



**ALÜMİNYUM MATRİSLİ VE SiC TAKVİYELİ TOZ METAL KOMPOZİT  
MALZEMENİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE PRESLEME  
SICAKLIĞININ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Fevzi TAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2023**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Fevzi TAŞ

28/04/2023

ALÜMİNYUM MATRİSLİ VE SiC TAKVİYELİ TOZ METAL KOMPOZİT  
MALZEMENİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE PRESLEME SICAKLIĞININ  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Fevzi TAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

ÖZET

Bu çalışmada, sıcak presleme ile alüminyum matrisli SiC takviye kompozit malzeme üretilmiştir. Alüminyum ve SiC tozları içerisinde 10 mm çapta çelik bilye bulunduran turbula cihazında 2 saat süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma sonrası çelik kalıp içerisinde konan tozlardan tek yönlü pres ile 200 MPa basınç altında 2 saat süreyle değişen sıcaklıklarda (500, 520, 540, 560 ve 580 °C) 14x32x52 mm boyutlarında 5 adet toz metal kompozit blok numune üretilmiştir. Üretilen blok kompozit numunelerden çapraz kırılma ve aşınma test numuneleri tel erezyon yöntemiyle kesilerek hazırlanmıştır. Üretilen numunelerin yoğunlukları belirlenmiş, sertlik ölçümleri alınmış ve metalografik incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin çapraz kırılma testleri ve pin-on-disk cihazında aşınma performansları incelenmiştir. Aşınma testleri oda sıcaklığında ve kuru ortamda pin-on-disk cihazı kullanılarak; hardox 500 çeliği aşındırıcıda 2000 m mesafede 5,10,15N değişen yükler altında olmak üzere 15 aşındırma testi gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerden elde edilen yüksek yoğunluk değerleri tüm presleme sıcaklıklarında yeterli sinterleşmenin sağlandığını, mikroyapı resimleri SiC partiküllerinin matris yapı içerisinde genellikle homojen dağıldığını göstermektedir. SiC içeren kompozit numunelerin mekanik özelliklerinde alüminyum toz metal parçanın mekanik özelliklerine göre önemli iyileşmelerin olduğu görülmüştür. Sertlik değerleri hemen hemen aynı sonuçları vermekle birlikte en yüksek sertlik 40,86 HBw değeri ile 580 °C presleme sıcaklığında elde edilmiştir. Pin-on-disk aşınma testinde sonuçları ağırlık kayıplarına göre hesaplanmıştır. Kompozitlerin aşınma direncinin alüminyum toz metal malzemeye göre daha iyi olduğu, deney sonuçlarına göre bu çalışma açısından en ideal çalışma sıcaklığının 560 °C olduğu saptanmıştır. Aşınma sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde bütün numunelerin kompozisyonu, takviye içeriği aynı olsa da sıcak presleme sürecindeki sıcaklık farkından dolayı sıcaklık artarken üretilen kompozit malzemenin aşınma direncinin arttığı ve aşınma kayıplarının azaldığı görülmektedir. Bazı sonuçların bu değerlendirmeye uymuyor olmasının sebebi ise üretilen malzemenin toz metal kompozit malzeme olmasından kaynaklı küçükte olsa yapısal farklılıklar gösterebileceği, bu tip malzemelerde tam olarak homojen bir yapının sağlanamayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 91528

Anahtar Kelimeler : Toz metalurjisi, sıcak presleme, SiC, kompozit malzeme, aşınma

Sayfa Adedi : 107

Danışman : Prof. Dr. Halil ARIK

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRESSING TEMPERATURE ON THE WEAR  
PROPERTIES OF ALUMINUM MATRIX AND SiC REINFORCED POWDER METAL  
COMPOSITE MATERIAL

(M. Sc. Thesis)

Fevzi TAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

ABSTRACT

In this study, aluminum matrix SiC reinforcement composite material was produced by hot pressing. Aluminum and SiC powders were mixed for 2 hours in a turbula device containing 10 mm diameter steel balls. After mixing, 5 powder metal composite block samples with dimensions of 14x32x52 mm were produced from the powders placed in the steel mold with a one-way press under 200 MPa pressure for 2 hours at varying temperatures (500, 520, 540, 560 and 580 °C). Cross-fracture and abrasion test specimens from the produced block composite specimens were prepared by cutting by wire erosion method. Densities of the produced samples were determined, hardness measurements were taken and metallographic examinations were made. In addition, the cross-fracture tests and wear performances of the samples in the pin-on-disc device were examined. Wear tests at room temperature and dry environment using pin-on-disc device; 15 abrasion tests were carried out on hardox 500 steel abrasive at a distance of 2000 m under varying loads of 5,10,15N. The high density values obtained from the composite samples show that sufficient sintering is achieved at all pressing temperatures, and the microstructure pictures show that the SiC particles are generally homogeneously dispersed in the matrix structure. It was observed that there were significant improvements in the mechanical properties of the composite samples containing SiC compared to the mechanical properties of the aluminum powder metal part. Although the hardness values give almost the same results, the highest hardness was obtained with a HBw value of 40.86 and at a pressing temperature of 580 °C. The results of the pin-on-disc wear test were calculated according to the weight losses. It has been determined that the wear resistance of the composites is better than the aluminum powder metal material, and according to the test results, the ideal operating temperature for this study is 560 °C. When the wear results are evaluated as a whole, although the composition and reinforcement content of all samples are the same, it is seen that the wear resistance of the produced composite material increases and the wear losses decrease as the temperature increases due to the temperature difference in the hot pressing process. The reason why some results do not comply with this evaluation is that the material produced may show slight structural differences due to the powder metal composite material, and it has been concluded that a fully homogeneous structure cannot be achieved in this type of materials.

Science Code : 91528

Key Words : Powder metallurgy, hot stamping, SiC, composite material, wear

Page Number : 107

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Halil ARIK

## TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim sürecinde bilgi birikimi ve tecrübelerinden istifade ettiğim aynı zamanda danışman hocam olan Prof. Dr. Halil ARIK' a şükran ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar test çalışmalarımnda desteklerini esirgemeyerek yardımcı olan değerli Öğr. Gör. Ömer ŞAHİN ve Araştırma Görevlisi Tolga YILMAZ' a teşekkürlerimi sunarım.

Metalurji ve malzeme bilimi adına bilgi sahibi olmamda emeği olan Gazi ve Kırıkkale Üniversitesi, Metalurji ve malzeme bölümü tüm kadrosuna teşekkürü bir borç bilirim.

Beni yetiştirip bu günlere gelmemde emekleri olan annem, babam ve kardeşlerime, yolumuzun kesiştiği ilk günden bu tarafa her zaman yanımda olup, sabır ve desteklerinden dolayı sevgili eşim ve çocuklarıma teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM (Al) VE SİLİSYUM KARBÜR (SiC) ÖZELLİKLERİ	7
2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri.....	7
2.2. Silisyum Karbürün Özellikleri.....	7
2.3. Alüminyum Esaslı Metal Matrisli Kompozitler.....	8
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	11
3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri.....	11
3.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları .....	12
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	13
3.3.1. Matris malzemesine göre kompozitler.....	14
3.3.2. Takviye malzemesine göre kompozitler. ....	16
3.4. Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması .....	19
3.5. Kompozit Malzemelerin Üretimi .....	19
3.5.1. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri.....	21
4. TOZ METALURJİSİ.....	23

	<b>Sayfa</b>
4.1. Toz Üretimi .....	24
4.1.1. Mekanik yöntemler .....	24
4.1.2. Kimyasal yöntemler .....	27
4.1.3. Elektroliz ile üretim.....	27
4.1.4. Atomizasyon yöntemleri .....	28
4.2. Tozların Karıştırılması .....	33
4.3. Tozların Preslenmesi .....	35
4.3.1. Kalıpta presleme.....	36
4.3.2. İzostatik presleme.....	37
4.3.3. Toz enjeksiyon kalıpta presleme .....	39
4.3.4. Ekstrüzyon ile presleme .....	40
4.3.5. Haddelme ile presleme .....	40
4.4. Sinterleme İşlemi .....	41
4.5. Tam Yoğunluk İşlemleri .....	45
5. AŞINMA .....	47
5.1. Aşınma Türleri .....	47
5.1.1. Adhezif (Adhezyon) aşınma .....	48
5.1.2. Abrasiv (Abrazyon) aşınma .....	49
5.1.3. Yorulma aşınması.....	50
5.1.4. Korozyon aşınması.....	51
5.1.5. Erozyon aşınması .....	52
5.2. Aşınma Test ve Ölçüm Yöntemleri.....	52
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	57
6.1. Malzeme.....	57

	<b>Sayfa</b>
6.2. Karışım Tozların Hazırlanması .....	57
6.3. Karışım Tozlardan Sıcak Presleme ile Blok Malzeme Üretimi .....	58
6.4. Metalografik İnceleme .....	59
6.5. Yoğunlukların Ölçümü.....	61
6.6. Sertlik Ölçümleri .....	62
6.7. Çapraz Kırılma Testi .....	63
6.8. Aşınma Numuneleri .....	64
6.9. Aşınma Testi .....	65
<b>7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>67</b>
7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları.....	67
7.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları .....	68
7.3. Çapraz Kırılma Testi Sonuçları.....	69
7.4. Metalografik İnceleme Sonuçları .....	72
7.5. Aşınma Testi Sonuçları .....	83
7.6. Aşınma Yüzeyleri.....	91
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>97</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>107</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Al esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri .....	9
Çizelge 3.1. Kompozit malzemelerin kullanım alanları.....	13
Çizelge 4.1. Bazı malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ve süreleri.....	43
Çizelge 5.1. Tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve aşınma mekanizmaları.....	53
Çizelge 6.1. Kullanılan Al tozunun kimyasal kompozisyonu.....	57
Çizelge 6.2. Turbula cihazında karıştırma parametreleri.....	58
Çizelge 6.3. Kellers dağılayıcısının kompozisyonu .....	60
Çizelge 6.4. Çapraz kırılma testi numunelerinin boyut ölçüleri .....	63
Çizelge 6.5. Çelik disk üzerinde aşındırma parametreleri .....	65
Çizelge 7.1. Numunelerdeki presleme sıcaklığına bağlı yoğunluk değişimleri.....	67
Çizelge 7.2. Sertlik ölçüm sonuçları .....	69
Çizelge 7.3. Numunelerin yüke bağlı ve hardox 500 aşındırıcıda ağırlık kayıpları .....	84
Çizelge 7.4. Uygulanan yüke bağlı aşınma değerlerindeki değişim .....	85

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Matris ve takviye fazların çeşitli bağlanma tipleri .....	12
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin matris yapısına göre sınıflandırılması .....	14
Şekil 3.3. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması.....	16
Şekil 3.4. Parçacık takviyeli kompozit .....	17
Şekil 3.5. Fiberlerin kullanım şekilleri .....	17
Şekil 3.6. Tabakalı kompozitler .....	18
Şekil 3.7. Kompozitlerin mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması .....	19
Şekil 3.8. Geleneksel tek parça malzemeler ile kompozit malzemeleri karşılaştırma....	19
Şekil 4.1. Toz metalurjisi prosesleri .....	23
Şekil 4.2. Değirmende öğütme işlemi.....	25
Şekil 4.3. Mekanik alaşımlama işlemi. ....	26
Şekil 4.4. Elektroliz ile toz üretimi .....	28
Şekil 4.5. Elektroliz ile toz üretimi .....	28
Şekil 4.6. Atomizasyon ile toz üretim aşamaları .....	29
Şekil 4.7. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi .....	29
Şekil 4.8. Düşey gaz atomizasyonunun şematik gösterimi.....	30
Şekil 4.9. Su atomizasyon işlemi .....	31
Şekil 4.10. Döner disk atomizasyon yöntemi .....	32
Şekil 4.11. Döner elektrot işlemi .....	33
Şekil 4.12. Toz karıştırma mekanizmaları .....	34
Şekil 4.13. Tozların preslenmesinde işlem sırası.....	35
Şekil 4.14. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve sıkıştırma işlemi.....	36

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.15. Çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve sıkıştırma işlemi.....	37
Şekil 4.16. Sıcak izostatik preslemenin şematik görünümü .....	38
Şekil 4.17. Soğuk izostatik preslemenin şematik görünümü .....	38
Şekil 4.18. TEK yönteminde imalat aşamaları .....	39
Şekil 4.19. Ekstrüzyon ile presleme işlemi .....	40
Şekil 4.20. Haddeleme ile presleme işlemi .....	41
Şekil 4.21. Çift - küre sinterleme modeli .....	42
Şekil 4.22. Katı yüzeyde sıvı damlacığın iki farklı şekilde yayınımı .....	43
Şekil 4.23. Sıvı fazlı sinterlemede katı tanelerin sıvı ile ıslatılması .....	44
Şekil 4.24. Çift-küre sinterleme modeli .....	44
Şekil 5.1. Adhesiv aşınmanın şematik gösterimi .....	48
Şekil 5.2. Abrasiv Aşınma mekanizması .....	49
Şekil 5.3. İki ve üç elemanlı abrazif aşınma .....	50
Şekil 5.4. Yorulma aşınması mekanizması .....	51
Şekil 5.5. Korozyon aşınması mekanizması .....	52
Şekil 5.6. Korozyon aşınması mekanizması .....	52
Şekil 5.7. Zımpara üzerinde aşınan pim (Pin On Disk) .....	55
Şekil 7.1. Presleme sıcaklığına bağlı kompozit malzemelerdeki sertlik değişimi.....	69
Şekil 7.2. SP sıcaklığına bağlı kompozit numunelerdeki çapraz kırılma değerleri .....	70
Şekil 7.3. Kompozit numunelerin Hardox 500 çeliği aşındırıcıda ağırlık kayıpları.....	85
Şekil 7.4. 500 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği .....	86
Şekil 7.5. 520 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği .....	86
Şekil 7.6. 540 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği.....	86
Şekil 7.7. 560 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği .....	87

**Şekil****Sayfa**

Şekil 7.8. 580 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği..... 87



## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.1. Adhesiv aşınmadan sonra meydana gelen malzeme transferi .....	48
Resim 6.1. Karıştırma - öğütme yapılan turbula (Type-T2F) cihazı.....	58
Resim 6.2. Kalıp elemanları ve ısıtıcı.....	59
Resim 6.3. Sıcak Presleme yapılan hidrolik pres .....	59
Resim 6.4. Blok numune.....	59
Resim 6.5. Bakalite alma cihazı ve bakalite alınmış incelenmeye hazır numuneler.....	60
Resim 6.6. Leica DMI 5000M optik mikroskop.....	61
Resim 6.7. JEOL JEM 6060 LV SEM Mikroskop .....	61
Resim 6.8. SARTORIUS marka yoğunluk kiti yerleştirilmiş hassas terazi .....	61
Resim 6.9. Sertlik ölçüm cihazı .....	63
Resim 6.10. Çapraz kırılma testi detay görüntüleri.....	64
Resim 6.11. Tel erozyon yöntemiyle kesilen aşınma testi numuneleri.....	64
Resim 6.12. Tribometer T10/20 aşınma test cihazı .....	65
Resim 7.1. 500 °C' de preslenen numunenin çapraz kırılma testi ve sonuç grafiği .....	70
Resim 7.2. 560 °C' de preslenen numunenin çapraz kırılma testi ve sonuç grafiği .....	71
Resim 7.3. 560 °C SP numunenin çapraz kırılma testi sonuçları.....	71
Resim 7.4. Presleme sıcaklığı 500 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm.....	73
Resim 7.5. Presleme sıcaklığı 520 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm.....	74
Resim 7.6. Presleme sıcaklığı 540 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm.....	75
Resim 7.7. Presleme sıcaklığı 560 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm .....	76
Resim 7.8. Presleme sıcaklığı 580 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm.....	77

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 7.9. 560 °C SP Numunede Matris Yapı içerisinde SiC Dağılımı.....	78
Resim 7.10. 560 °C SP Numunede SiC Kopma Boşlukları.....	79
Resim 7.11. 560 °C SP Numunede SiC Kırılması ve Mikro Çatlaklar.....	79
Resim 7.12. (a), (b) 560 °C SP Numunede Yetersiz Sinterleşme, Mikro Çatlaklar, SiC Kopma Çukurları.....	80
Resim 7.13. 560 °C SP Numunede (a) Yetersiz Sinterleşme, (b) Yetersiz Bağlanma.....	81
Resim 7.14. 560 °C SP Üretilen Numuneden Alınan SEM Görüntüleri.....	82
Resim 7.15. 560 °C SP Üretilen Numunede 1 Nolu Bölgeden Alınan EDS Sonucu....	82
Resim 7.16. 560 °C SP Üretilen Numunede 2 Nolu Bölgeden Alınan EDS Sonucu....	83
Resim 7.17. 560 °C SP Üretilen Numunenin 5N Yük Altında Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	88
Resim 7.18. 560 °C SP Üretilen Numunenin 5N Yük Altında Sürtünme Kuvveti Grafiği.....	88
Resim 7.19. 560 °C SP Üretilen Numunenin 10N Yük Altında Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	89
Resim 7.20. 560 °C SP Üretilen Numunenin 10N Yük Altında Sürtünme Kuvveti Grafiği.....	89
Resim 7.21. 560 °C SP Üretilen Numunenin 15N Yük Altında Sürtünme Katsayısı Grafiği.....	90
Resim 7.22. 560 °C SP Üretilen Numunenin 15N Yük Altında Sürtünme Kuvveti Grafiği.....	90
Resim 7.23. 560 °C Sıcaklıkta Preslenen Numunenin 15 N Yük Altında Aşındırılması İle Oluşan Yüzey Desenlerinin Genel Görünümü.....	91
Resim 7.24. 560 °C Sıcaklıkta Preslenen Numunenin 15 N Yük Altında Aşındırılması İle Oluşan Aşınma Mekanizmaları.....	92
Resim 7.25. 560 °C SP Üretilen Numunenin 15 N Yük Altında Aşınma Yönü İle Oluşan Deformasyona Bağlı Çatlama ve Ayrılma.....	93

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 7.26. 560 °C Sıcaklıkta Preslenen Numunenin 15 N Yük Altında Aşındırılması İle Oluşan Deformasyon ve Kopma Hasarlanması.....	94
Resim 7.27. 560 °C Sıcaklıkta Preslenen Numunenin 15 N Yük Altında Aşındırılması İle Oluşan Deformasyon .....	94
Resim 7.28. 560 °C Sıcaklıkta Preslenen Numunenin 15 N Yük Altında Aşındırılması İle Kopan Parça sonrası Ortaya Çıkan Yüzey Görünümü .....	95



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

$\mu\text{m}$	Mikro metre
Al	Alüminyum
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alümina
$\text{B}_4\text{C}$	Bor karbür
CBN	Cubic Boron Nitride
FN	Normal kuvvet
FT	Teğetsel kuvvet
GPa	Giga paskal
Mg	Miligram
ml	Mili litre
MPa	Mega paskal
N	Newton
nm	Nano metre
$\text{Si}_3\text{N}_4$	Silisyum nitrür
$\text{Si}_3\text{N}_4$	Silisyum nitrür
SiC	Silisyum karbür
$\text{SiO}_2$	Silisyum dioksitin
T6	Çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemi
$\text{TiB}_2$	Titanyum diborür
TiC	Titanyum karbür
$\rho$	Yoğunluk

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

BHw	Brinell Sertlik Değeri
CCC	Karbon-Karbon Kompozitler

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>DIN</b>	Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
<b>EDS</b>	Enerji Dağılımı Spektrometresi
<b>FDM</b>	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
<b>HIP</b>	Sıcak İzostatik presleme
<b>IACS</b>	International Annealed Copper Standard
<b>MA</b>	Mekanik Alaşımlama
<b>MK</b>	Mekanik Karıştırma
<b>MMK</b>	Metal Matrisli Kompozit
<b>PA</b>	Poliamid
<b>PC</b>	Polikarbonat
<b>PE</b>	Polietilen
<b>PET</b>	Polietilen Tereftalat
<b>PMK</b>	Polimer Matrisli Kompozitler
<b>PMK</b>	Polimer Matrisli Kompozitler
<b>PP</b>	Polipropilen
<b>PS</b>	Polistren
<b>PTFE</b>	Politetrafloretilen
<b>PVC</b>	Polivinilklorür
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SIP</b>	Soğuk İzostatik Presleme
<b>SIP/ CIP</b>	Soğuk izostatik presleme
<b>SMK</b>	Seramik Matrisli Kompozitler
<b>SP</b>	Sıcak Presleme
<b>T/M</b>	Toz Metalurjisi
<b>TEK</b>	Toz enjeksiyon kalıplama
<b>TM</b>	Toz Metalurjisi
<b>UV</b>	Ultraviyole Dayanımı
<b>YMK</b>	Yüzey Merkezli Kübik

## 1. GİRİŞ

Bilindiği üzere saf metallerin kimyasal ve fiziksel özellikleri çok düşüktür. Bu sebeple metallere saf olarak kullanılmazlar. Saf metallerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine arttırmak veya gereksinim duyulan özellikleri sağlamak için alaşımlama, ısıl işlem, çökelti sertleşmesi, sıcak veya soğuk deformasyon gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu tür yöntemlerle geleneksel malzemeler üretilmiştir. Hızlı gelişen bilim ve teknolojiye kaynaklanan ileri mühendislik malzemesi olarak nitelendirilen hafif, gerilme, basma, çekme, aşınma dayanımları yüksek, korozyona karşı dirençli, arzu edilen termal özelliklere sahip, iyi elektrik iletkenliği, akustik, estetiklik gibi birçok özelliği kapsayan komplike malzeme ihtiyacı, bilim insanlarını yeni yöntemlere yöneltmiş bu bağlamda profesyonel anlamda kompozit malzemelerin keşfedilip, geliştirilmesini sağlamıştır [1,2].

Kompozit malzeme iki veya daha fazla malzemenin makro boyutlarda birleşerek oluşturduğu yeni malzemeye denir. Kompozit malzemelerin ana yapısını genellikle dayanımı düşük, yumuşak ve sünek matris malzeme ile dayanımı yüksek, sert ve rijit takviye malzemesi oluştururlar. Kompozit yapı oluşturulurken matris ve takviye malzemesinin en iyi özelliği kullanılır. Kompozit yapıda takviye elemanının ana görevi; maruz kalınan yük/yüklerin taşınması, dayanım ve rijitliğin sağlanmasıdır. Matrisin ana görevi ise takviye elemanlarını bir arada tutmak, yükü takviye elemanlarına iletmek, kırılma ve gevrek olan takviye elemanlarını dışarıdan gelecek etkilerden korumaktır. Matris elemanı olarak polimerler, metallere ve seramikler kullanılırken, takviye elemanı olarak elyaflar, seramikler, karbon ve grafit kullanılmaktadır [3].

Alüminyum matrisli kompozit malzeme üretiminde temel olarak eriyik ve katı hal olmak üzere iki yöntemden biri tercih edilmektedir. Katı hal yöntemi olarak toz metalurjisi üretim metodu ön plana çıkarken uygulamada takviye elemanı olarak SiC, B<sub>4</sub>C, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi seramik esaslı takviye elemanları kullanılmaktadır. Bu bağlamda silisyum karbür (SiC); yüksek sıcaklıklarda yüksek sertlik ve mukavemet, kimyasal ve ısıl kararlılık, yüksek ergime noktası, oksitlenme direnci, yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı takviye elemanı olarak tercih edilen seramik malzemelerinden biridir. Toz metalurjisi (T/M) yönteminde matris ve takviye tozlarının bir karıştırıcıda karıştırılarak bir istenilen parça kalıbına preslemesiyle şekillendirilmesi ve sinterlenerek mukavemet kazandırma işlemlerine dayanmaktadır. Kompozit toz metal parçanın bütün kesitinde

benzer özellikleri gösterebilmesi için takviye elemanı partiküllerinin matris yapı içerisinde homojen dağılıma sahip olmalıdır. Kompozit malzemelerde matris malzeme ve takviye elemanı arasında güçlü bir ara yüzey bağı olmadan istenilen özellikleri elde edebilmek mümkün değildir. Ara yüzey bağının güçlü olması matris malzeme ile takviye elemanı arasındaki uyumun dışında doğru imalat yönteminin seçilmesiyle sağlanabilir [4-6].

H. ARIK, yaptığı çalışmada saflık derecesinde atomize alüminyum tozu matris malzemesi ve ağırlıkça %10 SiC toz takviye elemanı kullanılarak T/M yöntemi ile Al+SiC kompozit malzeme üretmiştir. Üretim aşamasında, matris malzemesi ve turbola cihazında 2 saat süreyle karıştırdığı kompozit tozdan kalıp içerisinde 500 MPa basınç altında tek yönlü aksel preste preslemiş, 650 °C' de 2 saat süreyle sinterlemiştir. Aşınma testi için ürettiği 6x12 mm çap ve boyutta silindirik numunelerin testlerini UTS TRIBOMETERS marka pin-on-disk aşındırma cihazında yapmıştır. Aşındırma işlemini 200 m mesafede değişen yükler (3-6-9-12 N) altında ve farklı SiC zımpara aşındırıcı (320, 400 ve 600 Mesh) parametreleri kullanarak testini gerçekleştirmiştir. Ürettiği kompozit malzemenin aşınma direncinin tüm test şartlarında alüminyum toz metal parçaya göre yüksek olduğunu görmüştür. SiC takviyesi ile alüminyum malzemenin mekanik özelliklerinde önemli iyileşmelerin gerçekleştiği sonucuna ulaşmıştır [8].

G. Kırmızı, H. Arık, H. Çinici yaptıkları çalışmada, T/M yöntemiyle Al7075 alaşımlı alüminyum matris malzemesi ve ağırlıkça %15-30-45 SiC takviye elemanı içeren dört farklı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) üretmişlerdir. Karıştırma işlemini turbola cihazında 1 saat sürede gerçekleştirmişlerdir. Kalıp içerisine konan karışım tozlarını farklı sıcaklıklarda (300, 400 ve 500 °C) ve farklı basınç altında (200, 300 ve 400 MPa) 1 saat süreyle verileri ardışık kullanarak tek yönlü aksel kalıpta preslemişlerdir. Artan presleme sıcaklığına bağlı olarak malzemelerin gözeneklerinin azaldığı ve sertlik değerlerinde kayda değer artış olduğunu tespit etmişlerdir. Gözeneklilik, homojen dağılım ve sertlik değerleri açısından en iyi sonuçların 400 MPa – 500 °C' de üretilen FDM'de olduğu belirlemişlerdir [9].

P. Şanlı yaptığı çalışmada ağırlıkça farklı oranlarda bor karbür (B<sub>4</sub>C) ve silisyum karbür (SiC) ile takviyeli alüminyum mmk malzemeler T/M yöntemiyle üretmiştir. Takviye oranları her iki takviye elemanı için %8, %16 ve %24 olarak aynısı seçmiştir. Karıştırıcıda 180 dakika süreyle karıştırılan tozlar, 450 MPa yük altında tek aksenli hidrolik pres ile

presleyerek kompakt hale getirmiştir. Üretilen kompakt numuneleri, 540, 580 ve 620 °C olmak üzere üç farklı sinterleme sıcaklığında 2 ve 4 saat olmak üzere iki farklı sinterleme işlemine gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak artan SiC takviye oranı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresiye numunelerin sertliklerinde artış olduğunu belirlemiştir [10].

N. S. Cilasun yaptığı çalışmada karıştırılmalı döküm yöntemi ile Al2014 – SiC (92,53 µm ortalama büyüklüğünde) sırasıyla %3, %6, %12 takviye oranında ve 700 °C, 750 °C, 800 °C’de döküm sıcaklığında 250, 500, 750 dev/dk karıştırma oranlarında farklı numuneler üretmiştir. Üretilen malzemelerin sertlik değerleri, % gözenek miktarları, aşınma miktarları, mikro yapı farklılıkları ve kendi arasındaki dönüşümlerini incelemiştir. Aşınma ve sürtünme deneyleri oda şartlarında Pin-On Disk tipi standart deney yapmıştır. Her bir parça için ayrı ayrı 10 N, 20 N ve 30 N ağırlıklar ile 150, 240 ve 320 meshte aşınma miktarlarını hesaplamıştır. İlerleme hızı 60 d/dak için 0,569 m/sn seçmiş, alınan yol 60 d/dak için 17,9 m hesaplamıştır. İlerleme motoru mil adımını 1,5 mm seçmiştir. İlerleme motoru saniyede 2 devir hesaplamış ve bu değeri 3 mm bulmuştur. Deney süresini 30 sn ölçmüş ve bu sürede 90 mm yol almıştır. Sıcaklığa bağlı deneysel çalışma da üretilen kompozit malzemeler için sıcaklık ve takviye hacim oranı arttıkça sertliğin arttığı, aşınma miktarının azaldığını gözlemiştir [11].

H. Karabulut, K. Karacif, M. Türkmen yaptıkları çalışmada %5 SiC takviye elemanı içeren ve AA2024 ile AA7075 alüminyum alaşımı iki farklı matris malzemesini T/M yöntemi kullanılarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Matris malzemelerini daha önceden ısıtılı işleme tabi tutmamışlardır. Alüminyum alaşımlarının toz boyutları 100 µm altında, SiC toz boyutları ise 10 µm altında tutmuşlardır. İki farklı alüminyum alaşımı matris tozları ve SiC takviye tozları ayrı ayrı olmak üzere 1 saat süreyle üç eksenli karıştırıcıda karıştırmışlardır. Karışım tozlarını 410 °C sıcaklıkta 45 MPa basınç altında DIEX marka cihazda vakumlu bir şekilde sıcak presleme işlemi yaparak SiC takviyeli iki farklı alüminyum alaşım esaslı matris kompozit numuneler elde üretmişlerdir. AA2024 + % 5 SiC kompozitin sertliği 101 HB ve AA7075 + % 5 SiC kompozitin sertliği 121 HB bulunmuştur. Burada AA7075 alüminyum alaşımının daha sert olmasının sebebinin daha yüksek oranlarda alaşım elementi bulundurmasına bağlamışlardır. Sonuç olarak bu çalışmada matris malzemelerin ısıtılı işleme kazandığı sertliği sadece %5 SiC takviye ile ulaşılabildiği sonucuna varmışlardır [12].

K. Kaynak, U. Matik yaptıkları çalışmada T6 ısıl işlemi uyguladıkları AA7075 alüminyum matris malzemesi, 82 µm boyutunda ağırlıkça 10, 20 ve 30% SiC takviye elemanı içeren ve sırasıyla 425, 450 ve 475 °C presleme sıcaklıklarında kompozit malzemeler üretmişlerdir. Kompozitlerin SiC içeriği ve presleme sıcaklığına bağlı olarak sertlik değişimini incelemiş, en yüksek sertlik %30 SiC takviyesi ve 475 °C de bulunmuştur. Sonuç olarak artan presleme sıcaklığı ile alaşım ve kompozit malzemelerin yoğunluk ve sertliklerinin arttığını tespit etmişlerdir [13].

E. F. Kılıç yaptığı çalışmada, T/M yöntemiyle matris malzemesi olarak 103,05 µm ortalama toz tane boyutta olan alüminyum, bakır alaşımı tozu ve takviye elemanı olarak SiC kullanarak alüminyum alaşımı esaslı metal matrisli kompozit malzeme üretmiştir. Üretilen kompozitler de SiC takviye malzemesi oranları ağırlıkça %5, %10 ve %15 olarak seçmiştir. Toz karışımlar tek yönlü bir kalıpta 800 MPa yükte preslenerek blok numuneler üretmiştir. Bütün numuneleri, 120 dakikada 650 °C' de argon gazı ortamında tüp fırında sinterlemiştir. Kompozitlerin aşınma testlerini oda sıcaklığında Pin-On-Disk tipi standart aşınma deney cihazında Ç5190 çelik aşındırıcı diskler kullanarak, 2,88 km sabit kayma mesafesinde 0,8 m/s sabit kayma hızında 15 N, 30 N ve 45 N sabit yük uygulayarak test etmiştir. Takviye elemanı seramiğin tane boyutu ve ağırlık hacim oranı küçüldükçe aşınma miktarının arttığı sonucuna varmıştır [14].

Jin ve diğerleri yaptıkları çalışmada matris olarak Al<sub>3</sub>.7Cu-1.3Mg (wt%) bileşimine ve 6 µm partikül boyutuna sahip 2009Al tozları ile 7 µm partikül boyutuna da SiC partikülleri kullanmışlardır. Al ve hacimce %15 SiC içeren tozlar 8 saat süreyle karıştırarak ardından 150 MPa'lık bir basınçta tek eksenli hidrolik presle preslemişlerdir. Kompakt parçalar sırasıyla 540, 560, 580, 600, 620 ve 640 °C' de 1 saat süreyle sinterleyerek, ardından ekstrüde etmişlerdir. 580 °C'de üretilen ve ekstrüde edilen kompozit, mükemmel ara yüzey bağlanması nedeniyle en iyi mekanik özellikleri sergilediğini, daha düşük veya daha yüksek sıcak presleme sıcaklıklarında, ekstrüde edilmiş kompozitlerin düşük mukavemet sergilediği sonucuna varmışlardır [15].

Evrende hiçbir şey ilk günkü gibi kalmaz, sürekli bir değişim içerisindedir. Bu değişime aşınma mekanizmalarının etkisi büyüktür. Malzemelerin teması ile meydana gelen sürtünme sonucu yüzeyden parçacık ayrılması ile görülen hasar durumuna aşınma denir [16].

İstatistiklere göre makine elemanlarının ortalama %70' inin hurdaya ayrılma sebebi aşınmadır. Aşınmanın sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım - onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel göz önüne alındığında her yıl milli sermayeye oldukça büyük yükler getirmektedir. Bu bağlamda kompozit malzemelerin de aşınma davranışları üzerine birçok önemli çalışma ve araştırmalar yapılmaktadır [17].

Bu çalışmada, T/M sıcak presleme tekniği ile 200 µm altı boyutta ve %99.97 saflıkta atomize alüminyum toz matris malzemesi ve 16 µm altı SiC metal tozu takviye elemanı kullanılarak MMK üretilmiştir. Alüminyum ve SiC tozlarının homojen bir şekilde karıştırılması amacıyla karıştırılma işlemi, içerisinde 10 mm çapta çelik bilye bulunduran turbula cihazında 2 saat karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Karıştırma sonrası karışım tozdan 200 MPa basınç altında 2 saat süreyle değişen sıcaklıklarda (500, 520, 540, 560 ve 580°C) sıcak presleme ile preslenerek blok numuneler üretilmiştir. Bu numunelerde metalografik çalışmalar, toz karışım ve malzeme karakterizasyonu, yoğunluk ölçümleri, sertlik ölçümleri, çapraz kırılma testi, Pin-on-disk yöntemiyle aşınma özellikleri incelenmiştir.



## 2. ALÜMİNYUM (Al) VE SİLİSYUM KARBÜR (SiC) ÖZELLİKLERİ

### 2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri

Alüminyum, atom numarası 13 ve simgesi Al olan kimyasal element, sünek, yumuşak ve hafif bir metal olup mat gümüşümsü renklidir. Tabiatta genel olarak boksit cevheri halinde bulunur. Oksitlenmeye karşı direnci yüksektir. Endüstride farklı pek çok ürünün imalatında kullanılmaktadır. Alüminyum manyetik değildir. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 MPa iken alaşımlandırıldığında bu değer 700 MPa' la kadar çıkabilmektedir. Yoğunluğu, 2,70 g/cm<sup>3</sup> ile çelik ve bakırın yaklaşık üçte biri kadardır. Yüzey Merkezli Kübik Kafes (YMK) yapısına sahiptir. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir. Çok üstün korozyon özelliklerine sahip olması, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır. Elektrik iletkenliği %64,94 IACS' dir (saf Al, 2 °C' de). Erime sıcaklığı 660 °C, kaynama sıcaklığı ise 2519 °C' dir [18].

### 2.2. Silisyum Karbürün Özellikleri

Silisyum karbür, silisyum dioksitin (SiO<sub>2</sub>), kok kömürü (grafit) ile elektrikli fırında indirgenmesi sonucunda gerçekleşen, saf olarak silisyum eldesi sırasında gerekenden daha fazla karbon kullanılması durumunda oluşan bileşiktir (SiC). Genellikle aşınmayı önleyici olarak kullanılır. Mucidi Edward Goodrich Acheson' dır. Silisyum karbür katısı kovalent bağa sahiptir. Elde etme yöntemine ve kullanılan malzemelere göre görünümü değişir, sarı, yeşil, siyahımsı mavi veya yanardöner kristaller olabilir. Yoğunluğu 3.21 g/cm<sup>3</sup>, ergime noktası 2730 °C, sertlik Mohs ölçeğinde 9 ila 10' dur [19].

Silisyum karbür kimyasal olarak etkisizdir bu sebeple güçlü asitlerin ve bazların etkisine karşı dayanıklıdır. Yüksek termal iletkenliğe sahip olup çok yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Yüksek sıcaklıkları destekleyen düşük lineer termal genişleme katsayısına sahiptir. Termal şok, yüksek basınç, aşınma ve korozyona karşı dayanıklı yüksek mukavemete sahip hafif bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda, elastik direncini korur ve aşırı voltajlarda işlevlerini yerine getirebilen yarı iletkendir [20].

Silisyum karbür, ileri teknoloji malzemelerine ihtiyaç duyulan birçok yerde kullanılmaktadır. Genel olarak saflık derecelerine göre; metalürjik, aşınma ve sinter amaçlı olmak üzere, üç ana gruba ayrılmaktadır.

Yüksek saflıktaki (yeşil renk) SiC, mühendislik seramiklerinde sinter amaçlı kullanılırken, saflığın %97.5 veya daha düşük olması durumunda, söz konusu malzeme aşınma ve refrakter amaçlı kullanılırlar. Saflığın %90' ın altına düşmesi durumunda ise, metalürjik uygulamalarda kullanılırlar. Yüksek performans seramikler, kimyasal endüstrisinde kaplamalar ve valfler, hidrosiklonlar, lens kalıpları, roket ile kum boruları memeleri üretiminde kullanılır. Aşınma dirençli SiC' ler ise havacılık endüstrisinde pompa, taşıma, yağ, yakıt deposu, pompa malzemelerinin üretiminde kullanılır. Isı dayanımından dolayı uzay teknolojisinde de yüksek sıcaklık roket meme bağlantılarında, ısı değişim tüplerin üretiminde kullanılır. Yüksek termal iletkenliklerinden dolayı uzay teknolojisinde lazer aynaları olarak kullanılmakta ve savunma sanayinde çalışmalar yapılmaktadır. Silisyum karbürün balistik etki dayanımı düşük olmasına rağmen, seramik zırh malzemesi olarak da uygulamaları mevcuttur. Son zamanlarda karbon elyaf takviyeli seramik fren disklerinde SiC kullanıldığı da bilinmektedir. Böylece SiC' ün yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımından yararlanır [21].

### **2.3. Alüminyum Esaslı Metal Matrisli Kompozitler**

Alüminyum esaslı kompozit malzemeleri; uçak, savunma, otomotiv, elektronik sanayiinde, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımına ihtiyaç duyulan uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığını bilinmektedir.

Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK) mekanik, fiziki ve termal özelliklerinin, uygulamaların gerektirdiği değerlerde üretilebilir olması en önemli avantajıdır. Uygulamalarda istenilen hafiflik, yüksek elastisite modulu, yüksek çekme dayanımı, düşük termal iletkenlik iyi yorulma, özellikle abrasif aşınma direnci başlıcalarıdır.

Çizelge 2.1. Al esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri [22]

Matris	Takviye İçeriği	Akma Dayanımı Re (MPa)	Çekme Dayanımı Rm (MPa)	Uzama (%)
Al	-	64	90	21
Al	-	117	200	10
2014-T6	% 20 SiC	429	476	7,5
2014-T6	-	457	508	1,8
2014-T6	% 10 SiC	495	515	1,2
6061-T6	% 20 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	275	290	18
6061-T6	-	290	340	5,5
6061-T6	% 15 SiC	345	410	4,9
6061-T6	% 20 SiC	380	435	1,8
6061-T6	% 30 SiC	307	349	5,3
7091-T6	% 20 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	520	590	1,2
7091-T6	-	500	560	1,8



### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

#### 3.1. Kompozit Malzemenin Tanımı ve Özellikleri

Kompozit malzemeler; en az iki malzemenin makro olarak birleştirilmesiyle oluşturulurlar. Bu oluşan malzemenin mukavemet, hafiflik, rijitlik, korozyon direnci, aşınma direnci, yorulma ömrü ve termal özellikleri gibi birçok önemli özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenir [3].

Malzemeler genel olarak seramik, metal ve polimerler olmak üzere üç ayrı gruba ayrılırlar. Bu üç farklı gruptaki malzemelerin her birinin kendine özgü mekanik ve fiziksel üstün özellikleri vardır. Metal, seramik ve polimerler malzemelerinin hepsinin veya birkaçının en iyi özelliklerinin aynı anda tek bir yapıda toplanması için yapılan birleştirme işleminden sora oluşan yeni malzeme kompozit olarak anılmaktadır [23].

Malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri olarak mukavemet, sertlik, rijitlik, tokluk, yoğunluk, yorulma, korozyon direnci, ultraviyole dayanımı (uv), ısı dayanımı, ısı iletimi ve elektrik iletkenliği sayılabilir. Bu özelliklerin üstün olanlarının aynı anda aynı malzemede bulunabilmesi pek olası değildir. Bu sebeple tek bir malzemede istenilen birçok üstün özelliğin elde edilmesi için istenilen özellikleri taşıyan iki ya da daha fazla farklı malzemenin fiziksel birleştirilerek yeni bir malzeme oluşturulması kompozit malzeme üretiminin temelini oluşturur [23,24].

Aşağıdaki sayılan özellikleri taşıyan malzemeler kompozit malzeme olarak isimlendirilir. Bunlar;

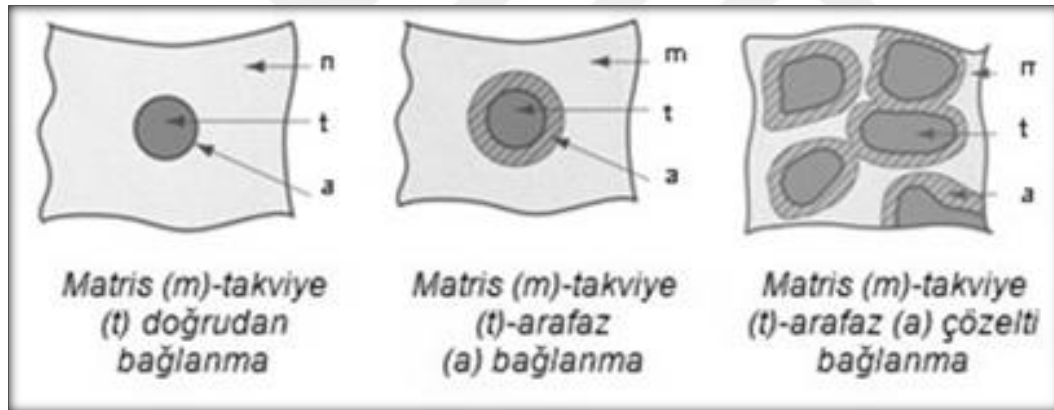
1. Kimyasal özellikleri ve içyapı bileşenleri farklı en az iki malzemeyi içermelidir.
2. Kompozit malzeme bileşenleri fiziki olarak birleşmelidirler.
3. Kompozitte kullanılan bileşenlerin birleşimi sağlandıktan sonra bileşenlerinden farklı bir özellik göstermelidir [24].

Kompozit malzemeler temel olarak geleneksel malzemeleri; daha hafif hale getirmek, korozyon direncini, gerilme dayanımlarını, termal özelliklerini iyileştirmek, elektrik

iletkenliği, estetik, akustik gibi bazı özelliklerinin bir veya birkaçını iyileştirmek amacıyla yapılmaktadır [25].

Kompozit malzemeler bir biri içerisinde çözünmeyen iki ayrı bileşenden ortaya çıkmaktadır. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözüme ve bileşenler arasında bazı ara yüzey reaksiyonları görülebilir. Matris ve takviye elemanları kompozit malzemenin temel bileşenleridir. Matris, takviye malzemesini çevresel ve dış etkilere karşı koruyarak malzemenin bütünlüğünü sağlar, takviye elemanı ise kompozitin mukavemetini ve yük taşıma kapasitesini artırmaktadır [26].

Matrisin ıslatma kabiliyetine bağlı olarak ara yüzey bağı oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin özellikleri temel olarak; matris, takviye, ara yüzey bağı ve mikro yapı özelliklerine bağlı olarak değişmektedir [27].



Şekil 3.1. Matris ve takviye fazların çeşitli bağlanma tipleri [28]

### 3.2. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler;

- ✓ Havacılık sektöründe
- ✓ Spor malzemeleri yapımında
- ✓ İnşaat sektöründe
- ✓ Deniz ulaşım araçlarında
- ✓ Müzik aletleri yapımında
- ✓ Otomotiv sektöründe

- ✓ Sağlık sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Kompozit malzemelerin kullanım alanları [29]

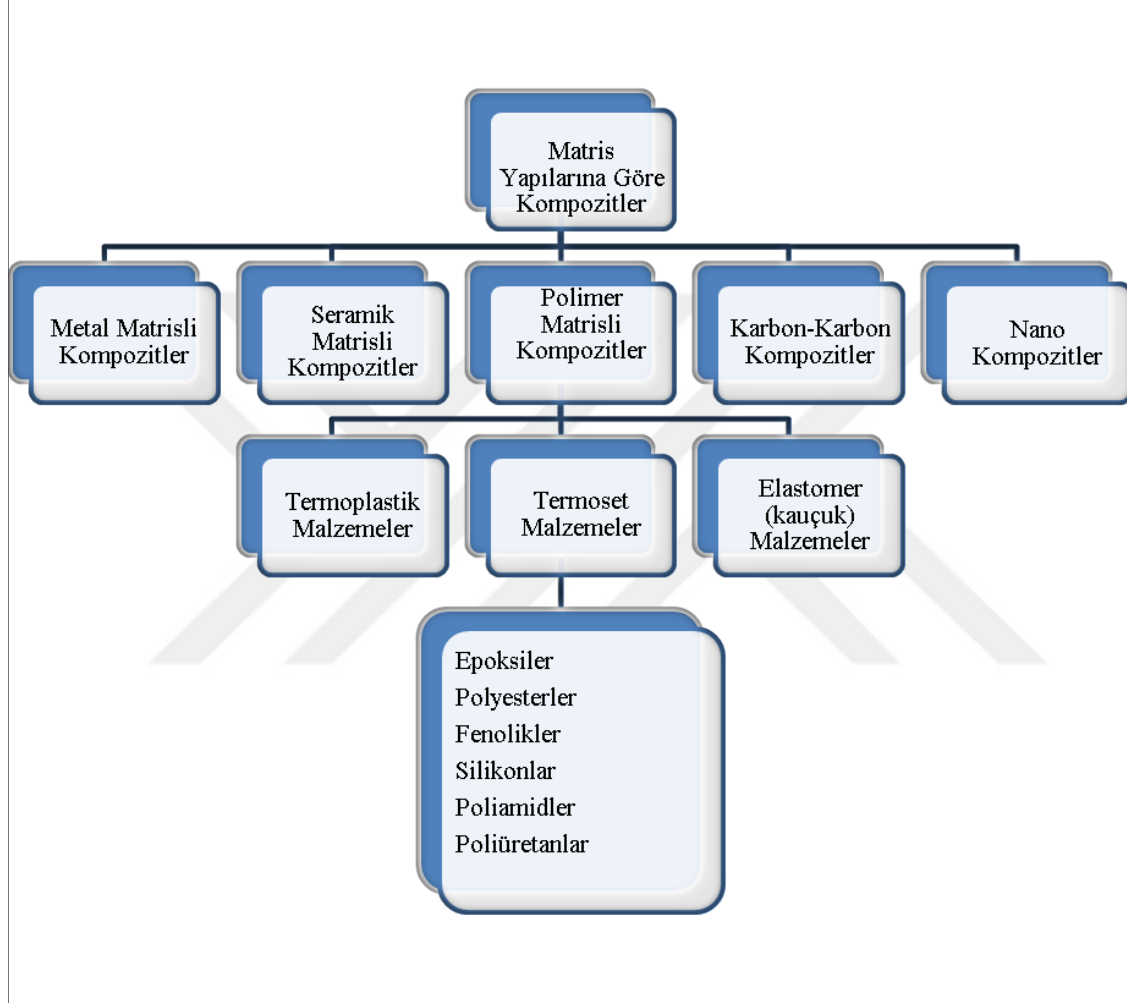
Endüstrisi	Kullanım Alanları	Kullanılan Kompozit Malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B/Al, SiCw/Al, Gr/Al, B/Al, Cam/Epoksi, C/Epoksi, B/Epoksi, Kevlar/Epoksi, Süper Alaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, kiriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al, SiCW/AlSiCw/Al, B/A, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /AlGr/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, SiCp/Al, SiCw/Al, SiCw/Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi ve 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, SiCw/Al, B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb

### 3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler çok farklı sayıda doğal ve sentetik malzemelerden üretilir. Bu durum kompozitlerin sınıflandırılmasının net bir şekilde yapılmasını zorlaştırmakla

birlikte, kompozit malzemeler yaygın olarak sınıflandırma şekli, yapısında bulunan matris ve takviye malzemeye göre yapılmaktadır.

### 3.3.1. Matris malzemesine göre kompozitler



Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin matris yapısına göre sınıflandırılması [24]

**Metal Matrisli Kompozitler (MMK):** Metal matris kompozitler, esneyebilir bir metal matris ile takviye malzemelerden oluşan kompozitlerdir; matris daima bir metal olarak tanımlanırsa da metaller ve hafif metal alaşımlarıdır [28]. MMK geleneksel malzemelere en büyük alternatiftir [30]. MMK’ te matris bileşeni olarak düşük yoğunluklu, iyi mekanik özelliklere sahip hafif metaller kullanılır. Genellikle matris malzemesi olarak Al, Mg, Cu, Ti, Ni ve Zn kullanılır. Bunlar arasında Al matrisli kompozitler en çok tercih edilenidir. Takviye malzemeler partiküller, sürekli ve süreksiz fiberler ve whiskerler olabilir; bunlar, hacimce %10-60 arasında kullanılabilir. Tipik sürekli fiberler karbon, silikon karbid,

boron, alumina ve refrakter metallendir. Süreksiz fiberler genellikle silikon karbid whiskerler, kesilmiş fiberler (alumina ve karbon) ve partiküllerdir (SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [26,28].

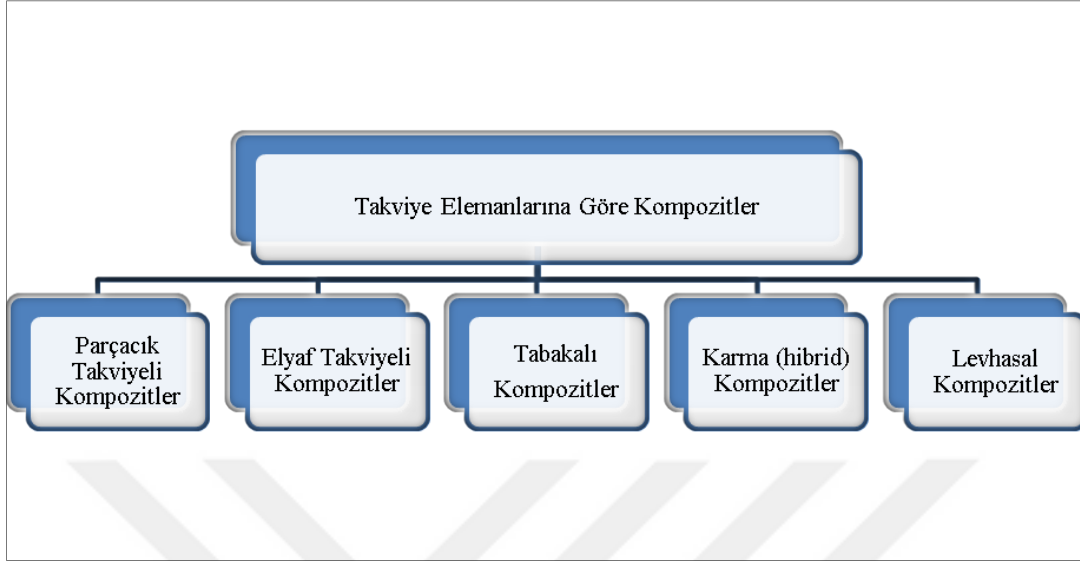
Seramik Matrisli Kompozitler (SMK): Seramikler tokluğu düşük, çok sert ve kırılğan olmakla birlikte göreceli düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımına sahiptirler. Bunların bazıları; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BC, TiC, CBN, TiB, TiN ve SiC'dir. Bu bileşikler farklı yapılarda sahip istenilen malzeme özelliğine göre bir ya da bir kaç birlikt kullanılarak seramik matris kompozitler elde edilir. Askeri bazı malzemelerin üretimi ile uzay araçları ürünlerin üretimi başlıca kullanım alanlarıdır. Seramik matris ve karbon, seramik ve cam fiberler gibi takviye elemanı kullanılarak özellikle yüksek sıcaklık uygulamalar için gereksinim duyan yerlere üretim gerçekleştirilmektedir. Seramik matrise, seramik fiberler takviye elemanı olarak kullanıldığında mukavemet ve toklukları artmaktadır. Alümina ve zirkonya esaslı seramik kompozitlerden yapılan roket başlığı, uzay araçları üretiminin yanında biomalzeme üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır [2,30].

Polimer Matrisli Kompozitler (PMK): PMK' ler ucuz ve kolay temin edilebildiği için endüstride çok yaygın kullanıma sahiptirler. Matris malzemesi olarak termoplastikler ve termosetler kullanılır. Çok hafif ve kolay şekillendirilebilirler. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, B<sub>4</sub>C, karbon, aramid, cam takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Otomobil, inşaat, uzay ve savunma sanayisi gibi pek çok yerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Güçlendirme için cam ve karbon takviye elemanı olarak kullanılır [31,34].

Karbon-Karbon Kompozitler (CCC): Karbon matris kompozitler çok önemli ve gelecek vadeden mühendislik malzemeleridir; adından da anlaşıldığı gibi hem takviye ve hem de matris faz karbondur. CCC' ler oldukça yenidir ve pahalıdır; dolayısıyla kullanım alanları yaygın değildir. Karbon-karbon kompozitler roket motorlarında, uçak ve yüksek performans otomobillerde sürtünme malzemeleri, sıcak presleme kalıpları, türbin motorları elemanları gibi çeşitli parçaların üretiminde kullanılır [28].

Nano Kompozitler: kendini oluşturan fazlardan birinin 100 nanometreden (nm) küçük bir, iki veya üç boyuta sahip olduğu kompozitlerdir. Diğer bir tanımı ise malzemeyi oluşturan farklı fazlar arasında nano ölçekli tekrar mesafelerine sahip yapıların bulunduğu çok fazlı katı kompozitlerdir [32].

### 3.3.2. Takviye malzemesine göre kompozitler



Şekil 3.3. Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması [23]

Parçacık Takviyeli Kompozitler: Matris malzemeye küçük parçalar takviye edilerek matrisin maruz kalacağı etkilere karşı güçlenmesini sağlayan kompozitlerdir. Matris ile parçacık ara yüzeyindeki bağın kuvveti kompozitin mekanik özelliklerini belirlemektedir [24].

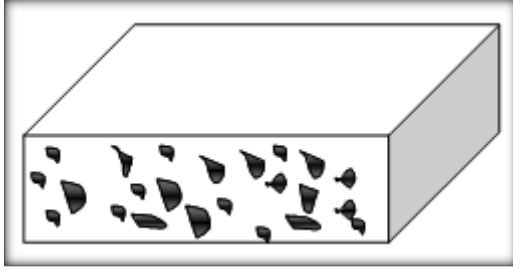
Takviye elemanın boyutları  $1\ \mu\text{m}$ ' den daha küçük ebatlar da ise partikül, daha büyük ise parçacık takviyeli olarak isimlendirilmektedir [28,33].

Parçacık takviyeli kompozitler nispeten düşük maliyet ve yüksek performans göstermesi üretim süreçlerindeki olumlu gelişmeler doğrultusunda kullanımı her geçen gün daha da artmaktadır. Parçacık takviye elemanları küresel, kübik gibi birçok aynı veya farklı tip şekle sahip olabilirler. Matris yapı içerisine yönlendirilmiş veya gelişi güzel dağılmış şekilde takviye edilebilirler.

Matris yapı içerisinde takviye elemanlarının özel yönlendirilmesi ile belirli bir istikamete doğru özel zorlamalara karşı dayanımın artırılabilir. İri parçacıklı kompozitler her üç malzeme grubuyla da kullanılır (metaller, seramikleri ve polimerler).

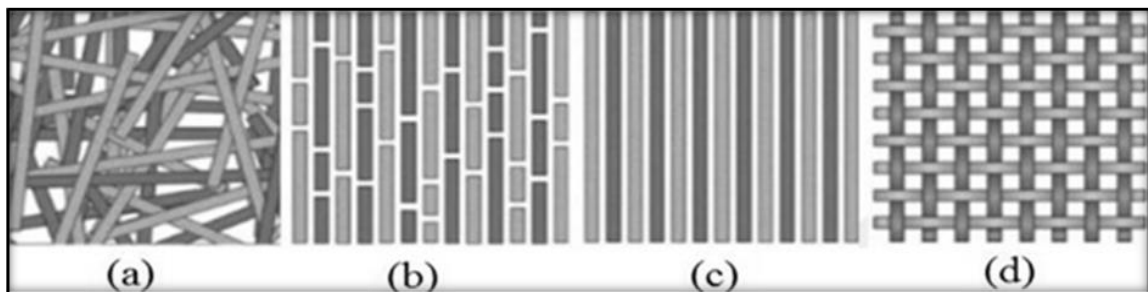
Partikül takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemeleri genellikle karbürler ( $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ), oksitler ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ), nitrürler ( $\text{Si}_2\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ ), paslanmaz çelik, Si, C

gibi elementlerden meydana gelmektedir. Sermetler, seramik-metal kompozitlerine örnektir. En yaygın sermet ise sinterlenmiş karbürdür [34,35].



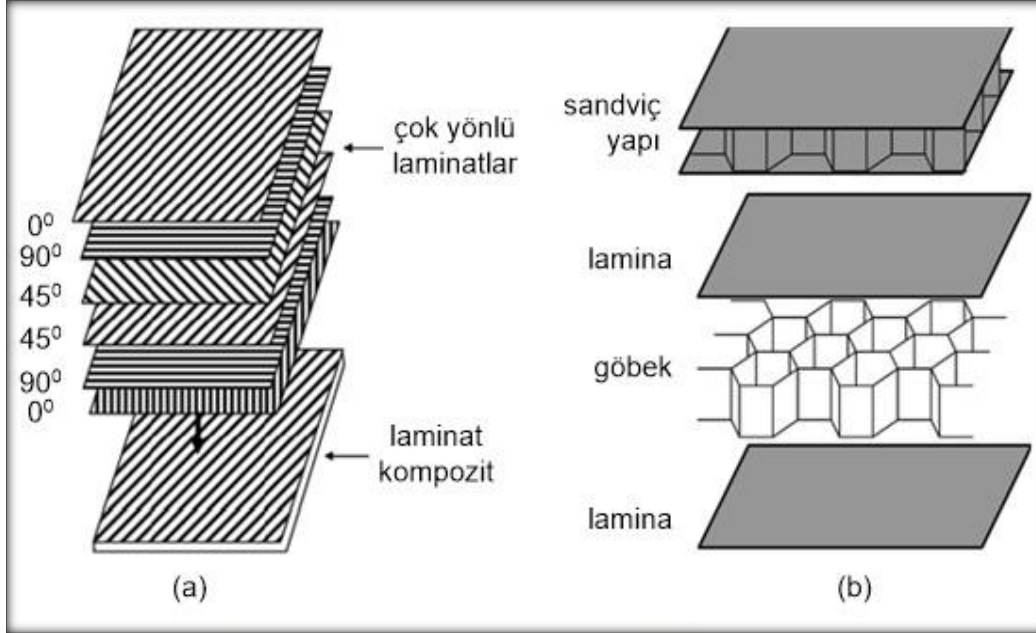
Şekil 3.4. Parçacık takviyeli kompozit

**Fiber Takviyeli Kompozitler:** Bu kompozitler, yüksek mukavemet ve elastiklik modüle sahip fiberlerin sünek matris malzemesi takviye edilmesiyle oluşurlar. Fiber takviyeli kompozitlerde takviye amaçlı kullanılan fiber malzemeleri; sürekli fiber, uzun/kısa fiber, organik/inorganik fiber gibi çeşitli şekillerde olabilir. Kullanılan fiberlerin çeşidi, fiziksel özellikleri, matris ile uyumu, matris içindeki dağılımı ve matris içindeki hacim oranı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirler. Kompozit malzeme üzerine gelen yük fiber-matris arayüzeyi tarafından fiberler üzerine transfer edilmektedir. Gelen yüklemenin %70-90' ı fiberler tarafından taşınmaktadır. Yüksek yük taşıma kapasitesi sahip fiber takviyeli kompozitler aynı zamanda kompozite gelecek yük doğrultusuna bağlı olarak fiberler birçok şekilde yerleştirilebilirler. Fiber takviyeli kompozit özellikle hafiflik, rijit ve yüksek mukavemete sahiptirler. Otomobil, uzay ve havacılık sektörlerinde çokça kullanılmaktadır. Şekil 3.5' te farklı takviye dizilimlerine sahip kompozit yapılar görülmektedir [24,30].



Şekil 3.5. Fiberlerin kullanım şekilleri a) Rastgele yönlenmiş süreksiz fiber kompozit, b)Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit c) Tek yönlü sürekli fiber kompozit d) Örgü şeklinde fiberlerle dizilmiş kompozit [24]

Tabakalı Kompozitler: Bu kompozitler fiber takviyeli levhaların istiflenmesi sonucu oluşurlar. Levhalar istiflendikten sonra sıcaklık ve basınç altında preslenirler. Tabakalar/Laminatlar ve sandwich yapılar olarak üretilmektedir [28].



Şekil 3.6. Tabakalı Kompozitler, (a) Çok yönlü laminatlı kompozit, (b) sandviç yapı kompozit [36,37]

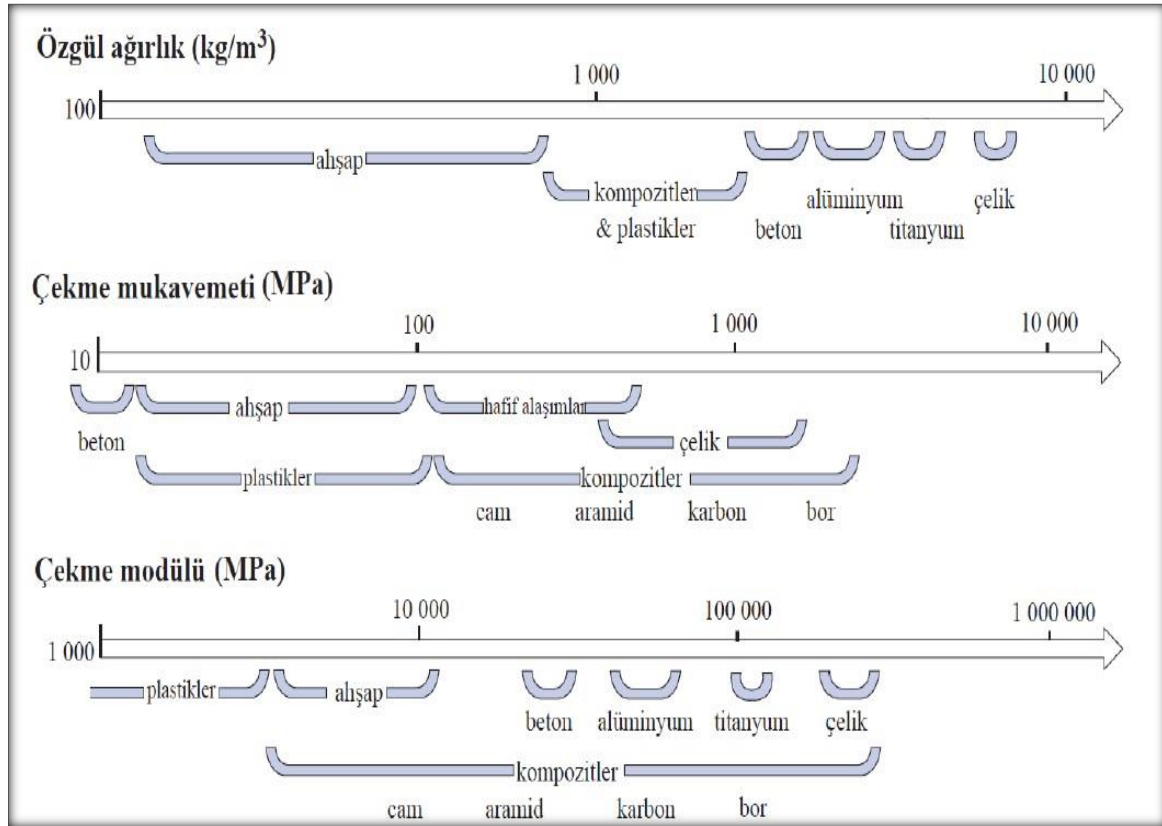
Tabakalı kompozitler farklı tür ve şekillerde takviye barındıran tabakaların birleşiminden oluşur. Mekanik özellikleri bu tabakalar belirlemektedir [38].

Hibrit Kompozitler: Matris yapısı içerisinde iki veya daha fazla takviye elemanın bir araya getirilerek, daha iyi özellikte yeni bir madde oluşturulmasına denir. Polimer matris içerisine karbon ve cam elyaf takviyeli üretimi en yaygın kullanılanıdır. Fiber-fiber, kısa elyaf, katman-katman, çekirdek yüzey yapılı, whisker olarak sınıflandırılmaktadır.

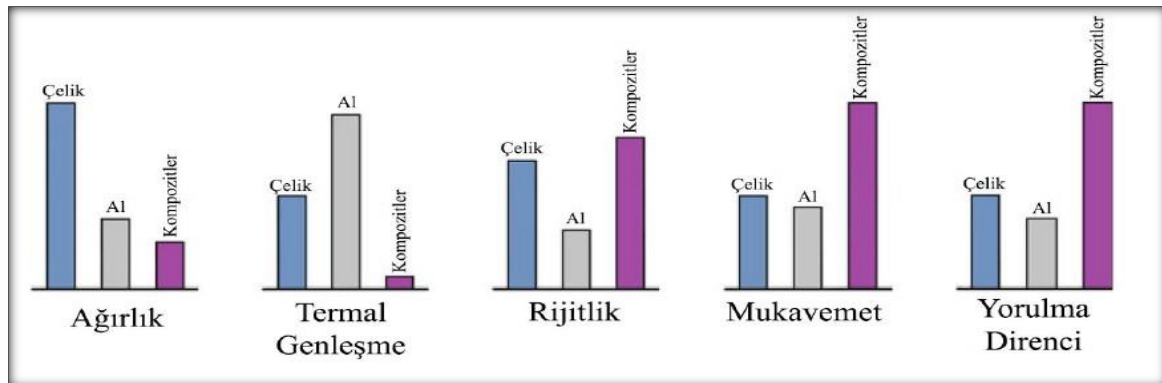
Hafif kara, su ve hava taşımacılığı araçlarında, spor malzemeleri, hafif ve ortopedik parçaların üretiminde kullanılmaktadır [39].

Levhasal Kompozitler: Matrise fazı içindeki levha şekilli takviye elemanlarından oluşan kompozitlerdir. Al-grafit sistemi levhalar; pullar, cam, mika ve metal olabilir. En çok bilinen metal levhalar  $AlB_2$  ve Be levhalardır [30].

### 3.4. Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması



Şekil 3.7. Kompozitlerin mühendislik malzemeleriyle karşılaştırılması [24]



Şekil 3.8. Geleneksel tek parça malzemeler ile kompozit malzemeleri karşılaştırma [24]

### 3.5. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit imalat yöntemlerini; Açık kalıplama ve kapalı kalıplama olmak üzere iki ana gruba ayırmak mümkündür. Açık kalıplama (temas yüzeyli kalıplama) yönteminde üretim süresince jelkot ve laminalar hava ile temas halindedir. Kapalı kalıplama yönteminde ise

üretim çift taraflı kalıplarla ya da vakum torbasıyla olur. Bu iki kategoriye dahil olan birçok üretim yöntemi vardır [40].

a. Açık Kalıplama Teknikleri

1. El Yatırması Yöntemi
2. Püskürtme Yöntemi
3. Elyaf Sarma (Filamen sarım metodu/ Fiber yerleştirme)

b. Kapalı Kalıplama Teknikleri

1. Pultruzyon (Profil Çekme) Yöntemi
2. Reçine Transfer Metodu (RTM)
3. Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Prosesi (SRIM)
4. Baskı Kalıplama Metodu
5. Enjeksiyon Kalıplama
6. Savurma Döküm (Santrifüj) Kalıplama
7. Vakum Torbası/ Otoklav Prosesi

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde ergiyik metal metodu ve toz metalürjisi olmak üzere genel olarak iki temel metot vardır [26].

Ergiyik metal uygulamasında takviye elamanını birçok farklı yöntemle sıvı metal matris malzeme içerisine gönderilir, transfer sürecinde dışarıdan uygulanan bir kuvvetle homojen bir süspansiyon sağlanmaya çalışarak dökme işlemi gerçekleştirilir [41].

Toz metalürjisi uygulamasında toz haldeki matris ve takviye elemanları istenilen şekli elde etmek için belirlenen oranlarında karıştırılarak tasarlanan kalıp içerisinde sıcak veya soğuk preslenerek sinterlenmesi işlemidir [42].

Seramik matrisli kompozitlerin üretimi ilk olarak takviye malzemesi matris içerisine transfer edilirken, daha sonraki süreçte matris yoğunlaştırılır. Toz metalürjisi, sıcak presleme, katı/sıvı faz sinterleme, sol jel ve infiltrasyon yöntemleri kullanılarak üretilmektedir [2].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde ise; enjeksiyon kalıplama, transfer kalıplama, basma kalıplama, profil çekme, tabakalı birleştirme ve el yatırma yöntemi gibi metotlar kullanılır [43].

### 3.5.1. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

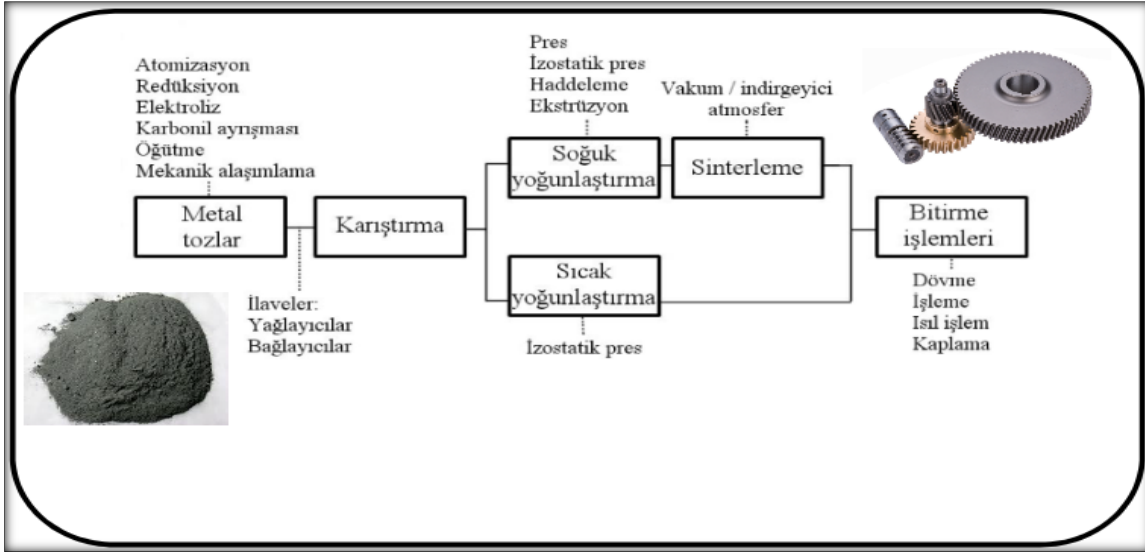
Metal matrisli kompozit malzemeler geleneksel yöntemlerle üretilemezler. Metal matrisli bir kompozit malzemenin üretim tekniği; üretilecek parçanın şekline, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere, matrise, takviye elemanı şekli ve türüne göre belirlenir. Üretim yöntemleri; katı faz, sıvı faz ve diğer üretim yöntemleri olarak sınıflandırılabilir [44].

- a) Katı Faz Üretim Yöntemleri: Difüzyon Bağı Yöntemi, Toz Metalurjisi Yöntemi
- b) Sıvı Faz Üretim Yöntemleri: Plazma Püskürtme Tekniği, Sıkıştırma Döküm Tekniği, Sıvı Metal Karıştırma Tekniği, Sıvı Metal İnfiltrasyon Tekniği
- c) Diğer Yöntemler: Döküm Teknikleri, In-Situ Tekniği, Ekstrüzyon



#### 4. TOZ METALURJİSİ (TM)

Toz metalürjisi; Matris ve takviye elamanı tozlarının bir karıştırıcı yardımı ile belirli hacim veya ağırlık oranlarında karıştırılarak, üretilen parça kalıbına doldurulması, uygun basınçta kalıp içerisinde kompozit tozlarının sıkıştırılması daha sonra atmosfer şartları kontrol altında tutularak sinterlenmeyle malzeme üretme işlemidir. Toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların preslenmesi, sinterleme ve isteğe bağlı işlemler (Tam yoğunluk, yağ emdirme, çapak alma, vb.) toz metalürjisi üretim tekniğinin aşamaları olarak sıralanabilir [45].



Şekil 4.1. Toz metalurjisi prosesleri [45]

T/M yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre üstünlükleri [45,46,47];

- Karmaşık şekilli parçaların üretimine olanak sağlar.
- Malzeme kayıpları azdır.
- Ergime sıcaklığı yüksek olan metallerin üretimi mümkündür.
- Düzgün yüzeyli ve düşük toleranslarda parçalar üretilebilir.
- Başka yöntemlerle üretimi mümkün olmayan alaşım veya karışımların üretimine olanak sağlar.
- Aşınma dayanımını arttırmak için gözeneklere yağ emdirilebilir.
- Geleneksel dövme ve döküm gibi yöntemlerde karşılaşılan oksidasyon, gaz absorpsiyonu ve segregasyon gibi sorunlar görülmez.

- Hızlı katılaştırılmış toz üretmek mümkündür.
- Seri imalat yapılabilir.

TM yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre zayıf yönleri [45,47];

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Tozların kalıp içindeki akışındaki sınırlılıklar imal edilecek parçanın şekli karmaşıklığına göre sınırlayıcı bir etken olabilir.
- Karmaşık şekilli parçaların yoğunluğu her yerde aynı olmayabilir.
- Metal tozları ingot halindeki malzemelerden daha pahalıdır.
- Seri üretim yapılmazsa üretim ekonomik değildir.
- Boyut toleransları talaşlı işleme göre biraz daha kabadır.
- Büyük parçaların üretimi zordur.

#### **4.1. Toz Üretimi**

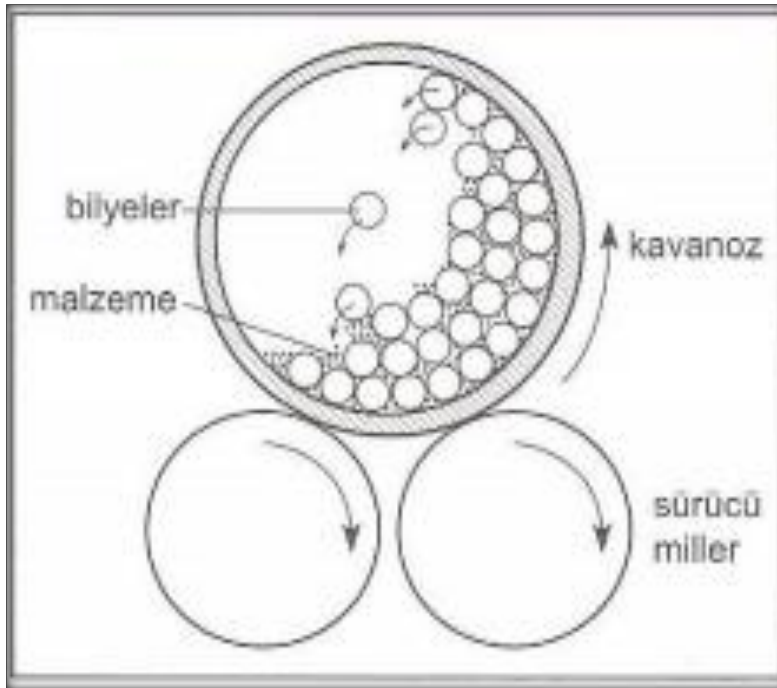
Boyutu 1 mm' den daha küçük katı parçacıklara toz denir. Bir tozun üretim tekniğinin bilinmesi o tozun boyutu ve şekli gibi özellikleri hakkında bilgi verir. Malzemelerin toz haline getirilmesinde maliyet, tepkimeler ve istenen özellikler toz üretim tekniğini belirler. Tozun en önemli karakteristiği, hacim başına yüksek yüzey alanına sahip olmasıdır. Toz üretiminde mekanik öğütme, kimyasal tepkime, elektrolitik biriktirme ve atomizasyon gibi yöntemler kullanılmaktadır [33,48].

##### **4.1.1. Mekanik yöntemler**

Mekanik yöntemle toz üretimi darbe, sürtünme ile aşınma, kayma (kesme) ve basma gibi dört aşamadan oluşur. Malzemeye darbeye ani bir kuvvet uygulanır bunun sonucu çatlaklar oluşur ve kırılmalar gerçekleşerek boyutsal küçülme olur. Sürtünmeyle aşınmada partikül boyundaki azalma devam eder. Kayma/kesme neticesi ile malzeme de klivaj kırılması meydana gelir ve basma mekanizması yeteri kırılabilirliğe sahip olan parçalardan toz üretimi gerçekleşir. Yukarıda bahsi geçen mekanizmalar ile değişik ebat ve şekilde metal esaslı tozlar üretilebilir. Talaşlı üretim, öğütme ve mekanik alaşımlama olmak üzere mekanik yöntemler üç gruba ayrılabilir [33,45].

Talaş kaldırma yöntemiyle toz üretimi: Bu yöntemle çok iri ve karmaşık tozlar üretilir. Bu tozlar frezeleme, tornalama ve taşlama gibi talaş kaldırma tekniklerle elde edilir. Bu tip metal tozunun en büyük kaynağını metal işleme tekniklerinde ortaya çıkan talaş hurdası oluşturur. Gerek görülür ise üretilen tozlar, öğütülerek inceltilebilir. Toz özelliklerinin kontrolündeki zorluk, oksitlenme, yağlanma, kir tutma ve diğer malzeme hurdaları ile karışma problemleri olabilir. Yüksek karbonlu çelik tozları bu yöntemle üretilir [33, 48].

Öğütme yöntemiyle toz üretimi: Öğütme, bir kavanoz içerisinde çekiçler, çubuklar veya sert bilyeler kullanılarak yapılan mekanik darbe işlemidir. Gevrek yapıları malzemelerden toz üretmede yaygın olarak kullanılır. Şekil 4.2' de görüldüğü gibi öğütülecek malzemenin içerisine doldurulacağı kavanoz ve bu kavanoz içerisinde öğütücü bilyelerin olduğu değirmendir. Kavanoz bir motor yardımı ile belirli bir hızda döner bu dönme esnasında öğütülecek parçaya çarpan bilyeler toz oluşumunu sağlar. Üretilen tozlar karmaşık şekilli olur ve tozlar soğuk deformasyon sertleşmesi görülür. Seramik, metal alaşımları gibi kırılabilir malzemeler öğütülmekte sünek malzemelerin öğütülmesi için kullanışlı değildir. Malzemelerin öğütme işlemine tabi tutulmadan önce gevrekleştirilmesi, öğütme kavanozuna hidrokarbon sıvı, alkol veya su eklenmesi öğütme süresini kısaltır ve daha ince tozlar üretilir [33,48,49,50].



Şekil 4.2. Değirmende öğütme işlemi [51]

Mekanik alaşımlama yöntemiyle toz üretimi: Mekanik alaşımlama (MA), genellikle homojen dağılıma sahip, kontrollü ve oldukça ince tozlardan oluşan çoğunlukla bir katı hal reaksiyonu şeklinde gerçekleşen kum ve yüksek enerjili öğütme işlemine denilir. MA işlemine tabi tutulacak tozlardan biri sert metal veya metal dışı tozlar olması gerekirken diğeri bağlayıcı özellik göstermesi için yumuşak olmalıdır. Şekil 4.3' te MA yöntemi görülmektedir. Mekanik alaşımlama yöntemde metalik olan alüminyum (Al), bakır (Cu), magnezyum (Mg), demir (Fe), paslanmaz çelik gibi malzemeler içerisinde SiC, TiC, TiN, SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vb. oksit, karbür veya nitrürler takviye edilerek üretim gerçekleştirilmektedir [33,50].



Şekil 4.3. Mekanik alaşımlama işlemi [51]

#### 4.1.2. Kimyasal yöntemler

Metal oksitlerin indirgeyici gazlarla kimyasal indirgenmesi işlemine kimyasal yöntem denmektedir. Genellikle demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt gibi metal oksitler, karbonmonoksit veya hidrojen gazlarıyla indirgenerek tozları üretilmektedir. Isıl bozunma, sıvıda çökeltme ve gazda çökeltme kimyasal üretim teknikleridir. [33,50].

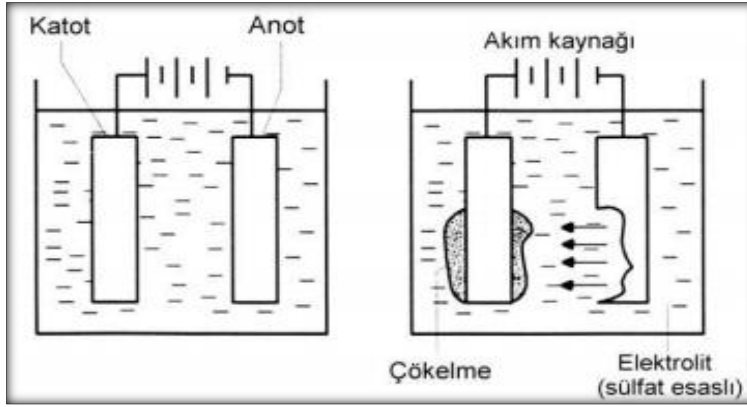
Isıl Bozunma Tekniği: Toz parçacıkları, buhar bozunması ve yoğunlaştırmanın birlikte kullanılmasıyla üretilirler. Basınç ve sıcaklık altında krom, bakır, demir, magnezyum, kobalt ve nikel gibi metallerin CO gazı ile parçalanarak ince taneli tozlar üretme işlemidir [33,48].

Sıvıda Çökeltme Tekniği: Sülfat, klorür veya nitrat gibi çözünmüş bileşiklerin kimyasal tepkimeyle çökeltmesi sonucu yaklaşık %99,5 saflıkta, düzensiz şekilli tozlar üretilir. Tozlar süngerimsi ve kübik görünümde olabilir. Bu tür tozların akış özellikleri zayıftır bu sebeple paketlenme yoğunlukları da düşüktür [33,48].

Gazda Çökeltme Tekniği: Nano ölçekli partiküllerden ve reaktif metallerden gaz bileşiklerinin oluşturduğu kimyasal tepkimeleri sonucu toz üretme işlemidir. Bu işlemde gaz tepkimesi sonucu pota kirlenmez ve potanın tekrardan kullanılmasına olanak sağlaması en önemeli avantajıdır. [33,53].

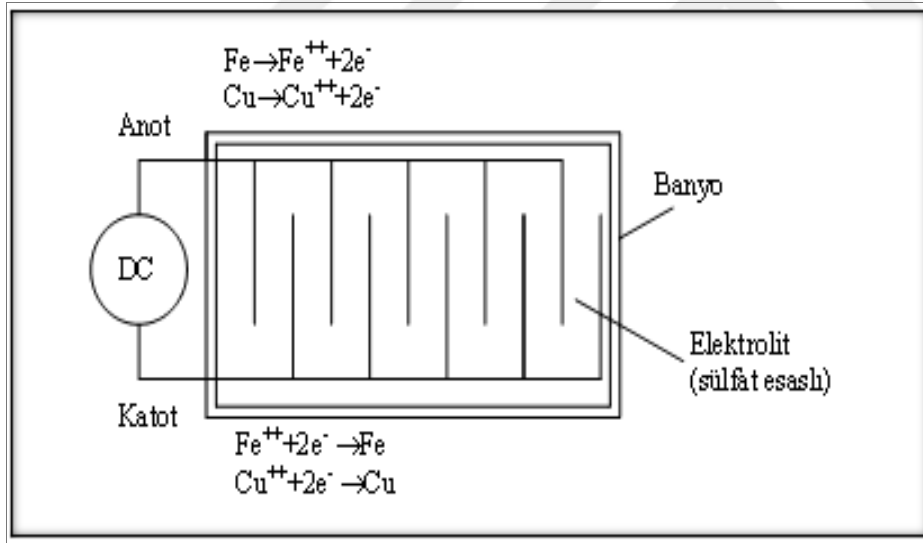
#### 4.1.3. Elektroliz ile üretim

Yüksek iletkenliğe sahip metal tozlarını üretmenin bir başka yöntemi de elektrolizdir. Bu işlem bir hücrenin katot çubuğunda metal tozlarını çöktürmektir. Bu yöntemi kullanarak yüksek safiyette Cu, Fe, Mn ve Ag tozlarını üretmek mümkündür. Elektroliz hücresinde üretilen tozlar genellikle süngerimsi biçimlerde ve dentritik yapılara sahiptir. Bu yöntemle alaşım ve bileşik tozları üretilemez sadece metalik tozlar üretilir. Elektroliz yönteminde; tozlar katot üzerinde toplanır veya elektrolit banyo içerisinde çökeltir. Katot üzerinde biriken toz sıyrılarak alınır. Daha sonra tozlar yıkama, kurutma ve gerek duyulursa öğütme işlemi yapılır. En son olarak tavlama işlemiyle tozdaki gerilmeler giderilir ve uçucu maddeler ortamdan uzaklaştırılır [33,53].



Şekil 4.4. Elektroliz ile toz üretimi [54]

Şekil 4.5' te Demir ve bakır için elektroliz yöntemi ile toz üretiminde örnek tepkimeler verilmiştir. Bu işlemden toz biriktirmek için bir elektroliz hücresi oluşturulur dışarıdan uygulanan voltaj ile anotta bulunan hammadde çözünür ve katotta birikir. Katotta biriken tozlar tozlar sıyrılarak alınır. Bu tozlar yıkanır, kurutulur, öğütülür, elenir ve tavlınır.

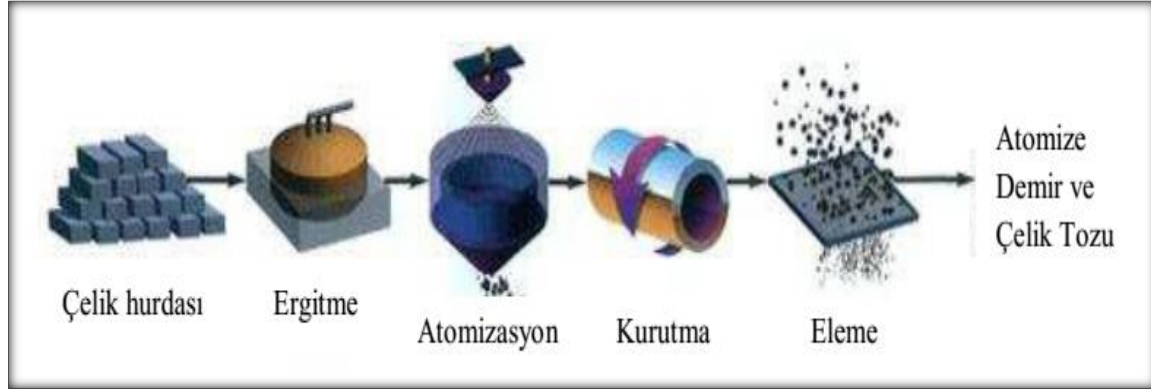


Şekil 4.5. Elektroliz ile toz üretimi [55]

#### 4.1.4. Atomizasyon yöntemleri

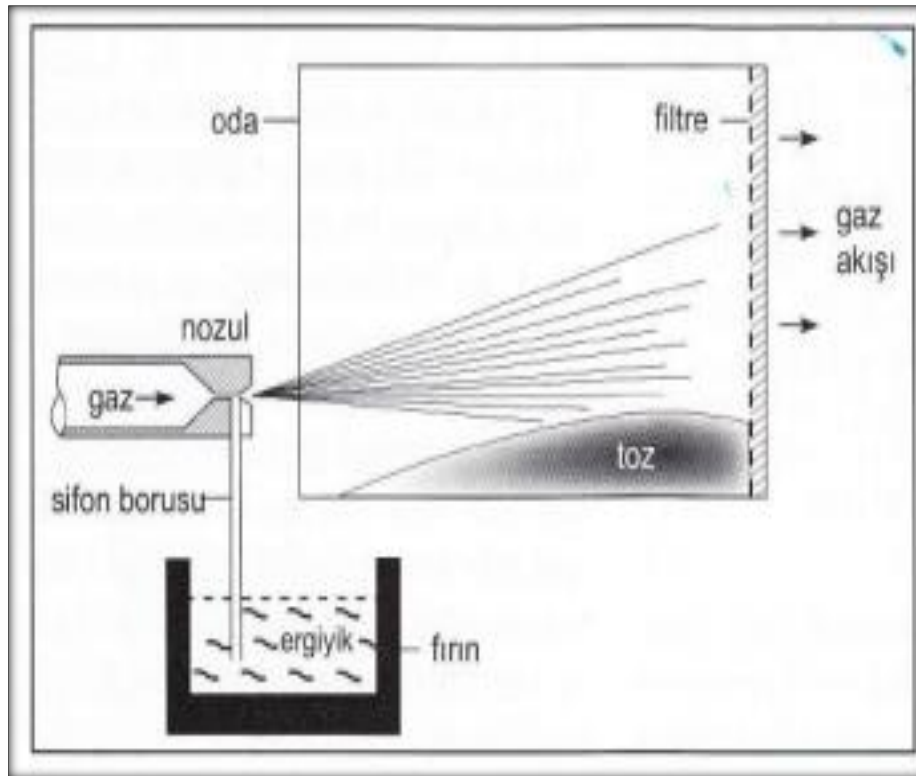
Atomizasyon, bir sıvı demetinin farklı boyutlardaki çok sayıda damlacıklara ayrılmasıdır. Temel prensip, bir potanın dibindeki delikten akmakta olan ergimiş metalin üzerine yüksek basınçlı gaz veya sıvı püskürtülmesidir. Hava, azot ve argon sıklıkla kullanılan gazlardır ve su ise çok sık tercih edilen sıvıdır. Burada gaz veya sıvı, ergiyük

haldeki metal demetini farklı boyutlarda çok sayıda damlacıklara ayırır. Damlacıklar daha sonra katılarak metal tozlarını oluştururlar [33].



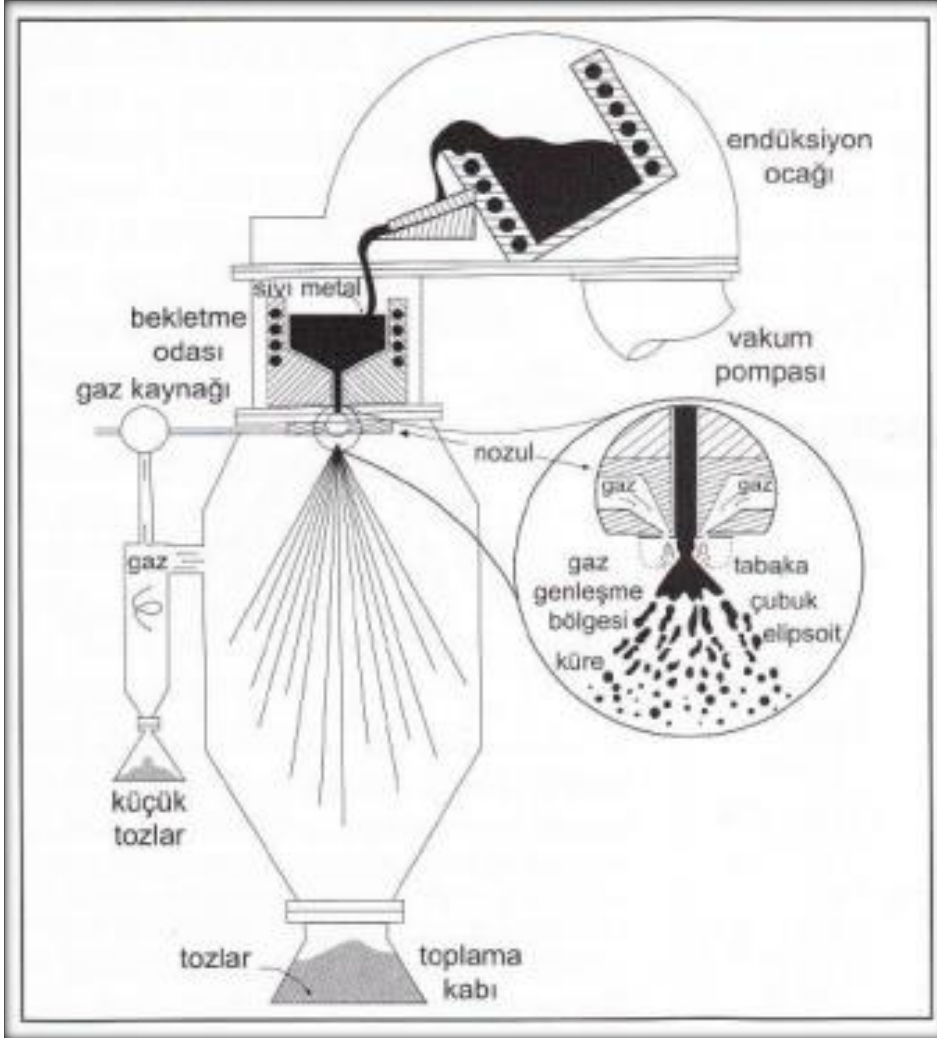
Şekil 4.6. Atomizasyon ile toz üretim aşamaları [56]

Gaz atomizasyonu: Ergimiş sıvı metalin yüksek hızlı gaz jetiyle parçalayarak toz üretilmesine gaz atomizasyon yöntemi denir. Parçalayıcı gaz olarak hava, azot, argon ve helyum gibi gazları kullanılmaktadır. Gaz atomizasyonunda; jet mesafesi ve basıncı, nozulun şekli, gaz ve metalin hızı ile metalin aşırı ısınması toz üretim kontrol parametrelerini içerir [33,48,56].



Şekil 4.7. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi [48]

Yatay gaz atomizasyon yönteminde düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler için çok uygundur. Ergiyik sifon etkisi ile gaz genişmeli nozula çekilir, damlacık olarak püskürtülür, katılaşır ve yan odada toplanır [33,48].

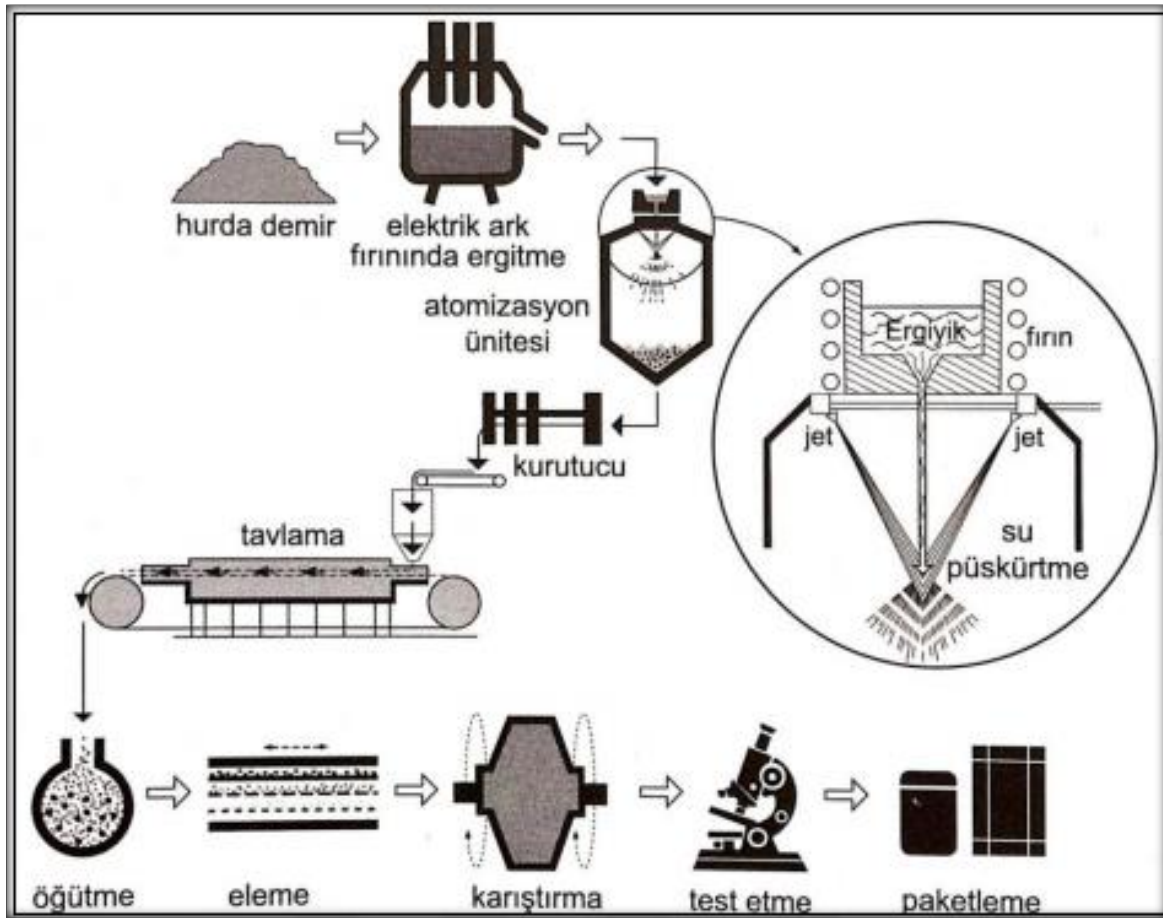


Şekil 4.8. Düşey gaz atomizasyonunun şematik gösterimi [38]

Düşey gaz atomizasyon yönteminin ana bölümleri; vakumlu indüksiyon ocağı, gaz genişmeli nozul, gaz dolaşım ve besleme sistemi, atomizasyon odası ve toz toplama odasıdır [33,48].

Su atomizasyonu: Gaz yerine yağ ve su içeren bir sıvının ergiyik demetini parçalamada kullanılmasıdır. 1600 °C' nin altındaki sıcaklıklarda ergiyen az reaktif malzemelerin suyla parçalanmasıdır. Su atomizasyon yönteminin düşük yatırım maliyeti ve giderleri sebebiyle endüstride kullanımı çok yaygındır. Su atomizasyonunda ana kontrol değişkeni su

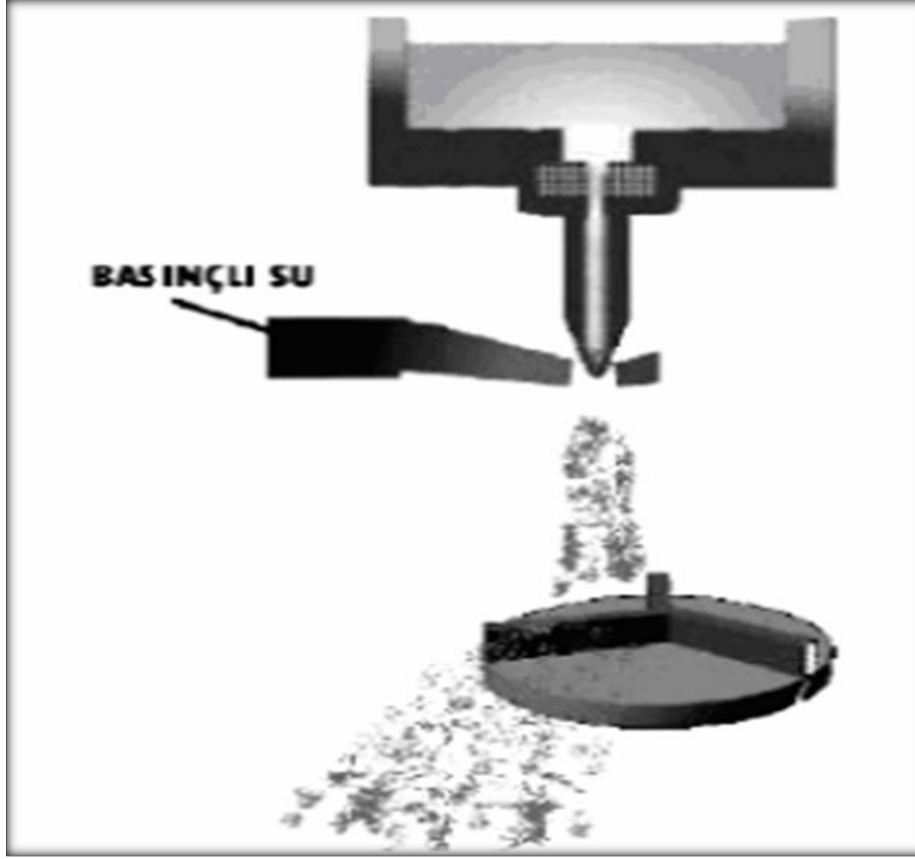
basıncıdır. Uygulamalı çalışmalar sonucu elde edilen deneye dayalı ilişkiler bu yöntemle elde edilen toz malzemelerin ortalama tane boyutu ve dağılımına, suyun basıncı ve hızı, metal eriyik akış açısı, eriyik viskozitesi, eriyik yoğunluğu, eriyik yüzey gerilimi, sıvı metal akış hızının soğutma suyu akış hızına oranı gibi parametreler etki etmektedir. Su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların genelde ortalama tane boyutu 30 - 1000  $\mu\text{m}$  arasında olmaktadır [33,48,57].



Şekil 4.9. Su atomizasyon işlemi [51]

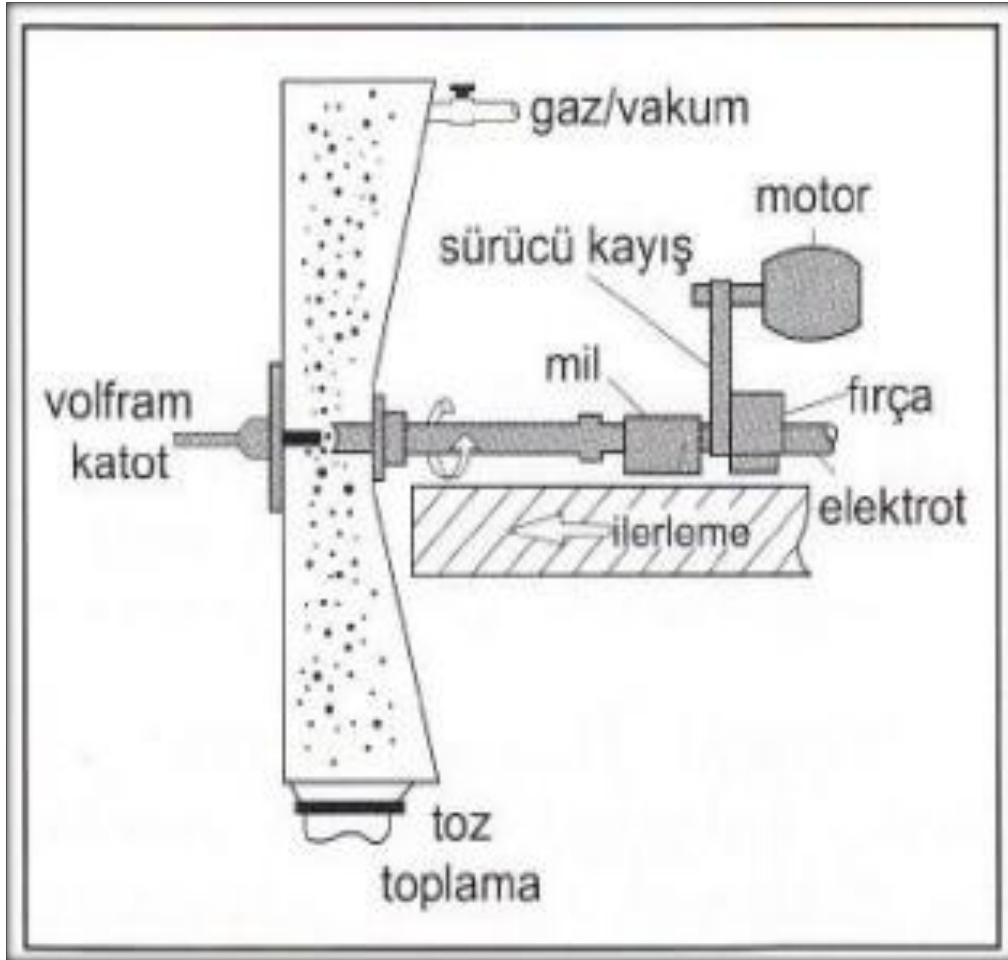
Savurma atomizasyonu: Merkez kaç kuvvetinin etkisiyle toz metal üretimini sağlayan yöntemdir. Elektrot ve döner diskin tozları savurması işlemin temelini oluşturur. Sıvı metalin döndürülmesiyle mekanik kuvvetler oluşur, oluşan bu kuvvetlerin etkisiyle damlacıkların katılabilir ve bunun sonucunda toz oluşur. Bu yöntem içinde iki farklı uygulama olup birincisi belli bir miktarda sıvı metal toz oluşturacak kadar merkezkaç kuvvetine tabi tutularak toz oluşturulur. İkincisinde ise erimiş metal sürekli dönen bir disk üzerine akıtılması ile toz üretme işlemidir. Sistemin çalışma prensibi sıvı metal soğutulan döner disk üzerine gönderilir burada oluşan merkezkaç kuvveti eriyik metali dışarıya

doğru ince bir tabaka şeklinde savurur, parçalanma sonucu oluşan damlacıkların katılaşması ile toz üretimi gerçekleşir. Diskin dönme hızının artması küçük ebatlı toz üretilmesini sağlar. Genellikle bakırdan üretilen diskler sıvı metalin ısınıını alarak katılaşmasını sağlar [58,59].



Şekil 4.10. Döner disk atomizasyon yöntemi [60]

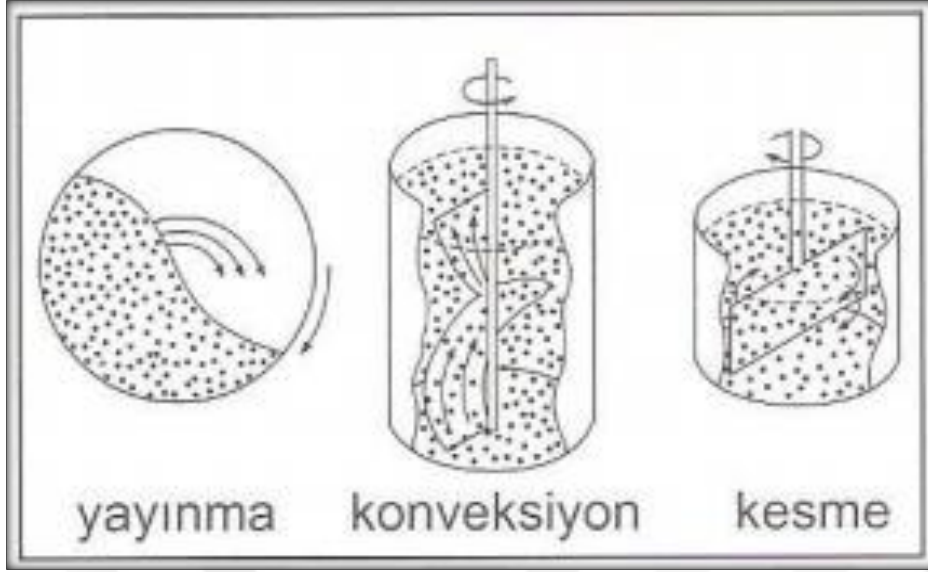
Döner elektrot atomizasyon toz üretiminde hızla dönen bir mil tungsten elektrot ile oluşturulan ark veya plazma üflecı ile ertilir. Tozlar anot milden ergiyen malzemenin savrulurak atılması ile oluşturulur ve katılaşma asal gaz veya vakum ortamında yapılır [33,48].



Şekil 4.11. Döner elektrot işlemi [51]

#### 4.2. Tozların Karıştırılması

Karıştırma; farklı kimyasal özelliklerdeki tozların homojen bir şekilde bir araya getirilmesi işlemidir. Kimyasal özelliği aynı olup fakat farklı tane boyutlarındaki tozların karıştırılma işlemine ise harmanlama denmektedir. Sıkıştırma öncesi, tozların aynı tane boyutu dağılımını sağlamak amacıyla harmanlama yapılır [33,50].



Şekil 4.12. Toz karıştırma mekanizmaları [51]

Homojen olmayan tozlar sıkıştırma ve sinterlemede başarılı sonuçlar alınmasını engellemektedir. Kompozit toz metal parçanın bütün kesitinde benzer özellikleri gösterebilmesi için takviye elemanı partiküllerinin matris yapı içerisindeki homojen dağılıma sahip olmalıdır. Homojen dağılımın gerçekleşmesi için tozların özelliğine uygun süre ve karıştırma tekniği seçilmelidir. Karıştırma aşamasına tozların birleştirilmesi, sıkıştırma ve şekillendirmesi amacıyla yağlayıcı ve bağlayıcılar eklenmektedir [33,50].

**Yağlayıcılar:** Yağlayıcılar; tozların sıkıştırma sırasında toz tanecikleri arasındaki sürtünmeyi azaltarak akıcılığını sağlamak, şekillendirme esnasında enerji kayıplarını azaltmak ve tozların sıkıştırılabilirliğini arttırmak için, karışım esnasında genellikle %0,5-1,5 arasında toz içerisine katılan stearik asit, metalik stearatlar, parafin ve çinko stearat gibi maddelerdir. Yağlayıcılar toz taneleriyle takım yüzeyleri ve kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, ham parçanın kalıptan çıkarılmasına yardımcı olmaktır. Bazı yağlayıcılar mukavemet artışına sebep olurken bazı yağlayıcılar ise sinterleme esnasında gözenek oluşumuna sebebiyet vererek malzemenin yoğunluğunu azaltır [33,42,48,50].

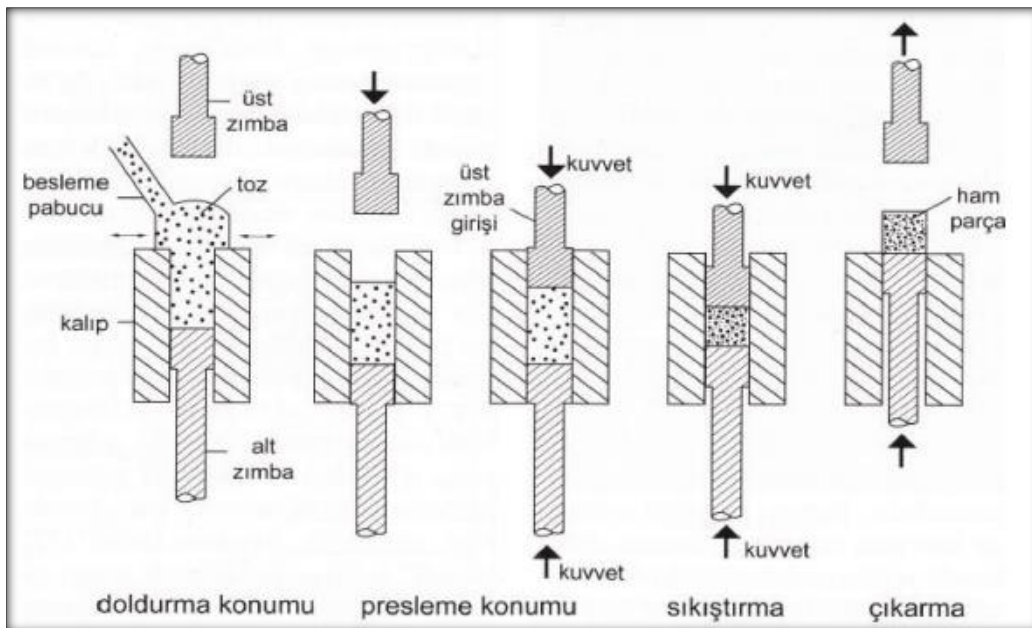
**Bağlayıcılar:** Bağlayıcı olarak ucuz ve erime ısısının düşük olması sebebiyle mum benzeri polimerler malzemeler kullanılır. Bağlayıcının amacı tozun istenilen şekli alması ve şeklin sinterleme aşamasına kadar bozulmamasını sağlamaktır. Özellikle oksit, karbür gibi sert tozların dayanımını arttırmak, enjeksiyon, ekstrüzyon, slip ve şerit döküm gibi yöntemlerle imalat işlemlerinde bağlayıcılar kullanılır. İyi bir bağlayıcı kolay dağılmalıdır [33,50,51].

### 4.3. Tozların Preslenmesi

Presleme (sıkıştırma) daha önce karıştırılan tozların bir kalıp içerisinde arzu edilen şeklin elde edilmesi işlemidir. Tozların sıkıştırılmasındaki temel sebep sinterleme aşamasına kadar şeklin bozulmamasını sağlamak ve ham yoğunluk elde edilmesidir [33,50,61].

Sıkıştırma işleminde pnömatik, hidrolik ve mekanik presler kullanılmaktadır. Karıştırma sonrası tozlar sertleşirler ve bu durum tozların sıkıştırılma kabiliyetini olumsuz etkiler. Tozların sıkıştırılabilirliğini arttırmak, sertliğini düşürmek ve ortamdaki rutubet, oksitler, karbon, kükürt, fosfor gibi istenmeyen etmenlerin mümkün mertebe uzaklaştırılması için birçok halde presleme öncesi tozlar 400 – 800 °C arasında bir ön tavlama işlemi yapılır. Metal tozları karışımındaki gaz, hava oranının yüksek olması da tozların sıkıştırılma kabiliyetini düşürür [33,50,61].

Sıkıştırılmış toza, ham parça bu parçanın yoğunluğuna ise ham yoğunluk, gösterdiği dayanıma ham mukavemet denmektedir. Tek yönlü preslemede homojen olmayan yoğunluk görülebilir. Presleme sonrası ham parçayı kalıptan çıkarmak için uygulanan kuvvete çıkartma kuvveti denir. Çıkartma kuvvetinin azalmasında yağlayıcılar çok etkili olup aynı zamanda kalıbın aşınmasını azaltır [33,50,61]. Şekil 4.13' te sıkıştırma işlemi safahatları gösterilmektedir.

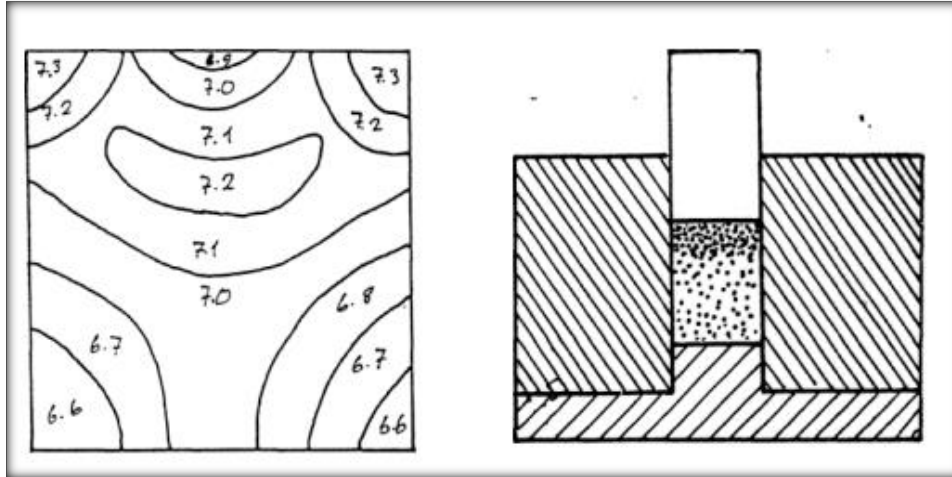


Şekil 4.13. Tozların preslenmesinde işlem sırası [50]

Presleme sırasında oluşan plastik deformasyon tozlardaki gözenek miktarını azaltırken malzemenin yoğunluğunu ve sertliğini artırır. Presleme işlemi sonrası teorik özgül ağırlığa yakın yoğunlukta parçalar üretilebilir. Tozların preslenmesinde tek veya çift hareketli pres ile kalıplama, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon kalıplama, hadde ile kalıplama, soğuk veya sıcak izostatik presleme gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

#### 4.3.1. Kalıpta presleme

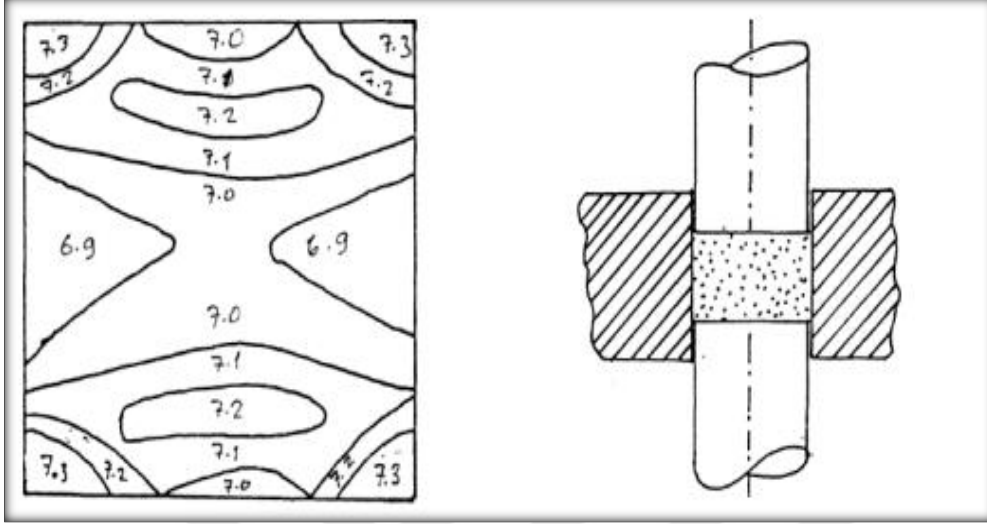
Çok yaygın kullanılan bir şekillendirme yöntemidir. Bu şekillendirmede 10 - 200 MPa basınç kullanılır. Uygulanmak istenen basınç şekillendirilecek kalıp içindeki tek veya çift hareketli uygulanabilir. Sıkıştırma işleminde pres kalıba tek yönlü kuvvet uygulanıyorsa tek yönlü sıkıştırma olarak adlandırılır. Burada üst zımba kalıp boşluğuna girerek sıkıştırılacak tozu sabit olan alt zımbaya doğru sıkıştırır. Şekil 4.14' te görüldüğü üzere tek yönlü sıkıştırmada tozlar ve tozların kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünmenin etkisiyle uygulanan basınç her noktaya eşit olarak dağılmaz bu durum sıkıştırılan parçadaki yoğunluğun homojen olmasını engellerken hareketli zımbaya yakın bölgeler daha yoğun iken sabit zımbaya doğru ilerledikçe azalmaktadır [33,51].



Şekil 4.14. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve sıkıştırma işlemi [51]

Çift hareketli sıkıştırmada ise toz her iki tarafından aynı anda sıkıştırılmakta olup zımbaların ikisi de hareketlidir. Alt ve üst zımba tarafından eşit veya farklı basınç uygulanabilir. Sıkıştırma işlemi iki zımbanın birbirlerine doğru hareketi ile gerçekleşir. Gerekli basınç uygulanıp sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra iş parçası alt zımbanın

yukarı hareketi ile kalıptan çıkarılır. Şekil 4.15' te görüldüğü üzere çift yönlü preslemede, tek yönlü preslemeye göre daha homojen yoğunlukta parça üretilmektedir [33,51].



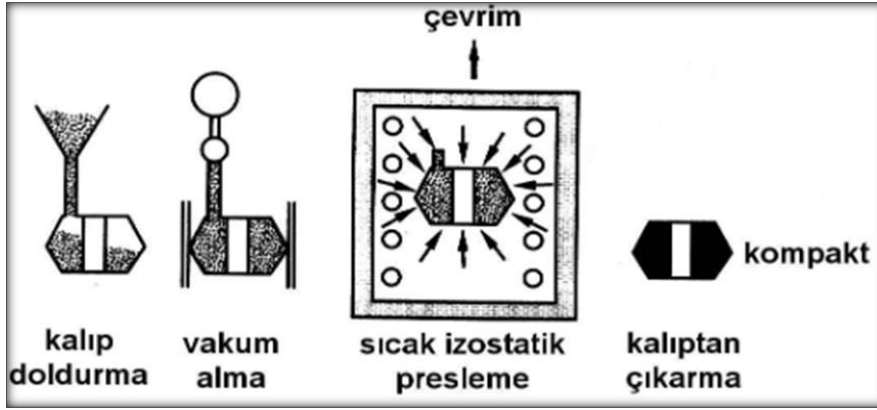
Şekil 4.15. Çift yönlü sıkıştırma yoğunluk dağılımı ve sıkıştırma işlemi [51]

Kalıpla sıkıştırma en önemli problemin başında kalıp yüzeyinde oluşan sürtünmedir. Sürtünme ham parçanın kalıptan kolay çıkartılmasını engeller ve homojen olmayan yoğunluklu parça üretimine sebebiyet verir. Sürtünme probleminin önüne geçmek için yağlayıcılar kullanılır [33,51].

#### 4.3.2. İzostatik presleme

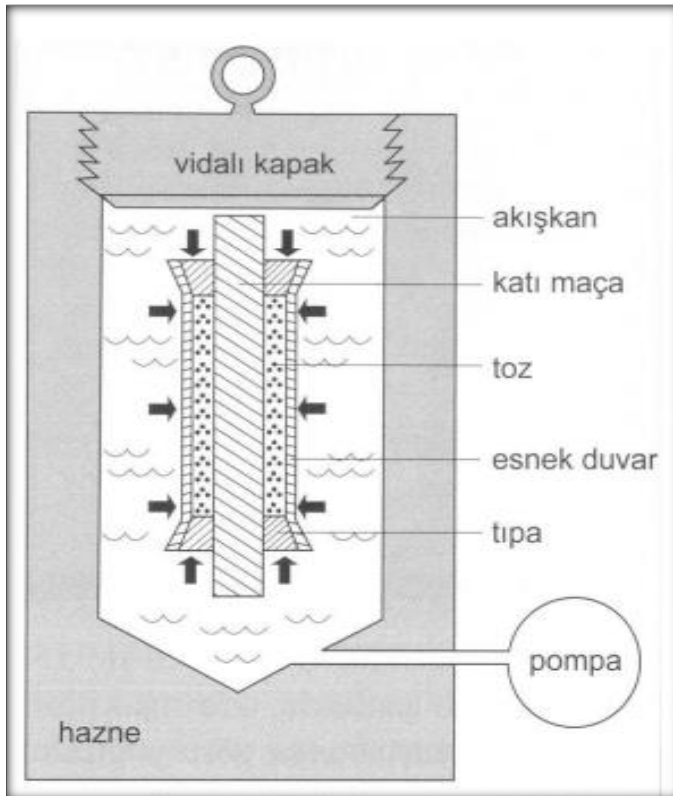
Sıcak İzostatik presleme (HIP) ve Soğuk izostatik presleme (SIP/ (CIP) olarak iki şekilde yapılmaktadır. İzostatik presleme kalıpta sıkıştırma ile istenilen sonuca ulaşamayacak üretimi zor parçaların sıkıştırılmasında kullanılır [33,50,64].

HIP yüksek sıcaklık ve basınçta (en yaygın argon veya azot), esnek kalıp içerisinde tozların kuvvetli difüzyon bağlarıyla yoğunlaştırılarak şekillendirmesidir. Maksimum teorik yoğunluğun %100' ünü elde edebilir ve kritik, yüksek performanslı malzemelerin sünekliliğini ve yorulma direncini artırabilir. HIP, maksimum çalışma basınçları 15.000 - 45.000 psi arasında belirtilebilir. Sıcaklıklar 2.000 °C' ye kadar değişebilir ve özel uygulamalar için yüksek basınç ve sıcaklıklarla da uygulanabilir [33,50,52,53,64].



Şekil 4.16. Sıcak izostatik preslemenin şematik görünümü [53]

SIP işlemi; kompozit tozlarının bir akışkanın basıncı ile sıkıştırılmasıdır. Kademeli ve karmaşık şekilli parçalar veya boy/çap oranının büyük olduğu parçalar için tercih edilir. SIP işleminde toz esnek bir kalıp içine dökülür. Toz dolu kalıp, bileşiminde yağ veya su gibi bir sıvının olduğu kabın içinde sıkıştırılır. Genellikle yağlayıcılar kullanılmaz. SIP genellikle 420 MPa altındaki basınçlarda yapılır. Esnek kalıp; lastikli lateks, poliüretan gibi dayanıklı polimerden yapılır. Bazı durumlarda sıkıştırmadan önce kalıbın içindeki hava boşaltılır [33,50,54].



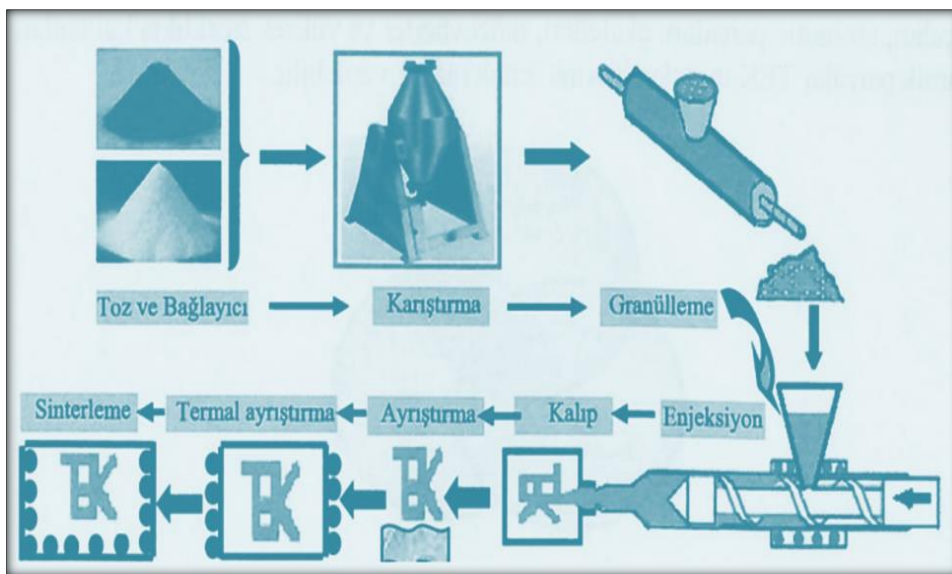
Şekil 4.17. Soğuk izostatik preslemenin şematik görünümü [66]

İzostatik preslemenin avantajları [33,50];

- ✓ Alışagelmış kalıplarda üretilmesi ve işlenmesi zor parçalar üretilebilir.
- ✓ İzostatik basınçtan dolayı, karmaşık parçalarda bile homojen yoğunluk elde etme imkanı sağlar.
- ✓ Mükemmel derecede mikroyapıya sahip malzeme üretilir.
- ✓ Kalıp duvarına sürtünme işlemi gerçekleşmediği için üretilen parçalarda kalıntı gerilmesi olmaz.
- ✓ Üretim aşamasında malzeme kaybı az, işçilik ve enerji bakımından diğer tekniklere nazaran daha ekonomiktir.

#### 4.3.3. Toz enjeksiyon kalıpta presleme

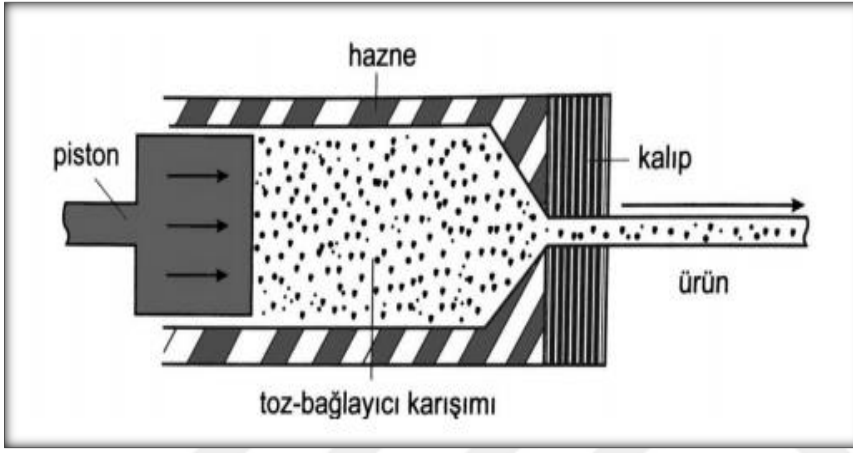
Toz enjeksiyon kalıplama (TEK); metal ve seramik tozlarının bir bağlayıcı yada taşıyıcı yardımıyla kalıp içerisine doldurulması yöntemidir. TEK, plastik enjeksiyon kalıplamada kullanılan cihazlarla aynıdır. Karmaşık şekilli küçük boyutlu makine parçalarının, protezlerin ve tıbbi cihaz parçalarının üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bağlayıcılar karışım tozların akışkanlığına yardımcı olarak karmaşık kalıp doldurmasına katkı sağlar. Yüksek sinterleme yoğunluğuna ulaşabilmek için genellikle küresel şekle yakın ve ortalama çapı 20 µm altında olan parçacıklar kullanılır[33,50,55].



Şekil 4.18. TEK yönteminde imalat aşamaları [50]

#### 4.3.4. Ekstrüzyon ile presleme

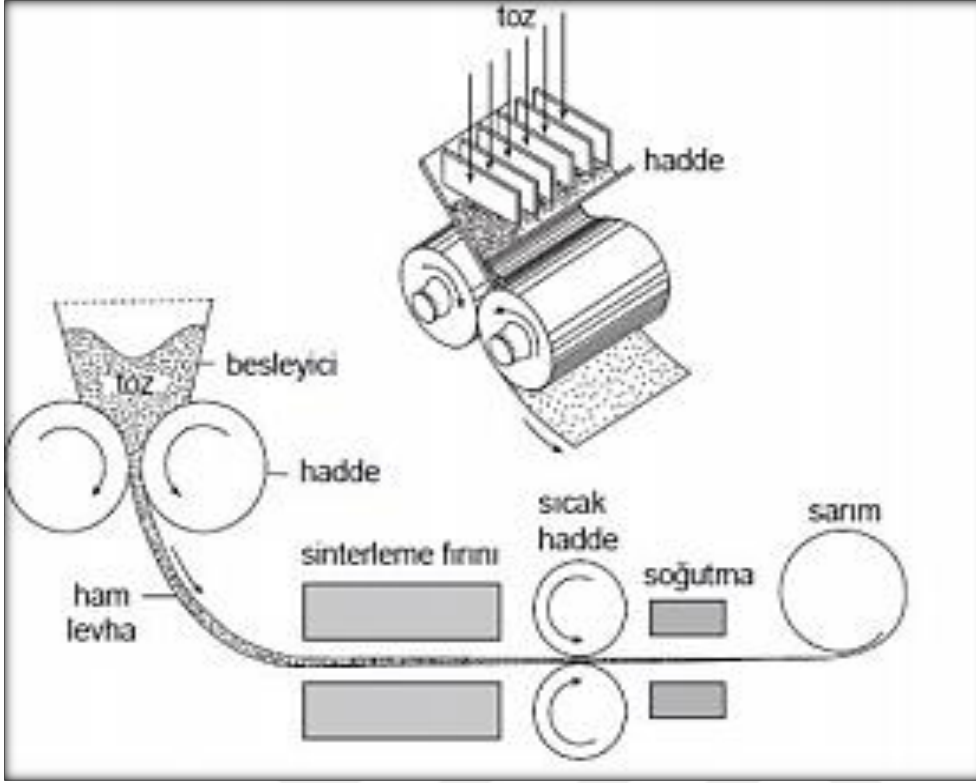
Isınmış olan hazneye toz ve bağlayıcı içeren karışım konur ve bir piston vasıtasıyla sıkıştırılarak hazne ucuna yerleştirilen parça kalıbından ürünün çıkartılması işlemidir. Malzemenin kalıptan çıkış hızı uygulanan basınca bağlıdır. Çubuklar, tüpler, matkap uçları, bal peteği şekilli malzemeler ve kaynak elektrotları gibi genişliği ince olan malzemeler üretilmektedir [33,63].



Şekil 4.19. Ekstrüzyon ile presleme işlemi [52]

#### 4.3.5. Haddeme ile presleme

Haddeme, gevşek metal tozlarının bir dizi silindir çiftleri arasından geçirilerek şekillendirilmesi işlemidir. Haddeme işleminde silindirler çok düşük hızlarda döndürülürler. Tozlar haddeme doğrultusunda yönlenecek şekilde alırlar. Bu teknik için sünek tozların kullanımı uygun olup gevrek tozların pekleşmesi sebebiyle üretime uygun değildir. Haddeme yöntemi ile basit şekilli çubuk, levha ve şerit gibi parçalar üretilmektedir. Silindirler arasındaki mesafe, plastik deformasyon miktarını ve nihai ürün kalınlığını belirlemektedir [56].

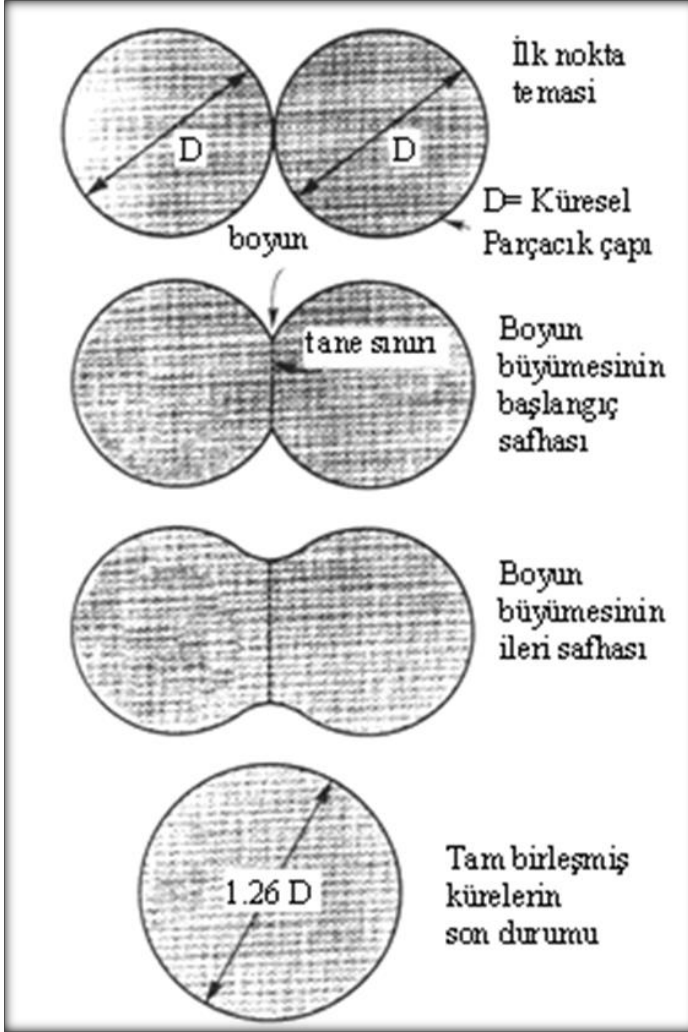


Şekil 4.20. Haddeleme ile presleme işlemi [68]

#### 4.4. Sinterleme İşlemi

Sinterleme; parçacıkların birbirine bağlanmasını, önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısıtma ile atomik difüzyona dayanan bir işlemdir. Sıkıştırılmış ham yoğunluktaki toz parçalar arasındaki bağlantı mekanik kitlenme, yapışma gibi zayıf bağlardır. Sıkıştırılmış parçalarına yüksek yoğunluk ve mukavemet kazandırmak için kompoziti oluşturan bileşenlerin ergime derecesi altındaki sıcaklıklarda ısı işlem uygulanması da sinterlemedir [33,69].

Sinterlemenin başlaması noktasal olarak temas halinde bulunan toz parçacıklarının katı-hal bağına dönüşümü ile başlar. Difüzyon mekanizmasında atomlar mikro yapıdaki boşlukları doldurarak gözenekler küreselleşerek kaybolur. Sinterleme işlemi şekil 4.21’ de gösterildiği gibi, iki parça nokta teması ile başlayan, ara parçacık bağının gelişmesi ile devam eden mekanizmaya çift-küre sinterleme modeli denilmektedir. Bu modelde, parçacık temasının sonucunda oluşan boyun büyümesiyle yeni bir tane sınırı oluşur ve iki parçacık tek bir parçacık oluşturacak şekilde birleşir [33,48,57].



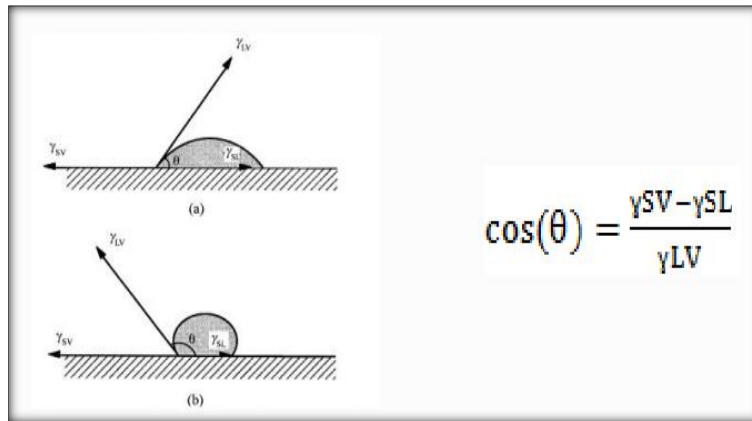
Şekil 4.21. Çift - küre sinterleme modeli [69]

Sinterleme sonucu mikro yapı oluşumunda ana belirleyicisi sıcaklık olup ısıtma hızı, sinterleme süresi, parçacık boyutu, ham yoğunluk ve atmosfer gibi özellikler etki etmektedir. Tek bileşenli kompozitlerde metalin ergime sıcaklığının takriben 4/5'i alınarak sinterleme işlemi yapılırken, birden fazla bileşenli kompozitlerde ise sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığı yüksek olan bileşenin ergime sıcaklığının altında, ergime sıcaklığı düşük olan bileşenin ergime sıcaklığının üzerinde seçilerek gerçekleştirilmektedir. T/M yöntemi ile yüksek yoğunluk ve mukavemette malzeme üretilmesine gereksinim duyulduğunda sıcak preslemeyle üretim tercih edilebilir. Fakat sıcak presleme ile parça üretimi hızlı ve seri imalatı ortadan kaldıran bir sınırlılığa sahiptir. Çizelge 4.1' de bazı malzemelerin sinterleme sıcaklık ve süreleri verilmiştir [33,48,57,69,70].

Çizelge 4.1. Bazı malzemelerin sinterleme sıcaklıkları ve süreleri [30]

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

Sıvı faz sinterlemesi için genel gereksinim ıslatmadır. Islatılabilirlik, katı bir yüzey üzerinde bir sıvının yayınabilme kabiliyetidir. Islatılabilirlikte,  $\gamma_{sv}$ , katı/gaz arayüzey enerjisi,  $\gamma_{sl}$ , sıvı/katı arayüzey enerjisi ve  $\gamma_{lv}$ , sıvı/gaz arayüzey enerjisi olmak üzere üç farklı enerjiden bahsedilebilir. Katı yüzeye bir sıvı damlacık temas ettiğinde, katı/gaz, sıvı/katı ve sıvı/gaz ara yüzeyiyle kesilir.  $\theta$ : ıslatma açısı, Young eşitliğiyle ifade edilir [33,56]:

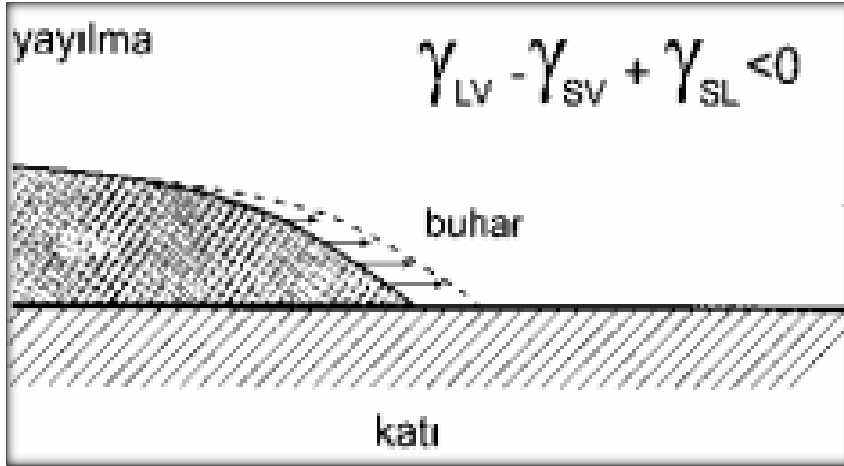


Şekil 4.22. Katı yüzeyde sıvı damlacığın iki farklı şekilde yayınımı [68]

$\theta = 0$  olduğunda mükemmel ıslatma gerçekleşir.

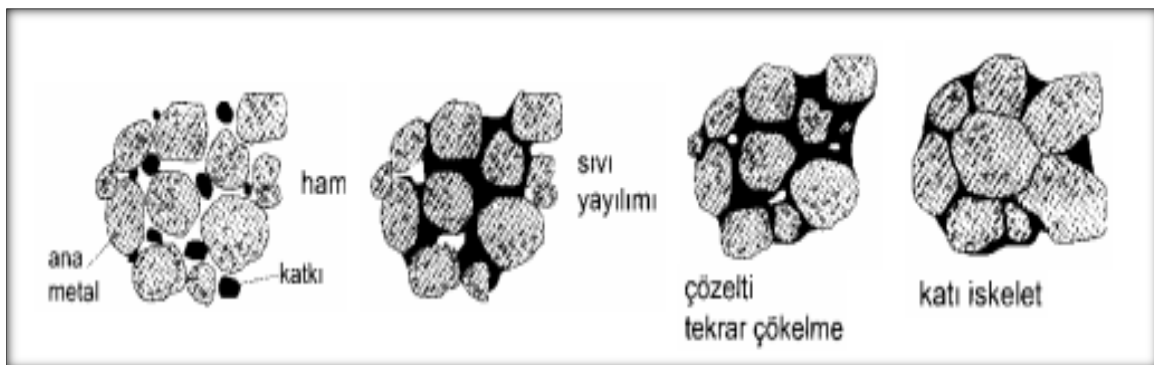
$0 < \theta < 180$  olan durumlarda kısmi ıslatma olur.

$\theta = 180$  olduğunda ise ıslatma gerçekleşmez.



Şekil 4.23. Sıvı fazlı sinterlemede katı tanelerin sıvı ile ıslatılması [68]

Şekil 4.24' te aşamaları gösterildiği gibi sıvı faz sinterlemesinde ısıtma sırasında taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanır. Sıvının ilk oluşumu ile taneler yeniden düzenlenir ve hızlı bir yoğunluk artışı gerçekleşir. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak daha önce oluşan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenme gerçekleşir. Akabinde çözelti tekrar çökme gerçekleştirerek sıvı, katı atomların taşıyıcısı olurlar. Bu safahatta daha küçük kütleli katılar sıvı içerisinde çözünerek büyük sıvı içerisinde yayınırlar ve büyük tanelerin üzerine çöklerler. Katı tanelerin çözünürlüğü tanelerin boyutuna bağlı olup boyutu ile ters orantılıdır. Bu sebeple öncelikle küçük taneler sıvı faz içinde çözünerek ilerleyen süreçte tane sayısı azalırken tane boyutu artar. Bu taneler temas noktalarından kararlı boyunlar oluşturur ve son yoğunlaşmayla katı iskeletin sinterlenme işlemi gerçekleşmiş olur [33,58,68].



Şekil 4.24. Çift-küre sinterleme modeli [38]

#### 4.5. Tam Yoğunluk İşlemleri

T/M aşamalarından geçerek üretilen ürün daha sonra isteğe bağlı veya üretilen parçaların karşılanması için bir dizi işlemlerden geçirilebilir. Bu işlemler; tam yoğunlaştırma, ısıl işlemler, talaşlı imalat ve kaplama yüzey işlemleri olarak sayılabilir. Malzemelerin basınç ve sıcaklık aynı anda kullanılarak tekrar sinterlenmesi ile yoğunlukları geliştirilebilir. Gözeneksiz mikroyapılar istenilen durumlarda tam yoğunluk işlemleri uygulanmaktadır [33,65,66].





## 5. AŞINMA

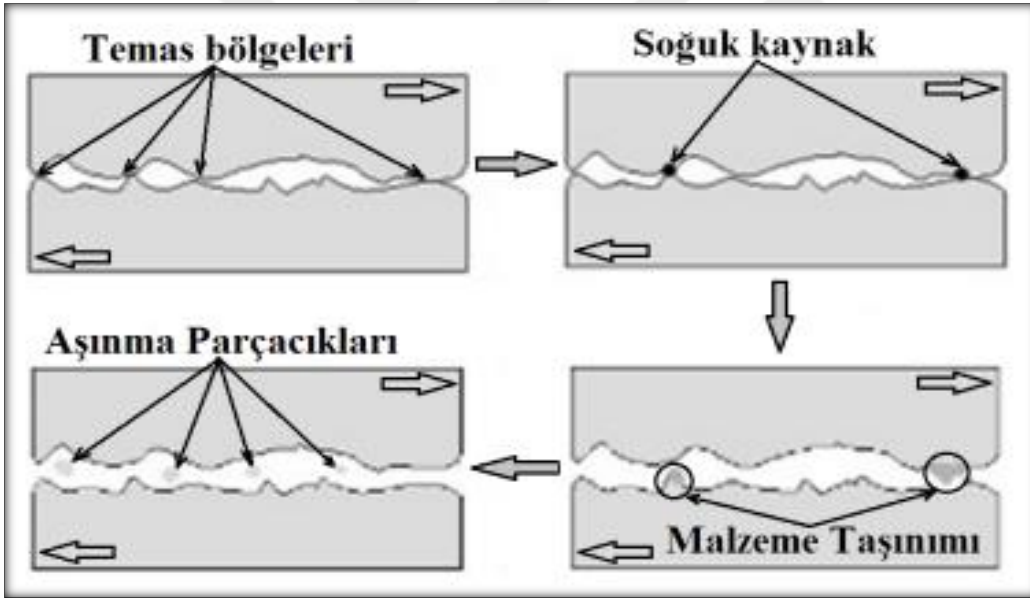
Alman Standartlar Enstitüsü ( Deutsches Institut für Normung e. V. ) kısaca DIN 50320 ye göre aşınma, malzeme yüzeyinden mekanik etkiler sonrasında ufak parçacıkların ayrılması neticesinde oluşan ve arzu edilmeyen malzemede meydana gelen şekil değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle aşınma birbirine temas eden parçaların sürtünmeyle parçaların malzeme kaybetmesidir. Sürtünme, birbirleri üzerinde kayan, yuvarlanan veya kayarak yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan ya da engelleyen mekanik bir direnç olarak DIN 50281’ de tanımlanmıştır. Bir birine temas eden makine parçaları zamanla aşınarak görevini düzgün bir şekilde yerine getiremezler. Aşınma izi çizilme, çukurlanma, pullanma, oyulma, parlama, kemirilme ve kazılma şeklinde olabilirler. Aşınmanın gerçekleştiği ortamlar yuvarlanma aşınması, yüksek sıcaklık metalik aşınması, yüksek gerilmeli kayma aşınması, yağlı/yağsız aşınma ve metal-metal kayma aşınması olarak sınıflandırılabilirler. Aşınma, ana malzeme (aşınan), aşındıran, ara malzeme, hareket ve yük gibi değişkenlerin oluşturduğu bir sistemin etkileşiminin sonucudur. Aşınmaya sebep olan esas yük faktörleri; Mekanik, ısı, kimyasal ve sürtünmedir. Aşınma sonucu kesme takımlarında, makine parçalarının kullanım sürelerinde ve performanslarında azalma olabilir, tamamen kullanılmaz duruma gelebilirler. Bunun sonucunda iş güvenliği, işgücü, zaman, verimlilik kaybına yol açar bu durum büyük ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Aşınma endüstride en çok karşılaşılan problemlerin başında gelmektedir. Bu sebeple birçok araştırmacı triboloji üzerine çalışmalar gerçekleştirmektedirler. Yüksek aşınmanın olduğu ve yeterli yağlamanın yapılamadığı sistemlerde aşınmaya karşı daha dayanıklı malzemeler kullanılmalıdır. Bu kapsamda MMK dikkat çekmektedir. Özellikle Al matrisli ve seramik takviyeli kompozitlerin aşınma direnci yüksek malzemelerdir Bu sebeple şaftlar, piston, silindir gömleği gibi otomotiv parçaların üretimi yapılmaktadır [70-74].

### 5.1. Aşınma Türleri

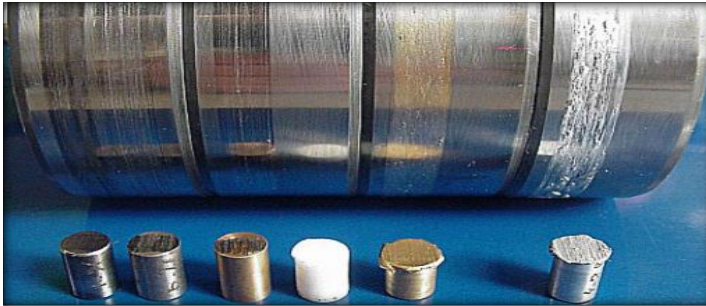
Aşınmanın türleri genel itibarıyla adheziv, abrasiv, yorulma, korozyon, erozyon aşınması olarak sınıflandırılabilirler.

### 5.1.1. Adhezif (Adhezyon) Aşınma

Adhezif aşınma en çok karşılaşılan aşınma türü olup kaynaklanma şeklinde gerçekleşmektedir. Adhezif aşınması birbirine temas eden parçaların temas yüzeylerinin, normal kuvvetin etkisinde izafi hareket yapmaları ile oluşan aşınmadır [70]. Daha çok kayma sürtünmesi sırasında metalografik yapıları benzer olan malzeme çiftleri arasında adhezif çekim kuvveti meydana gelir. Temas malzeme çiftinin pürüzleri arasında olduğu için malzemenin ağırlığından ve dış kuvvetlerden dolayı pürüz tepelerinde yüksek bir basınç meydana gelir. Bu basınç pürüzlerin akma dayanımını aşınca pürüzler plastik deformasyona uğrayarak birbirine sıvanarak kaynak oluşturur. Kaynak olmuş bu tepelikler iki metalin hareketlerine devam etmesi sonucu koparlar ve küçük parçacıklar serbest kalırlar. Böylece aşınma gerçekleşmiş olur [72].



Şekil 5.1. Adhesiv aşınmanın şematik gösterimi [75]



Resim 5.1. Adhesiv aşınmadan sonra meydana gelen malzeme transferi [76]

Bu tip aşınma, yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve sürtünme koşulları altında gerçekleşir. Bu aşınma mekanizması mikroskobik seviyede meydana geldiğinden, deformasyon çıplak gözle görülemeyebilir [76].

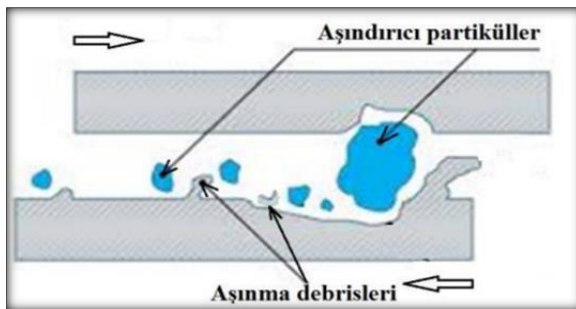
Sürtünme aşınması oranı birkaç faktöre bağlıdır: iki yüzey arasında hareket eden kuvvet, hız, çalışma ortamının sıcaklığı, yüzey durumu ve yüzey sürtünme katsayıları. Çalışma ortamındaki ana malzemenin türü de önemli bir etkiye sahiptir. Özdeş kristalografik yapıya sahip örneğin kesiciler, rulman yatakları gibi malzemelerin kullanımı, sürtünme aşınması riskini artırır [76].

Adhezif aşınmayı önlemek için [76];

- ✓ Sistemi oluşturulan parçalar benzer veya kolay alaşım yapabilecek parçalar olmamalıdır.
- ✓ Birbirine temas eden malzemelerden bir sert ise diğeri yumuşak seçilmelidir.
- ✓ Metal - metal malzemelerde yüzey kaplaması yapılabilir.
- ✓ Metal – metal malzemelere yüzey sertleştirilmesi yapılabilir.
- ✓ Mümkünse sistemde iyi bir yağlama yöntemi yapılacak şekilde tasarlanabilir.
- ✓ Sistemin izin vermesi halinde pürüzsüz yüzeyli malzemeler kullanılabilir.

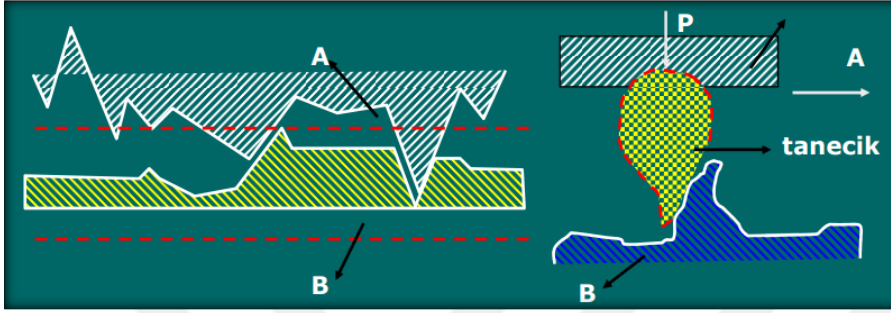
### 5.1.2. Abrasiv (Abrazyon) aşınma

Abrasif aşınması; çizilme veya yırtılma aşınması olarak da bilinen, birbirine göre izafi hareket yapan iki cisim temas yüzeyleri arasına ortamdaki kaynaklanan yabancı sert parçacıkların girmesiyle ortaya çıkan, aşındırdığı yüzeyde çizikler ve kesikler şeklinde hasara sebebiyet veren bir aşınma türüdür [78].



Şekil 5.2. Abrasiv aşınma mekanizması [75]

Bu aşınma mekanizması iki ve üç elemanlı olarak gerçekleşmektedir. İki elemanlı aşınmada direkt iki malzemenin birbiriyle sürtünmesiyle oluşurken, üç elemanlı aşınmada ise, iki cismin sürtünmesi sırasında, ara yüzeylerinde sürtünmeden kopan veya dışarıdan gelen üçüncü elaman olarak nitelendirilen sert taneciklerin bulunmasıyla meydana gelmektedir [77].



Şekil 5.3. İki ve üç elemanlı abrazif aşınma [68]

Metal-metal malzemelerin sürtünmelerinde iki elemanlı abrazif aşınmasıyla başlar ve daha sonra üç elemanlı olarak devam eder. Burada üçüncü elamanı, araya giren çizilme sonucu kopan mikro parçalar, toz veya parçalanmış oksit parçacıkları oluşturabilirler. Abrazif aşınma endüstriyel makinalardaki en çok görülen ve en önemli aşınma türüdür. İş makinalarının kazıma bıçakları, kırıcı uçları ve çalışma ağızlarında, cevher işleme tesislerinde, eleklerde, öğütme değirmenlerde ve traktör gibi tarım makinelerinde yaygın olarak görülür [77,78].

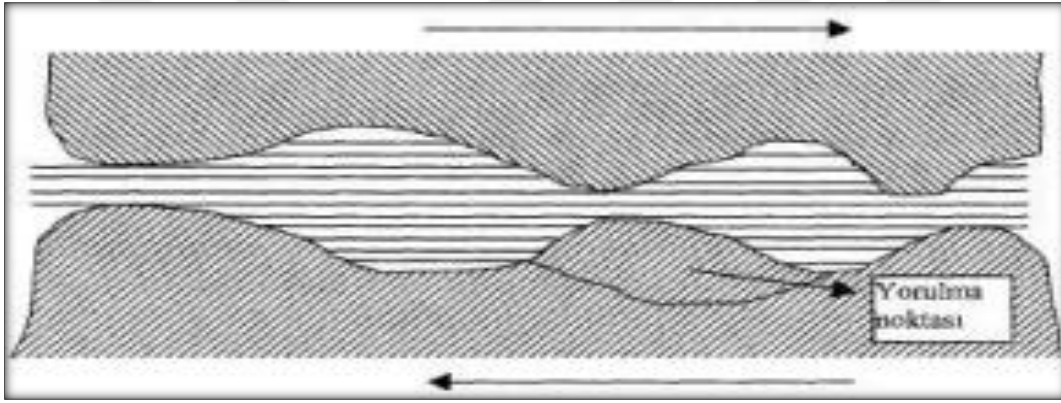
Abrasive aşınmayı azaltmak için,

- ✓ Sert alaşımlı malzemeler kullanılmalı
- ✓ Abrazif parçacıkları sistemden uzaklaştırmaya imkan tanıyacak şekilde tasarım yapılmalı
- ✓ Metal malzemelere sertlik artırma ısıl işlemi uygulamalı
- ✓ Malzeme yüzeylerini sert bir malzeme ile kaplama yapılabilir.

### 5.1.3. Yorulma aşınması

Değişken, tekrarlı yüklemeler sonucunda maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerlerde plastik deformasyon ve dislokasyona bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana

gelir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyürler, büyüyen bu boşluklar yüzeyde küçük çukurların oluşmasına sebep olur, bu duruma yorulma aşınması denir. Yorulma aşınma hem plastik hem elastik temaslarda meydana gelebilir. Çoğunlukla dinamik zorlanma sonunda temas yüzeyinin altında veya yakınında içyapının yorulması ile yüzeyden küçük parçaların kopmasıyla aşınma gerçekleşir. Birçok aşınma sürecinde yorulma aşınmasının görülür. Aşınmanın büyüklüğü mekanik gerilmelere bağlıdır. Çoğunlukla, rulmanlı yatakları, dişli çarklar ve yuvarlama hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür. Bu aşınma türünde doğal sertlik önemli bir husustur. Yorulma aşınması yumuşak malzemelerde görülmemektedir. Yorulma aşınmasını önlemenin en etkili yolu yüzeylerin sertleştirilmesidir [68,69,70,77].

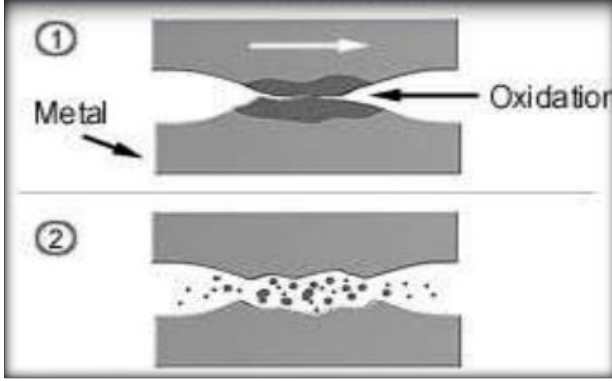


Şekil 5.4. Yorulma aşınması mekanizması [71]

#### 5.1.4. Korozyon aşınması

Malzeme yüzeyinin kimyasal bir madde ile temasından ortaya çıkan aşınma türüdür. Korozyon bir ortamdaki temas durumunda temas ara yüzeyinde tribo - kimyasal reaksiyon meydana gelebilir. Korozyon ortamdaki tribo - kimyasal reaksiyon bir malzeme kaybına yol açmışsa, bu aşınma korozyon aşınması olarak adlandırılır. Havada en baskın korozyon ortam oksijendir ve metallerin havadaki tribo-kimyasal aşınması genellikle oksidatif aşınma olarak adlandırılır. Korozyon aşınması hem plastik hem elastik temaslarda meydana gelebilir. Bu aşınma tipinde çalışma ortamıyla parça yüzeyleri arasındaki etkileşim önemli rol oynar. Korozyon aşınma iki kademede gerçekleşir. İlk olarak temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girer ve yüzeyde bir tabaka oluşur. Daha sonra temas noktasında çatlak oluşur veya abrazyon etkiden dolayı oluşan tabaka hasara uğrar. Bu aşınma türüne yağın

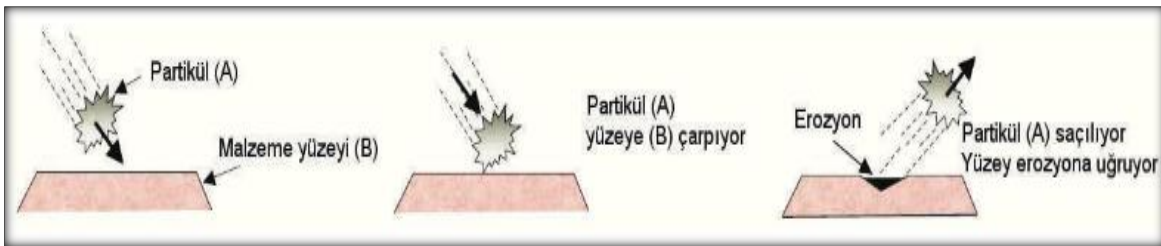
içinde bulunan asit sebep olabilir. Isının artması aşınmayı hızlandırmaktadır. Bu aşınmayı önlemenin en iyi yolu malzemeyi koruyucu bir tabaka ile kaplamaktır [80,81].



Şekil 5.5. Korozyon aşınması mekanizması [79]

### 5.1.5. Erozyon aşınması

Katı veya sıvı aşındırıcı parçacıkların hava veya sıvı bir ortam içerisinde hedef numunenin yüzeyine çarparak numuneden malzeme kaldırması olayına erozyon aşınması denir. Erozyon aşınması birkaç aşınma mekanizmasını kapsar. Bu aşınma mekanizmaları, parçacık malzemesi, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık boyutuyla genelde kontrol edilebilir. Yaygın olarak pompalarda, pervanelerde, fanlarda, nozullarda, boru ve tüplerin dirseklerinde görülür [79,82].



Şekil 5.6. Erozyon aşınması mekanizması [80]

## 5.2. Aşınma Test ve Ölçüm Yöntemleri

Aşınma mekanizmalarına göre aşınma testleri de çeşitlilik gösterebilmektedir. Bu sebeple çok sayıda aşınma testi bulunmaktadır. Aşınma testleri değişik deney düzeneklerinde yapılmaktadır. Aşınma deneylerini genel olarak iki başlık altında toplamak mümkündür.

Birincisi yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü testler. İkincisi ise katı, sıvı ve gaz halinde ki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü testler. Aşınma deneylerinde en yaygın deney donanımlarından birisi, bir disk (Silindir veya dikdörtgen) üzerine bastırılan pimdir. "Disk üzerinde pim" metodunun başka şekilleri de vardır. Ancak ana fikir hep aynıdır. Bu tip asimetrik düzenlemelerde, pim ya da blok çoğu zaman numunedir ve bu parçanın aşınma hızı ölçülür. Diğer parça olan disk ise, "dış yüzey" olarak isimlendirilir. Aşınma deney düzenekleri uluslararası standartlara uygun olarak standartlaştırılmıştır [80,83].

Çizelge 5.1. Tribolojik testler, ilgili aşınma prosesleri ve aşınma mekanizmaları [84]

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 yöntem: Ağırlık farklı metodu, ölçüm yöntemleri içerisinde hem ekonomik hem de hassas sonuçlar edilmesinden dolayı en çok tercih edilen yöntemdir. Aşınma testi numunenin deneyden önce ağırlığı hassas terazide tartılarak kayıt altına alınır. Daha sonra numunenin aşınma testi sonrası ağırlığı tekrar tartılarak kayıt altına alınır. Kayıt altına alınan ağırlık kaybı verilerinin farkı aşınan malzeme miktarını verir. Numunenin ağırlık ölçümlerinde  $10^{-5}$ - $10^{-3}$  gram hassasiyetine sahip teraziler kullanılır [85].

Aşınma miktarı ağırlık ve sürtünme yolu birimleri bakımından ağırlık kaybı, gr/km ve mg/m cinsinden ifade edilirler. Ağırlık kaybı, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir. Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntılar şunlardır [77].

$$W_a = \frac{\Delta G}{d.M.S} (\text{mm}^3.N^{-1}.m^{-1}) \quad (5.1)$$

Burada;

$W_a$ : Aşınma oranı ( $\text{mm}^3.N^{-1}.m^{-1}$ ),

$\Delta G$ : Ağırlık kaybı (mg),

$M$ : Yükleme ağırlığı (N),

$S$ : Aşınma yolu (m),

$d$ : Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ ) olarak verilmiştir.

Aşınma ( $W_a$ ) ters değeride aşınma direnci ( $W_r$ ) olarak gösterilir.

$$W_r = 1/ W_a \quad (5.2)$$

Başka bir ilişki, genellikle iki cisimli abrasiv aşınmanın hesaplanmasında kullanılan kilometre kayma yolunu kabul eden yükseklik kaybı ilişkisidir.

$$V_s = [10^4.\Delta G/(F.d.S)](\mu/\text{km}) \quad (5.3)$$

Burada;

$V_s$ : Bir km aşınma yolunu kabul eden yükseklik kaybı ( $\mu\text{m}$ ),

$\Delta G$  : Ağırlık kaybı (mg),

$F$  : Aşınma yüzeyi ( $\text{cm}^2$ ),

$d$  : Yoğunluk ( $\text{gr/cm}^3$ ),

$S$  : Kayma yolu (km) olarak alınır.

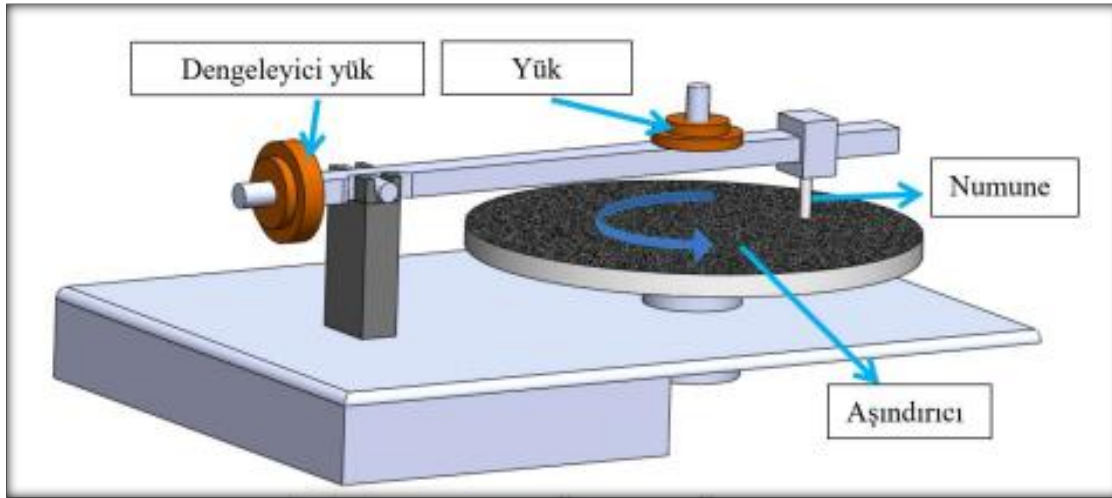
Deney malzemesi yükseklik kaybının, referans malzemesinin (örneğin Fe37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı sayısını ( $W_s$ ) verir.

$$W_s = \frac{V_s(\text{deney numunesi})}{V_s(\text{Fe37})} \quad (5.4)$$

Bu orantı sayısının ters değeride bağlı aşınma direnci ( $R$ ), olarak kullanılır.

$$R = 1/Ws$$

(5.5)



Şekil 5.7. Zımpara üzerinde aşınan pim (Pin On Disk) [86]

Kalınlık farkı yöntemi: Numunenin aşınmaya uğramadan önce başlangıç değeri ile aşınma sonrasında oluşan boyut değişikliğinin karşılaştırılması işlemidir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanmaktadır. Kumpas, mikrometre vb. hassas ölçme aletleri yardımı ile kalınlık farkı  $\pm 1 \mu\text{m}$  duyarlılıkta ölçülmelidir [87].

İz değişimi yöntemi: İz değişim yönteminde, sürtünmeye maruz kalan aşınan yüzeyde plastik deformasyon yöntemi ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Bu izin oluşumunda Brinell veya Vickers sertlik ölçüm uçlarından yararlanılır. Bu uçların oluşturduğu geometrik izin çapının boyutundaki değişim bir mikroskop yardımıyla ölçülerek aşınma miktarı belirlenir [77].



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Toz metal kompozit üretimi ve deneysel çalışmaların yapıldığı tez çalışmasında; tozların tartılması - turbula cihazında karıştırma işlemi ile karışım tozların hazırlanması, sıcak preslemeyle toz metal blok parçaların üretimi, üretilen numuneler üzerinden yoğunluk ölçümü, metalografik inceleme, sertlik ölçümü, çapraz kırılma testleri, SEM-EDX görüntü alma ve analiz çalışmaları, Pi-On-Disk metodu ile kuru kayma aşındırma testleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 6.1. Malzeme

Sıcak presleme ile üretilecek toz metal kompozit parçalar için matris malzemesi olarak 200 µm altı parçacık boyutunda ve Çizelge 6.1' de kimyasal kompozisyonu verilen % 99,97 saflıkta atomize alüminyum tozu, takviye elemanı olarak ise 16 µm altı parçacık boyutunda SiC tozu kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. 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

### 6.2. Karışım Tozların Hazırlanması

Bu çalışmada sıcak presleme ile SiC takviyeli alüminyum matrisli toz metal kompozit parça üretimi hedeflenirken presleme öncesi belirlenen oranlarda 0,1 mg ölçüm hassasiyetine sahip hassas terazide tartımları yapılmış her iki tozun birbiri içerisinde homojen dağılımını sağlamak amacıyla T2F tipi turbula cihazında karıştırma-öğütme uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tozların karıştırma işlemi çizelge 6.2' de verilen şartlarda ve Resim 6.1'de gösterilen turbula cihazında yapılmıştır.

Çizelge 6.2.Turbula cihazında karıştırma parametreleri

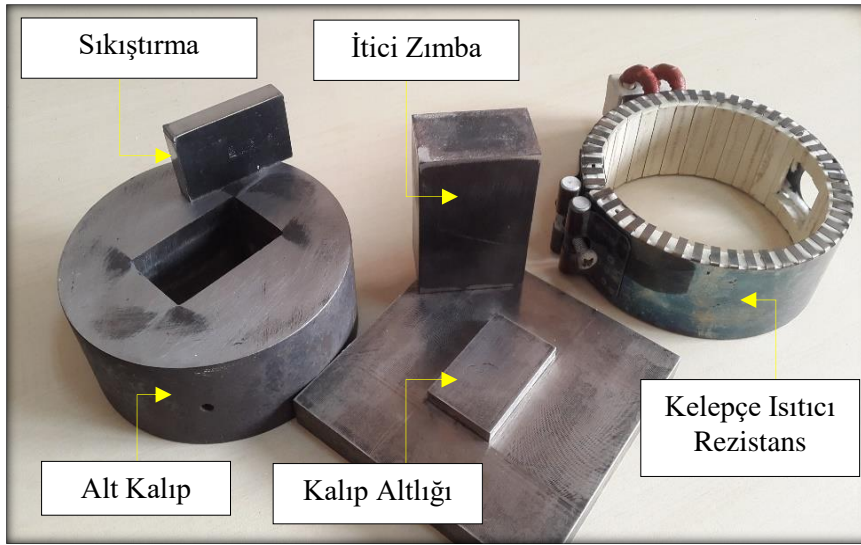
Karışım Toz	Al (gr)	SiC (gr)	10 mm Çapta Çelik Bilye (gr)	Plastik Kap İç Hacmi (WxDxH mm)	Karıştırma Süresi (saat)	Hareket Hızı (dv/d)
Al + SiC	225	25	200	608x501x393	2	450



Resim 6.1. Karıştırma - öğütme yapılan turbula (Type-T2F) cihazı

### 6.3. Karışım Tozlardan Sıcak Presleme ile Blok Malzeme Üretimi

Sıcak presleme öncesi kalıp iç yüzeyleri MOLYKOTE G-n Plus Paste marka yağlayıcı ile yağlandıktan sonra kalıp içerisine toz beslemesi yapılmıştır. Toz beslemesi yapılan kalıbın çevresine kelepçe ısıtıcı rezidans yerleştirilmiş daha sonra hidrolik pres altında 50 MPa ön yükleme yapılmıştır. Kelepçe rezistans sistemiyle toz metal yüklü kalıp 10 °C/dk ısıtma hızıyla ısıtmaya başlanıldı ve kalıp üzerindeki termo-cupel ısıölçerle ısınma ve ısınma hızı takip edilmiştir. Ortam sıcaklığı önceden belirlenen presleme sıcaklığına (500, 520, 540, 560 ve 580 °C) yükseldiğinde basınç 200 MPa' a yükseltilerek mevcut sıcaklık ve basınç altında 2 saat beklenmiştir (Resim 6.3).

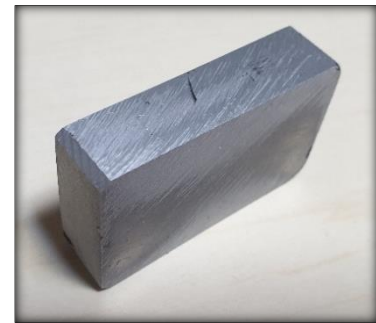


Resim 6.2. Kalıp elemanları ve ısıtıcı

Presleme süresi bitiminde uygulanan yük sonlandırılmış ve toz metal kompozit malzeme kalıp içerisinde oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Bu uygulama farklı sıcaklıklarda - tekrarlanarak presleme sıcaklığı farklı 14x32x52 mm boyutlarında toplam 5 ayrı toz metal kompozit blok numune üretilmiştir (Resim 6.4).



Resim 6.3. Sıcak Presleme yapılan hidrolik pres



Resim 6.4. Blok numune

#### 6.4. Metalografik İnceleme

Metalografik inceleme için numuneler ATM Opal 460 model bakalite alma cihazında sıcak bakalite alınarak daha sonra sırayla 120, 320 - 600 ve 1200' lük zımparalar ile zımparalama ve 6;3 mikronluk oxide polishing colloidal silica solüsyon kullanılarak

parlatma işlemi yapılmıştır. Daha sonra optik mikroskopta ve taramalı elektron mikroskobu ( SEM ) görüntüleri alınarak kompozit malzemenin sinterleşme derecesi, matris yapı içerisindeki takviye partiküllerin dağılım durumu, matris takviye ara yüzeyi bağlanma durumu incelenmiştir.



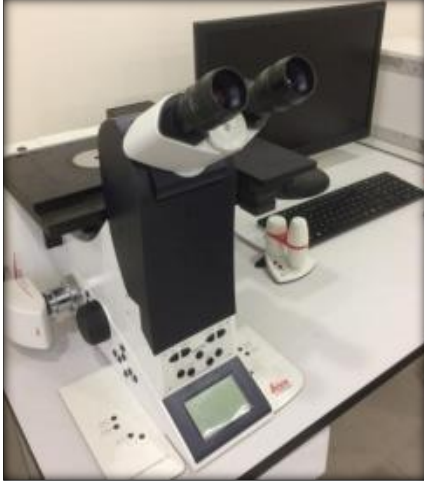
Resim 6.5. Bakalite alma cihazı ve bakalite alınmış incelenmeye hazır numuneler

Numuneler üzerinde dağlama yapılarak sonrasında optik mikroskopta ve SEM cihazında görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır. Parlatma sonrası numune yüzeyleri kellers dağlayıcı ile 10 saniye süreyle dağlanmıştır. Kellers reaktifinin kompozisyonu Çizelge 6.3' te verilmiştir.

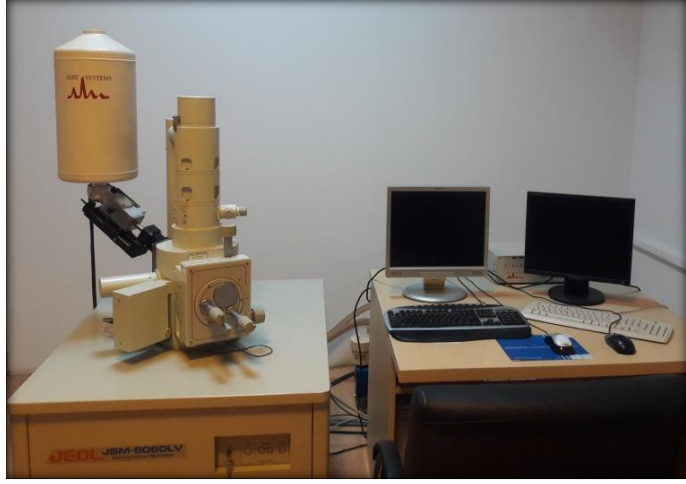
Çizelge 6.3. Kellers dağlayıcısının kompozisyonu

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

Numunelerden görüntü alımı ve EDS analizleri Resim 6.6' da verilen LEICA DMI 5000M optik mikroskop ve Resim 6.7' de verilen JEOL JEM 6060 LV SEM mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.6. Leica DMI 5000M optik mikroskop



Resim 6.7. JEOL JEM 6060 LV SEM Mikroskop

### 6.5. Yoğunlukların Ölçümü

Sıcak presleme ile üretilen presleme sıcaklığı farklı 5 adet toz metal kompozit blok numunenin yoğunluk ölçümleri 0,1 mg ölçüm hassasiyetine sahip üzerinde yoğunluk kiti bulunan hassas terazide arşiment prensibine göre yapılmıştır (Resim 6.8).



Resim 6.8. SARTORIUS marka 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 iken terazinin darası alınır,
- ✓ Numune, askının alt kefesine yerleştirilir ve sudaki ağırlığı tartılır  $G$ ,
- ✓ Havadaki ağırlık sudaki ağırlığına bölünür ve suyun sıcaklığına göre katalogdan alınan katsayı ( $Rho$ ) ile çarpılarak numunenin yoğunluğu bulunur.

$$Yogunluk = \frac{W(a)}{G} \times Rho \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (6.1)$$

500 °C sıcaklıkta preslenen numunenin yoğunluğu =  $0,9688/0,3575 = 2,70 \text{ g/cm}^3$

520 °C sıcaklıkta preslenen numunenin yoğunluğu =  $0,9608/0,3532 = 2,72 \text{ g/cm}^3$

540 °C sıcaklıkta preslenen numunenin yoğunluğu =  $1,0474/0,3841 = 2,726 \text{ g/cm}^3$

560 °C sıcaklıkta preslenen numunenin yoğunluğu =  $1,0078/0,3680 = 2,738 \text{ g/cm}^3$

580 °C sıcaklıkta preslenen numunenin yoğunluğu =  $1,0200/0,3728 = 2,736 \text{ g/cm}^3$

% 90 Al + %10 SiC içeren karışım tozun teorik yoğunluğu;

Karışım teorik yoğunluğu =  $2,70 \times 0,90 + 3,21 \times 0,10$

Karışım tozun teorik yoğunluğu =  $2,751 \text{ g/cm}^3$

- ✓ Bulunan yoğunluk değeri teorik yoğunluğa bölünerek gerçek yoğunluk bulunur.

$$\text{Gerçek yoğunluk} = \text{Numune yoğunluğu} / \text{Teorik yoğunluk g/cm}^3 \quad (6.2)$$

500 °C SP numunenin Gerçek yoğunluğu =  $2,70 / 2,751 = 0,9814 \text{ g/cm}^3$

520 °C SP numunenin Gerçek yoğunluğu =  $2,72 / 2,751 = 0,9887 \text{ g/cm}^3$

540 °C SP numunenin Gerçek yoğunluğu =  $2,726 / 2,751 = 0,9909 \text{ g/cm}^3$

560 °C SP numunenin Gerçek yoğunluğu =  $2,738 / 2,751 = 0,9952 \text{ g/cm}^3$

580 °C SP numunenin Gerçek yoğunluğu =  $2,736 / 2,751 = 0,9945 \text{ g/cm}^3$

## 6.6. Sertlik Ölçümleri

Metalografik incelemesi yapılan numunelerin yüzeyinden Brinell sertlik (BHw) ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümünde Resim 6.9' da verilen Duravision 2000 EmcoTest Sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinde 62,5 kgf yük ve 2,5 mm çapta çelik

bilye kullanılmıştır. Her bir numune yüzeyinden 5' er adet ölçüm yapılmış, ölçümlerin aritmetik ortalaması kompozit numunenin sertlik değeri olarak kabul edilmiştir.



Resim 6.9. Sertlik ölçüm cihazı

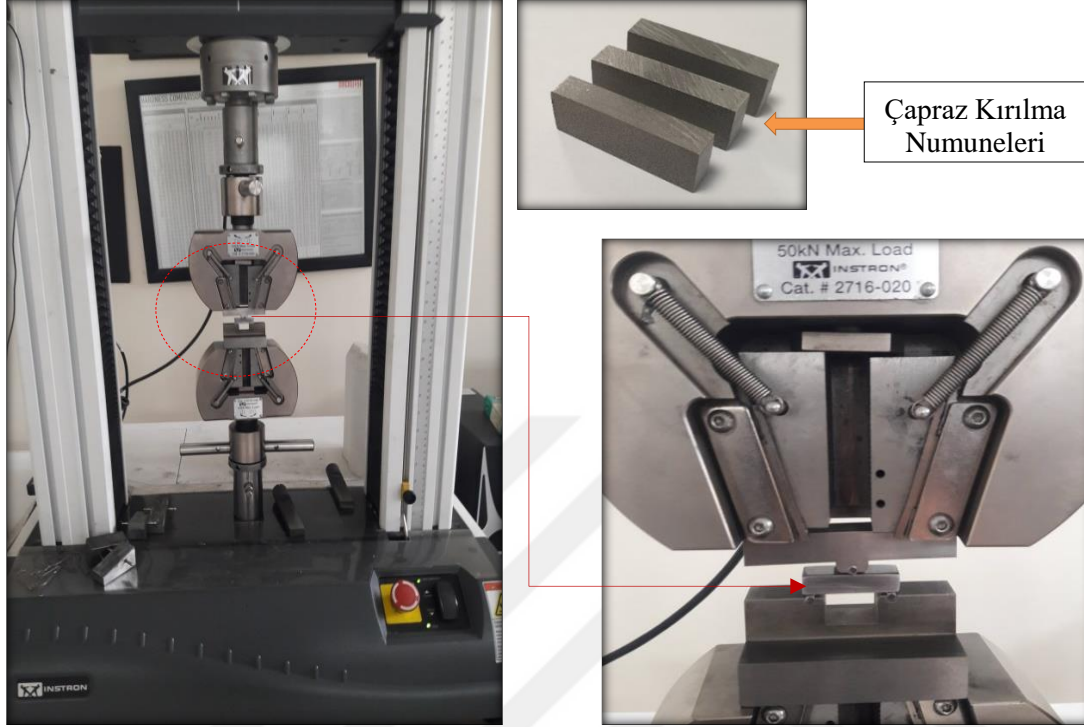
### 6.7. Çapraz Kırılma Testi

Toz metal blok malzemelerden 6,35x12,7x31,7 mm boyutlarında çapraz kırılma numuneleri tel erozyon yöntemiyle kesilerek elde edilmiştir. Kırılma testi öncesi numune yüzeyleri 1200 µm zımpara ile zımparalanarak temizlenmiştir. Zımparalama işlemi ile numune yüzeyinde çentik etkisi oluşturabilecek kusurlar ve oksit yapı tamamen giderilmiştir. Daha sonra numunelerin en ve kalınlıkları 1/20 mm hassasiyette sürmeli kumpasla ölçülerek ölçüm sonuçları çizelge 6.4' te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Çapraz kırılma testi numunelerinin boyut ölçüleri

Numune (°C )	500	520	540	560	580
Genişlik (mm)	12,67	12,30	12,50	12,60	12,70
Kalınlık (mm)	7,06	7,05	7,40	6,50	7,50

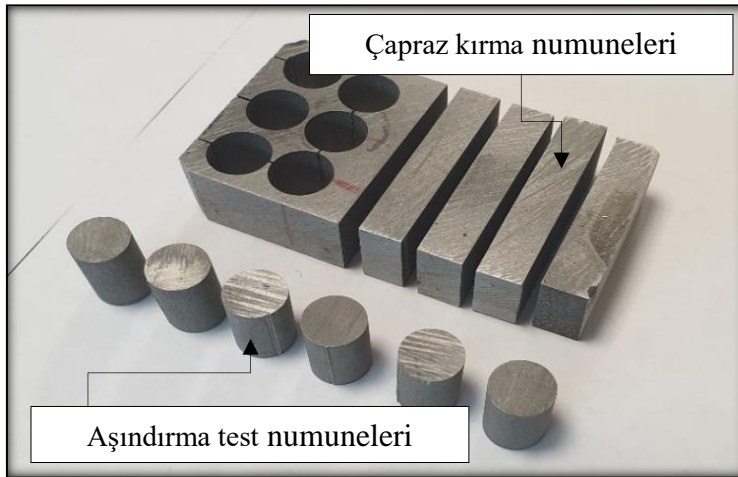
Genişlik ve kalınlık ölçüleri belirlenen numunelerin orta noktası saptanarak Resim 6.10' da görülen INSTRON Cat. # 2716-020 cihazında çapraz kırılma testleri gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.10. Çapraz kırılma testi detay görüntüleri

### 6.8. Aşınma Numuneleri

Toz metal kompozit blok malzemelerden tel erzyon yöntemi ile kesilerek elde edilen 8 mm çapta ve 14 mm boyunda aşınma test numuneleri Resim 6.11' de görülmektedir.



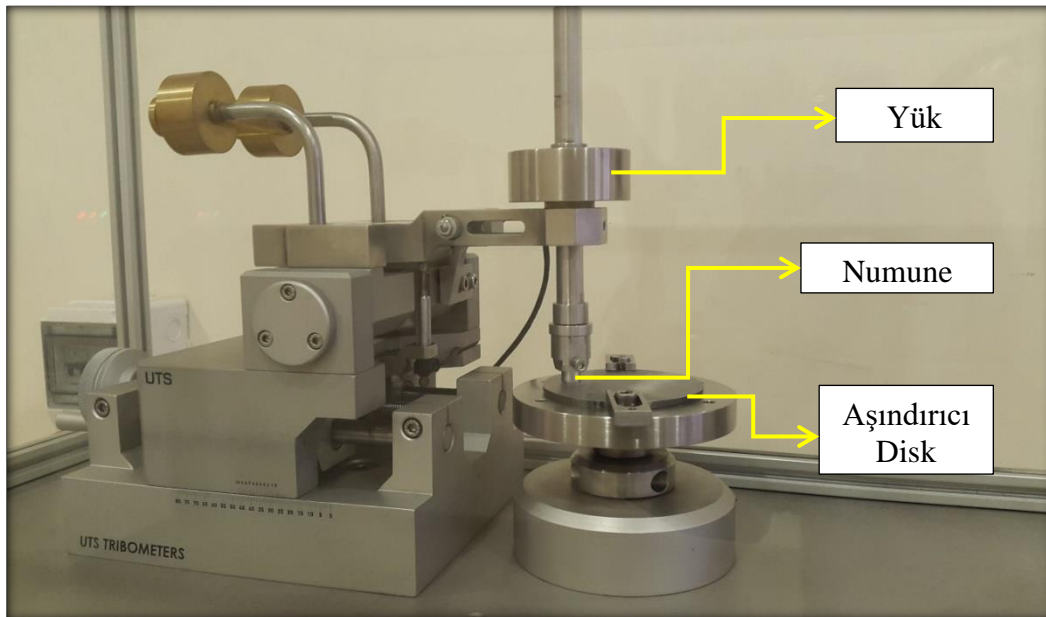
Resim 6.11. Tel erozyon yöntemiyle kesilen aşınma testi numuneleri

## 6.9. Aşınma Testi

Hazırlanan aşınma test numuneler yaklaşık sertliği 52 HRC olan hardox 500 çelik disk üzerinde kuru kayma aşındırma testine tabi tutulmuştur. Uygulamada TRIBOMETER T10/20 aşınma test cihazı kullanılmıştır (Resim 6.12). Çelik disk üzerinde yapılan aşındırma testinde uygulanan parametreler Çizelge 6.5' te görülmektedir.

Çizelge 6.5. Çelik disk üzerinde aşındırma parametreleri

Numune Presleme Sıcaklığı ( °C )	Yük (N)	Kayma Hızı (m/s)	Kayma Mesafesi (m)
500	5	1,51	2000
	10		
	15		
520	5	1,51	2000
	10		
	15		
540	5	1,51	2000
	10		
	15		
560	5	1,51	2000
	10		
	15		
580	5	1,51	2000
	10		
	15		



Resim 6.12. Tribometer T10/20 aşınma test cihazı

Aşınma testi öncesinde ve sonrasında numuneler 0,1 mg hassasiyetindeki hassas terazide tartılarak ağırlık farkından aşınmaya bağlı ağırlık kayıpları bulunmuştur.



## 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Literatürde alüminyum tozlarının yüzeyinde meydana gelen oksitlenmenin sinterleme sürecinde partiküller arası difüzyonu azaltarak sinterlenebilirliği olumsuz etkilediği, dolayısıyla yoğunluğu düşürdüğü belirtilmektedir [88]. İnce SiC parçacıkları içeren kompozitin, iri SiC içeren kompozite kıyasla homojen olmayan oksit pulları sergilediği, yüksek takviye içeriğinde genellikle takviye elemanında topaklanmanın görüldüğü bu durumun matrisin ıslatma kabiliyetini düşürerek, matris ve SiC partikülleri arasında gözenek oluşumuna yol açtığı, yoğunluğun düşmesine sebebiyet verdiği ayrıca takviye oranının artmasıyla birlikte kompozit malzemelerin yoğunluğunun genel olarak arttığı daha yavaş difüzyon ve sinterleşme olayının meydana geldiği vurgulanmaktadır [89-93]. Presleme basıncının artmasıyla sıkıştırılan tozlar arası mesafenin azaldığı bu sebeple sinterleşme esnasında difüzyonun daha kolay gerçekleştiği, gözeneksiz daha yoğun malzeme elde edildiği, sinterleme sıcaklığı ve süresi arttıkça yoğunluğun arttığı (ancak burada unutulmaması gereken sıcaklık ve sürenin birbiriyle ilişkili olduğu) bu sebeple kompozit üretiminde mekanik özellikler açısından en uygun sıcaklık ve zamanın belirlenmesi gerektiği literatürden bilinmektedir [90]. SiC takviyeli numunelerde sinterleme esnasında, sinterleme sıcaklığı veya sinterleme süresi arttıkça takviyeyi çevreleyen matrisin ıslatma kabiliyetinin arttığı bu sebeple tozların difüzyon yoluyla daha kolay hareket ederek kolay boyun oluşumu sonucu atomlar arası tam bağlanma gerçekleştiği ve daha yoğun bir kompozit üretildiği sonuçlarına ulaşılmıştır [90,91].

Bu deneysel çalışma sonucunda ulaşılan yoğunluk yüzdeleri çizelge 7.1’ de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Numunelerdeki presleme sıcaklığına bağlı yoğunluk değişimleri

Presleme Sıcaklığı (°C)	500	520	540	560	580
Yoğunluk (%)	98,14	98,87	99,09	99,52	99,45

Çizelge 7.1’ de verilen numunelerin yoğunluk sonuçlarına bakıldığında, toz metal kompozit numunelerin sıcak preslenmesinin bir sonucu olarak teorik yoğunluk değerlerine

yakın yoğunluğa ulaşıldığı görülmektedir. Bütün sıcaklıklarda teorik yoğunluğun % 98 ve üzeri yoğunluk değerlerine ulaşılmışken verilen sıcaklık değerleri için sıcaklıktaki artışın yoğunluk değerlerinde çok ciddi bir artışa sebep olmadığı görülmektedir. Bu sonuçlar çalışmadaki bütün sıcaklıkların hedeflenen yoğunluk için yeterli olduğunu göstermektedir.

Literatür verilerine bakıldığında deneylerde kullanılan parametreler neticesinde bir miktar daha yüksek yoğunluk değerleri beklenebilirdi. Buradaki yoğunluk kayıplarına alüminyum toz parçacıkları yüzeyindeki oksitler ve takviye malzemesinde meydana gelen kümelenme sonucu tam sinterleşmenin gerçekleşmemesi olarak düşünülebilir. Bu durumdan presleme basıncının daha yüksek seçilerek kaçınılabileceği değerlendirilmektedir. Yeniden presleme işlemi ile de kompozit numunelerin yoğunluk artışı sağlanabilirdi.

MMK malzeme üretiminde, matris ve takviye elemanı boyut ve karışım oranından, karıştırma türü ve süresine, presleme basınç ve süresine, sinterleme sıcaklığı ve süresine kadar her aşamada deney şartlarına göre en uygun değerlerin olduğu unutulmamalıdır.

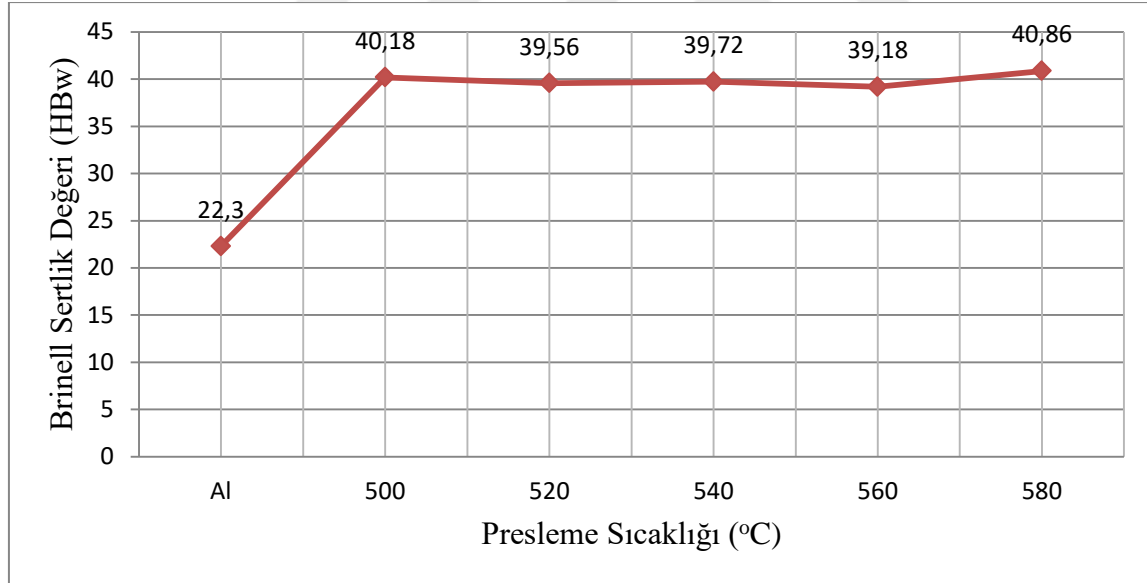
## 7.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Saf alüminyuma göre %10 SiC içeren kompozit malzemelerde ciddi bir sertlik artışı gözlenirken, sıcak preslemedeki sıcaklık artışının tıpkı yoğunluk değerlerinde olduğu gibi çok ciddi bir fark oluşturmadığı Çizelge 7.2 ve Şekil 7.1’de görülmektedir.

Üretilen numunelerde en yüksek sertlik değeri 40,86 HBw ile 580 °C’ de elde edilirken diğer numunelerde de 39 HBw üzeri sertlik değerleri görülmektedir. Sertlik ölçüm değerlerinin birbirine çok yakın çıkması kompozit malzemelerde bütün sıcaklıklarda yeterli sinterleşmenin olduğunu, takviye elemanının matris yapı içerisinde yüksek mertebede homojen olarak dağılmış olduğunu da göstermektedir.

Çizelge 7.2. Sertlik ölçüm sonuçları

Presleme Sıcaklıkları (°C)	Brinell sertlik ölçüm değerleri (BHw) (62,5 kgf yük ve 2,5 mm çapta Çelik bilye uç ile)					
	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Ortala sertlik
500	41,5	39,9	39,5	39,7	40,3	40,18
520	39,5	39,8	39,6	39,5	39,4	39,56
540	39,4	39,7	39,6	39,9	40,0	39,72
560	39,5	39,5	38,3	39,1	39,5	39,18
580	41,4	41,1	41,0	40,3	40,5	40,86



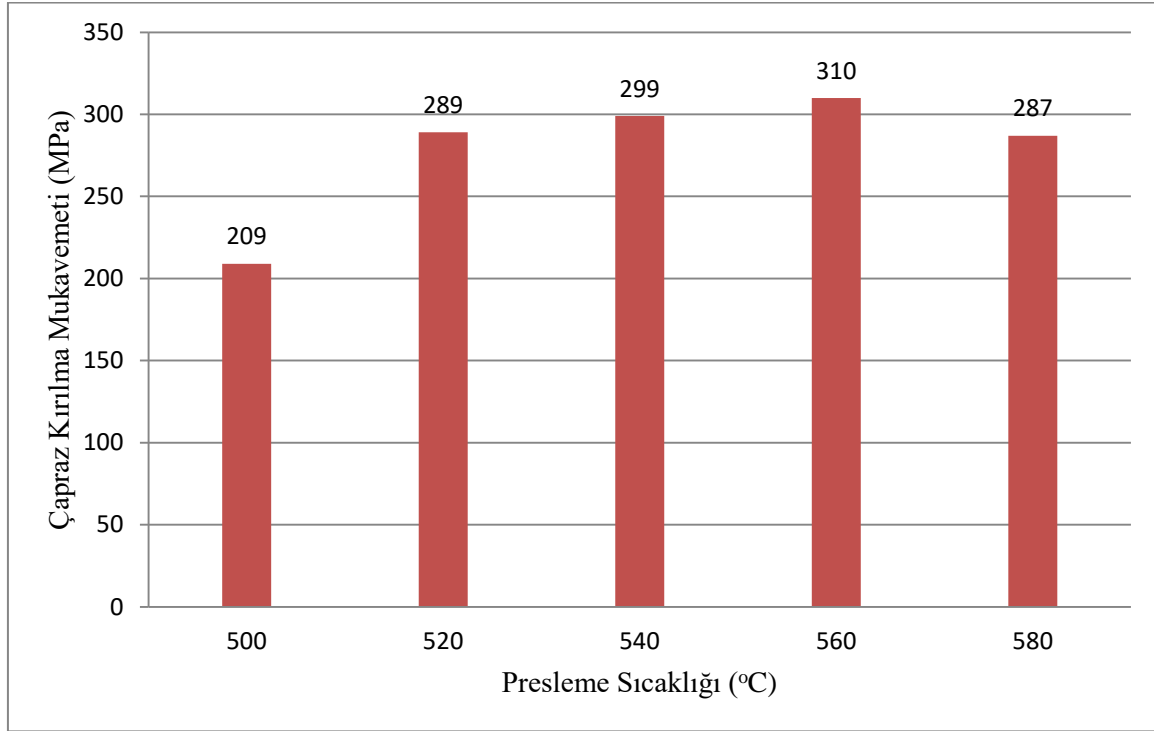
Şekil 7.1. Presleme sıcaklığına bağlı kompozit malzemelerdeki sertlik değişimi

### 7.3. Çapraz Kırılma Testi Sonuçları

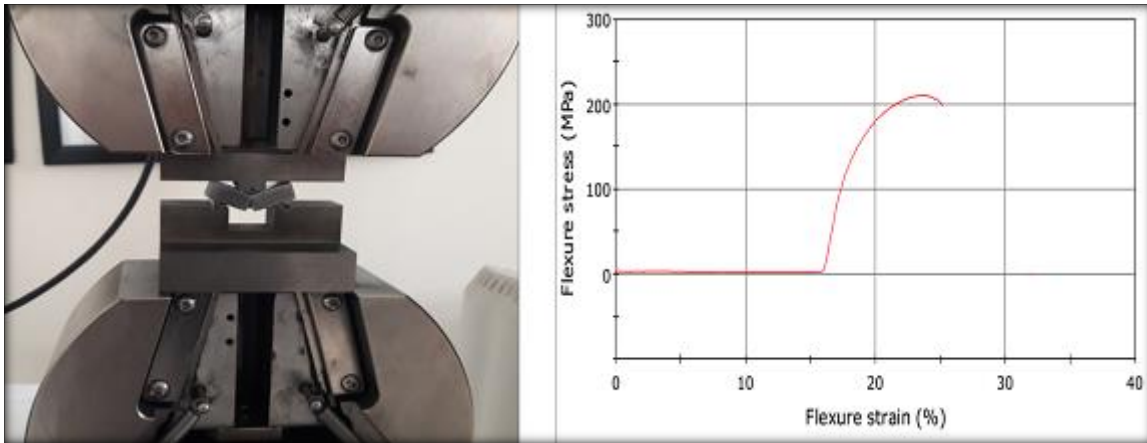
Çapraz kırılma test sonuçları Şekil 7.2.'de görülmektedir. Ayrıca 500 °C ve 560 °C'de preslenen numunenin çapraz kırılma testleri ve sonuç grafiği sırasıyla Resim 7.1 ve Resim 7.2' de verilmekle birlikte 560 °C SP numunenin INSTRON Cat. #2716-020 cihazından alınan çapraz kırılma testi sonuç verileri Resim 7.3' te verilmiştir.

INSTRON Cat. #2716-020 cihazında test gerçekleştirilirken kompozit test numunesine uygulanan yüke bağlı olarak üst çenedeki silindirik mil dışında herhangi bir parçanın temas etmesine yakın testler sonlandırılmıştır.

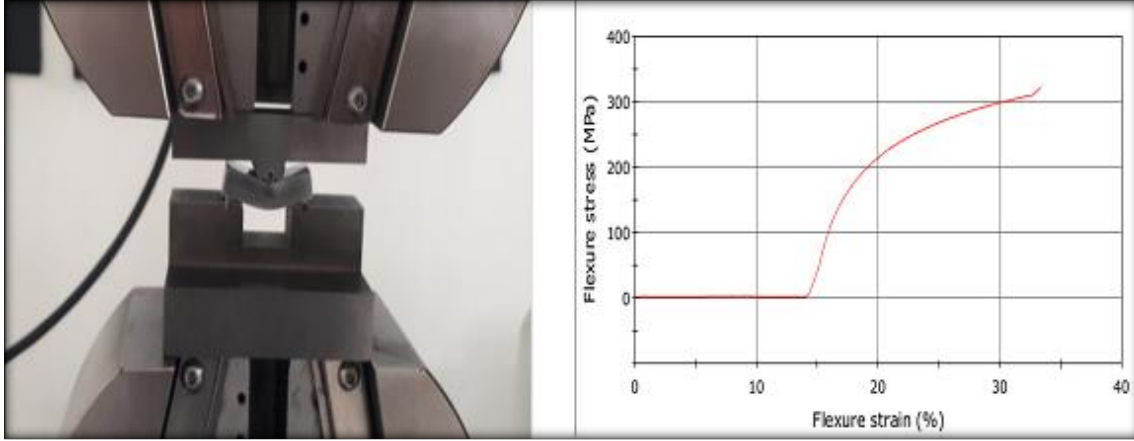
500 °C sıcaklıkta preslenen numune 209 MPa yükte tam olarak kırılırken, maksimum kırılma mukavemeti 310 MPa olarak 560 °C sıcaklıkta preslenen numunede elde edilmiştir. Bu sonuç yoğunluk sonucu ile de uyumludur.



Şekil 7.2. SP sıcaklığına bağlı kompozit numunelerdeki çapraz kırılma değerleri



Resim 7.1. 500 °C' de preslenen numunenin çapraz kırılma testi ve sonuç grafiği



Resim 7.2. 560 °C' de preslenen numunenin çapraz kırılma testi ve sonuç grafiği

560 °C SP numunenin INSTRON Cat. #2716-020 cihazından alınan çapraz kırılma testi sonuçları Resim 7.3' te verilmiştir.

	Load at Tensile Strength (N)	Flexure stress at Tensile Strength (MPa)	Flexure strain at Tensile Strength (%)
1	-4331.66400	310.015	32.561
Standard Deviation	*****	*****	*****
Mean	-4331.66400	310.015	32.561
	Flexure extension at Tensile Strength (mm)	Flexure load at Break (Standard) (N)	Flexure stress at Break (Standard) (MPa)
1	5.387	4501.102	322.141
Standard Deviation	*****	*****	*****
Mean	5.387	4501.102	322.141
	Flexure strain at Break (Standard) (%)	Flexure extension at Break (Standard) (mm)	Time at Break (Standard) (sec)
1	33.299	5.509	330.518
Standard Deviation	*****	*****	*****
Mean	33.299	5.509	330.518

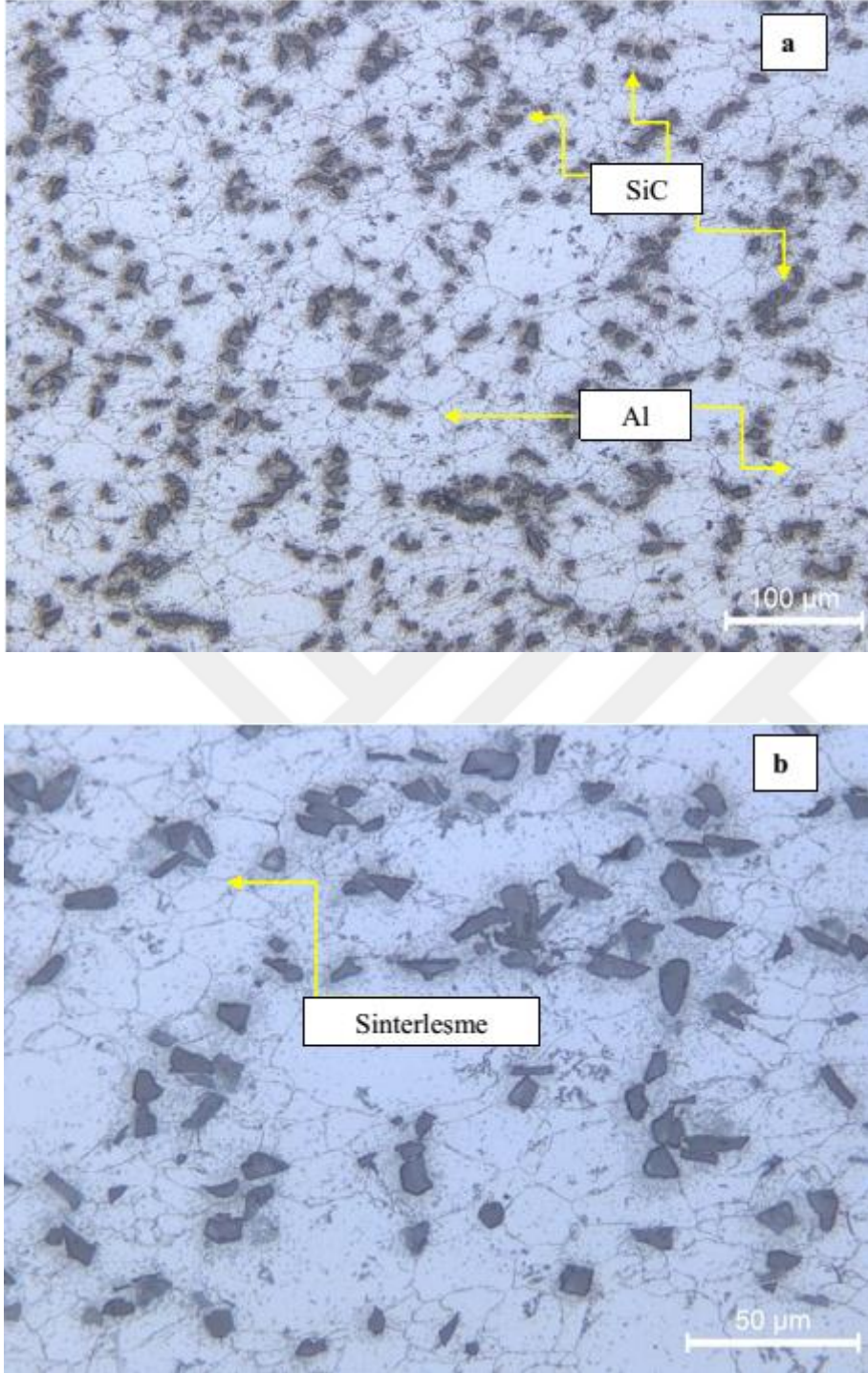
Resim 7.3. 560 °C SP numunenin çapraz kırılma testi sonuçları

#### 7.4. Metalografik İnceleme Sonuçları

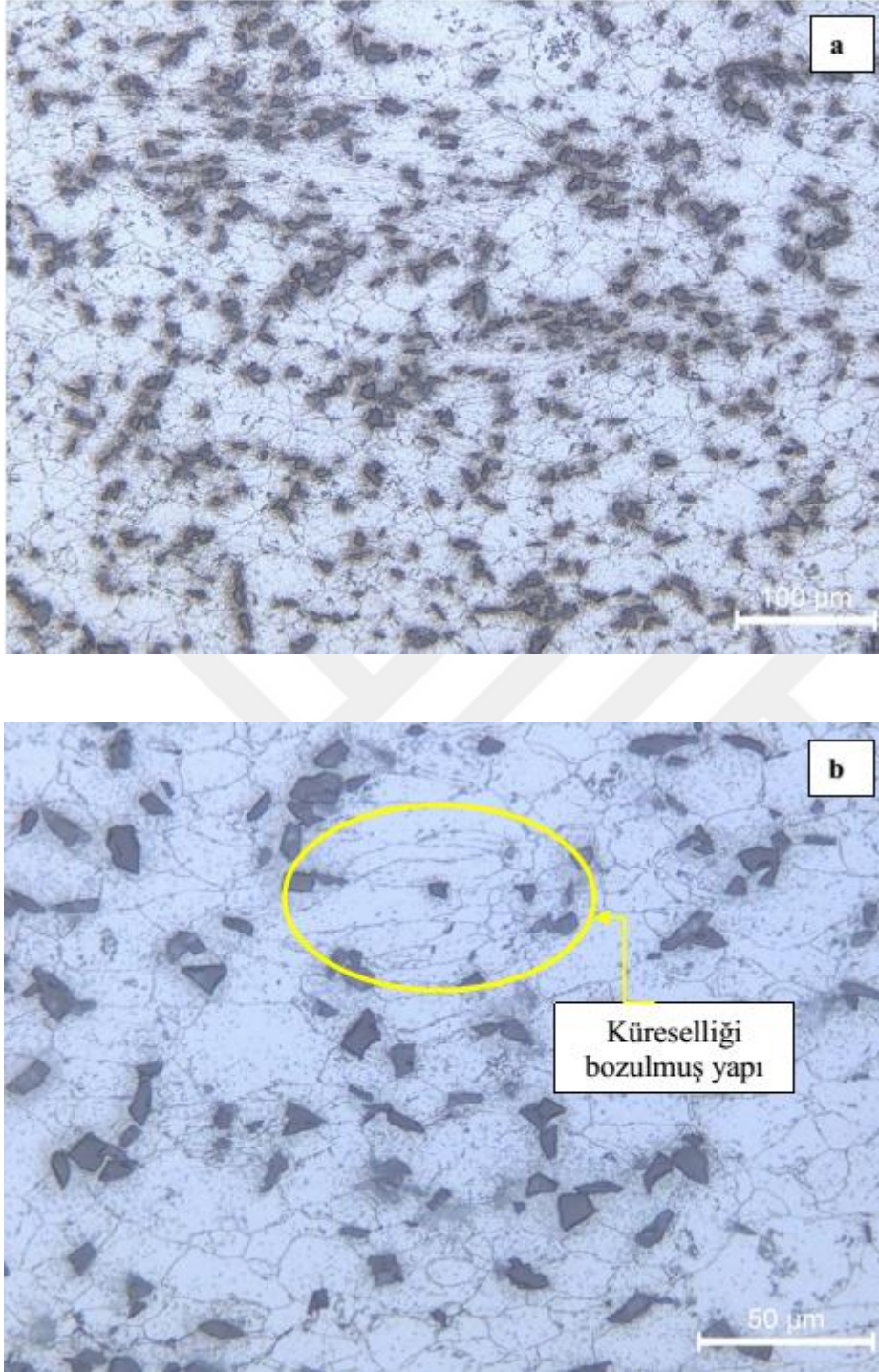
Üretilen kompozit numunelerin dağlanmış yüzeylerinden alınan farklı büyültmelerdeki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde; takviye elemanı olarak kullanılan SiC partiküllerin matris yapı içerisinde genel olarak homojen şekilde dağıldığı ve daha çok alüminyum toz partikül sınırlarında konumlandığı Resim 7.4' te görülmektedir. SiC partiküllerin nadiren bir araya gelerek homojen olmayan bir görüntü verdiği ve aslında bu durumun istenmeyen bir görüntü olduğunu ifade edebiliriz. Toz metal kompozit numunelerin yüzeylerinin dağlanmış olması alüminyum toz partiküllerin temas sınırlarında birbirlerine ne derece sinterlenip sinterlenmedikleri hususunda da daha detaylı inceleme yapma imkânı vermiştir. Turbula cihazında çelik bilye ortamında yapılan karıştırma ve öğütmenin sonucu olarak matris yapıyı oluşturan alüminyum toz partiküllerin kısmen deforme olduğu ve küresel morfolojilerinin kısmen bozulduğu görülmektedir (Resim 7.5).

En düşük presleme sıcaklığı olan 500 °C'de dahi toz metal kompozit numunede yüksek derecede yoğunluk elde edilmiş olması ve mikroyapı görüntülerinden de iyi derecede sinterleşmenin olduğunun görülmesinin en önemli sebebi yüksek presleme basıncı ve başlangıçta karışım toza uygulanan mekanik karıştırma-öğütme işleminin pozitif sonucu olarak yorumlanabilir. Karışım kompozisyonu aynı fakat presleme sıcaklığı farklı olan bütün numunelerde birbirine yakın, yoğunluk, sertlik ve mikroyapı görüntüleri alınmış durumda. Matris yapıdaki sinterleşme derecesini ve takviye elemanı matris ara yüzey bağlanma durumunu daha iyi görebilmek adına numune yüzeylerinden ayrıca SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır.

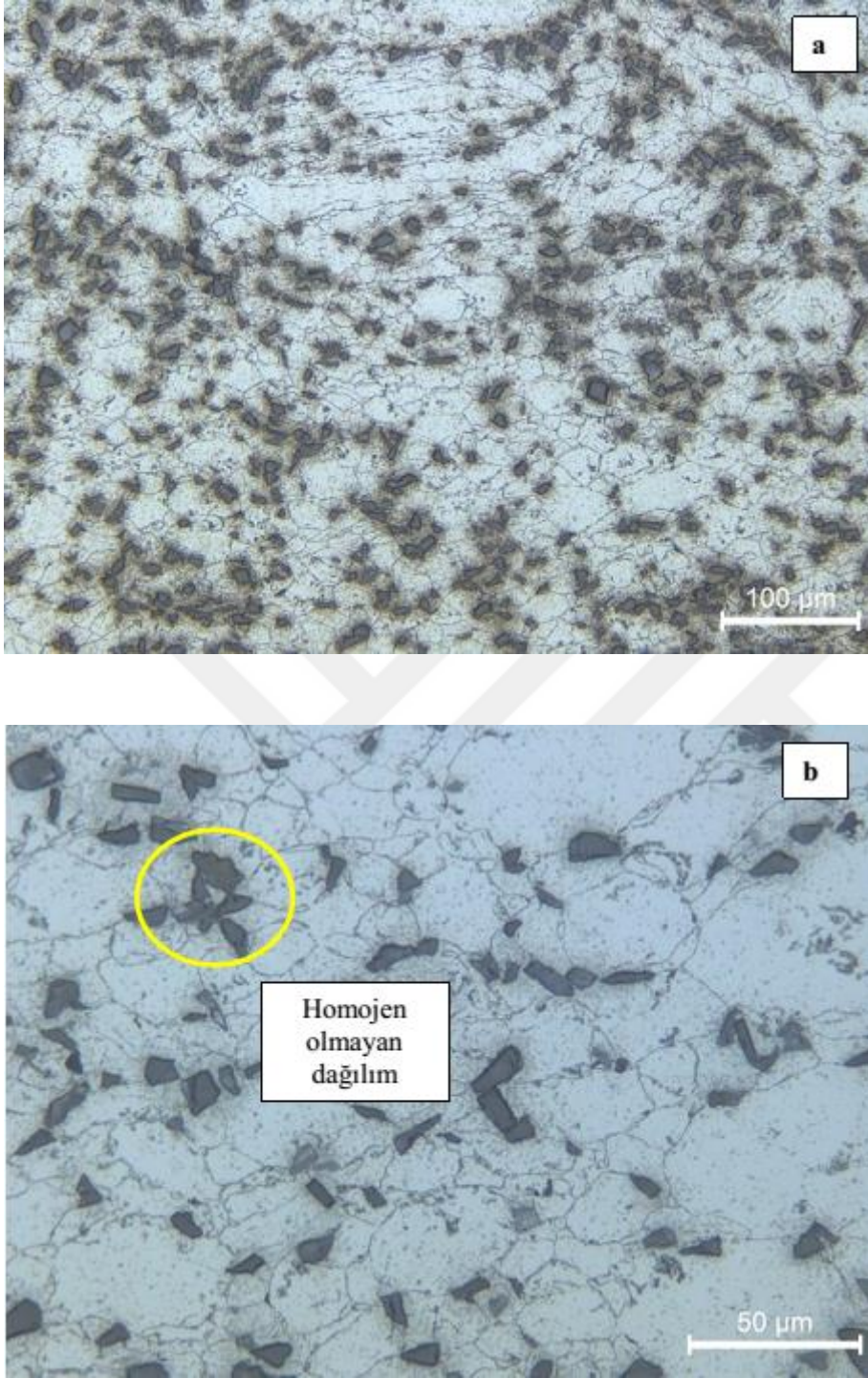
Takviye elemanı olarak kullanılan %10 nispetindeki SiC partiküllerin matris yapı içerisinde homojen olarak dağılımını sağlamak için sıcak presleme öncesi bilyeli plastik kap içerisinde Turbula cihazında karıştırma-öğütme işlemi gerçekleştirilmiş olsa dahi kompozit toz metal parçada yer yer SiC partiküllerin bir araya gelerek homojen olmayan bölge görüntüleri tespit edilmiştir (Resim 7.6, 7.7, 7.8). Kısmen de olsa bu problemi tamamen gidermek için daha uzun süreli karıştırma işlemleri uygulanabilir. Karıştırma ve öğütme işleminin bir başka sonucu da SiC partiküllerin kısmen kırıldığı ve daha küçük partiküllerin matris yapı içerisine dağılmış olduğunun görülmesidir. Bu durum kompozit yapının mekanik özelliklerine olumlu katkı verebilecek bir gelişme olarak görülebilir.



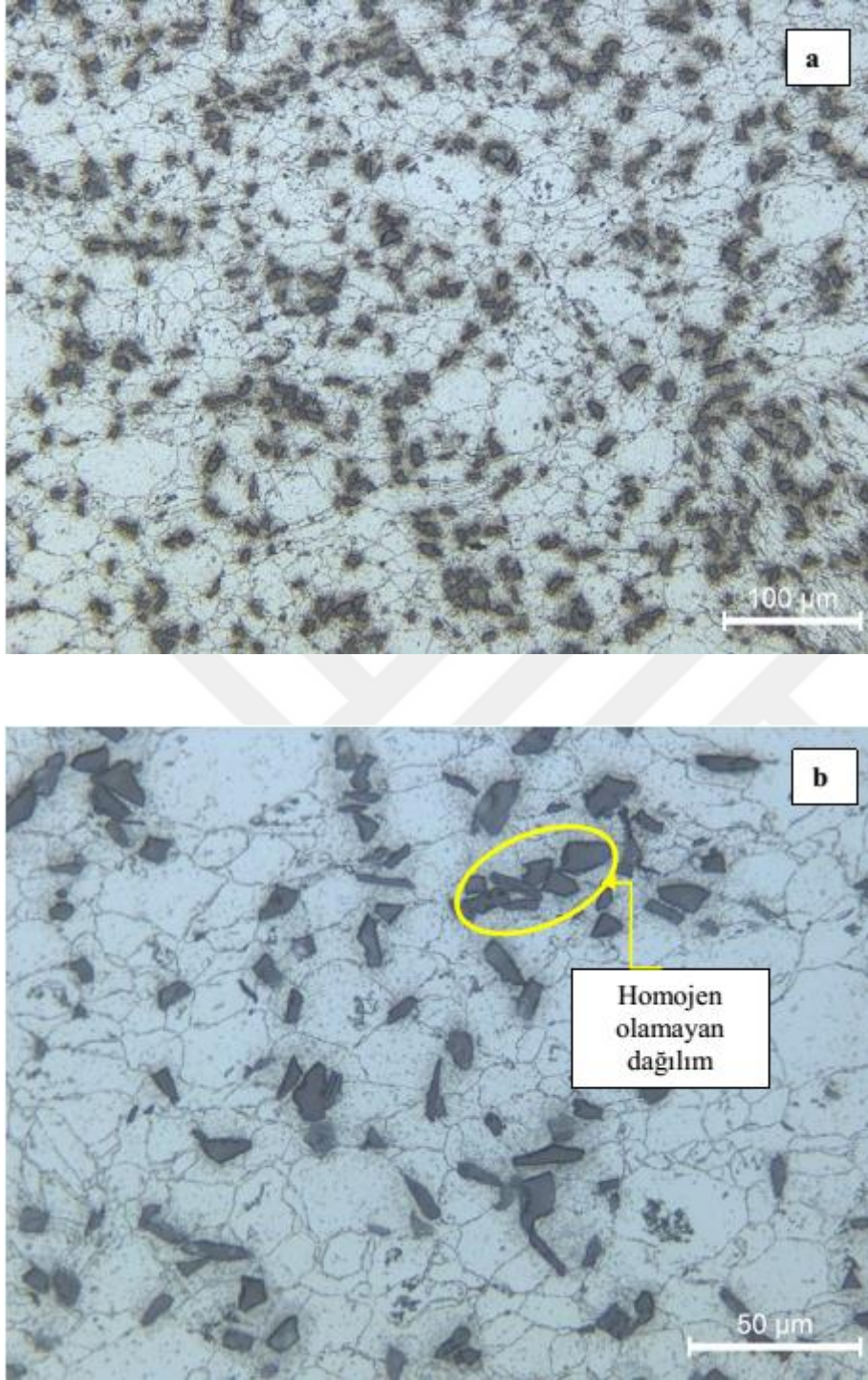
Resim 7.4. Presleme sıcaklığı 500 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 μm, b) 50 μm



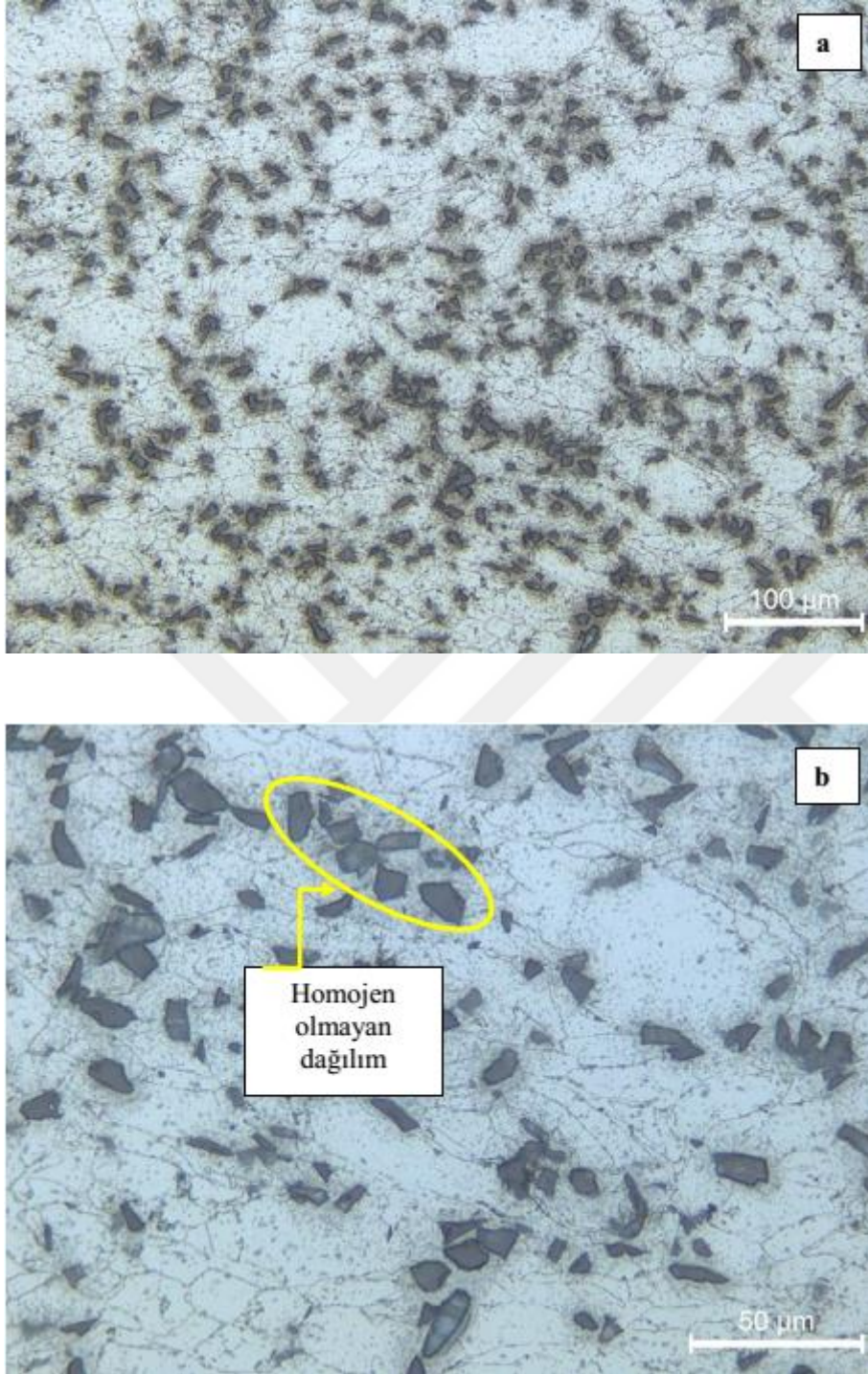
Resim 7.5. Presleme sıcaklığı 520 °C olan numune de SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm



Resim 7.6. Presleme sıcaklığı 540 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm



Resim 7.7. Presleme sıcaklığı 560 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 µm, b) 50 µm

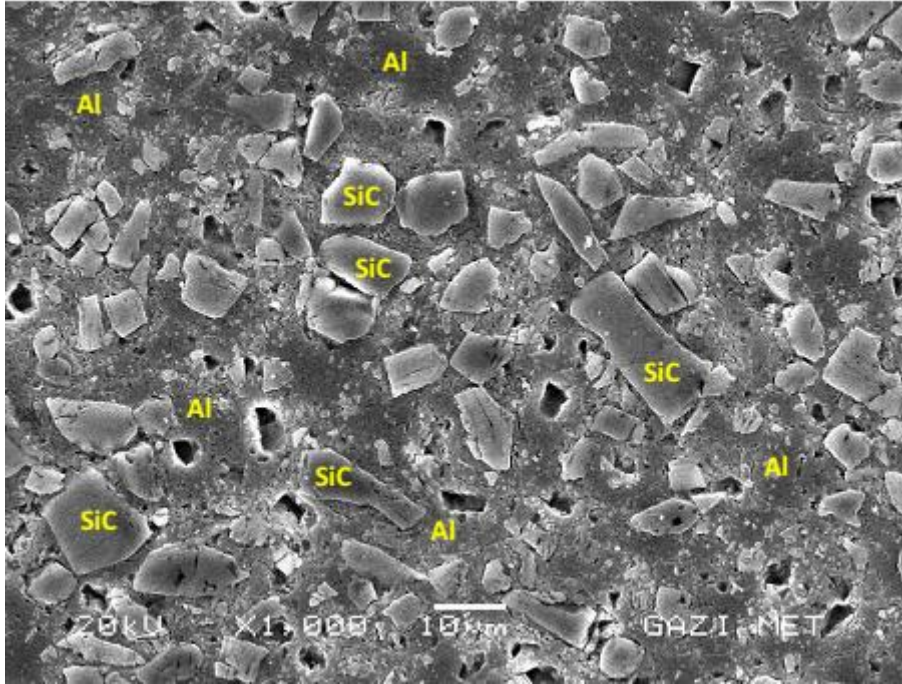


Resim 7.8. Presleme sıcaklığı 580 °C olan numunede SiC' ün matris yapı içerisindeki dağılımı, a) 100 μm, b) 50 μm

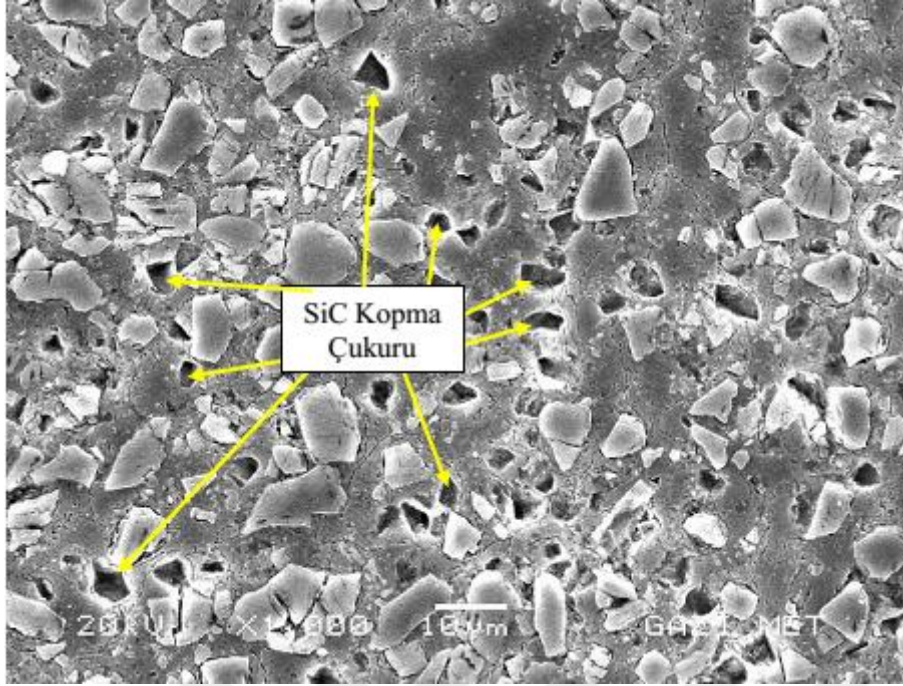
İlk olarak numuneler üzerinde yapılan optik mikroskop incelemelerinden elde edilen sonuçlara göre; yoğunluk, sertlik ve kırılma test sonuçları dikkate alındığında numunelerin presleme sıcaklığına bağlı olarak mikroyapılarında ciddi bir farklılık oluşmadığı ve sonuçların birbirini destekler nitelikte olduğunu göstermiştir. Bu sebeple elektron mikroskobu incelemeleri diğer numunelere göre kırılma mukavemeti daha yüksek

yoğunluk ve sertlik değerleri yakın olan 560 °C sıcaklıkta preslenen numune üzerinden gerçekleştirilmiştir. Resim 7.9' de verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde 16 µm altı SiC partiküllerin matris yapı içerisinde genel olarak homojen şekilde dağıldığını ve parçacık boyut ve şekillerinin farklı geometrilerde olduğu görülmekte. Ayrıca metalografik inceleme için yapılan zımparalama ve parlatma sürecinde pek çok SiC partikülün matris yapıdan ayrıldığı gözlenmiştir (Resim 7.10). Takviye elemanı SiC parçacıklarının turbula cihazında karıştırma-öğütme işleminde çelik bilyelerin çarpma etkisi altında kırılarak daha küçük parçacıklara ayrıldığı veya üzerlerinde çatlaklar oluştuğu görülmektedir (Resim 7.11, 7.12).

Matris takviye elemanı ara yüzey bağlanmasının yetersiz olması kompozit malzemelerdeki mekanik özellikleri azaltan en önemli unsurların başında gelmektedir [3,24]. Bu durum muhtemelen kompozit malzemenin aşınma performansını da ciddi olarak olumsuz şekilde etkileyecektir. Yüksek büyütmede alınan SEM görüntüleri matris yapıyı oluşturan Al parçacıkları arası sinterleşmenin de istenen düzeyde olmadığını göstermektedir (Resim 7.12, 7.13). Presleme sıcaklığı artarken bu yönde bir iyileşme olsa da tam bir sinterleşmenin ve bağlanmanın olduğu söylenemeyiz.

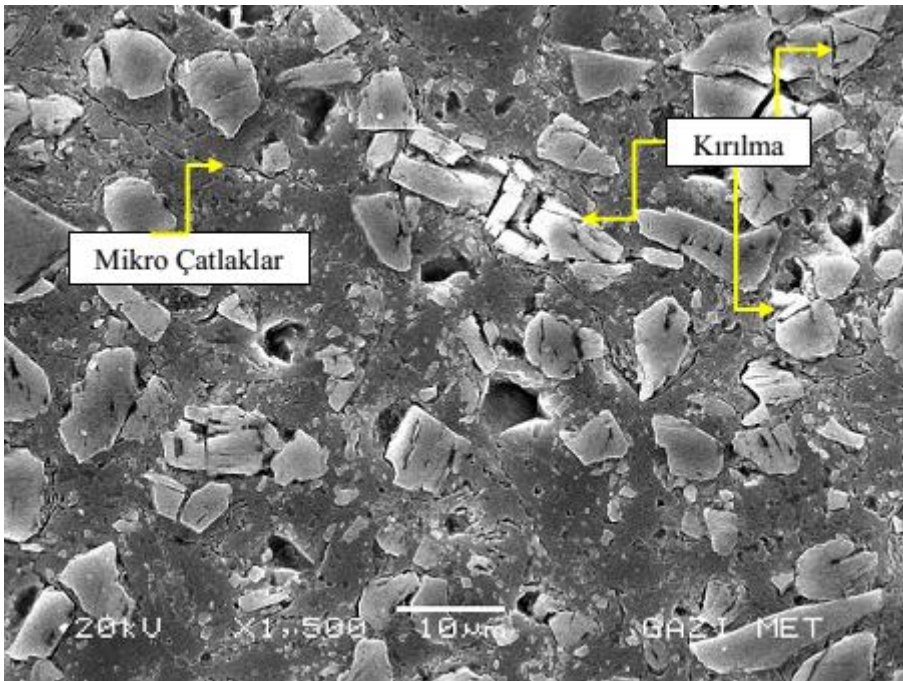


Resim 7.9. 560 °C SP numunede matris yapı içerisinde SiC dağılımı

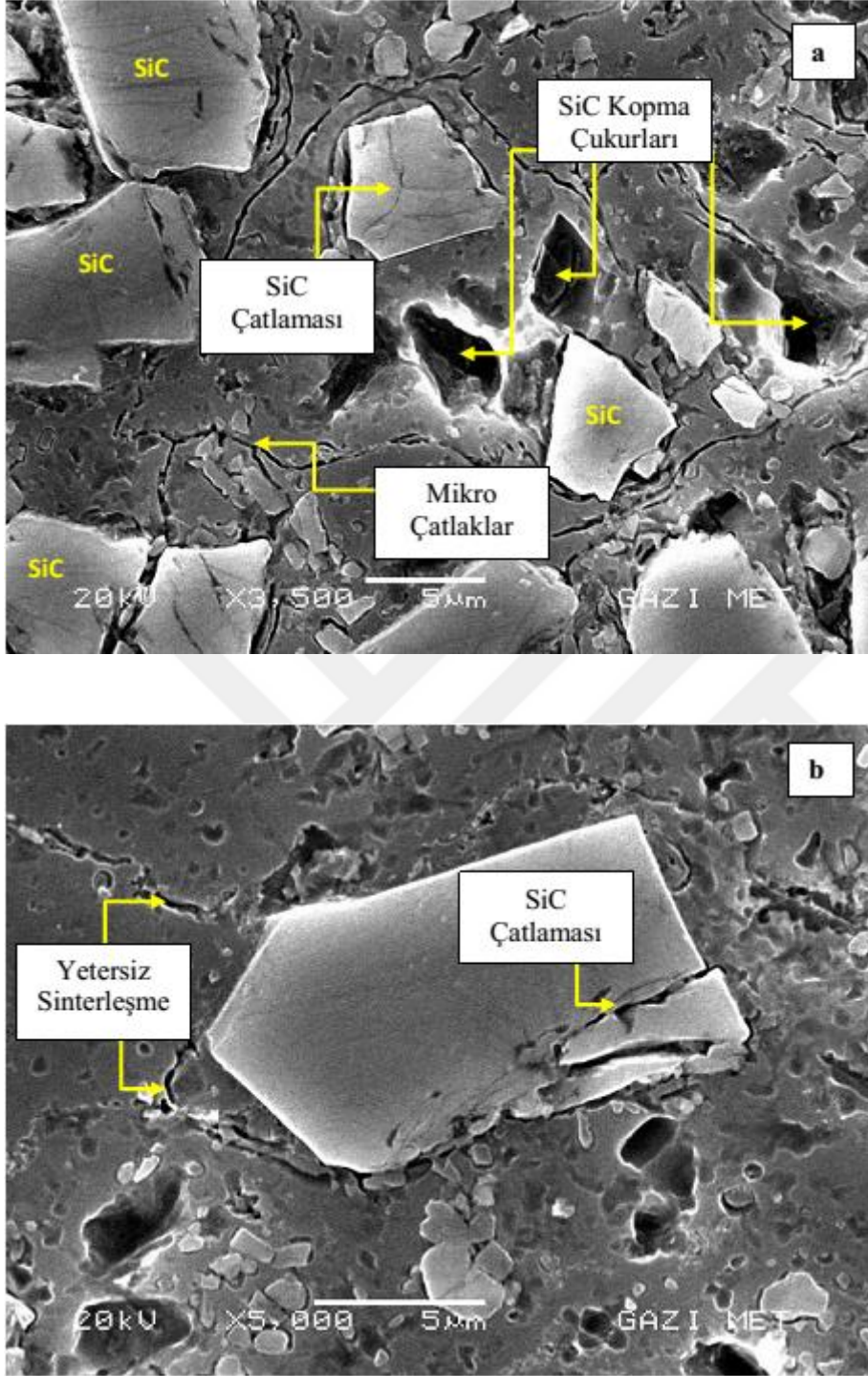


Resim 7.10. 560 °C SP numunede SiC kopma boşlukları

Resim 7.10 da görüldüğü gibi metalografik inceleme için numune yüzeylerinin zımparalama ve parlatma sürecinde SiC partiküllerin yer yer yüzeyden koparak geride boşluklar bıraktıkları görülmektedir. Bu durum matris ve takviye elemanı ara yüzey bağının yeterince güçlü olmadığını göstermektedir.

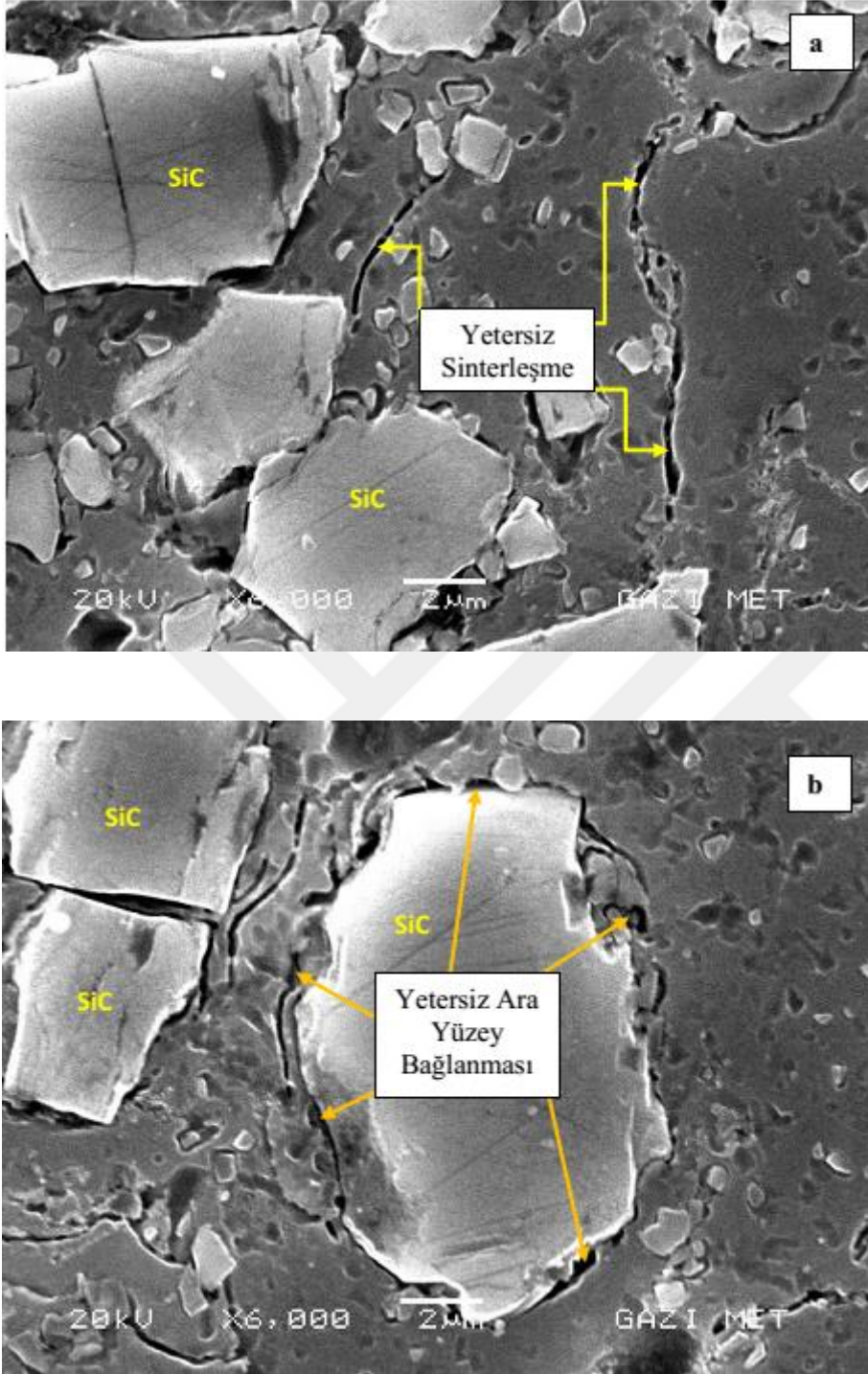


Resim 7.11. 560 °C SP numunede SiC kırılması ve mikro çatlaklar



Resim 7. 12. (a), (b) 560 °C SP numunede yetersiz sinterleşme, mikro çatlaklar, SiC kopma çukurları

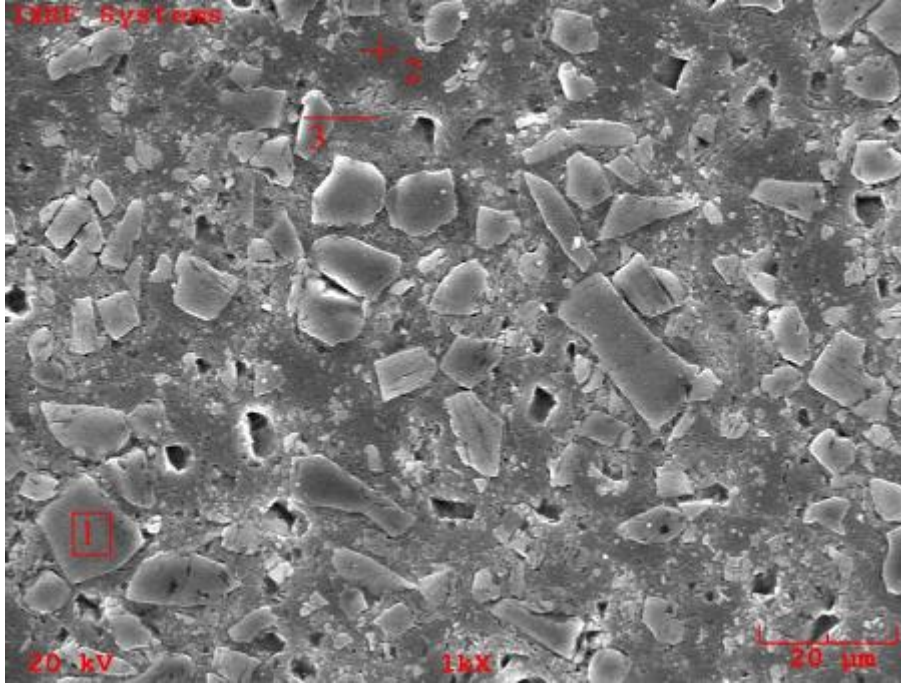
Resim 7.12. a-b' de görülen matris yapıdaki yetersiz sinterleşme, oluşan mikro çatlaklar ve takviye matris ara yüzey bağlanmasından kaynaklı mekanik özelliklerde yeteri kadar mukavemet artışı sağlanamamıştır.



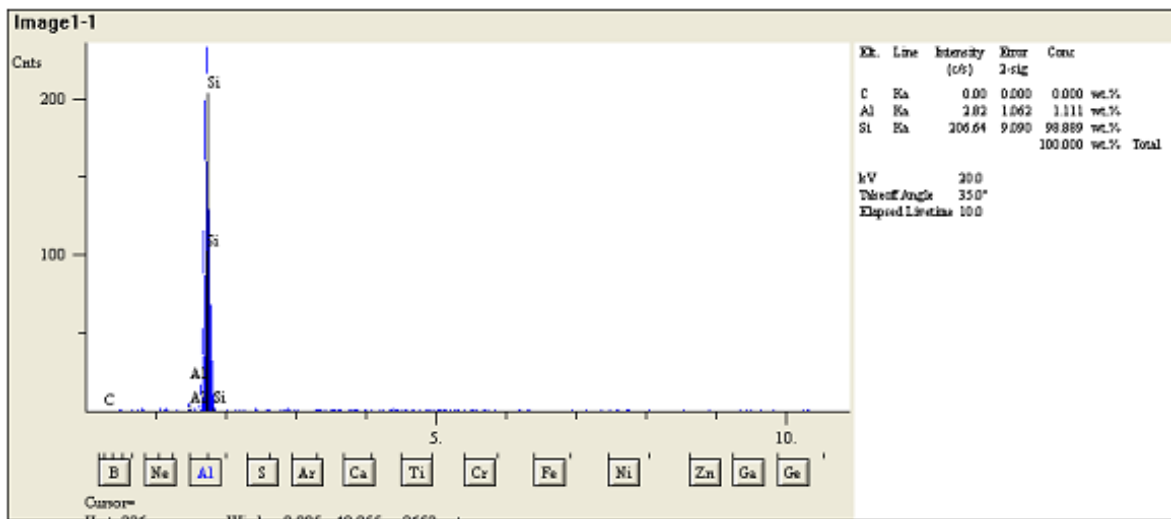
Resim 7.13. 560 °C SP numunede (a) yetersiz sinterleşme, (b) yetersiz bağlanma

560 °C presleme sıcaklığında üretilen kompozit malzemenin farklı noktalarından alınan EDS analiz sonuçları Resim 7.14, 7.15 ve 7.16 görüntülerinde verilmektedir. 1 nolu partikül üzerinden alınan EDS analiz sonucunda cihaz karbonu algılamakta yetersiz kalırken tamamen silisyum olduğu görülmekte. 2 nolu analiz sonucu ortamın tamamen matris yapıya ait olduğunu gösterirken çok küçük değerlerde SiC kaynaklı bir kirlenme

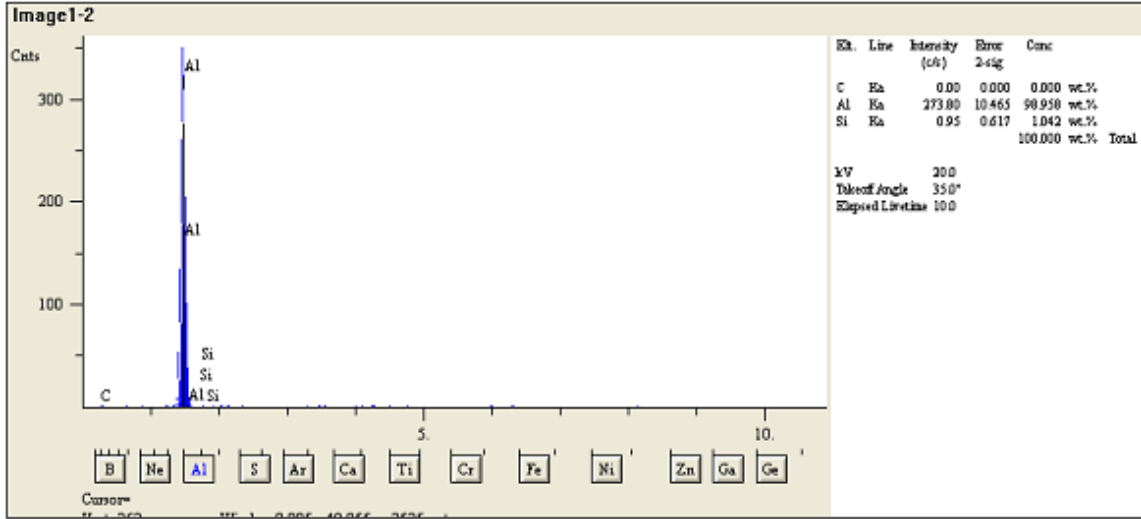
olduğunu göstermektedir. Bu analizde %1,04 olarak görünen Si değeri özellikle öğütmeye bağlı olarak matris yapının SiC tarafından kirletildiğini göstermektedir. SiC matris ara yüzey bağlanmasının yetersiz olduğu görülürken SiC kirlenmesinin Al matris partiküllerinin birbirine sinterleşmesini de güçleştiren bir unsur olarak ortaya çıkmış olabilir.



Resim 7.14. 560 °C SP üretilen numuneden alınan SEM görüntüleri



Resim 7.15. 560 °C SP üretilen numunede 1 nolu bölgeden alınan EDS sonucu



Resim 7.16. 560 °C SP üretilen numunede 2 nolu bölgeden alınan EDS sonucu

Optik ve SEM mikroskobu görüntüleri beraber değerlendirildiğinde yapı içerisinde takviye elemanın yüksek oranda homojen ve gözenek miktarının yok denecek kadar az olduğu söylenebilir. Diğer taraftan yapı içerisinde mikro çatlakların olduğu, yetersiz sinterleşme ve yetersiz ara yüzey bağlanması görülmüştür. Bu durum bilindiği üzere malzeme özelliklerini düşüren etmenlerdir.

### 7.5. Aşınma Testi Sonuçları

Pin-on-disk metoduyla hardox 500 çelik disk üzerinde yapılan aşınma testleri sonrası numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları Çizelge 7.3' te görülmektedir. Aşındırma testlerinde bütün numunelerde uygulanan yük artarken aşınma değerlerinin arttığı Çizelge 7.4 ve Şekil 7.3' te görülmektedir. Bu sonuç beklenen bir durum olup literatürdeki benzer çalışmalarla uyumludur (52,88). 5 N yük altında elde edilen aşınma kayıplarında numunelerin presleme sıcaklığı artarken aşınma kayıplarının da azaldığı ancak 580 °C de preslenen numunede sıra dışı bir ağırlık kaybının ortaya çıktığı görülmekte. Aynı durum 10 ve 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma test sonuçlarında da görülmektedir. 580 °C de ortaya çıkan bu durum kırma testi sonuçlarını doğrular nitelikte olup, çapraz kırılma testi sonuçlarında da kırılma mukavemetinin bir miktar düştüğü görülmüştür. Hem kırılma hem de aşınma testinden alınan sonuçlara göre 580 °C de preslemenin kompozit numunenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini söyleyebiliriz.

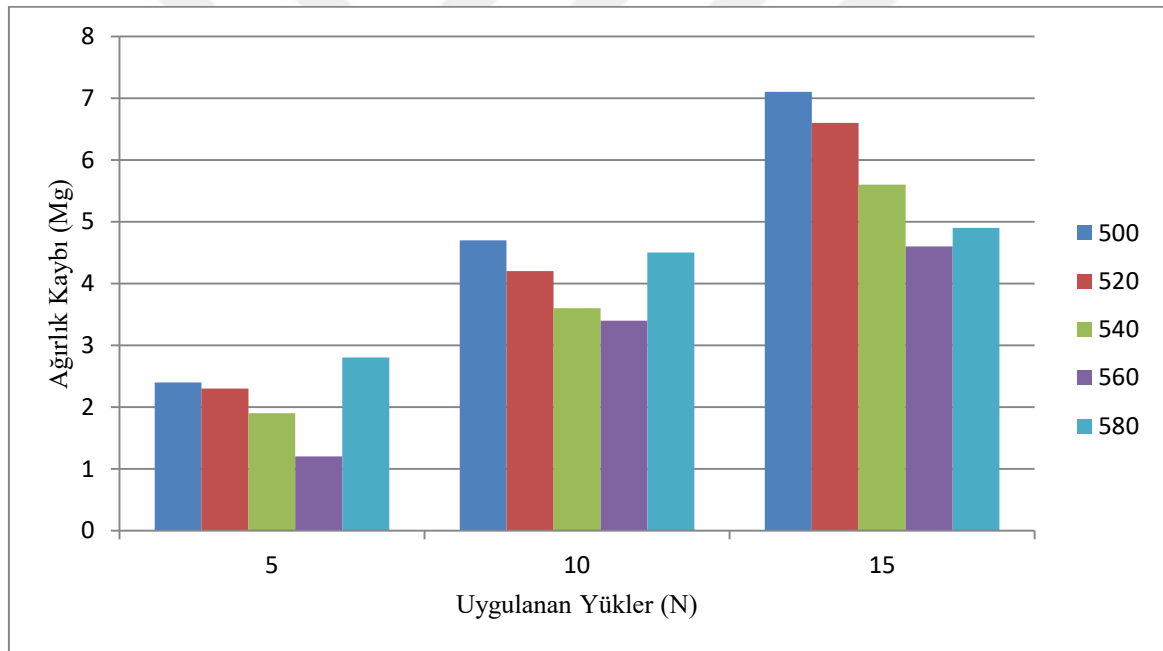
Yoğunluk, kırılma mukavemeti ve aşınma kayıpları bakımından 560 °C de preslenen numunede daha iyi sonuçların alındığı görülmektedir. 500 °C den 560 °C'ye kadar matris ve takviye elemanı arasında iyi bir bağlanma görünürken 580 °C' de preslemenin mekanik özellikleri iyileştirmek yerine tersine bir etkide bulunduğu görülmüştür.

Çizelge 7.3. Numunelerin yüke bağlı ve hardox 500 aşındırıcıda ağırlık kayıpları

Test Numuneleri Ağırlık Fark Tablosu				
Numune Presleme Sıcaklığı (°C)	Aşındırmada Uygulanan Yük (N)	Test Numunesi İlk Ağırlık (g)	Test Numunesi Son Ağırlık (g)	Test Numunesi Ağırlık Farkı (mg)
500	5	0,9690	0,9666	2,4
	10	0,9653	0,9606	4,7
	15	0,9599	0,9528	7,1
520	5	0,9614	0,9591	2,3
	10	0,9579	0,9537	4,2
	15	0,9526	0,9460	6,6
540	5	1,0477	1,0458	1,9
	10	1,0449	1,0413	3,6
	15	1,0402	1,0346	5,6
560	5	1,0540	1,0528	1,2
	10	1,0032	0,9998	3,4
	15	0,9933	0,9887	4,6
580	5	1,0206	1,0178	2,8
	10	1,0113	1,0068	4,5
	15	1,0128	1,0079	4,9

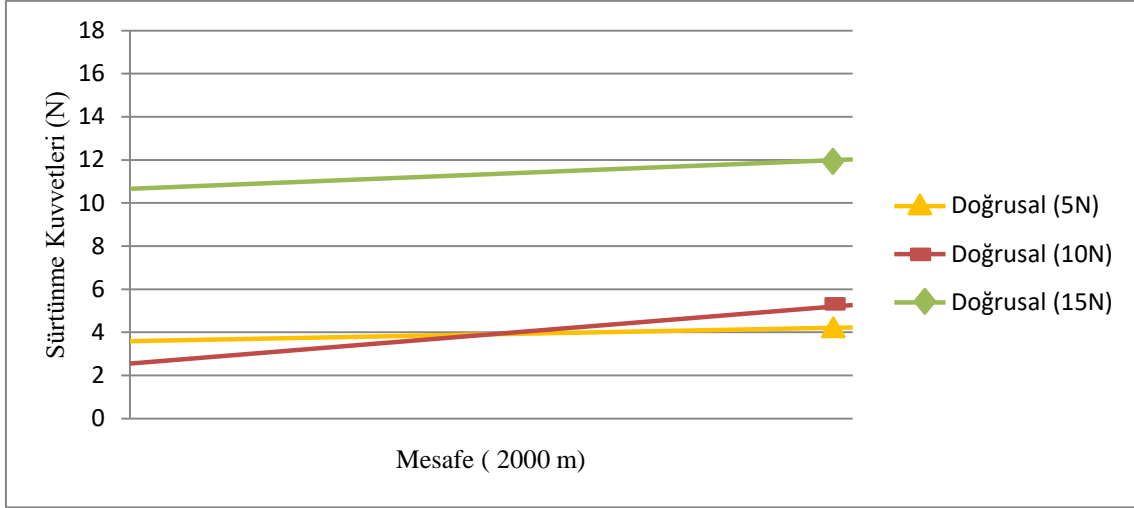
Çizelge 7.4. Uygulanan yüke bağlı aşınma değerlerindeki değişim

Kompozit Numune	Uygulanan Yük (N)		
	5	10	15
500 °C	2,4 mg	4,7 mg	7,1 mg
520 °C	2,3 mg	4,2 mg	6,6 mg
540 °C	1,9 mg	3,6 mg	5,6 mg
560 °C	1,2 mg	3,4 mg	4,6 mg
580 °C	2,8 mg	4,5 mg	4,9 mg

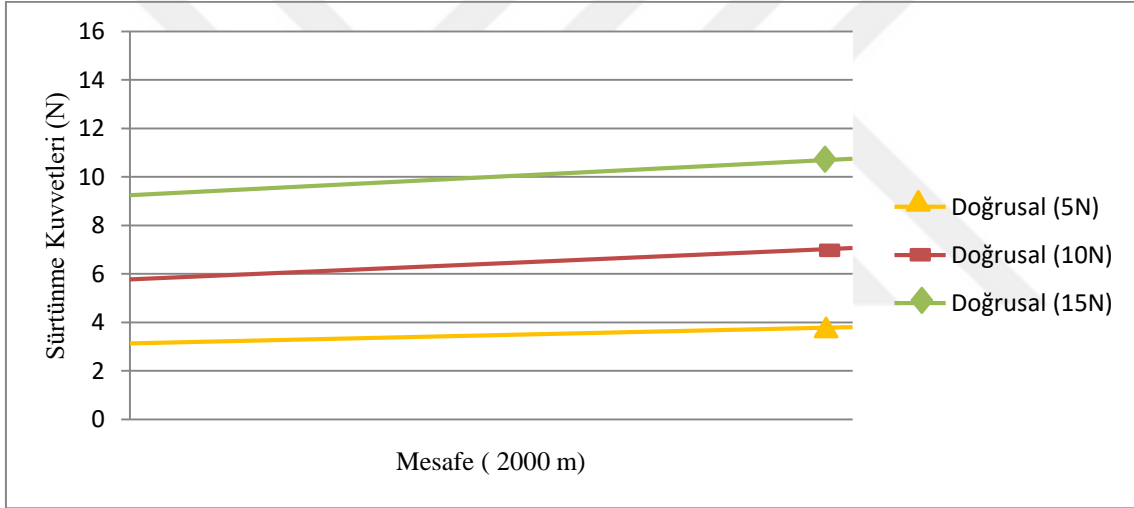


Şekil 7.3. Kompozit numunelerin Hardox 500 çeliği aşındırıcıda ağırlık kayıpları

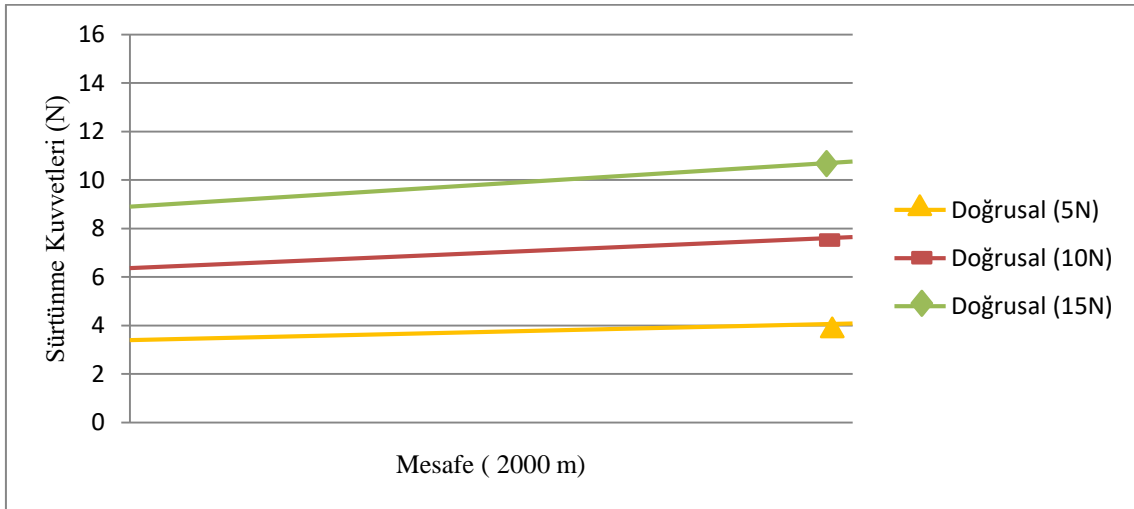
TRIBOMETER T10/20 Pin-on-disk aşınma cihazında oda sıcaklığında ve kuru ortamda yapılan deneyler sonucu Microsoft excel programında doğrusal grafiğe çevrilmiştir. Bütün numunelerde sürtünme kuvveti değerleri yük artarken artış göstermiştir. Ayrıca aşınma süresinde yol uzarken sürtünme kuvvetinin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi aynı yüzeyde numune aşındırılırken disk ve numune yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla aşındırma mesafesi artarken sürtünme kuvvetinde de artış meydana gelmesindedir.



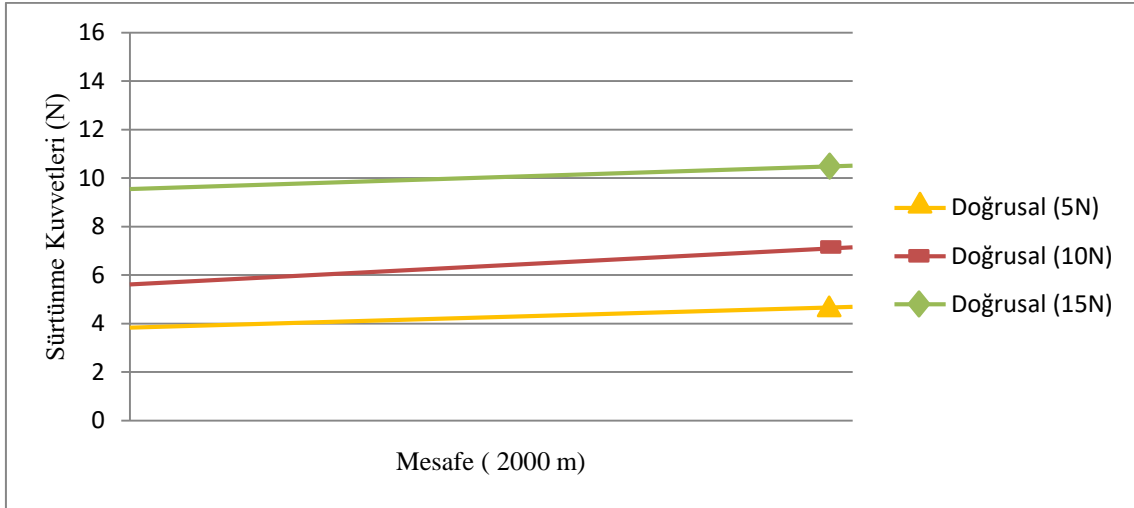
Şekil 7.4. 500 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği



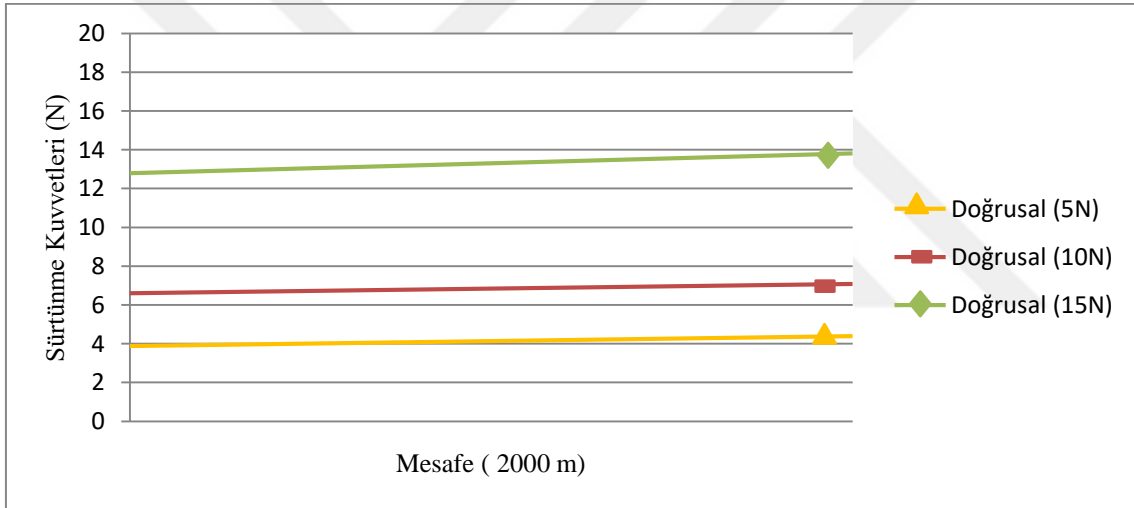
Şekil 7.5. 520 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği



Şekil 7.6. 540 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği

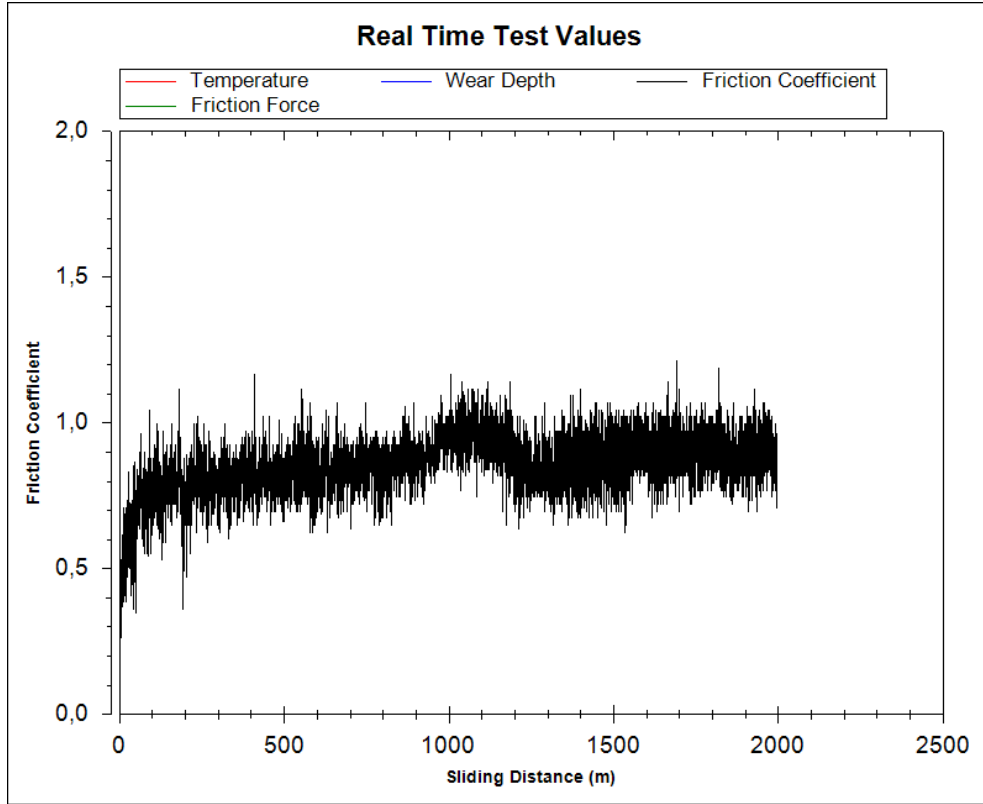


Şekil 7.7. 560 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği

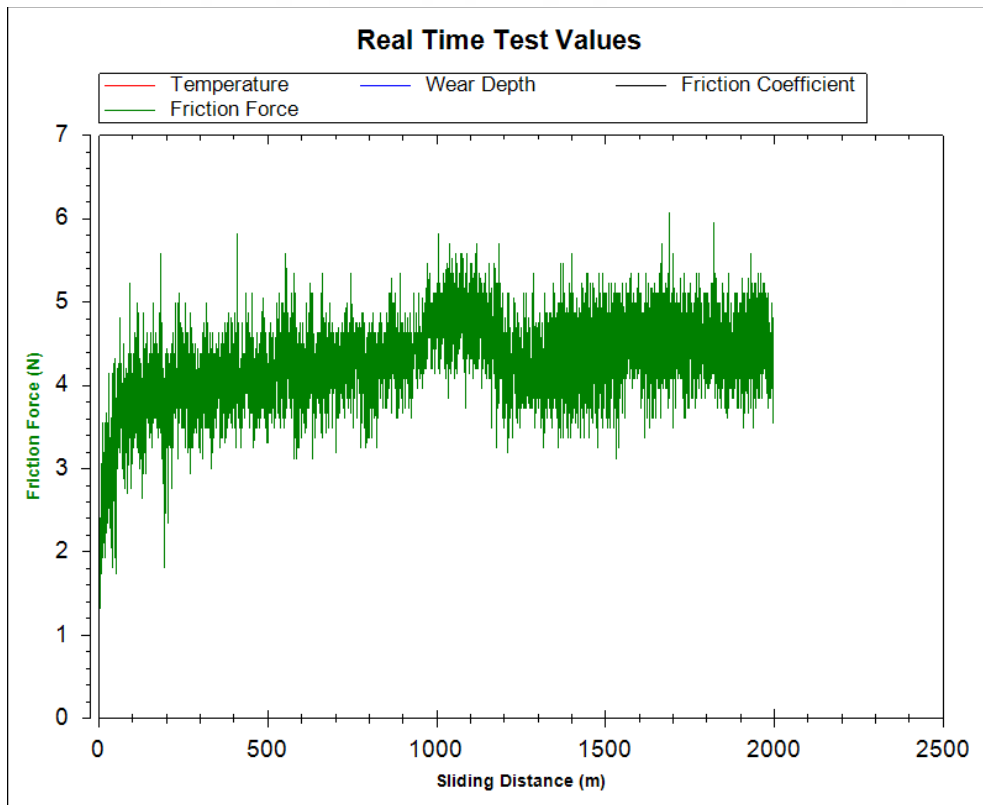


Şekil 7.8. 580 °C' lik numunenin sürtünme kuvvetleri doğrusal grafiği

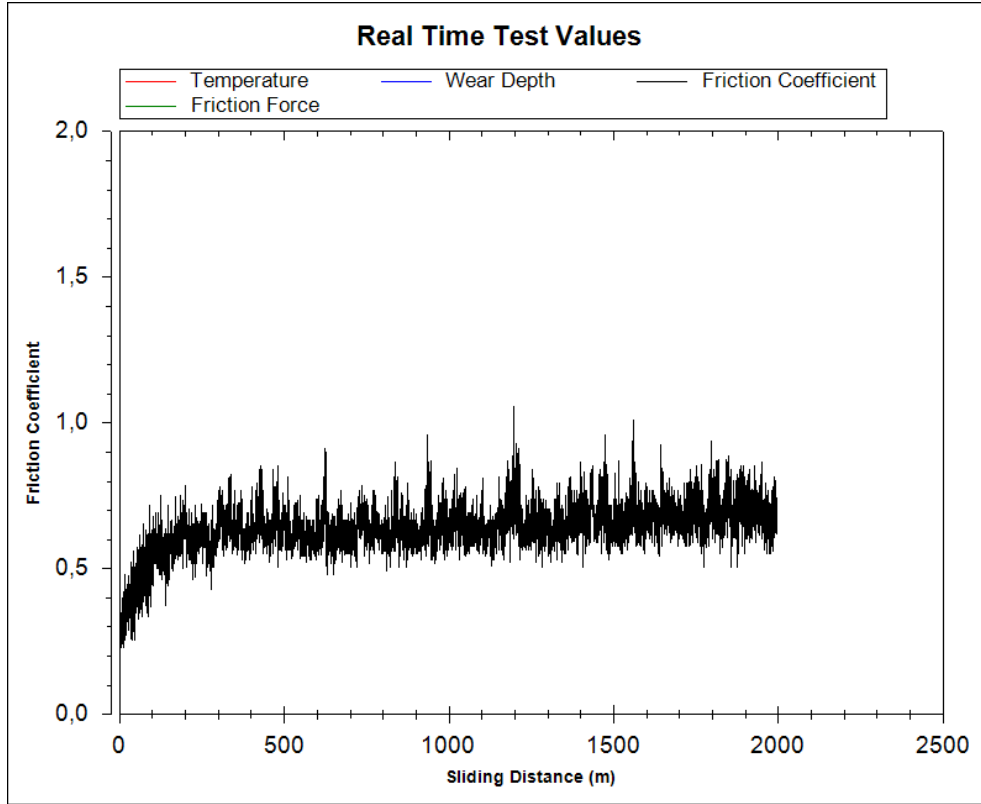
560 °C SP numunenin TRIBOMETER T10/20 Pin-on-disk aşınma cihazından alınan sürtünme katsayısı ve kuvveti test sonuçları Resim 7.17-7.22' de verilmiştir.



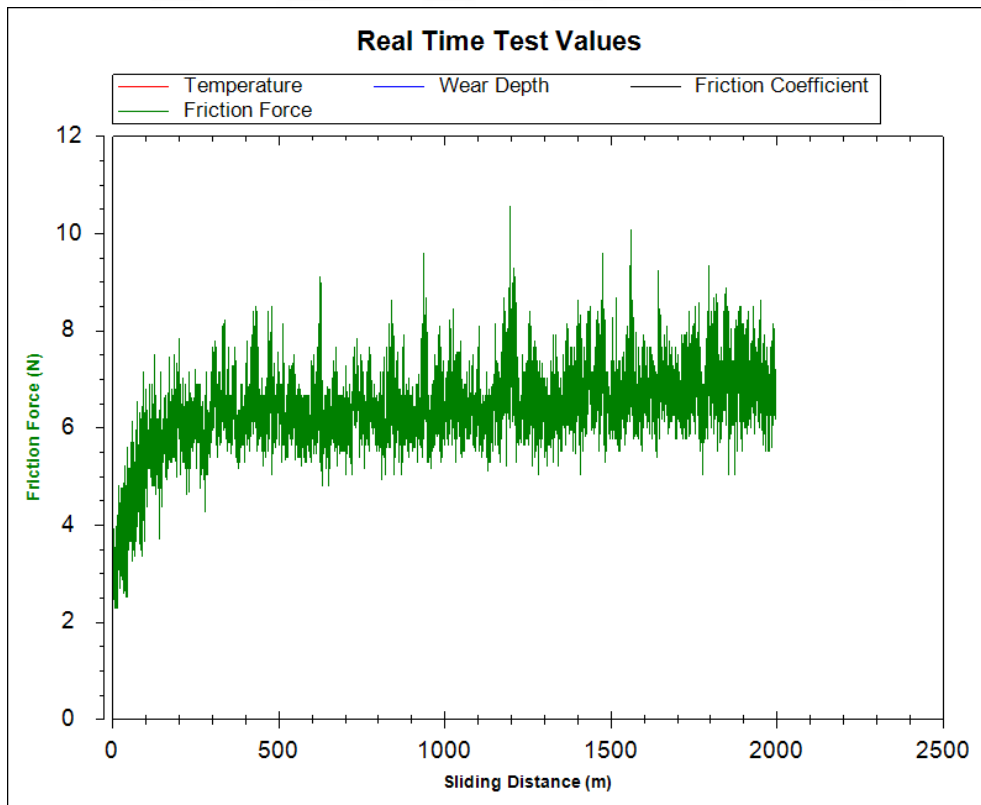
Resim 7.17. 560 °C SP üretilen numunenin 5N yük altında sürtünme katsayısı grafiği



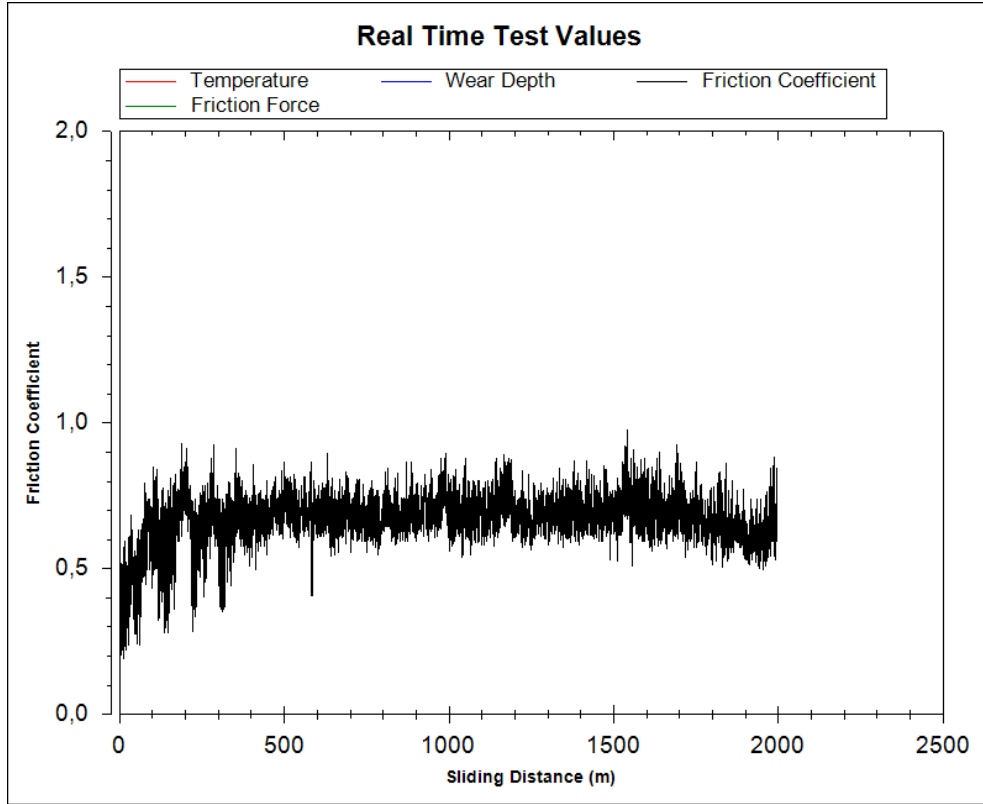
Resim 7.18. 560 °C SP üretilen numunenin 5N yük altında sürtünme kuvveti grafiği



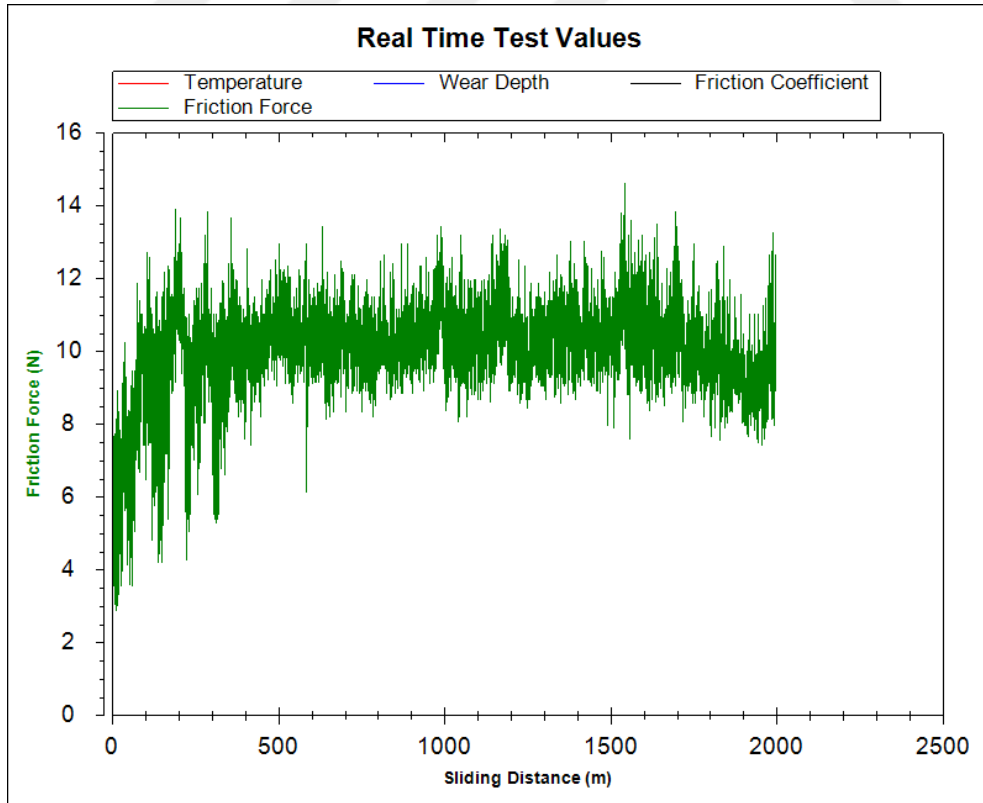
Resim 7.19. 560 °C SP üretilen numunenin 10N yük altında sürtünme katsayısı grafiği



Resim 7.20. 560 °C SP üretilen numunenin 10N yük altında sürtünme kuvveti grafiği



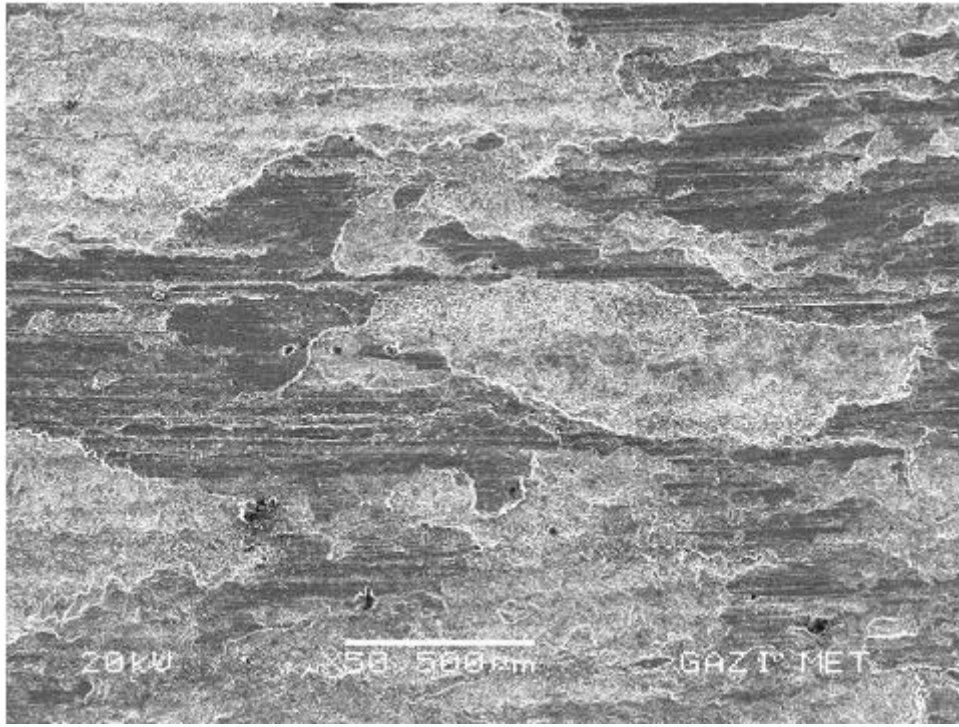
Resim 7.21. 560 °C SP üretilen numunenin 15N yük altında sürtünme katsayısı grafiği



Resim 7.22. 560 °C SP üretilen numunenin 15N yük altında sürtünme kuvveti grafiği

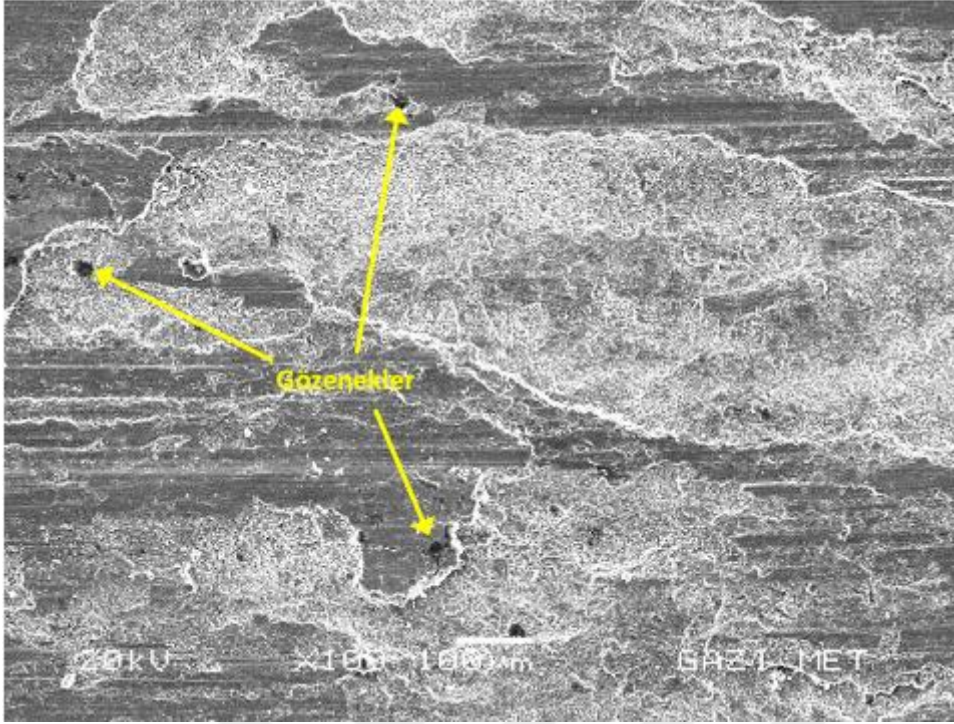
## 7.6. Aşınma Yüzeyleri

560 °C' de preslenen ve 15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası numune yüzeylerinden farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri alınarak aşınma desenleri üzerinden gerçekleşen aşınma mekanizması hakkında değerlendirmeler yapılmıştır (Resim 7.23-7.28).

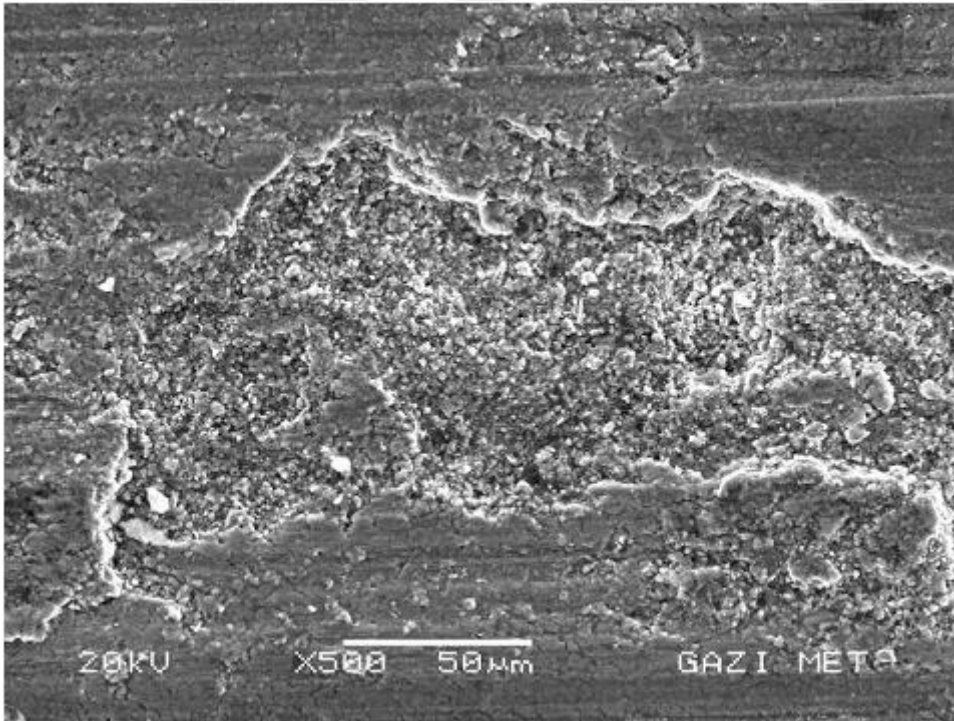


Resim 7.23. 560 °C Sıcaklıkta preslenen numunenin 15 N yük altında aşındırılması ile oluşan yüzey desenlerinin genel görünümü

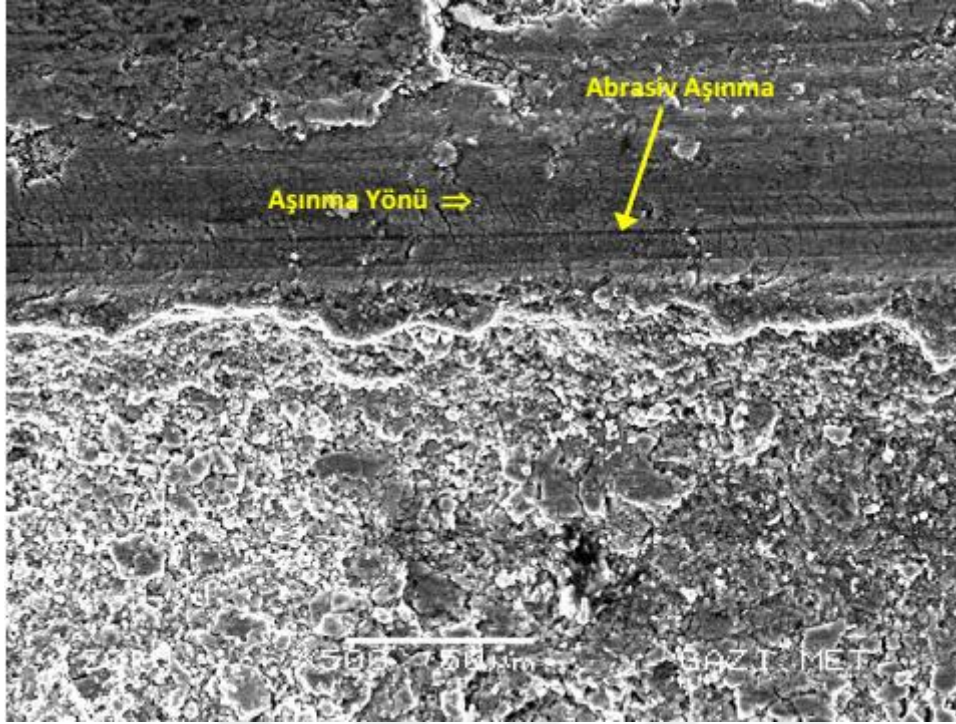
Aşınma yüzeyindeki koyu kısımlar aşınmaya maruz kalan yüzeyi gösterirken açık kısımlar ise aşınmış katman şeklindeki yüzeyi göstermektedir.



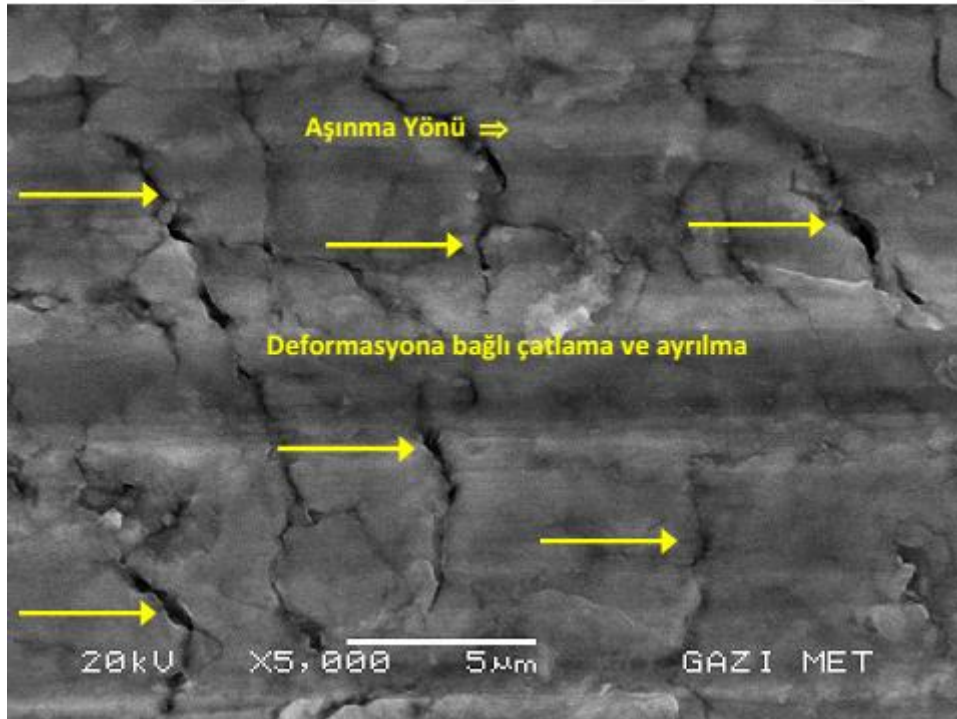
Resim 7.23. (devam) 560 °C Sıcaklıkta preslenen numunenin 15 N yük altında aşındırılması ile oluşan yüzey desenlerinin genel görünümü



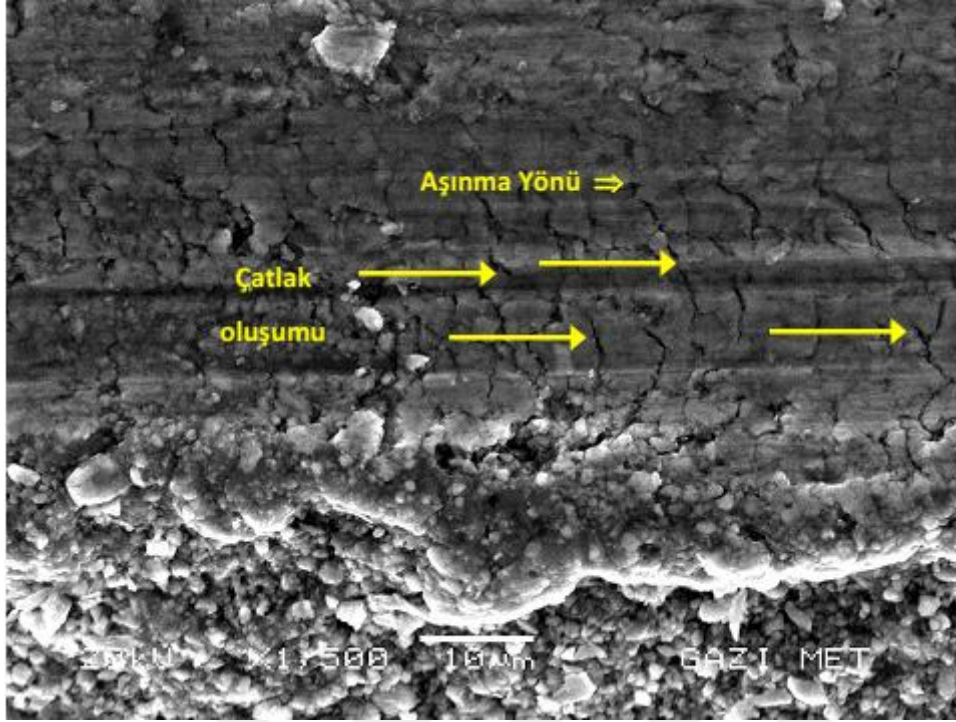
Resim 7.24. 560 °C Sıcaklıkta preslenen numunenin 15 N yük altında aşındırılması ile oluşan aşınma mekanizmaları



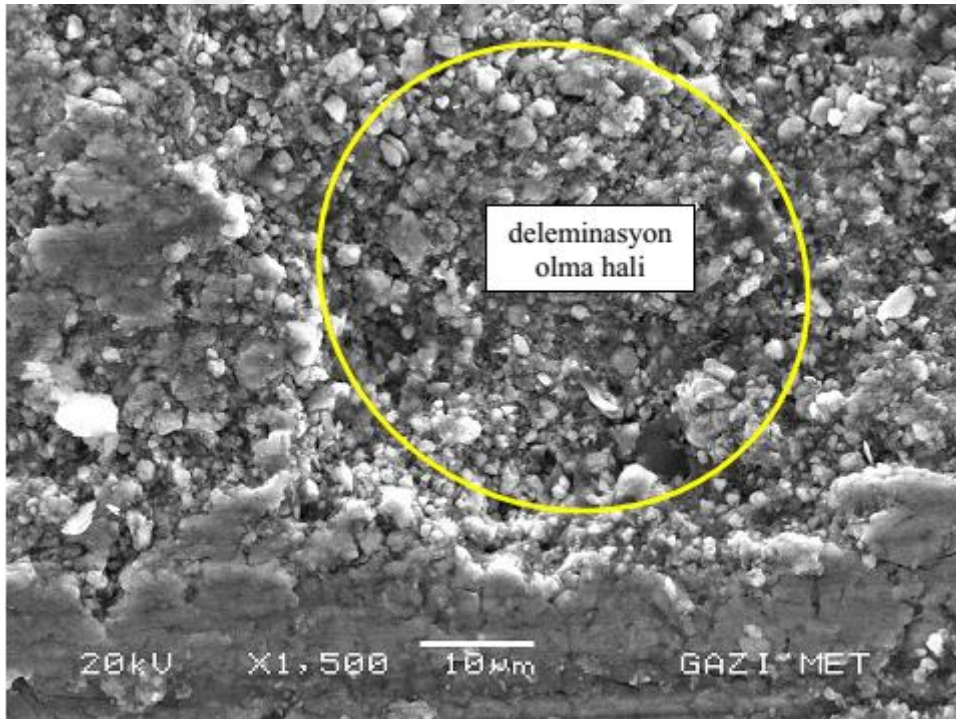
Resim 7.24. (devam) 560 °C Sıcaklıkta preslenen numunenin 15 N yük altında aşındırılması ile oluşan aşınma mekanizmaları



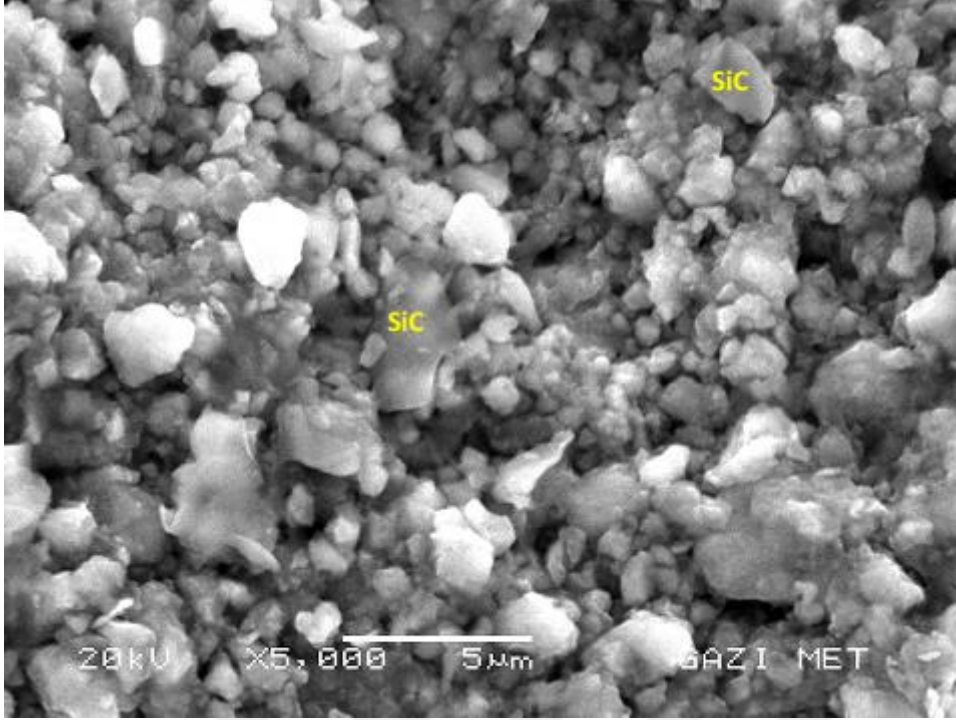
Resim 7.25. 560 °C SP üretilen numunenin 15 N yük altında aşınma yönü ile oluşan deformasyona bağlı çatlama ve ayrılma



Resim 7.26. 560 °C Sıcaklıkta preslenen numunenin 15 N yük altında aşındırılması ile oluşan deformasyon ve kopma hasarlanması



Resim 7.27. 560 °C Sıcaklıkta preslenen numunenin 15 N yük altında aşındırılması ile oluşan deformasyon



Resim 7.28. 560 °C Sıcaklıkta preslenen numunenin 15 N yük altında aşındırılması ile kopan parça sonrası ortaya çıkan yüzey görünümü

Aşındırıcı disk ile aşınmaya maruz kalan numunenin, uygulanan yük altında temasın artması sonucu malzeme çifti yüzeyleri arasında pürüzler oluşmuştur. Bu pürüzler sürtünmeyi arttırmıştır. Aşınma süresine bağlı olarak çatlama ve ayrılmalar meydana gelmiş plastik deformasyon gerçekleşmiştir. Aşınmanın numune yüzeylerinden bölgesel kopmalar (deleminasyon) şeklinde gerçekleştiği görülmüştür.

Diğer taraftan malzemede aşınma sonrası gözenekler olduğu görülmektedir. Bu gözenekleri matristen kopan SiC partiküllerinin oluşturduğu değerlendirilmektedir (Resim 7.23). Aşınma yüzeyinden kopan parçalar, malzeme yüzeyini çizerek abrasiv aşınmayı gerçekleştirdiği görülmektedir (Resim 7.24). Bu tip aşınmayı matristen ayrılan takviye elamanı SiC partiküllerinin gerçekleştirdiği değerlendirilmektedir. Baskın olarak bölgrsrl katman halinde yüzey kopmalar şeklinde Adheziv aşınmanın gerçekleştiği görülmektedir.

Aşınması sonrası görüntüleri genel olarak değerlendirildiğinde iyi bir sinterleşmenin olmadığı dolayısıyla arzu edilen seviyede ara yüzey bağının oluşmadığı söylenebilir.



## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında farklı sıcaklıklarda sıcak preslemeyle alüminyum matrisli ve SiC takviyeli toz metal kompozit malzeme üretilerek presleme sıcaklığının malzemenin başta aşınma davranışı olmak üzere mekanik özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre aşağıda verilen genel sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Bilyeli ortamda turbula cihazında yapılan mekanik karıştırma-öğütme etkisiyle SiC takviye partiküllerinin matris yapı içerisinde yüksek oranda homojen olarak dağılmış olduğu,
2. Bütün sıcaklıklarda elde edilen toz metal kompozit malzemelerde % 98,14 üzeri yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılabildiği,
3. Bütün numunelerde 39-40 HBw arası sertlik değerleri elde edilirken en düşük ve en yüksek sıcaklıklarda preslenen numunelerin sertlik olarak aralarında kayda değer bir fark olmadığı,
4. Presleme sıcaklığındaki artışa paralel olarak toz metal kompozit malzemelerin kırılma mukavemetinde artış gözlemlendiği ve en yüksek çapraz kırılma mukavemet değerinin 560 °C de preslenen numunede elde edildiği,
5. Yapıda görülen mikro çatlaklar ve takviye matris ara yüzey bağlanmasındaki yetersizliklerden kaynaklı daha yüksek mekanik mukavemet değerlerine ulaşılamadığı,
6. Aşınma sonuçlarına göre bütün numunelerde uygulanan yük artarken aşınma kayıplarının artmış olduğu, en düşük aşınma kayıplarının 560 °C de preslenen numunede elde edildiği, bunun da çapraz kırılma mukavemeti değerleriyle uyumlu olduğu,
7. Yoğunluk, sertlik sonuçlarına göre presleme sıcaklığı artarken bariz bir iyileşme görülmezken, aşınma kayıplarına ve çapraz kırılma mukavemeti değerlerine göre en uygun sıcak presleme sıcaklığının 560 °C olduğu tecrübe edilmiştir.

Yapılacak benzer çalışmalarda kompozit malzemenin aşınma performansını, sabit yük altında ve değişen sürtünme mesafesinde test edilebilir.



## KAYNAKLAR

1. Yağcı, T., Cöcen Ü., Çulha, O., Korkmaz, A. (2021). Alüminyum döküm alaşımlarına dair son yıllardaki akademik ve endüstriyel gelişmelere genel bakış ve değerlendirme. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1191-1210.
2. Kalemtaş, A. (2015). Seramik matrisli kompozit malzemeler. *Bursa: Putech and Composites*, 20-26.
3. Yastımoğlu, F., Özkan, A. (2017). Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
4. Arık, H. , Kırmızı, G., Semerci, P. (2017). Sıcak presleme ile alüminyum matrisli ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli toz metal kompozit malzeme üretimi ve abrasif aşınma davranışının araştırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(4), 87-97.
5. Okumuş, M., Bülbül, B. (2020). Mekanik alaşımlama metodu ile üretilen Al-4.5Cu/SiC kompozitin termal ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(2), 405-417.
6. Singla, M., Dwivedi, DD, Singh, L. ve Chawla, V. (2009). Alüminyum bazlı silisyum karbür parçacıklı metal matrisli kompozitin geliştirilmesi. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 8(6), 455-467.
7. Yıldız, T., Gür, A. K. (2006). Aşınma sistemleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 86-91.
8. Arık, H. (2019). Investigation of wear properties of Al-SiC composite materials produced by powder metallurgy method. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(3), 742-752.
9. Kırmızı, G., Arık, H., Çinici, H. (2017). *Sıcak Presleme İle Al7075 Matrisli Ve Sic Takviyeli Toz Metal Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzeme Üretimi Ve Karakterizasyonu*. Uluslararası Savunma Sanayi II. Sempozyumu, Kırıkkale, 1-7.
10. Şanlı, P. (2019). *Farklı Oranlardaki Takviye Elemanlarıyla Katkılandırılmış Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 88.
11. Cilasun, N. S. (2013). *Karıştırmalı Döküm Yöntemi İle SiC Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 28-55.
12. Karabulut, H., Karacıf, K., Türkmen, M. (2021). Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilen AA2024 ve AA7075 Esaslı %5 SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Sertlik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(1), 104-112.

13. Kaynak K., Matik U. (2018). Toz metalürjisi ve sıcak presleme prosesleri ile üretilen AA7075-SiCp kompozitlerin yapısal özellikleri. *Turkey Politeknik Dergisi*, 23(2), 383-392.
14. Kılıç, E. F. (2007). *Alüminyum Alaşımli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 46-78.
15. Jin, P., Xiao, B., Wang, Q., Ma, Z., Liu, Y., Shu, L. (2011). Effect of Hot Extrusion on Interfacial Microstructure and Tensile Properties of SiCp/2009Al Composites Fabricated at Different Hot Pressing Temperatures. *ScienceDirect, J. Mater. Sci. Technol*, 27(6), 518-524.
16. Yıldız, T., Gür, A. K. (2006). Aşınma sistemleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4 (2), 86-91.
17. İlkhçi, A.A., İzçiler, M. (2018). ASTM F75 Co-Cr-Mo alaşımının abrasiv aşınma davranışlarının araştırılması ve incelenmesi. *Uluslararası Multidisipliner Çalışmalar ve Yenilikçi Teknolojiler Dergisi*, 2(1), 1-4.
18. İnternet: Alüminyum. URL: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BCminyum>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
19. İnternet: Silisyum karbür. URL: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Silisyum\\_karb%C3%BCr](https://tr.wikipedia.org/wiki/Silisyum_karb%C3%BCr), Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
20. İnternet: Silisyum karbürün kimyasal yapısı, özellikleri ve kullanım alanlar. URL: <https://tr.thpanorama.com/articles/qumica/carburo-de-silicio-estructura-qumica-propiedades-y-usos.html>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
21. İnternet: Silisyum karbür kullanım alanları. URL: <https://www.metalurjik.com/silisyum-karbur-kullanim-alanlari>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
22. Kaczmar, J.W., Pietrzak, K., Wlosinski, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 58-67.
23. Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech and Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
24. İnternet: Kompozit nedir? kompozit malzemeler ve özellikleri. URL: <https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri/>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
25. Sur, G., Kayabaşı, İ. (2019). Hafif Metal Ana Fazlı Kompozit Malzeme Üretim Sisteminin Tasarım, İmalat Ve Performansının İncelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7(1), 63-79.
26. Uygur, İ., Saruhan, H. (2004). Aluminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *Sakarya University Journal of Science*, 8(1), 167-174.

27. Kılıçarslan, A. (2009). *Al-B<sub>4</sub>C Kompozitlerinde Islatılabilirliği Artırmak Amacıyla B<sub>4</sub>C Partiküllerinin Yüzey Özelliklerinin Değiştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3.
28. İnternet: Beşergil, B. (2022). Kompozitlerde arayüz (interface in composites). URL: [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3\\_7.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/3_7.html), Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
29. Şahin, Y. (2015). *Kompozit Malzemelere Giriş*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 38-145.
30. İnternet: Karanfil T. (2022). Kompozit malzemeler, sınıflandırılması ve üretimi. URL: <https://tolgakaranfil.webnode.com.tr/products/kompozit-malzemeler%2C-s%2C%2B1n%2C%2B1fland%2C%2B1r%2C%2B1lmas%2C%2B1-ve-uretimi/>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
31. Cagar, P. (2021). Endüstriyel Ürünlerin Tasarımında Yaygın Yer Edinen Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Özellikleri. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(2), 79-88.
32. Küçükçobanoğlu, Y., Yıldız Aktaş, L. (2018). Nanokompozit kaynağı ve uygulama alanı olarak bitkiler. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 30(4), 429-436.
33. İnternet: Toz metalurjisi. URL: <http://kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2016/03/toz-metalurjisi-afsin-alper-cerit.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
34. İnternet: Kompozitler. URL: <https://cdn2.beun.edu.tr/metalurji/2018/03/tek/16.-bolum.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
35. Köseadağ, E., Ekici, R. (2019). Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 384-393.
36. İnternet: Çok yönlü laminatlardan bir kompozit. URL: <http://www.expertsmind.com/questions/properties-of-some-fibres-30137449.aspx>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
37. İnternet: Sandviç yapıli kompozit. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sandwich-structured\\_composite#/media/File:CompositeSandwich.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Sandwich-structured_composite#/media/File:CompositeSandwich.png), Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
38. Solmaz, Y., Gür, M. (2007). Tabakalı kompozit plakalarda takviye malzemesi ve oryantasyon açısının gerilme analizine etkisi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 16-25.
39. İnternet: Hibrit kompozit malzemeler. URL: <https://www.slideshare.net/aatayzada/hibrit-kompozit-malzemeler-hybrid-composite-materials>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
40. Işık, A. (2008). *Kompozit Malzemedden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanının Eğilme ve Burulma Yükü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 24-46.

41. Soy, U. (2009). *SiC/B4C Takviyeli Metal Matriks Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 52-57.
42. Güven, Ş. (2011). Toz metalurjisi ve metalik köpükler. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 22-28.
43. Gümilcine, T. (2014). *İzoftalik Polyester Reçine Matrisli Sürekli E-Camı ve Bazalt Fiber Destekli Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 65-76.
44. İnternet: Metal matrisli kompozit malzemeler ve üretim yöntemleri. URL: <https://docplayer.biz.tr/17800082-Metal-matrisli-kompozit-malzemeler-ve-uretim-yontemleri.html>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
45. İnternet: Yamaoğlu, R. (2017). Toz metalurjisi. URL: <https://docplayer.biz.tr/47494693-Toz-metalurjisi-yrd-doc-dr-ridvan-yamanoglu.html> Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
46. İnternet: Karanfil, T. (2022). Kompozit malzemelerin avantajları ve üretim metodları. URL: <https://tolgakaranfil.webnode.com.tr/products/kompozit-malzemelerin-avantajlari-ve-uretim-metodlari/> Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
47. Öztürk, S., İcin, A. G. K. (2015). Toz Metalurjisi Deneyi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Föyü*, Trabzon, 1-10.
48. İnternet: Ünal, R. (2022). Toz üretim teknikleri. URL: [https://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder\\_product.html](https://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html), Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
49. İnternet: Cerit, A. A. (2022) Toz metalurjisi. URL: [http://www.alpercerit.com.tr/wp-content/uploads/ders\\_notlari/imalat/7\\_Toiz\\_Metalurjisi.pdf](http://www.alpercerit.com.tr/wp-content/uploads/ders_notlari/imalat/7_Toiz_Metalurjisi.pdf), Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
50. German, R.M. (2007). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri* (çev. S. Sarıtaş, M. Türker ve N. Durlu). Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları. (Eserin orijinali 2007’de yayımlandı), 61-331.
51. Canaran, M. (2002). *Mekanik Alaşımlamanın Volfram Ağır Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Sinterleme Davranışlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 8.
52. Yalçınkaya, F. (2018). *Toz Metalurji Metodu İle Üretilen Alüminyum Matrisli ve Alümina Takviyeli Kompozit Malzemenin Abrasiv Aşınma Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22.
53. Yurtkuran, E. (2011). *T/M ile Üretilmiş Alüminyum Esaslı Malzemelerin Alaşım Elementleri ve Takviye Elemanı İçermelerine Bağlı Tel Erezyonunda İşlenebilirliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 13-40.

54. Baksan, B., Gürler, R. (2003), Toz metalurjisinin savunma sanayiinde uygulanması, *Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü Dergisi*, Eskişehir, 1-15.
55. Ayata, A.(2014). *Toz Metal Alüminyum Malzemelerin Mikrodalga Enerjisi ile Sinterlenebilirliğinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12.
56. Lawley, A. (1986). Modern powder metallurgy science and technology. *Journal of Metals*, 15-25.
57. Akkaş, M., Çetin, T., Boz, M. (2018). Gaz atomizasyonu yöntemi ile  $Al_2Si$  tozu üretimi ve karakterizasyonu, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, (9)2, 795-804.
58. Kurt, A. (1992). *Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerinin Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-22.
59. Yılmaz, F. Y., Fedai, Y. (2004). Metal tozu üretiminde yeni bir yöntem, dondelark yöntemi, *Makine Tasarım Ve İmalat Dergisi*, (6)1, 1-8,
60. Mabuchi, M., Higashi, K. (2001). An Experimental investigation of a superplastic constitutive equation in Al-Mg-Si alloy composites reinforced with  $Si_3N_4$  whiskers. *International Journal of Plasticity*, 17, 399-407.
61. İnternet: Toz metalurjisi. URL: <https://docplayer.biz.tr/32188094-Toz-metalurjisi-tm.html>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
62. Boothroyd, G., Dewhurst, P., Winston, K. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly*. (3. Baskı). United States: CRC Press, 461-490.
63. Ulutaş, A. (2014). *Bor Takviyeli Bakır Kompozitinin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Mekanik-Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 23-24.
64. İnternet: HIP (Sıcak izostatik pres) nedir?. URL: <https://malzemebilimi.net/hip-sicak-izostatik-pres-nedir.html>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
65. İnternet: Tozların yoğunlaştırılması ve şekillendirilmesi. URL: <https://silo.tips/download/toz-metalurjs-profdrmuzaffer-zeren-2>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
66. İnternet: Bölüm 4: Yoğunlaştırma öncesi toz işlemleri, şekillendirme ve tozun sıkıştırılması. URL: <https://docplayer.biz.tr/17625760-Bolum-4-yogunlastirma-oncesi-toz-islemleri-sekillendirme-ve-tozun-sikistirilmesi.html>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
67. Kevenlğk, O. F., (2013). *Toz Metalurjisi Yöntemi ile SiC Takviyeli Al 2014 Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 61-62.
68. Çalın, R. (2021). Kompozit Malzemeler Lisans Ders Notları. *Kırıkkale Üniversitesi*, Kırıkkale.

69. İnternet: Ünal R. (2022). Sinterleme. URL: <https://rahmiunal.net/toz/sinterleme/sintering.html>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
70. İnternet: Aşınma nedir? adhezif ve abrazif aşınma nedir?”, URL: <https://malzemebilimi.net/asinma-nedir-adhezif-ve-abrazif-asinma-nedir.html>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
71. Özçatalbaş, Y. (2014). Mühendislik Malzemelerin İşlenebilirliği (MEM-516) Ders Notları. *Gazi Üniversitesi*, Ankara.
72. Köz, F. (2020). *SiC Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Farklı Ortamlardaki Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lİsans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 23-24.
73. 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, 95-144.
74. İnternet: Adezyon aşınması. URL: [https://www.turkcebilgi.com/adezyon\\_a%C5%9F%C4%B1nmas%C4%B1#post](https://www.turkcebilgi.com/adezyon_a%C5%9F%C4%B1nmas%C4%B1#post), Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
75. Varol, T. (2016). *Nano Partikül Takviyeli Bakır Esaslı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 38-40.
76. Şenol, E., Ölüç, S., (2018). Şeffaf Camların Erozyon Karakteristiğinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Bitirme Çalışması, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü*, Trabzon.
77. ALAMDARI ILKHCHI, A. (2019). *ASTM F75 Co-Cr-Mo Alaşım Çeliğinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12.
78. İnternet: Abrazyon aşınması. URL: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Abrazyon\\_a%C5%9F%C4%B1nmas%C4%B1](https://tr.wikipedia.org/wiki/Abrazyon_a%C5%9F%C4%B1nmas%C4%B1), Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
79. İnternet: Aşınma hasarları. URL: <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture2.pdf>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
80. İnternet: Metalik malzemelerde aşınma. URL: <https://silo.tips/download/metal-k-malzemelerde-a-inma>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
81. İnternet: Aşınma nedir aşınma çeşitleri. URL: <https://www.muhendisbeyinler.net/asinma-nedir-asinma-cesitleri/>, Son Erişim Tarihi: 25.12.2022.
82. Kosa, E. (2016). *Çeliklerin Eroziyon-Abrazif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-28.

83. Kurt, H. (2010). *Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-22.
84. Sirek, F. (2015). *DeneySEL Aşınma Modeli Verileri İçin Uygun Parametre Seçimi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-21.
85. Kiraz, A. T. (2019). *Polimer Matrisli Demir Oksit Takviyeli Kompozit Malzemenin Kuru Kayma Aşınma Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 27-28.
86. Savaş, Ö., Başer, M. S. (2019). Alüminyum ana yapı fonksiyonel derecelendirilmiş Al<sub>3</sub>Ti takviyeli kompozitlerin abrasif aşınma davranışlarının taguchi yaklaşımı ile incelenmesi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 193-200.
87. Demirel, M. (2007). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Metal Matrisli Kompozitlerde Ni<sub>3</sub>Al Metallerarası Bileşik Takviyesinin Aşınma Davranışına Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 23-24.
88. Arık, H. (2019). Toz metalurjisi metoduyla Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7(3), 741-754.
89. Gürcan, K. , Derin, B. , Ayas, E. (2021). Effect of SiC particle size on the microstructural, mechanical and oxidation properties of in-situ synthesized HfB<sub>2</sub>-SiC composites, *Politeknik Dergisi*, 24, 503-510.
90. Tosun, G., Kurt, M. (2020). SiC takviyeli Al-Mg kompozitlerin yoğunluğunun ve mikroyapısının incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 589-597.
91. Şimşek, İ., Yıldırım, M., Tunçay, T., Özyürek, D., Şimşek, D. (2018). Mekanik Alaşım/Öğütme Yöntemi İle Üretilen Al-SiC Kompozitlerin İncelenmesi, *Technological Applied Sciences*, 13 (2), 165-171.
92. Şimşek, D., Şimşek İ., Özyürek, D. (2019). Production and characterization of Al-SiC composites by mechanical milling, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (8)1, 227-233.
93. Gürbüz, M., Turan, B.C., Yılmaz, Ö. (2019). Stir Casting of SiC Reinforced Aluminum Composites From Waste Aluminum. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, (3)1, 31-33.





*Gazili olmak ayrıcalıktır*