonun 3A grubunda yer alan alüminyum yumuşak ve hafif bir metaldir ve mat gümüşümsü renktedir. Yoğunlukları düşük olup, elektrik ve ısı iletkenlikleri yüksektir. Atmosfere ve diğer ortamlara karşı korozyon direnci yüksektir. Alüminyum % 8’lik oranla yer kabuğunda en fazla bulunan metaldir. Temel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Bu gibi özelliklerinden dolayı çağımızda demir çelikten sonra en çok kullanılan metaldir [3,4,13].

Alüminyum gerek saf halde gerekse alaşım halinde endüstride yaygın kullanımı olan önemli malzeme gruplarından birini oluşturmaktadır. Alüminyumun saflık derecesi arttıkça korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliği artar. Saf alüminyumun oksijene ilgisi yüksektir bundan dolayı çabuk oksitlenir. Ayrıca saf haldeyken mukavemeti ve mekanik özellikleri düşüktür. Bu gibi olumsuz özellikleri olsa da korozyon direnci iyidir. Alüminyum oksitlenirken yüzeyinde ince bir tabaka oluşturur. Bu oksit tabakası kimyasal etkilere karşı özellikle korozyona karşı koruma sağlar. Sahip olduğu olumsuz özellikler alaşımlama yapılarak iyileştirilebilir. Örneğin saf alüminyumun çekme dayanımı 49 MPa iken alaşımlama ile bu değer 700 MPa kadar çıkabilmektedir. Magnezyum, silisyum, bakır ve çinko ilave edilerek dayanım artışı sağlanan alüminyuma ısıl işlemler uygulanarak yüksek çekme dayanımı elde edilebilmektedir [3,4,14].

Çizelge 2.1. Al özellikleri

Yoğunluk	2,70 g/cm ³	Ergime Isısı	-390 KJ/kg
Ergime Sıcaklığı	660 °C	Özgül Isı	0,214 cal/g
Buharlaştırma Sıcaklığı	2327 °C	Isıl Genleşme Katsayısı	24,10 ⁻⁶ 1/K
Elastik Modülü	69 GPa	Isı İletim Katsayısı	230 W/mK
Kayma Modülü	25 GPa	Elektrik İletim katsayısı	40 m/Ω.mm ²
Poisson Oranı	0,33	Çekme Dayanımı	84 MPa

Alüminyum alaşım elementleri ile alaşımlandırıldığı zaman genellikle çökelme sertleşmesi yoluyla mekanik özellikleri artmaktadır. Çökelme sertleşmesi mekanizması matris fazı

içinde ısıtıl işlem ile, Al_2Cu_2 , Mg_2Si , Al_3Mg gibi sert bileşikler meydana getirmesi ve oluşan bileşiklerin dislokasyon hareketini engellemesi ile mekanik özelliklerde artış şeklinde gerçekleşmektedir [15].

Al ve alaşımları yüksek süneklik gösterirler. Bu sayede kolaylıkla şekillendirilebilirler ve hatta saf alüminyum haddeleme ile çok ince folyo haline getirilebilir. Alüminyumun kristal yapısının YMK olmasından dolayı süneklik özelliğini çok düşük sıcaklıklarda koruyabilir [16].

Alüminyum soğuması kolay olduğundan ve ısıyı emdiğinden soğutma sanayisinde yaygın bir kullanıma sahiptir. Korozyon ortamlarda gösterdiği üstün direnç ve mekanik özellikleri sayesinde inşaat, otomotiv, havacılık, denizcilik, petrol ve kimya sanayilerinde alüminyum kullanılmaktadır. Ayrıca zehirli olmaması ve reaksiyona girememesi ile gıda ve ambalaj sanayilerinde tercih edilmektedir. Işığı büyük oranda yansıtması sayesinde aydınlatmalarda ve ışık gibi ısıyı da yansıtma özelliği ile çatılarda kullanılmaktadır [4]. Özellikle hafifliğinden dolayı düşük yakıt tüketimi sağlar ve bu yüzden taşıtlarda ve taşıt parçalarının üretiminde yaygın bir kullanım alanına sahiptir [16].

2.2. Alüminanın Özellikleri

Alümina (Al_2O_3) çoğunlukla gri, kahverengi, mavi, yeşil, mor renklerde bulunan şeffaf veya yarı şeffaf halde bir korund mineralidir. Genellikle silikatlarla bileşik halinde bulunur (kil, feldispat, kiyanit vb). Al_2O_3 kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak kullanılmadan önce aşındırıcı yakut ve safir gibi mücevherlerde, ayrıca buji ve laboratuvar malzemelerinde kullanılmıştır. Günümüzde ise metal matrisli kompozitlerde, sert kesici takım uçlarında, yatak malzemelerinde, elektronik, zırh, implant gibi çeşitli alanlarda farklı amaçlarla kullanılmaktadır [3,4].

Alümina; yüksek mekanik performans, iyi kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklık karakteristikliği gibi mükemmel malzeme özellikleri sayesinde endüstride çeşitli uygulamalar için yaygın olarak kullanılan önemli bir yapısal seramik malzemedir [17].

Ergime sıcaklığı 2050 °C olan alümina, yüksek elastikiyet modülüne sahiptir ve alüminyum ile iyi bir karışım oluşturabilmektedir. Oluşturduğu kompozit malzemelerde iyi

sürtünme ve aşınma özellikleri sağlar. Bu sebeple silindir gömleği, fren diski, pistonlar gibi otomobil parçaları üretiminde kullanılır [15].

Alümina üretiminin neredeyse tamamı Bayer Prosesi ile gerçekleştirilir. Bayer prosesinde hammadde olarak boksit cevheri kullanılır. Bayer Prosesi sonucu üretilen Al_2O_3 ise Al üretiminde tüketilir [14].

Alümina ürünler, ekstrüzyon, slip döküm, sıcak ve soğuk pres ile şekillendirilebilirler. Şekillendirme işlemlerinde polivinil alkol mum, doğal reçine, lastik lateks gibi bağlayıcı ve yağlayıcı kullanılır. Sol-jel yöntemi ile çok ince toz halinde saf alümina üretilebilir [18].

Alümina çeşitli formlarda bulunabilir. Bu formlar arasından $\alpha-Al_2O_3$ en yoğun, kararlı olanı ve ticari olarak kullanılanıdır. $\alpha-Al_2O_3$ 2040 °C’de erir. Diğer bir şekli ise whiskerdir. $\alpha-Al_2O_3$ ’nın kristalimsi şeklidir ve düzgün bir yüzeye sahiptir. 1650 °C üzerindeki sıcaklıklarda erir. “Saffimax” veya “Saffil” olarak bilinen alümina türü ise çok kristalli yapıya sahiptir ve temel fazı $\delta-Al_2O_3$ ’tir. % 95 Al_2O_3 ve % 5 Si içeren bu elyaflar kompozit malzeme üretilirken dolgu veya keçe ön şekil halinde bir bağlayıcı içerisine konulur [3,4].

Çizelge 2.2. Al_2O_3 ’nın özellikleri

Yoğunluk	3,98 g/cm ³	Molekül Ağırlığı	101,96 g/mol
Elastik Modül	380 GPa	Isıl İletkenlik	25 W/mK
Spesifik Modül	100 GPa/Mgm ⁻³	Spesifik Elektrik Direnci	10 ⁸ Ω.cm
Ergime Sıcaklığı	2050 °C	Elektriksel Direnç	10 ¹⁸ Ω.cm
Isıl Genleşme Katsayısı	8,30 10 ⁻⁶ /K	Çekme Dayanımı	500 MPa

2.3. Alüminyum Esaslı Metal Matrisli Kompozitler

Alüminyumun temel dezavantajı aşınma direncinin düşük olmasıdır. Bu problem seramik parçacıkların eklenmesi ile aşılabılır. Kompozitler elyaflar veya partiküller ile üretilebilir. Bu kapsamda sert seramik parçacıkların uygulanma eğilimi yüksektir. Bunun nedeni bu takviyelerin kullanılması hacim oranını, boyutunu ve bileşenlerin dağılımını kontrol ederek mikro yapıların, tribolojik ve mekanik özelliklerin kontrol etmesidir. Seramik takviyeler

arasında, Al_2O_3 , yüksek sıcaklıklarda matris ile reaksiyona girmediği ve istenmeyen fazlar oluşturmadığı için avantajlıdır [19].

Son yıllarda, mühendislik malzemelerinde daha üstün performans elde etmek için kompozit malzemelerin kullanılması yönünde artan bir eğilim vardır. Al esaslı metal matris kompozitler; düşük yoğunluk, yüksek sertlik, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek ısı iletkenliği, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gibi cazip özelliklerinden dolayı, sadece havacılık ve otomobil endüstrileri uygulamalarında değil, sayısız elektronik aygıtlar için ambalajlama ve destek yapılarında da yaygın bir ilgi görmektedir [17].

Çizelge 2.3'te saf alüminyum ve bazı alüminyum esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde mekanik özelliklerdeki en büyük artışın, düşük gerilme mukavemeti ile karakterize edilen matrislerde kaydedildiği görülmektedir [20].

Çizelge 2.3. Al esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri [20]

Matris	Takviye İçeriği	Akma Dayanımı R_e (MPa)	Çekme Dayanımı R_m (MPa)	Uzama (%)
Al	-	64	90	21
Al	% 20 SiC	117	200	10
2014-T6	-	429	476	7.5
2014-T6	% 10 SiC	457	508	1.8
2014-T6	% 20 Al_2O_3	495	515	1.2
6061-T6	-	275	290	18
6061-T6	% 15 SiC	290	340	5.5
6061-T6	% 20 SiC	345	410	4.9
6061-T6	% 30 SiC	380	435	1.8
6061-T6	% 20 Al_2O_3	307	349	5.3
7091-T6	-	520	590	10.2
7091-T6	% 20 SiC	500	560	1.8

Al esaslı metal matrisli kompozit malzemelerinin çoğu fiziksel ve mekanik özellikleri; alaşımın bileşimi, takviye elemanının dağılımı ve ısı işlemlerden etkilenmektedir. Matris ile takviye elemanı arasında termal genleşme katsayısında farklılık olması, kompozit malzemenin yapısında farklı kalıntı gerilmeleri oluşmasına sebep olur. Kalıntı gerilmeler daha çok dislokasyon konsantrasyonuna neden olduğundan alaşımın dayanımında artış görülür. Dislokasyon oluşumunda etkili olan önemli parametreler; termal genleşme katsayısı, takviye elemanı boyutu ve oranlarıdır [21].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri

20. yüzyılın sonuna gelindiğinde mühendislik araştırma geliştirme çalışmalarıyla cam elyaf takviyeli polimerler gibi malzemelerin uygun bir biçimde üretilmesi sonucu kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır. Çok öncelerden beri bilinen çok fazlı malzemeler yani günümüzde farklı türden malzemelerin üretim sırasında bir araya getirilmesi anlamına gelen kompozitler; metal, polimer ve seramik malzemelerden sonra dördüncü bir malzeme grubu olarak kabul edilmektedir [16].

Kompozit malzemeler; iki veya daha fazla, aynı ya da farklı gruptaki malzemelerin makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen üstün özelliklere sahip yeni malzemelerdir. Karbon elyaf, otomobil lastikleri, sermetler örnek olarak verilebilir ve ayrıca ağaç, selüloz, kemik gibi doğal halde bulunan kompozit malzemeler de vardır. Mikroskobik açıdan homojen olan, atomik düzeyde birleştirilen alaşım gibi malzemeler kompozit malzeme tanımına girmemektedirler. Bir kompozit malzemede yapıyı oluşturan fazlar kimyasal olarak birbirinden farklı ve bir ara yüzey ile birbirinden ayrılmış durumdadır [3].

Kompozit malzemeler ana faz olarak yumuşak, sünek ve dayanımı düşük olan matris ile, sert ve dayanımı yüksek olan takviye elemanından oluşmaktadır. Matris, çevresinde dağılmış olan takviye elemanlarını dış etmenlere karşı korur, dirençlerini artırır ve maruz kalınan yükü takviye elemanına iletir. Takviye elemanı ise matris içerisinde homojen bir dağılım göstererek ve matris ile etkili bir ara yüzey bağı kurarak kompozit malzemede dayanım artışı sağlar. Ara yüzey bağı matrisin ıslatma kabiliyetine bağlı olarak değişmektedir. [15,22].

Bir kompozit malzemenin özellikleri; matris malzemesi, takviye elemanı, ara yüzey özellikleri ve mikro yapı özellikleri olmak üzere dört ana faktöre bağlı olarak değişmektedir [23].

Kompozit malzeme üretimi ile malzemelere kazandırılan özellikler şunlardır:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| a. Yüksek dayanım | g. Düşük ağırlık |
| b. Rijitlik | h. Isı yalıtımı |
| c. Korozyon direnci | ı. İyi termal ve ısı iletkenlik |
| d. Yüksek yorulma dayanımı | i. Estetik görünüm |
| e. Aşınma direnci | j. Ses yalıtımı |
| f. Yüksek sıcaklık kapasitesi | |

Bu özellikleri belirleyen temel etmen matris ve takviye elemanı arasındaki uyumdur. Bu uyum ara yüzeyde oluşan bağın güçlü olmasını sağlar. Kompozit malzemelerin sağladığı avantajlar yanında; üretim güçlüğü, maliyet, geri dönüşümünün olmaması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [3,4].

3.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzeme tanımı 20. yüzyıldan önceki zamanlarda bilinmemesine rağmen, bu malzemeler aslında çok eskilerden beri kullanılmaktadır. Orta doğuda ok yayları üst üste malzemelerin yerleştirilmesiyle farklı lif yönleri elde edilerek kompozit malzeme oluşturulmuş ve bu sayede daha fazla eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Bina yapımında kullanılan kerpiç, çamur ile saman karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir. Çinliler ile Japonlar metal ve işlenilmiş deriyi bir araya getirip ok yayı gövdesi yapmış ve daha iyi darbe direnci elde etmeyi amaçlamışlardır. Boeing firması ürettiği 707, 727 gibi uçaklarda cam ile karbon elyafı kullanarak iniş kapı dışlısı, kanatlar, sabit ve arka kenar denge sağlayıcı yapmıştır [3].

Metallerin sahip olduğu yüksek süneklik ile seramiklerin sahip olduğu yüksek elastiklik modül özelliklerinin birleştiği MMK malzemeler havacılık, savunma ve otomotiv sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle yoğunluklarının düşük olmasından dolayı seramik takviyesi ile güçlendirilen Al alaşımlarının klasik otomobillerin motor parçalarında kullanımı yaygındır [24]. 1920'lerden beri Al matrisli kompozit malzemeler üzerinde yaygın olarak çalışılmış ve spor malzemeleri, elektronik ambalajlar, zırhlar ve otomotiv endüstrisinde kullanılmıştır. Bu malzemeler Al matrisin kimyasal bileşimine bağlı olarak çok çeşitli mekanik özellikler sunmaktadır [25].

Metal matrisli kompozitlerin ilk uygulamalarından biri uzay mekiğidir. Sürekli fiber bor- alüminyum kompozitten yapılmış hafif, yüksek sertlikte dikmeler, mekiğin gövde kısmının çoğunu oluşturmaktadır. Metal matrisli kompozitin kullanılması, geleneksel ekstrüze edilmiş alüminyum ile mümkün olandan daha küçük çapta tüp yapılmasını sağlamıştır. Kompozit daha düşük ısı iletkenliğe sahip olduğundan yük taşıyıcı bölme ile dış katman arasındaki yalıtım miktarını azaltmaktadır [26].

Üreticiler otomobillerde ağırlığı azaltmak için dökme demirden üretilen motor blokları yerine Si içeren A319 ve A356 alaşımlarından yapılan blokları kullanmışlar fakat sürtünme ve aşırı yüklemeye dayanamadığını görmüşlerdir. Bu amaçla parçacık takviyeli Al matrisli kompozitlerden motor blokları üretmişlerdir. Motor bloğu aşırı sıcaklıklara ve aşırı yüklemeye maruz kaldığı için, aşınmaya, yorulmaya, sürtünmeye dayanıklı Al_2O_3 ve SiC takviyeli kompozit malzemeler kullanılır [27].

Al matrisli kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanımına bir örnekte fren diskleri verilebilir. Dökme demir ile üretilmiş bir fren diskinin ağırlığı 5,4 kg gelirken, Al matrisli kompozit malzeme ile ağırlık 2,5 kg'na düşmüştür. Bu sayede ağırlıktan elde edilen tasarruf ile yakıt tüketiminde azalma, fren mesafesinde azalma, daha az aşınma sağlanır [27].

Altyapı uygulamalarında nükleer atıkların tutulması için Al/ B_4C ve maksimum güç iletimi için sürekli takviyeli Al/Saffil metal matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Resim 3.1). Bu MMK malzeme enerji taşıma kapasitesinde % 200-300'lük bir artış sağlamıştır. Şekildeki MMK iletken kablosunun iç kısmı Al/ Al_2O_3 sürekli güçlendirilmiş MMK tellerden, dış kısmı ise Al iletken malzemedan yapılmıştır. Bu sayede çelik tellere göre daha hafif, daha sert, daha düşük termal genleşme ve önemli miktarda akım taşımaktadır [28].



Resim 3.1. İletken kabloların kurulu olduğu güç taşınımı kuleleri ve Al/Al₂O₃ MMK iletken kablosu [28]

Alüminyumdan oluşturulan kompozitler hafifliğin yanında dayanımın yüksek olması sebebiyle uçak yapımında kullanılmaktadır. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerden direksiyon mili, jant, kask, bisiklet yapılmaktadır. F16 uçaklarının kanat, uçak burnu, birleştirme elemanları karbon elyaf takviyeli plastik kompozitten (CFRP) yapılmıştır. Boron epoksi kompozitlerden askeri uçaklarda dış yüzeylerde faydalanılmaktadır.

Sahil botları, yatlar, hızlı deniz araçları cam, karbon ve aramid kompozit malzemeden yapılmıştır. Ayrıca kompozit malzemeler kompresörler, pervaneler, vanalar, jet motorları, tenis raketleri, golf sopaları, tenis topu, bilyardo topu gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çizelge 3.1’de genel olarak kompozitlerin kullanım alanları verilmiştir [3].

Çizelge 3.1. Kompozit malzemelerin kullanım alanları [3]

Endüstrisi	Kullanım Alanları	Kullanılan Kompozit Malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B/Al, SiC _w /Al, Gr/Al, B/Al, Cam/Epoksi, C/Epoksi, B/Epoksi, Kevlar/Epoksi, Süper Alaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, kiriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	Al ₂ O ₃ /Mg, Gr/Al, Gr/Mg B/Al, Al ₂ O ₃ /Al, SiC _w /Al SiC _w /Al, B/A, Al ₂ O ₃ /Al Gr/Al, SiC/Al
Uzay	Uzay yapıtları, antenleri, robot kolları	B/Al, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, ön ve arka paneller, aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları	Kevlar/Epoksi SiC _p /Al SiC _w /Al SiC _w /Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi, gemi güvertesi	Kevlar/Epoksi, Cam/Epoksi
Kimya	Borular, basınçlı kaplar ve tanklar	Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi
Spor	Oltalar, golf kulüpleri, yüzme havuzları, tenis raketleri , bisiklet ve motosiklet gövdesi	B/Epoksi, C/Epoksi B/Al, Gr/Al, SiC _w /Al B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al ₂ O ₃ /Pb
Tekstil	Mekikler	B/Al, C/Al, SiC/Al
Tıp	Röntgen masaları, protezler ve tekerlekli sandalye	SiC/Al, B/Al B/Al, SiC/Al
Uçak-Uzay	Uçak frenleri, roket memeleri, turbin pervaneleri, roket çıkış sistemleri	Karbon/Karbon Kompozit
Diğer Alanlar	Makine yatakları	C/Pb, Al ₂ O ₃ /Pb

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması Şekil 3.1’de verilmiştir.



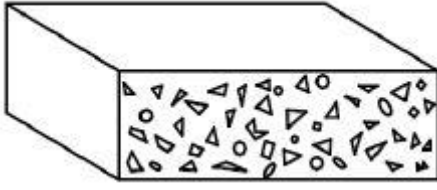
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması [16]

Matris olarak polimer, metal ve seramik malzemelere Şekil 3.1’deki üç tip takviye elemanı eklenerek kompozit malzemeler elde edilmektedir.

Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitlerde homojen olarak dağılmış sert ve gevrek malzeme, yumuşak ve sünek olan matris ile çevrilmiştir (Şekil 3.2). Metallerin sertliğini, aşınma davranışını, yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini artırmak amacıyla çeşitli oksitler, karbürler ve nitrür parçacıkları kullanılır. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde parçacık boyutu 1 μm ’den küçük ve elyaf hacim oranı % 25’ten az olan mikroskobik partiküller kullanılır. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC seramikleridir. Maruz kalınan yük matris ve elyaf ile ortak taşınır. Parçacık takviyeli bir kompozitte dayanım şu parametrelere bağlıdır:

- parçacıkların büyüklüğü,
- parçacıklar arası mesafe ve homojen dağılım,
- matrisin ve parçacıkların özellikleri [3,15].



Şekil 3.2. Parçacık takviyeli kompozitin yapısı [15]

İri parçacıklı kompozitler

Malzemenin özelliklerini değiştirmek ya da iyileştirmek ve polimer yerine hacmin bir kısmını daha ucuz olan bir malzeme ile doldurmak amacıyla kullanılan dolgu malzemeleri birer iri parçacık içeren kompozit malzemeleridir. Başka bir örnek ise matris olarak çimento, takviye elemanı olarak kum ve çakıldan oluşan betondur [16].

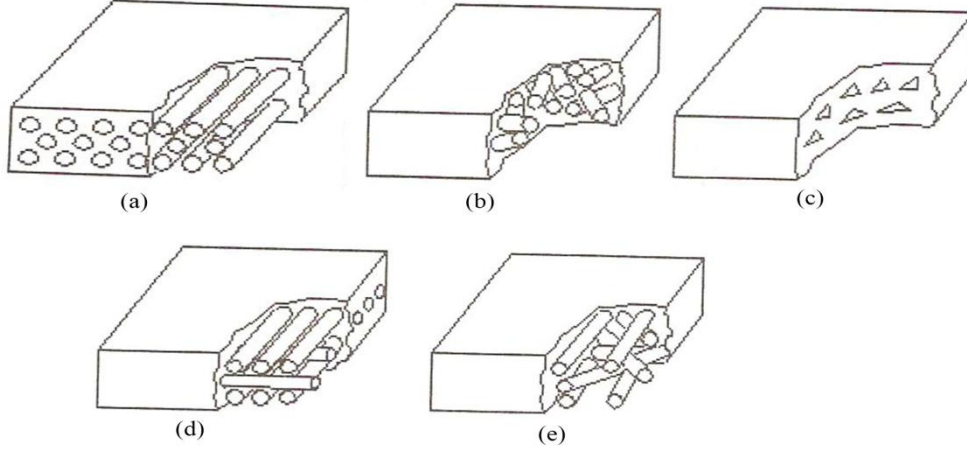
Saçınma yoluyla dayanım artışı sağlanan kompozitler

Saçınma yoluyla dayanım artışı sağlanan kompozitler; çapı 0,01 ile 0,1 μm ve uzunluğu 50-200 μm arasında olan küçük parçacıkların matris içinde homojen dağılmasıyla elde edilir. Küçük parçacıkların dislokasyon hareketini engellemesi ile dayanım artar. Normal sıcaklıklarda dayanım artışı sağlanmış kompozitler iki fazlı bileşenlerden daha zayıf olabilir. Fakat sürünme dirençleri metal alaşımlara nazaran daha iyidir. Saçınan faz metal veya metal dışı malzemeler olabilir. En yaygın olanı ise oksitlerdir [3,16,29].

Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitlerde matris yumuşak ve sünek iken elyaflar sert ve dayanıklıdır. Bu sayede dayanım özellikleri iyileştirilir. Maruz kalınan yükü matris elyaflara iletir ve yük elyaf tarafından taşınır [3]. Elyaf takviyeli kompozitlerin esas amacı düşük ağırlıkla birlikte yüksek dayanım ve yüksek elastiklik modülü sağlamaktır [16]. Elyaflar değişik yön ve doğrultularda düzenlenebilir (Şekil 3.3). Bir elyafın minimum çapı 10-20 μm boyutlarında iken maksimum çapı 100-200 μm olabilir. Sürekli elyafların yönlendirilmesi sayesinde diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özellikler elde edilir. Elyaf doğrultusunda yüksek özellikler elde edilirken, elyaf eksenine dik yönde matris etkin olduğundan düşük özellikler elde edilir. Kompozit malzeme içerisindeki elyafların rastgele

yönlendirilmesi ne kadar düzenli olursa elyaf hacim oranı o derece artar. Mekanik özellikler elyafların yerleştirilme düzenine bağlı olarak değişmektedir [3].



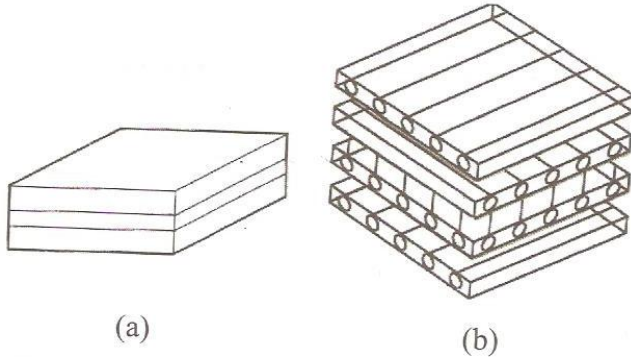
Şekil 3.3. Değişik şekilli elyaf takviyeli kompozitler (a) tek yönlü sürekli elyaflar, (b) kısa elyaflar, (c) parçacık takviyeli, (d) çift yönlü elyaflar, (e) rastgele yönlendirilmiş elyaflar [3]

Sürekli elyaf takviyeli kompozitler, preform veya tel serilerin sıvı metal emdirilmesi ya da difüzyon yolu ile üretilmektedirler. Üretim işlemi oldukça karmaşık ve maliyetli olsa da özellikle uzay uygulamalarında kullanımı yaygın olan kompozitlerdir [30].

Elyaf çapının 3 ile 5 μm arasında ve uzunluğunun 0,5 ile 6 mm arasında olduğu elyaf takviyeli kompozitler kısa veya süreksiz elyaf takviyeli kompozit malzemeler olarak adlandırılır. Kısa elyaflar genellikle rastgele yönlendirilirler. Sürekli elyaflar ile karşılaştırıldığında, süreksiz elyaflı kompozitlerde üretim daha hızlı ve maliyet daha düşüktür ve şekil verilebilirlik daha iyidir [15].

Yapısal kompozitler

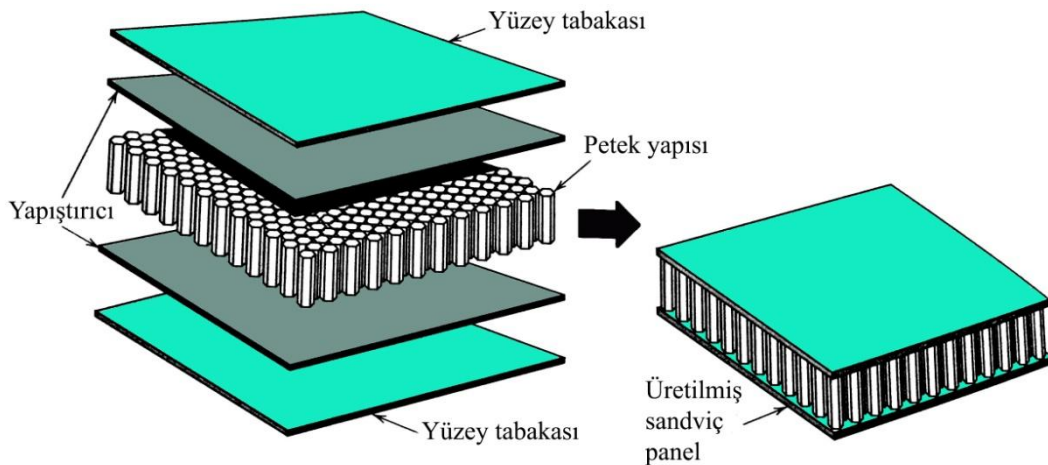
Tabakalı kompozitlerde yapı değişik yönlerde katmanların ana malzeme eksenine etrafında üst üste konulmasından oluşmaktadır (Şekil 3.4). Genellikle katmanların her biri 0,1 mm kalınlığındadır. Bu yüzden uygulamalarda çok katlı kompozitler kullanılmaktadır. Katmanları oluşturan elemanlar aynı ise “izotropik”, farklı malzemelerden meydana gelmişse “ortotropik” olarak adlandırılırlar [3].



Şekil 3.4. Tabakalı bir kompozitin yapısı (a) izotropik, (b) ortotropik [3]

Tabakalı bir kompozit iki boyutlu düzlemde birçok yönde yüksek dayanıma sahip olabilir. Fakat bu dayanım tüm elyafın tek yönde bulunduğu duruma göre daha düşüktür [16]. Tabaka ile daha kullanışlı olan malzemeye erişebilmek için bileşimdeki katmanlar ve bağlanan malzemelerin en iyi durumları birleştirilmektedir [15].

Sandviç paneller ise hafif fakat yüksek rijitlik ve dayanıma sahip kiriş veya panellerin tasarımında kullanılırlar. Sandviç panel kalın bir ara dolgu tabaka ve buna yapışan iki dış tabaka ya da yüzeyden oluşmaktadır. Dış tabaka yapıya dayanım ve rijitlik sağlar. Bu yüzden dış tabaka alüminyum ve alaşımları, çelik, elyaf takviyeli polimer gibi çekme, basma gerilmelerine dayanıklı ve rijit malzemelerden yapılır. Ara dolgu tabaka ise hafif ve düşük elastiklik modülüne sahip malzemelerden yapılır. Rijit polimer köpükler, ahşap ve petek yapı dolgu malzemelerini oluşturur. En yaygın olarak kullanılanı ise Şekil 3.5’de verilen petek yapısıdır [16].



Şekil 3.5. Petek dolgulu bir sandviç panel yapısının şematik görünüşü [16]

Kompozit malzemeleri ayrıca kullanılan matris fazı açısından polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemeler olmak üzere sınıflandırmak mümkündür.

3.3.1. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimer malzemeler, metal ve seramik malzemelerle karşılaştırıldığında daha karmaşık yapıdadırlar. Polimerler hafif olması ve kolay işlenebilmesi sebebiyle geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Çok karmaşık şekilli parçalar dahi üretilebilir. Düşük yoğunluğa sahiptirler. Çalışma sıcaklıkları düşüktür ve bu sayede üretimde daha az enerji gereksinimi duyulur. Polimer matrisli kompozit malzemeler, matris fazı olarak reçinenin ve takviye elemanı olarak elyafın kullanıldığı kompozitlerdir. Reçine yüksek molekül ağırlığına sahip takviyeli plastiktir. Polimer matrisli kompozitlerin başlıca özellikleri arasında hafiflik, elektromanyetik geçirgenlik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikler sayılabilir. Bazı dezavantajları da vardır. Metaller ve seramiklere nazaran daha düşük dayanıma sahiptirler. Elastik modülü düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmazlar [15,16].

Polimer matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanı çoğunlukla elyaf şeklinde sert ve dayanımı yüksek malzemelerdir. Mukavemetteki en yüksek artış sürekli elyaflar kullanıldığında olmaktadır. Elyaf hacmi arttığında kompozitlerin dayanımı da artış göstermektedir [15,31].

Cam fiber, kevlar, bor ve karbon takviye elemanları olarak kullanılır. Kompozit malzemelerde kullanılan polimer matrisler termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Termoplastikler oda sıcaklığında katı olup, ısıtıldığında yumuşayan sıcaklık arttıkça vizkozitesi düşen ve soğutulduğunda tekrar sertleşen malzemelerdir. Termoplastik malzemeler arasında en çok kullanılanlara örnek olarak asetale, selüloz, PTFE, PA, PC, PE, PET, PVC, PS ve PP verilebilir. Termosetler tekrar ısıtıldığında yumuşama göstermeyen malzemelerdir. Epoksi ve polyesterler yaygın olarak kullanıma sahiptir. Termosetlerin dayanımları termoplastiklere göre daha yüksektir. Elastomerler ise çok düşük gerilmeler uygulandığında büyük elastik deformasyon gösteren polimerlerdir. Örnek olarak kauçuk verilebilir [3].

3.3.2. Metal matrisli kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler genel olarak en az iki bileşen içerir, birincisi metal matris ve ikinci bileşen takviye elemanıdır. Her durumda matris bir metal olarak tanımlanır, fakat saf bir metal nadiren matris olarak kullanılır. Matris genellikle bir alaşımdır [26].

Metaller polimerlere göre daha yüksek elastik modül, dayanım, tokluk ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir. Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak yoğunluğu düşük, mekanik özellikleri iyi ve hafif olan metaller kullanılır. Genelde Mg, Ni, Al, Cu, Zn ve Ti matris malzemesi olarak kullanılabilir (Çizelge 3.2). Bunlar arasında ise en çok tercih edilen Al matrisli kompozitlerdir [3]. Alüminyum ve alaşımları kolay erişilebilirlik, düşük yoğunluk, düşük ergime noktası ve ayrıca takviye ile kimyasal ve fiziksel uyumluluğu nedeniyle sıklıkla matris malzemesi olarak incelenmektedir [32]. Takviye elemanı olarak alümina, silisyum karbür ve silisyum nitrür gibi metaller arası oksitli bir bileşik, karbür veya nitrür kullanılır. Metal malzemelerin sahip olduğu süneklik ve tokluk ile seramik malzemelerin sahip olduğu yüksek dayanım ve elastik modül özellikleri birleştirilir [4]. Takviye elemanları; parçacık, sürekli veya süreksiz elyaf, visker, plaka veya düzensiz şekilde olup, hacimce oranları yaklaşık % 10 ile % 60 arasındadır [16]. Takviye elemanının kompozit malzeme içerisindeki dağılımı homojenliği belirler. Homojenlik, bir malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirtmede önemli bir parametredir [21].

Metal matrisli kompozitlerin sahip olduğu başlıca özellikler şunlardır:

- a. Yüksek elastik modül,
- b. Yüksek mukavemet,
- c. Düşük yoğunluk,
- d. Yüksek elektrik ve ısı iletkenlik,
- e. Yüksek sıcaklıklarda çalışılabilirlik,
- f. Sıcaklık değişiklikleri ve ısıl şoklara karşı direnç,
- g. Değişik teknikler ile şekillendirilebilme
- h. Korozyon ortamlara karşı direnç
- i. İyi yorulma ve kırılma özellikleri [28].

Çizelge 3.2. Tipik metal matris malzemeleri

Alüminyum	Bronz
Titanyum	Nikel
Magnezyum	Nikel alaşımları
Bakır	Süper alaşımlar
Gümüş	Titanyum alaşımları

3.3.3. Seramik matrisli kompozitler

Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan oluşan (Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 , SiC) inorganik bileşiklerdir. Sert, gevrek ve yüksek sıcaklık direncine sahip olan seramiklerin kayma dirençleri yüksek olduğu için plastik şekil verme olmadan gevrek şekilde kırılması gerçekleşir. Kompozit malzeme oluşturulduğunda $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar kullanıma sahiptirler. Bazı seramik malzemelerin tipik özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir [3].

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklıkta kullanım için uygundur ve korozyon ortamlara karşı iyi direnç gösterirler. Fakat yük altındayken gevrek davranış sergilerler ve bundan dolayı kullanım alanları sınırlanmaktadır. Seramiklerin düşük olan kırılma tokluğu değerleri; parçacık, elyaf veya visker formunda bir seramiğin diğer bir seramik malzeme içerisine yerleştirilmesiyle oluşturulan seramik matrisli kompozit malzemeler ile arttırılmaktadır [15,16].

Seramikler yüksek sıcaklık ve katı çevre şartlarına karşı dirençli olmaları açısından tercih edilen malzemelerdir. Ama seramiklerin yük taşıma kapasiteleri, üretim aşamasında oluşan çatlak türünde kusurlar ile ya da kullanım gereği içerdiği süreksizlikler ile önemli derecede azalmaktadır [33].

Seramik matrisli kompozitlerde tokluğun artmasının nedeni takviye elemanının çatlak ilerlemesini engellemesi ya da geciktirmesidir. Meydana gelen çatlak takviye elemanı ile karşılaştığında yön değiştirir ve ilerlemesi durur [14].

Çizelge 3.3. Bazı seramiklerin tipik özellikleri [3]

Malzeme Türü	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Si ₃ N ₄	SiC
Eğilme Dayanımı (MPa)	440	1020	880	500
Oda Sıcaklığında Çekme Dayanımı (MPa)	500	1200	1000	1100
1200 °C Sıcaklıkta Çekme Dayanımı (MPa)	300	350	350	480
Kırılma Tokluğu (joule)	4	9	6	4
Termal Şok Direnci (suda)	200	350	900	370

3.4. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde genel olarak iki temel yöntem mevcuttur. Bunlar:

- a. Ergiyik metal yöntemleri
- b. Toz metalurjisi

Ergiyik metal yöntemlerinde takviye partikülleri farklı teknikler kullanılarak sıvı metal matris içerisine transfer edilir ve burada dışarıdan da bir kuvvet uygulanarak homojen bir süspansiyon elde edilmeye çalışılır. Ardından da döküm işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemlerde takviye elemanı seçerken matris ile uyumunun önemi dışında; yüksek elastik modül, düşük yoğunluk, yüksek ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık ve maliyet gibi faktörler önem arz etmektedir [1,3,34].

Başlıca ergiyik metal yöntemleri şunlardır:

- Sıkıştırırmalı veya sıvı dövme döküm
- Sıvı metal emdirmesi
- Karıştırma (vorteks)
- Yarı-katı döküm
- Basınçlı infiltrasyon
- Basınçsız infiltrasyon
- Plazma püskürtme

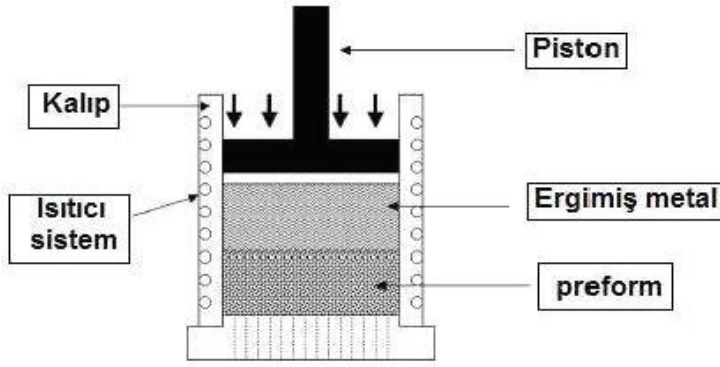
Toz metalurjisi yönteminde toz haldeki matris ve takviye malzemeleri karıştırılır. Tozlar istenilen şekli elde etmek için hesaplanan hacim ya da ağırlık oranlarında karıştırılır ve tasarlanan kalıp içerisinde preslenir [3]. Alüminyum matrisli kompozitlerle ilgili olarak, TM yöntemi, geniş yönlülüğü ile birlikte rekabetçi işleme maliyetinden dolayı en yaygın kullanılan üretim tekniklerinden birisidir. Bununla birlikte, arzu edilen bir mikro yapıyı elde etmek ve mekanik özellikleri iyileştirmek için, karışım içerisindeki tüm parçacıkların homojen bir şekilde dağılmış olması istenir [17].

Seramik matrisli kompozitlerin üretimi genellikle iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada takviye elemanları matris içerisine verilirken, ikinci aşamada da matris yoğunlaştırılır. Sıcak presleme, eş basınçlı sıcak presleme (HIP), sıvı faz sinterleme, infiltrasyon, toz metalurjisi ve sol jel yöntemleri seramik matrisli kompozit üretimi metotlarıdır [15,16].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde ise; el yatırma yöntemi, basma kalıplama ve transfer kalıplama, soğuk presleme, helisel sarma, tabakalı birleştirme, profil çekme ve enjeksiyon kalıplama gibi yöntemler kullanılır.

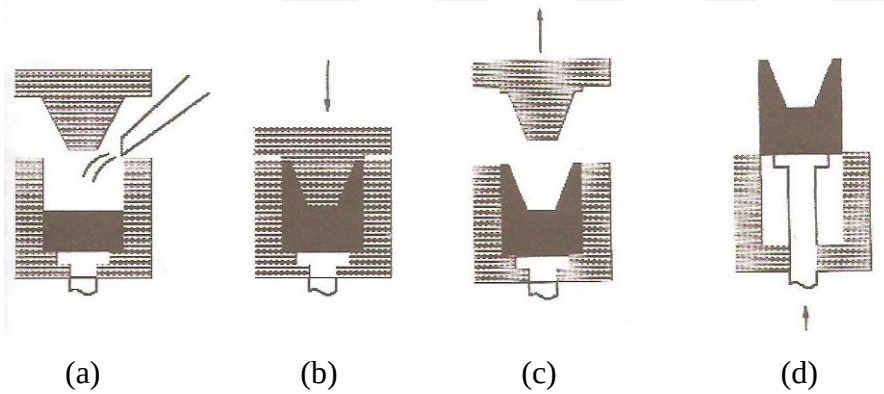
3.4.1. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm

Sıvı halde bulunan metal, basınç altında katılaştırılarak metal matrisli kompozitler üretilir. Sıkıştırılmalı döküm yönteminde önceden şekillendirilmiş ve takviyeden oluşturulan preforma veya yatağa hidrolik bir basınç altında sıvı alaşım emdirilir. Sıvı metalin daha yavaş katılaşması için bu işlemde kullanılan kalıp, preform ve zımba önceden ısıtılır. Takviye preform içindeki hava boşluklarına veya kalıp ile takviye arasındaki boşluklara sıvı sızmasını en aza indirmek için kalıp boşluğuna sızdırmaz şekilde yerleştirilir. Bu işlemde kontrol parametreleri; takviyenin ön ısıtma sıcaklığı, takviye partikülleri arası boşluk, basınç, hız ve metalin sıcaklığıdır. Şayet metal sıcaklığı veya takviye sıcaklığı düşük değerde ise gözenekli yapı elde edilir. Sıcaklığın yüksek olması sonucu ise istenmeyen metal-takviye reaksiyonları gerçekleşebilir. Şekil 3.6'da sıkıştırma döküm yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [1,3,27,35].



Şekil 3.6. Sıkıştırılmalı döküm yönteminin şematik gösterimi [35]

Şekil 3.7’de ise sıvı dövme yöntemi ile metal emdirme işleminin aşamaları görülmektedir. Bu yöntemde yüksek basınç sayesinde seramik malzemelerin ıslanabilirliği arttırılabilmektedir. Yüksek verimde, iyi ara yüzey bağı ve düşük maliyetle üretim yapılabilir [3].



Şekil 3.7. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm işleminin aşamaları; (a) dökme, (b) sıkıştırma, (c) bırakma, (d) çıkartma [3]

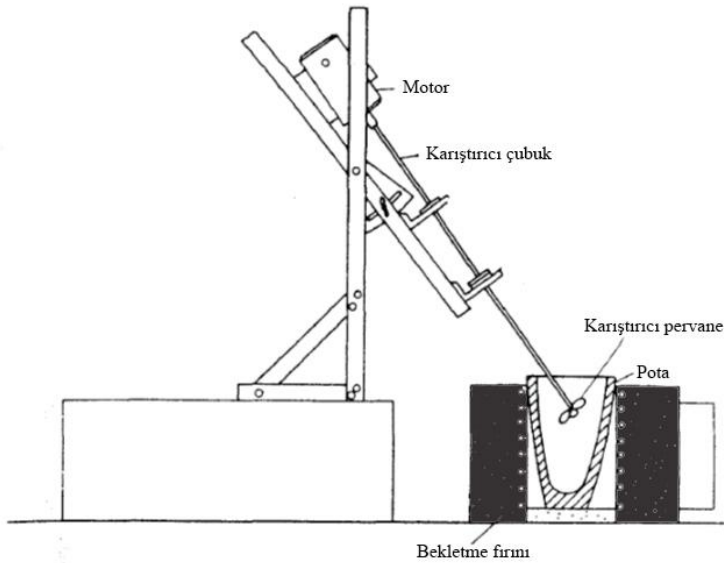
3.4.2. Sıvı metal emdirmesi

Bir diğer adı infiltrasyon olan bu yöntem; kısa elyaf, kılcal kristalli ve sürekli elyaflarla takviye edilen metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde yaygın bir kullanıma sahiptir. İstenilen şekilde tasarlanan master veya preform kalıp içerisine yerleştirilir ve ergiyik metal enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede master ısıtılır. Bu işlemde Al_2O_3-Al ve $B-Mg$ gibi kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilir. Sıvı metal emdirme yönteminde ıslanabilirlik istenen düzeyde olmayabilir ve yapıda boşluklar oluşabilir. Islanabilirlik iyi

olmazsa ara yüzey bağı kuvvetli oluşmaz. Bunu engellemek için elyaflar başka bir malzeme ile kaplanabilir [3].

3.4.3. Karıştırma (Vorteks)

Vorteks yöntemi olarakta bilinen karıştırma yönteminde mekanik bir pervane yardımıyla takviye partikülleri ergiyik metal içerisinde karıştırılır. Şekil 3.8’de karıştırma sistemi görülmektedir [1]. Matris bir pota içerisinde ergitilir. Ergimiş haldeki matris metali içine düşey ile 30-35 derecelik açı yapacak şekilde daldırılmış bir karıştırıcı yardımı sayesinde vorteks yani girdap oluşturulur. Vorteks oluşturulduktan sonra içerisine seramik takviye partikülleri kontrollü bir şekilde katılarak metal matrisli kompozitler üretilir. Takviye işlemi bittiğinde karıştırma devam eder ve partiküllerin homojen olarak dağılması sağlanmaktadır [24,27].



Şekil 3.8. Karıştırma metodunda kullanılan mekanik karıştırma sistemi [1]

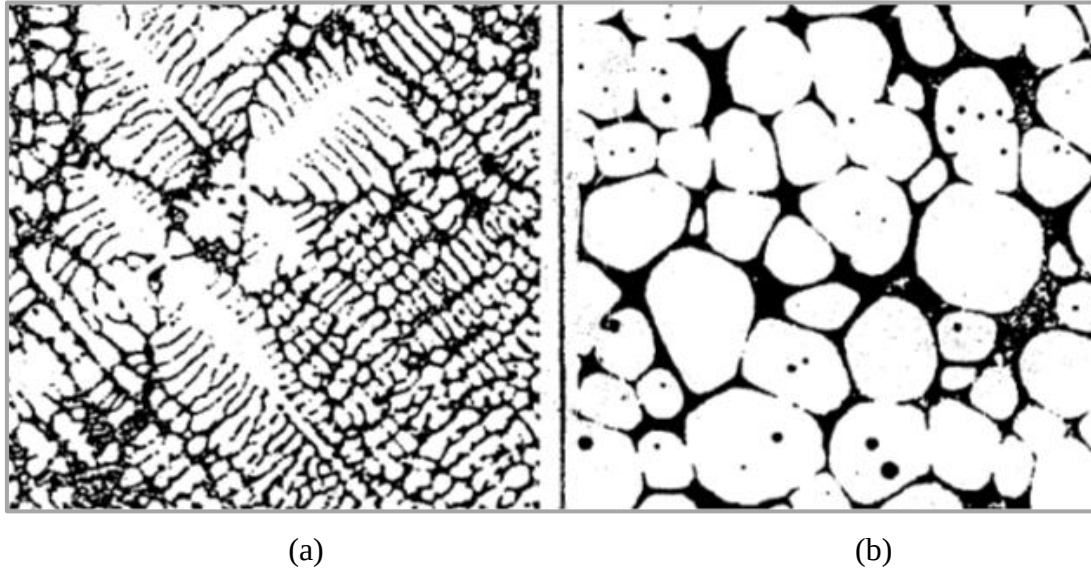
Bu yöntemde etkili olan parametreler; karıştırıcının hızı ve uç boyutları, karıştırıcı pervanenin sıvı içerisindeki konumu, takviye partiküllerinin boyutu ve oranı, karıştırma süresi, sıvı alaşımın bileşimi ve sıcaklığı, kalıp malzemesinin türü ve kalıp sıcaklığı sayılabilir [35].

Matris alaşımları ile bazı takviye malzemeler arasındaki zayıf ıslanma nedeniyle metal matrisli kompozitlerin üretimi maliyetli ve zor olmaktadır. Bununla birlikte, parçacık

takviyeli metal matrisli kompozitlerin çeşitli üretim yöntemleri arasında vorteks metodu ile nispeten daha düşük bir maliyetle net şekilde parça üretmek mümkündür [36].

3.4.4. Yarı katı döküm

Bu yöntemde katı ile sıvı arasındaki bir sıcaklığa sahip yarı katı karıştırma ile takviye partikülleri ilave edilir. Alaşımın sıcaklığı ergime sıcaklığının 30-50 °C üzerine çıkartılıp şiddetli bir şekilde karıştırılarak yarı katı aralığına kadar soğuması sağlanır. Şiddetli karıştırılan yarı katı bulamaç içerisine Al_2O_3 ve SiO_2 gibi takviye partiküller katılır. Bu işlemde hareketin devam etmesi katılaştan dendritik yapıyı kırarak ince küresel parçacıklara dönüştürür (Şekil 3.9) [1,3].



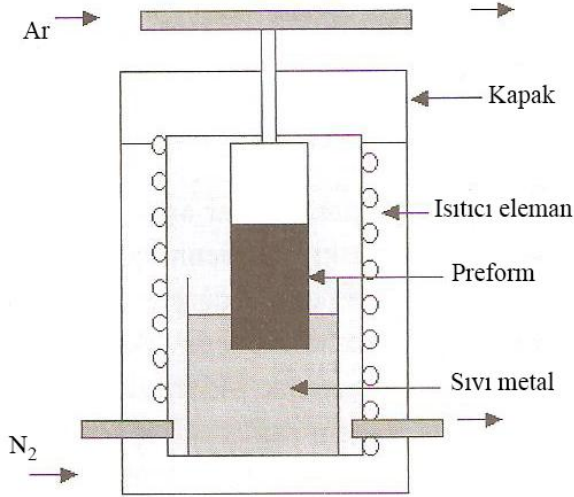
Şekil 3.9. 357(Al-7Si-0,5Mg) alaşımının (a) konvensiyonel dökümdeki dendritik mikroyapısı, (b) yarı katı döküm esnasında dendritlerin kırılması ile oluşan yapı [1]

Bu yöntem, yarı katı haldeki kompozitin deformasyona direnci az olduğundan dövme ve ekstrüzyon gibi işlemlerle net şekilde üretime imkan tanır. Ayrıca yarı katı döküm düşük sıcaklıklarda yapıldığından takviye partikülün kimyasal bozulma riskini ve takviye ile matris arasında gerçekleşen reaksiyonları azaltmaktadır [27].

3.4.5. Basınçlı infiltrasyon

Basınçlı infiltrasyon tekniği; önceden hazırlanan preforma, ergiyik metalin basınçlı bir şekilde infiltre edilmesi esasına dayanır. Sıkıştırılmalı döküm yönteminden farkı, sıvının preform içerisine bir zımba yardımıyla değil basınçlı bir gaz ile iletilmesidir. Şekil 3.10'da basınçlı infiltrasyon yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemde kontrol parametreleri; kalıp ön ısıtma sıcaklığı, infiltrasyon basıncı, takviye yoğunluğu, partikül boyutu, infiltrasyon hızı ve sıvı metal sıcaklığıdır [3].

Basınçlı infiltrasyon yönteminde hacim oranları yüksek seramik takviyeli kompozit malzemeler üretilmektedir. Toyota dizel motor pistonları üretiminde Al-Al₂O₃ kısa fiber kompozit malzemesini basınçlı infiltrasyon yöntemini kullanarak üretmiştir [27].



Şekil 3.10. Basınçlı infiltrasyon [3]

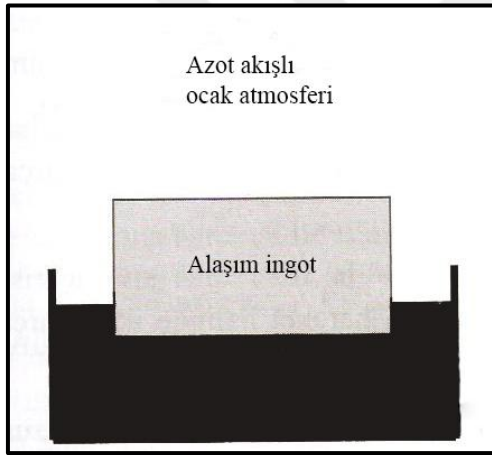
Basınçlı infiltrasyon yöntemi genel anlamda hızı, yüksek üretim kapasitesi ve net şekle yakın parça üretimi gibi özellikleri sayesinde MMK malzemelerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [15].

3.4.6. Basınçsız infiltrasyon

Basınçsız infiltrasyon tekniği farklı kalıplama yöntemleri ile preslenen preform içine azot ortamında bir karışımın ya da alaşımın infiltrasyon edilmesi işlemidir ve Lanxide yöntemi olarak bilinmektedir [35].

Şekil 3.11’de basınçsız infiltrasyon tekniği görülmektedir. Bir katı, sıvı tarafından ıslatıldığında gözenekli ortam içerisine sıvının kendiliğinden infiltrasyonu gerçekleşmektedir. Bu yöntem ile yüksek hacim oranlı net şekle yakın parça üretimi mümkün olmaktadır [3].

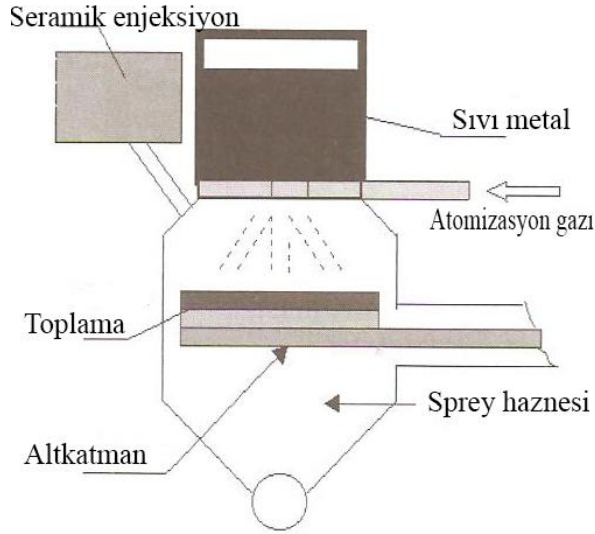
Temel olarak alüminyumun seramik preforma sızmasını sağlamak için kimyasal reaksiyonlar kullanılır. Alüminyum alaşım matrisleri ile net şekle yakın kısımlar oluşturmak için alümina ve silisyum karbür % 55- 60 hacim oranlarında kullanılır. Ağırlıkça % 3-10 magnezyum içeren bir alüminyum alaşımlı külçe, alümina veya silisyum karbürden geçirilebilir bir seramik malzeme kütlesinin üzerine yerleştirilir. Alaşım seramik sistemi 1475 - 1835°C arasındaki sıcaklıklarda azot atmosferi altında ısıtılır [26].



Şekil 3.11. Basınçsız infiltrasyon

3.4.7. Plazma püskürtme

Plazma püskürtme tekniğinde, püskürtme işlemi yapılacak alaşım indüksiyon fırınında ergiyik hale getirilir ve potaya basınç uygulanarak püskürtülmesi sağlanır. Ergiyen alaşımın püskürtülmesi sırasında takviye partikülleri atomize edilmiş sıvı içerisine enjekte edilerek önceden ısıtılmış alt katman üzerine çökeltirilir. Benzer şekilde “osprey” veya “sprey çöktürme” yöntemleri ile kompozit üretilmektedir. Şekil 3.12’de osprey yöntemi gösterilmiştir [3]. Takviye partikülleri, inert gaz jeti ile birlikte atomize edilecek sıvı alaşım içine gönderilir, metal damlacık spreya haline dönüşür ve takviye edilen metal matrisli alt katman üzerinde toplanır. Damlacık alt katmana çarptığında katı haldedir ve biriktirme hızı yaklaşık 6-10 kg/dk’dır [37].



Şekil 3.12. Osprey yöntemi [3]

Bu yöntemde sıvı ile takviye fazı arasındaki temas süresinin kısa olmasından dolayı sıvı matris ve seramik takviyesi etkileşimi sınırlı olmaktadır ve bu yüzden ara yüzeyde sınırlı sayıda reaksiyon oluşmakta ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin iyi olmasını sağlamaktadır. Diğer bir avantaj ise takviye partiküllerinin matris içinde homojen olarak dağılmasıdır. Yöntemin dezavantajları ise tam yoğunluğa ulaşabilmek için ikinci bir prosese ihtiyaç duyulması, üretim sırasında oluşan gözenek ve maliyetin yüksek olmasıdır [27].

4. TOZ METALURJİSİ (TM)

Toz metalurjisi; farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliklerine sahip olan metal tozlarından son şekle yakın, yüksek performanslı parça üretim kademelerini içeren bir yöntemdir. Tozlar karıştırılıp istenilen şekle preslendikten sonra sinterlenmesi ile parça üretimi gerçekleştirilir. Bir çok malzeme toz haline getirilebilir. TM’de kullanılan metal tozları 200 μm ’den küçüktür ve gelişen teknoloji ile beraber her yıl daha da küçük toz boyutları elde edilmektedir. TM yönteminin geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında sağladığı avantajları şunlardır [21,35,38]:

- Geleneksel yöntemlerle üretimi zor olan karmaşık şekilli parçaların kolay bir şekilde üretimine imkân tanır.
- Ergime sıcaklığı yüksek olan metallerin üretimi mümkündür.
- Yoğunluk kontrolü daha kolay yapılabilir.
- Ucuz ve son şekle yakın parçalar üretilir.
- Seri ve çok sayıda üretim yapılabilir.
- Malzeme kaybı yok denecek kadar azdır.
- Döküm ve dövme gibi yöntemlerde karşılaşılan oksidasyon, segregasyon ve gaz absorpsiyonu gibi problemler görülmez.

TM yönteminin bu avantajları yanında bazı dezavantajları da vardır ve bunlar:

- Tozların kalıplara zor akması seri üretimde probleme neden olabilir.
- Sinterleme sırasında boyca büzülme sebebiyle parçaların hacmi küçülür. Bu yüzden kalıp tasarımında boyut toleransına dikkat edilmelidir.
- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Toz üretimi veya toz fiyatları maliyeti artırmaktadır.
- Büyük parçaların üretimi zordur.

Ayrıca kompozit malzeme üretiminde, ergiyik metal yöntemleriyle üretilen malzemelerde karşılaşılan temel problemlerden biri takviye ile matris arasında tam olarak istenen düzeyde bir bağ oluşturulamaması ve takviye elemanı matris içerisinde tam olarak homojen dağılmamasıdır. TM ile bu ara yüzey kinetiğinin daha iyi kontrol edilebilmesi mümkündür ve daha iyi homojenlik sağlanabilir [5,35].

Toz metalurjisinde parça üretim kademeleri

Toz metalurjisinde parça üretiminde temel olarak beş aşama gerçekleştirilir. Temel prensip homojen bir yapı için tozların karıştırılması, istenilen şekle preslenmesi ve sinterleme ile dayanım kazandırılmasıdır. TM ile parça üretim kademeleri:

- a. Toz üretimi
- b. Tozların karıştırılması
- c. Tozların preslenmesi
- d. Sinterleme
- e. Tam yoğunluk işlemleri

4.1. Toz Üretimi

Bir tozun üretim yönteminin bilinmesi toz özellikleri hakkında başlangıçta tahmin edilebilmeyi sağlar. Toz üretiminde mevcut olan çeşitli yöntemler Şekil 4.1'deki gibidir.

Mekanik Yöntemler

- Talaş kaldırma
- Değirmende öğütme
- Darbe yöntemleri
- Mekanik alaşımlama

Elektroliz ile Üretim

Kimyasal Yöntemler

- Gaz fazı ile ayrıştırma
- Termal ayrıştırma
- Sıvı fazdan çökeltme
- Gaz fazdan çökeltme

Atomizasyon Yöntemleri

- Gaz atomizasyonu
- Su atomizasyonu
- Döner disk atomizasyonu
- Döner elektrod atomizasyonu

Şekil 4.1. Toz üretim yöntemleri

4.1.1. Mekanik yöntemler

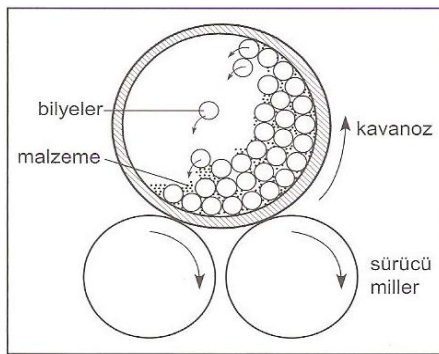
Talaş kaldırma

Mekanik kuvvetler etkisi altında toz malzemeler üretilir. Bu yöntemle üretilen toz karmaşık şekilli olmaktadır. Kütüklerin parçalanmasında talaş kaldırma işlemi kolaylık sağlayan bir yöntemdir. Küçük ölçekli toz üretimi için elverişlidir. Yeterince gevrek olmayan metal parçalara katkı elemanları katılarak gevreklik ve kırılgenlik sağlanır. Genellikle yüksek karbon içeren çeliklere uygulanır. Oksitlenme, yağ kirliliği gibi problemler oluşabilir [15,39,40].

Değirmende öğütme

Şekil 4.2’de verilen değirmen içersine aşınmaya dayanıklı bilyelerle birlikte toz malzeme konularak öğütme işlemi yapılır. Değirmen döndürüldüğünde bilyeler toz malzemeye çarparak boyut küçülmesini sağlarlar. Sonuçta karmaşık şekilli ve soğuk deformasyon sertleşmesi görülmüş toz üretilir. Bu yöntemde demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum gibi kırılgen malzemeler öğütölmektedir. Sünek malzemelerde, kırılıp küçölmek yerine şekil değışimi olduğu için bu yöntem kullanılmaz [41]. Öğütmenin en uygun hali için;

- Bilye çapı toz çapının yaklaşık 30 katı olmalıdır.
- Bilyeler kavanoz hacminin yarısını doldurmalıdır.
- Öğütölecek toz kavanoz hacminin % 25’ini doldurmalıdır [39].

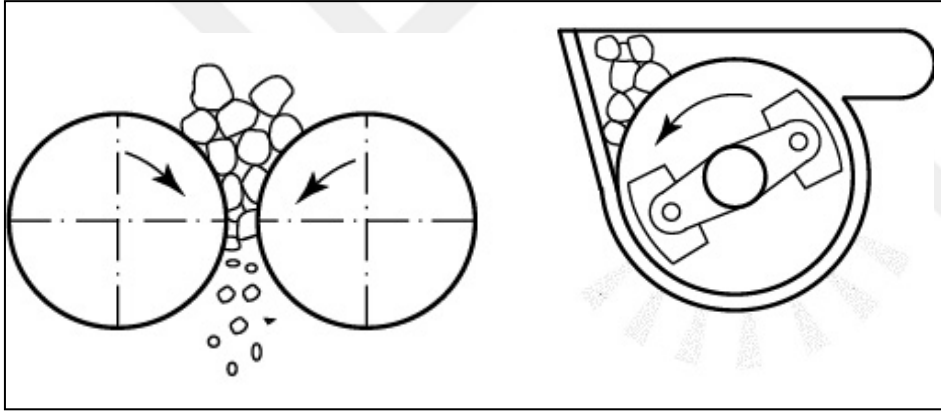


Şekil 4.2. Değirmende öğütme işlemi [39]

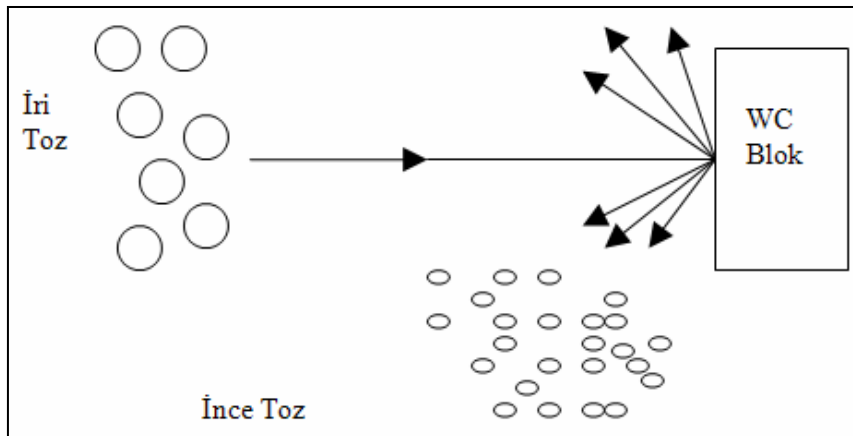
Öğütme işlemi su, alkol veya heptan gibi bir hidrokarbon sıvı içerisinde yapılarak öğütme süresini kısaltılabilir ve ayrıca ince toz üretilir [42].

Darbe yöntemleri

İri taneli tozlar darbe yöntemleri ile ince tane boyutlu tozlar haline getirilir. Tozları 1 mm boyutuna inceltmek için çeneli kırıcılar kullanılabilir (Şekil 4.3). Parçacık boyutunu daha da küçültmek için sert kanatçıklı yüksek hızlı darbeli öğütücüler kullanılabilir. Soğuk akış yaklaşımında, iri taneli tozların yüksek bir basınç ile sert bir bloğa çaptırılması sonucu boyut küçültme işlemi de diğer bir yöntemdir (Şekil 4.4). Paslanmaz çelik tozlar bu yöntem ile üretilmektedir [4,39].



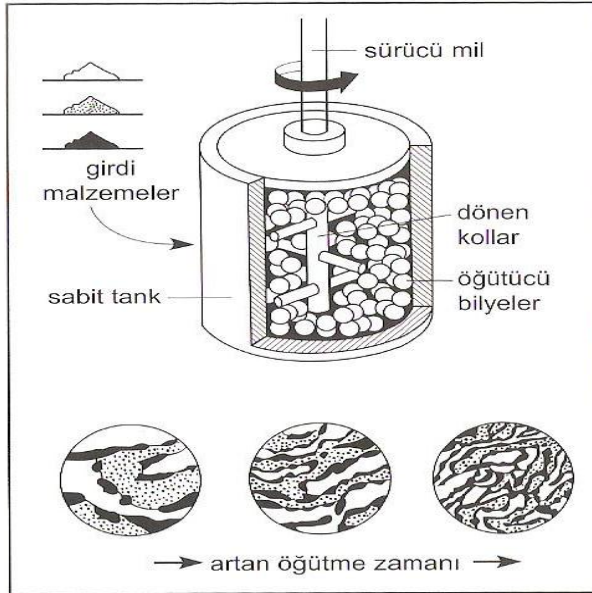
Şekil 4.3. İri taneli tozların inceltmesinde kullanılan darbeli kırıcılar



Şekil 4.4. Soğuk akış yaklaşımında çarptırma ile toz boyutu küçültme işlemi [4]

Mekanik alaşımlama

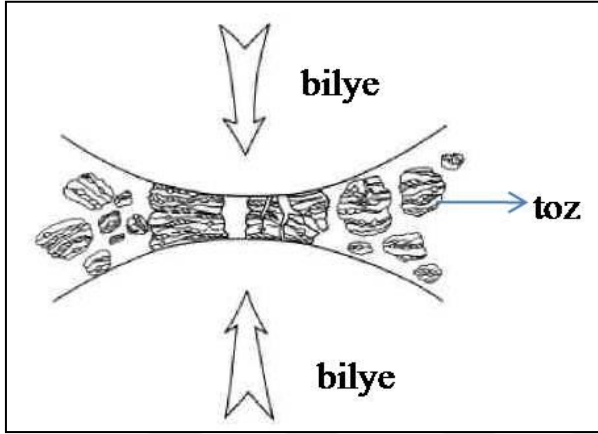
Mekanik alaşımlama işleminde yüksek enerjili atritör kullanımı ile hareketli bilyeler ile tozların karışımı ve öğütülmesi gerçekleştirilir. Kompozit tozlar üretimde kullanılan bir yöntemdir. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi dönen kollar yardımıyla bilye ve toz dolu tank karıştırılmaktadır. Üretimi istenen tozlar ile bilyeler tank içine konur. İşlemin başlamasıyla tank içerisindeki tozlar mikroskobik ölçekte tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynak ve kırılma olaylarını izler. Bu işlemden önce matris içinde takviye sert elemanın öğütme sonucunda homojen bir şekilde dağılması gerçekleştirilir. Üretilen tozların boyutunu bilye-toz oranı, bilye çapı ve ortam sıcaklığı etkilemektedir [39,43].



Şekil 4.5. Mekanik alaşımlama işlemi [39]

Mekanik alaşımlama tankı su soğutmalıdır. Ayrıca karıştırma sırasında meydana gelebilecek oksitlenmenin önüne geçmek için argon, azot veya hidrojen atmosferi altında işlem gerçekleştirilir. MA işlemine tabi tutulacak tozlardan biri bağlayıcı özellik göstermesi bakımından yumuşak diğeri ise sert metal veya metal dışı tozlar olmalıdır. Sert tozlar kompozit malzemede matris içerisinde takviye partikülü olarak yer almaktadır [4,14,44].

MA işleminde karıştırma sırasında bilyeler arasında kalan toz, bilyelerin birbirlerine çarpması sonucu öğütülür ve sert partiküller kırılarak yumuşak matris içine gömülür (Şekil 4.6). Her bir çarpışmada yaklaşık 0,2 mg'lık bir yığın ile 1000 adet toz tanesi ezilir [14].



Şekil 4.6. MA işlemi sırasında bilye-toz çarpışması [14]

Toz üretim yöntemlerinde karşılaşılan kirlilik problemi mekanik alaşımlama işleminde de meydana gelebilir. Bilyeler, karıştırma kolu, tank ve toz aynı malzemeden olduğunda kirlilik azaltılabilir. Ayrıca stearik asit gibi yağlayıcılar tozun birbirine kaynaklanmasını ve ortamdaki atritör elemanlarına sıvanmasını önler [39].

MA yöntemi ile üretilen kompozit tozların kullanıldığı parçalarda döküm veya diğer metotlar ile üretilen parçalarda ortaya çıkan malzeme kaybı, mikroyapıda homojen olmayan dağılım, yüzey pürüzlülüğü gibi problemler oluşmaz [15].

4.1.2. Kimyasal yöntemler

Gaz fazı ile ayrıştırma

Oksitler indirgenerek metalik toz üretilir. Oksit faz grafit ve kireç taşı gibi indirgeyici maddeler ile karıştırılıp daha sonra ısıtılır. Oksitler ortaya çıkan karbon monoksit gibi gazları içeren reaksiyonlar ile indirgenir. Elde edilen toz şekli köşeli olup paketlenme yoğunluğu düşüktür. Safılık kaliteyi belirler. Tozların parçacık şekli ve boyutu indirgenme parametreleri değiştirilerek çeşitlendirilebilir. Bu parametreler; gazın bileşimi, sıcaklık, tepkime kinetiği ve indirgenen madde yatağı kalınlığıdır [38,39,45].

Termal ayrıştırma

Demir, bakır, krom, magnezyum, nikel ve kobalt gibi metaller CO gazı ile basınç ve sıcaklık altında karbonille parçalanır ve ince taneli tozlar elde edilir. Örnek olarak, nikel karbon monoksit ile ısıtma ve basınç uygulanarak tepkimeye sokulur. Karbonil molekülü 43 °C'ye soğutularak sıvı hale getirilir ve saflaştırmak için kısmi damıtma kullanılır. Sıvı bir katalizörle birlikte ısıtıldığında buhar bozunması ile toz elde edilir. Elde edilen Ni tozu küçük parçacık boyutundadır ve yaklaşık % 99,5 saflığa sahiptir. Şekli ise düzensiz, yuvarlak veya zincir gibidir [4,39,46].

Sıvı fazdan çökeltme

Nitrat, klorür, sülfat gibi metal iyonları içeren ergiyiklerden kimyasal işlemler ile çökeltilmiş toz parçacıklar üretilebilir. Kimyasal olarak çökelen tozların boyutları 1 µm kadardır. Fakat çökeltilerin reaktör içinde dolandırılması ile boyut artışı sağlanabilir. Çökeltilmiş tozun saflığı % 99,5 civarındadır ve parçacık şekli düzensiz, kübik ve süngerimsi olabilir. Bu yüzden akış özellikleri zayıf olup paketlenme yoğunlukları düşüktür [38,39].

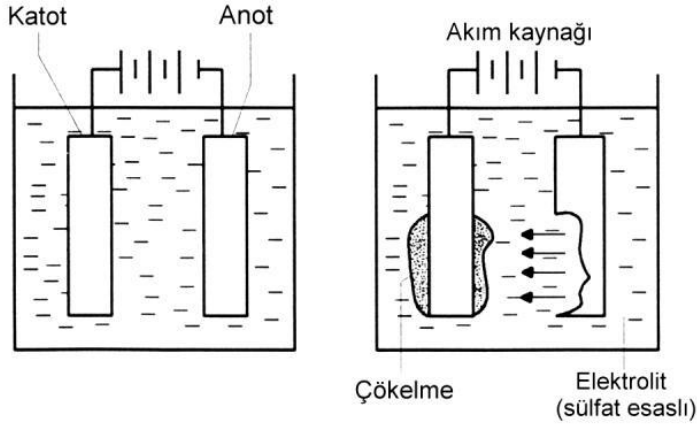
Gaz fazdan çökeltme

Toz malzeme üzerinden metal içerikli bir buhar fazı geçirildiğinde esas malzeme buhar fazında bulunan metalin yerine geçerek toz üzerine çöker. Kompozit tozlar ve ısıya dayanıklı kaplamalar bu gibi buhar fazı tepkimeleriyle oluşturulur. Pahalı bir yöntem olmasının yanında parçacık boyutu, şekli, saflığı ve topaklanma özellikleri iyidir. Gümüş, volfram, vanadyum, titanyum, kobalt, zirkonyum, nikel metalleri için uygun bir yöntemdir [39,47].

4.1.3. Elektroliz ile üretim

Elektroliz işleminde elektrolitin kimyasal bileşimi, akım yoğunluğu, mukavemeti ve sıcaklık gibi şartlar kontrol edilerek tozlar üretilebilir. Genel olarak bakır tozlarının üretildiği elektroliz yönteminde; tozlar elektrolit banyo içerisinde çökeltir veya katot üzerinde toplanır. Katot üzerinde biriken toz sıyrılır, yıkama, kurutma ve istenirse öğütme

işlemi yapılarak toz üretilir. Daha sonra gerilmeleri ve uçucu maddeleri gidermek için tavlama yapılır. Sonuçta üretilen toz tane şekli dendritik veya süngerimsi olabilir. Toz özellikleri banyo şartları ve işlem parametrelerine bağlı olarak değiştirilebilir. Elektroliz ile üretimde sadece metalik tozlar kullanılır, alaşım veya bileşikler kullanılmaz [15,39,48].



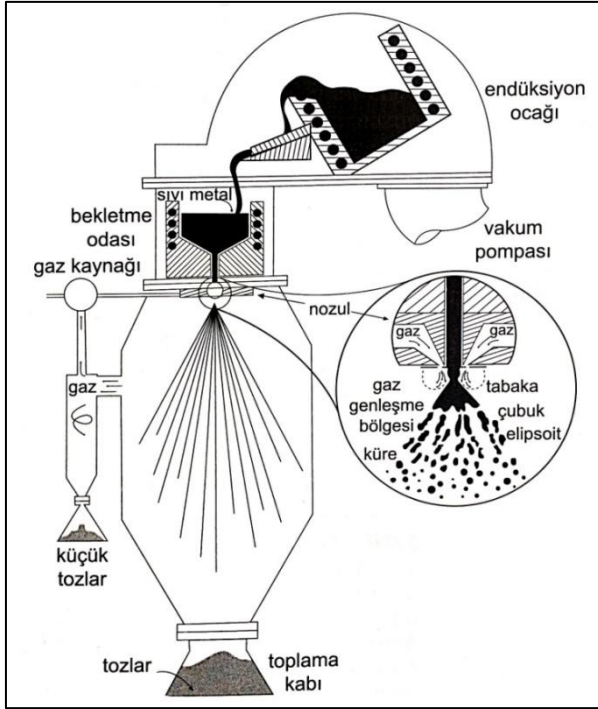
Şekil 4.7. Elektroliz ile toz üretimi [42]

4.1.4. Atomizasyon yöntemleri

Gaz atomizasyonu

Gaz atomizasyon işleminde sıvı metalin hava, argon, azot, helyum gibi gazlar ile parçalanması ve soğuma sonucu toz üretimi gerçekleştirilir. Şekil 4.8’de verilen düşey gaz atomizasyon ünitesinde sıvı metal endüksiyon ocağı ile erime noktasının çok üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır ve soğuk nozula gönderilir. Hızlı genleşen gaz nozulda sıvı metal demetini parçalar. Gazdaki enerji sıvı metal demetine geçer ve damlacık oluşumu sağlanır. Soğuyan damlacıklar katılaşır. Katılaşma başlangıcında oluşan toz şekli tabaka halinde olup daha sonra çubuk, elipsoit ve en son küre şeklinde toz toplama kabına birikir. Gaz atomizasyonunda toz üretimi tamamen koruyucu atmosferde gerçekleştirilebilir ve bu sayede saflığı yüksek toz üretilir [39].

Gaz atomizasyonunda kontrol parametreleri, jet mesafesi, jet basıncı, nozul geometrisi, gaz ve metal hızı ve metal aşırı ısınmayı içerir. Litaratürde parçacık boyut dağılımını atomizasyon koşullarıyla ilişkilendiren bazı ifadeler önerilmiştir. Yüksek basınç ve daha küçük bir jet mesafesi ile daha ince toz üretilmektedir [49].

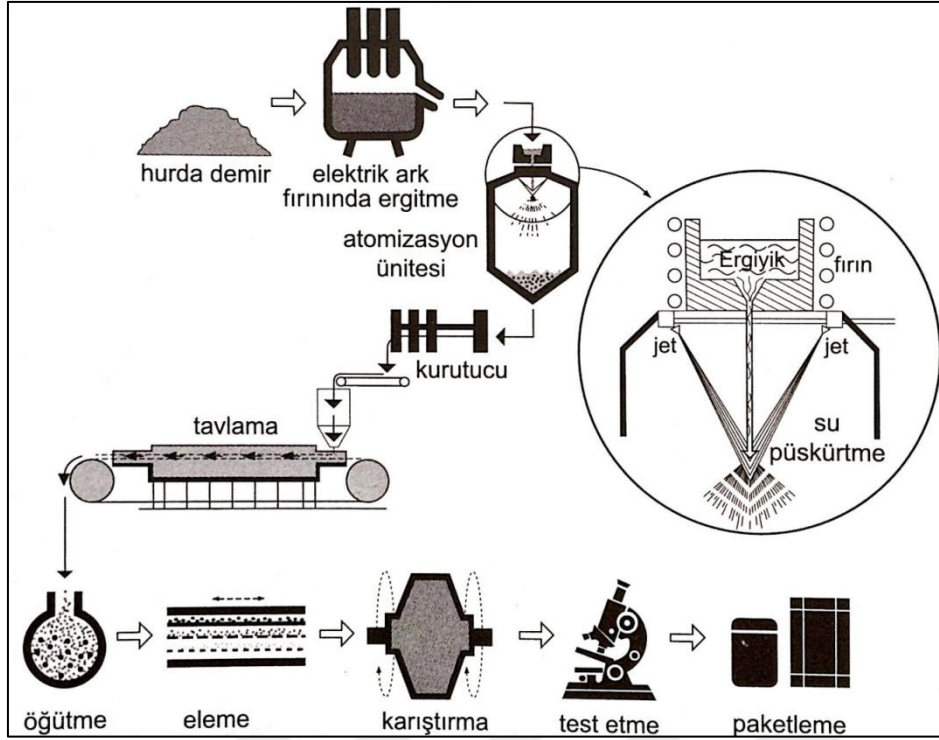


Şekil 4.8. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [39]

Su atomizasyonu

Gaz atomizasyon yönteminden temel farkı sıvı metalin bir gaz ile değil yağ ve su içeren bir sıvı yardımıyla parçalanmasıdır. Şekil 4.9'da çelik ya da demir tozu üretiminde su atomizasyon işlemi gösterilmiştir. Birden fazla jetten yönlendirilen yüksek basınçlı su sıvı metal demetini parçalar ve hızlı katılaşmasını sağlar. Su atomizasyon yönteminde parçacıkların soğuma hızı gaz atomizasyonuna göre daha hızlı gerçekleşir. Bu sebeple parçacık şekli düzensiz ve pürüzlüdür. Bu yöntemde temel kontrol parametresi basınç olup daha yüksek basınçlı su daha küçük parçacık boyutu oluşturur [39].

Sıvı metal, akışı sırasında en az iki adet ve eşit açıda yerleştirilen v-jetleri sayesinde kesilir. V-jeti sayısı iki veya dört adet olabilir. İkili v-jeti çalıştığında sıvı metal dağılmadan huzme dışına çıkabilir bu yüzden dörtlü v-jetleri ile çalışıldığındaki verime ulaşabilmek için daha yüksek basınç gerekir [50].



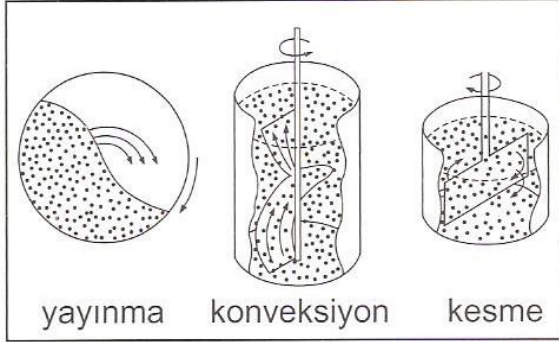
Şekil 4.9. Su atomizasyon işlemi [39]

Yüksek basınçta su tedarik etmek için büyük miktarda enerji gereklidir ve toplam işlem verimliliğinin yaklaşık % 1 olduğu tahmin edilmektedir. Su atomizasyonu, düşük ve yüksek alaşımlı çeliklerin üretiminde önemli ekonomik ve teknik etkiye sahiptir. Aşırı oksitlenmeye maruz kalmadan atomize olabilen veya atomizasyon esnasında oluşan oksitlerin kolayca indirgenebildiği alaşımlar ile sınırlandırılmıştır [49].

Döner disk atomizasyonu

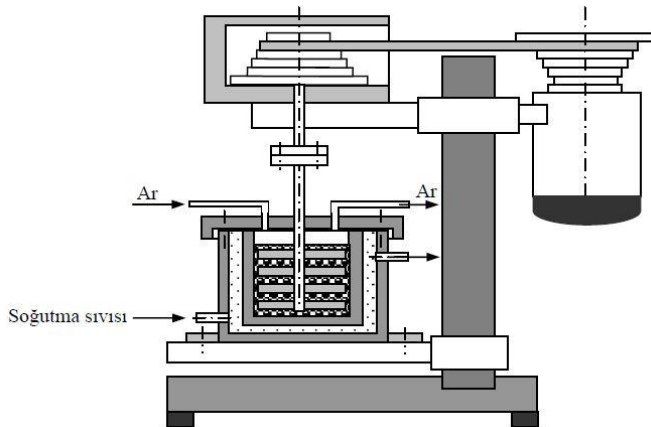
Sıvı metalin döndürülmesi ile oluşan mekanik kuvvetler etkisi sayesinde damlacıkların katılaşması ile toz oluşturulması esasına dayanan yöntemlere savurmalı veya santrifüj atomizasyon denilmektedir. Döner disk ve döner elektrot yöntemlerinin temelinde savurma işlemi vardır. Sıvı metal soğutulan döner disk üzerine akıtılır. Merkezkaç kuvveti ergiyik metali dışarıya doğru ince bir tabaka halinde fırlatır ve parçalanır. Oluşan damlacıklar katılaşır ve toz üretimi gerçekleştirilir. Disk hızı arttığında toz ebatları küçülür. Disk malzemesi sıvı metalin ısını alı ve katılaşmasını sağlar. Bu yüzden genelde bakırdan yapılır [51].

Tozların karıştırılması V ya da Y tipi olarak bilinen konik karıştırıcılarda yapılır. Toz karıştırma mekanizmaları; yayınma, konveksiyon ve kesmedir. Yayınmada dönen silindir içerisinde, konveksiyonda vidalı bir karıştırıcıda ve kesmede ise bıçaklı karıştırıcı da karıştırma gerçekleştirilir (Şekil 4.11) [39].



Şekil 4.11. Toz karıştırma mekanizmaları [39]

Karıştırma işlemi atritörde, biyeli değirmende veya bilyesiz değirmende yapılabilir. Atritörde yapılan mekanik karıştırma işlemi koruyucu gaz atmosferi altında ve bilye eklenerek gerçekleştirilir (Şekil 4.12). Mekanik karıştırma sırasında tozlarda pekleşme, kırılma ve kaynaklanma meydana gelir. Atritörde karıştırma sonucu yapıda tamamen homojen bir dağılım sağlanabilir.



Şekil 4.12. Yüksek enerjili atritör şematik gösterimi [4]

Karıştırma türü, zamanı ve hızı karışım tozdan üretilecek malzemelerin özelliklerine etki etmektedir. Zamanın fazla olması tanelerin kırılarak küreselleşmesine ve deforme olmasına neden olabilir. Bundan kaynaklı olarak tozun kalıp içerisinde sıkıştırılabilirliği azalabilir.

Dönme hızının düşük olması istenen karışımın sağlanabilmesi için gereken süreyi uzatır. Çok yüksek hızlarda yapılan karıştırmada ise merkezkaç kuvveti etkisiyle toz akışı engellenebilir, bu da homojen olamayan bir karışıma neden olur [52].

Yağlayıcılar

Sonraki adımlarda tozların kalıp cidarlarına yapışmasını engellemek, tozların birbirleri üzerinden rahat bir şekilde kaymasını ve bu sayede kolay şekil almasını sağlamak ve preslenmiş parçanın kalıptan çıkarılması işlemini kolay hale getirmek için yağlayıcılar kullanılır. Yağlama işlemi, yağlayıcının kalıp duvarına sürülmesi veya toz malzeme içine katılarak karıştırılması ile uygulanabilir. Yağlayıcılar arasında yaygın bir kullanıma sahip olanı stearat tozlarıdır. Karışım içine ilave edilen yağlayıcı miktarı genellikle ağırlıkça % 0,5-1,5 arasındadır. Çizelge 4.1’de bazı yağlayıcıların özellikleri verilmiştir [14,35,39].

Yağlama sayesinde;

- ham parçanın kalıptan çıkarılma basıncı önemli ölçüde azalır,
- kalıp aşınması azalır,
- parçacıklar arası sürtünme, ham dayanım, ham yoğunluk ve çıkartma basıncı arasında denge sağlanır.

Çizelge 4.1. Bazı yağlayıcıların özellikleri

Adı	Yumuşama Sıcaklığı (°C)	Ergime Sıcaklığı(°C)	Teorik Yoğunluğu (g/cm ³)
Kalsiyum stearat	115-120	160	1,03
Etilen bistearamid	129	144	1,05
Lityum stearat	195-212	220	1,01
Stearik asit	45	55	0,85
Çinko stearat	100-120	120	1,09

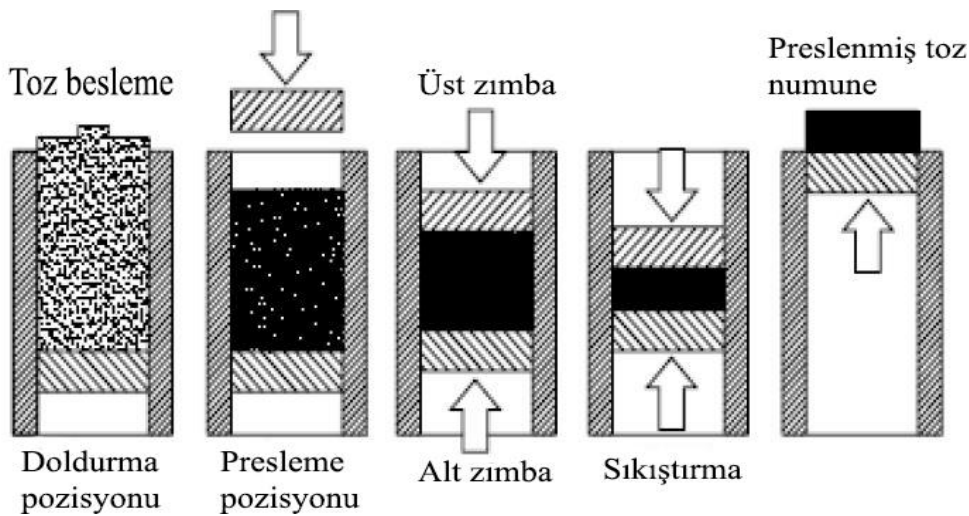
İyi bir yağlayıcı presleme sonrasında parçanın kalıptan çıkarılma basıncını düşürür. Bazı yağlayıcılar yapıştırıcı gibi davranıp mukavemet artışına neden olur. Bazı yağlayıcılar ise sinterleme sırasında yanarak gözeneklerin artışına neden olur ve bu yüzden yoğunluk azalabilir [53].

Bağlayıcılar

Karbür, oksit, intermetalik gibi sert tozların dayanımını arttırmak için bağlayıcılar toz karışımına eklenir. Ucuzdurlar ve ısıtma ile kolayca yapıdan uzaklaştırılabilirler. İyi bir bağlayıcı kolay dağılma, kararlı vizkosite, tozlara yapışma ve şekillendirilen parçaların dayanımını artırma gibi özelliklere sahiptir. Genellikle enjeksiyon, ekstrüzyon, slip döküm, şerit döküm gibi yöntemlerde kullanılırlar [39].

4.3. Tozların Preslenmesi

Tozlar karıştırıldıktan sonra şekil kazandırılmak ve yoğunluk sağlanması için istenilen parça şeklinde yapılmış ve üretilecek malzemeye uygun sertlik ve aşınma direncine sahip olan bir kalıp içinde farklı yöntemlerle genelde 300-800 MPa basınç aralıklarında preslenirler. Çizelge 4.2’de bazı toz malzemelerin preslenmesindeki basınç değerleri verilmiştir. Basınç uygulanması ile parçacıklar konumlanır, şekil değiştirir ve birbirlerine bağlanır. Şekil 4.13’te kalıpta presleme işlemi gösterilmiştir. Başlangıçta üst zımba yukarı çekilmiş durumdayken toz kalıp boşluğuna doldurulur. Üst zımba yerleştirilerek basınç uygulanır. Basınç tek yönlü uygulanabildiği gibi çift yönlü olarak uygulanabilir. İşlem sonunda üst zımba çekilir ve alt zımba parçayı iterek çıkartır. Preslenip sıkıştırılan toza ham parça, yoğunluğuna ham yoğunluk, mukavemetine ise ham mukavemet adı verilir [4,39,54].

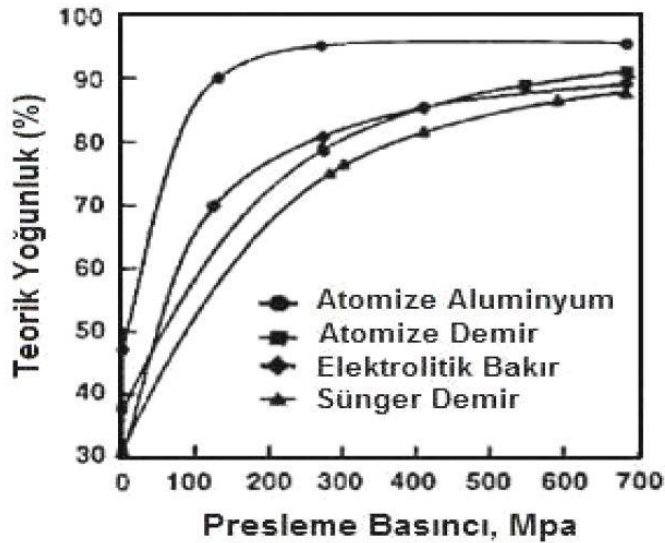


Şekil 4.13. Tozların preslenmesinde işlem sırası [14]

Çizelge 4.2. Bazı tozlar için presleme basınçları [54]

Malzeme	Ton/inc ²	Basınç MPa
Alüminyum	5-20	69-276
Pirinç	30-50	414-687
Bronz	15-20	207-276
Karbon	10-12	138-165
Alümina	8-10	110-138
Ferrit	8-12	110-165
Demir düşük yoğunlukta	25-30	345-414
Demir orta yoğunlukta	30-40	414-552
Demir yüksek yoğunlukta	35-60	483-827
Tungsten	5-10	69-138
Tantalyum	5-10	69-138

Presleme sırasında plastik deformasyon ile tozlarda gözenek miktarı azalır ve yoğunluk artar. Presleme kuvveti arttıkça toz numunelerde plastik deformasyon sertleşmesi sonucu sertlik artar [15]. Tozların preslenmesi ile teorik özgül ağırlığa yakın yoğunluğa sahip parçalar üretilebilir. Şekil 4.14'te gösterildiği gibi yoğunluk artışı düşük basınçlarda ilk olarak hızlıdır fakat gözenekler kapandıkça toz yoğunlaşmaya karşı atan bir direnç gösterir [35].

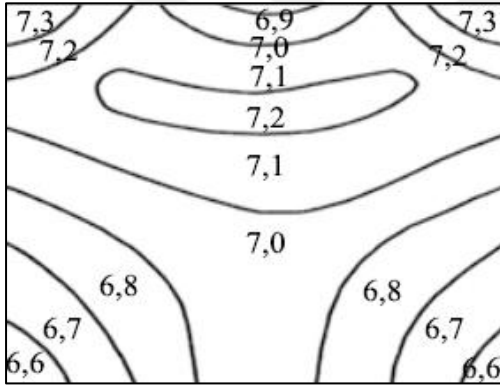


Şekil 4.14. Presleme basıncı ile teorik yoğunluk arasındaki ilişki [35]

Tozların preslenmesinde kalıpta presleme, yüksek basınçlı presleme, izostatik presleme, ekstrüzyon gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

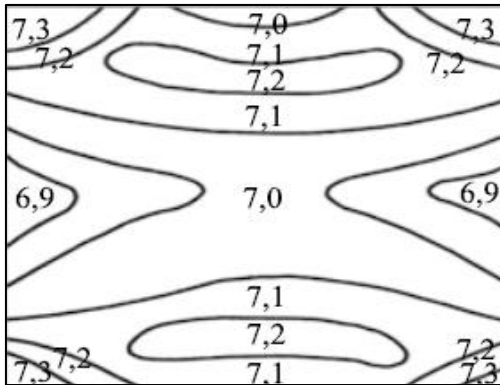
4.3.1. Kalıpta presleme

Kalıpta presleme en yaygın kullanıma sahip yöntemdir. Tek yönlü ve çift yönlü olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Tek yönlü presleme işlemi tozun hareketli olan üst zımbanın, hareketsiz olan alt zımbaya doğru tek ekseninde basınç uygulayarak sıkıştırması ile gerçekleşir. Tek yönlü preslemede toz partiküllerinin birbirleri arasındaki ve kalıpla olan sürtünmeden kaynaklı basınç dağılımı düzensiz olduğundan, yoğunluk homojen olmayan bir dağılım gösterir (Şekil 4.15). Şekilde yoğunluğun hareketli zımbadan sabit zımbaya doğru gidildiğinde azaldığı görülmektedir [14,15,55].

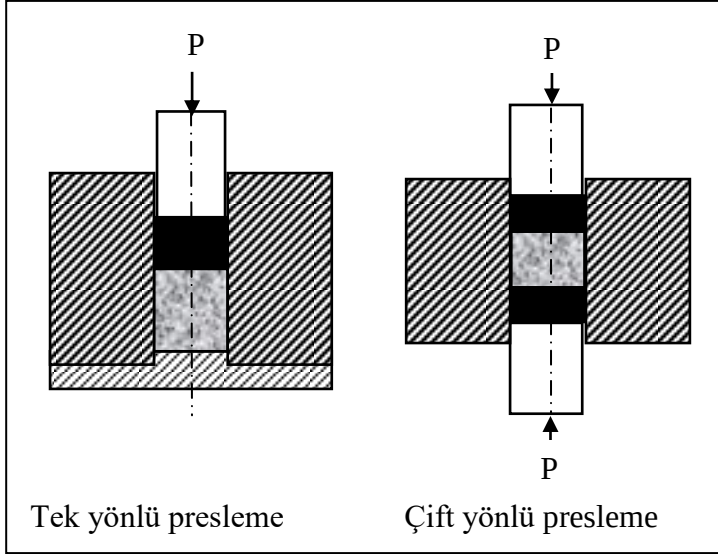


Şekil 4.15. Tek yönlü preslemede yoğunluk dağılımı

Çift yönlü presleme işleminde ise üst ve alt zımbanın ikisinde hareketlidir. Presleme işlemi iki zımbanın birbirlerine doğru hareketi ile gerçekleşir. Çift yönlü presleme ile kalıp içinde dengeli bir sıkıştırma sağlanır (Şekil 4.16). Bu sayede parçanın yoğunluğu tek yönlü preslemeye göre daha homojendir [4,14,15].



Şekil 4.16. Çift yönlü preslemede yoğunluk dağılımı



Şekil 4.17. Tek ve çift yönlü presleme şematik gösterimi

Kalıpta preslemede meydana gelen problemlerin başında kalıp yüzeyinde oluşan sürtünme gelmektedir. Sürtünme sıkıştırılan parçanın kalıptan çıkarılmasını zorlaştırır ve yoğunluk farkına neden olur. Basınç hem yoğunluğu belirlediğinden dolayı basınç farklılıkları yoğunluk farklılıklarını oluşturur. Sürtünme probleminin önüne geçmek için yağlayıcılar kullanılır [39].

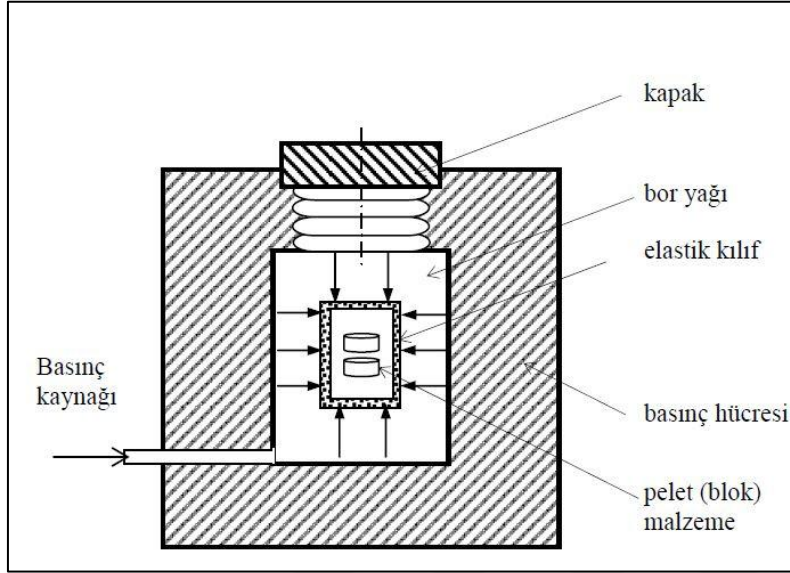
4.3.2. Yüksek basınçlı presleme

Bazı malzemelerin tam yoğunluğa ulaşması için yüksek sıkıştırma basınçları uygulanır. Basınç 1 GPa ile 3 GPa arasında olabilir. Bu basınçlarla yapılacak sıkıştırmada özel kalıplar gereklidir. Sadece sert metaller bu basınçlara dayanabileceğinden kalıp malzemesi olarak kullanılır. Yağlayıcı toz ile karıştırılmaz çünkü çok fazla hacim kaplar. Sadece kalıp duvarı yağlanır [39].

4.3.3. Soğuk izostatik presleme (SIP)

SIP işlemi tozun bir akışkanın basıncı ile sıkıştırılma işlemidir. Akışkanlarda bir noktaya etki eden basıncın tüm yönlerde aynı değerde ulaştığı bilinmektedir. Toz esnek bir kalıp içinde sızdırmaz hale getirildikten sonra içinde yağ veya su gibi bir sıvının olduğu kalıpta sıkıştırılır. Basma hareketi ile akışkan sıvı kalıbı her yönden eşit olarak sıkıştırır. Böylelikle numune yoğunluğu her kısımda aynı olur. İzostatik presleme; uzun, büyük, ince

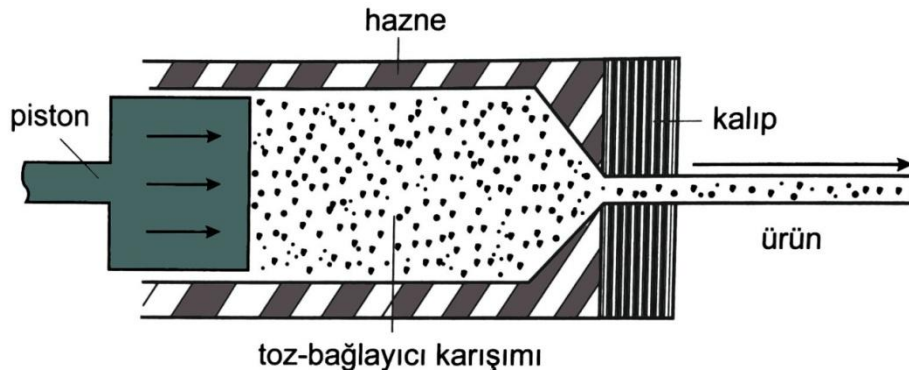
veya diğer yöntemler ile homojen olarak yapılamayan parçaların üretiminde kullanılan bir tekniktir. Boy/en oranının fazla olduğu parçalarda kullanılır. Kalıp duvarı sürtünmesi yoktur ve bu yüzden daha fazla yoğunluk elde edilebilir [14,39,56].



Şekil 4.18. Soğuk izostatik preslemenin gösterimi [4]

4.3.4. Ekstrüzyon ile presleme

Çubuklar, tüpler, matkap uçları, kaynak elektrotları gibi genişliği ince olan parçaların üretilmesinde kullanılır. Şekil 4.19'daki gibi toz ve bağlayıcı karışımı önceden ısıtılmış hazne içerisine yerleştirilir. Pistonun karışımı, haznenin sonunda bulunan şekil verme kalıbına doğru itmesi ile sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Yüksek yoğunluklu parçalar üretilir. Daha çok takım çeliği üretiminde kullanılır [14,39, 57]



Şekil 4.19. Ekstrüzyon ile presleme işlemi

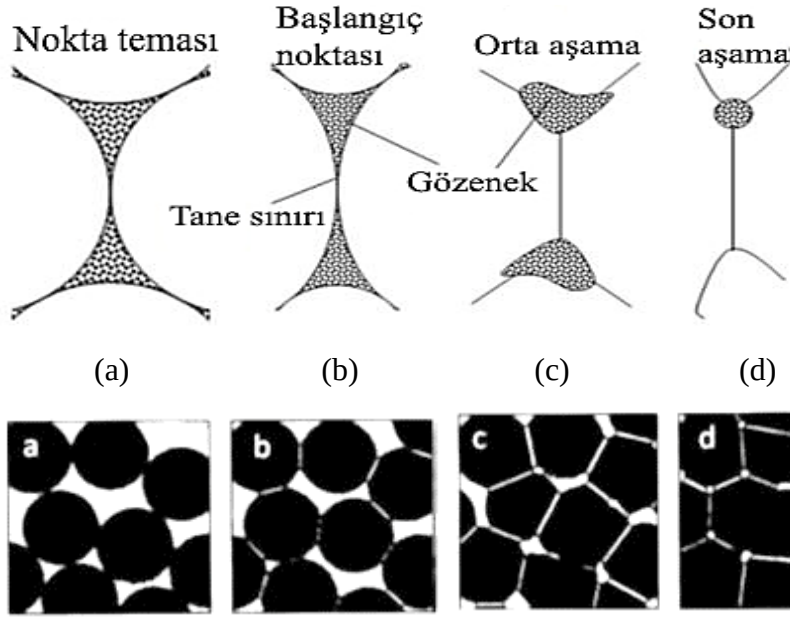
4.4. Sinterleme

Sinterleme işlemi, sıkıştırılarak şekillendirilen parçaların mukavemet kazanımı ve özelliklerin gelişimini sağlayan ısıtma işlemidir. Birbirlerine temas halinde bulunan parçacıklar, yüksek sıcaklıklarda atomların yayınımlı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisindeki azalmayla birlikte birbirine bağlanır. Bazı malzemeler için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Sinterleme sıcaklıkları tek bileşenli malzemeler için ergime noktasının yaklaşık 0,6-0,8 katıdır. Çok bileşenli malzemelerde sinterleme sıcaklığı ise daha düşük ergime sıcaklığına sahip metalden hesaplanır. Sinterleme işlemi atomik difüzyona dayanır. Difüzyon sonucu atomlar mikroyapıdaki boşlukları doldurur. Gözenekler küreselleşir ve küçük gözenekler yok olur [14,35,39,58].

Çizelge 4.3. Bazı malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ve süreleri

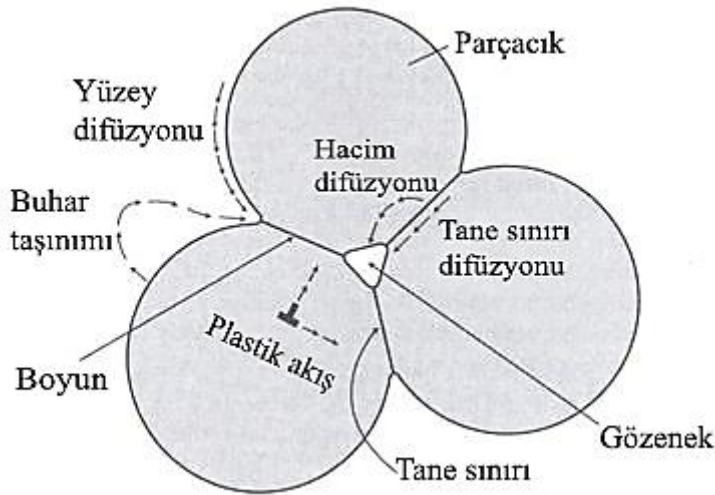
Malzeme	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)
Al	550-600	20-30
Cu	870	25
Fe	1150	25
Ni	1040	40
Mo	2050	120
Ti	1200	120
W	2350	480
Paslanmaz çelik	1150	40

Sinterleme başlangıcında nokta teması halinde olan parçacıklar (Şekil 4.20 a) arasında ilk aşamaya gelinmesiyle boyun büyümesi meydana gelir. Gözenekler başlangıçta düzensiz ve köşelidirler (b). Boyunlar birbirlerinden bağımsız halde büyürler. Sinterlemenin ara aşamasında gözenekler küreselleşir fakat halen dışa açık durumdadırlar. Boyunlar ise birbirleri ile etkileşecek kadar büyümüştür (c). Sinterleme ilerledikçe taneler büyür, gözenekler küçülür ve yoğunluk artışı olur. Son aşamaya gelindiğinde gözenekler küresel ve dışarıya kapalıdır (d) [4,59].



Şekil 4.20. Sinterleme aşamaları ve gözenek yapı gelişimi

Sinterleme işleminin ana mekanizmaları yüzey ve hacim difüzyonuna dayanır (Şekil 4.21). Difüzyon sonucu metal gövdesi oluşur ve alaşım elementleri yayılır. Termodinamik kanunların ifade ettiği serbest enerjiyi en aza indiren kuvvet gözeneklerin küreselleşmesini sağlar ve küçük gözenekler yok olur [60].



Şekil 4.21. Sinterlemede difüzyon mekanizmaları

4.5. Tam Yoğunluk İşlemleri

Sinterlemenin yetersiz olduğu durumlarda ve uzay, havacılık, biyomedikal, petrol, bilgisayar, savunma, metal kesme ve elektronik gibi uygulamalarda gözeneksiz mikroyapılar istenmektedir. Bu nedenle basınç ve sıcaklık aynı anda kullanılır. Başlıca tam yoğunluk işlemleri:

- Sinterleme benzeri, yayılım kontrollü işlemlerin baskın olduğu, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen düşük gerilmeli teknikler,
- Sıcak presleme
- Sıcak izostatik presleme
- Toz dövme
- Patlamalı sıkıştırma

Tam yoğunluk işlemleri ile kazanılan mukavemet, sertlik, süneklik, kırılma tokluğu gibi özellikler Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu özelliklerin yanı sıra homojenlikte sağlanır [39].

Çizelge 4.4. Basınçlı sinterleme ile kazanılan bazı özellikler

Malzeme	Özellik	Basıncsız Sinterleme	Basınçlı Sinterleme
Al ₂ O ₃	Kırılma tokluğu	3,5 MPa	4,2 MPa
Al ₂ O ₃	Dayanım	490 MPa	605 MPa
Çelik	Süneklik	%2	%39
Fe-10Al ₂ O ₃	Dayanım	430 MPa	1310 MPa
W-Mo-Ni-Fe	Dayanım	1400 MPa	2100 MPa
ZnO	Optik geçirgenlik	%10	%45
ZrO ₂	Dayanım	450 MPa	1200 MPa

Tam yoğunluk işlemlerinden sonra istenildiğinde ek işlemler gerçekleştirilebilir. Bu işlemlere örnek olarak delik delme, vida açma, montaj, kaba yüzeylerin düzleştirilmesi, çapakların alınması, ısıtma işlemi, kaplama gibi uygulamalar verilebilir.

Gözeneklerin azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için yapıdaki gözenekçikler doldurulur. Sinterlenmiş parçalarda korozyona olan direnci artırmak için yağ veya metal dışı malzemeler emdirilebilir [35].

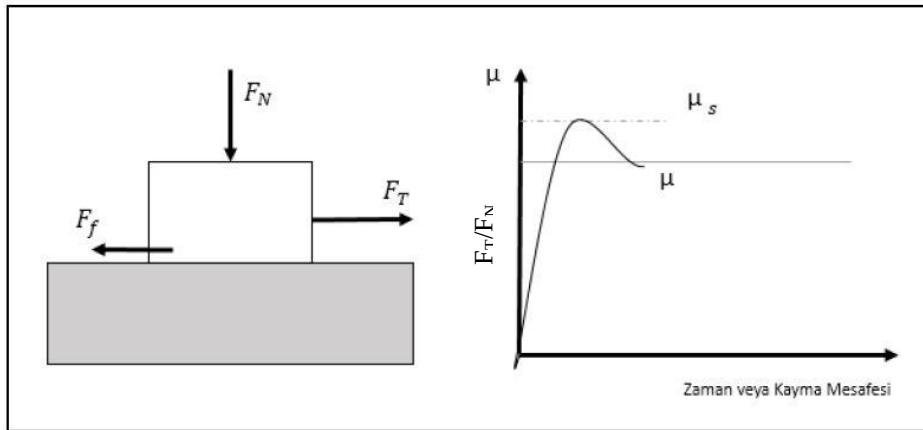


5. AŞINMA

5.1. Sürtünme ve Aşınmanın Tanımı

Sürtünme sonucu malzemelerde aşınma meydana gelmektedir. Sürtünme, DIN 50281'e göre: "Birbirleri üzerinde kayan, yuvarlanan veya kayarak yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan ya da engelleyen mekanik bir direnç" olarak tanımlanmaktadır [59].

Şekil 5.1'de gösterildiği gibi F_N normal kuvveti ile bağlı olan iki parçanın izafi hareketini sağlamak için F_T teğetsel kuvvetine gereksinim vardır. Bu kuvvete sürtünme kuvveti denilir. Sürtünme kuvveti, hareketini ters yönde etkileyen F_f statik sürtünme kuvvetinden üstün olmalıdır. F_T / F_N oranı μ_s statik sürtünme katsayısıdır. İki yüzeyin belirli bir hızda hareket ettirilmesi için gereken, kinetik sürtünme kuvvetini geçebilecek bir teğetsel kuvvettir. Bu durumda $F_T / F_N = \mu$ kinetik sürtünme katsayısıdır. Statik sürtünme katsayısı, genelde kinetik sürtünme katsayısından daha büyüktür [61].



Şekil 5.1. Temas halindeki iki yüzeyin hareket ettirilebilmesi için gerekli kuvvetin şematik gösterimi

Sürtünen malzemelerin yüzeylerinden mekanik olaylar ile küçük parçaların kopması sonucunda oluşan hasar mekanizmasına aşınma denilmektedir. Aşınma fiziksel ya da kimyasal yollar ile yüzeyden malzeme ayrılması ile gerçekleşir. Aşınma aşağıda verilen parametrelerin oluşturduğu bir sistemin etkileşimlerinden doğan bir sonuçtur.

- Malzeme özellikleri,
- Çalışma şartları (yük, hız),

- Kontak geometrisi,
- Yüzey pürüzlülüğü,
- Çevre (yağlayıcı, sıcaklık) [11,12,13].

Birbirlerine temas eden malzemelerin yüzeyleri oksit tabakası ve yağlayıcı tarafından korunsalar bile, mekanik yüklere maruz kalındığında oksit tabakasının kırılması ya da yağlayıcının bozulması yüzeylerin birbirlerine temasına sebep olur. Temas sonucu sürtünme oluşur ve bu da malzemelerin çalışma şartlarında ömür ve performansa etki eden aşınmaya sebebiyet verir. Aşınma sonucu makine parçalarının ömürleri ve performansları azalır, parçalar tamamen bozulabilir ve kullanılmayacak hale gelebilir. Sonucunda büyük miktarlarda ekonomik kayıplar oluşmaktadır [15].

Endüstride en çok karşılaşılan problemlerin başında aşınma gelmektedir. Aşınmanın yüksek olup ve yağlamanın yeterince yapılamadığı yerlerde aşınmaya daha dayanıklı malzemeler kullanarak malzeme ömrü uzatılır. Metal matrisli kompozitler bu kapsamda dikkat çeken malzemelerdir. Daha iyi aşınma direnci ve sürtünme özellikleri sayesinde silindir gömleği, piston, fren diski, şaftlar gibi otomotiv parçalarında MMK malzemeler kullanılabilmektedir [15]. Özellikle Al esaslı ve seramik takviye edilmiş kompozit malzemeler, çalışma koşullarında aşınmaya karşı en yüksek direnç ve üstün performans gösteren malzemelerdir [27].

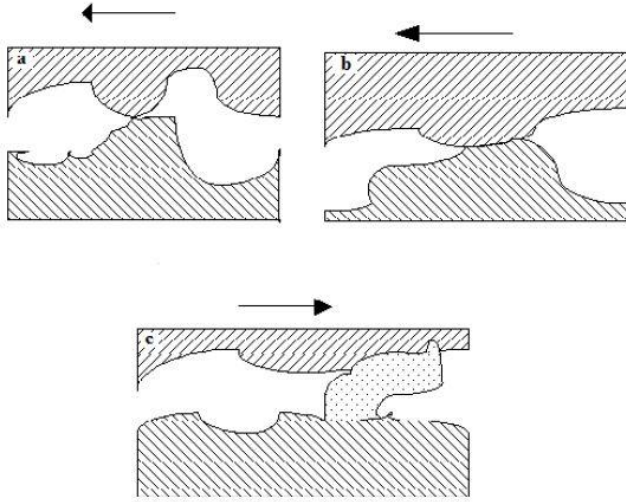
5.2. Aşınma Türleri

Aşınmanın gerçekleşme yolları adheziv, abrasiv, yorulma, korozyon, erozyon şeklinde olmaktadır.

5.2.1 Adhesiv aşınma

Adhesiv aşınma diğer bir adıyla yapışma aşınması basınç altında iki metal yüzeyi birbirleri üzerinde kaydığı zaman meydana gelir. Temas halinde bulunan yüzeyler birbirlerini pürüzlü noktalarda etkiler. Gerçek temas alanı çok küçük olduğu için yüzeylere uygulanan yükün etkisi ile temas eden yüzeylerde temas artar. Temas halindeki pürüzler yükü taşıyamayacak olduklarında akma sınırı geçilir ve plastik deformasyon oluşur. Uygulanan yük yüzeyler arasındaki yağ tabakasını koparır ve küçük temas noktaları oluşur.

Moleküller temas noktalarında kaynak bağları oluştururlar. Kayma devam ettiğinde oluşan bağ kırılır, yüzeylerin birinde boşluklar diğer yüzeyde ise çıkıntılar ve yapışkan parçalar yüzeylerin aşınmasına sebep olur [15,56,59,62].



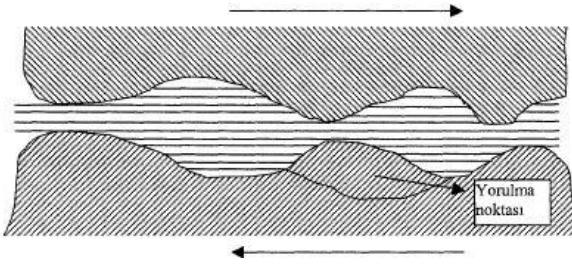
Şekil 5.2. Adhesiv aşınmanın şematik gösterimi, a) iki çıkıntının buluşması ve bağ oluşumu, b) bağın koparak bir yüzeyden diğerine malzeme transferi, c) uzamış olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntı ile etkileşimi sonucunda kırıntı oluşumu [15]

5.2.2. Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma yükün ve hareketin etkisi ile, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüz veya taneler aracılığıyla diğer cismin yüzeyini çizmesi sonucu talaş kaldırması mekanizmasıdır. İki veya üç elemanlı olarak gerçekleşir. Sürtünen cisimlerin karşılıklı etkileşimleri sonucu meydana gelen aşınma iki elemanlı, ara yüzeyde bulunan sert tanelerin sürtünen cisimleri çizmesi sonucu meydana gelen aşınma ise üç elemanlı aşınmadır [63].

5.2.3. Yorulma aşınması

Makine parçaları tekrar eden sürekli ve değişmekte olan yüklere maruz kaldıklarında yüzeylerinin hemen altında yorulma çatlakları meydana gelir. Bu çatlaklar zaman ile ilerler ve malzeme yüzeyinden parçacık kopmasına neden olurlar. Genelde dişli çarklar, rulmanlar ve kamlar gibi makine elemanlarında yuvarlanma hareketi gerçekleştiren parçaların yüzeyinde oluşur [15,56,62].



Şekil 5.3. Yorulma aşınması

5.2.4. Korozyon aşınması

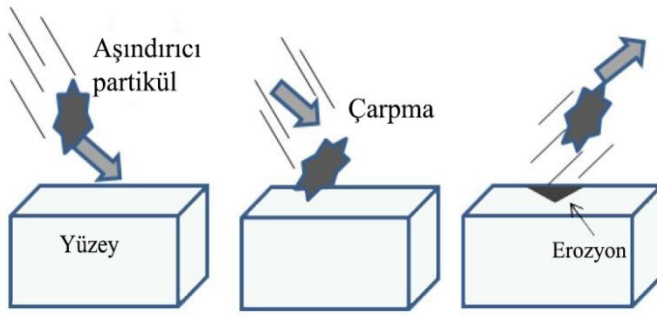
Metaller içerdikleri oksit tabakası sayesinde korozif ortamlara karşı dirençlidirler. Metal yüzeyine aşındırıcı ortamın tekrar eden darbelerinin etkisi sonucu oksit tabakası kırılabilir. Tekrar eden darbeler nedeniyle koruyucu tabakayı oluşturan elementler tükenir ve yeni tabaka oluşmaz. Sonuçta metal yüzeyi korumasız kalır ve korozyon aşınması oluşur [59,62]. Aşınma iki basamakta gerçekleşir:

- Temas eden yüzeyler ortam ile reaksiyona girer, reaksiyon ürünleri yüzey üzerinde tabaka oluşturur,
- Temas noktalarında çatlak oluşumu ya da abrasiv etkenlerden kaynaklı olarak reaksiyon tabakası hasara uğrar [64].

5.2.5. Erozyon aşınması

Erozyon aşınması; akışkan bir ortamdaki parçacıkların yüksek hızlar ile katı yüzeyine çarpması, hareket halindeki sıvı damlaların yüksek hızlar ile katı yüzeyine çarparak şok dalgası ile tahribat oluşturmaları, yüksek hızla hareket eden katının kendisinden daha yavaş su damlalarına tekrarlı olarak çarpması ya da gaz kabarcıklarının yüksek bir basınç ile malzeme yüzeyine çarpması şeklinde farklı yollarla meydana gelebilir [62].

Erozyon aşınma mekanizmasını aşındırıcı partikülün büyüklüğü, şekli, hızı ve çarpma açısı etkiler [15].



Şekil 5.4. Erozyon aşınması [59]

5.3. Aşınma Testleri ve Ölçüm Yöntemleri

Aşınma mekanizmaları birbirinden farklı olduğundan aşınma testleri de farklılık gösterebilmektedir. Bu yüzden çok sayıda aşınma testi bulunmaktadır. Çizelge 5.1’de bazı aşınma mekanizmaları ve simüle ettiği test verilmiştir [61].

Çizelge 5.1. Tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve aşınma mekanizmaları [61]

Test	Simüle Edilen Test	Aşınma Mekanizması
Pin-on-disk	Kayma aşınması	Abrasiv aşınma
Blok-on-ring	Kayma aşınması	Adhesiv aşınma
Disk-on-disk	Yuvarlanma-kayma aşınması	Temas yorulması-adezyon
4 Top	Yuvarlanma aşınması	Temas yorulması
PAT	Yüksek baskı abrazyon	Abrasiv aşınma
Kuru-kum, kauçuk lastik	Düşük baskı abrazyon	Abrasiv aşınma

Ağırlık farkı yöntemi

Aşınma testine tabi tutulacak numunenin deneyden önce ağırlığı tartılarak not edilir. Aşınma testi gerçekleştirildikten sonra numune ağırlığı tekrar tartılır. Bu şekilde ağırlık kaybının değerinin belirlenmesinde 10^{-3} , 10^{-4} g hassasiyetinde bir terazi kullanılır. TS 555 standartlarında verilen aşağıdaki eşitlik kullanılarak aşınma davranışı hakkında bilgi sahibi olunur [56,59].

$$V = \frac{m_i - m_s}{2\pi R d n F m p} \quad (5.1)$$

Burada;

V: Özgöl aşınma (cm³/N.m)

m_i: Deney öncesi ağırlık (g)

m_s: Deney sonrası ağırlık (g)

R_d: Disk çapı (m)

F_m: Ortalama sürtünme kuvveti (N)

n: Devir sayısı

p: yoğunluk (g/cm³)

Kalınlık farkı yöntemi

Aşınma testi yapılmadan ve yapıldıktan sonra numune kalınlığı ölçülür, kalınlık farkı değerinden hacimsel kayıp değeri ve birim hacimde aşınma miktarı belirlenir. Kalınlık ölçümleri mikro metre gibi hassas ölçüm aletleri kullanılarak ölçülmelidir [56,59]

Uzunluk ölçüm yöntemi

Mikro metre yardımıyla aşınma testi öncesi ve sonrasında boyut veya yüzeydeki değişim ölçülür. Daha çok aşınma dağılımını ölçmek için kullanılır. Ölçüm sonucu alınan veriler deformasyon nedeniyle oluşan boyut değişikliklerini kapsadığından yaygın olarak kullanılmayan bir yöntemdir [59].

İz değişimi yöntemi

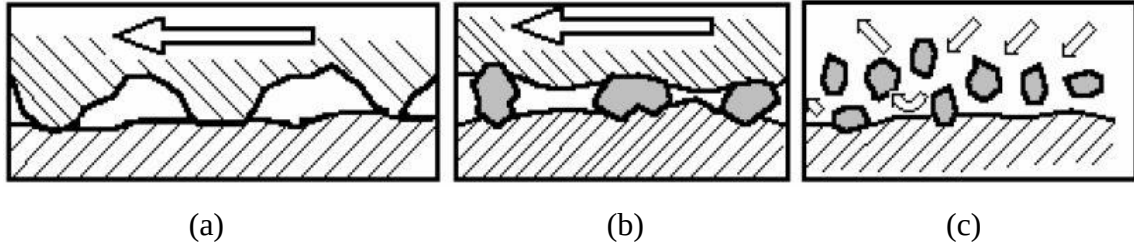
İz değişimi yönteminde sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon ile geometrik şekli belli olan bir iz oluşturulur. Deney süresince bu izin karakteristik bir boyutunun değişimi ölçülür. İz bırakıcı olarak en çok Vickers ve Brinell sertlik uçları kullanılır. Bu uçların bıraktığı iz boyutundaki değişim mikroskop ile ölçülür [15].

6. ABRASİV AŞINMA

6.1. Abrasiv Aşınmanın Tanımı

Temas halinde hareket eden yüzeylerden biri diğerine göre daha sert olduğu bir durumda ya da temas bölgesinde sert partiküller bulunduğunda abrasiv aşınma meydana gelir. Temelde iki faktör abrasiv aşınmayı tetiklemektedir. Birincisi aşındırıcı partikül ve metal yüzeyi arasında sertliğin farklı olması, ikincisi ise basınçtır.

İki elemanlı, üç elemanlı ve erozyon aşınması şeklinde üç farklı abrasiv aşınma türü vardır. İki elemanlı abrasiv aşınmada, pürüzlü bir yüzey hareket ettiğinde ya da aşındırıcı tanelerin hareketiyle malzeme yüzeyinden parçacık kaldırılması gerçekleşir. Sert ve pürüzlü yüzey kendisine göre daha yumuşak bir yüzey ile temas ettiğinde basıncın etkisi ile yumuşak malzeme yüzeyinde çizilme ve parçacıkların kopması ile deformasyon oluşur. Üç elemanlı abrasiv aşınmada, etkileşimde olan iki yüzey arasında kayma ve yuvarlanma hareketi yapan aşındırıcı tanenin malzeme yüzeyinden parçacık kaldırması ile gerçekleşir. Erozyon ile abrasiv aşınma ise serbest şekilde akan tanelerin yüzeyden parçacık kaldırmasıdır (Şekil 6.1) [65,66].



Şekil 6.1. Abrasiv aşınma mekanizmaları, a) iki elemanlı, b) üç elemanlı, c) erozyon

Malzemelerin abrasiv aşınma davranışı birçok faktör etkileyebilir. Bunlar:

- Kırılma tokluğu
- Takviye tipi
- Takviye boyutu
- Takviye hacim oranı
- Matris malzemesi
- Aşındırıcı tipi
- Aşındırıcı boyutu
- Yük [67]

Kırılma tokluğu

Aşınma hızı ve mekanizmasını etkileyen parametrelerden biri takviye ya da kompozit malzemenin kırılma tokluğudur. Hornbogen'e göre azalan kırılma tokluğu aşınma hızının artmasına neden olur. Malzemenin gevrek olarak kırılması yüksek aşınma hızına neden olur. Lee ve arkadaşları takviye fazı ile matris arasındaki ara yüzey bağ özelliklerinin kompozitin kırılma tokluğunu ve aşınma hızını etkilediği sonucuna varmışlardır [68].

Takviye tipi

Bhansali ve Mehrabian yaptıkları çalışmada SiC ve Al₂O₃ ile takviye edilen 2024 ve 2014 alüminyum alaşımlarının abrasiv aşınma davranışını incelemişler ve Al₂O₃ ile takviye edilen kompozit malzemenin daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu bulmuşlardır. Bunun sebebi de Al₂O₃ takviye elemanının matris ile daha güçlü bir bağ oluşturmasıdır. Ek olarak ince olan partiküllere göre daha iri olan Al₂O₃ takviyesinin daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Takviye oranı arttıkça aşınmaya karşı olan dirençte artmıştır [69].

Takviye boyutu

Yapılan araştırmaların çoğunda yük ve aşındırıcı gritin boyutuna bağlı olarak takviye boyutunun artması, Al₂O₃ ya da SiC takviyeli Al kompozitlerin abrasiv aşınma sonucu ağırlık kaybının azaldığını belirlemiştir.

Takviye hacim oranı

Literatür incelendiğinde, sert fazların miktarının ve tane boyutunun artması ile aşınma oranının arttığı görülmektedir. Zhang ve Alpas yaptıkları çalışmada, % 20 Al₂O₃-Al6061 kompozitini, takviyesiz Al6061 alaşımı ile karşılaştırmış ve kritik yük değerinin yükseldiğini tespit etmişlerdir [70].

Al₂O₃ veya SiC takviyeli Al matrisli kompozitlerde takviye hacim oranının artması ile aşınma direncinin arttığı yapılan birçok incelemede görülmüştür. Axen ve arkadaşları %0-30 hacim oranlarında Al₂O₃ fiber takviyeli Al kompozitin aşınma davranışına takviye

hacim oranının etkisini incelemiş ve hacim oranı arttıkça kompozit malzemenin aşınma direncinde iyileşme olduğunu bildirmişlerdir [71].

Matris malzemesi

Kompozit malzemelerin abrasiv aşınma dirençlerine takviye elemanının etkisi kadar matrisin sertliği de etki etmektedir. Sertlik bir malzemenin sert bir ucun batmasına karşı gösterdiği dirençtir. Matrisin sertliği abrasiv aşındırıcıların batma derinliğini azaltır ve uygulanan yüke karşı destek sağlar. Imbeni ve arkadaşlarının çalışmalarına göre % 20 Al_2O_3 takviye edilmiş daha sert 2014 Al kompozit malzemenin, % 17 Al_2O_3 takviye edilmiş 6061 Al kompozit malzemesine kıyasla daha düşük aşınma hızı göstermiştir [72].

Aşındırıcı tipi

Sert abrasiv gritler küçük takviye parçacıklarını yerinden çıkartırken iri takviyeleri ise kırar. Yumuşak abrasiv gritler ince takviye parçacıklarını yerinden çıkartırken iri takviyelere etkisi ise matris ile takviye parçacığının oluşturduğu bağ dayanımına bağlıdır. Güçlü bir bağ var ise yumuşak olan abrasiv grit körleşir. Zayıf bir bağ var ise yumuşak abrasiv grit iri takviye partiküllerini yerinden çıkartır [27].

Aşındırıcı boyutu

Abrasiv grit boyutunun artması her bir abrasiv tane üzerine düşen gerilmenin artmasına ve daha fazla malzeme kaybına yol açar. İnce olan abrasiv aşındırıcılar birim alan başına daha çok temas noktasına sahipken, kaba aşındırıcılar daha az temas noktasına ve bundan dolayı da her bir temas noktasında daha yüksek basınca neden olur [73].

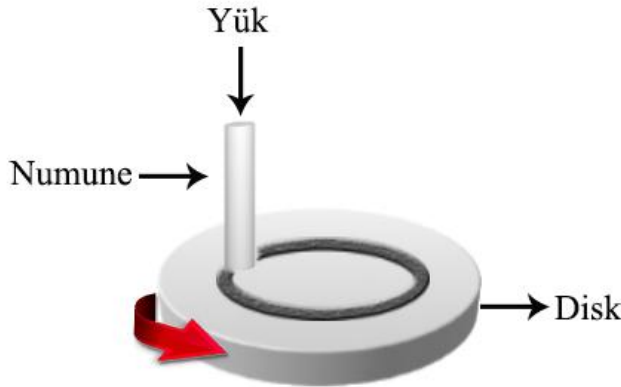
Yük

Abrasiv aşınma davranışının belirlemesinde matematiksel açıdan ilk ifade Archard denklemi olmuştur. Buna göre hacim kaybı uygulanan yük ile doğru orantılı, aşındırılacak malzemenin sertliği ile ters orantılı olacak şekilde değişmektedir [27].

Mondal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Al matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemenin abrasiv aşınma davranışını incelemiş, aşındırıcı boyut ve uygulanan yükün aşınma oranına etkisini karşılaştırmışlar ve uygulanan yükün alaşım veya kompozit malzemenin aşınma davranışını etkileyen en önemli parametre olduğu sonucuna varmışlardır [67].

6.2. Pin-on-disk Yöntemi İle Abrasiv Aşınma Davranışının Belirlenmesi

Pin-on-disk yöntemi ASTM G99-05'te belirtildiği gibi, malzemenin aşınma davranışlarını belirlemek amacıyla, belirli çap ve kalınlıkta aşındırıcı disk üzerinde, pim şeklinde hazırlanmış olan numunenin, yük, dönme hızı ve yarıçapı, mesafe gibi parametrelere bağlı olarak temas etmesi şeklinde uygulanır (Şekil 6.2). Deney sonucunda bilgisayar kontrollü sistem sayesinde alınan verilerden grafik yardımıyla numunenin aşınma davranışı hakkında bilgi sahibi olunabilir [59].



Şekil 6.2. Pin-on-disk yöntemi şematik gösterimi

Pin-on-disk deneylerinde kuvvet ve aşınma miktarı belirli bir mesafe boyunca ve süresince kayıt edilir ve bu verilerden yola çıkarak sürtünme katsayısı ve aşınma oranları hesaplanır. Sürtünme kuvveti anlık olarak okunabilirken, ağırlık kaybı deney öncesi ölçülen tartım ile deney sonrası ölçülen tartım arasındaki fark alınarak hesaplanır [61].

H.Sharifi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; basınçsız infiltrasyon yöntemiyle Al-Mg/ Al_2O_3 ve Al-Mg/SiC- Al_2O_3 kompozit malzemeleri üretmişler ve Pin-on-disk metoduyla aşınma davranışını incelemişlerdir. 6,5, 18 ve 30 N yüklerde, 0,16 m/s hızda ve toplam kayma mesafesi 1000 m olacak şekilde yürüttükleri testler sonucunda Al_2O_3 takviyeli

kompozit SiC- Al_2O_3 takviyeli kompozite göre daha iyi aşınma özellikleri gösterdiğini bulmuşlardır [74].

Pramanik yaptığı çalışmada 6-18 μm boyutlarında düzensiz şekilli Al_2O_3 takviyeli ve 6061 Al matrisli kompozit malzemeyi soğutmalı döküm ve sıcak ekstrüzyon ile üretmiştir. Pin-on-disk yöntemiyle aşınma testini parametrelerin etkisini görebilmek amacıyla iki aşamada gerçekleştirmiştir. Çelik disk 2 km mesafeden sonra aşınmıştır. Birinci aşamada aşındırıcı çelik disk 2 km kayma mesafesinde aşındırılmadan önce ve ikinci aşama ise 2 km'den sonra aşınmış disk ile test yapmıştır. Sonuç olarak MMK'lar için kayma mesafesi ile aşınma arasında doğrusal bir ilişki bulmuştur. 2 km'den sonra aşınma ve mesafe doğrusal olarak artmıştır. Ayrıca kayma hızlarını karşılaştırmış ve 600 dev/dak'a kadar olan hızlarda kayma hızının artmasıyla aşınma oranının arttığını daha sonra ise oksitlenmeden dolayı, 760 dev/dak'da aşınma oranının hafifçe düştüğünü ve 1480 dev/dak'da aşınma oranının 30 kat arttığını bildirmiştir [75].

Abouelmagd yapmış olduğu çalışmada yüksek enerjili atritörde MA, soğuk sıkıştırma ve sonrasında 500 °C'de sıcak ekstrüzyon ile Al + %1,5 Al_2O_3 ve Al + %1,5 Al_2O_3 + % 4-12 Al_4C_3 kompozit malzemelerini üretmiştir. Pin-on-disk yöntemiyle 5,10,15,20 N yüklerde, 1,09-1,64-2,18-3,27 m/s hızlarda ve 200 m mesafede abrasiv aşınma testlerini gerçekleştirmiştir. Tüm kayma hızlarında en yüksek aşınma direncinin Al + %1,5 Al_2O_3 + % 4 Al_4C_3 kompozitinin sahip olduğunu bildirmiştir [76].



7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Malzeme

Bu çalışmada çeşitli oranlarda (% 5,10 ve 15) Al_2O_3 takviye edilerek Al matrisli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiş ve aşınma davranışı incelenmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan atomize Al tozu ECKA Granule firmasından temin edilmiş olup; % 99,7 saflıkta ve toz tane boyutu 160 μm altıdır. Al tozunun kompozisyonu Çizelge 7.1’de verilmiştir. Takviye elemanı olarak ise 32 μm altı boyutta ve saflığı % 99,52 olan Al_2O_3 tozu kullanılmıştır.

Çizelge 7.1. Kullanılan Al tozunun kimyasal kompozisyonu

Al	Fe	Si	Zn	Mn	Ti	Cu	Mg
99,7	0,25	0,2	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen uygulamalar; tozların tartılması, mekanik karıştırma ile kompozit tozların üretimi, sıcak presleme ile parça üretimi, yoğunluk ölçümleri, metalografik çalışmalar, sertlik ölçümleri, SEM ve aşınma testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan cihazlar ve mekânlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcak presleme ile üretilen parçalardan aşınma numunelerinin tel erezyon ile kesilmesi işlemi Ankara Ostimde bulunan Yalçinkaya CNC Makine Kalıp San. Ltd. şirketinde gerçekleştirilmiştir. Toz tane boyut ölçümü ise Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarında yapılmıştır.

7.2. Karışım Tozların Eldesi

Bu çalışmada Al ve Al_2O_3 tozları önceden hesaplanan miktarlarda tartılarak birbiri içerisinde homojen dağılımın sağlanması amacıyla SZEGVARI marka yüksek enerjili atritörde (Resim 7.1) mekanik karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma işleminde alüminyum tozun bilyelere, atritör kazanı iç yüzeyine ve karıştırıcı kollara sıvanmasını önlemek üzere ağırlıkça % 1,5 oranında çinko stearat ($Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$) yağlayıcı karışım toza eklenmiştir. Matris yapıyı oluşturacak alüminyum ile takviye elemanı olarak kullanılan alüminanın bir biri içerisindeki tam ve homojen karışımını sağlamak için ortama

karışım toz bilye oranı ağırlıkça 1:10 olmak üzere 12 mm çapta 500 g çelik bilye eklenmiştir. Karıştırılan malzeme ve karıştırma parametreleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

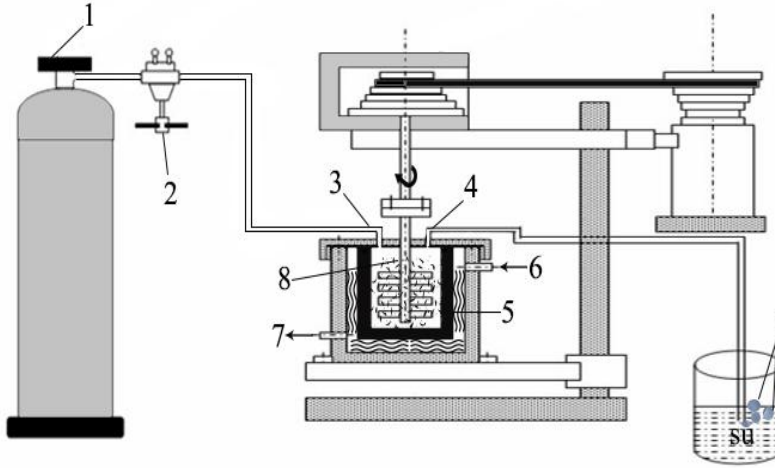
Çizelge 7.2. Karışım toz malzeme ve yüksek enerjili atritörde karıştırma parametreleri

Karışım Malzeme Kompozisyonu		Karıştırma Hızı (dev/dak)	Karıştırma Süresi (saat)	Bilye Çapı (mm)	Koruyucu Ortam
Al	Al ₂ O ₃	400	2	12	Azot
% 95	% 5				
47,5 g	2,5 g				
Al	Al ₂ O ₃	400	2	12	Azot
% 90	% 10				
45 g	5 g				
Al	Al ₂ O ₃	400	2	12	Azot
% 85	% 15				
42,5 g	7,5 g				



Resim 7.1. Yüksek enerjili atritör

Şematik olarak Şekil 7.1’de verilen mekanik karıştırma (MK) düzeneğinde, yapılan karıştırma işlemi sırasında ortamdaki istem dışı sıcaklık artışını önlemek amacıyla sistem sürekli olarak su ile soğutulmuştur. Ayrıca alüminyum tozun oksitlenmesini engellemek için karıştırma tankı içerisinden sürekli olarak azot gazı geçirilmiştir.



Şekil 7.1. Yüksek enerjili atritör ile mekanik karıştırma düzeneği 1. Gaz tüpü 2. Manometre 3. Gaz girişi 4. Gaz çıkışı 5. Karıştırma tankı 6. Su girişi 7. Su çıkışı 8. Dönen karıştırıcı kollar 9. Gaz geçiş kontrolü yapılan su dolu kap

7.3. Karışım Tozların Karakterizasyonu

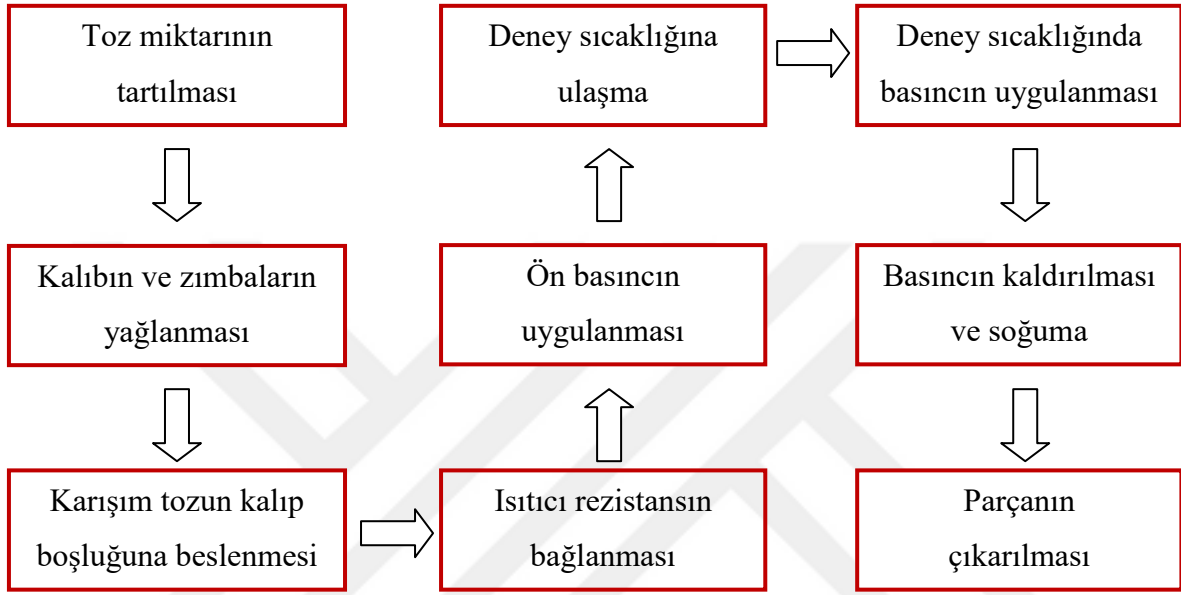
MK işleminin, karışım tozun toz tane boyutu dağılımı üzerine olan etkilerini görebilmek için her bir farklı karışım tozdan alınan numunelerden Malvern Mastersizer E Version 1.2b cihazında toz tane boyut ve dağılımı ölçümü gerçekleştirilmiştir.

MK sonrası tozların parçacık morfolojisinin incelenebilmesi amacıyla bir miktar toz soğuk olarak reçineye gömülüp, daha sonra 800 ve 1200 μm zımpara ile zımparalanmış ve 6;3;1 mikronluk elmas solüsyon kullanılarak parlatma işlemi sonrası optik mikroskopta alınan görüntüler üzerinden gerekli incelemeler yapılmıştır.

7.4. Karışım Tozlardan Sıcak Presleme ile Blok Malzeme Üretimi

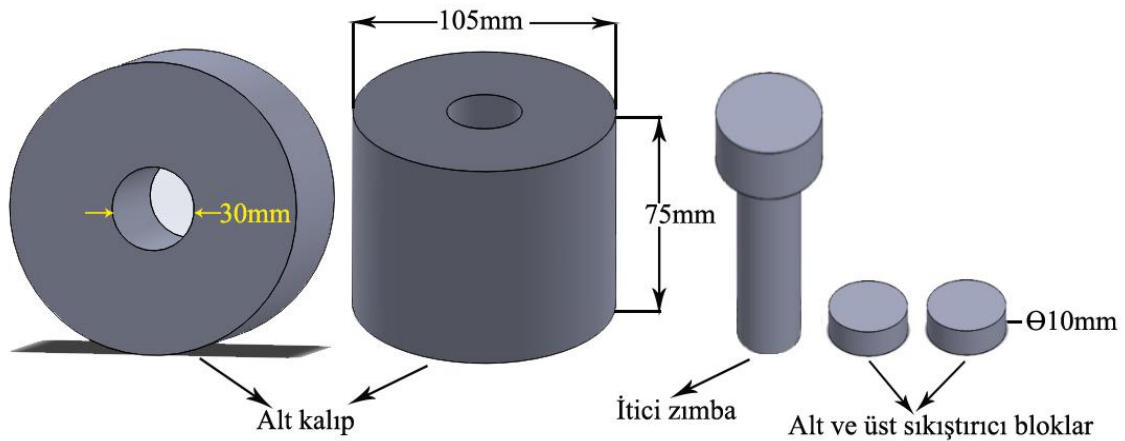
Sıcak presleme ile üretilmek istenen kompozit toz metal blok parçalar için gerekli toz miktarlarının tartımları 0,1 mg hassasiyette ölçüm yapabilen dijital terazide yapılmıştır. Hassas olarak önceden belirlenen miktarlarda tartımı yapılan alüminyum ve karışım tozlar

silindirik kalıp içerisinde tek yönlü sıkıştırma ile sıcak presleme işlemine tabi tutularak toz metal parçalar üretilmiştir. Sıcak presleme işlemi için gerçekleştirilen uygulamalar akım şeması şeklinde Şekil 7.2’de görülmektedir. Sıcak presleme Şekil 7.3’te şematik olarak verilen kalıpta gerçekleştirilmiştir. Çizelge 7.3’te ise sıcak presleme parametreleri verilmiştir.



Şekil 7.2. Sıcak presleme işlem sırası

Alüminyum ve karışım tozlardan elde edilen kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin ve aşınma davranışının kompozisyona bağlı değişimi ortaya koyabilmek için bütün toz metal blok malzemelerin sıcak presleme ile üretim parametreleri aynı tutulmuştur.



Şekil 7.3. Preslemede kullanılan kalıp ve zimba detayları

Boy 18 mm ve çapı 30 mm olan silindirik parçaların üretimi için kalıp içerisine beslenecek toz miktarı % 5, 10 ve 15 Al₂O₃ takviyeleri için ayrı ayrı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Numune hacmi: } V = \pi r^2 \times h = 3,14 \times 225 \times 18 = 12,717 \text{ cm}^3 \quad (7.1)$$

% 5 Al₂O₃ + % 95 Al için;

$$\text{Bileşik yoğunluk: } \rho = (\rho_1 \times \% \text{ ağırlık}) + (\rho_2 \times \% \text{ ağırlık}) \quad (7.2)$$

$$\rho = (3,98 \times 0,05) + (2,70 \times 0,95) = 2,764 \text{ g/cm}^3$$

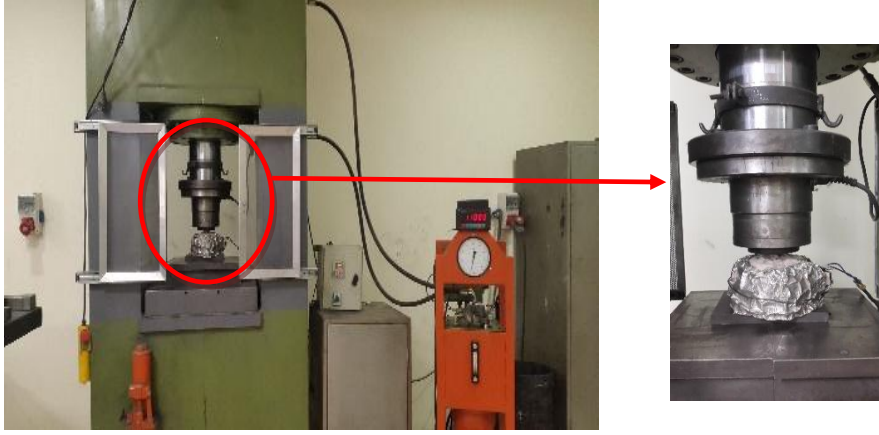
$$\text{Kalıp içerisine konulacak toz ağırlığı: } W = \rho \times V = 2,764 \times 12,717 = 35,14 \text{ g} \quad (7.3)$$

olarak belirlenmiş olup, % 10 ve % 15 Al₂O₃ içeren karışım tozların miktarının tespiti de benzer şekilde yapılmıştır.

Uygulamalarda üretilen Al blok parçalar kompozit malzemelerle mekanik özellikler ve aşınma davranışı bakımından karşılaştırma yapabilmek amacıyla üretilmiştir. Sıcak preslemenin yapıldığı hidrolik pres Resim 7.2’de verilmiştir.

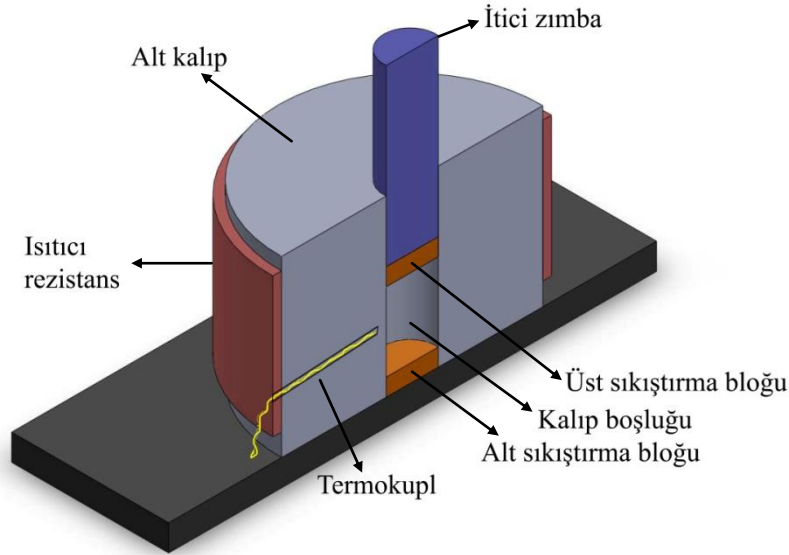
Çizelge 7.3. Sıcak presleme parametreleri

Malzeme	Toz miktarı (g)	Bileşik Yoğunluk (g/cm ³)	Ön yükleme (MPa)	Deney sıcaklığı (°C)	Basınç (MPa)	Süre (dk)
%5 Al ₂ O ₃ + Al	35	2,764	70	580	400	60
%10 Al ₂ O ₃ + Al	36	2,828	70	580	400	60
%15 Al ₂ O ₃ + Al	37	2,892	70	580	400	60
Saf Al	40	2,70	70	580	400	60

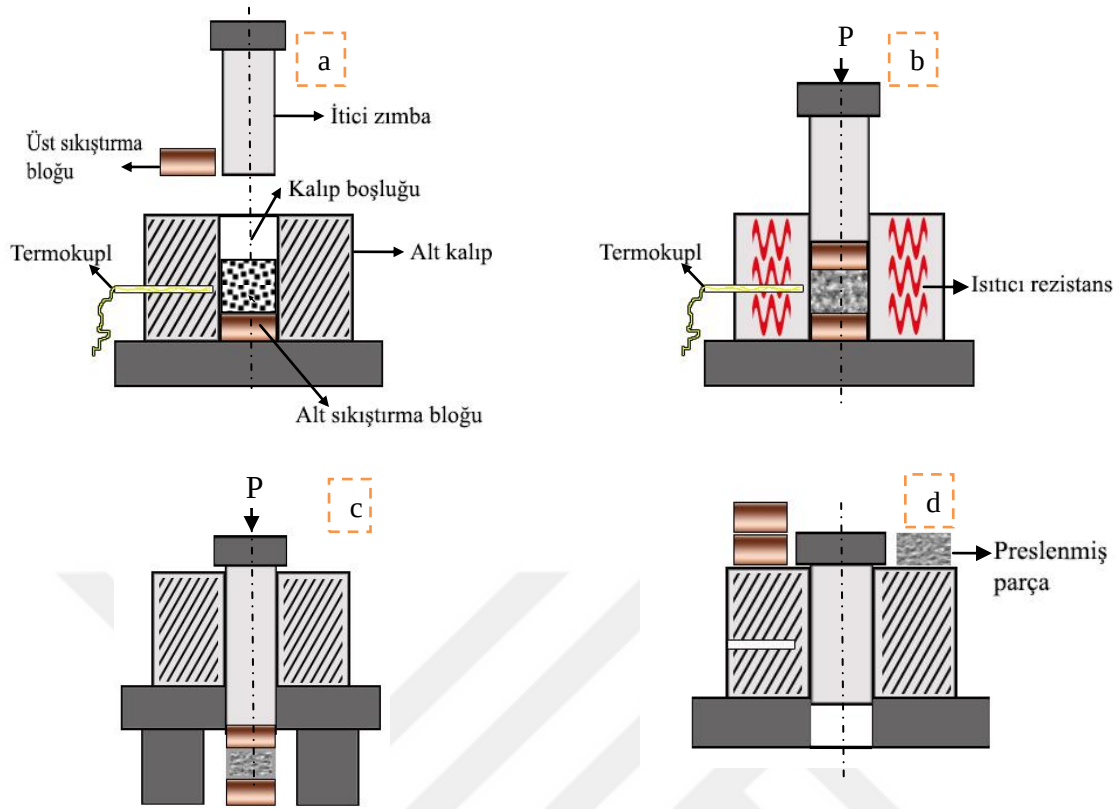


Resim 7.2. Hidrolik pres

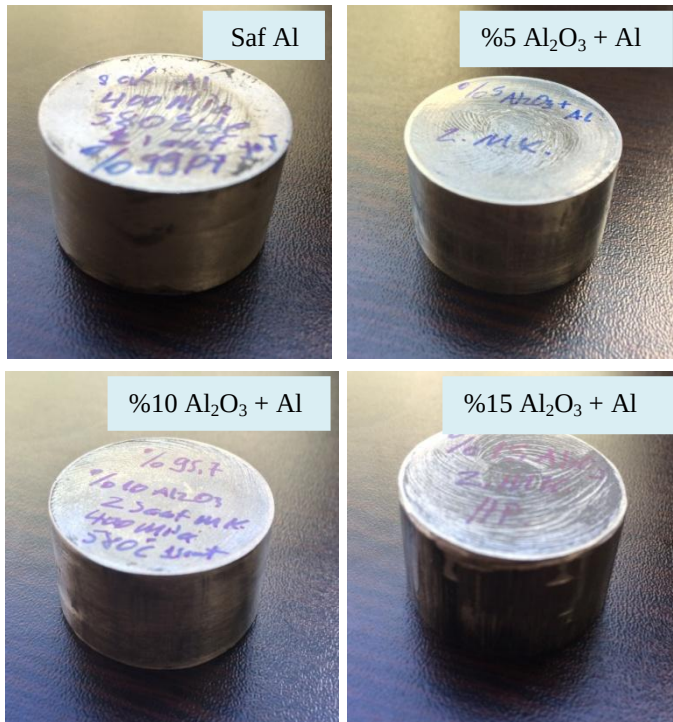
Kalıp içerisine toz beslemeden önce kalıp duvarları, alt ve üst zımba kenarları ve yüzeyleri MOLYKOTE G-n Plus Paste marka sıcak yağlayıcı ile yağlanmıştır. Sıcak presleme işleminde kalıbın, zımbaların ve ısıtıcı rezistansın yerleşimi Şekil 7.4'teki gibidir. Sistem kurulduktan sonra presleme işlemi gerçekleştirilir. Presleme aşamaları Şekil 7.5'te gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Sıcak preslemede kalıp yerleşimi kesit görünüşü



Şekil 7.5. Sıcak presleme aşamaları a) tozun beslenmesi, b) sıcaklığın ve basıncın uygulanması, c ve d) parçanın çıkarılması



Resim 7.3. Sıcak preslemeyle üretilen blok parçalar

7.5. Yoğunlukların Ölçümü

Üretilen 4 adet numunenin yoğunluk ölçümleri 0,1 mg hassasiyette ölçüm yapabilen Sartorius marka terazide yoğunluk kiti kullanılarak Arşimet prensibine göre yapılmıştır. (Resim 7.4).



Resim 7.4. Yoğunluk kiti yerleştirilmiş hassas terazi

Yoğunluk kiti kullanılarak yapılan yoğunluk ölçümünde işlem basamakları:

- Cam beher kap su ile doldurulur, numune askısı takılır ve terazinin darası alınır,
- Numune, askının üst kefesine yerleştirilerek havadaki ağırlığı tartılır $W(a)$,
- Numune üst kefedeki terazinin darası alınır,
- Numune, askının alt kefesine yerleştirilir ve sudaki ağırlığı tartılır G ,
- Numunenin özgül ağırlık (γ) değeri aşağıdaki formül ile bulunur. Rho katsayısı suyun sıcaklığına göre katalogdan bulunur.

$$\gamma = \frac{W(a)}{G} \times Rho \quad (7.4)$$

- Bulunan değer numunenin teorik yoğunluğuna bölünerek gerçek yoğunluk hesaplanır.

7.6. Aşınma Numunelerinin Kesilmesi

Aşınma testleri için numunelerin ASTM G99-05'e uygun olarak hazırlanması amacıyla, 30 mm çapında üretilen her bir blok parçadan 8 mm çapında 4'er adet numune tel erozyon

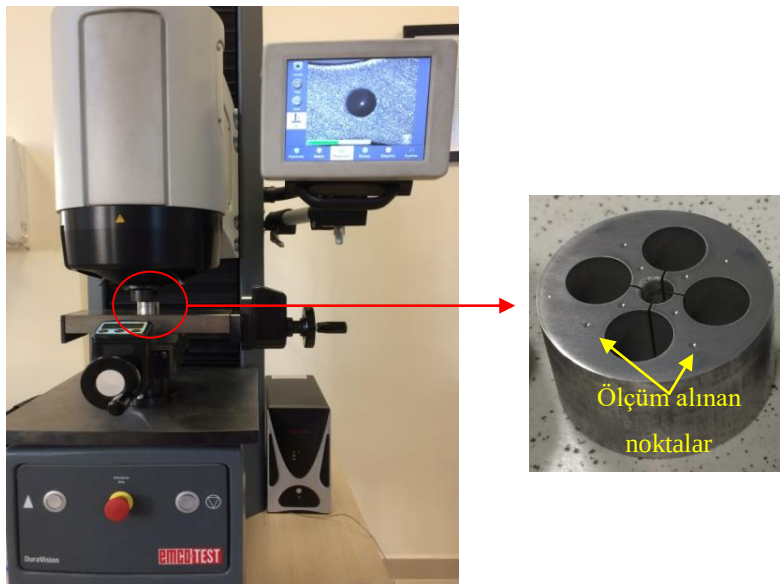
cihazında kesilmiştir. Tel erozyon ile kesimin yapılabilmesi için parçaların ortalarına delik delinmiştir. Telin bu deliklerden girmesi sağlanmış ve her bir parçanın kesim işlemi gerçekleştirilerek 8 mm çapta ve 18 mm boyunda toplam 16 adet numune kesimi yapılmıştır.



Resim 7.5. Tel erozyon ile kesilmiş aşınma test numuneleri

7.7. Sertlik Ölçümleri

Tel erozyonda kesim yapıldıktan sonra parça yüzeylerindeki oksit tabakası kademeli bir şekilde zımparalanarak giderilmiştir. Daha sonra Brinell sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak her bir parçadan 4'er ölçüm yapıp ortalama değerleri malzemenin sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Brinell sertlik ölçümünde Resim 7.6'da verilen Duravision 2000 EmcoTest Sertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri 31,25 kgf yük altında ve 2,5 mm çapında tungstenkarbür standart bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 7.6. Sertlik ölçüm cihazı

7.8. Metalografik İnceleme

Üretilen farklı kompozisyondaki numunelerin optik ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri alınarak kompozit malzemedeki sinterleşme ve takviye elemanı partiküllerinin matris yapı içerisindeki dağılımı incelenmiştir.

Kompozit parçalardan alınan numuneler bakalit içerisine gömülerek kademeli olarak 220, 320, 800 ve 1200 μm zımpara ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından kademeli olarak 6;3;1 mikronluk elmas solüsyon ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma sonrası numune yüzeylerinden dağlanmadan önce JEOL JEM 6060 LV SEM mikroskobunda görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır.

Numunelerin optik mikroskopta mikroyapı incelemeleri öncesi yüzeyleri parlatılan numuneler Kellers reaktifi ile 10 saniye süreyle dağlanmıştır. Çizelge 7.4'te Kellers reaktifinin kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 7.4. Kellers dağlayıcısının kompozisyonu

Dağlayıcı Kompozisyonu	Karışım Oranı
H ₂ O	95 ml
HNO ₃	2,5 ml
HCl	1,5 ml
HF	1 ml

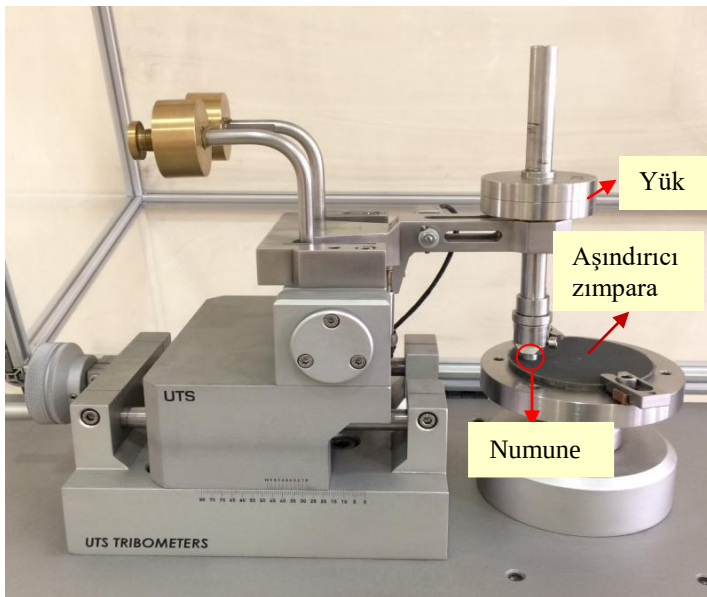
Dağlama sonrası numunelerin mikroyapı görüntüleri Resim 7.7'de verilen LEICA DMI 5000M mikroskobu kullanılarak çeşitli büyütme oranlarında farklı bölgelerden alınmıştır.



Resim 7.7. Leica DMI 5000M optik mikroskop

7.9. Aşınma Testi

Aşınma testinde Pin-on-disk yöntemi kullanılmıştır. Pin-on-disk aşınma testi için ASTM G99-05'e uygun olarak 8 mm çapında numuneler hazırlanmıştır. Aşınma testinden önce oksit tabakasının giderilmesi için numune yüzeyleri zımparalanmıştır. Aşınma testleri TRIBOMETER T10/20 aşınma cihazında yapılmıştır (Resim 7.8). Aşınma testi öncesinde ve sonrasında hassas terazide numune ağırlıklıları tartılarak ağırlık kayıpları miligram cinsinden belirlenmiştir.



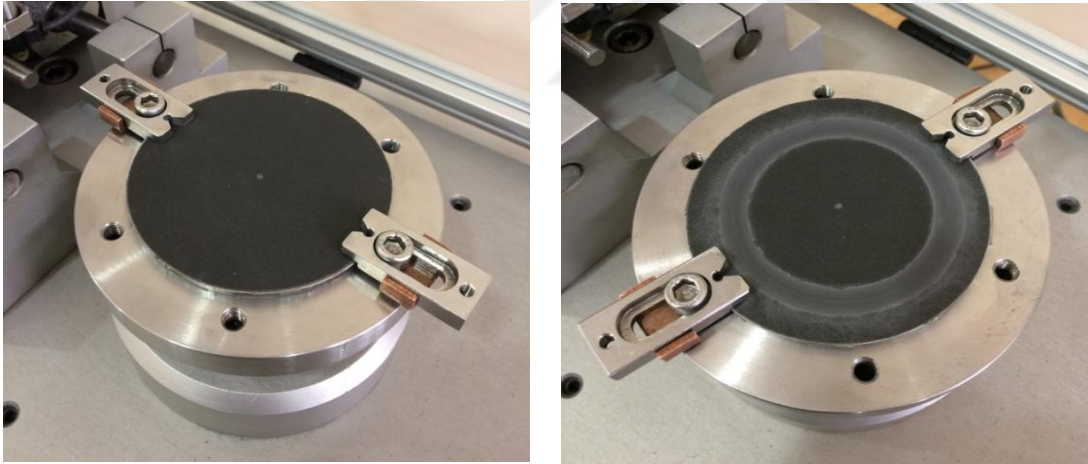
Resim 7.8. Tribometer T10/20 aşınma test cihazı

Çizelge 7.5’de aşınma testinde kullanılan parametreler verilmiştir. Sabit kayma hızı ve aşındırma mesafesi, farklı yükler ve farklı abrasiv aşındırıcı zımpara yüzeyleri kullanılmıştır.

Çizelge 7.5. Aşınma testi parametreleri

Malzeme Kompozisyonu	Kullanılan Yükler (N)	Abrasiv Aşındırıcı Numarası	Kayma Hızı (m/s)	Mesafe (m)
Saf Al	2, 4, 6, 8	320, 400, 600	0,73	200
% 5 Al ₂ O ₃ +Al	2, 4, 6, 8	320, 400, 600		
% 10 Al ₂ O ₃ +Al	2, 4, 6, 8	320, 400, 600		
% 15 Al ₂ O ₃ +Al	2, 4, 6, 8	320, 400, 600		

Her numuneden 4 farklı yük altında ve 3 farklı abrasiv aşındırıcı kullanılarak 12 deney gerçekleştirilmiştir. Toplamda 48 deney yapılmıştır. Her deney yeni bir abrasiv aşındırıcı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hardox 500 çeliğinden yapılmış disk üzerine çift taraflı bant kullanılarak abrasiv aşındırıcı zımparalar yapıştırılmıştır (Resim 7.9). Aşınma testi sonrası, aşınma yüzeylerinin karakterizasyonu elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

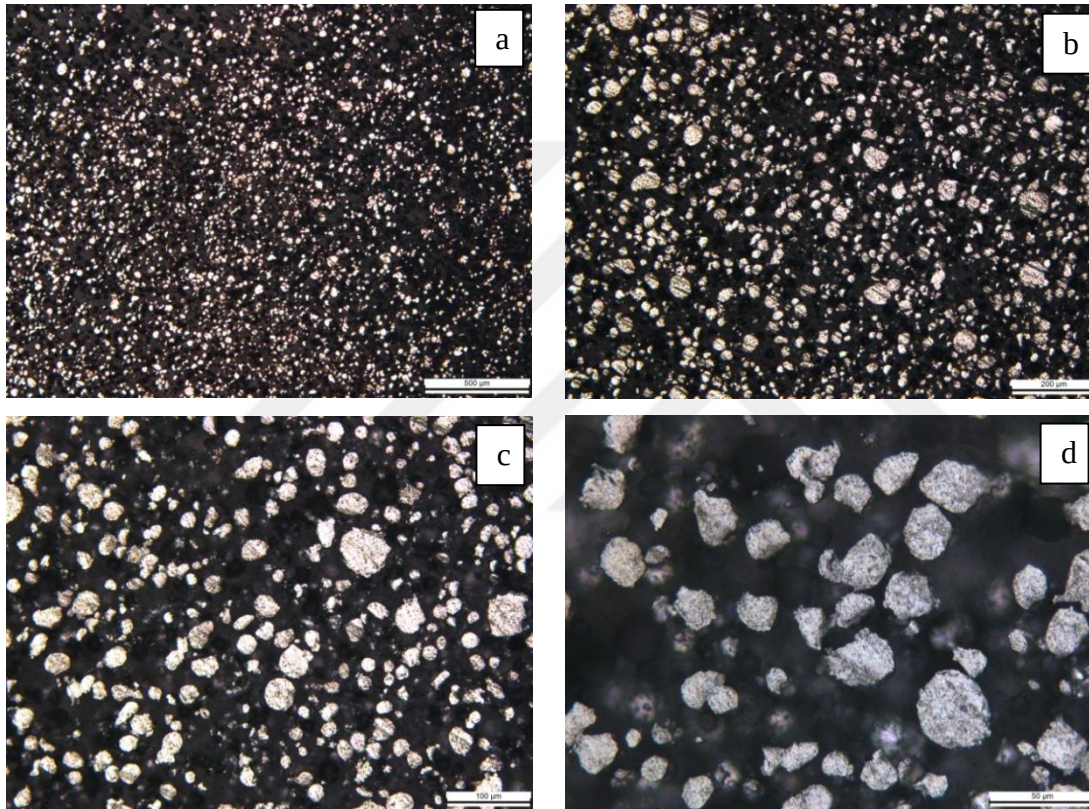


Resim 7.9. Abrasiv aşındırıcı zımparanın aşınma testi öncesi ve sonrası görüntüsü

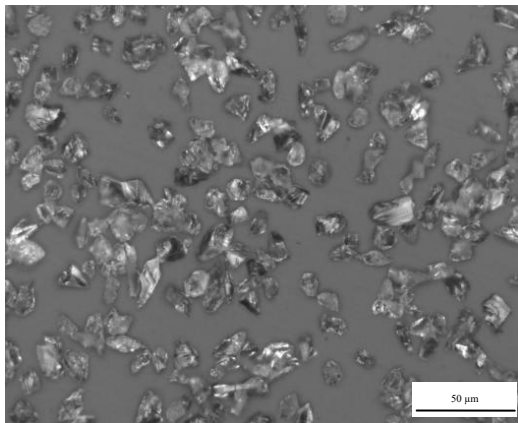
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. Toz Tane Morfolojisi ve Boyutu

MK öncesi kullanılan atomize alüminyum tozun optik mikroskopta çekilen resimlerine bakıldığında toz parçacık şeklinin genellikle küresel olduğu görülmektedir. Al_2O_3 toz parçacık şekli ise keskin köşeli olup düzgün olmayan bir geometriye sahiptir (Resim 8.1;8.2).

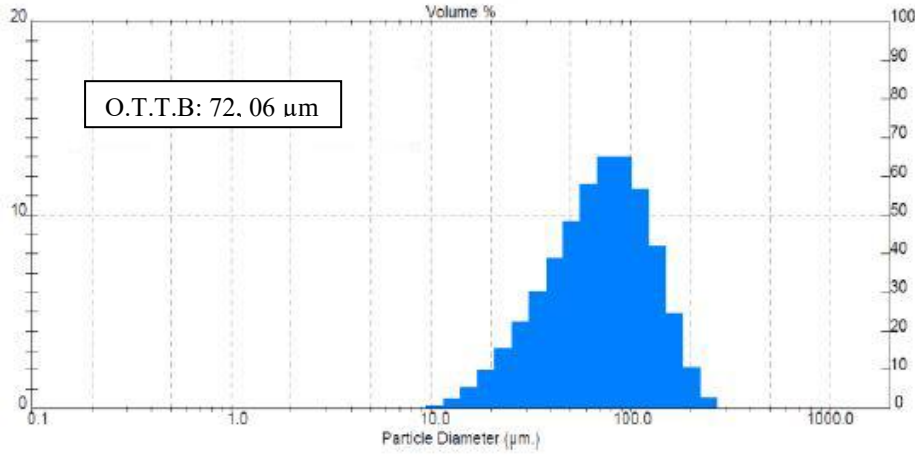


Resim 8.1. Kullanılan Al tozunun optik mikroskop görüntüleri, a) 5X, b) 10X, c) 20X, d) 50X



Resim 8.2. Al_2O_3 tozunun optik mikroskop görüntüsü 50X

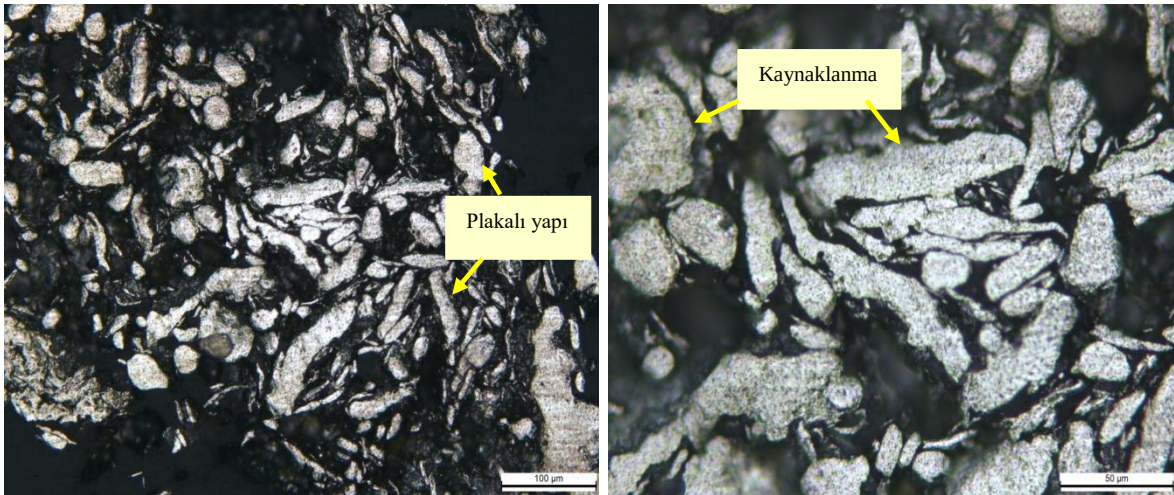
Mekanik karıştırma öncesi alüminyumun ortalama toz tane boyut değeri 72,06 μm olarak ölçülmüştür (Şekil 8.1).



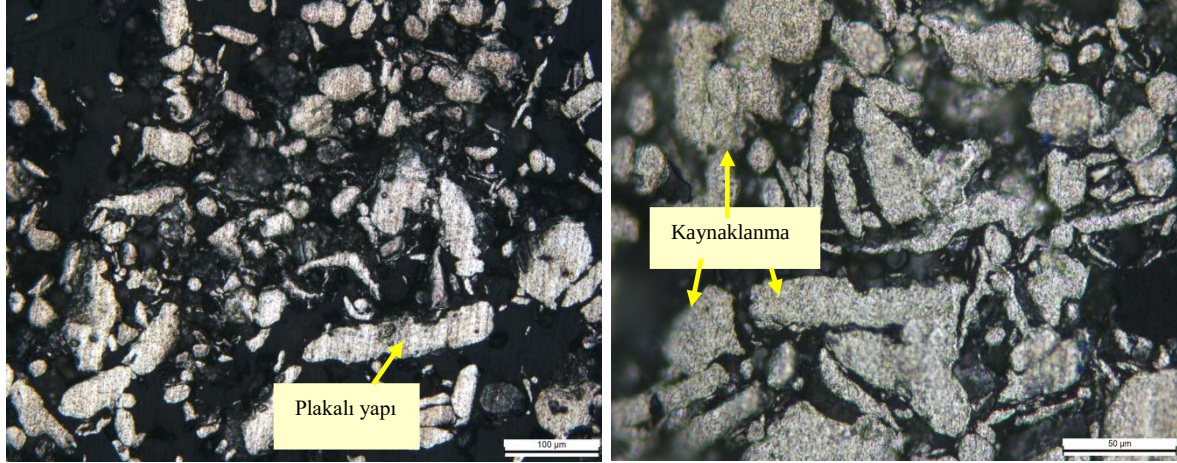
Şekil 8.1. Al toz tane boyut dağılımı

8.2. Karışım Tozun Karakterizasyonu

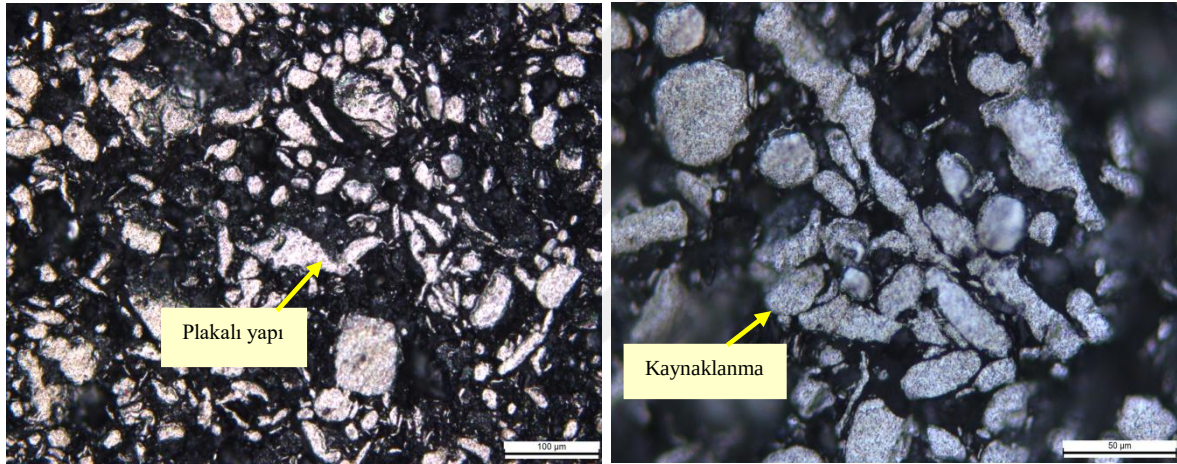
MK sonrası karışım tozların ağırlıkça takviye oranına göre toz tane şekilleri Resim 8.3, 8.4 ve 8.5'te verilmiştir. Optik mikroskopta alınan toz parçacık şeklini gösteren bu resimlere bakıldığında, MK sonucu bilyelerin etkisi altında deforme olan toz partikülleri şekillerinin küreselden çubuksu ve plakalı bir görünüme geçtiği görülmektedir. Aynı zamanda yer yer alüminyum toz parçacıklarının birbirine soğuk kaynaklandığı da görülmektedir. Deforme olarak pekleşen karışım tozun daha sonra kalıp içerisinde sıkıştırılabilirliği bir miktar azalabilmektedir. Bu durum ham yoğunluğu düşürürken aynı zamanda presleme sırasında mekanik kilitlenmeyi artırarak toz metal parçanın ham mukavemetini artırmaktadır.



Resim 8.3. MK sonrası % 5 Al_2O_3 + Al tozunun optik resimleri



Resim 8.4. MK sonrası % 10 Al_2O_3 + Al tozunun optik resimleri

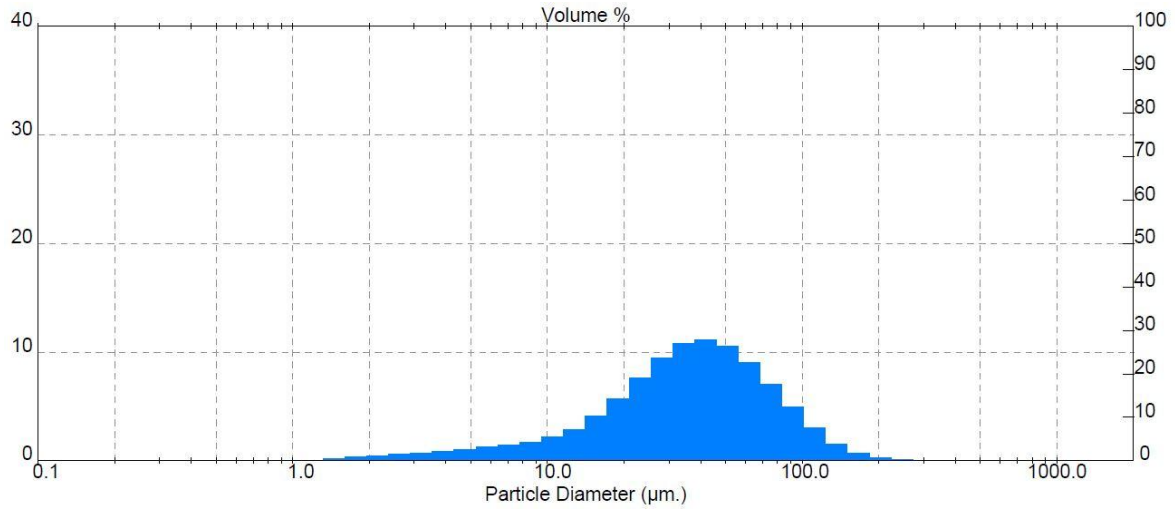


Resim 8.5. MK sonrası % 15 Al_2O_3 + Al tozunun optik resimleri

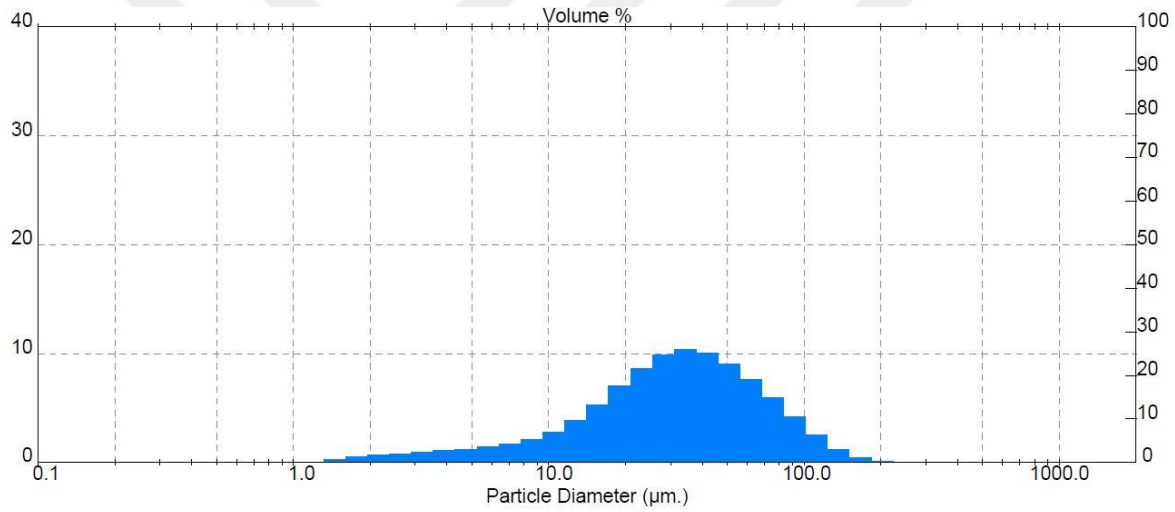
Aynı parametrelerde gerçekleştirilen MK sonrası karışım tozların ortalama toz tane boyut ölçümleri Çizelge 8.1’de verilmiştir. Buradan görüleceği üzere ağırlıkça Al_2O_3 takviye oranı arttıkça ortalama toz tane boyutu azalmıştır. Şekil 8.2, 8.3 ve 8.4’te parçacık boyut dağılımı görülmektedir.

Çizelge 8.1. Ortalama toz tane boyut ölçüm sonuçları

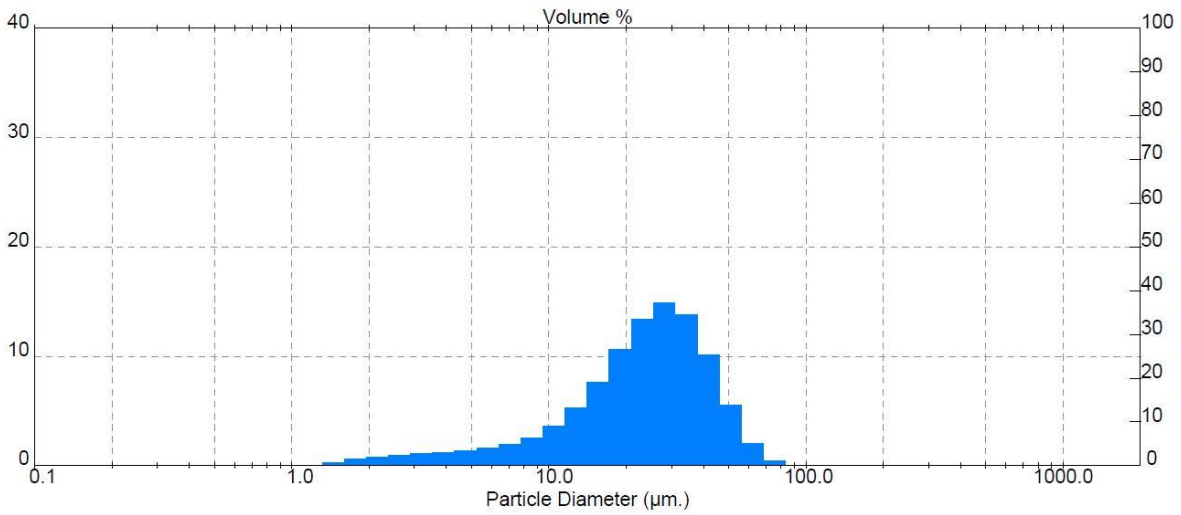
Karışım Toz	Ortalama Toz Boyutu
% 5 Al_2O_3 + Al	36,75 μm
% 10 Al_2O_3 + Al	32,02 μm
% 15 Al_2O_3 + Al	24,35 μm



Şekil 8.2. % 5 Al_2O_3 + Al karışım tozun parçacık boyut dağılımı



Şekil 8.3. % 10 Al_2O_3 + Al karışım tozun parçacık boyut dağılımı



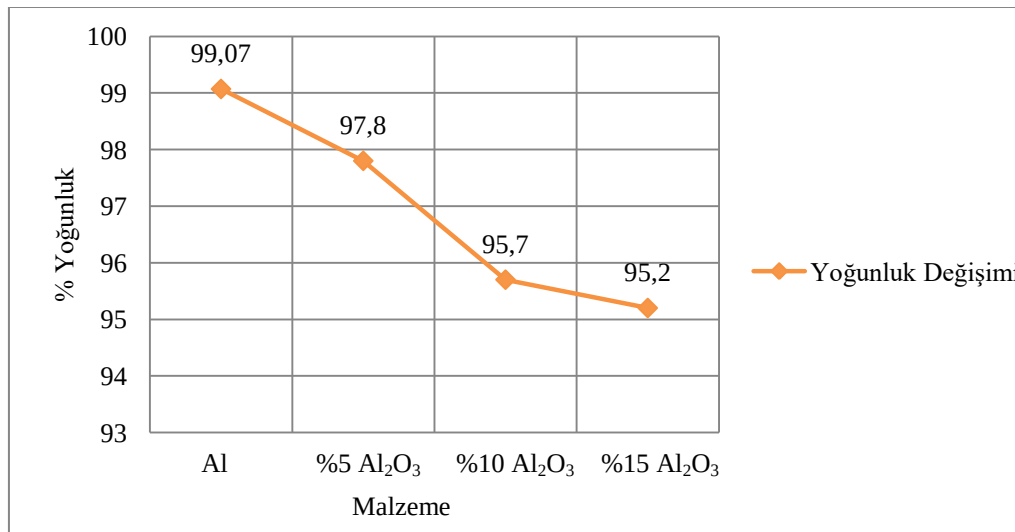
Şekil 8.4. % 15 Al_2O_3 + Al karışım tozun parçacık boyut dağılımı

8.3. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Karışım tozlardan aynı şartlar altında sıcak presleme ile elde edilen blok parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları Çizelge 8.2’de verilmiştir. Şekil 8.5’te ise takviye oranındaki artışa göre yoğunluktaki değişimi gösterir grafik çizilmiştir. Buradan görüleceği üzere ağırlıkça alümina oranının artması ile % yoğunluk düşmektedir. Bunun nedeni ise matris yapı içerisinde alümina miktarındaki artışın presleme sırasında sıkıştırılabilirliği azaltıcı etkide bulunmasıdır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, tozların sıcak olarak preslenmesi ile teorik yoğunluğa yakın yüksek yoğunluklu parçalar üretilmiştir. Genel olarak sıcak presleme ile toz metal parça üretiminin en önemli amaçlarından biri daha yüksek yoğunlukta kompozit üretmektir. Bu çalışmada da yoğunluk anlamında istenen sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen yoğunluk değerleri, literatürdeki benzer çalışmalarda elde edilen yoğunluk değerleriyle hemen hemen aynıdır [77]. Ayrıca bu çalışmada sıcak presleme ile üretilen numunelerin yoğunluk değerleri, benzer bir çalışmada sinterleme ile üretilen numunelerin yoğunluk değerlerinden daha yüksek çıkmıştır [4].

Çizelge 8.2. Yoğunluk ölçüm sonuçları

Malzeme	Ölçülen Yoğunluk (g/cm ³)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	% Yoğunluk
Saf Al	2,675	2,70	99,0
% 5 Al ₂ O ₃ + Al	2,705	2,764	97,8
% 10 Al ₂ O ₃ + Al	2,707	2,828	95,7
% 15 Al ₂ O ₃ + Al	2,754	2,892	95,2



Şekil 8.5. Takviye oranındaki artışın yoğunluk değişimine etkisi

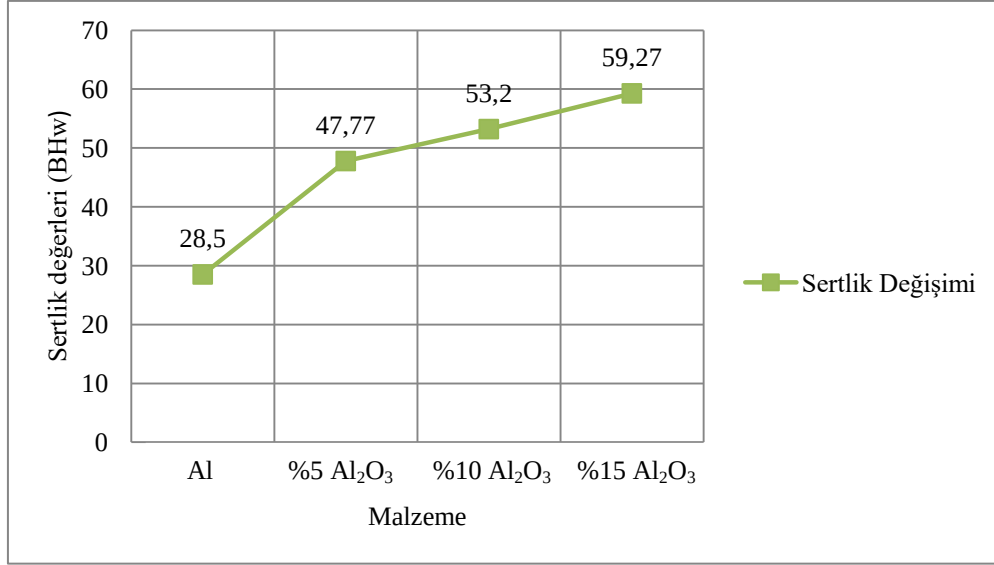
8.4. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Brinell sertlik ölçümü yöntemi ile yapılan ölçümler Çizelge 8.3'te verilmiştir. Takviye oranındaki değişimin sertlik üzerine olan etkisini gösterir grafik Şekil 8.6'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ortamdaki Al_2O_3 takviye oranı arttıkça Al matrisli kompozit malzemenin sertliğinin artmış olduğunu göstermektedir. Aynı şartlar altında üretilen Al toz metal parçaya göre en yüksek sertlik artışı % 107 olarak % 15 Al_2O_3 içeren kompozit malzemede elde edilmiştir. % 15 Al_2O_3 içeren kompozit malzemede 59,27 olarak elde edilen sertlik değeri, literatürdeki benzer çalışmalarda elde edilen değerden daha yüksektir [77].

Çizelge 8.3. Sertlik ölçüm sonuçları

Malzeme	Brinell sertlik ölçüm değerleri (BHW) (31,25 kgf yük ve 2,5 mm çapta WC bilye uç ile)	
	Setlik Ölçüm Değerleri	Ortalamaları
Saf Al (99,7)	28,5 28,6 28,6 28,3	28,5
% 5 Al_2O_3 + Al	47,4 47,7 48,0 48,0	47,77
% 10 Al_2O_3 + Al	56,2 52,2 51,5 52,9	53,2
% 15 Al_2O_3 + Al	59,4 59,4 58,9 59,4	59,27
Not: Sertlik ölçümü öncesi bütün numune yüzeyleri kademeli olarak 800 numara zımpara ile temizlenmiştir.		

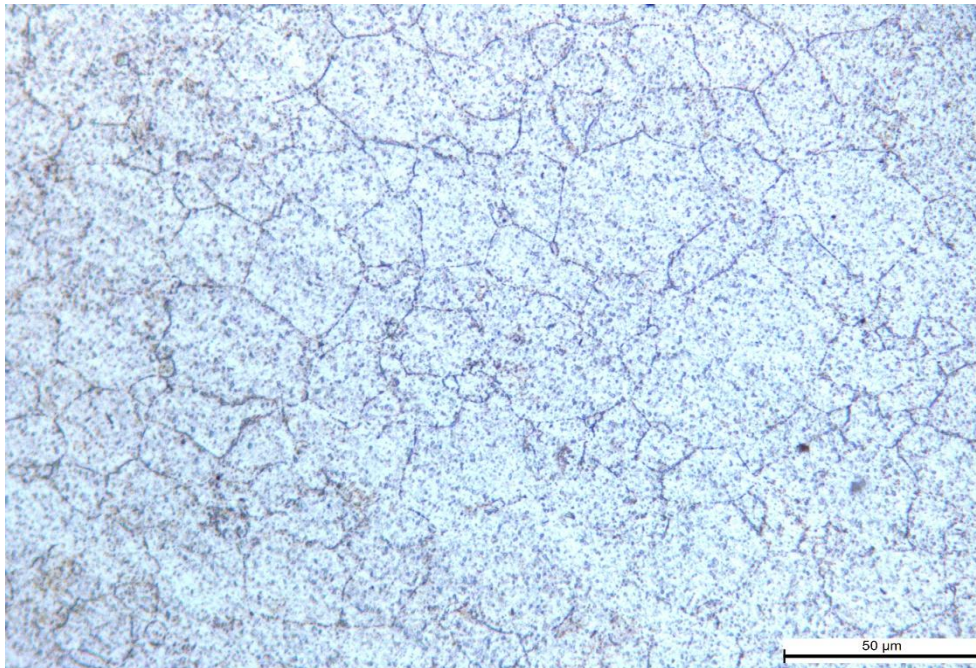
Metal matrisli kompozit malzemelerin takviye elemanı ve oranı artarken kompozit malzemenin sertliğinin de ciddi olarak arttığı Şekil 8.6'da görülmektedir. Her farklı kompozisyondaki malzeme üzerinden birden fazla yapılan sertlik ölçüm sonrası elde edilen sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olması üretilen kompozit malzemelerde takviye elemanının matris yapı içerisinde homojen olarak dağılmış olduğunu göstermektedir.



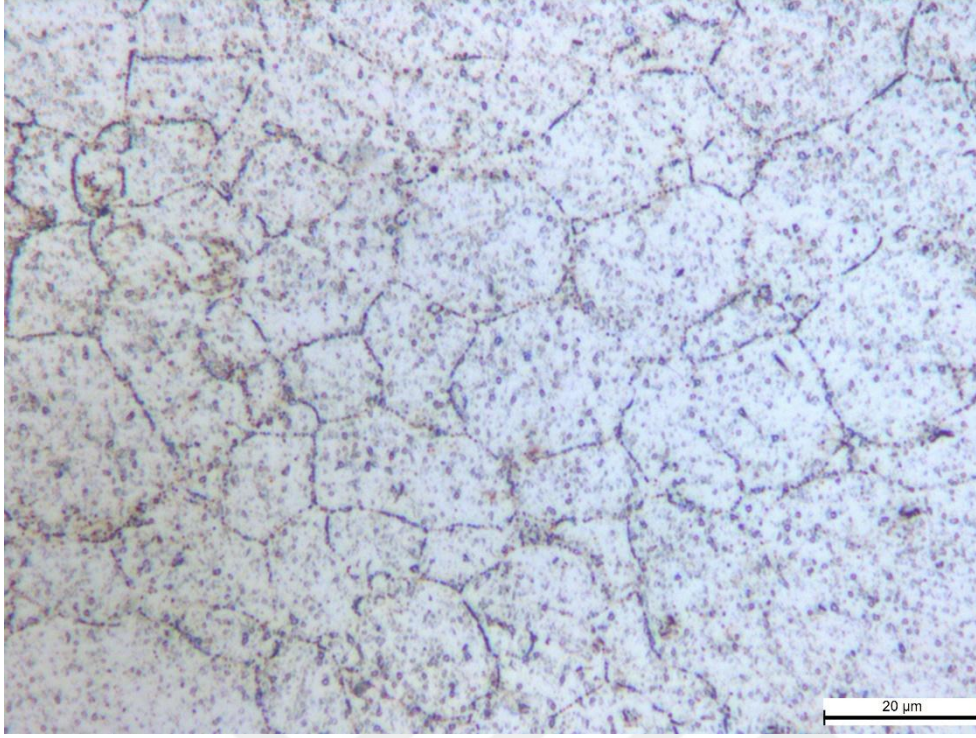
Şekil 8.6. Takviye oranındaki artışa bağlı sertlikteki değişim

8.5. Metalografik İnceleme Sonuçları

İlk olarak saf alüminyum tozdan elde edilen toz metal parçanın metalografik incelemesinde alınan optik mikroskop görüntüleri sinterleşmenin homojen ve istenen düzeyde olduğunu göstermektedir (Resim 8.6). Görüntüler üzerinden malzemenin çok düşük oranlarda gözenek içerdiği görülmektedir. Bu sonuç, numunenin yoğunluğunun teorik yoğunluğa yakın olduğunu göstermektedir.



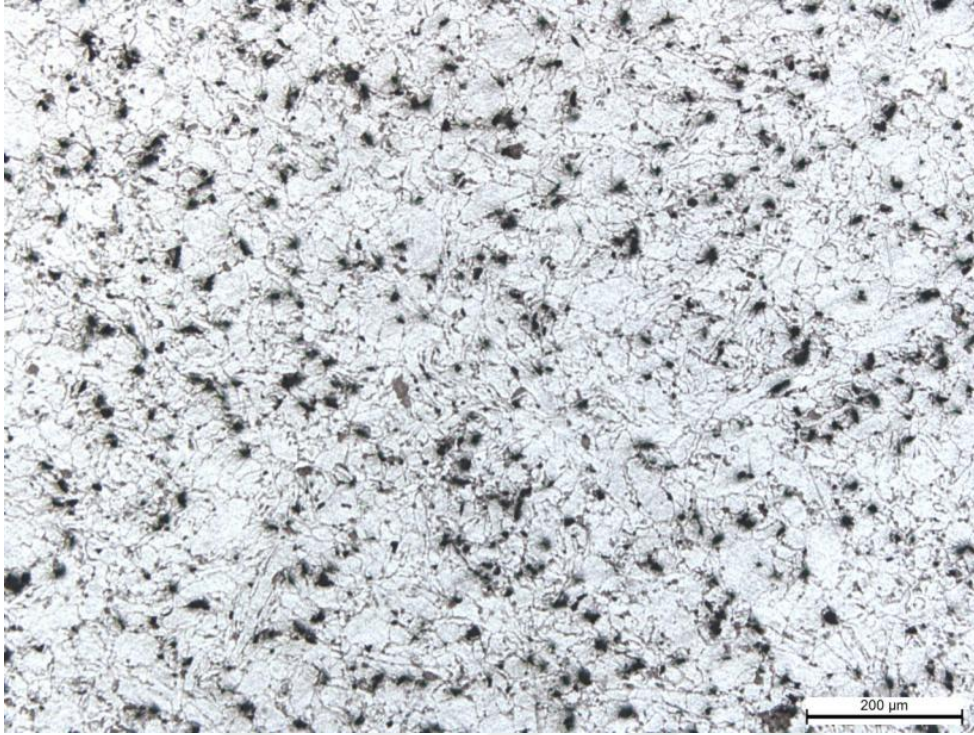
Resim 8.6. Saf alüminyum toz metal parçanın optik mikroskop görüntüleri



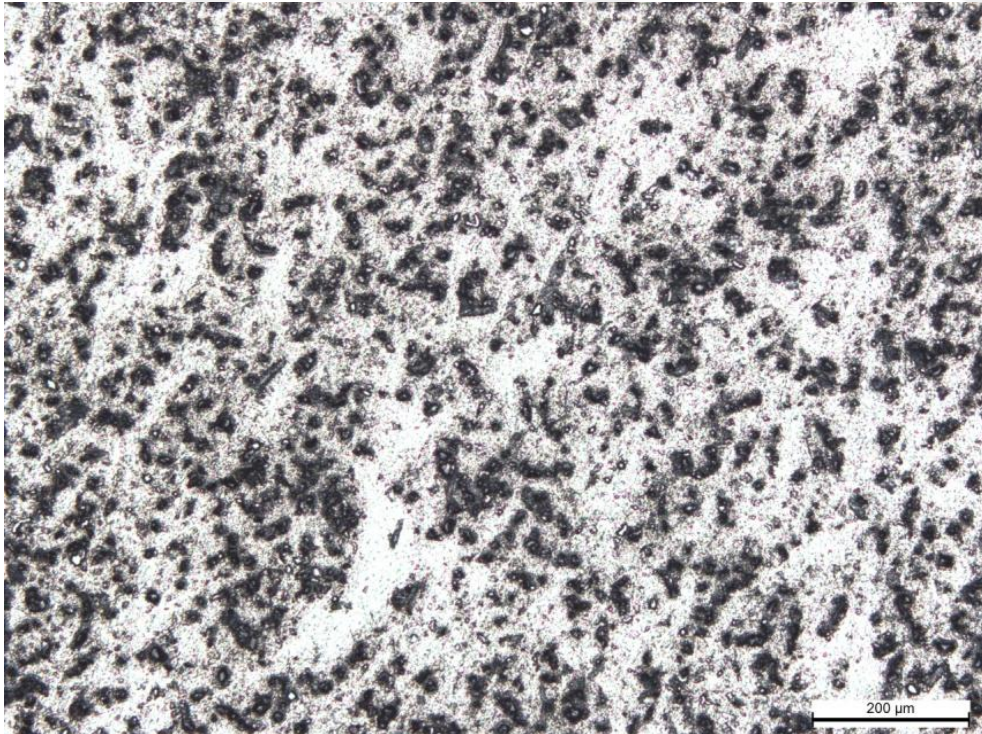
Resim 8.6. (devam) Saf alüminyum toz metal parçanın optik mikroskop görüntüleri

Farklı oranlarda takviye elemanı içeren kompozit numunelerden çekilen fotoğraflara bakıldığında, MK yöntemi ile karıştırılan tozlardan elde edilen kompozit malzemelerde takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Ayrıca aynı büyütme oranlarında alınan görüntüler, takviye oranındaki artışı net bir şekilde göstermektedir (Resim 8.7, 8.8 ve 8.9).

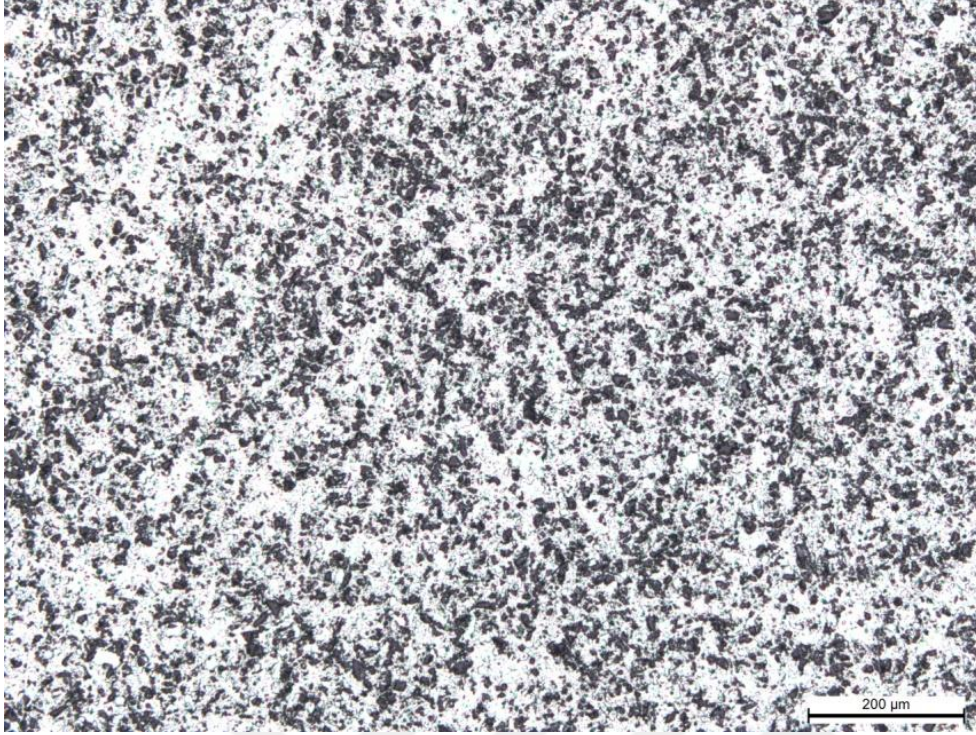
Takviye elemanının matris yapı içerisinde homojen şekilde dağılımı ve ara yüzey bağlanmasının istenen düzeyde gerçekleşmiş olması kompozit malzemenin sertliğini artırmıştır. Alüminyuma benzer şekilde, uygulanan sıcak presleme ile kompozit malzemelerde de yüksek derecede yoğunluk elde edilirken gözenek oranı çok düşük oranlardadır.



Resim 8.7. % 5 Al₂O₃ + Al kompozit parçanın optik mikroskop görüntüsü
(Koyu ton: Takviye elemanı, Açık ton: Matris yapı)

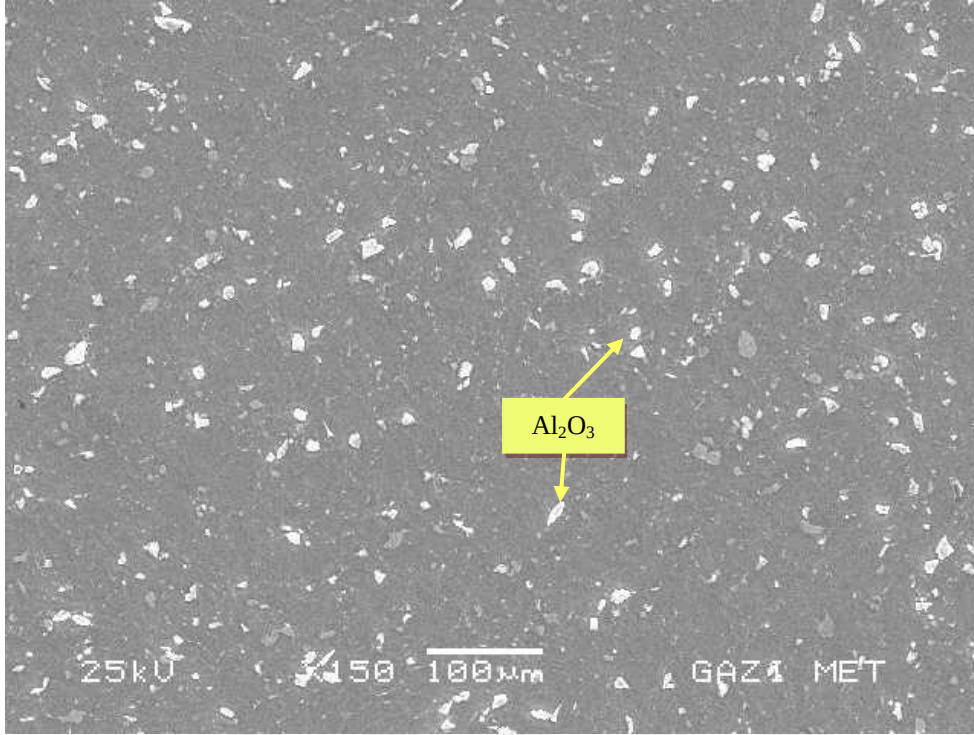


Resim 8.8. % 10 Al₂O₃ + Al kompozit parçanın optik mikroskop görüntüsü
(Koyu ton: Takviye elemanı, Açık ton: Matris yapı)

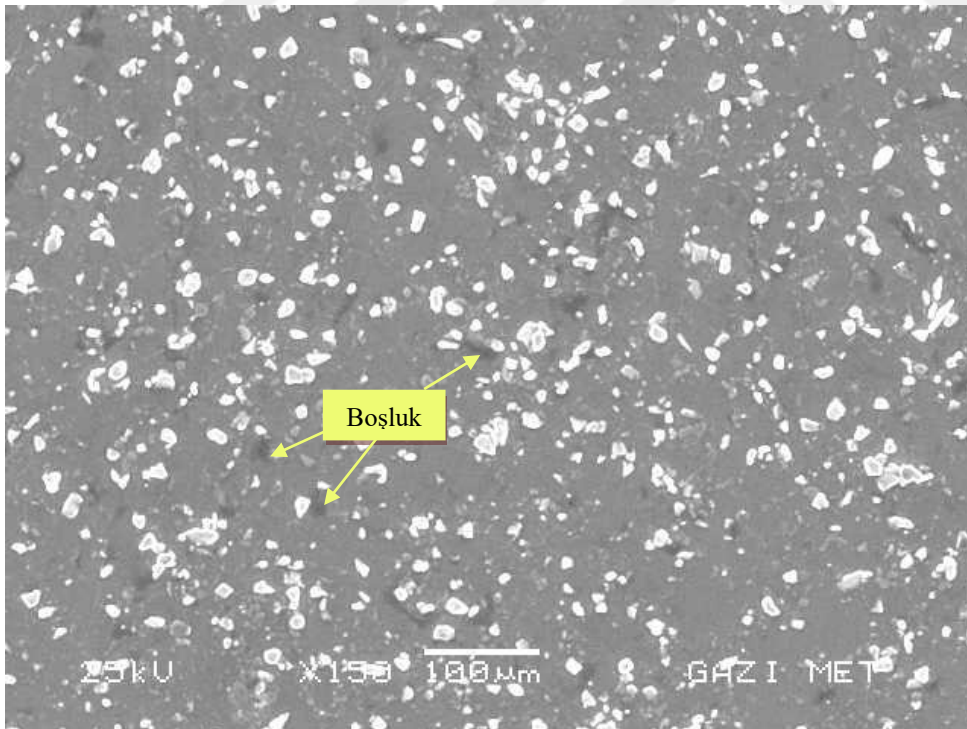


Resim 8.9. % 15 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın optik mikroskop görüntüsü
(Koyu ton: Takviye elemanı, Açık ton: Matris yapı)

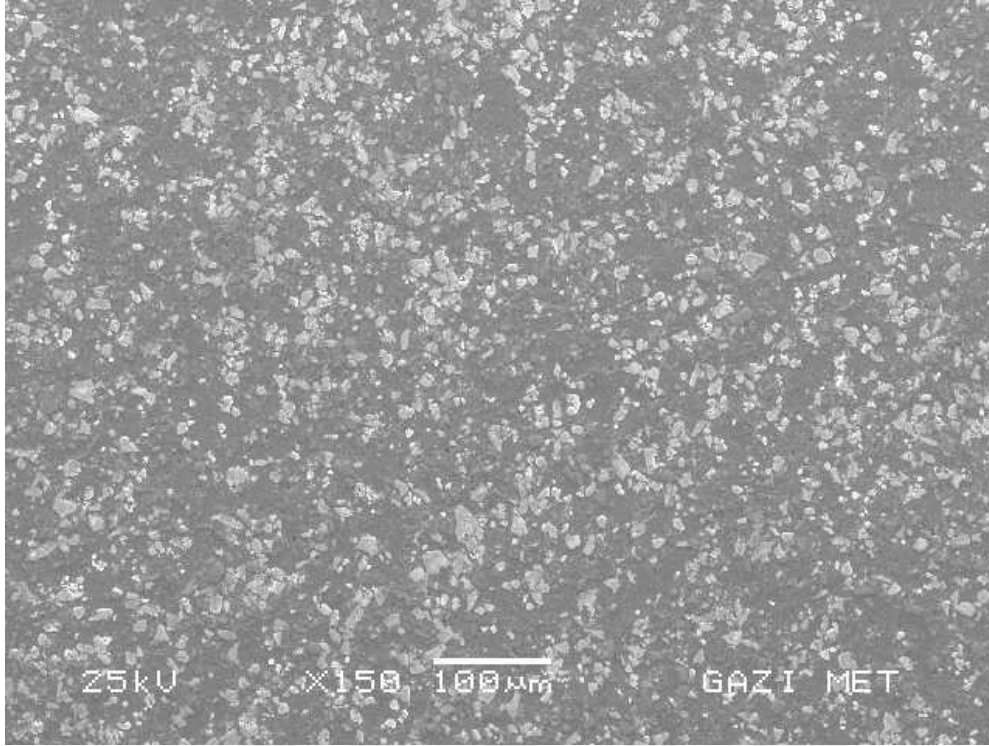
Elektron mikroskobu görüntülerine bakıldığında (Resim 8.10, 8.11 ve 8.12), yine aynı şekilde Al_2O_3 partiküllerinin matris içerisinde homojen olarak dağılımı ve takviye oranındaki artış net bir şekilde görülmektedir. Optik mikroskop görüntülerinden farklı olarak alümina partikül morfolojileri daha net olarak gözükmemektedir. Ayrıca zımparalama işleminden kaynaklanan partikül kopmaları yapıda boşluk olarak görülmüştür (Resim 8.11). Bundan dolayı daha sonra benzer çalışma yapılacak araştırmaların zımparalama işlemini dikkatli bir şekilde yapılması önerilir.



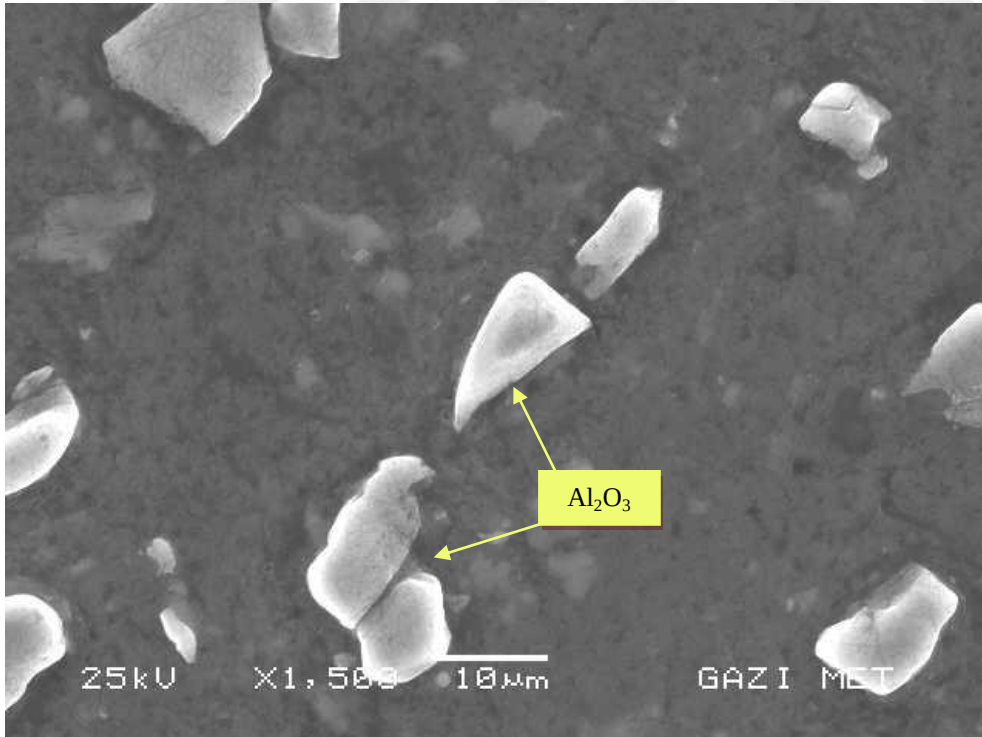
Resim 8.10. % 5 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın SEM görüntüsü



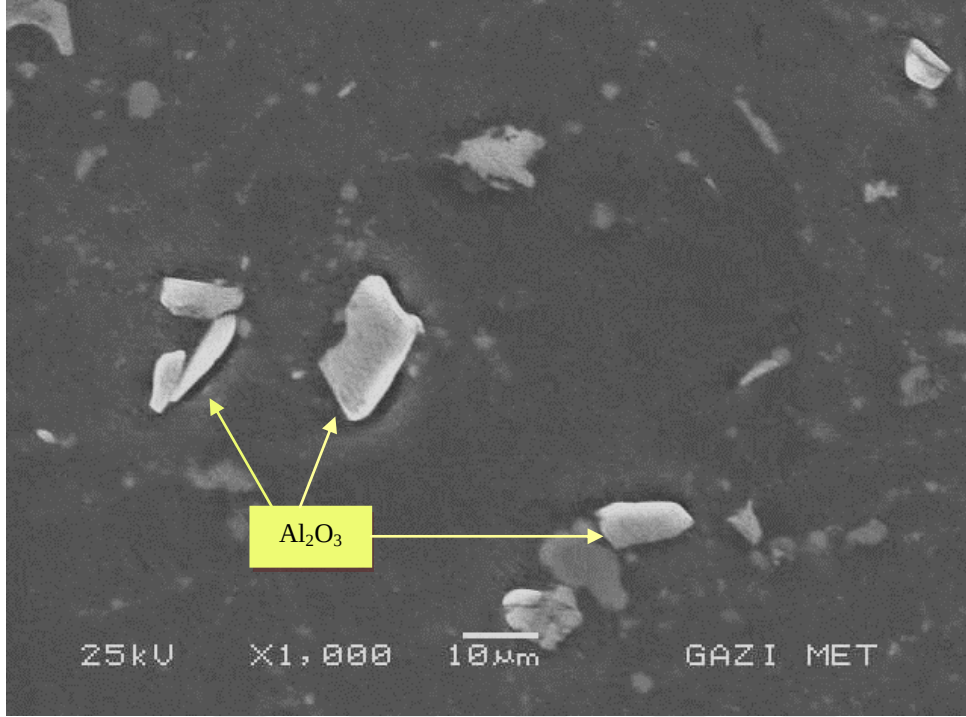
Resim 8.11. % 10 Al_2O_3 + Al kompozit parçanın SEM görüntüsü



Resim 8.12. % 15 Al₂O₃ + Al kompozit parçanın SEM görüntüsü



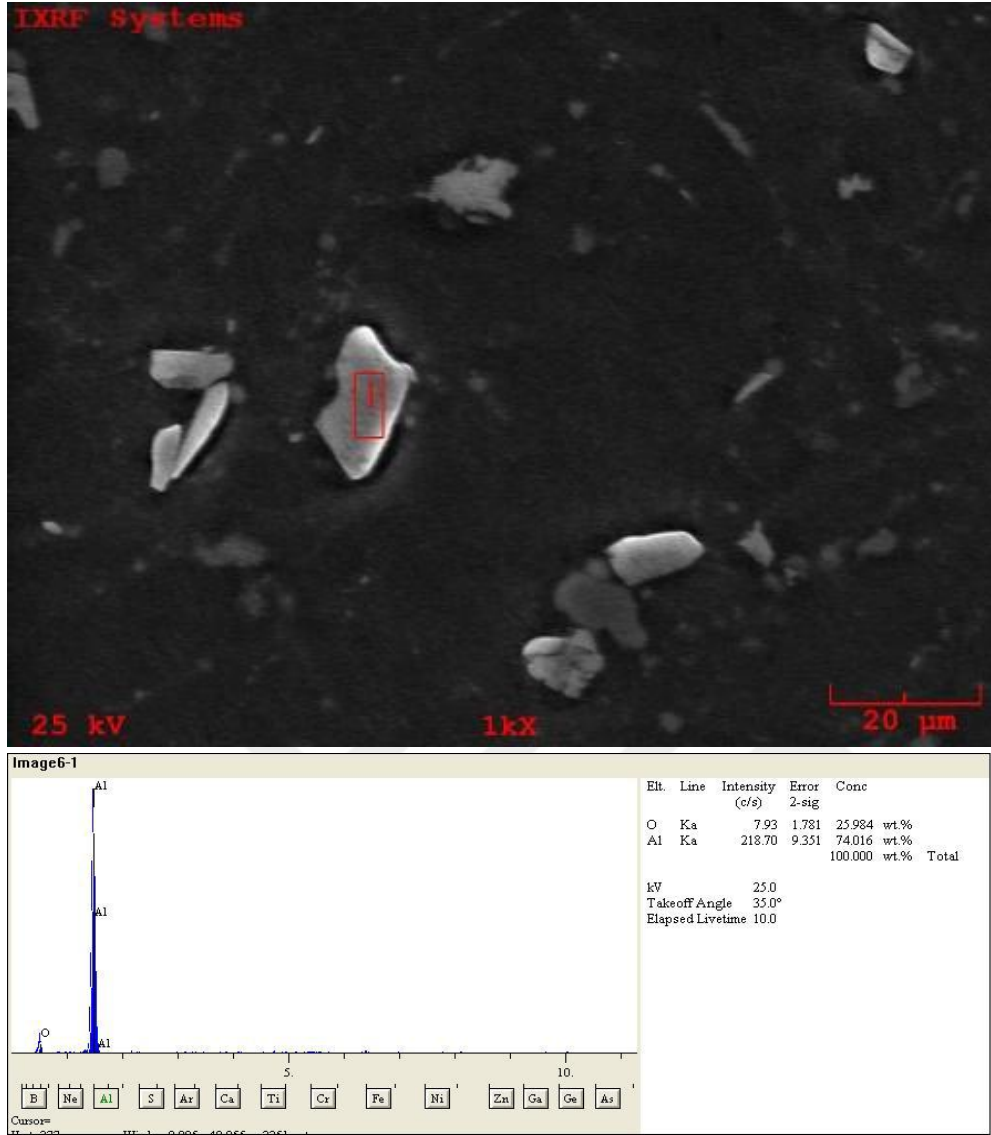
Resim 8.13. Al₂O₃ partiküllerinin matris içerisindeki görünümü



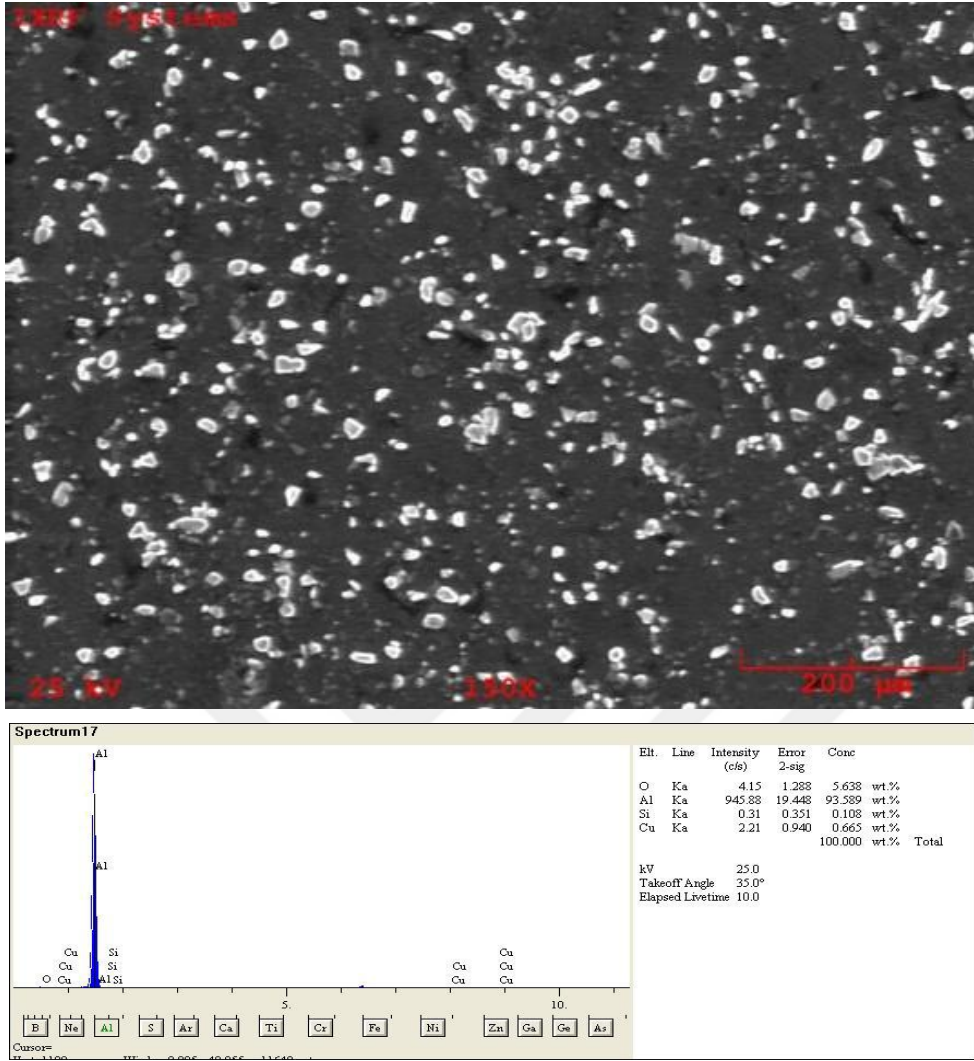
Resim 8.13. (devam) Al_2O_3 partiküllerinin matris içerisindeki görünümü

Kompozit malzemelerden genel olarak ve partikül üzerinden elementel analizler yapılmıştır. EDS analiz sonuçları Resim 8.14, 8.15 ve 8.16’da görüldüğü gibidir. Al_2O_3 partikülü üzerinden alınan EDS sonucuna bakıldığında alümina, Al ve O olarak gözükmektedir. Örneğin % 5 Al_2O_3 içeren kompozit malzemede alümina partikülü üzerindeki analiz % 74 alüminyum ve % 25 oksijen olduğunu göstermektedir (Resim 8.14).

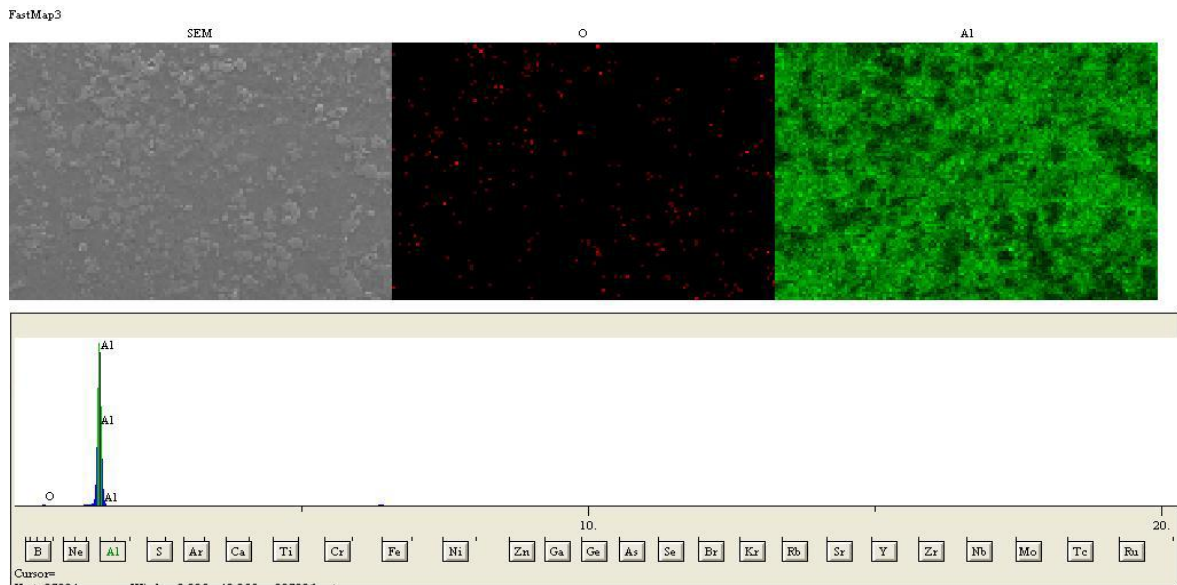
Genel olarak alınan elementel analiz sonuçlarına bakıldığında ise yapıda, başlangıç Al tozundan kaynaklanan % 0,1 Si ve % 0,6 Cu gibi elementlere rastlanmıştır (Resim 8.15).



Resim 8.14. % 5 Al_2O_3 + Al kompozit parçada partikül üzerinden alınan EDS sonucu



Resim 8.15. % 10 Al_2O_3 + Al kompozit parçadan genel olarak alınan EDS sonucu



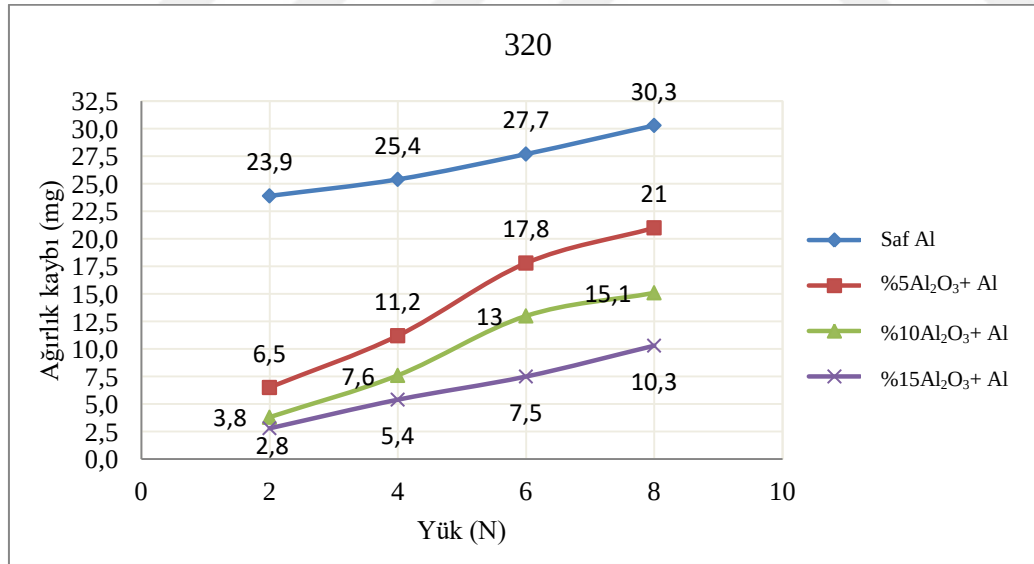
Resim 8.16. % 15 Al_2O_3 + Al kompozit parçadan EDS ile genel olarak alınan haritalandırma

8.6. Aşınma Testi Sonuçları

Kompozit malzemelerin pin-on-disk metoduyla abrasiv aşınma miktarlarının tespiti ağırlık kaybı hesabına göre belirlenmiştir. Aşınma testi öncesi ve sonrası numune ağırlıkları tartılarak aşınmaya bağlı numunedeki ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Farklı yükler altında 320, 400 ve 600 numara SiC zımpara üzerinde gerçekleştirilen abrasiv aşındırma testleri sonucu elde edilen ağırlık kayıpları Çizelge 8.4, 8.5 ve 8.6’da sırayla verilmiştir.

Çizelge 8.4. 320 numara SiC zımparada malzeme kompozisyonu ve yüke bağlı ağırlık kayıpları

Kayma mesafesi (m)		200				
Kayma hızı (m/s)		0,73				
Zımpara numarası		320				
Uygulanan yük (N)		2	4	6	8	
Malzeme kompozisyonu	Saf Al	Ağırlık kayıpları (mg)	23,9	25,4	27,7	30,3
	%5 Al ₂ O ₃ +Al		6,5	11,2	17,8	21,0
	%10 Al ₂ O ₃ +Al		3,8	7,6	13,0	15,1
	%15 Al ₂ O ₃ +Al		2,8	5,4	7,5	10,3



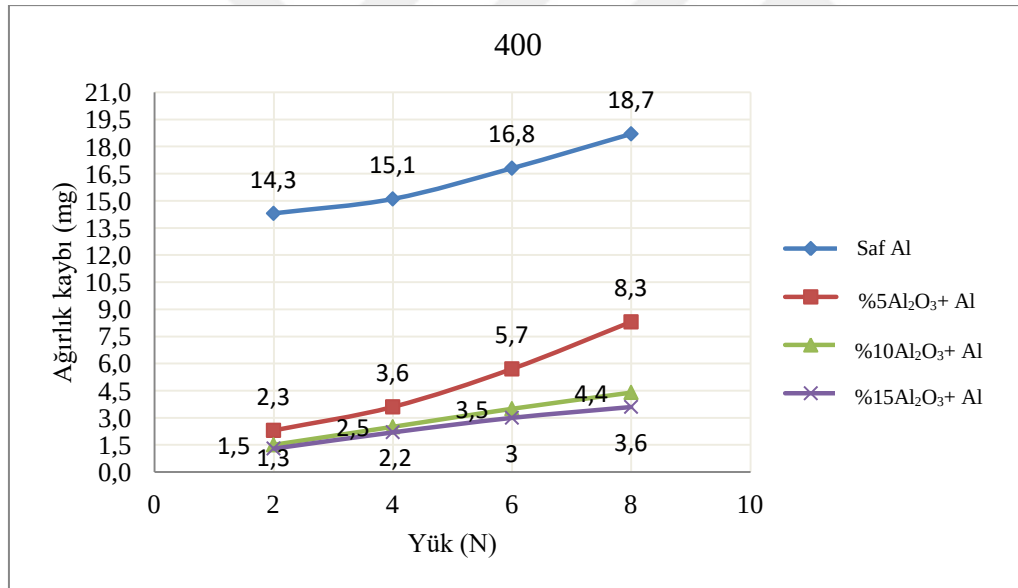
Şekil 8.7. 320 numara aşındırıcıda meydana gelen ağırlık kayıpları

Çizelge 8.4 incelendiğinde, örneğin 2 N yük altında en fazla 23,9 mg ağırlık kaybı ile saf alüminyumun aşındığı ve takviye oranı % 5, 10, 15 şeklinde artarken, ağırlık kayıplarının sırayla 6,5 - 3,8 - 2,8 mg olarak giderek azaldığı görülmektedir. En az ağırlık kaybı %15 Al₂O₃ takviyeli kompozit numunede meydana gelmiştir. Bu malzemenin aynı şartlar altında alüminyum malzemeye göre aşınma davranışı 8.5 kat daha iyileşmiştir. 4; 6 ve 8 N

yüklerde elde edilen ağırlık kaybı değerleri de benzer şekildedir. Ayrıca Şekil 8.7’de de görüldüğü gibi artan yüklerle beraber bütün malzemelerde meydana gelen ağırlık kayıpları giderek artmıştır.

Çizelge 8.5. 400 numara SiC zımparada malzeme kompozisyonu ve yüke bağlı ağırlık kayıpları

Kayma mesafesi (m)		200				
Kayma hızı (m/s)		0,73				
Zımpara numarası		400				
Uygulanan yük (N)		2	4	6	8	
Malzeme kompozisyonu	Saf Al	Ağırlık kayıpları (mg)	14,3	15,1	16,8	18,7
	%5 Al ₂ O ₃ +Al		2,3	3,6	5,7	8,3
	%10 Al ₂ O ₃ +Al		1,5	2,5	3,5	4,4
	%15 Al ₂ O ₃ +Al		1,3	2,2	3,0	3,6



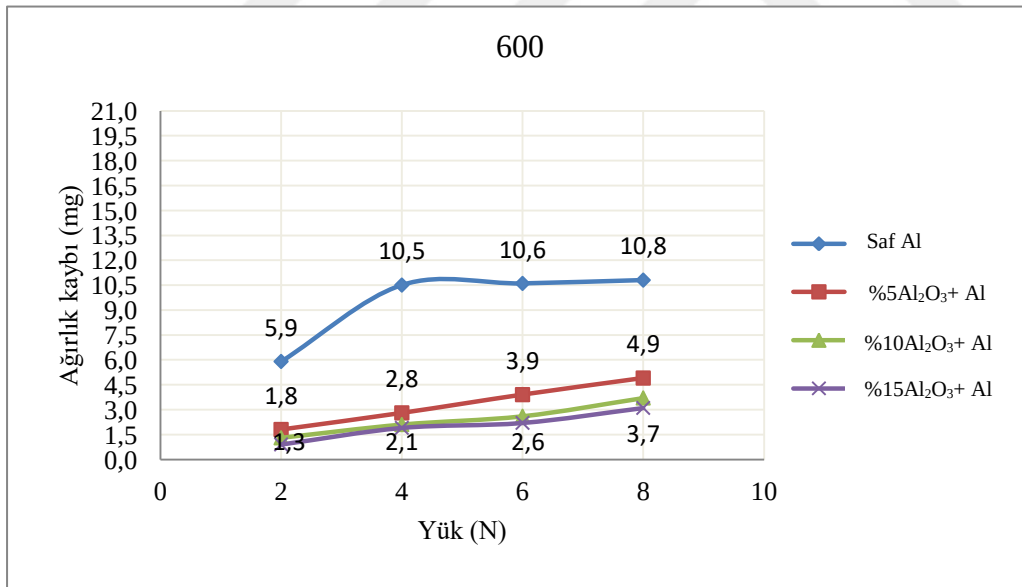
Şekil 8.8. 400 numara aşındırıcıda meydana gelen ağırlık kayıpları

Çizelge 8.5 incelendiğinde, örneğin 2 N yük altında en fazla 14,3 mg ağırlık kaybı ile saf alüminyumun aşındığı ve takviye oranı % 5, 10, 15 şeklinde artarken, ağırlık kayıplarının sırasıyla 2,3 – 1,5 – 1,3 mg olarak giderek azaldığı görülmektedir. 400 numaralı zımparada elde edilen değerler, aynı yük altında 320 numaralı zımpara ile karşılaştırıldığında ağırlık kaybının azaldığını göstermektedir. Aynı şekilde Çizelge 8.6’da verilen değerler ele alındığında; örneğin 2 N yük altında ağırlık kayıplarının, saf alüminyumdan % 15 alümina takviyeli kompozite gidilirken sırasıyla 5,9 – 1,8 – 1,3 – 0,9 mg olarak azalmıştır. Aynı

zamanda 600 numaralı zımparada 320 ve 400 numaralı zımparalara göre azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak zımpara yüzey pürüzlülüğünün azalması ağırlık kayıplarını azaltmıştır. Aynı durum 4 N, 6 N ve 8 N yükler içinde geçerlidir. Ayrıca Şekil 8.8 ve 8.9'da da görüldüğü gibi artan yüklerle beraber malzemelerde meydana gelen ağırlık kayıpları giderek artmıştır.

Çizelge 8.6. 600 numara SiC zımparada malzeme kompozisyonu ve yüke bağlı ağırlık kayıpları

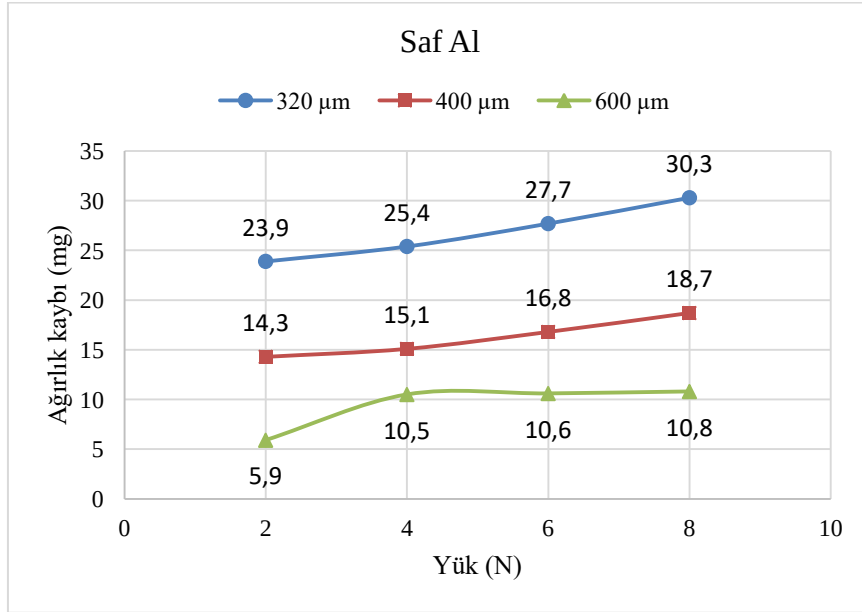
Kayma mesafesi (m)	200					
Kayma hızı (m/s)	0,73					
Zımpara numarası	600					
Uygulanan yük (N)			2	4	6	8
Malzeme kompozisyonu	Saf Al	Ağırlık kayıpları (mg)	5,9	10,5	10,6	10,8
	%5 Al ₂ O ₃ +Al		1,8	2,8	3,9	4,9
	%10 Al ₂ O ₃ +Al		1,3	2,1	2,6	3,7
	%15 Al ₂ O ₃ +Al		0,9	1,9	2,2	3,1



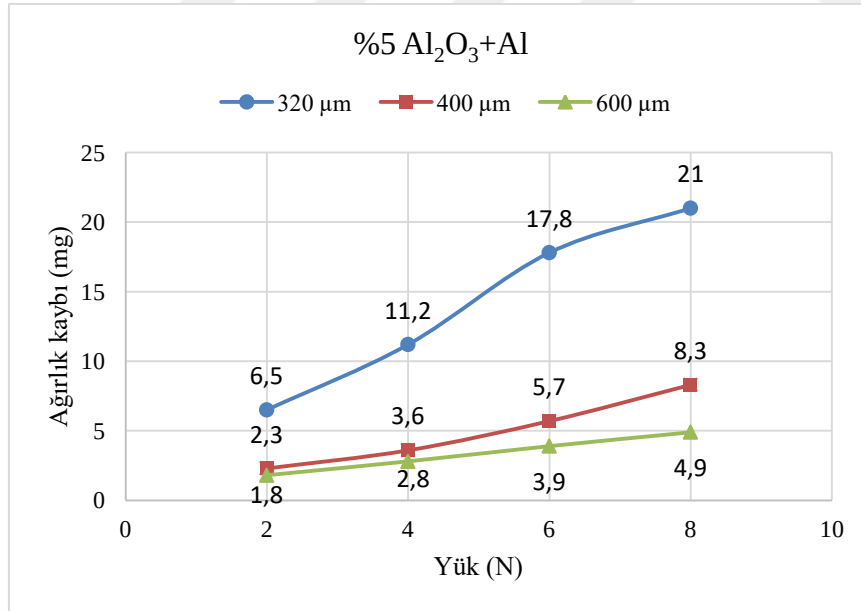
Şekil 8.9. 600 numara aşındırıcıda meydana gelen ağırlık kayıpları

Çizelgelerde verilen değerler kullanılarak her bir numunede zımpara numarasına göre meydana gelen ağırlık kayıplarındaki değişimi veren grafikler çizilmiştir. Şekil 8.10'da verilen saf alüminyuma ait grafik incelendiğinde, zımpara numarası artarken (320-400-600) ağırlık kaybının azalmış olduğu görülmektedir. Takviyeli kompozit numunelerde de aynısı geçerlidir. Bu durum daha önce açıklandığı gibi, zımpara pürüzlülüğünün azalması

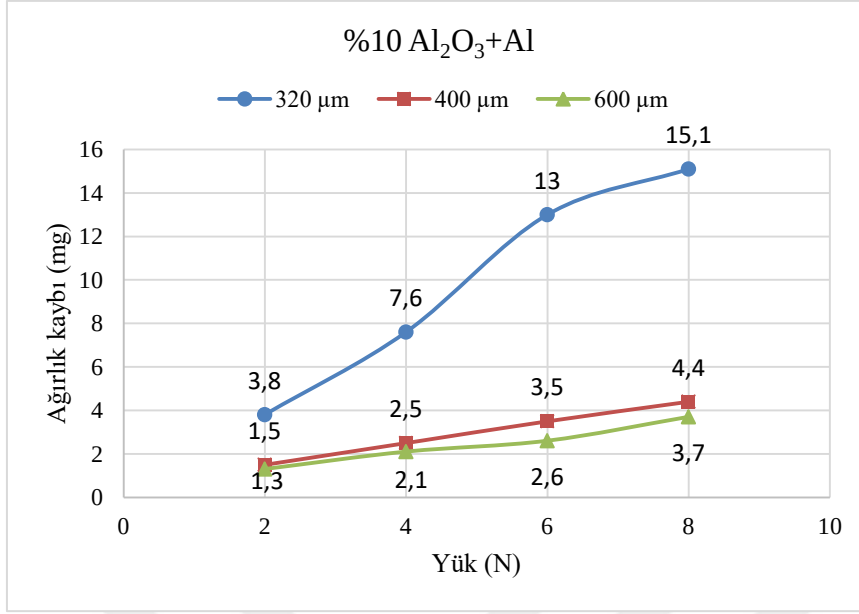
ile sürtünme kuvvetinin azalması sonucu daha az malzeme kaybı meydana geldiğini göstermektedir.



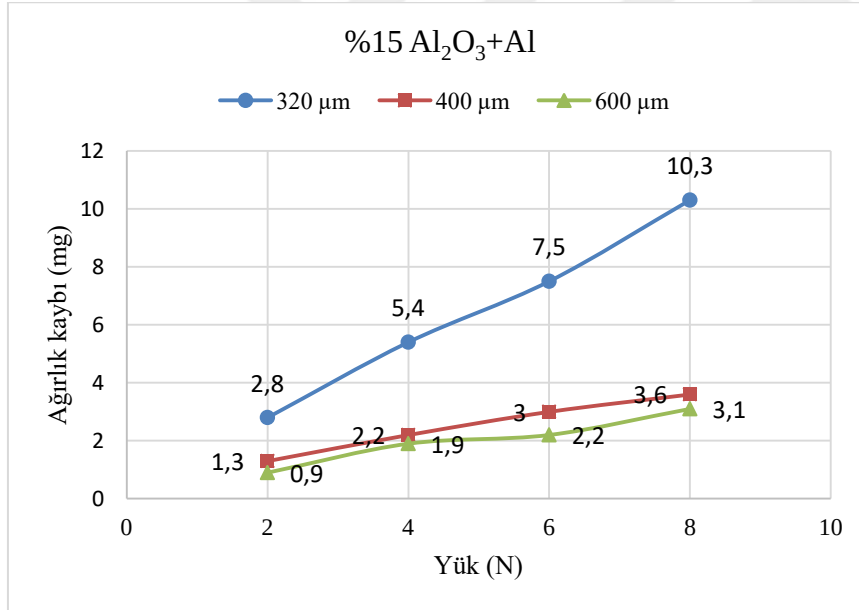
Şekil 8.10. Alüminyumda zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları



Şekil 8.11. %5 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ 'da zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları

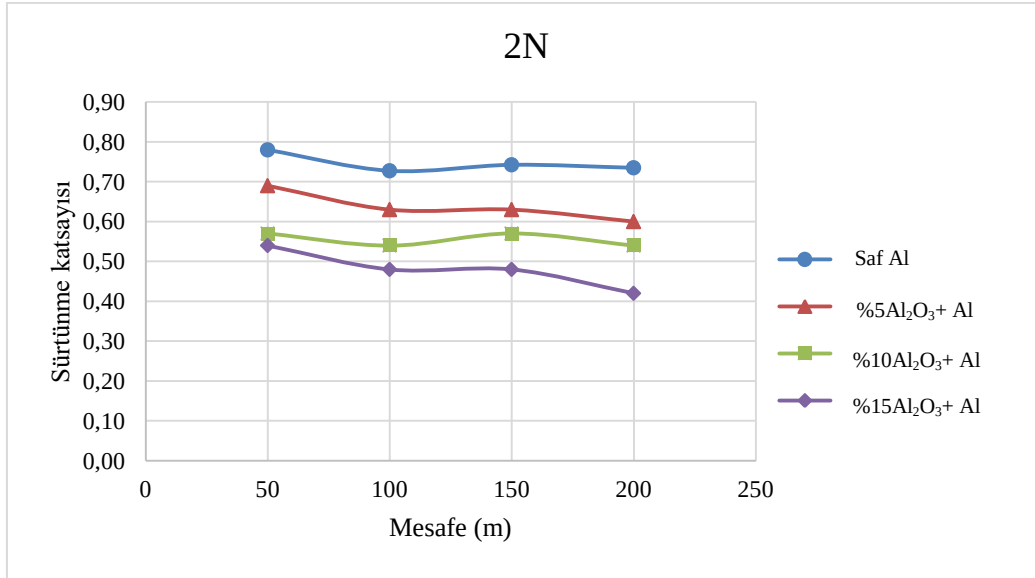


Şekil 8.12. %10 Al₂O₃+Al’da zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları

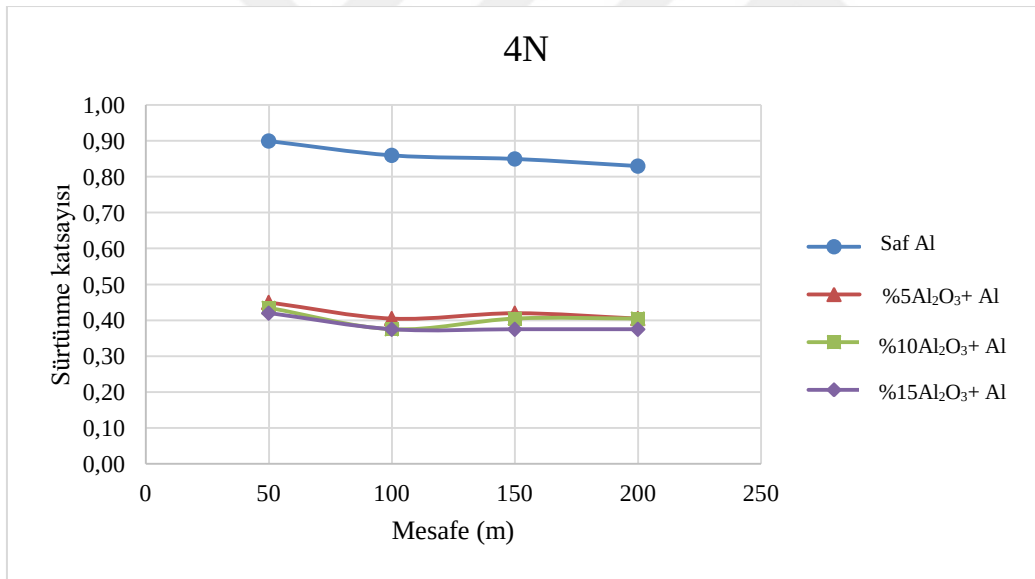


Şekil 8.13. %15 Al₂O₃+Al’da zımpara numaralarına göre yüke bağlı ağırlık kayıpları

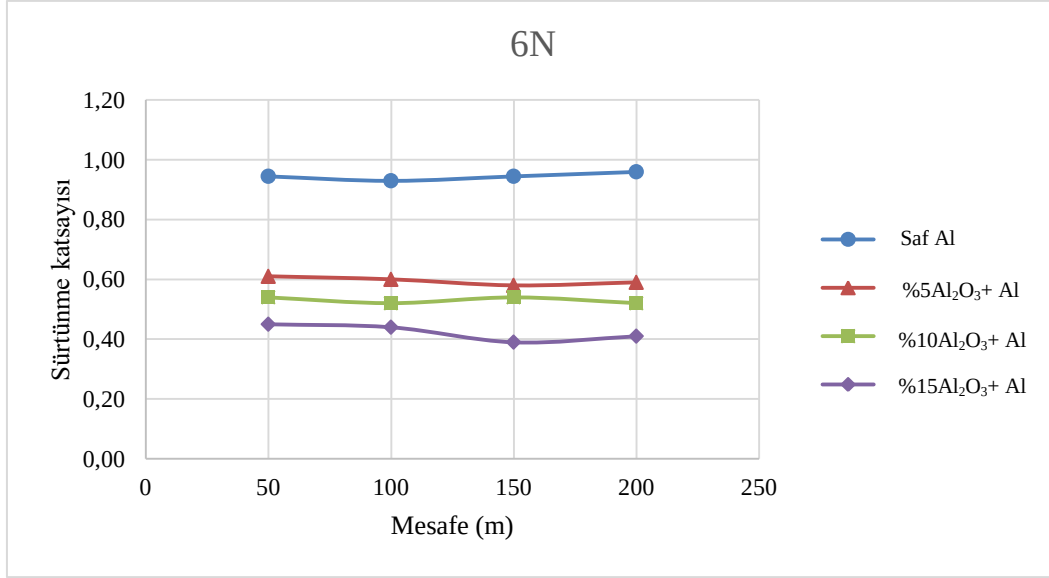
2 N, 4 N, 6 N ve 8 N yüklerinde ve 320 numaralı zımparada yapılan aşınma testi sonucu sürtünme katsayısının mesafeye bağlı olarak değişimini gösteren grafikler Şekil 8.14, 8.15, 8.16 ve 8.17’de verilmiştir. 2 N yük altında sürtünme katsayısı saf alüminyumda, takviyeli kompozit numunelere göre daha yüksektir. Alümina takviye oranının artması sürtünme katsayısını düşürmüştür (Şekil 8.14). Aynı durum uygulanan diğer yüklerde de geçerlidir.



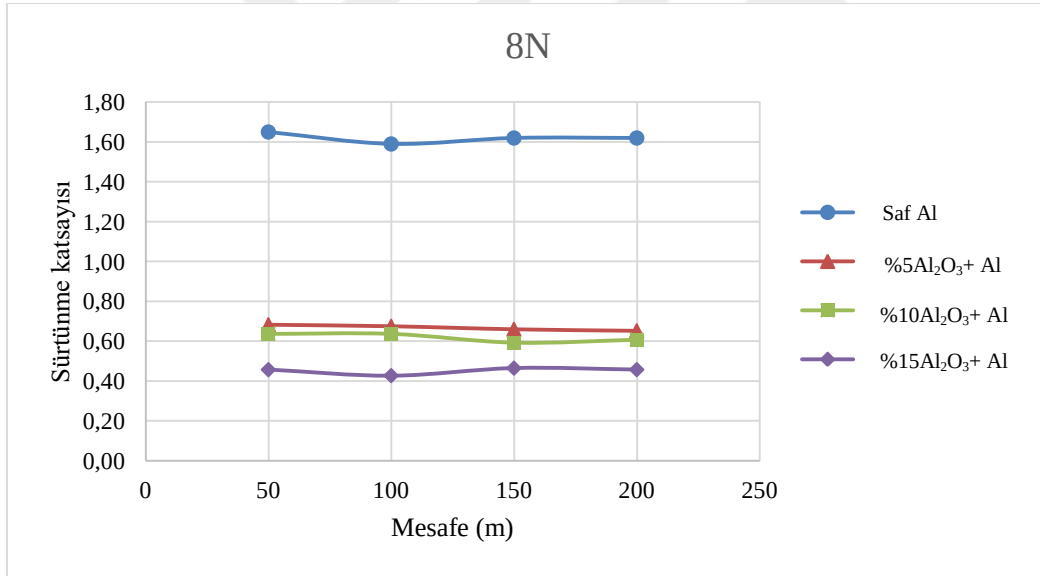
Şekil 8.14. 320 numaralı zımparada 2 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayısındaki değişim



Şekil 8.15. 320 numaralı zımparada 4 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayısındaki değişim

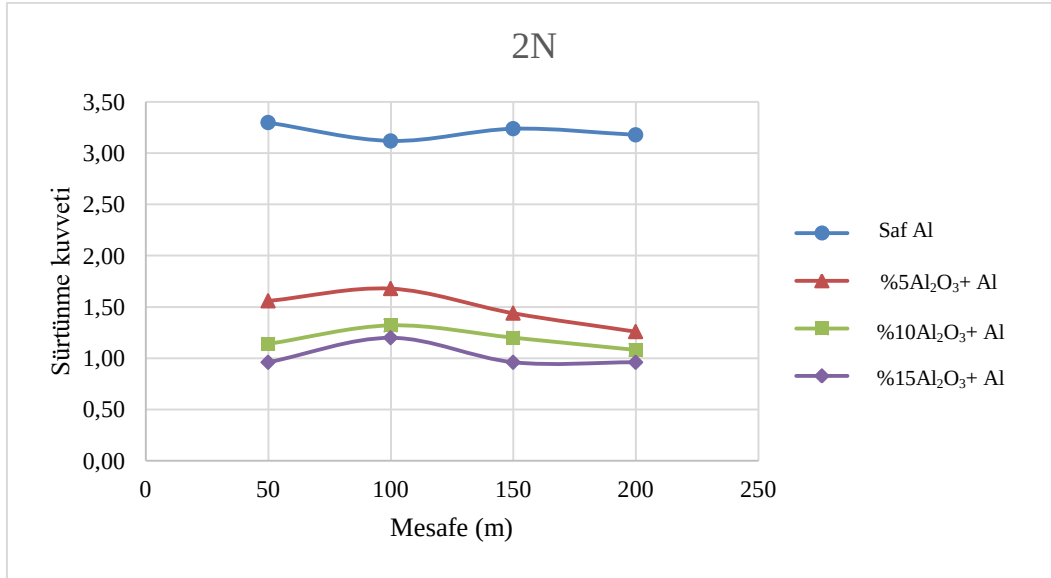


Şekil 8.16. 320 numaralı zımparada 6 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayısındaki değişim

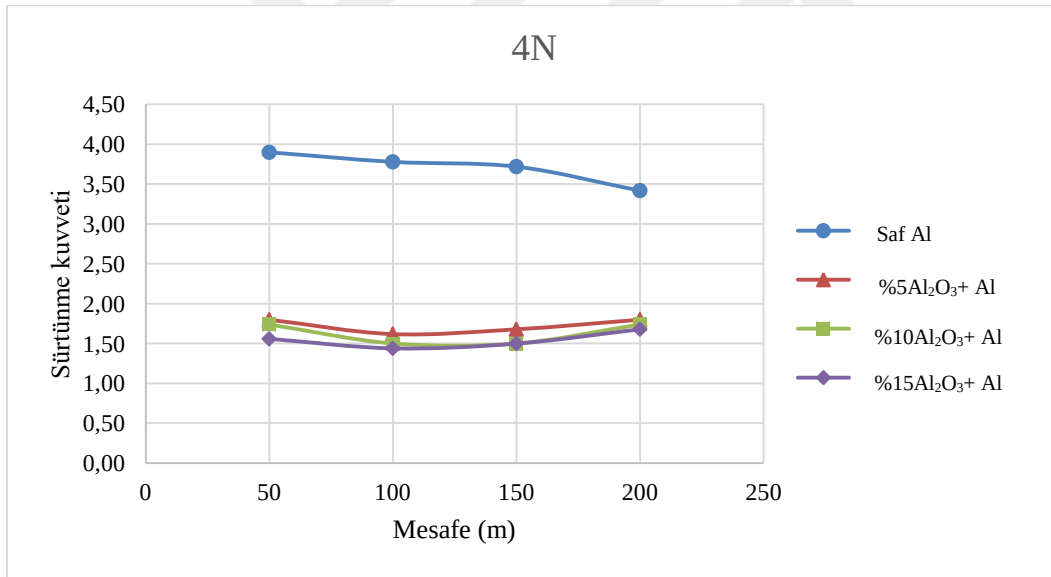


Şekil 8.17. 320 numaralı zımparada 8 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme katsayısındaki değişim

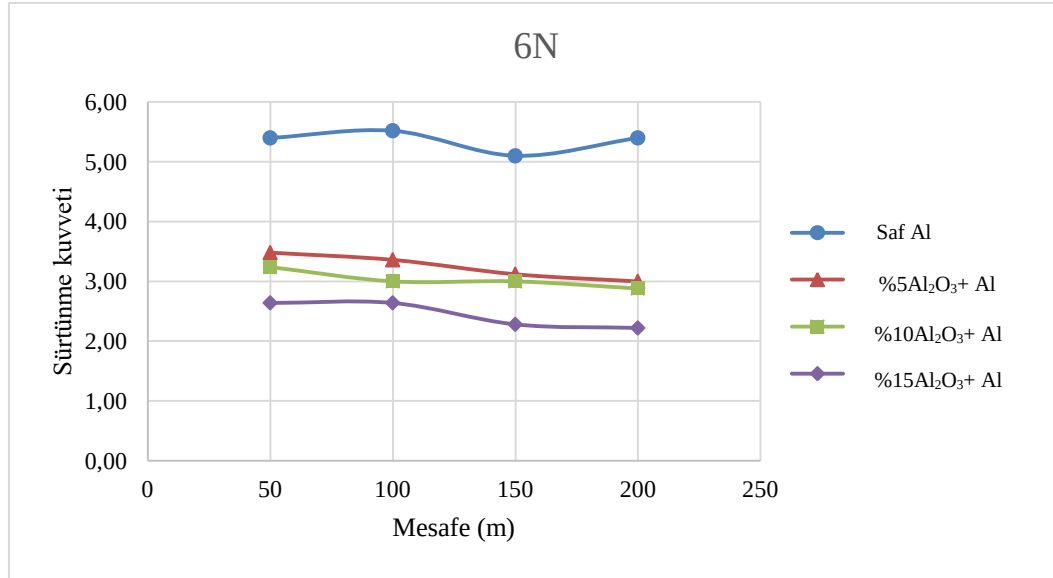
Sürtünme kuvveti grafikleri de sürtünme katsayısı grafiklerine benzer şekildedir (Şekil 8.18, 8.19, 8.20, 8.21). Aşınma testlerinde, en çok malzeme kaybı meydana gelen alüminyumun, sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerleri diğer malzemelere göre daha yüksektir. Genel olarak farklı yüklerde, takviye oranı artmasıyla sürtünme katsayısı ve kuvvet değerleri azalmıştır.



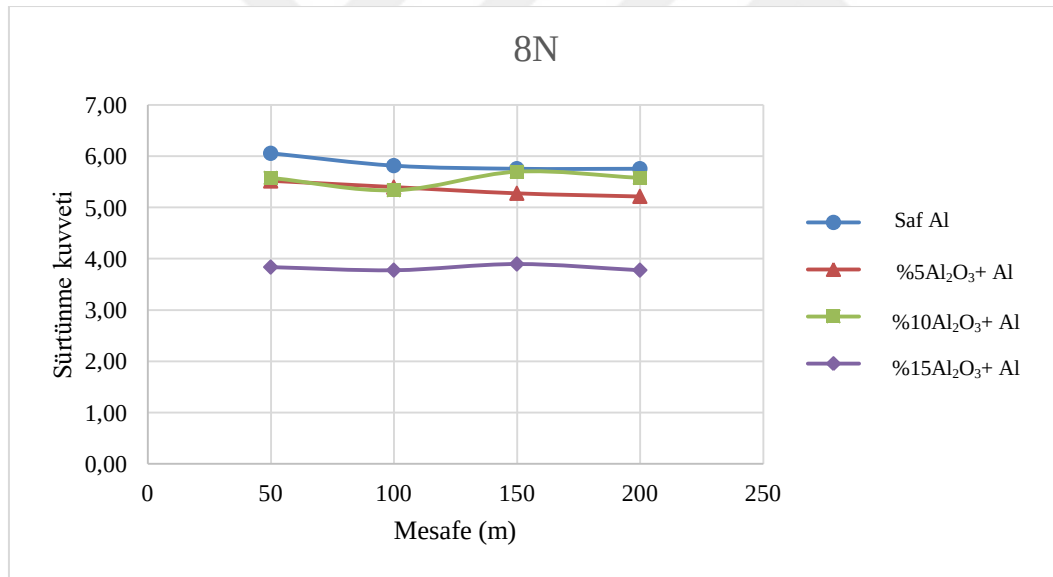
Şekil 8.18. 320 numaralı zımparada 2 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvvetindeki değişim



Şekil 8.19. 320 numaralı zımparada 4 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvvetindeki değişim



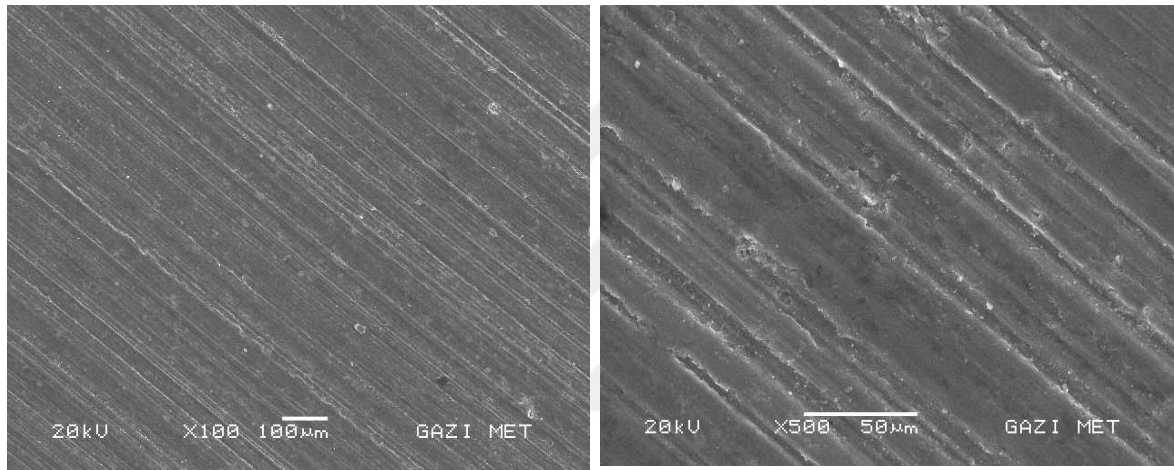
Şekil 8.20. 320 numaralı zımparada 6 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvvetindeki değişim



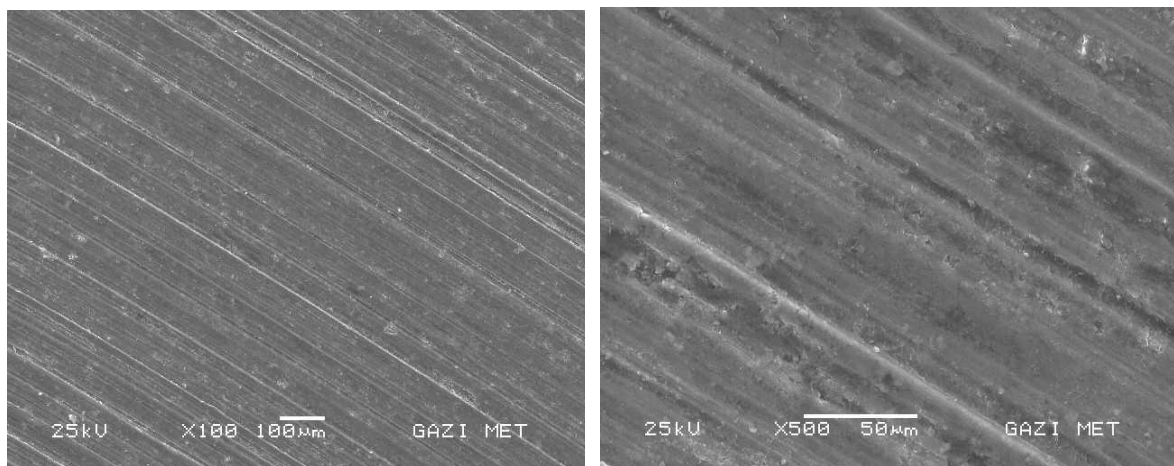
Şekil 8.21. 320 numaralı zımparada 8 N yük altında mesafeye bağlı sürtünme kuvvetindeki değişim

8.7. Aşınma Yüzeyleri

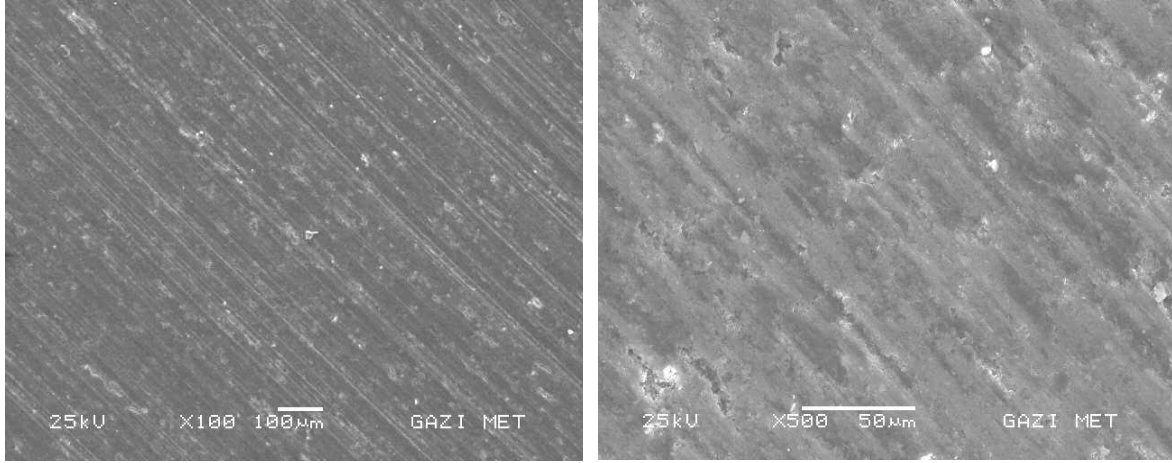
Aşınma testi sonrası elektron mikroskobunda aşınan yüzeylere bakıldığında, saf alüminyumda abrasiv aşınma izlerinin takviyeli kompozite göre daha belirgin olduğu görülmektedir (Resim 8.17, 8.18, 8.19 ve 8.20). Al_2O_3 takviye oranı arttıkça aşınma izleri giderek azalmaktadır. Bu durum elde edilen ağırlık kaybı sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. En iyi aşınma direncini % 15 Al_2O_3 içeren kompozit malzeme göstermiştir.



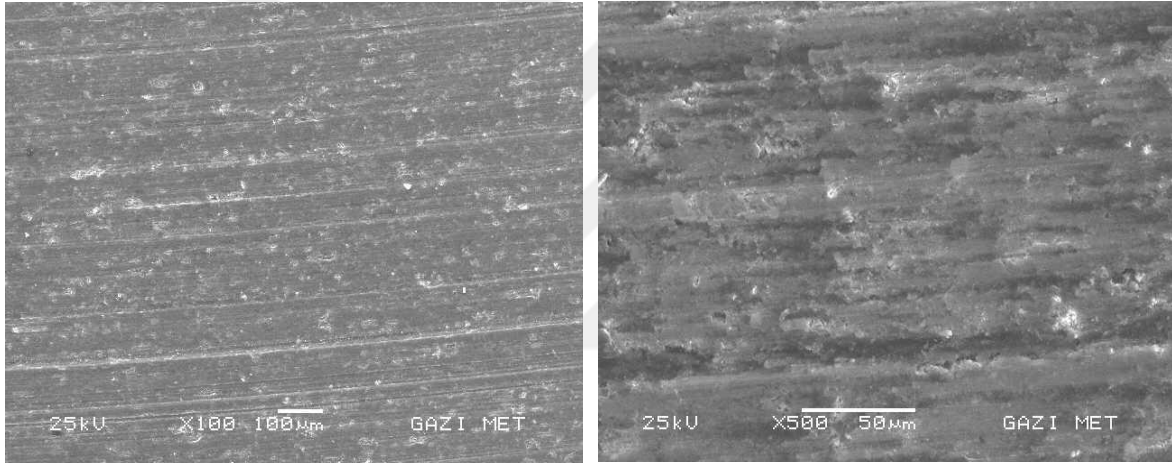
Resim 8.17. Saf alüminyumda abrasiv aşınma izleri



Resim 8.18. % 5 Al_2O_3 + Al kompozitte abrasiv aşınma izleri

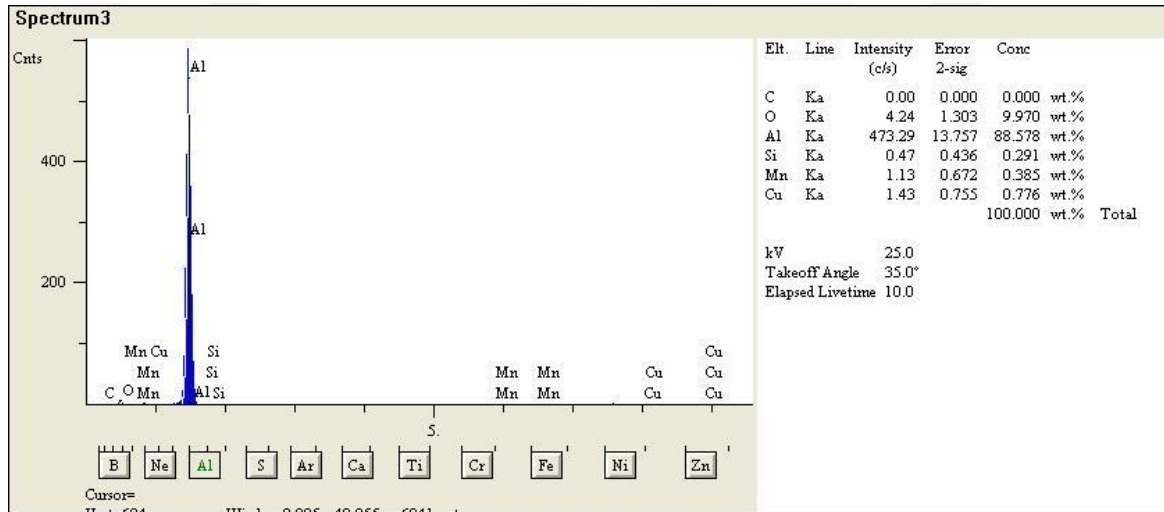
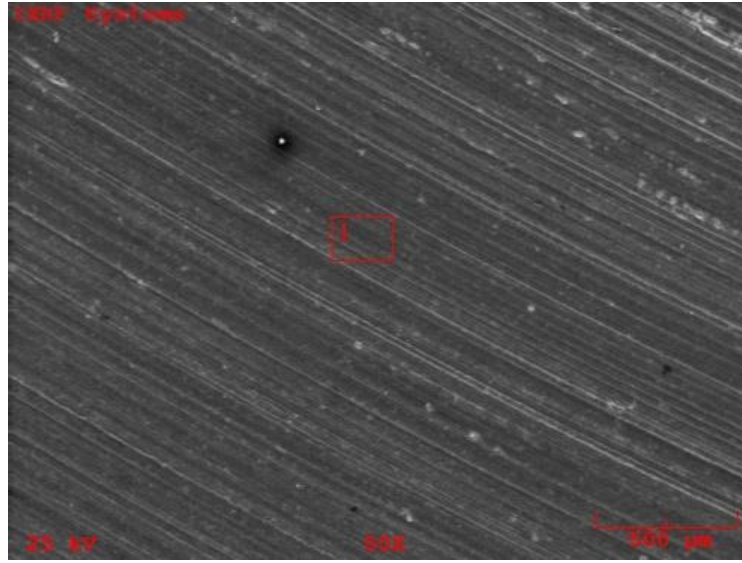


Resim 8.19. % 10 Al_2O_3 + Al kompozitte abrasiv aşınma izleri

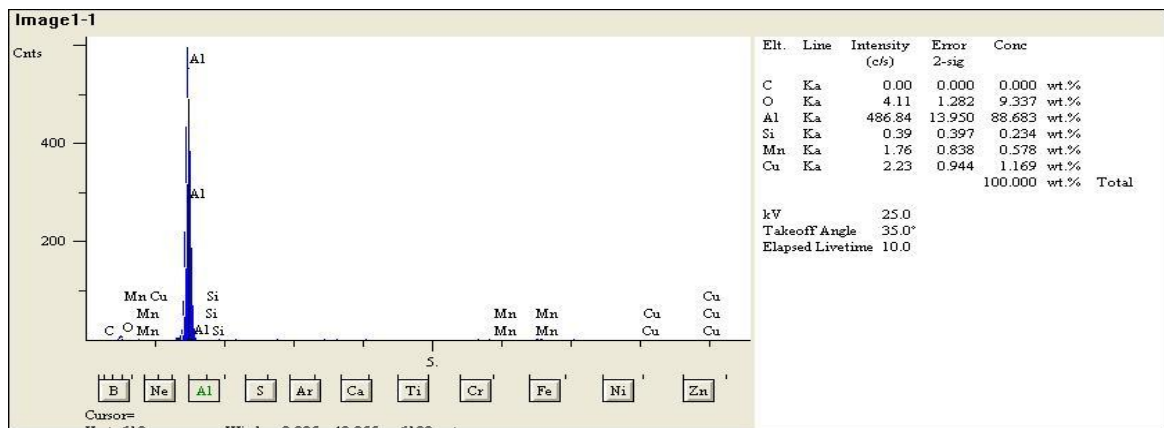


Resim 8.20. % 15 Al_2O_3 + Al kompozitte abrasiv aşınma izleri

Ayrıca aşınan yüzeylerden EDS analizleri alınmıştır. Alüminyuma ait EDS analizleri incelendiğinde, genel olarak alınan analiz (Resim 8.21) ile 1 numaralı bölgeden alınan analiz (Resim 8.22) arasında fark görülmemiştir. Aynı şekilde % 5, 10 ve 15 Al_2O_3 içeren kompozitte noktasal analiz ile genel analiz arasında fark yoktur. Resim 8.22’de görüldüğü üzere yapıda % 88 alüminyumun yanında % 9 oksijen bulunmaktadır. Bu durum aşınan yüzeyde oksitlenmenin meydana geldiğini göstermektedir.

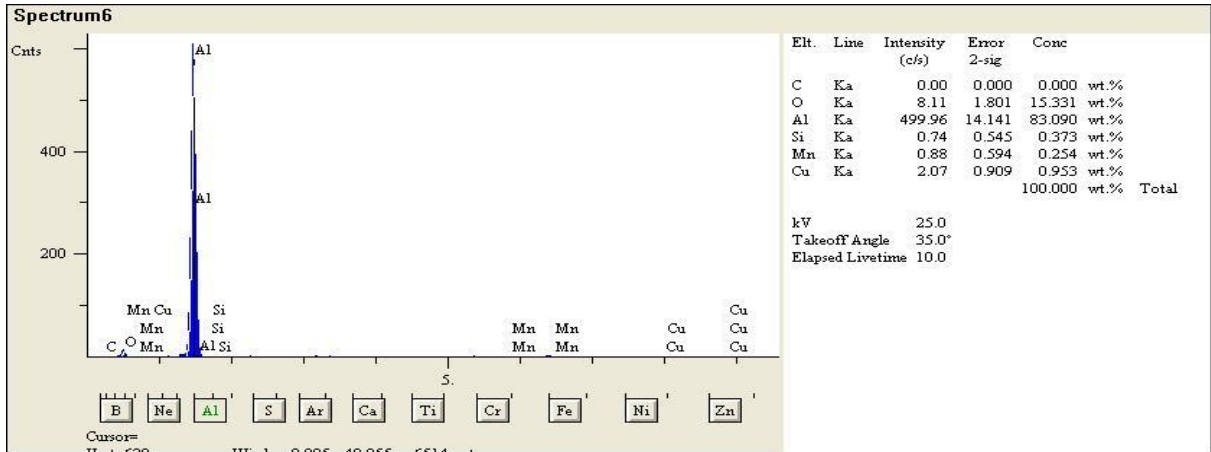
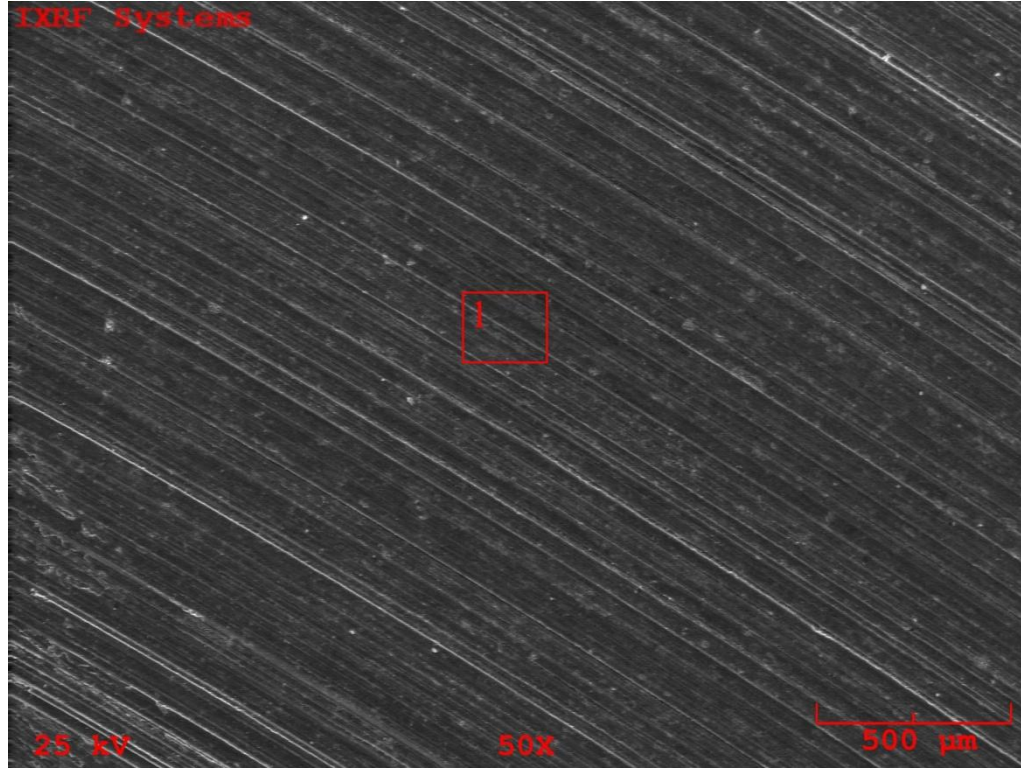


Resim 8.21. Alüminyumun aşınma yüzeyinin genel olarak EDS analizi

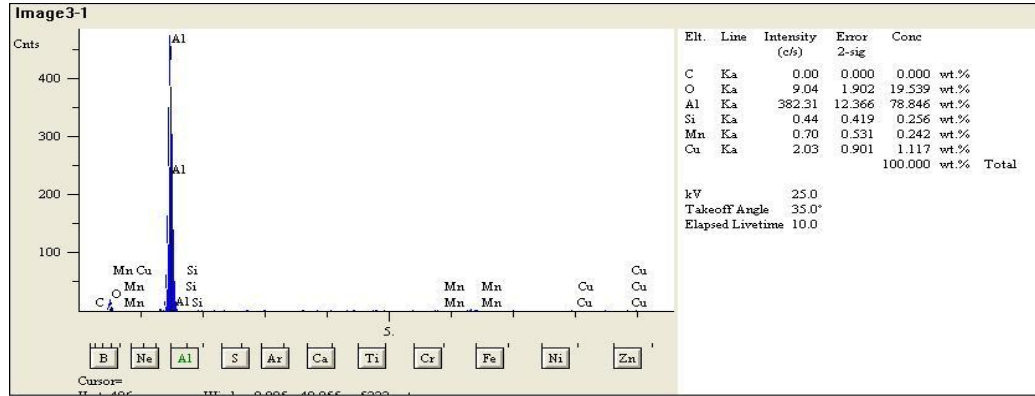
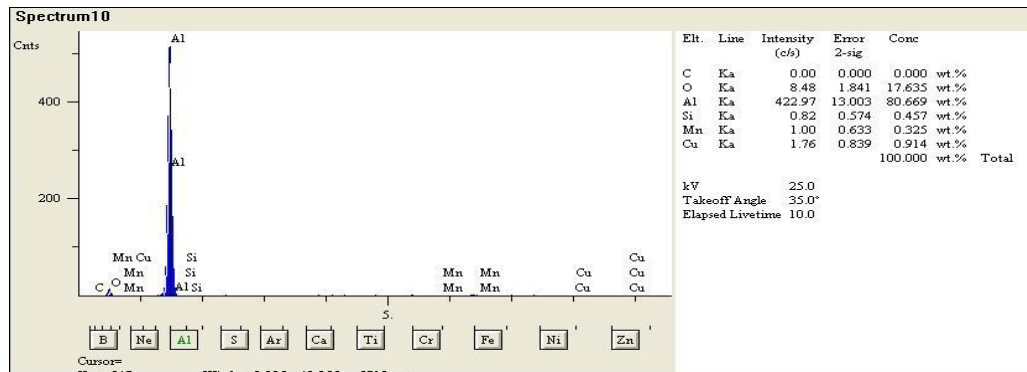
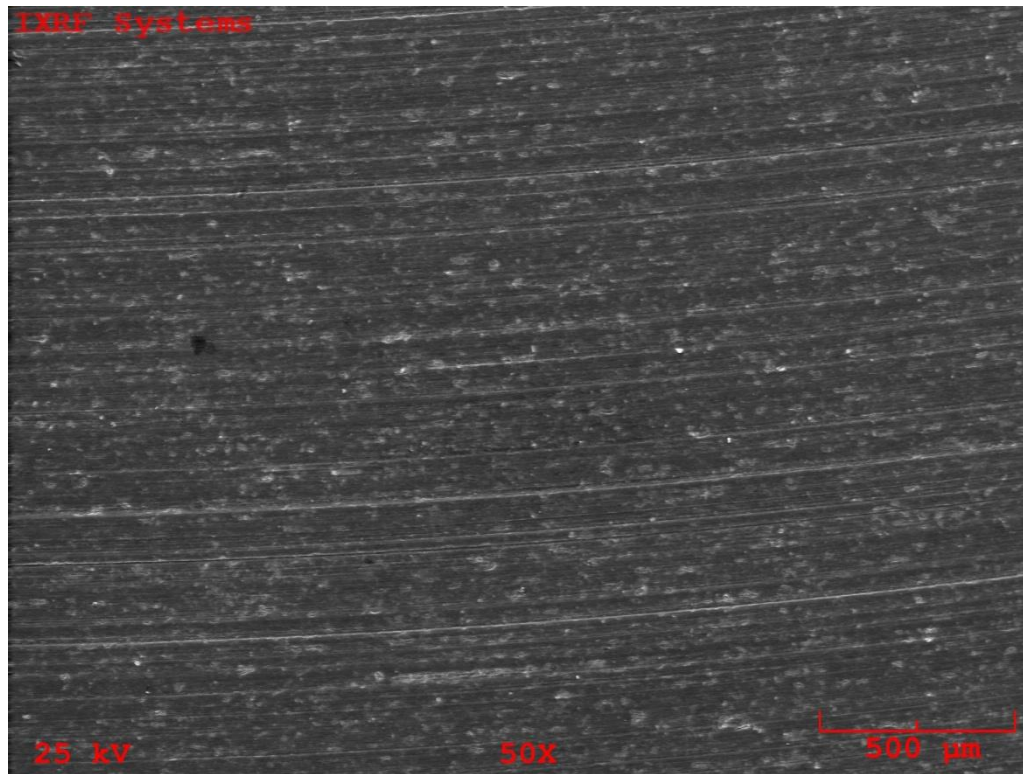


Resim 8.22. Alüminyumun aşınma yüzeyinde 1 numaralı bölgede EDS analizi

% 5, 10 ve 15 Al_2O_3 içeren kompozitte aşınma yüzeylerinin EDS analizlerine bakıldığında (Resim 8.23 - 8.27 arası) alüminyuma göre oksijen oranında görülen artış takviye elemanındaki oksijenden kaynaklanmaktadır.



Resim 8.23. % 5 Al_2O_3 içeren kompozitte aşınma yüzeyi EDS analizi

Resim 8.26. % 10 Al_2O_3 içeren kompozitte 1 numaralı nokta EDS analiziResim 8.27. % 15 Al_2O_3 içeren kompozitte aşınma yüzeyi EDS analizi

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Al-Al₂O₃ toz metal kompozit malzeme üretilmiş ve takviye oranının kompozitin yoğunluğuna, sertliğine ve abrasiv aşınma davranışına olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Başlangıçta matris yapıyı oluşturacak alüminyum toz ile takviye elemanı konumundaki alüminanın yüksek enerjili atritör içerisinde çelik bilyelerle birlikte mekanik olarak karıştırılması her iki tozun birbiri içerisinde homojen olarak dağılımını tam olarak sağlamıştır.

Metalografik incelemelerde sıcak presleme işlemi sonucu sinterleşmenin yüksek oranda gerçekleştiği görülmüştür. Bu sayede gözeneklerin neredeyse tamamı kaybolmuş ve yüksek yoğunlukta parçalar üretilebilmiştir. Kompozit malzemelerde sıcak presleme sonrası % 5, 10 ve 15 Al₂O₃ içeren kompozit numunelerde sırasıyla % 97,8-95,7-95,2 yoğunluk değerleri elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen sıcak presleme ile aynı şartlarda matris yapıyı oluşturan Al tozdan üretilen toz metal parçaya göre % 15 Al₂O₃ içeren kompozit malzemede % 107 olarak sertlik artışı sağlanmıştır.

Yapılan abrasiv aşınma testleri sonuçlarında,

- Yük artarken bütün numunelerde aşınma değerlerinin arttığı,
- SiC zımpara kağıtları 600-400-320 numara olarak kabalaşırken aşınmanın arttığı,
- Malzemelerde takviye oranı artarken aşınma kayıplarının azaldığı görülmüştür.

Maksimum aşınma performansı % 15 Al₂O₃ içeren kompozit malzemede görülmüş olup, Al toz metal parçaya göre bütün yükler ve aşındırıcı ortamlarda % 66-90 arasında aşınma değerleri azalmıştır.

Bundan sonra yapılacak benzer aşınmalarda, yük sabit tutularak farklı aşındırma mesafelerindeki kompozitin aşınma davranışı araştırılabilir.

Üretilen kompozit malzemenin farklı aşındırıcı ortamlardaki (çelik disk) aşınma performansı ve ortaya çıkan aşınma mekanizmaları araştırılabilir.

Aşınma sürecinde arayüzeyde oluşan ısının kompozit malzemenin aşınma davranışına olan etkileri araştırılabilir.



KAYNAKLAR

1. Deniz, S. (2000). *Al₂O₃ Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Mekanik ve Fiziksel Özellikleri ile Mikroyapı Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-35.
2. Şahin, Y., Öksüz, E. (2012). *TM metodu ile üretilen Al₂O₃ takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin aşınma davranışı için istatistiksel model oluşturulması*. 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi Balıkesir, 442-443.
3. Şahin, Y. (2015). *Kompozit Malzemelere Giriş*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 38-145.
4. Ekinci, V.Ş. (2007). *Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-58.
5. Arslan, Z., Şimşir, M., Onurlubaşgil, T., Karaca, B., Akkan, H. (2015). *Toz metalurjisi yöntemi ile kompozit kam üretimi ve karakterizasyonu*. 3. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Kuşadası.
6. Yılmaz, O., Buytoz, S. (2001). Abrasive wear of Al₂O₃ reinforced aluminium based MMCs. *Composites Science and Technology*, 61(2001), 2381-2392.
7. Ünlü, B.S. (2008). Investigation of tribological and mechanical properties Al₂O₃-SiC reinforced Al composites manufactured by casting or P/M method. *Materials and Design*, 29(2008), 2002-2008.
8. Kök, M., Özdin, K. (2006). Wear resistance of aluminium alloy and its composites reinforced by Al₂O₃ particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2007), 301-309.
9. Prasad, V.J., Rao, N.M., Kamaluddin, S. (2016). A study of microstructure and tribological properties of stir cast Al metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 4(2017), 9264-9271.
10. Kurt, H., Arık, H., Bağcı, C. (2016). Abrasive wear, structure, and mechanical aspects of Al- Al₂O₃ composites fabricated using various mixing media during P/M routes. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 55(3-4), 141- 150.
11. Sidar, B. (2001). *Examination Of Abrasive Wear Behaviour Of Steels*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, İstanbul, 9-16.
12. Özmen, Y. (2004). Makine elemanlarının tribolojik hasarları ve uygun malzeme seçimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 31-37.
13. Buytoz, S., Eren, H. (2007). Al metal matris kompozitlerin abrasiv aşınma performansına takviye elemanlarının etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim Dergisi*, 19(2), 209-216.

14. Sandal, R. (2009). *Al-Al₂O₃ Kompozit Malzeme Üretimi ve Difüzyon Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-35.
15. Kurt, H. (2010). *Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-62.
16. Callister, W., Rethwisch, D. *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* (çev. K. Genel). Nobel Yayıncılık. (Eserin orijinali 1985’de yayımlandı), Ankara, 627-662.
17. Reddy, M.P., Ubaid, F., Shakoor, R.A., Parande, G., Manakari, V., Mohamed, A.M.A. and Gupta, M. (2017). Effect of reinforcement concentration on the properties of hot extruded Al-Al₂O₃ composites synthesized through microwave sintering process. *Materials Science and Engineering*, A(606), 60-69.
18. Değerli, S. (2002). *Bayer Prosesinin Ara Atık Ürünü Olan Alüminyum Hidroksit Kabuğundan Aktif Alümina Eldesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 9-17.
19. Rahimian, M., Parvin, N., Ehsani, N. (2009). Investigation of particle size and amount of alumina on microstructure and mechanical properties of al matrix composite made by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering A*, 527(2010), 1031-1038.
20. Kaczmar, J.W., Pietrzak, K., Wlosinski, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 58-67.
21. Uygur, İ., Saruhan, H. (2004). Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 167-173.
22. Şen, O. (2005). *TiO₂ Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 7-28.
23. Buytoz, S. (1999). *Al Matrisli Al₂O₃ Takviyeli Kompozit Malzemelerin Katı Hal Birleştirme Teknikleri ile Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 34-43.
24. Mutlu, İ. (2012). Alüminyum matrisli metal kompozit malzemelerin üretilmesi. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(1), 31-36
25. Tatar, C., Özdemir, N. (2010). Investigation of thermal conductivity and microstructure of the α -Al₂O₃ particulate reinforced aluminum composites (Al/ Al₂O₃-MMC) by powder metallurgy method. *Physica B*, 896-899.

26. Srivatsan, T.S., Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A. and Lavernia, E.J. (1991). Processing techniques for particulate reinforced metal aluminium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 26(22), 5965-5978.
27. Ahlatcı, H. (2003). *Alüminyum Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3-147.
28. Miracle, D.B. (2005). Metal matrix composites- from science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 65(2005), 2526-2540.
29. Askeland, D.R. *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri 2* (Çev. M. Erdoğan), Nobel Yayın Dağıtım (Eserin orijinali 1989'da yayımlandı), 457-655.
30. Mertgenç, E. (2004). *Savurma Döküm Yöntemiyle Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretiminin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 5-25.
31. Kaya, T. (2006). *Sol-Jel Yöntemi ile ZrO_2 - Al_2O_3 Seramik Kompozit Oksit Üretimi, Karakterizasyonu ve ZrO_2 'nin Parametrik Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-21.
32. Ekinci, V.Ş., Bağcı, C., Arık, H. (2011). Effect of Al_2O_3 content and milling time on microstructure and mechanical properties of aluminum metal matrix composites. *Experimental Techniques*, 38(2014), 66-73.
33. Öztürk, M. (2007). *SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 5- 76.
34. Das, S., Behera, R., Datta, A., Majumdar, G., Oraon, B. and Sutradhar, G. (2010). Experimental investigation on the effect of reinforcement particles on the forgeability and the mechanical properties of aluminum metal matrix composites. *Materials Sciences and Applications*, 1(2010), 310-316.
35. Akın, G. (2006). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2-25.
36. Kok, M. (2004). Production and mechanical properties of Al_2O_3 particle-reinforced 2024 Aluminium Alloy Composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(2005), 381-387.
37. Ray, S. (1993). Synthesis of cast metal matrix particulate composites. *Journal of Materials Science*, 28, 5397-5413.

38. Söyler, M. (2007). *Toz Metalurjisi ve Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 8-20.
39. German, R.M. *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri* (çev. S. Sarıtaş, M. Türker ve N. Durlu). Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05 (Eserin orijinali 2007'de yayımlandı), 61-331.
40. Arık, H., Sarıtaş, S. (1996). *Silisyum nitrür tipi seramiklerin üretilmesi ve mekanik özellikleri*. 1.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Ankara, 247-253.
41. Cambroner, C.E.G., Sanchez, E., Ruiz Romen, J.M. and Ruiz Prieto, T.M. (2003). Mechanical characterization of AA7015 aluminium alloy reinforced with ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144.
42. Yurtkuran, E. (2011). *T/M ile Üretilmiş Alüminyum Esaslı Malzemelerin Alaşım Elementleri ve Takviye Elemanı İçermelerine Bağlı Tel Erezyonda İşlenebilirliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 13-40.
43. Evans, C. (1993). Green strength of compacted metal powders. *Pyron Corporation*, 288-289.
44. Çıtak, R. (1998). *Metalik Baryum-Alüminyum Başlangıç Tozlarının Düşük Sıcaklıkta Oksidasyonu ile Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-26.
45. Arık, H., Sarıtaş, S., Gündüz, M. (1999). Production of Si_3N_4 by carbothermal reduction and nitridation of sepiolite. *Journal of Material Science*, 34, 835-842.
46. Acılar, M. (2002). *Al/SiC Kompozitlerin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43-63.
47. Davidson, J.E. (1996). Compressibility of metal powders. *Quebec Metal Powders Ltd*, 286-287.
48. Sevinçtav, S., Günay E., Günay, V. (1995). *Modifiye sol-jel yöntemi ile Al_2O_3 üretimi*. 8.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi İstanbul, 575-581.
49. Lawley, A. (1986). Modern powder metallurgy science and technology. *Journal of Metals*, 15-25.

50. Işiker, V. Ögel, B. (1996). *Al-SiC kompozitlerinin üretiminde yatay bilyalı değirmen kullanımı ve parçacık dağılımına etkisi*. 1.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Ankara, 377-385.
51. Kurt, A. (1992). *Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerinin Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-22.
52. Gölbaşı, Z. (2014). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Gözenekli Titanyum Esaslı İmplant Malzemelerin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 34-37.
53. Mabuchi, M., Higashi, K. (2001). An Experimental investigation of a superplastic constitutive equation in Al-Mg-Si alloy composites reinforced with Si₃N₄ whiskers. *International Journal of Plasticity*, 17, 399-407.
54. Boothroyd, G., Dewhurst, P., Winston, K. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly*, CRC Press, US, 461-490.
55. Hanumanth, G.S., Irons, G.A. (1993). Particle incorporation by melt stirring for the production of metal matrix composites. *Journal of Material Science*, 2459-2465.
56. Boz, M. (2003). *Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme-Aşınma Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-29.
57. Önel, K. (1995). Süreksiz SiC katkılı alüminyum matrisli kompozitler. *Metalurji Dergisi*, 46-53.
58. Chung, W.S., Lin, S.J. (1996). Ni-coated SiC reinforced aluminium composites processed by vacuum infiltration. *Materials Research Bulletin*, 1437-1447.
59. Algan, İ.B. (2015). *Organik Fren Balatalarında Kullanılan Metal Tozlarının Aşınma ve Sürtünme Performansının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-22.
60. Tokdemir, M. (2007). *Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Demir Esaslı T/M Malzemelerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 7-24.
61. Sirek, F. (2015). *DeneySEL Aşınma Modeli Verileri İçin Uygun Parametre Seçimi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-21.
62. Sarıkaya, Ö. (2007). *Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri*. Sakarya: Y.Y Yayın, 2-80.
63. Özay, Ç. (2004). *Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Cu-C-Al₂SiO₅ Kompozitinin Abrasiv Aşınma Dayanımının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 28-30.

64. Owsalou, R.G. (2012). *Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 16- 37.
65. Özdin, K. (2006). *Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 19-22.
66. Aktaş, H. (2007). *Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 24-26.
67. Mondal, D. P., Das, S., Jha, A.K. and Yegneswaran, A.H. (1998). Abrasive wear of Al alloy- Al₂O₃ particle composite: a study on the combined effect of load and size of abrasive. *Wear*, 223(1998), 131-138.
68. Lee, G. Y., Dharan, C.K.H., Ritchie, R.O. (2001). A physically based abrasive wear model for composite materials. *Wear*, 252(2002), 322-331.
69. Bhansali, K.J., Mehrabian, R. (1982). Abrasive wear of Al matrix composites. *Journal of Metals*, 34(9), 30-34.
70. Zhang, J., Alpas, A.T. (1993). Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate reinforced aluminum alloys. *Materials Science and Engineering A161*, 273-284.
71. Axen, N., Alahelisten, A., Jaconson, S. (1994). Abrasive wear of alumina fibre reinforced aluminum. *Wear* 173, 95-104.
72. Imbeni, V., Hutchings, I.M., Breslin, M.C. (1999). Abrasive wear behaviour of an Al₂O₃-Al co-continuous composite. *Wear*, (233-235).
73. Wang, A., Hutchings, I.M. (1989). Wear of alumina fibre aluminum metal matrix composites by two body abrasion. *Materials Science and Technology*, 71-76.
74. Sharifi, H., Ostovan, K., Tayebi, M. and Rajaei, A. (2017). Dry sliding wear behavior of open-cell Al-Mg/ Al₂O₃ and Al-Mg/SiC- Al₂O₃ composite preforms produced by a pressureless infiltration technique. *Tribology International*, 116(2017), 244-255.
75. Pramanik, A. (2015). Effects of reinforcement on wear resistance of aluminum matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(2016), 348-358.
76. Abouelmagd, G. (2004). Hot deformation and wear resistance of P/M aluminium metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 155(2004), 1395-1401.
77. Arık, H., Semerci, P., Kırmızı, G. (2017). Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al₂O₃ takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve aşınma davranışının araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(4), 87-97.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YALÇINKAYA, Furkan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.05.1992, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (537) 857 89 97
 e-mail : furkanylcnkaya@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2018
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi/ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2015
Lise	Bekir Gökdağ Lisesi	2010

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Yalçinkaya, F., Arık, H. (2018). *Toz metalurjisi yoluyla Al-Al₂O₃ kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. 1.Uluslararası Hafif Alaşımlar ve Kompozit Malzemeler Konferansı, Karabük, 280-281.

Hobiler

Yüzmek, Satranç, Sudoku vb akıl oyunları



GAZİ GELECEKTİR..