

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM MATRİSLİ
BOR KARBÜR TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Mlz. Müh. Gürkan AKIN

Anabilim Dalı : İLERİ TEKNOLOJİLER

Program : MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ

ŞUBAT 2006

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ALÜMİNYUM MATRİSLİ
BOR KARBÜR TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. ve Mlz. Mh. Gırkan AKIN
(521031005)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Şubat 2006

Tez Danışmanı : Prof. Dr. E. Sabri KAYALI

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Hiseyin ÇİMENÖĞLU

Prof. Dr. Mehmet KOZ (MÜ)

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Program'ında 2003 güz yarısından bugüne kadar sürmüş olan yüksek lisans eğitimiimde, şahsıma göstermiş olduğu her türlü ilgi ve destekten dolayı değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim

Tez çalışmalarımsüresiince kendisine sürekli danıştığımve yönlendirmelerinden her zaman büyük istifade ettiğim değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLÜna da ayrıca teşekkürlerimi sunarım

Tezi me ait deneylerin şekillendirilmesinde ve yapılmasında yardımcı esirgemeyen başta Araş. Gör. Harun MİNDİVAN olmak üzere, Araş. Gör. Özgür ÇELİK e, Araş. Gör. Dr. Erdem ATAR' a ve Araş. Gör. Hasan GÜLERYÜZ' e ilgilerinden dolayı teşekkür ederim

Bugünlere gel meimde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta sevgili anne m olmak üzere, merhum babama, ailemin değerli fertlerine tez çalışmalarımsüresiince göstermiş oldukları sabır ve gayretlerinden dolayı minnettar olduğumu belirtmek isterim

Şubat, 2006

Gürkan AKIN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER	2
2.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Genel Tanımı ve Özellikleri	2
2.2. Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri	3
2.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Endüstriyel Uygulamaları	5
2.3.1. Havacılık ve Uzay Endüstrisi	5
2.3.2. Otomotiv Endüstrisi	7
2.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	8
2.4.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri	8
2.4.1.1. Sıvı Metal - Seramik Partikül Karışımı	9
2.4.1.2. Sıkıştırma Dökümü	11
2.4.1.3. Basıncsız ve Basıncılı İnfiltrasyon Yöntemleri	12
2.4.2. Katı Faz Üretim Yöntemleri	14
2.4.2.1. Toz Metalurjisi	14
2.4.2.2. Difüzyonla Bağlama	15
3. TOZ METALURJİSİYLE METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ	16
3.1. Toz Metalurjisinde Parça Üretim Kademeleri	17
3.1.1. Metalik Tozların ve/veya Alaşımların Karıştırılması	17
3.1.2. Tozların Preslenmesi	17
3.1.3. Preslenen Kompozitlerin Sinterlenmesi	20
3.1.4. Sinterleme Sonrası Yapılan Modifikasyonlar	22
3.1.4.1. Yapıdaki Porların Doldurulması	22
3.1.4.2. Yağ Endirgeme	22

3.1.4.3 İlave Presleme (ikinci deforasyon)	22
3.1.4.4 Buharla İşlem	24
3.1.5 Son İşlemler	24
3.1.5.1 Talaş Kaldırma ve Çapak Alma İşlemleri	24
3.1.5.2 Birleştirme ve Montaj	24
3.1.5.3 Isıl İşlem	24
3.2 Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen MMK Malzemelerin Avantajları ve Uygulama Alanları	26
3.2.1 TMYöntemiyle Üretilen Kompozitlerin Genel Uygulamaları	28
3.2.1.1 Düşük Yoğunluklu (Gözenekli) Parçalar	28
3.2.1.2 Orta Yoğunluklu Parçalar	29
3.2.1.3 Yüksek Yoğunluklu Parçalar	29
3.2.2 TMYöntemiyle Üretilen Kompozitlerin Askeri Uygulamaları	30
3.2.2.1 Aışılengelmiş T/M Uygulamaları	30
3.2.2.3 Hıroteknik T/MUygulamaları	30
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
4.1. Kompozit Malzeme Üretimi	32
4.2. Mikroyapı Karakterizasyon Çalışmaları ve Sertlik Ölçümleri	33
4.3. Aşınma Deneyleri	34
4.4. Korozyon Deneyleri	34
5. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRİLMESİ	35
5.1. Optimum Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi	35
5.1.1. Presleme Basıncı	35
5.1.2. Sinterleme Ortamı	36
5.1.3. Sinterleme Süresi	36
5.2. Mikroyapı ve Sertlik Karakterizasyon Sonuçları	37
5.3. Aşınma Deneyi Sonuçları	42
5.4. Korozyon Deneyi Sonuçları	46
6. GENEL SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	50
EKLER	54
ÖZGEÇMİŞ	70

KISALTMALAR

MMK	: Metal Matrisli Kompozit
T/ M	: Toz Metalurjisi
HV	: Vickers Sertliği
SEM	: Scanning Electron Microscopy
XRD	: X– Ray Diffraction
B A D	: Bağlı Aşınma Drenci
GSE	: Geri Saçılan Elektron
İEG	: İkincil Elektron Görüntüsü

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Alüminyum matrisli kompozitlerde mekanik özellikler	4
Tablo 2.2. MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları ve boyutları..	5
Tablo 2.3. Havacılık endüstrisinde kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri.....	6
Tablo 2.4. Otomotiv endüstrisinde kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri.....	8
Tablo 3.1. Toz malzemeler için tipik presleme basınçları.....	18
Tablo 3.2. Farklı malzemeler için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri.....	21
Tablo 4.1. Bu çalışmada kapsamında toz metalurjisiyle üretilen kompozitlerin bileşen oranları	32
Tablo 5.1. Atmosferik ortamda 12 saatlik sinterleme sonucu elde edilen kompozit numunelerinin sertlik değerleri	39
Tablo 5.2. Lineer kesişme metodu ile hesaplanan takviye-porozite hacim oranı	40
Tablo 5.3. İncelenen malzemelerin bağışınma dirençleri	44
Tablo 5.3. Kompozitlerin aşınmasında ölçülen kararlı durum sürtünme katsayıları	46
Tablo B.1. İncelenen kompozitlerin yüzeylerinde aşınma deneyleri sonucunda oluşan izlerin boyutu	57
Tablo C.1. Korozyon deneyi sonuçları	64

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Kompozitlerin mevcut malzeme grupları içerisindeki yeri.....	2
Şekil 2.2 : Yapısal kompozitlerin Airbus uçaklarında kullanımı.....	6
Şekil 2.3 : Ti - 6Al - 4V kompozitinden yapılmış motor pervanesi	7
Şekil 2.4 : Motor türbününde kullanılan metalik kompozitler.....	7
Şekil 2.5 : Sıvı damlacık metoduna göre ıslanma mekanizmasının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.6 : Vorteks metoduyla MMK üretiminin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.7 : Ağırlıkça %7 SiC partikülü içeren; a) geleneksel döküm b) sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş alüminyum matrisli kompozitin mikroyapısı.....	11
Şekil 2.8 : Sıkıştırma döküm yöntemiyle kompozit üretiminin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.9 : Basıncsız infiltrasyon yöntemiyle; a) Al-Mg alaşımı infiltrasyonu b) Cu-Cu ₂ O karışımı infiltrasyonuna ait kompozit üretiminin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.10 : Basıncılı infiltrasyon yönteminin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.11 : Basıncılı infiltrasyon yöntemiyle üretilen ağırlıkça %4,5 Cu/saffil takviyeli alüminyum matrisli kompozite ait SEM görüntüsü.....	14
Şekil 2.12 : Hicmiye %30 SiC filament içeren bir Ti-6Al-4V kompozitinin 870° C de 20 MPa basınç altında a) 1 dk b) 8 dk c) 40 dk süreyle sıcak preslenmesiyle elde edilen optik mikroskop görüntüleri.....	15
Şekil 3.1 : Toz metalurjisinde tek yönlü preslemeye ait işlem kademeleri.....	19
Şekil 3.2 : Metal tozlarında presleme basıncının teorik yoğunluğa etkisi.....	19
Şekil 3.3 : Metal tozlarında tek ve çift yönlü presleme altında meydana gelen yoğunluk değişiminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.4 : Nikel tozunun sintirlenmesi sırasında boyun oluşumu.....	20
Şekil 3.5 : 150 °C de deformasyon uygulanmış; a) Al b) Al - %1,5 Al ₂ O ₃ c) Al - %1,5 Al ₂ O ₃ - %4 Al ₄ C ₃ d) Al - %1,5 Al ₂ O ₃ - %12 Al ₄ C ₃ kompozitlere ait görüntüler.....	23
Şekil 3.6 : İlave deformasyon ve sintirlenmenin yoğunluk değişimine etkisi...	23
Şekil 3.7 : Toz metalurjisinde kullanılan parça üretim ve modifikasyon işlem kademelerinin genel sınıflandırması.....	25
Şekil 3.8 : Toz metalurjisinin dünya genelindeki pazar payı.....	26
Şekil 3.9 : Parça üretim proseslerinde harcanan enerjilerin kıyaslanması.....	27
Şekil 3.10 : Parça üretim proseslerinde malzemelerin kullanılabilirlik oranları.....	27
Şekil 3.11 : Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bakır ve demir esaslı parçalar	28
Şekil 3.12 : Toz metalurjisiyle üretilen malzemelerin genel kullanım alanları.	29

Şekil 4 1	: Bu çalışmada üretilen kompozit numunelere ait üretim akış şeması.....	33
Şekil 4 2	: Aşınma testlerinin yapıldığı ileri-geri (reciprocating) aşınma deney cihazı.....	34
Şekil 5 1	: Toz presleme basıncının, atmosferik ortamda ve 570 °C de 12 saat süreyle sinterlenen alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi	35
Şekil 5 2	: Sinterleme ortamının 700 MPa’da preslendikten sonra 570 °C de 12 saat süreyle sinterlenen alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi	36
Şekil 5 3	: Sinterleme süresinin 700 MPa’da preslendikten sonra atmosferik ortamda ve 570 °C de sinterlenen alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi.....	37
Şekil 5 4	: Ara deformasyonun B ₄ C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi	38
Şekil 5 5	: Matris bileşiminin B ₄ C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi	38
Şekil 5 6	: Üretilen kompozitlere ait XRD paternleri; a) %0 B ₄ C içeren %100 Al matrisli kompozit b) %23 B ₄ C içeren %100 Al matrisli kompozit c) %0 B ₄ C içeren %50 Al ve %50 Al ₁₂ Si matrisli kompozit d) %23 B ₄ C içeren %50 Al ve %50 Al ₁₂ Si matrisli kompozit.	41
Şekil 5 7	: İncelenen malzemelerin yüzeylerinde aşınma deneyleri sırasında oluşan izlerin 3 boyutlu görünüşleri	43
Şekil 5 8	: B ₄ C içeren %100 alüminyum matrisli ve ara deformasyon işlemi uygulanmış malzemenin aşınma izi boyu ve derinliğini gösteren iki boyutlu profil örneği.....	44
Şekil 5 9	: İncelenen kompozitlerde bağli aşınma direnci ile sertlik arasındaki ilişki.....	45
Şekil 5 10	: NaCl- HCl-saf su çözeltisi içinde yapılan korozyon deneylerinde deney süresinin korozyon kaybına etkisi	47
Şekil 5 11	: Korozyon deneylerinin yapıldığı çözeltiye ait iletkenliğin deney süresince değişimi	48
Şekil 5 12	: Korozyon deneylerinin yapıldığı çözeltiye ait PH değerlerinin deney süresince değişimi	48
Şekil A 1	: Üretilen kompozitler ait mikroyapı resimleri	54
Şekil B 2	: İncelenen kompozitlerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin stereo mikroskop görüntüleri.....	57
Şekil B 3	: İncelenen kompozitlerin aşınmış yüzeylerine ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.....	59
Şekil B 4	: Aşınma deneylerinde aşındırıcı olarak kullanılan Al ₂ O ₃ bilyanın temas yüzeylerine ait fotoğraflar	60
Şekil B 5	: Matrisi alüminyum olan kompozitlerde sürtünme katsayısının aşınma deneyi süresince değişimi	61
Şekil B 6	: Matrisi Al- Al ₁₂ Si olan kompozitlerde sürtünme katsayısının aşınma deneyi süresince değişimi.	62
Şekil C 2	: 3 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görünüşleri	64
Şekil C 3	: 6 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görünüşleri.....	65

Şekil C4 : 9 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numuneleri yüzey görünüşleri	66
Şekil C5 : 12 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görünüşleri	67
Şekil C6 : 24 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görünüşleri	68
Şekil C7 : 24 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin kesit mikroyapıları	69

ÖZET

Son 50 yıl içerisinde, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerindeki takip edilemez hızda ilerleyen teknolojik gelişmeler, metal matrisli kompozitlerin hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olmasına neden olmuştur. Sahip oldukları üstün mekanik özellikler (yüksek mukavemet ve elastik modül, yüksek aşınma direnci, sürünmeye karşı direnç, termal etkilere karşı kararlılık v.b.) sebebiyle metal matrisli kompozitler üzerine yapılan çalışmalar büyük rağbet görmektedir ve genellikle üretim metotlarının ekonomikleştirilmesi ve verimliliğinin artırılması yönünde olmaktadır.

Bu çalışmada, metal matrisli kompozit malzeme ailesinin geniş bir parçasını oluşturan alüminyum matrisli kompozitlerin bir katı faz üretim metodu olan toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi amaçlanmıştır. Taşıdığı stratejik önem ve sahip olduğu üstün fiziksel özellikleri sebebiyle B₄C alüminyum matrisli kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılan SiC, Al₂O₃ ve TiC gibi seramiklerin alternatifi olma yolundadır.

Çalışma kapsamında, farklı oranlarda B₄C içeren %100 Al ve %50 Al + %50 Al₁₂Si matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle optimum üretim parametreleri sertlik ölçümleri ile belirlenmiş ve optimum koşullarda üretilen kompozitlerin özellikleri aşınma ve korozyon deneyleriyle incelenmiştir. Ağırlıkça %4 - %23 aralığında B₄C takviye edilmiş kompozitlerde, artan B₄C içeriği ve matrise yapılan Al₁₂Si ilavesiyle sertlik artmaktadır. Aşınma direnci %8 B₄C içeriğine kadar artmakta ve bu miktarının üzerinde düşüş göstermektedir. Korozyon deneylerinde en düşük korozyon kaybı matrisi %100 Al olan B₄C partikül takviyesi yapılmamış malzeme de meydana gelmiştir.

SUMMARY

In the last five decades, the metal matrix composites have acquired a considerable part in our life since the technological developments in aerospace and automotive industries have been growing amazingly. Owing to their satisfactory mechanical properties (high strength and elastic modulus, wear resistance, creep resistance, stability against thermal effects etc.), scientific studies for metal matrix composites have been attracting high attention and have objectives to minimize the costs of manufacturing and to increase the efficiency.

In this study, the goal was to produce aluminum metal matrix composites using powder metallurgy method which was a kind of solid-phase processing. Since its having high strength and physical features, B_4C has been a popular alternative reinforcement among the others such as SiC , Al_2O_3 and TiC which are commonly used in aluminum metal matrix composites.

Optimum producing parameters of composites having %100 Al and %50 Al - %50 Al₁₂Si matrix reinforced with several amounts of B_4C were determined by hardness tests. Characteristics of composites were investigated by wear and corrosion tests. With increasing of B_4C content and Al₁₂Si addition into the matrix increased the hardness of composites reinforced with %4 - %23 B_4C by weight. Up to 9% B_4C content, wear resistance of composites increased however it decreased with further increase of B_4C content. In corrosion tests, minimum corrosion loss was occurred at the composite which had an unreinforced aluminum matrix.

1. GİRİŞ

Metal matrisli kompozitler, metal ve/veya metalik alaşımlardan oluşan matris içine katılan seramik takviyeler sayesinde nitelikli mekanik özellikler gösteren ve başta havacılık ve otomotiv endüstrisi olmak üzere kendisine oldukça geniş uygulama alanı bulan ileri malzemelerdir. Metal matrisli kompozitlere mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için yapılan takviyelerin başında SiC, Al_2O_3 , TiC, MgO ve B₄C gibi seramikler gelmektedir. Bu ilaveler arasında B₄C sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle son zamanlarda birçok çalışmaya konu olmakta ve zengin bor kaynaklarına sahip ülkemiz için son derece stratejik bir malzeme olarak göze çarpmaktadır.

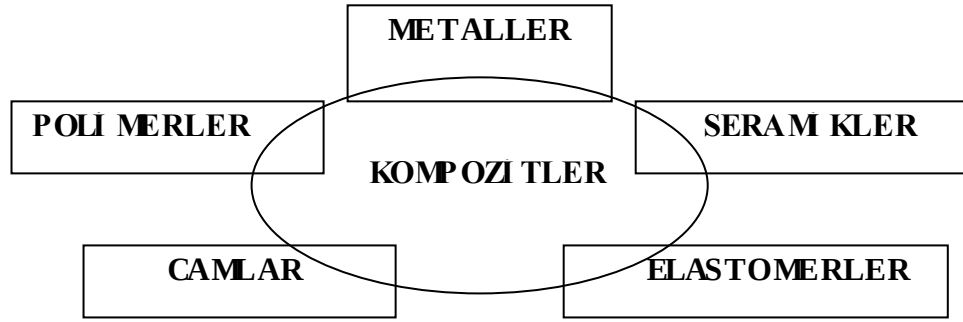
Toz metalurjisi, üretim parametrelerinin kolay kontrol edilebilir olması ve düşük operasyon masrafları sayesinde metal matrisli kompozitlerin üretim metotları içinde oldukça geniş yer bulan bir yöntemdir. Bu yöntemde, metaliktöz ve/veya alaşımlar çeşitli bağlayıcı katkılarla birlikte karıştırılarak preslenmekte ve kompakt ara ürünler elde edilmektedir. Daha sonra bu ürünler mukavemet ve yoğunluklarının arttırılması amacıyla sinterlenmeye tabi tutulmaktadır. Sinterlemeyle kullanıma hazır hale gelen bu parçalara opsiyonel bazı ilave işlemler uygulanarak mekanik ve manyetik özelliklerinin arttırılması mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada; alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi, optimum üretim parametrelerinin belirlenerek aşınma ve korozyon davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

2.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Genel Tanımı ve Özellikleri

Kompozit malzemeler, temel olarak birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla bileşimin karışımından veya birleşiminden oluşan bir malzeme sistemi olarak tanımlanmaktadır [1].



Şekil 2.1. Kompozitlerin mevcut malzeme grupları içerisindeki yeri [2].

Kompozitler, Şekil 2.1’de de görüldüğü üzere tüm malzeme gruplarıyla az veya çok bir ilişkisi olan günümüz şartlarının gelişmiş malzemeleridir. Metal matrisli kompozitler ise son 20 yıl içerisinde kendisine ileri teknolojik uygulamalarda hızla artan bir biçimde yer bulan yeni bir kompozit sınıfı olup, matrisi metalik esaslı saf elementlerden ve/veya alaşımlardan meydana getirilen ve üstün nitelikteki çeşitli seramik takviyelerin (partikül, visker ve fiber) yapıya ilave edilmesiyle başarılı mekanik ve manyetik davranışlar gösteren malzemelerdir.

Metal matrisli kompozitlerin gelişimine destek veren başlıca etkenler uçak ve uzay endüstrisindeki iskelet yapılar olmuştur. Son zamanlarda, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde de yoğun bir biçimde kullanım alanı bulan metal matrisli kompozitlerin bu denli cazip olmalarını sağlayan itici güç, istenilen malzeme özelliklerine sahip olacak şekilde dizayn edilebilmeleri ve üretim proseslerinin buna uygun biçimde geliştirilebilir olmasıdır. Partikül ve visker takviyeli kompozitlerin standart metal işleme yöntemleriyle şekil verilebilir özelliklerde olması önemli bir

avantaj olarak görülmektedir. Yüksek direngenlik ve mukavemet gibi özellikler MMK malzemelerde elde edilmek istenen ana hedef olup, bu kompozitler üzerinde yapılan güncel araştırmalar termal genişleme katsayısını, sürtünme davranışını ve aşınma direncinin kontrol edilmesi yönünde artış göstermektedir [3].

Metallik matrisli kompozitlerin sahip oldukları üstün özellikler şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Yüksek mukavemet ve elastik modül
- 2) Düşük yoğunluk
- 3) Yüksek aşınma direnci
- 4) Termal şoka karşı direnç
- 5) Sürtünmeye karşı yüksek direnç
- 6) Üstün elektriksel ve manyetik özellikler [4].

2.2 Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Takviye Malzemeleri

Matris ve takviye elemanı arasında kimyasal ve fiziksel bir uyumluluğun olması, metalik matrisli kompozitlerde bulunması gereken en önemli özelliklerin başında gelmektedir. Bu uyumluluğun sağlanması amacıyla, matris malzemeleri genellikle alaşımlı metallerden seçilmekte ve böylece takviye fazla matris arasında ıslatabilirliğin artırılması ve güçlü bir arayüzey bağ kuvvetinin oluşturulması hedeflenmektedir. MMK malzemeler üzerinde yapılan araştırmalarda, matris malzemesi olarak kullanılan metaller arasında alüminyum ve alaşımlarının, sahip olduğu düşük maliyet ve yoğunluğun yanı sıra birçok takviye elemanı ile oluşturduğu başarılı ıslanma sebebiyle oldukça cazip malzemeler olduğu sonucuna varılmıştır. Alüminyumdan farklı olarak bakır, silisyum, magnezyum, titanyum, demir, zirkonyum ve çinko gibi elementler ve bunların alaşımları da MMK malzemelerde matris olarak yoğun şekilde kullanılmaktadır [5].

MMK malzemelerde takviye elemanları, kimyasal içerikleri göz önünde tutulduğunda karbürlü, oksitli, nitrürlü olmak üzere üç ana grupta, şekilsel özellikler göz önünde tutulduğunda ise partikül, visker, fiber ve metalik takviyesi olarak 4 ana grupta toplanmaktadır. Şekilsel farklılığa göre yapılan sınıflandırma içinde partikül takviyeli MMK malzemeler takviye elemanı yönünden en düşük maliyete sahip olup yüksek hacimde takviye ilavesine imkan sağlamaktadır. Partikül takviyeli kompozitler özellikle toz metalurjisi ve döküm yöntemleri kullanılarak yapılan

kompozit üretimlerinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Tablo 2.1’de alüminyum matrisli kompozitlere ait mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 2.1. Alüminyum matrisli kompozitlerde mekanik özellikler [6, 7, 8].

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

Partikül takviyeleri arasında sahip olduğu düşük yoğunluk ($d = 2,5$), yüksek sertlik (3700 HV), termal kararlılık ve kimyasal inertliği sebebiyle bor karbür, alüminyum esaslı kompozitler için elverişli bir takviye malzemesi olmaktadır. Diğer aşındırıcı tozlara (Al₂O₃, SiC) kıyasla B₄C’nin yüksek maliyete sahip olması B₄C takviyeli MMK malzemeler üzerinde yapılan araştırmaları kısıtlamıştır [9, 10].

Viskerler takviyeleri ise yüksek uzunluk/çap oranına sahip tek kristalli malzemelerdir. Ekstrüzyon, dövme ve sac formlarında kullanılan visker takviyeli kompozitler, izotropik ve anizotropik özellikler gösterebilmektedirler. Tablo 2.2’de MMK malzemelerde kullanılan takviyeler ve boyutları listelenmiştir.

Tablo 2.2 MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları ve boyutları [11].

Takviye	Partikül Boyutu (μm)
Al_2O_3	3 – 200
Si C - partikül	6 – 120
Si C – visker	5 – 10
Grafit lamel	20 – 60
Zirkon	40
Silis kumu	75 – 120
Zirkonya	5 – 80
Ti C	46
Magnezyum	40
Bor nitrit - partikül	46
M ka	40 – 180
B ₄ C	50 – 80

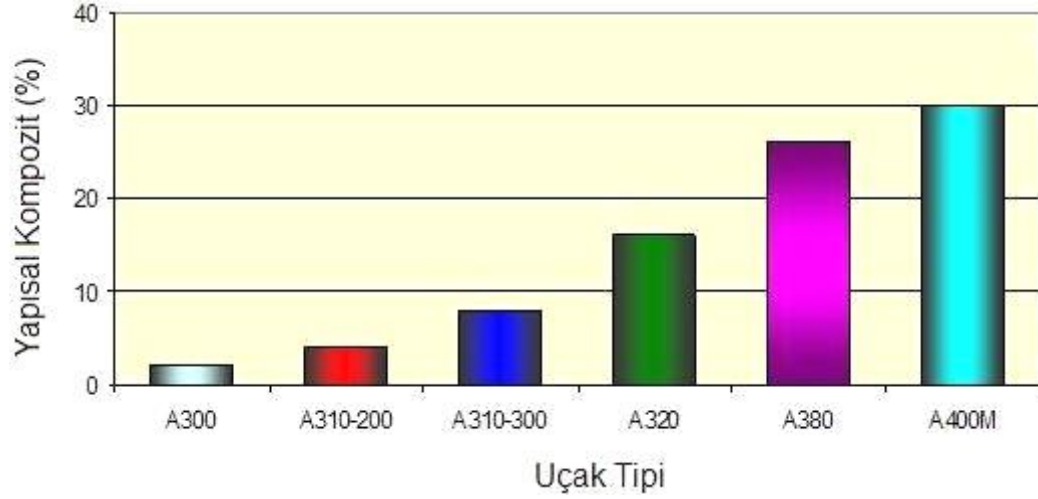
MMK malzemelerde her geçen gün daha geniş bir kullanım alanı bulan fiber takviyeler, genellikle sürekli ve süreksiz olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadır. MMK malzemelere anizotropik özellikler kazandıran, yüksek elastik modüle ve üretim maliyetine sahip olan fiberlerin ana görevi, malzemelerin yüke ve darbeye maruz kaldığı uygulamalarda matris üzerinde oluşan gerilmeleri homojen olarak dağıtarak plastik bir deformasyonun oluşmasını engellemek ve kompozitlerin yapısal olarak kararlı kalmasını sağlamaktır.

2.3 Metal Matrisli Kompozitlerin Endüstriyel Uygulamaları

2.3.1 Havacılık ve Uçay Endüstrisi

Hafiflik, statik ve dinamik yüklere karşı yapısal bütünlüğün korunması amacıyla yüksek mukavemet, korozyon direnci ve termal kararlılık uçak-uzay sanayinde kullanılan kompozitlerde arzu edilen en önemli mekanik özelliklerdir. Havacılık sektöründe kullanılan jet yakıtının yüksek maliyete sahip olması ve ağırlıkta meydana gelen her türlü artışın yakıt tüketimini de beraberinde artırması, yapısal parçaların seçiminde hafiflik kavramını daha önemli kılmaktadır. Bundan dolayı özellikle uçakların gövde iskelet ve kanat omurga sisteminde kullanılan yapısal parçalarda (frame, stringer, rib, clad), sahip olduğu düşük yoğunluk, korozyona karşı kararlılık ve çeşitli takviye elemanları ve ısıt işlemlerle birlikte spesifik

mukave metinde yapılan iyileştir neler neticesinde alüminyum esaslı kompozitler uçak sektöründe yoğun bir biçimde kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de uçaklarda kullanılan yapısal kompozitlerin kullanı moranı verilmiştir. Uçak ve uzay araçlarında kullanılan MMK malzemeler, fiber üreti mteknolojilerinin de geliş i myle birlikte birçok nitelikli mekanik özelli ğ i bir arada toplamış ve uygulama alanı genişletmiştir. (Tablo 2.3.)

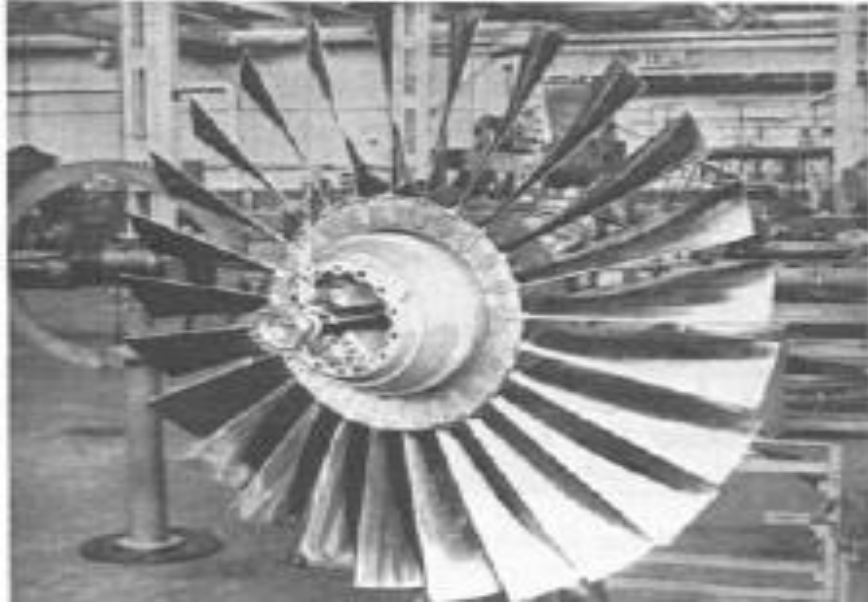


Şekil 2.2 Yapısal kompozitlerin Airbus uçaklarında kullanı moranı [12].

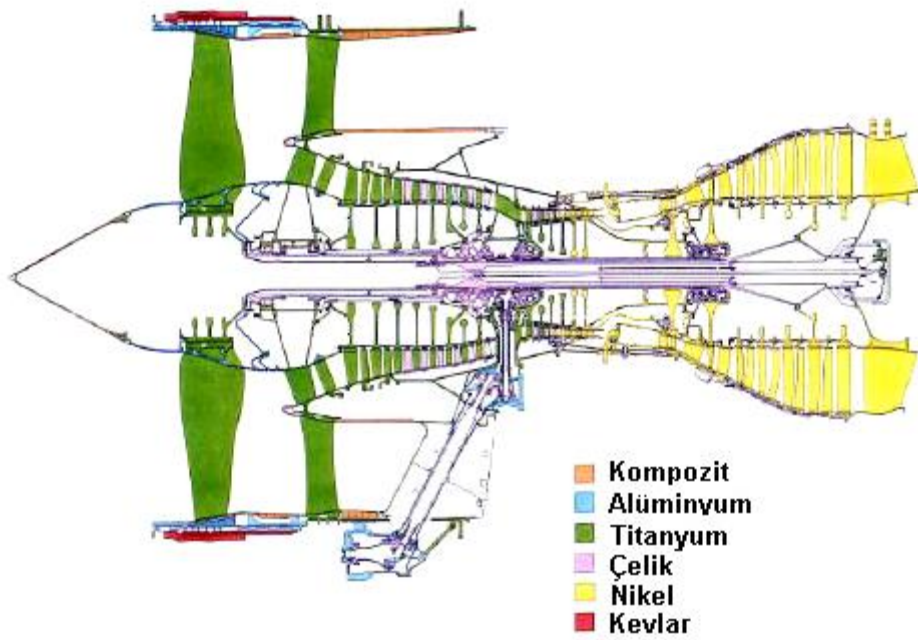
Tablo 2.3 Havacılık endüstrisinde kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri [13].

Ko mpozit	Kullanı m Alanı	Avantajları
Al - Si C parti kül	Uçak omur ga ve iskeleti (frane, stringer, rib)	Aşınma direnci
Al - karbon fi ber	Uçak mot orları	Termal karlılık Sür ünme ye karşı direnç
Mg - Al ₂ O ₃ fi ber	Uçak mot orları	Termal karlılık Sür ünme ye karşı direnç
Al - Ti/ Be şerit	Helikopter pervane şaftı	Mukave met
Ti - Al/ karbon fi ber	Roket mot orları	Termal karlılık
Ti/ Mo fi berler	Ses üst ü uçak roketi fırlatıcısı	Yüksek servis sıcaklı ğ ı
Al - Ti - V bor fi ber	Tür bin kanatları	Yüksek mukave met Sür ünme direnci
Ti - Al/ Si C	Turbojet mot or aksa nları	Yüksek mukave met Sür ünme direnci

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’de havacılık sektöründe uygulama alanı bulan metalik kompozitlerin kullanıld ı ğ ı uçak mot or aksa nları verilmiştir.



Şekil 2.3 Ti - 6Al - 4V kompoziti nden yapılmış motor pervanesi [14].



Şekil 2.4 Motor türbününde kullanılan metalik kompozitler [15].

2.3.2 Otomotiv Endüstrisi

Havacılık ve uzay sanayiinde olduğu gibi otomotiv endüstrisinde de hafiflik ve aşınma direnci, ön planda tutulan özelliklerin başında gelmektedir. Yapılan araştırmalar, hafif ve nitelik malzeme seçimiyle araçlarda kg başına 2 dolar tasarruf yapılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Ayrıca motor bloğunda oluşan

titreşimlere ve aşınmalara karşı matrisin alüminyum olduğu kompozitler kullanılmakta ve böylece ve hareketli aksamların kullanım ömrü arttırılmaktadır [4]. Tablo 2.4’de otomotiv endüstrisinde kullanılan metal matrisli kompozitler ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.4 Otomotiv endüstrisinde kullanılan MMK malzemeler ve özellikleri [16].

Kompozit	Uygulanmalar	Avantajlar
Al - SiC partikül	Piston, fren balatası, şaftlar	Hafiflik, aşınma direnci
Al - SiC whisker	Bağlantı rotaları	Yüksek spesifik mukavemet ve direngenlik, düşük genleşme
Mg - SiC partikül	Makaralar, motor bloğu	Aşınma direnci ve termal direnç
Al - Al ₂ O ₃ kısa fiber	Piston hal kası, yanma odası	Aşınma direnci, yüksek servis sıcaklığı
Al - Al ₂ O ₃ uzun fiber	Bağlantı rotaları	Yüksek spesifik mukavemet ve direngenlik, düşük genleşme
Cu - grafit	Elektrik malzemeleri	Düşük sürtünme ve aşınma, düşük genleşme katsayısı
Al - TiC	Silindir, rulman	Düşük aşınma ve hafiflik
Al - Al ₂ O ₃ - C fiber	Motor bloğu	Hafiflik, yüksek mukavemet ve aşınma direnci

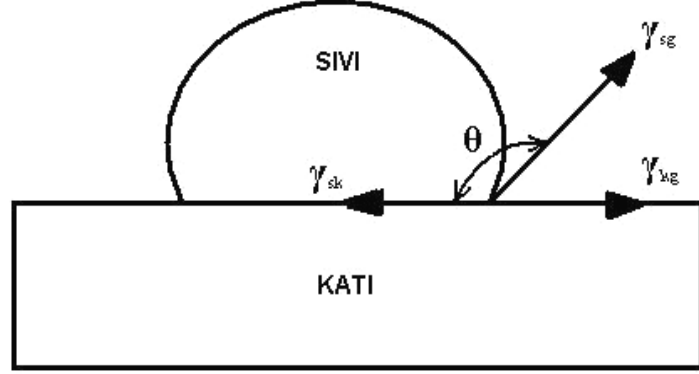
2.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozitlerin ticari amaçlı üretilmesini kısıtlayan faktörlerin oldukça fazla olması sebebiyle, gelişmiş mekanik özelliklerin kaybedilmeden ekonomik kazandırılması amacıyla birçok üretim metodu geliştirilmekte ve MMK malzemelerin üretim maliyetlerini en aza indirmenin yolları araştırılmaktadır. Bu amaçla yapılan çalışmalarındaki öncelikli hedef matris içine yapılan takviyelerin homojen olarak dağılımlarını sağlamak olmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin üretilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerin başlıcaları bir sıvı faz üretim metodu olan döküm tekniği ve bir katı faz üretim metodu olan toz metalurjisi olarak sınıflandırılmaktadır [17,18].

2.4.1 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Kompozit üretiminin sıvı fazda gerçekleştiği ve metalik matris ile takviye elemanları arasındaki ıslatmanın ve bağlanmanın ön plana çıktığı yöntemlerdir. İyi bir

bağlanmanın gerçekleşmesi için sıvı ve katı malzeme arasındaki ara yüzey geriliminin, sıvının yüzey geriliminden mümkün olduğunca büyük olması gerekmektedir [1].



Şekil 2.5 Sıvı damlacık metoduna göre ıslanma mekanizmasının şematik gösterimi [1].

Ara yüzey kuvvetlerini şematize eden Şekil 2.5’de de görüldüğü üzere başarılı bir ıslanmanın gerçekleşebilmesi için temas açısının (θ) sıfır olması gerekmektedir. Temas açısının 180 derece olması durumunda ise ıslanma gerçekleşmemektedir.

Islatılabilirliğin artırılması için yapılabilecek temel işlemler şu şekilde sıralanabilir;

- Katının yüzey enerjisini arttırmak
- Katı – sıvı yüzey enerjisini düşürmek
- Sıvı – metal yüzey gerilimini düşürmek

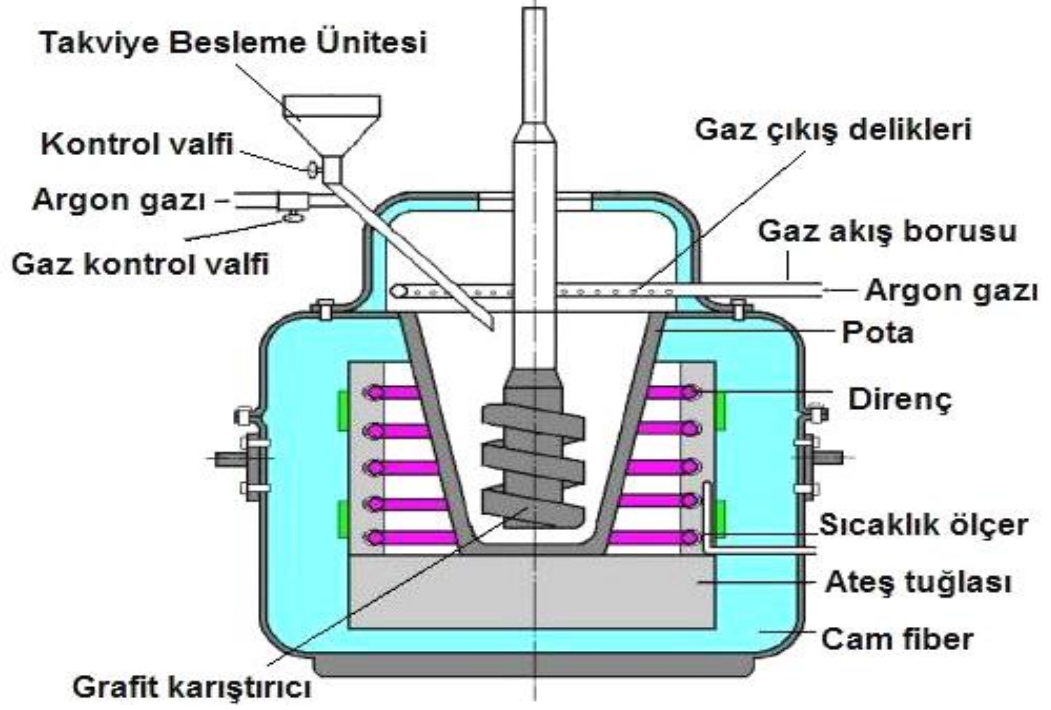
Pratikte bu iyileştirmeler seramik partiküllere metalik kaplama uygulayarak, reaktif elementlerle metalik matrisi alaşımlandırarak ve seramik partiküle ısıtma işlemi uygulayarak mümkündür [1].

Sıvı fazla metal matrisli kompozit üretiminde kullanılan başlıca yöntemler; sıvı metal içine seramik esaslı partikülleri karıştırma (vorteks veya stir), sıkıştırma dökümü (squeeze cast), basınçlı ve basınçsız infiltrasyon yöntemleridir.

2.4.1.1. Sıvı Metal – Seramik Partikül Karışımı

Sıvı metal içerisine ilave edilen seramik takviyelerin homojen bir biçimde karışımını sağlamak ve ıslatılmayan seramik fazı sıvı içerisine ilave etmek için dış kuvvetin uygulandığı bu yöntemde mekanik olarak karışım sağlayan bir karıştırıcı ve sıvı metalini içinde bulunduğu potayı çevreleyen bir fırın bulunmaktadır (Şekil 2.6).

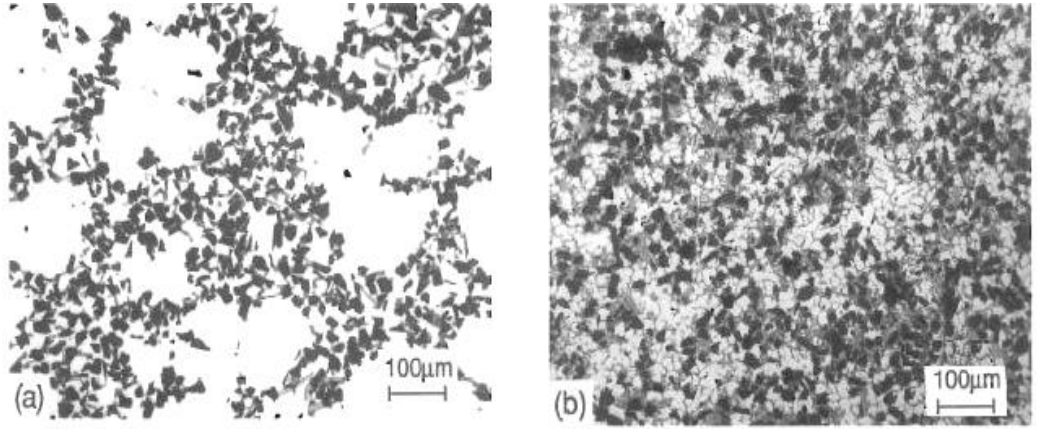
Düşeyle yaklaşık olarak 35 derecelik açı (düzeneginin yapısına göre 90 derece de olabilir) yapacak şekilde sabitlenen karıştırıcı pervane, pota içerisindeki sıvı metal içerisine daldırılır ve yeterli bir girdap akımının oluşması sağlanır. Vorteks oluşturmak olarak da isimlendirilen bu yöntemde, önceden hazırlanmış olan takviye malzemeleri oluşturulan bu girdabı içine kontrollü olarak ve belirli bir besleme hızında katılır. Takviye malzemelerinin ilavesinin tanımlanmasının ardından karıştırma işlemine homojen bir yapı elde edilinceye kadar devam edilir [4, 19].



Şekil 2.6 Vorteks metoduyla MMK üretiminin şematik gösterimi [19].

Vorteks yöntemiyle kompozit üretimine etki eden iç ve dış parametreler şu ana başlıklar altında toplanabilir.

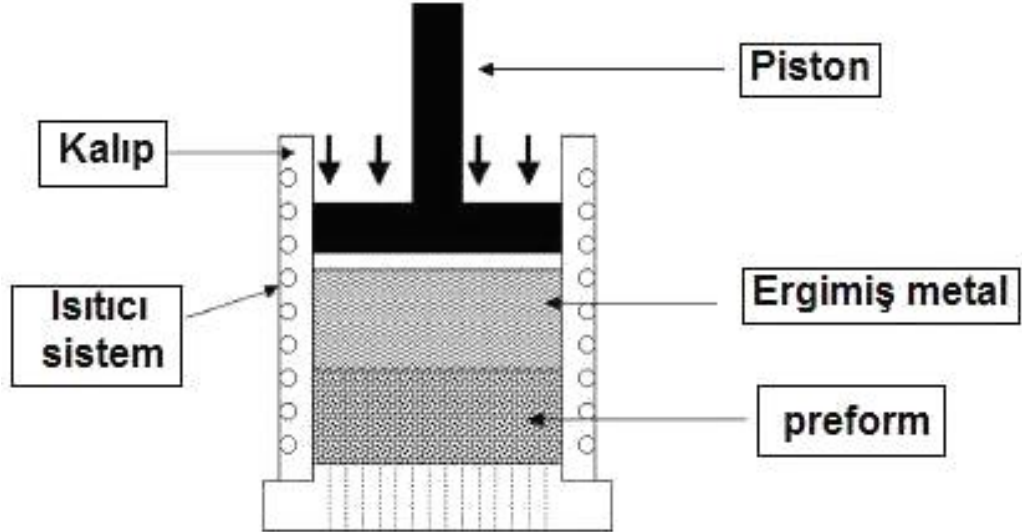
- Sıvı metalin sıcaklığı ve soğuma hızı
- Karıştırma hızı ve süresi
- Matris ve takviye malzemelerin yoğunlukları
- Takviye partiküllerin boyutu ve miktarı
- Kalıp malzemesinin türü ve kalıp sıcaklığı



Şekil 2.7. Ağırlıkça %7 Si C partikülü içeren; a) geleneksel döküm b) sıkıştırma dökümü yöntemiyle üretilmiş alüminyum matrisli kompozitin mikroyapısı [17].

2.4.1.2 Sıkıştırma Dökümü

Sıvı alaşıma ve takviye olarak kullanılan preform yapının birbiri içine emdirilmesi esasına dayanan bu yöntemde, sıvı alaşımın katılaşmasını engellemek için kalıp, preform ve zımba önceden ısıtılarak sistemde termal bir denge sağlanır. Kalıp ön ısıtma sıcaklığı ve uygulanan basınç, üretim kalitesini etkileyen önemli faktörlerdir [20, 21].



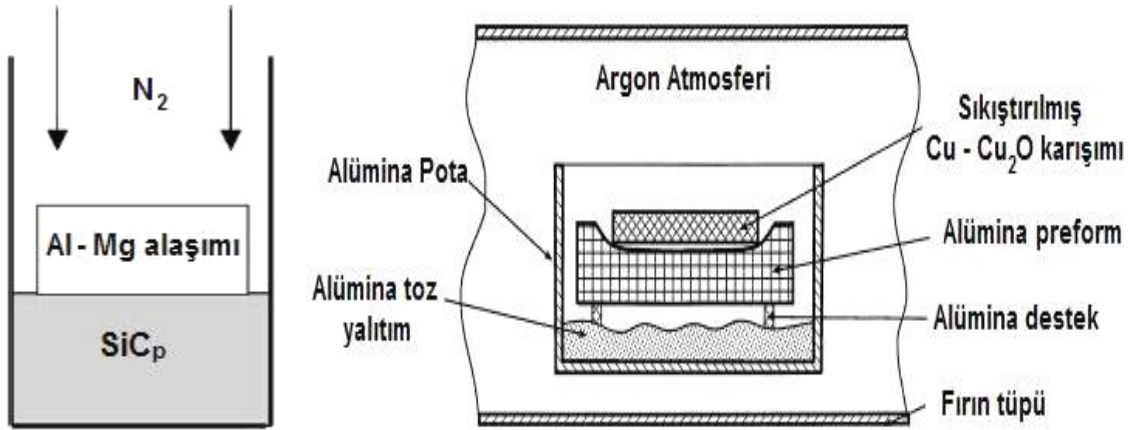
Şekil 2.8 Sıkıştırma dökümü yöntemiyle kompozit üretiminin şematik gösterimi [19].

Partikül veya fiberlerin paketlenmesinden oluşan preform metal, Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, kalıp içine yerleştirilmekte ve kalıp içine doldurulan sıvı alaşıma hidrolik bir presin uyguladığı basınç (50-100 MPa) yardımıyla preforma infiltrate edilerek kompozit katılaştırılmaktadır. Penetrasyon hızı ve partiküller arasında oluşan boşluklar kompozitlerin kalitesini etkileyen faktörlerdir. Fiber takviyeli

kompozitlerde, pistonun hızlı hareket etmesi preforun hasar görmesine neden olmaktadır. Bu sebeple optimum bir sıkıştırma basıncına ihtiyaç duyulmaktadır [4].

2.4.1.3 Basıncsız ve Basınclı İnfiltrasyon Yöntemleri

Basıncsız infiltrasyon yöntemi, çeşitli kalıplama yöntemleriyle preslenmiş prefor yapı içerisine herhangi bir karışım veya alaşımın azot ortamında infiltre edilmesi esasına dayanan ve Lanxide yöntemi olarak da bilinen bir prosestir. (Şekil.2.9)



Şekil 2.9. Basıncsız infiltrasyon yöntemiyle a) Al-Mg alaşımı infiltrasyonu b) Cu-Cu₂O karışımı infiltrasyonuna ait kompozit üretiminin şematik gösterimi [22, 23].

850-1000 °C aralığında gerçekleştirilen basıncsız infiltrasyonla, hacimce %60 Al₂O₃ veya SiC içeren karışık şekilli ve yüksek yoğunluğa sahip kompozitlerin üretilebilmesi mümkündür. Bu yöntem kullanılarak infiltrasyonu sağlayan bir Al-Mg alaşımının sebep olduğu reaksiyonlar şu şekilde örneklenebilir; [23, 24]

- 1) İnfiltrasyon yapılacak sıcaklığa çıkılırken Mg'nin buharlaşması ve kontrollü atmosfer sağlamak için ortama verilen azotla reaksiyona girerek nitrit bileşiği oluşturması,

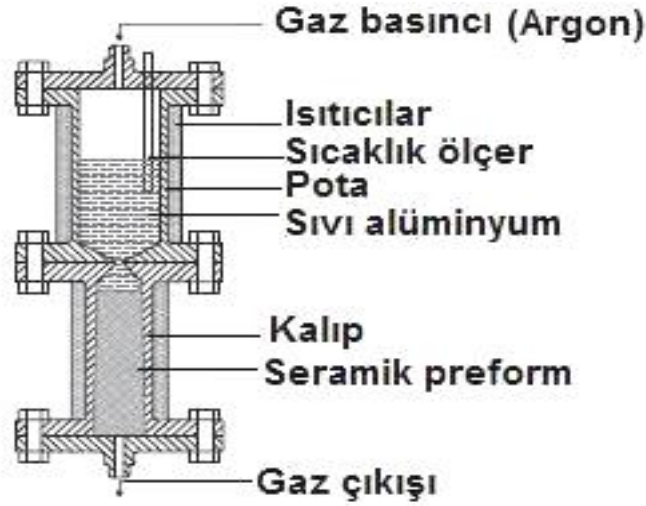


- 2) Oluşan Mg₃N₂ bileşiğinin takviye faza infiltre olması,



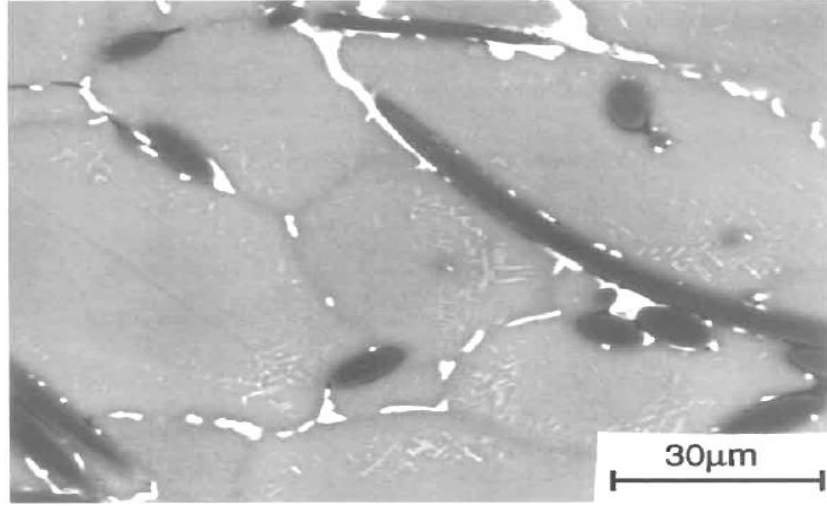
Basıncısız infiltrasyon süresince meydana gelen reaksiyonlar sırasında oluşan alüminyum nitritür, üretilen kompozitlerin sertliğini arttırmakta ve termal genleşme katsayısını düşürmektedir [4].

Şekil 2.10’da şematik gösterimi verilmiş olan basınçlı infiltrasyon yönteminde ise poroziteli kompakt bir preform içine gaz basıncı yardımıyla sıvı metal infiltrate edilerek basıncısız ortamlarda yapılan infiltrasyonda elde edilemeyen ıslatabilirliğin basınçla sağlanması ve reaktifler arasındaki bağlanmanın güçlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu yöntemle %70 oranında takviye elemanı bulunduran kompozitlerin üretilmesi mümkün olup basıncısız infiltrasyon yöntemine oranla daha hızlı sonuç alınmaktadır. Sistemin en önemli dezavantajı, dengesiz basınç uygulanması durumunda takviyenin hasara uğrayabilmesi ve bazı istenmeyen arayüzey reaksiyonlarının bağlanmayı azaltıcı etkilerde bulunmasıdır.



Şekil 2.10. Basınçlı infiltrasyon yönteminin şematik gösterimi [25].

Şekil 2.11 ‘de basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilmiş olan alüminyum matrisli Cu/saffil takviyeli kompozite ait taramalı elektron mikroskop görüntüsü verilmiştir. Bu görüntü kullanılarak kompozit üzerinde yapılan incelemede, basınçlı infiltrasyonun etkisiyle bakırca zengini beyaz renkli bölgelerin siyah renkte görülen fiberlerin etrafında ve tane sınırlarında olduğu sonucuna varılmıştır [17].



Şekil 2.11. Basıncılı infiltrasyon yöntemiyle üretilen ağırlıkça %4,5 Cu/saffil takviyeli alüminyum matrisli kompozite ait SEMgörüntüsü [17].

2.4.2. Katı Faz Üretim Yöntemleri

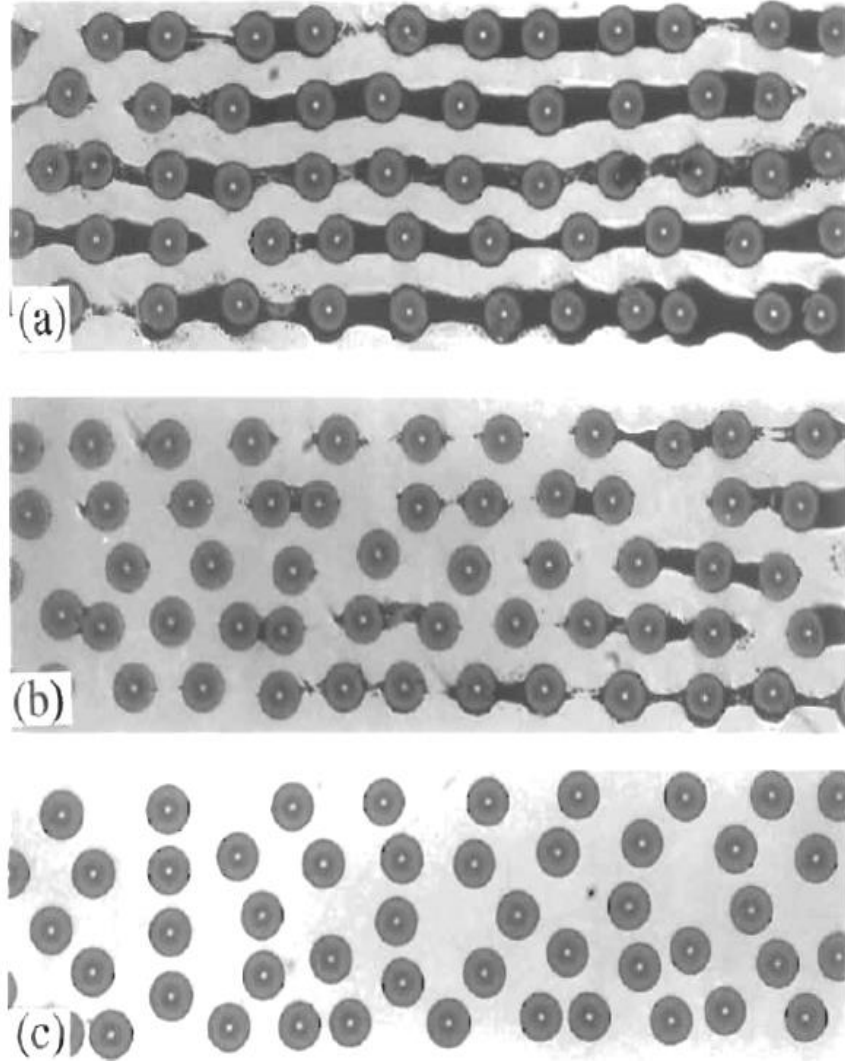
2.4.2.1. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, ana matris ve takviye malzemelerinin (metal ve/veya alaşımlar) uygun bir şekilde karıştırılması, elde edilen karışımın isteğe bağlı olarak soğuk veya sıcak preslemeye tabi tutulması, preslenmiş parçaların mukavemet özelliklerini arttırmak için sinterlenmesi esasına dayanır. Toz metalurjisiyle üretilen parçalarda sinterlemeyle % 80 civarında yoğunluk artışı sağlanmaktadır. Sinterleme sonrası parçalar ikincil işlemler (opsiyonel) olarak adlandırılan bazı uygulamalara (Çizgi derme, yağ emdirme, ilave presleme, haddelendirme, ekstrüzyon) tabi tutularak nihai şekline getirilir [24, 26].

Toz metalurjisi, metal işleme teknolojileri arasında çok büyük farklılık gösteren bir üretim tekniğidir. Tarihsel gelişimi incelendiğinde, ilk toz metalurjisi çalışmalarının kimyasal olarak elde edilmiş platin ve iridyum gibi yüksek sıcaklıkta eriyen malzemeler üzerinde yapıldığı tespit edilmiştir. Rusya’da 1826 yılında kullanılan platin para, toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur. TMMOB teknikleri, başlangıç malzemelerinin üretim süreci içerisinde yüksek oranda kullanılabilirliğe ve verimlilikle sahip olması, enerji tasarrufu, düşük anizotropi, otomasyonun kolay olması, yüksek hassasiyet ve kalitede karmaşık şekilli parça üretimine elverişli olması gibi özellikleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında geniş yer bulmaktadır [27].

2.4.2.2 Difüzyonla Bağlama

Met al ve alaşı m pl aka yapıları arasında takvi ye fila nentleri (Şekil 2.12) kullanılarak uygul anan bu yönt emde, met al ve takvi yeni n yapış ma yüzeylerine yapılan polisajın sonrasında Si C ve Al aset on iç erisinde ultrasonik temizlenir. Ergi ne sıcaklı ğ ının altında 50 MPa basınçta 2 saat bekle ne ve daha sonra fırında soğ ut ma ile iş lem gerç ekleş tiril mekt edir [4].



Şekil 2.12 Hacı ne % 30 Si C fila nent iç eren bir Ti-6Al-4V kompoziti nin 870° C de 20 MPa basınç altında; a) 1 dk b) 8 dk c) 40 dk süreyle sıcak preslenmesi yle el de edil en optik mikroskop gör ü nt ü leri [17].

3. TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE METAL MATRİSLİ KOMPZİTLERİN ÜRETİMESİ

Toz metalurjisi; farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarının sağlam hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülmesi işlemler bütünüdür. T/Myöntemi, tozların preslenmesi ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıtılması basamaklarını içermektedir. T/Myönteminin kullanılmasıyla diğer üretim teknolojilerine oranla hızla artmasına sebep olan etkenlerin başında üretim parametrelerinin nispeten daha düşük enerji tüketimine neden olması, reaktif malzemelerin yüksek oranda kullanılabilirliği ve düşük operasyon maliyetleridir. Sahip olunan bu özellikler ile T/M verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırmaktadır. Bunların sonucu olarak T/M konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme proseslerinin yerini almaktadır [28].

T/M ergime sıcaklığı yüksek olan metallerinde kolaylıkla şekillendirilebildiği bir yöntemdir. Döküm gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmaya gibi birçok problem T/M yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir. Parça üretim yöntemi olmasının yanı sıra T/M aynı zamanda önemli bir malzeme ve yarı hamul üretim yöntemidir. Periyodik cetvelde metal olarak kabul edilebilen 86 kadar elementten yaklaşık 8000 kadar alaşım üretilebilir. Halbuki bu 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü gibi farklı kombinasyonlarla 1025 mertebelerinde alaşımlanabilir mümkün olabilmekte ve bunu mümkün kılabilen yegane yöntem olarak T/M ortaya çıkmaktadır.

T/M kompozit malzeme üretiminde de fazlasıyla kullanılan yöntemlerden biri olup bu yolla alışlagelmiş malzemelerden daha farklı ve üstün özelliklerde malzeme üretmek mümkün olmaktadır. Bu avantajlarının yanında, T/M ile üretilmiş parçaların boyut ve ağırlığının bazı durumlarda sınırlı olması, bazı olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir [29].

3.1. Toz Metalurjisinde Parça Üretim Kademeleri

3.1.1. Metalik Tozların ve/veya Alaşımların Karıştırılması

Metalik toz bileşimlerinin birbiri içerisinde homojen bir dağılım oluşturacak şekilde karıştırılması evresi, toz metalurjisiyle parça üretiminde başlangıç kademesini oluşturmaktadır. Bu safhada, elementel metal tozları ve/veya mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla bazı alaşımsal ilaveler, uygun karıştırıcılarda harmanlanır veya mekanik olarak alaşımlanmaya tabi tutulur. Bir sonraki işlem kademesi olan tozların preslenmesi safhasında, reaktif tozların kalıpcıdarlarına yapışmasını engellemek, tozların birbiri üzerinde daha rahat kayarak şekil almasını sağlamak ve preslenmiş parçanın kalıptan çıkışını kolaylaştırmak amacıyla uygun bir yağlayıcı (metal stearatlar, mum grafit) belirli oranlarda (%0,5-1,5) yapıya ilave edilebilir. Yapılan bu ilaveler, yoğunluğun her tarafta mümkün olduğunca aynı olmasını sağlayarak, tozların aşırı şekilde sıkışmasını ve alaşım elementlerinden dolayı sertleşmesini önlemiştir [27].

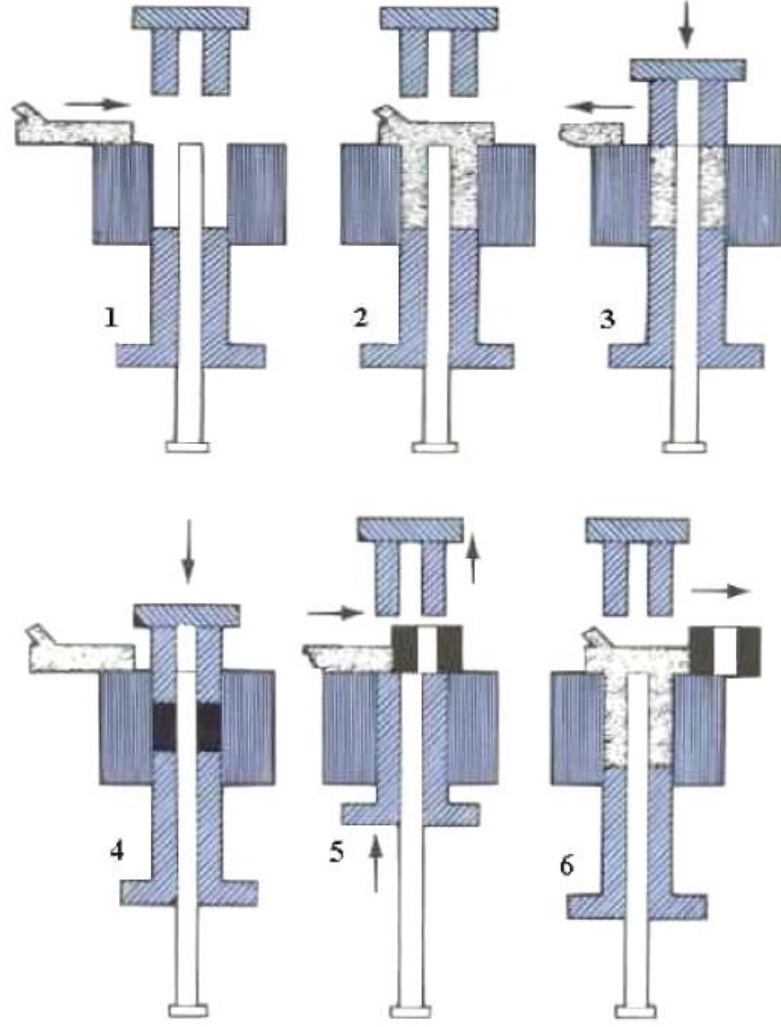
3.1.2. Tozların Preslenmesi

Presleme, üretilecek malzemenin türüne göre uygun sertlik ve aşınma direncine sahip bir kalıpta (sıkıştırma çelik veya karbür kalıp) içerisinde genellikle 300-800 MPa basınç aralığında yapılır. Tablo 3.1’de tozların preslenmesinde kullanılan basınç değerleri verilmiştir. Presleme öncesinde yapılan malzeme şarjı sırasında kalıptan taşan tozlar bir sonraki preslemede kullanılmak üzere değerlendirilir. Tek yönlü veya çift yönlü çalışan pistonlar yardımıyla gerçekleştirilen preslemede karışık şekilli parçaları tek bir proses sürecinde 25 parça/dakika hızla üretebilmek mümkündür. Şekil 3.1’de tozların sıkıştırılmasına ait işlem kademeleri şematik olarak gösterilmiştir. Presleme neticesinde kompakt hale getirilen parçalar kalıptan çıkartılarak mukavemetlerinin artırılması amacıyla sinterleme işlemine tabi tutulmaktadır. [27, 28].

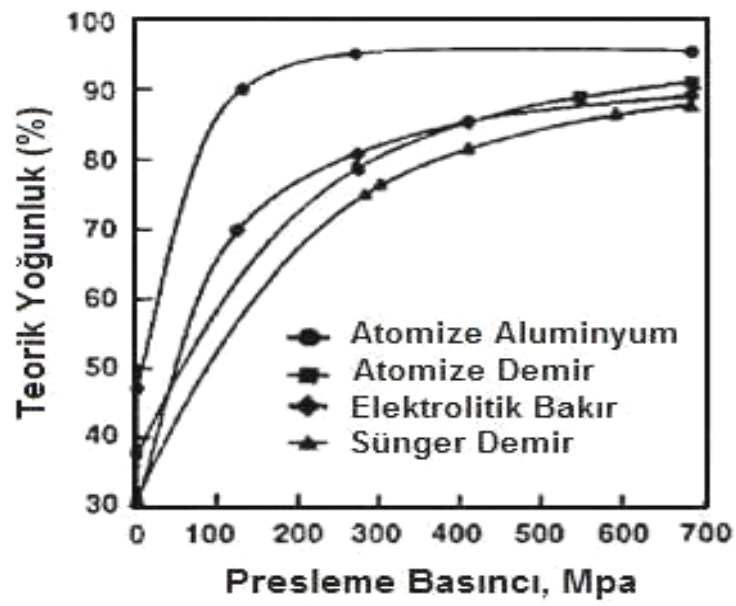
Tablo 3.1. Toz malzemeler için tipik presleme basınçları [30].

Preslenen Malzeme	Ton / inch²	Basınç (MPa)
Alüminyum	5 - 20	69 - 276
Pirinç	30 - 50	414 - 687
Bronz	15 - 20	207 - 276
Karbon	10 - 12	138 - 165
Karbürler	10 - 30	138 - 414
Alümina	8 - 10	110 - 138
Feritler	8 - 12	110 - 165
Demir (düşük yoğunluk)	25 - 30	345 - 414
Demir (orta yoğunluk)	30 - 40	414 - 552
Demir (yüksek yoğunluk)	35 - 60	483 - 827
Tungsten	5 - 10	69 - 138
Tantalum	5 - 10	69 - 138

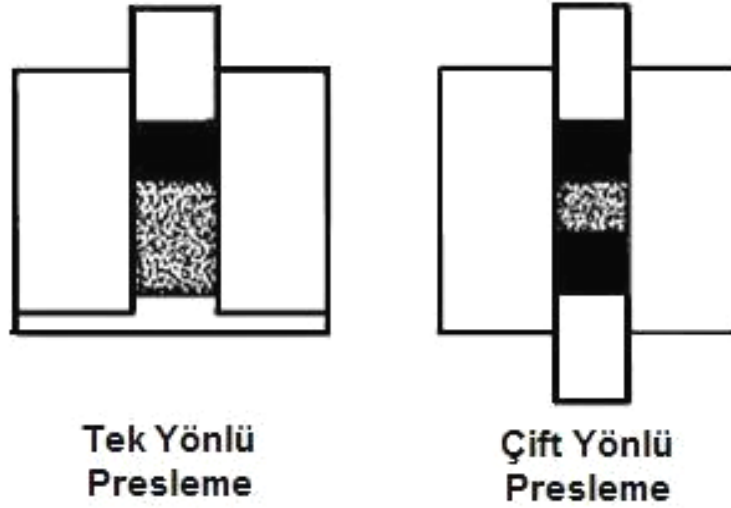
Toz malzemelerin preslenmesinde teorik özgül ağırlığa yakın yoğunlukta parça üretimi mümkün olabilmektedir (Şekil 3.2). Buna ilişkin endüstriyel bir örnek olarak, 800 MPa basınçta demir tozlarına ait 7.3 g/cm^3 teorik özgül ağırlığın yaklaşık %93'ünün sağlanabilir olması verilebilir. Şekil 3.3'de görülebileceği gibi çift yönlü preslenmenin de tek yönlü presleye oranla yoğunluk artışına pozitif bir etki de bulunduğu ve tozların homojen bir dağılımı göstermesi ne yardımcı olduğu sonucuna varılmaktadır. Alternatif bir presleme yöntemi olan sıcak sıkıştırma işleminde ise T/ M parçanın özgül ağırlığı 0.2 g/cm^3 kadar artırılabilir. Bu işlemden toz karışımı özel bir yağlayıcı ile yağlanır ve kalıp sıcaklığı $130\text{-}150^\circ \text{C}$ 'ye çıkartılarak işlem tamamlanır. Sıcak sıkıştırmanın en önemli avantajı, sinterleme öncesinde parçanın daha yüksek mukavemet ve düşük poroziteye sahip olmasından dolayı bazı talaş kaldırma işlemleri yapılarak takı mükürünü artırmasıdır [27].



Şekil 3.1. Toz metalurjisiinde tek yönlü preslemeğe ait işlemler kade nelleri [28].



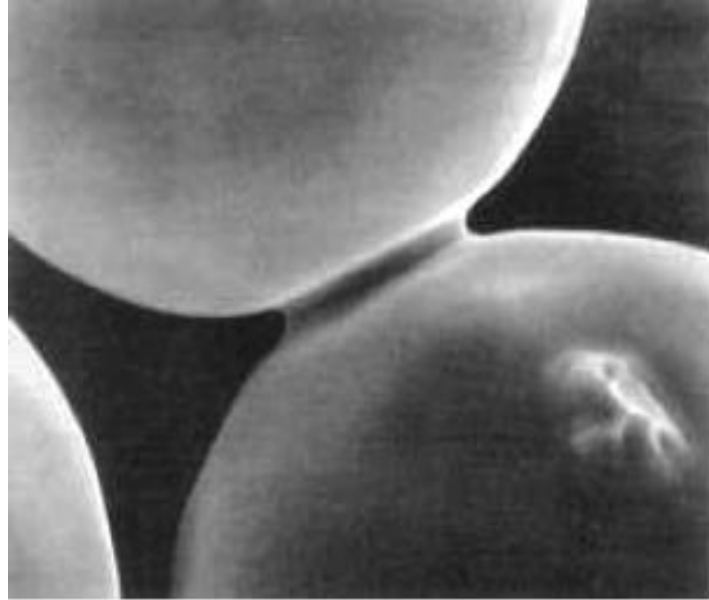
Şekil 3.2. Metal tozlarında presleme basıncının teorik yoğunluğa etkisi [30].



Şekil 3.3 Metal tozlarında tek ve çift yönlü presleme altında meydana gelen yoğunluk değişiminin şematik gösterimi [30].

3.1.3 Preslenen Kompozitlerin Sinterlenmesi

Sinterleme, toz halindeki malzemenin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta bekletilerek tozların birbirlerine değdikleri noktalardan kaynaşmasına denir. Şekil 3.4.'de sinterleme sırasında bir nikel tozunda partiküller arasında meydana gelen boyun oluşumuna ait bir mikroyapı görüntüsü verilmiştir [31].



Şekil 3.4 Nikel tozunun sinterlenmesi sırasında boyun oluşumu [31].

Toz metalurjisinde sinterleme, sıkıştırılmış parçalara mukavemet kazandıran ve poroziteyi düşürmeye yönelik yapılan bir ısıtma işlemidir. Demir esaslı alaşımlar için sinterleme sıcaklığı genellikle $1100-1150^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Sinterleme işleminin süresi

uygulamanın çeşidine göre 10 ila 60 dakika arasında değişmektedir. Tablo 3.2’de farklı malzemelere ait sinterleme sıcaklıkları ve süreleri verilmiştir [27, 29].

Toz metalurjisiyle parça üretiminde, sinterleme işlemi 3 ana kademeden meydana gelmektedir. Bunlar;

- Yağlayıcı - bağlayıcı katkının yapıdan uçurulması
- Sinterleme
- Soğutma

Toz metalurjisiyle üretilen istenen kompozit parçaların sinterlenmesinin 1. kademesinde bağlayıcı olarak yapıda görev yapan ilavelerin kontrollü olarak giderilmesi sağlanır. Sinterleme fırınının soğutma bölgesinde, parçaların hava ile temas ederek oksitlenmelerini engellenmek amacıyla oksitlenmeden koruyucu bir gaz altında soğumaları sağlanır. Sinterleme sırasında boyutta orta derecede değişim görülür. Birçok malzeme küçüldüğü halde, bakır gibi bazı alaşımlarda boyutta artış görülür. Baskı kalıbı tasarlanırken bu değişimlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir [29].

Tablo 3.2 Farklı malzemeler için sinterleme sıcaklıkları ve süreleri [29].

Malzeme	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (dk)
Bronz	815	15
Bakır	870	25
Alüminyum	600	20
Pirinç	870	20
Demir	1150	25
Nikel	1040	38
Paslanmaz çelik	1150	40
Sement karbürler	1460	90
Molibden	2050	120
Tungsten	2350	480
Tantalum	2400	480
Titanyum	1200	120

3.1.4 Sinterleme Sonrası Yapılan Modifikasyonlar

Toz metalurjisi tekniği kullanılarak üretilen kompozitlerin sinterlenmesi aşamasının ardından, mekanik özellikleri arzu edilen seviyeye çıkarmak ve parçaya nihai şeklini ve boyutunu kazandırmak için seçime bağlı bazı işlemler mümkündür. Kompozit özelliklerini modifiye eden bu işlemleri şu başlıklar altında toplanabilir.

- Yapıda oluşan porların doldurulması
- Yağ emdirme
- Tekrar presleme (ikinci deformasyon) ve/veya tekrar sinterleme
- Buhar gönderme
- Yüzey sertleştirme
- Yüzey kaplama
- Son işlemler (talaş kaldırma, çapak alma, birleştirme ve montaj, ısıtma vb.)

3.1.4.1 Yapıdaki Porların Doldurulması

Üretilen kompozit parçaların kendisini oluşturan tozların sinterleme sıcaklığından daha düşük ergime sıcaklığına sahip metal ile gözeneklerin doldurulması esasına dayanan bu işlemlerde, porozitenin azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu işlemin kısıtlayıcı olan yönü parça boyutlarında değişim görülmesidir. Bu işleme örnek olarak demir esaslı alaşımlarda genellikle sinterleme esnasında bakır kullanılarak gözeneklerin doldurulması verilebilir [27].

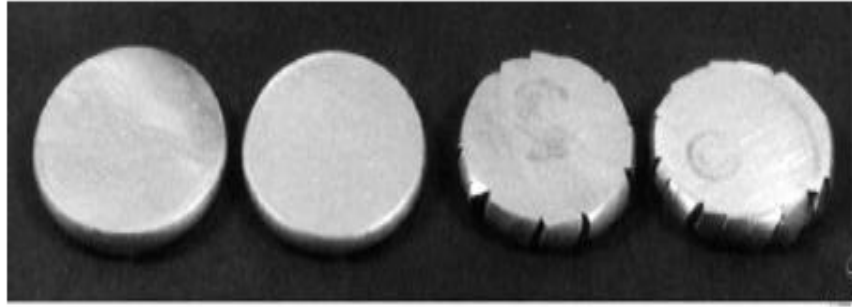
3.1.4.2 Yağ Emdirme

Sinterlenmiş parçaların korozyona karşı direncini artırabilmek için yağ veya metal oluşturan maddeler emdirilmesi yoluna gidilebilir. Kendinden yağlamalı yataklar sadece T/M metodu ile yapılabilir ve bu yataklarda porozitelerin içine yağ emdirilmek suretiyle yağlamasız yatak yapımı gerçekleştirilir [27].

3.1.4.3 İlave Presleme (İkinci Deformasyon)

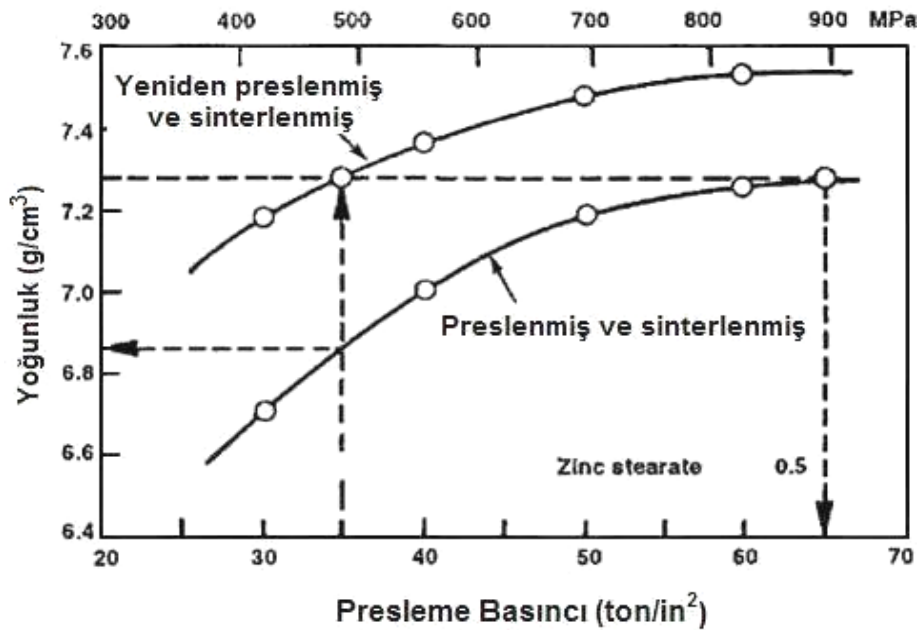
Boyut hassasiyetini, parça yoğunluğunu ve yüzey kalitesini arttırmak, mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla sinterleme sonrası uygulanan ilave bir işlemdir. Üretim sırasında toz bileşimlerinin sıkıştırılarak kompakt hale getirilmesinden sonra uygulanan ilave bir sıkıştırma işlemi olduğu için literatürde ikinci deformasyon

olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 3.5’de ikinci deforasyona uğratılmış alüminyum matrisli kompozitlere ait görüntüler sunulmaktadır.



Şekil 3.5 150 °C’de deforasyon uygulanmış; a) Al b) Al - %1,5 Al_2O_3 c) Al - %1,5 Al_2O_3 - %4 Al_4C_3 d) Al - %1,5 Al_2O_3 - %12 Al_4C_3 kompozitlere ait görüntüler [32].

Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için yapılan ilave deforasyon işleminin ardından arzu edilirse parçalar tekrar sinterlemeye tabi tutulabilmektedir. Toz metalurjisiyle parça üretimi üzerine yapılan araştırmalar neticesinde, ilave deforasyon ve ilave sinterlemeyle elde edilen parçalarda teorik yoğunluğunun arttığı ve buna bağlı olarak daha nitelikli ve kaliteli son ürünün elde edildiği sonucuna varılmıştır. Şekil 3.6’da, T/Mile metal matrisli kompozit üretimi sırasında gerçekleştirilen ilave deforasyonun ve ilave sinterlemenin kompozitlerin yoğunluğu üzerinde pozitif bir etki oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 3.6 İlave deforasyon ve sinterlemenin yoğunluk değişimine etkisi [30].

3.1.4.4 Buharla İşlem

Sadece demir esaslı alaşımların bazı mekanik özelliklerini (korzyon direnci, sertliği, aşınma direnci) iyileştirmek amacıyla 550⁰ C sıcaklığa kadar parçaların ısıtılması ve parça üzerine oksitlenme oluşturmak amacıyla su buharı gönderilmesi ve yüzeyde Fe₃O₄ oluşturulması işlemidir [27].

3.1.5 Son İşlemler

3.1.5.1 Talaş Kaldırma ve Çapak Alma İşlemleri

Üretilen parçalar üzerinde malzemenin servis şartlarına uygun olacak şekilde isteğe bağlı olarak delme, raybalama, diş açma, tornalama vb. gibi bazı talaşlı işlemler metotları uygulanabilmektedir. Her ne kadar T/M yöntemiyle üretilen kompozitler diğer geleneksel yöntemlerle üretilen malzemelere oranla daha hassas şekil ve boyut toleransında sahip olsalar da bu tip son işlemlere bazı durumlarda ihtiyaç duyulabilmektedir. Üretim aşamasında yapıya ilave edilen MıS gibi sinterleme sonrasında da yapıda kalabilen katkılar talaşlı işlemlerle düzümde etkilenebilir.

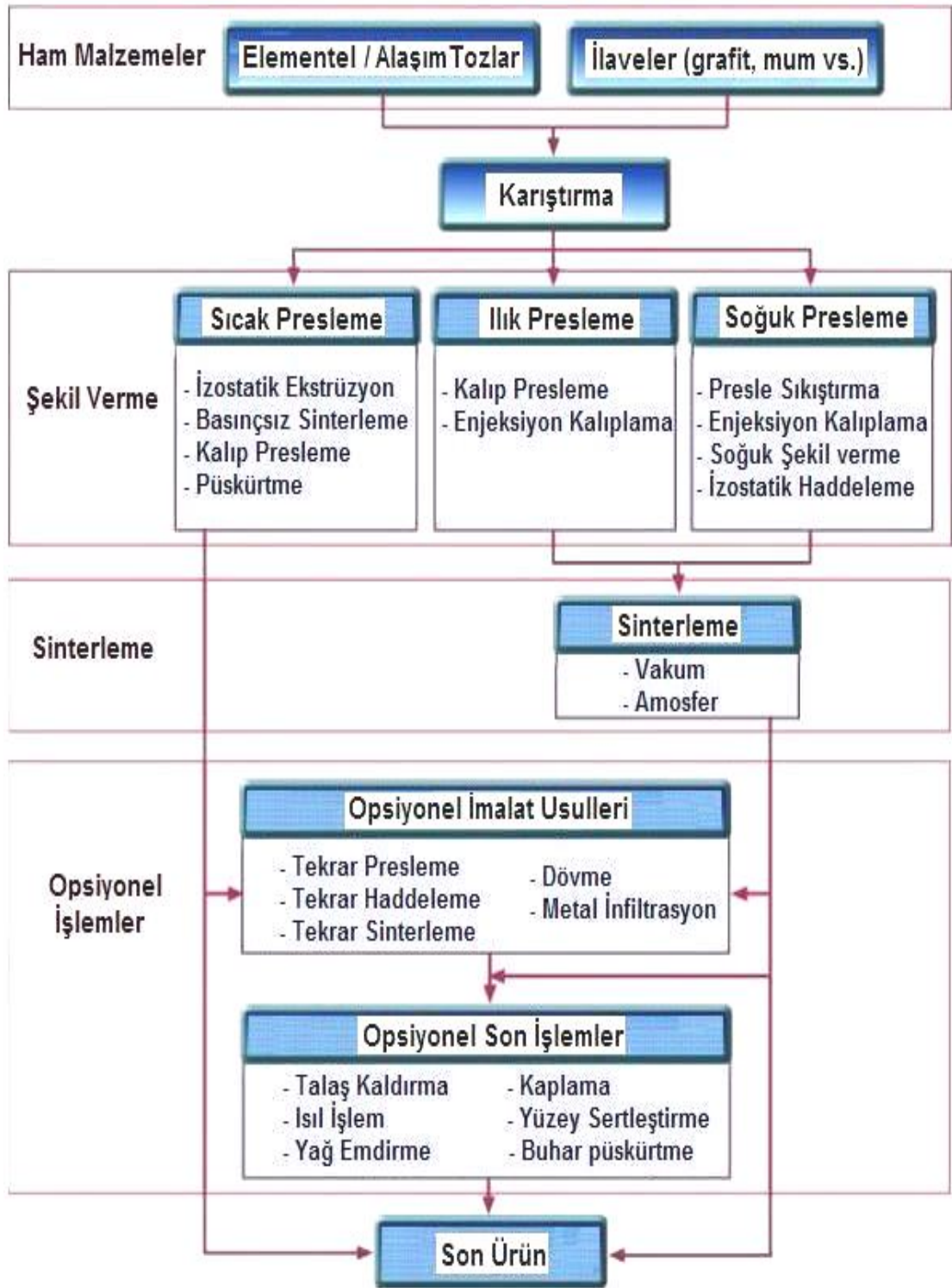
Çapak alma işlemi ise presleme sonrası parça üzerinde oluşan çapakların giderilmesi işlemidir. Bilinen en genel çapak alma uygulaması tambur içinde aşındırıcı toz kullanarak yapılan işlemlerdir [27].

3.1.5.2 Birleştirme ve Montaj

Büyük ve karmaşık şekilli parçalar birleştirilmesi amacıyla difüzyonla birleştirme, sinter braze veya laser kaynağı gibi yöntemlerin kullanıldığı işlemdir.

3.1.5.3 Isıl İşlem

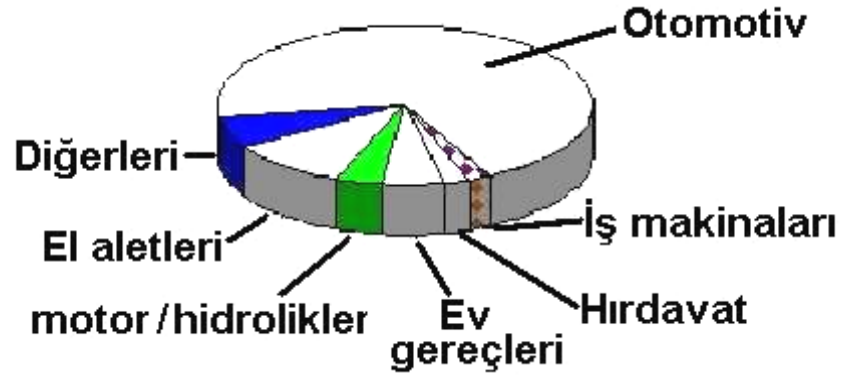
T/M ile üretilmiş parçada faz dönüşümleri parça içindeki porozite ile değil, parçayı oluşturan tozların bileşimi ve homojen olması ile ilgilidir. Bu nedenle her türlü T/M ile üretilmiş parçaya ısıtılma işlemi uygulanabilmektedir. Su verme ile sertleştirme ve temperleme işlemleri sonucu T/M parça mukavemetinde, aşınma direncinde artış olurken sünekliğinde ise azalma görülür. T/M ile üretilmiş parçalara genellikle karbürleme, karbonitrülme gibi yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır [27].



Şekil 3.7. Toz metalurjisinde kullanılan parça üretim ve modifikasyon işlemlerinin genel sınıflandırması [33].

3.2 Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen MMK Malzemelerin Avantajları ve Uygulama Alanları

Toz metalurjisi üzerine yapılan çalışmaların birçoğu alüminyum metalini içeren çalışmalar olup alüminyum alaşımlarının oldukça yoğun şekilde kullanıldığı uçak sanayisinde de T/M kendine kullanım alanı bulmaktadır. Yeni ticari uçak motorlarında 680-2000 kg/motor T/M kullanılmaktadır. T/M parçaların dünya genelindeki pazar payı Şekil 3.8’de verilmiş olup bu pazarın %75’ini otomotiv endüstrisi oluşturmaktadır. Yapılan incelemeler araç başına düşen T/M parça ağırlığının Avrupa’da 7 kg, Japonya’da 5 kg ABD’de ise 16 kg’nin üzerinde olduğunu göstermektedir [28, 34, 35].

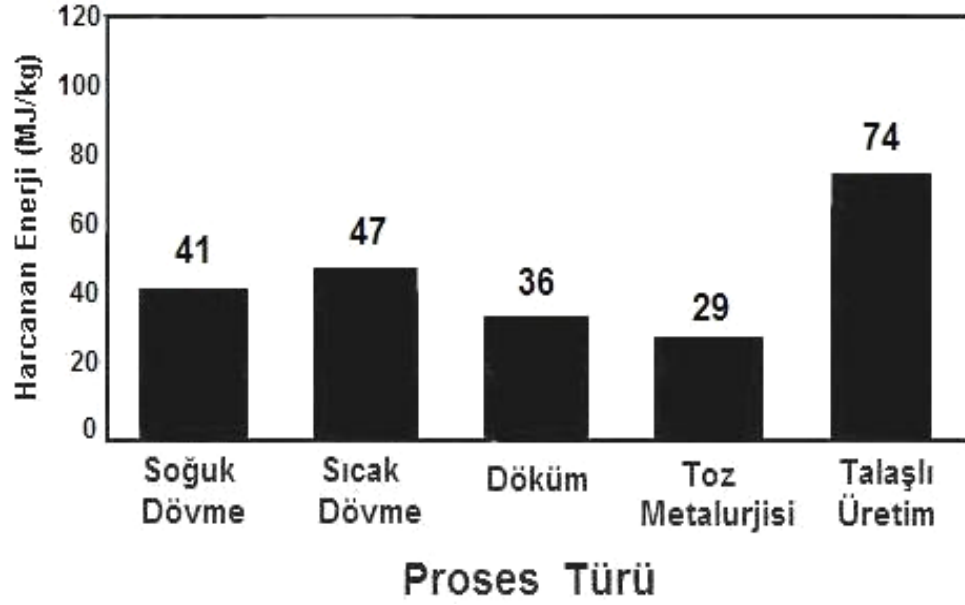


Şekil 3.8 Toz metalurjisini n dünya genelindeki pazar payı [28].

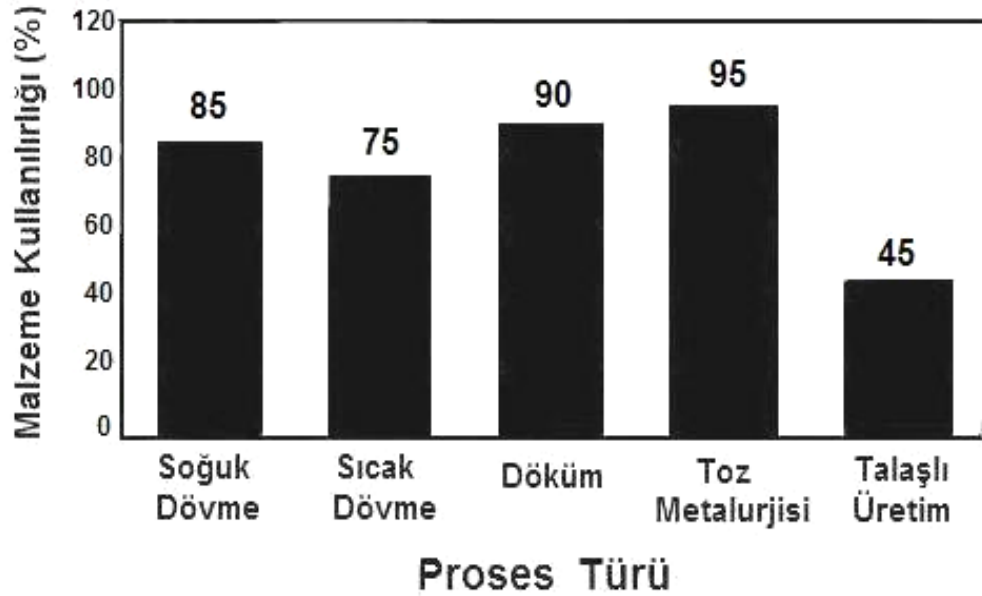
Toz metalurjisi yöntemi nin diğer üretim tekniklerine kıyasla sahip olduğu üst ünlükler şu şekilde sıralanabilir:

- Malzeme seçimin den son ürüne kadar aradaki tüm kademelerde üretim iyileştirme ye elverişli dir.
- Uygulanan işlem adımları esnek, düşük maliyetli ve çevreye zararsız yöntemler dir. (Şekil 3.10.)
- Toz metalurjisinde başlangıç aşamasında kullanılan ham maddenin yaklaşık % 95’i son üründe kendini gösterir. (Şekil 3.11)
- Parça içindeki porozitenin kontrolü kolaydır.
- İstenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde malzeme üretimi ne imkan sağlar.
- Üretim adetleri orta miktardan yüksek miktarlara kadar çıkabilir ve sınırsız şekilde parça üretimi yapılabilir.

- Son ölçülerde parça üretimi mümkün olduğu için talaş, çapak vs. gibi artıklar yoktur. İsteğe göre talaş kaldırma işlemi yapılabilir.
- Sinterlenmiş toz metalurjisi ürünü, döküm yöntemiyle üretilenlere ve diğer tekniklere (dövme, talaşlı imalat) oranla daha iyi kalitededir.
- Yüksek hacimli malzemelerin üretimi için uygundur.
- Kritik uygulamalarda uzun dönem performans güvenilirliği sağlar [27, 35].



Şekil 3.9 Parça üretim proseslerinde harcanan enerjilerin kıyaslanması [36].



Şekil 3.10 Parça üretim proseslerinde malzemelerin kullanılabilirlik oranları [36].



Şekil 3.11. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bakır ve demir esaslı parçalar [28].

3.2.1. TMMYöntemiyle Üretilen Kompozitlerin Genel Uygulanmaları

Çokça geniş bir uygulama sahasına sahip olan toz metalurjisi ne ait tipik endüstriyel kullanım alanları olarak; tungsten lamba filamentleri, dişçilik dişli çarklar, yağlamasız yataklar, elektrik kontaktları, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makine parçaları, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balataları, akü elemanları ve jet motor parçaları örnek olarak verilebilir. Ayrıca birçok metal tozu, boyalar, gözenekli betonlar, basılmış devre levhaları, zenginleştirilmiş un, patlayıcılar, kaynak elektrotları, roket yakıtları, baskı mürekkepleri, lehimleme malzemeleri ve katalizörlerin üretilmesinde de kullanılmaktadır.

3.2.1.1 Düşük Yoğunluklu (Gözenekli) Parçalar

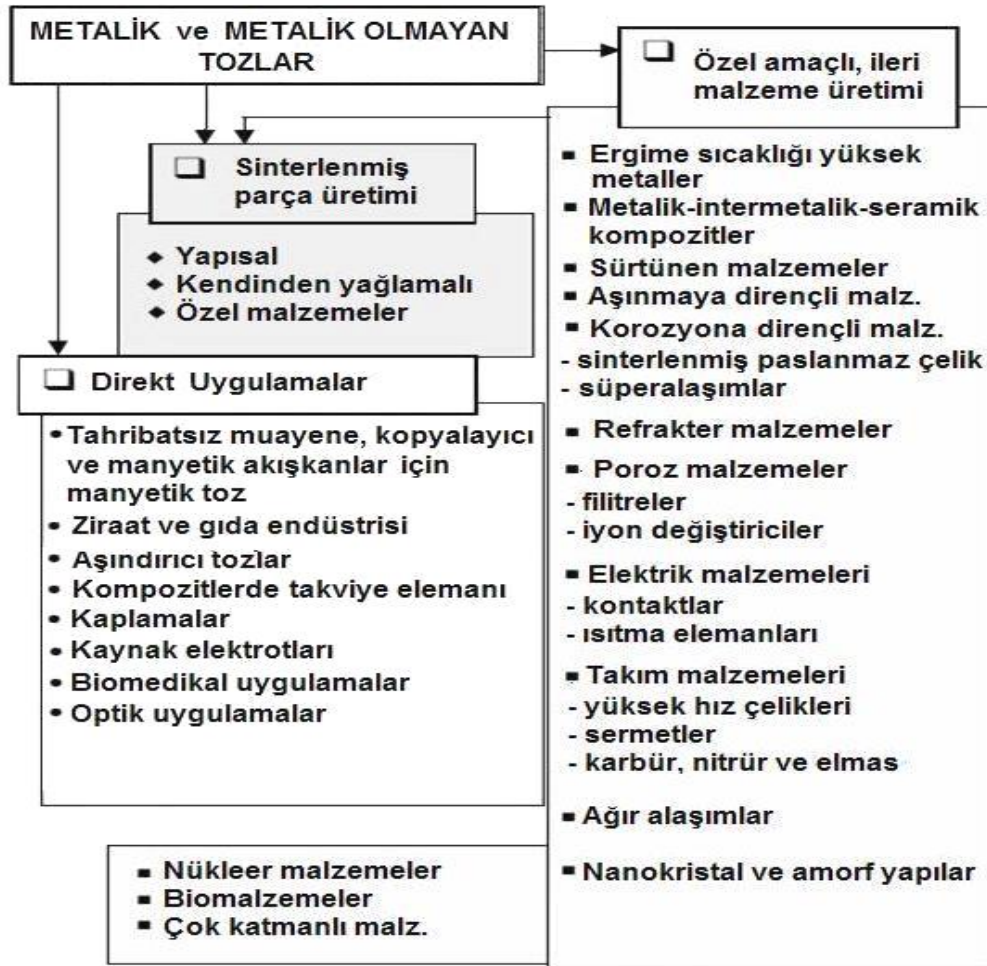
Parça gözeneklilik oranı % 40-60 arasında olup genellikle metalik filtre olarak kullanılırlar. Demir, paslanmaz çelik veya bronz esaslı imal edilebilen bu filtreler, hava, su, yağ yakıt devrelerinde kullanılır. %18-50 gözeneklilikteki parçalar ise genellikle uygun yağ emdirilerek kendinden yağlamalı yataklar olarak kullanılmaktadır [37].

3.2.1.2 Orta Yoğunluklu Parçalar

Hacminin %15-20'lik kısmı gözenek olan bu grup parçalar, yataklık özelliği isteyen orta mukavemetli parçalardır. Otomotiv amortisör pistonları, mil kılavuzları, yağ pompa rotor ve dişlileri ile benzeri makine parçaları örnek olarak gösterilebilir [37].

3.2.1.3 Yüksek Yoğunluklu Parçalar

Gözenek oranı %10'dan az olan ve mukavemeti önemli olan parçalardır. Dişliler, kavramalar, kamalar, kilit parçaları gibi çok çeşitli makine parçaları bu şekilde üretilmektedir [37].



Şekil 3.12 Toz metalurjisiyle üretilen malzemelerin genel kullanımları [38].

3.2.2. T M Yöntemiyle Üretilen Kompozitlerin Askeri Uygulamaları

Toz metalurjisinin, karmaşık şekilli parçaların üretimindeki kolaylık ve imalat maliyetleri açısından sivil amaçlı olduğu kadar askeri uygulamaları da oldukça fazladır. Askeri uygulamaları iki ana grupta değerlendirmek mümkün olup bunlar alışılagelmiş T Mile üretilmiş parçalar ve piroteknik uygulamalarıdır.

Alışılagelmiş T M uygulamaları T Mile üretilmiş parçaları kapsamaktadır. Bunlar; çeşitli silah ve mermi parçaları, uçak, deniz ve yer teçhizatında ve taşıtlarında kullanılan parçalardır. Piroteknik uygulamalarda ise metal ve metal olmayan malzemelerin tozları çeşitli organik maddelerle karıştırılarak hangi alanda kullanılmak isteniyorsa ona göre karışımı hazırlanır. Bu grup içine roket yakıtları, patlayıcılar, tutuşturucular, geciktiriciler, ateşleyiciler, aydınlatma bombaları, dumaneler vs. girer. [39].

3.2.2.1. Alışılagelmiş T M Uygulamaları

Alışılagelmiş T M uygulamaları her türlü kara, hava ve deniz araçlarında kullanılan yapısal parçaları içermektedir. Bunlar arasında uçak motor türbin diskleri gibi çok önemli parçalar sayılabilir. Bu parçalardan başka silah sistemlerinde yapı elemanları ve tanımlayıcı elemanlar şeklinde kullanımları da söz konusudur. Bu türden alışılagelmiş T M uygulamalarına örnek olarak ağır top mermilerinde kullanılan ve uçuş kararlılığını sağlayan mermilerde döner bant, parça tesiri yapmak amacıyla tüm havan mermisi gövdeleri, ağır zırhları delmekte kullanılan yüksek kinetik enerjili delicilerin içinde kinetik enerjisinden faydalanan tungsten deliciler, parça tesirli cephaneler gibi silah sistemleri ve parçaları verilebilir [39].

3.2.2.2. Piroteknik T M Uygulamaları

Havadaki oksijene bağlı kalmaksızın çeşitli kimyasal karışımlar kullanarak, ve bu karışımları herhangi bir ateşleyici vasıtasıyla reaksiyona sokarak, gözle görülebilir, mekanik ve ısı etkileri oluşturmak suretiyle yapılan uygulamalardır. Bu amaçla kullanılan karışımların hemen hepsi toz karakterlidir. Sıvı ve kompozit olarak kullanılan başka karışımlar da mevcut olup reaksiyona sokulduğunda, ışık, ısı, ses, duman, gaz vs. gözlenen etkiler göstermektedir.

Protetik uygulamalarda kullanılan metal tozlarının tamamının yurt dışından temini sebebiyle, bu toz metallerin hangileri olduğu ve ne oranlarda kullanıldığının bilinmesi son derece önemlidir. Protetik amaçla kullanılan metal tozlarına örnek olarak alüminyum, magnezyum, berilyum, tungsten, zirkonyum, titanyum, manganez ve krom verilebilir [39].

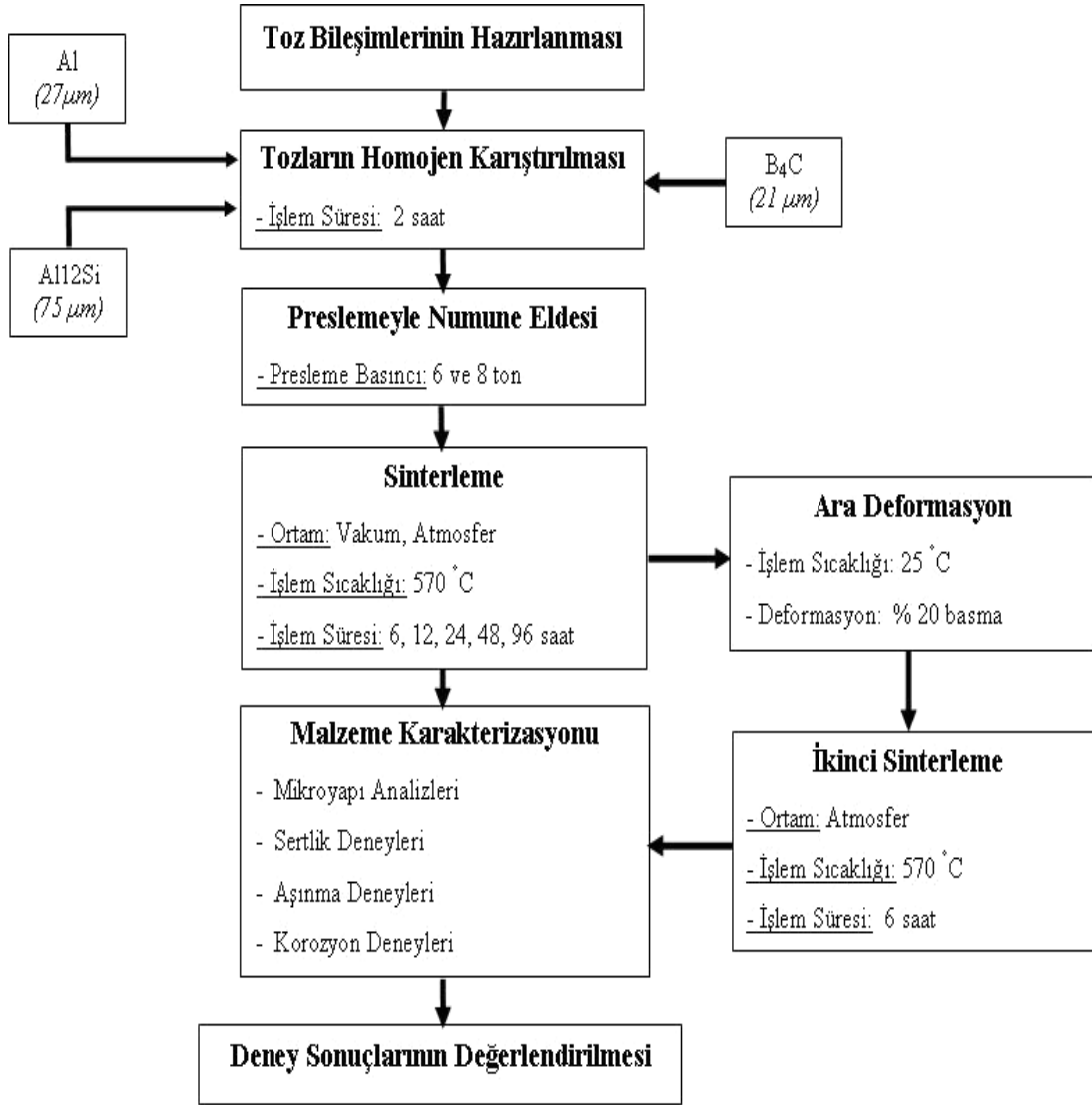
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kompozit Malzeme Üretimi

Üretimin ilk aşamasında 27, 75 ve 21 μm ortalama tane boyutuna sahip Al, Al 12Si ve B₄C tozlarının uygun bir karıştırıcıda 2 saat süreyle harmanlanarak homojen dağılımları sağlanmıştır. Tablo 4.1’de tozların karışım oranları verilmiştir. Homojen olarak karışım sağlanmış tozlar, 6 ve 8 tonluk basma kuvveti ile düşey eksenli presleme cihazında preslenerek 12 mm çapında ve 6 mm yüksekliğinde silindirik numuneler elde edilmiştir. Preslenen kompozitlerin mukavemetlerinin artırılması ve yapıdaki mevcut porozitenin azaltılması amacıyla sinterleme çalışmaları yapılmıştır. Sinterleme işlemleri 570⁰ C’de atmosferik koşullarda ve vakum ortamında ($0.5 \cdot 10^{-2}$ mbar) gerçekleştirilmiştir. Sinterleme süresi 6, 12, 24, 48 ve 96 saat olarak seçilmiş ve sinterleme sonrası numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Bazı numuneler 6 saatlik sinterleme sonrasında ara işlem olarak oda sıcaklığında %20 oranında deformasyona tabi tutulup, tekrar 6 saat süreyle sinterlenmiştir. Kompozit üretimine ait akış şeması Şekil 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Bu çalışmada toz metalurjisiyle üretilen kompozitlerin bileşen oranları

Kompozit Adı	Toz Karışım Oranı (% Ağırlık)		
	Al	Al 12Si	B ₄ C
Saf Al	100	-----	-----
Al - %4 B ₄ C	96	-----	4
Al - %9 B ₄ C	91	-----	9
Al - %16 B ₄ C	84	-----	16
Al - %23 B ₄ C	77	-----	23
Al - Al 12Si	50	50	-----
Al - Al 12Si - %4 B ₄ C	48	48	4
Al - Al 12Si - %9 B ₄ C	45,5	45,5	9
Al - Al 12Si - %16 B ₄ C	42	42	16
Al - Al 12Si - %23 B ₄ C	38,5	38,5	23



Şekil 4.1. Bu çalışmada üretilen kompozit numunelere ait üretilme süreci

4.2 Mikroyapı Karakterizasyon Çalışmaları ve Sertlik Ölçümleri

Kompozit deney numunelerinin mikroyapı incelemeleri için standart metalografik yöntemler uygulanmıştır. Numuneler sırasıyla 240, 400, 600, 800 ve 1200 meshlik zımpara kağıdı kullanılarak zımparalanmış, son olarak Al_2O_3 ve elmas pasta ile parlatılmıştır. Mikroyapı analizleri optik ve stereo mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerde faz analizleri X-ışınları difraksiyon tekniği ile yapılmıştır. Bu amaçla Philips marka XRD cihazı kullanılmıştır. Kompozit numuneler üzerinde yapılan sertlik ölçümleri Shimadzu marka mikrosertlik ölçme cihazında 1 kg yük ve vickers ucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.3 Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri ileri-geri (reciprocating) aşınma deney cihazında normal atmosferik koşullarda (oda sıcaklığında ve % 40±2 nem) gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı olarak 10 mm çapında Al_2O_3 bilye kullanılmıştır. Deneyler 150 gr yük altında, 0.02 m/s kayma hızında yapılmış olup toplam kayma mesafesi 100 m'dir. Aşınma deneyleri sonrasında numuneler üzerinde oluşan izler Leica marka stereo mikroskopta ve Jeol marka taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Aşınma deneylerinin yapıldığı cihaz Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2 Aşınma testlerinin yapıldığı ileri - geri (reciprocating) aşınma deney cihazı

4.4 Korozyon Deneyleri

Korozyon deneyleri, 150 gr NaCl, 5 cc HCl ve 500 ml saf su bileşimindeki çözelti içerisinde, kompozit numunelerin 3'er saat aralıklar ile 12 saat tutulması ve daha sonra ilave bir 12 saatlik süre boyunca aynı çözelti içerisinde bekletilmesi suretiyle yapılmıştır. Toplam 24 saatlik sürede gerçekleştirilen korozyon deneylerinde, malzeme ağırlığında oluşan kayıplar, korozyon çözeltisinin iletkenlik ve PH değerlerinin süreye bağlı olarak göstermiş olduğu değişimler tespit edilmiştir. Korozyonlu yüzeylere ait mikroyapı fotoğrafları incelenerek korozyona yönelik karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

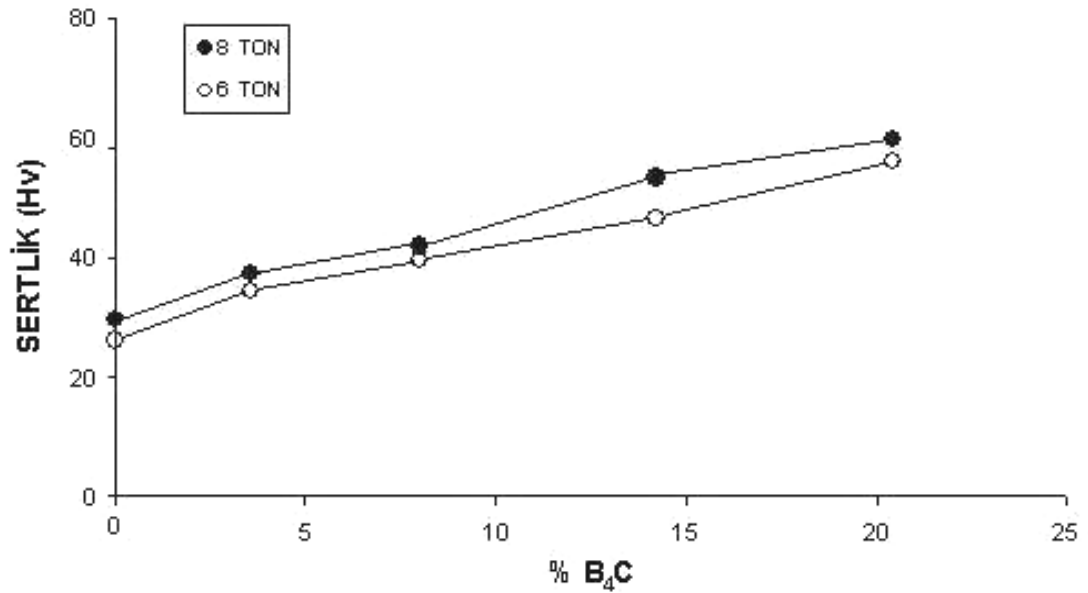
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Optimum Üretim Parametrelerini Belirleme

Sinterleme yöntemi ile bor karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozit üretime ait optimum üretim parametreleri sertlik ölçüm sonuçlarına göre belirlenmiştir. Bu amaçla izlenen yöntem aşağıda açıklanmıştır.

5.1.1. Presleme Basıncı

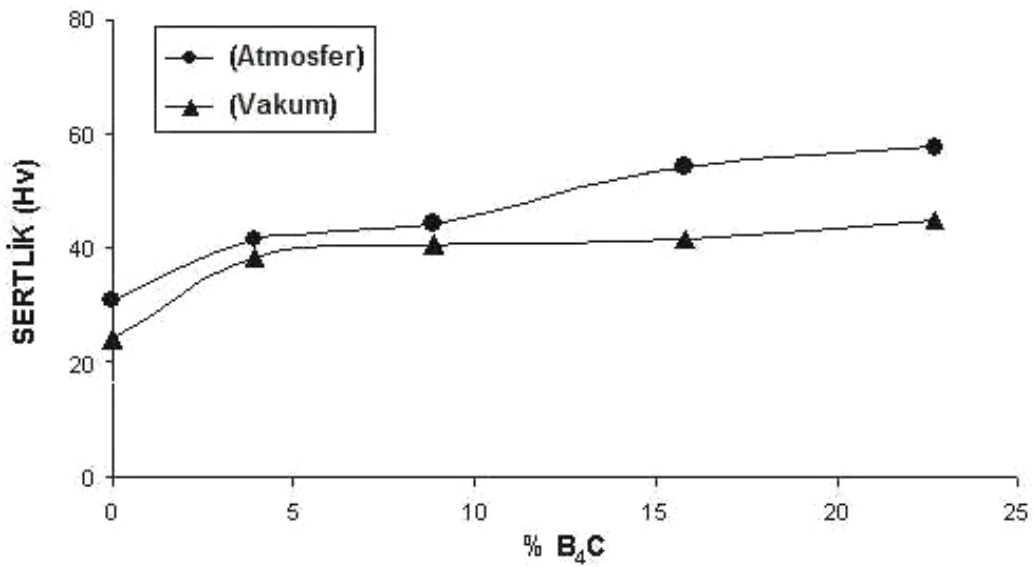
6 ton ve 8 tonluk presleme sonrasında, atmosferik koşullarda 570°C de 12 saat süreyle sinterlenen alüminyum matrisli kompozitlerin sertlik ölçüm sonuçları Şekil 5.1’de verilmiştir. Artan B_4C miktarı ile kompozitlerin sertliği artmaktadır. 8 tonluk toz presleme kuvveti (700 MPa basınç) 6 tonluk presleme kuvvetine (500 MPa basınç) oranla kompozit malzemelerde daha yüksek sertlik elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 5.1. Toz presleme basıncının, atmosferik ortamda ve 570°C de 12 saat sinterlenen alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi

5.1.2 Sinterleme Ortamı

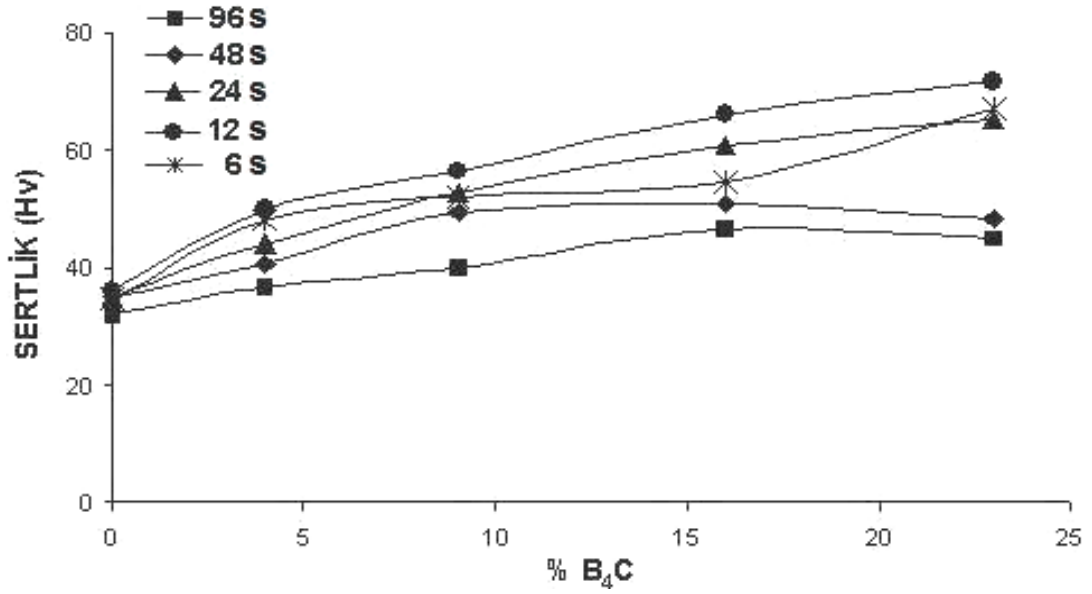
Farklı oranlarda B_4C içeren Al matrisli kompozitler 8 tonluk yük altında preslendikten sonra $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 12 saat vakumda ($0.5 \cdot 10^{-2}$ nbar) ve normal atmosferik koşullarda sinterlenmişlerdir. Şekil 5.2’de de görüldüğü gibi gerek vakumda ve gerekse atmosferik koşullarda sinterlenen kompozitlerin sertliği artan B_4C içeriği ile artmaktadır. Matrisin alüminyum olarak seçildiği numune grupları göz önünde tutularak yapılan değerlendirme neticesinde, atmosferik ortamda yapılan sinterlemenin vakumlu sinterlemeye oranla daha fazla sertlik artışı sağladığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.2 Sinterleme ortamının, 700 MPa’da preslendikten sonra $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 12 saat süreyle sinterlenen alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi

5.1.3 Sinterleme Süresi

8 tonda preslendikten sonra atmosferik ortamda $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ de farklı sürelerde sinterlenmiş olan alüminyum matrisli B_4C takviyeli kompozitlerin sertlikleri Şekil 5.3’de görülmektedir. 12 saatlik sinterleme sonucu elde edilen sertlik değerleri diğer sinterleme süreleriyle kıyaslandığında sertliğin en yüksek olduğu süreyi vermektedir. Elde edilen bu sonuçlar neticesinde, kompozit üretiminde sinterleme süresinin 12 saat olarak seçilmesine karar verilmiştir.



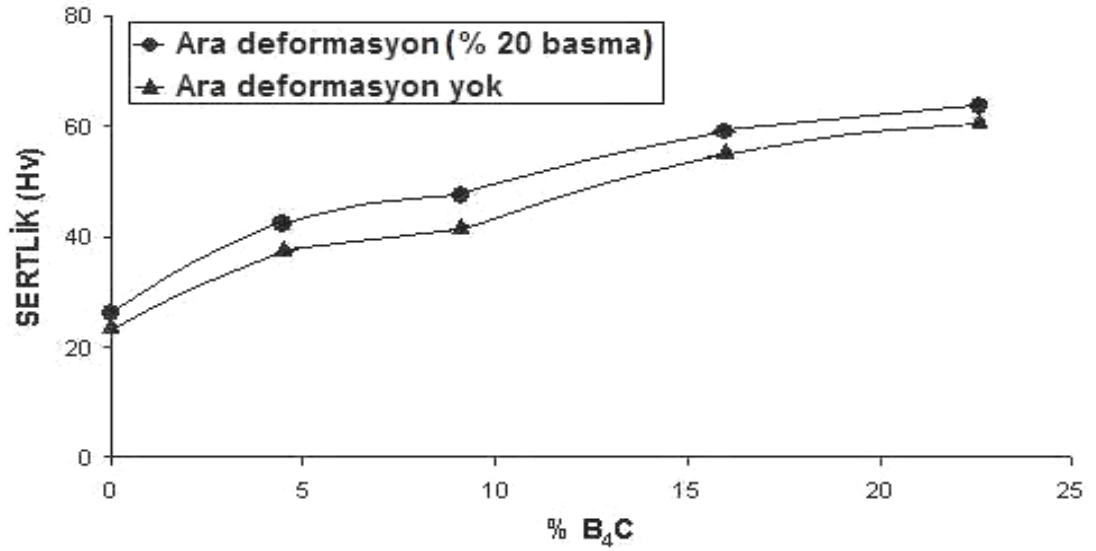
Şekil 5.3 Sinterleme süresi nin 700 MPa’da preslendi kten sonra at mosferik ortamda ve 570 °C de sinterlenen alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi

5.2 Mikroyapı ve Sertlik Karakterizasyon Sonuçları

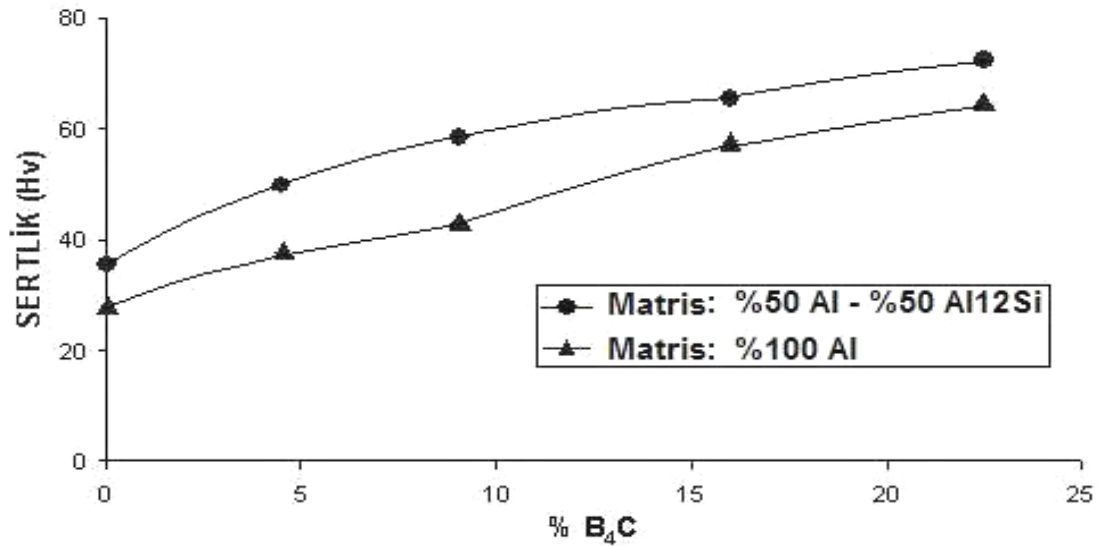
Bor karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin toz metalurjisi tekniği ile üretilmesine ait optimum parametreler Bölüm 5.1’de;

- Presleme basıncı: 700 MPa (12 mm çaplı numune için 8 ton)
- Sinterleme ortamı: Atmosferik
- Sinterleme süresi: 570 °C de 12 saat

olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda üretilen alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğinde ilave bir artış sağlamak amacıyla kompozitler 6 saat sinterlendikten sonra oda sıcaklığında basma yönünde %20 oranında ara deformasyona tabi tutulup tekrar 6 saat süreyle ikinci kez sinterlenmiş ve/veya Al 12Si tozu katılarak matrisi %50 Al + %50 Al 12Si olan kompozitler üretilmiştir. Ara deformasyon ve matrise yapılan Al 12Si ilavesinin sertliğe etkileri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri neticesinde, matrise Al 12Si ilavesinin ve/veya kompozite ara işlem olarak basma yönünde % 20 oranında deformasyon uygulanmasının kompozite daha yüksek sertlik kazandırdığı görülmüştür.



Şekil 5.4 Ara deformasyonun B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi



Şekil 5.5 Matris bileşiminin B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin sertliğine etkisi

Tablo 5.1’de bu çalışmanın ileri aşamalarında incelenen kompozitlerin sertlikleri yer almaktadır. Ara deformasyonun sertlikteki standart sapmayı azaltıcı etkide bulunduğu bu tablodan anlaşılmaktadır. İncelenen kompozitlerin mikroyapı fotoğrafları Ek A.1’de verilmiş olup, bu kompozitlerden elde edilen XRD paternleri Şekil 5.6’da yer almaktadır. Mikroyapı incelemeleriyle lineer kesişim metoduna göre mikroyapı bileşenlerinin hacim oranları hesaplanmış ve sonuçları Tablo 5.2’de listelenmiştir.

Tablo 5.1. Atmosferik ortamda 12 saatlik sinterleme sonucu elde edilen kompozit numunelerinin sertlik değerleri

Matris	% B ₄ C	Ara Deformasyon	Sertlik (HV ₁)
%100 Al	0	Yok	28,7 ± 1,78
		%20	30,6 ± 0,80
	4	Yok	39,3 ± 2,32
		%20	43,3 ± 0,26
	9	Yok	41,3 ± 3,14
		%20	48,0 ± 1,27
	16	Yok	56,0 ± 4,90
		%20	57,5 ± 3,48
%50 Al + %50 Al ₁₂ Si	0	Yok	36,1 ± 1,23
		%20	39,7 ± 1,18
	4	Yok	49,9 ± 0,73
		%20	54,7 ± 0,70
	9	Yok	58,0 ± 2,67
		%20	63,3 ± 2,14
	16	Yok	66,2 ± 3,50
		%20	69,3 ± 3,09
	23	Yok	71,6 ± 4,55
		%20	74,2 ± 4,08

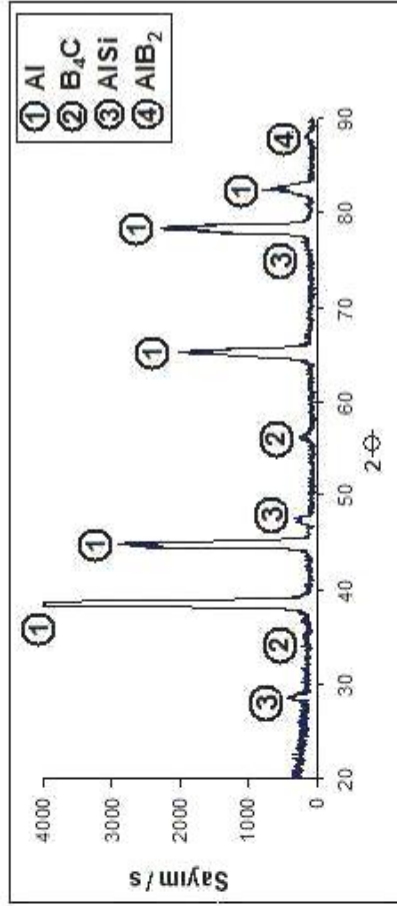
Ek A.1. de verilen mikroyapı resimlerinin analizleri neticesinde takviye elemanı olarak kullanılan B₄C partiküllerinin gerek Al matris içinde gerekse Al - Al₁₂Si matris içinde homojen bir dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Matris içinde dağılmış koyu gri partiküller B₄C ü, beyaz partiküller ise Al₁₂Si alaşımını temsil etmektedir. Artan B₄C içeriği ile birlikte her iki matris içerisindeki porozite miktarında artış meydana gelmektedir. En yüksek poroziteye matrisi alüminyum olan ve ara deformasyon işlemi görmemiş % 23 B₄C takviyeli kompozitin mikroyapısında rastlanırken matrisin alüminyum olduğu ve ara deformasyon görmüş B₄C takviyesi yapılmış kompozitte ise en düşük poroziteye rastlanmıştır. Mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilen ara deformasyon ve ikinci sinterleme neticesinde elde

edilen kompozitlerde ise yapıdaki porozite miktarının azaldığı ve kullanılan toz partüküllerin birbirine daha sıkı biçimde bağlandığı gözlenmiştir.

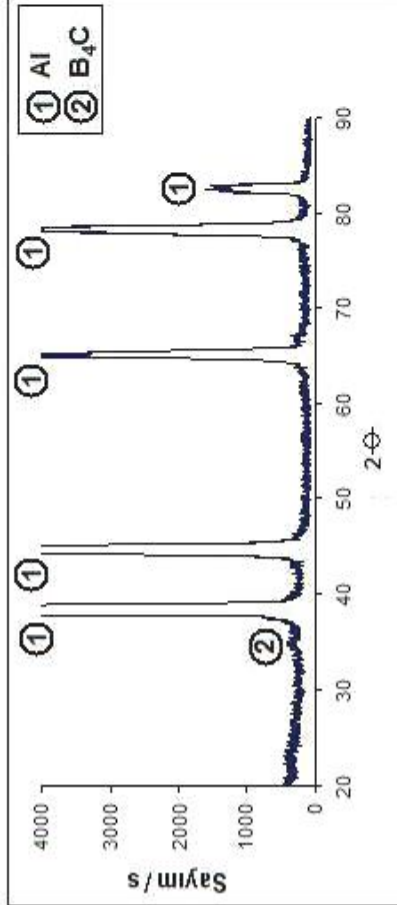
Tablo 5.2 Lineer kesişme metodu ile hesaplanan takviye-porozite hacim oranı

Matris	% B ₁ C	Ara İşlem	Mikroyapı Bileşenlerinin (% Hacimsel Oranı)			
			Al	Al 12Si	B ₁ C	Porozite
% 100 Al	0	Yok	95,9	-	-	4,1
		% 20 deformasyon	96,8	-	-	3,2
	4	Yok	88,6	-	3,3	8,1
		% 20 deformasyon	88,6	-	3,5	7,9
	9	Yok	85	-	8,3	6,7
		% 20 deformasyon	87,1	-	8,4	4,5
	16	Yok	73,7	-	12,2	14,1
		% 20 deformasyon	73,9	-	12,5	13,6
	23	Yok	68	-	14,6	17,4
		% 20 deformasyon	69,9	-	15,3	14,8
%50 Al + %50 Al 12Si	0	Yok	48,1	44	-	7,9
		% 20 deformasyon	48,3	45,2	-	6,5
	4	Yok	44,6	46	3,3	6,1
		% 20 deformasyon	44,5	46	3,6	5,9
	9	Yok	40,1	41,1	8,3	10,5
		% 20 deformasyon	42,4	42	8,2	7,4
	16	Yok	40,6	32,5	13,1	13,8
		% 20 deformasyon	37,5	35,9	13,2	13,4
	23	Yok	40,1	30,7	14,5	14,7
		% 20 deformasyon	42,3	29,6	14,4	13,7

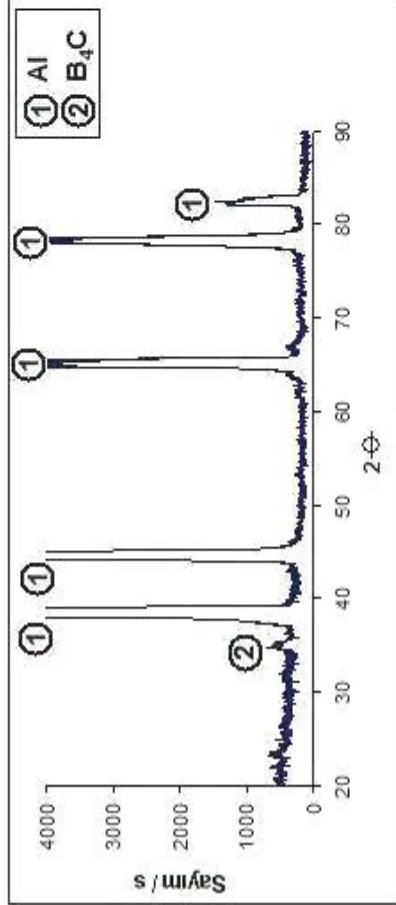
Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kompozitlerin bazıları üzerinde gerçekleştirilen X-ışınları difraksiyon çalışmaları sonucunda elde edilen paternler Şekil 5.6'da verilmiştir. Bu paternlerin çözümlenmesi sonucunda matrisi saf Al olan % 9 ve % 23 B₁ C takviyeli kompozitlere ait paternlerde baskın olan pikler Al pikleri olup buna ilave olarak B₁ C pikleri bulunmuştur. Matrisi Al - Al 12Si olan % 9 ve % 23 B₁ C takviyeli kompozitlerde ise Al piklerinin yanı sıra Al Si, Al B₂ ve B₁ C pikleri de görülmüştür. X - ışınları difraksiyon paternlerinden de görüleceği gibi atmosferik ortamda gerçekleştirilmiş sinterleme işlemleri neticesinde üretilen kompozitlerde herhangi bir oksit pikine rastlanmamıştır.



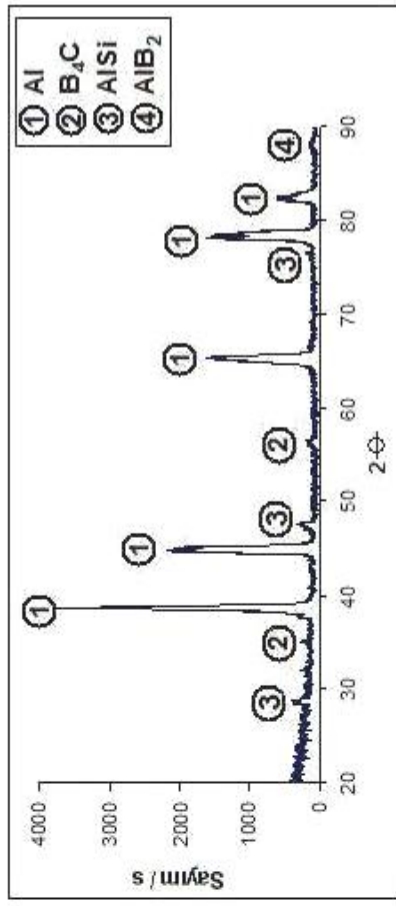
a)



b)



c)



Şekil 5.6 Üretilen kompozitlere ait XRD paternleri; a) %9 B₄C içeren %100 Al matrisli kompozit b) %23 B₄C içeren %100 Al matrisli kompozit c) %9 B₄C içeren %50 Al ve %50 Al₁₂Si matrisli kompozit d) %23 B₄C içeren %50 Al ve %50 Al₁₂Si matrisli kompozit

5.3 Aşınma Deneyi Sonuçları

Ağırlıkça farklı miktarlarda B₄Ci çeren ve bazıları ilave deformasyona uğratılmış Al ve Al - Al₂Si matrisli kompozit malzemelerin 10 mm çapında Al₂O₃ bilya kullanılarak oda koşullarında yapılanileri - geri (reciprocating) aşınma deneylerinde elde edilen aşınma izlerinin 3 boyutlu profilometrik görüntüleri Şekil 5.7’de verilmiştir. Elde edilen bu 3 boyutlu iz görüntüleri kullanılarak iz derinliği ve genişliği ölçülmüş ve her bir malzeme için aşınma iz alanı hesaplanmış ve Ek B 1’de sunulmuştur. Ek B 1 de verilen aşınma iz boyutları incelendiğinde alüminyum matris içine Al₂Si alaşımının ilave edildiği, ara deformasyon ve sinterleme görmüş kompozitlerde aşınma izi boyu ve derinliğinin matris içine alaşım ilavesi yapılmış ve ara işlem görmemiş kompozitlerinkine oranla daha küçük olduğu ve buna paralel olarak aşınma direncinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İz alanı hesaplanmasında kullanılan iki boyutlu profil örneği Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

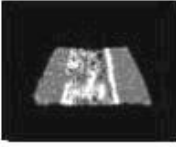
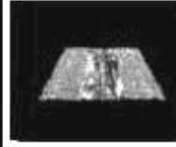
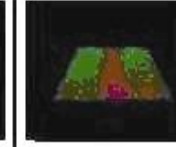
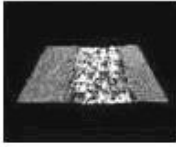
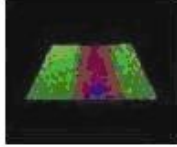
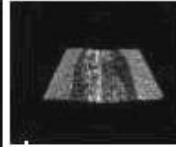
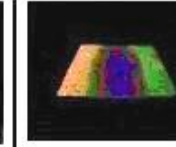
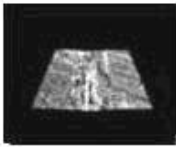
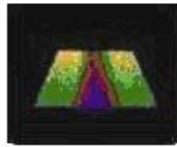
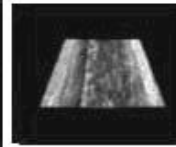
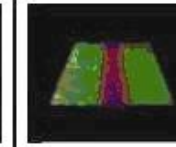
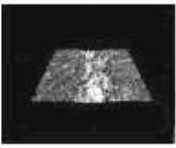
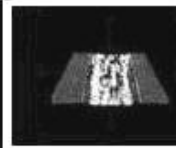
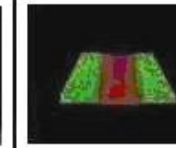
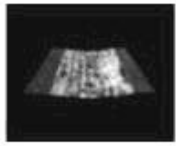
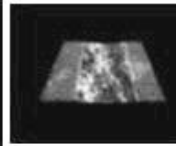
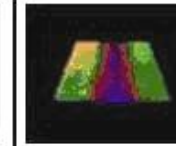
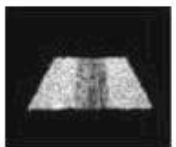
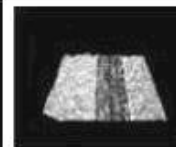
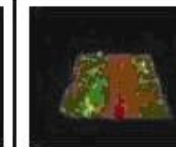
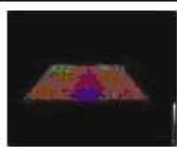
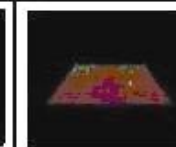
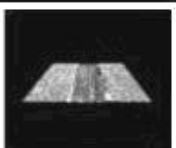
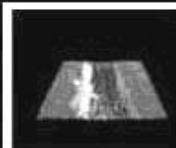
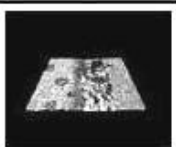
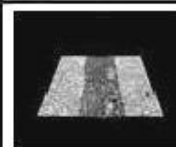
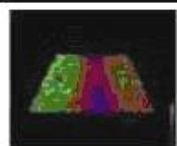
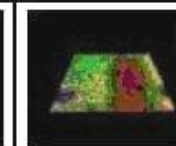
İncelenen malzemelerin göstermiş oldukları aşınma dirençlerini kıyaslamak amacıyla aşınma iz alanı değerleri % 100 Al matrisli ve ara deformasyon uygulanmış malzemenin iz alanı (Şekil 5.8) referans alınarak bağıl aşınma direncine dönüştürülmüştür. (Tablo 5.3) Sertlik deneyleri sonucunda en düşük sertliğin elde edildiği % 100 Al matrisli ve ara deformasyon uygulanmış kompozitin bağıl aşınma direnci 1 alınarak diğer kompozitlerin bağıl aşınma dirençleri

$$B.A.D = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_n}$$

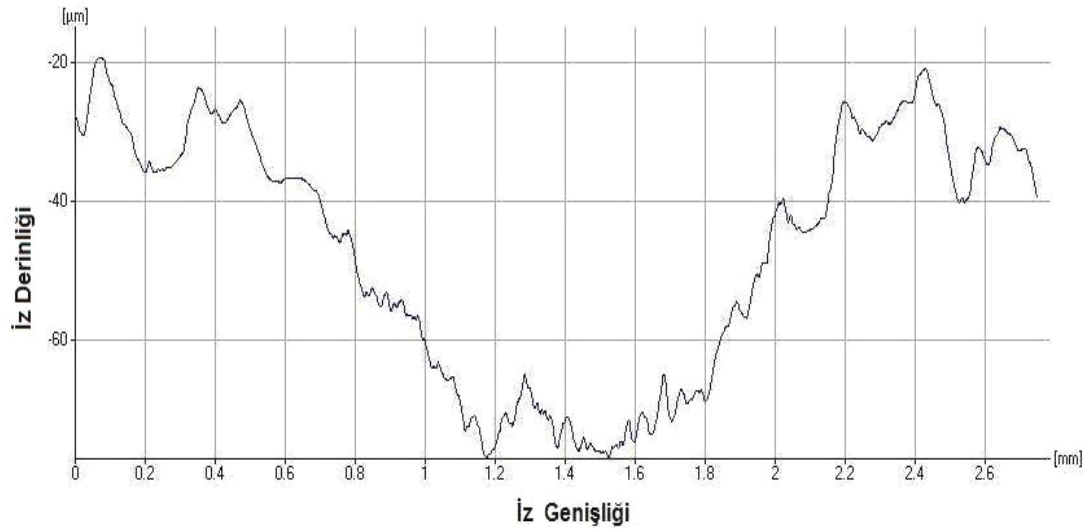
bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada;

ΔS_1 : %100 Al matris - deformasyon uygulanmış kompozitin aşınma izi alanı

ΔS_n : Herhangi bir kompozitin aşınma iz alanı

Matris	% B ₄ C	Ara Deformasyon			
		Yok		% 20	
Al	0				
	4				
	9				
	16				
	23				
Al - Al ₁₂ Si	0				
	4				
	9				
	16				
	23				

Şekil 5.7. İncelenen malzeme lerin yüzeyleri nde aşınma deneyleri sırasında oluş an izleri n 3 boyut lu görünümü eri.



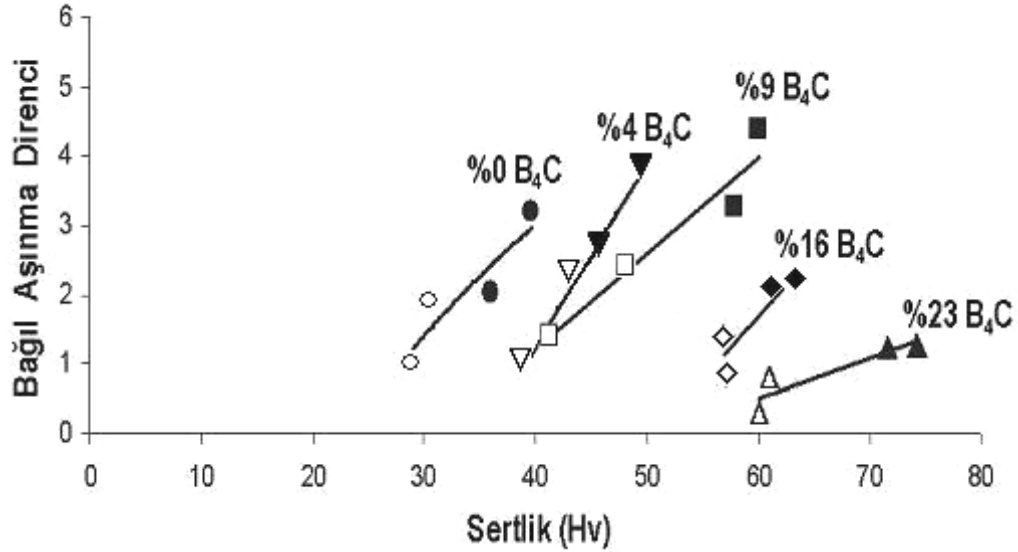
Şekil 5.8 B₄C içeren %100 alüminyum matrisli ve ara deformasyon işlemi uygulanmış malzemenin aşınma izi boyu ve derinliğini gösteren iki boyutlu profil örneği.

Tablo 5.3 İncelenen kompozitlerin bağlı aşınma dirençleri.

Matris	% B ₄ C	Deformasyon	Bağlı Aşınma Direnci
% 100 Al	0	Yok	1,0
		% 20 basma	1,9
	4	Yok	1,1
		% 20 basma	2,3
	9	Yok	1,4
		% 20 basma	2,4
	16	Yok	0,9
		% 20 basma	1,4
% 50 Al - %50 Al ₂ Si	0	Yok	2,0
		% 20 basma	3,2
	4	Yok	2,7
		% 20 basma	3,8
	9	Yok	3,3
		% 20 basma	4,4
	16	Yok	2,0
		% 20 basma	2,2
	23	Yok	1,2
		% 20 basma	1,3

Bor karbür takviyesiyle, matrise Al₂Si ilavesiyle ve ara deformasyonla sertliği artırılan kompozitlerde sertliğin bağlı aşınma direnci üzerindeki etkisi Şekil 5.9'da verilmiştir. B A D %9 B₄C içeriğine kadar artansertlikle artmakta, fakat bu değer in üzerinde şiddetli olarak azalmaktadır. Sabit bir B₄C içeriğinde, kompozitin ara

deformasyon uygulanarak üretilmesi ve/veya matrise Al₁₂Si ilavesi sonucu sertliğe paralel olarak bağıl aşınma direnci de artmaktadır.



Şekil 5.9 İncelenen kompozitlerde bağıl aşınma direnci ile sertlik arasındaki ilişki. (İçerik boş semboller matrisin Al olduğu kompozitleri, içerik dolu semboller ise matrisin Al-Al₁₂Si olduğu kompozitleri temsil etmektedir.)

Aşınma deneyleri boyunca kompozit malzemelerde oluşan aşınma izlerine ait stereo mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu resimleri sırasıyla Ek B 2 ve B 3’de verilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan Al₂O₃ bilyada oluşan aşınma izi görüntüleri ise Ek B 4’de yer almaktadır.

Aşınma karakterizasyonuna yönelik yapılan incelemeler neticesinde, en küçük aşınma izinin matrisi Al - Al₁₂Si olan %9 B₄C takviyeli ve ara deformasyon görmüş kompozitte, en büyük aşınma izinin ise matrisi Al olan %23 B₄C takviyeli ara deformasyon uygulanmış kompozitte meydana geldiği belirlenmiştir. %9 B₄C içeren kompozitlere kadar aşınma yiv oluşumuyla gerçekleşmiş olup, %9’dan fazla B₄C içeriği kompozitlerde partikül kopmalarına ve buna bağlı olarak yüzeyde boşluk oluşumuna neden olmuştur. B₄C miktarının %9’un üzerinde olduğu kompozitlere (%16 ve %23 B₄C içeren kompozitler) ait yüzeylerde aşınma izi derinliği ve genişliğinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, %16 ve %23 B₄C içeren kompozitlerde aşınma sırasında yüzeyden kopan bazı B₄C partiküllerinin yüzey üzerinde ilave bir aşındırıcı etkiye sebep olarak aşınmayı arttırdığı düşünülmektedir.

Aşınma deneylerine tabi tutulan kompozitlere ait sürtünme katsayısı-süre grafikleri Ek B 5 ve Ek B 6’da verilmiş olup, bu grafiklerden elde edilen kararlı sürtünme katsayısı değerleri Tablo 5.4’de sunulmuştur. Genel olarak üretilen kompozitlerin sürtünme katsayısı değerleri matrisin Al - Al₁₂Si olduğu kompozitler ile ara deformasyon ve ikinci sinterlemenin yapılmış olduğu kompozitlerde düşüş göstermektedir.

Tablo 5.4 Kompozitlerin aşınmasında ölçülen kararlı durumsürtünme katsayıları

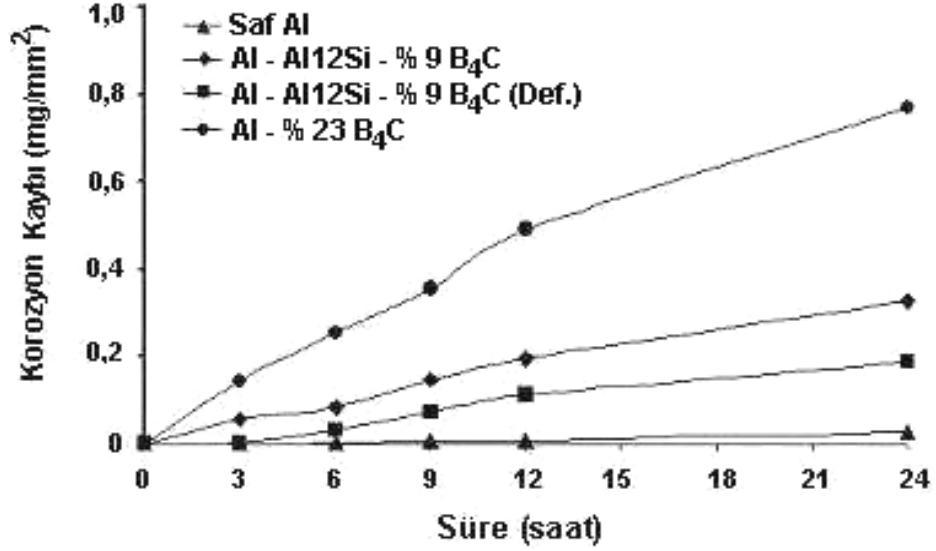
Matris	% B ₄ C	Ara İşlem	Sürtünme Katsayısı
%100 Al	0	Yok	1,1
		% 20 deformasyon	0,9
	4	Yok	1,0
		% 20 deformasyon	0,9
	9	Yok	1,1
		% 20 deformasyon	0,8
	16	Yok	1,2
		% 20 deformasyon	1,2
%50 Al + %50 Al ₁₂ Si	0	Yok	0,8
		% 20 deformasyon	0,6
	4	Yok	1,1
		% 20 deformasyon	0,9
	9	Yok	1,0
		% 20 deformasyon	0,9
	16	Yok	0,9
		% 20 deformasyon	1,0
	23	Yok	0,9
		% 20 deformasyon	1,2

5.4 Korozyon Deneyi Sonuçları

Korozyon deneyleri, en yüksek ve en düşük aşınma aşınma direnci sergileyen kompozitler ile, B A D hesaplamasında referans alınan saf alüminyum numuneler kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin ağırlık kayıpları Ek C 1.’de verilmiştir. Şekil 5.10’da ise incelenen kompozitlerde meydana gelen korozyon kayıpları görülmektedir.

Süreye bağlı olarak değişen korozyon kayıpları incelendiğinde; Al - %23 B₄ C kompozitinde korozyon kaybının en yüksek olduğu, %100 Al matrisli numunede ise korozyon kaybının en düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek aşınma

direncinin elde edildiği %9 B₄C takviyeli %50 Al - %50 Al₁₂Si matrisli ara deformasyon uygulanarak üretilen kompozit en iyi ikinci korozyon direncini sergilemiştir. Söz konusu kompozitin ara deformasyon uygulanmaksızın üretilmesi korozyon direncini azaltıcı etki de bulunmuştur.

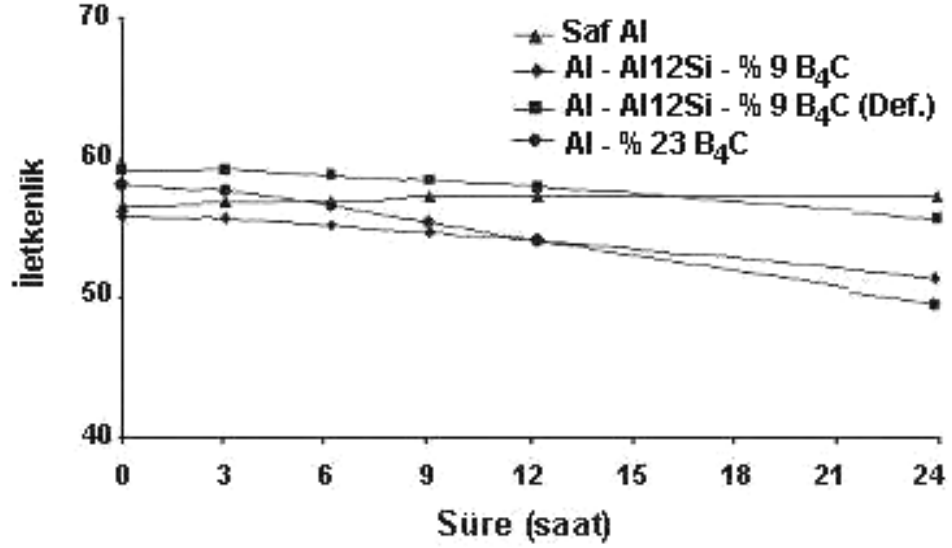


Şekil 5.10. NaCl - HCl - saf su çözeltisi içinde yapılan korozyon deneylerinde, deney süresinin korozyon kaybına etkisi

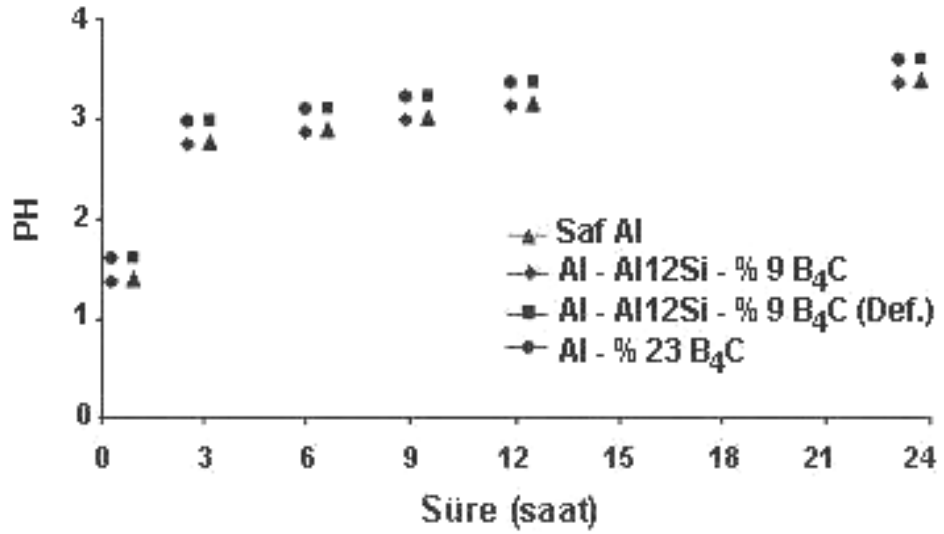
Korozyon deneyine tabi tutulan kompozitlere ait yüzey ve kesit mikroyapı görüntüleri Ek C 2 - C 6'da verilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde, %100 Al matrisli numunede korozyon etkisiyle gerek yüzeyde gerekse kesitte çok belirgin bir korozyon hasarı görülmüştür. Şekil 5.10'da en fazla korozyon kaybına uğrayan Al - %23 B₄C kompozitinin yüzeyinde oluşan aşırı oyuklanma sebebiyle çok ağır korozyon hasarının meydana geldiği görülmüştür. Bu kompozitin kesit incelemeleri, korozyon nedeniyle yüzeyden içeriye doğru geniş oyukların oluştuğu, korozyonun tane sınırları boyunca ilerlediği ve buralarda büyük malzeme kayıplarının meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır. Üretim aşamasında ara deformasyon işlemi görmüş Al - Al₁₂Si - %9 B₄C kompozitinde deformasyon görmemiş olan kompozite oranla daha az oyuklanma gözlenmektedir. Söz konusu kompozitte oluşan oyuklar kılcal nitelik taşırken, deformasyon görmemiş kompozitte ise oyuklar yüzey altında ve yüzeye paralel yönde gelişmiştir.

Her bir deney gözlemsüresi sonunda korozyon çözeltisine ait ölçülen iletkenlik ve PH değerleri şekil 5.11 ve şekil 5.12'de gösterilmektedir. Korozyon deneyine tabi tutulan tüm kompozitlerde, çözelti PH değerleri birbirine oldukça yakın olup asidik

yapıdan bazı ğe doğru ilerlemiştir. Çözelti iletkenliğı ise her bir kompozit için düşüş göstermektedir. Bu azalmanın en fazla olduğı kompozitin Al - %23 B₄C olduğı sonucu tespit edilmiştir.



Şekil 5.11. Korozyon deneylerinin yapıldığı çözeltiye ait iletkenliğinin deney süresince değışimi



Şekil 5.12 Korozyon deneylerinin yapıldığı çözeltiye ait PH değerlerinin deney süresince değışimi

5. GENEL SONUÇLAR

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş olan B_4C takviyeli ‘‘%100 Al’’ ve ‘‘%50 Al + %50 Al₁₂Si’’ matrisli kompozitlerin incelendiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Sertlik kriter alınarak yapılan değerlendirilmede, optimum üretilme parametrelerine tozların 8 tonluk yük altında preslenmesi ve 570 °C de atmosferik ortam koşullarında 12 saat süreyle yapılan sinterleme neticesinde ulaşılmıştır. 6 saat sinterlemeden sonrası basma yönünde yapılan %20’lik deformasyon ve tekrar 6 saat sinterleme işlemi sertlikte ilave bir artış sağlamıştır. Artan B_4C miktarı ve Al₁₂Si ilavesiyle kompozitlerin sertliği artış göstermektedir.
2. En yüksek aşınma direncine, matrisi %50 Al - %50 Al₁₂Si olan %9 B_4C takviyeli ve ara deformasyon işlemleri görmüş kompozitte ulaşılmıştır. %9 B_4C ilavesine kadar artan sertlikle birlikte aşınma direnci de artmaktadır. %9’ dan büyük B_4C takviyesi sertliği arttırmasına rağmen aşınma direnci üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Sabit bir B_4C içeriğine sahip kompozitte, setliği n Al₁₂Si ilavesi ve/veya %20’lik ara deformasyonla arttırılması aşınma direncini de arttırılmaktadır.
3. %9 B_4C içeren kompozite uygulanan ara deformasyon korozyon direncini de arttırılmıştır. B_4C içeriğinin artmasıyla korozyon direnci azalmaktadır. Artan süreyle korozyon çözeltisine ait PH değeri artarken, iletkenlik düşmektedir.

KAYNAKLAR

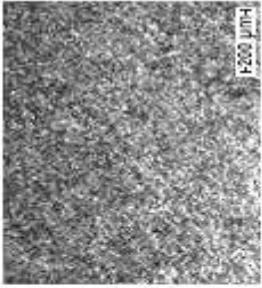
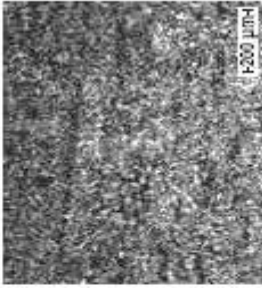
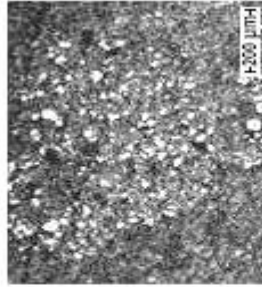
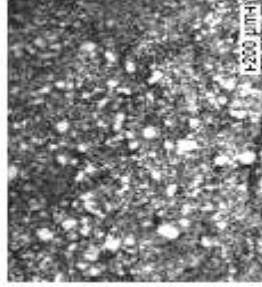
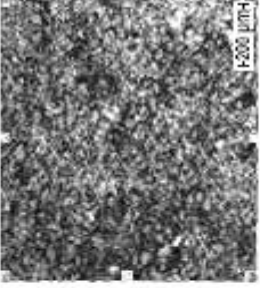
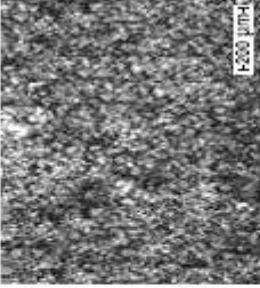
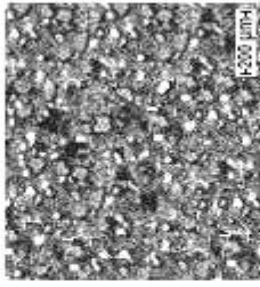
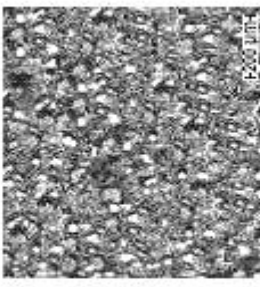
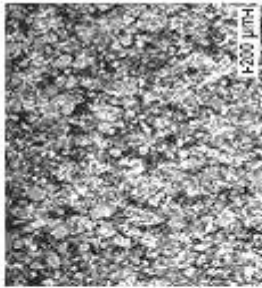
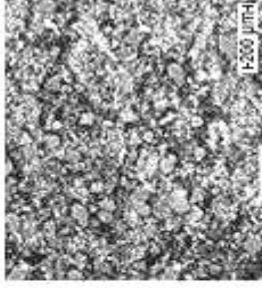
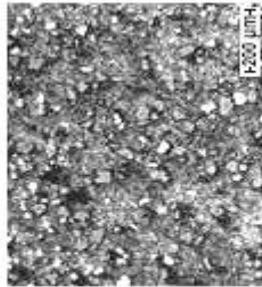
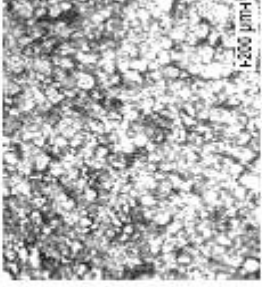
- [1] **Ahl atcı, H,** 2003. Alümi nyum - Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matriks Bileşiminin Etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **As hby, M.F.,** 1993. Criteria for selecting the components of composites, *Acta Metallurgica et Materialia*, **v 41**, p 1313-1335.
- [3] **Harrigan, William C Jr.,** 1988. Commercial Processing of Metal Matrix Composites, *Materials Science & Engineering (Structural Materials: Microstructure and Processing)*, **v 244**, p 75-79.
- [4] **Koçer, T,** 2002. Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen Al_2O_3 ve SiC Partikül Takviyeli Al-Mg Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] **Sandström R and Eliasson, J,** 1995. Application of aluminium matrix composites, *Key Engineering Materials*, **104**, 3-36.
- [6] **Brooksbank, D and Andrews, K W,** 1969. Tessellated stresses associated with inclusions in steel, *JISI*, **207**, 474-483.
- [7] **You, C P., Thompson, A W, and Bernstein, I. M,** 1987. Proposed failure mechanism in a discontinuously reinforced aluminium alloy, *Scripta Metall.* **21**, 181-185.
- [8] **Mc Daniels, D L,** 1985. Analysis of stress-strain, fracture and ductility behaviour of aluminium matrix composites containing discontinuous silicon carbide reinforcements, *Metall. Trans.* **A16**, 1105-1113.
- [9] **Thevenot, F and Bouchacourt.,** 1979. L'industrie Céramique **732** 655.

- [10] **Kouzeli, M. and Mortensen A**, 2002. *Acta Mater.* **50**, 39-51.
- [11] **Rohatgi, P.**, 1988. Cast Metal Matrix Composites in Metals Handbook **Vol. 15**, 840 - 854, ASM International, Chicago.
- [12] **AIRBUS INDUSTRY**, 2005. Structural Repair for Engineers, *Training Notes*, Toulouse.
- [13] **Akbulut, H.**, 2002. *Kompozit Malzemeler Ders Notları*, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji - Malzeme Müh. Bölümü, Sakarya.
- [14] **Polnear, I. J.**, 1995. Light Alloys, *Metallurgy of the Light Metals*, Arnold, London.
- [15] **Burg T, and Grosky, A.**, 2001. Aeronautical Materials, *Material Science and Engineering*, UNSW.
- [16] **Encyclopedia of Science and Technology**, 8th ed., **Vol. 11**, McGraw Hill, New York.
- [17] **Cahn, R. W, and Haasen, P.**, 1996. *Physical Metallurgy*, 4th, Revised and Enhanced Edition, **Vol. III**, North Holland Elsevier Science.
- [18] **Harris, S. J.**, 1988. Cast metal matrix composites, *Mater. Sci. Tech*, **4**, 231-238.
- [19] **Kok, M.**, 2005. Production and mechanical properties of Al_2O_3 particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites, *Journal of Materials Processing Technology*, **161**, 381-387.
- [20] **Ray, S.**, 1993. Review synthesis of cast metal matrix particulate composites, *Materials Science and Engineering*, **28**, 5397-5413.
- [21] **Ahmad, Z.**, 2001. Mechanical Behavior and Fabrication Characteristics of Aluminum Metal Matrix Composite Alloys. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **v 20**, n 11, p 921.
- [22] **Travitzky, N.A., Shlayan, A.**, 1998. Microstructure and mechanical properties of $Al_2O_3/Cu-O$ composites fabricated by pressureless infiltration technique, *Materials Science and Engineering*, **A244**, 154-160.

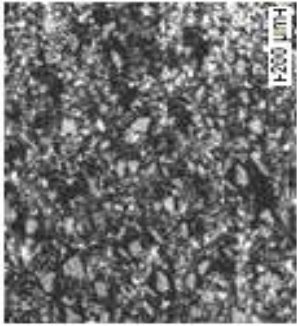
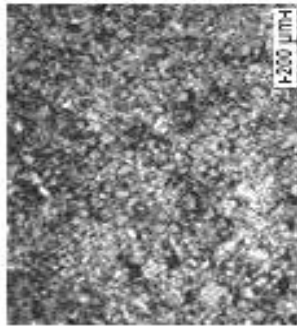
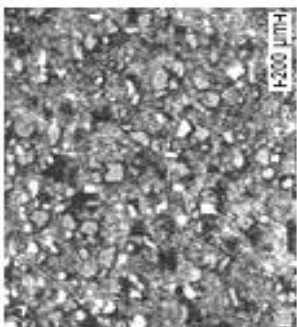
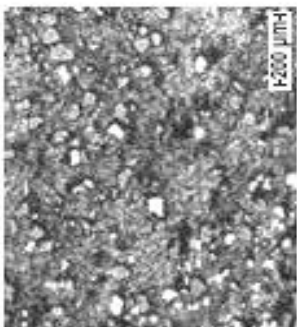
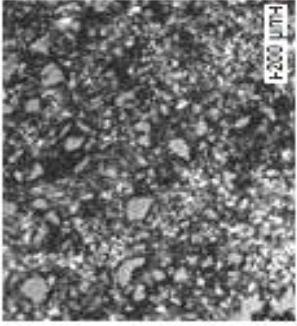
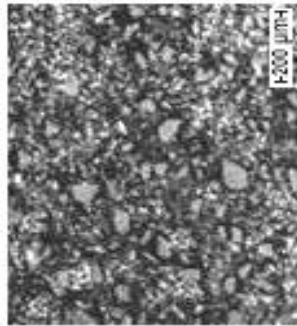
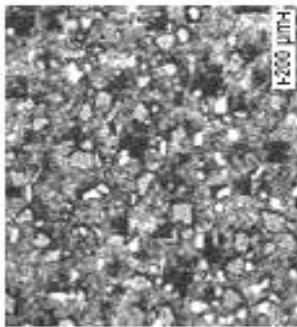
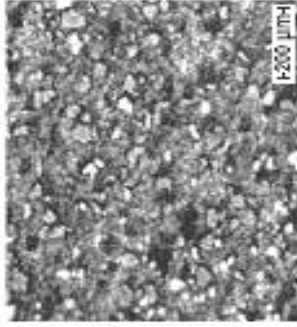
- [23] **Zulfia, A., Hand, R.J.,** 2002. The production of Al-Mg alloy/SiC metal matrix composites by pressureless infiltration, *Journal of Materials Science*, **37**, 955 - 961.
- [24] **Lloyd D J,** 1994. Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites, *Journal of Materials Science*, **39**, 1-23.
- [25] **Altınkok, N,** 2004. Microstructure and Tensile Strength Properties of Aluminium Alloys Composites Produced by Pressure-assisted Aluminium Infiltration of Al₂O₃/SiC Preforms, *Journal of Composite Materials*, **Vol. 38**, No 17.
- [26] **Huda, MD and Hamsi, MS J,** 1995. Materials, Manufacturing and Mechanical Properties. *Metal Matrix Composites part I, Application and Processing*, Hobb The Printers Ltd, UK
- [27] **Baksan, B ve Gürler, R,** Toz Metalurjisinin Savunma Sanayinde Uygulanması, Oğangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
http://www.msb.mil.tr/Birimler/ARGETeknoloji/ARGESEmineri/Sunular/09_Toiz_Metalurji.htm
- [28] **Türk Toz Metalurjisi Derneği,** 2005. Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri, Ankara.
<http://www.turktoz.gazi.edu.tr/makale.htm>
- [29] **Metals Handbook** 1984. American Society of Metals, Powder Metallurgy, ninth ed., vol. 7, ASM Metals Park, OH
- [30] **Boothroyd G, Dewhurst P. and Winston K,** Design for Powder Metal Processing *Product Design for Manufacture and Assembly*, **Ch. 11**.
- [31] **Qo İnşa Teknolojileri,** 2005. Sinterleme Teknolojisi.
<http://www.turkcadcam.net/rapor/qoinsa/sinterleme.html>
- [32] **Abouelmagd, G,** 2004. Hot deformation and wear resistance of P/M aluminium metal matrix composites., *Journal of Materials Processing Technology*, (article in press).
- [33] **Metal Powder Industries Federation (MPIF),** 2005. The PM Process
<http://www.mpiif.org/IntroPMprocess.asp?linkid=2>

- [34] **Pestes R H, Kamat, S V, and Hirth J.P,** 1994. Effect of microstructure parameters on the yield strength of Al-4.5% Mg/Al₂O₃ composites, *Scripta Metal*, **30**, 963-972.
- [35] **European Powder Metallurgy Association (EPMA).**, 2005. An Introduction to Powder Metallurgy Design
http://www.epma.com/rv_pmpdf_download/Design_Low_Res.pdf
- [36] **Koos, K H,** 1977. VDI Berichte, **No 77**, p193,
- [37] **Sinter Metal Imalat Sanayi A Ş,** İstanbul, 2005. Toz Metal Üretim Teknolojisi.
<http://www.sinter-metal.com/indextr.htm>
- [38] **Orban, R L,** 2004. New Research Directions in Powder Metallurgy, *Romanian Reports In Physics*, **Vol 54**, No. 3, page 505 - 516.
- [39] **Dursun, K, Mik Y. Mih.,** 1999. Askeri Uygulamalarda Toz Metalurjisi. *Aselsan Dergisi*.
<http://www.aselsan.com.tr/DERGI/eyul99/toz.htm>

EKLER

Takviye B ₄ C (%)	% 100 Al matris		% 50 Al - % 50 Al ₁₂ Si matris	
	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma
0				
4				
9				

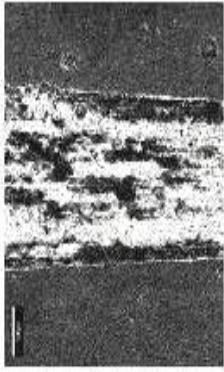
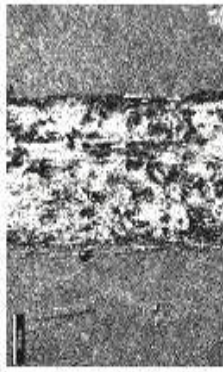
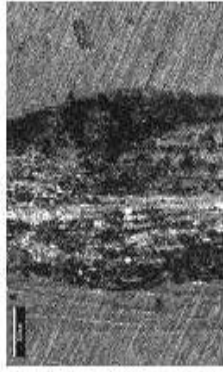
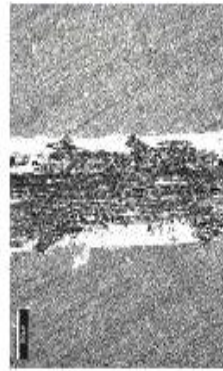
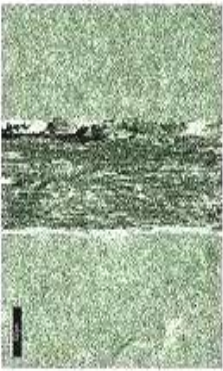
Ek A.1. Üretilen kompozitlere ait mikroyapı resimleri

Takviye B ₄ C (%)	% 100 Al matris		% 50 Al - % 50 Al12Si matris	
	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma
16				
23				

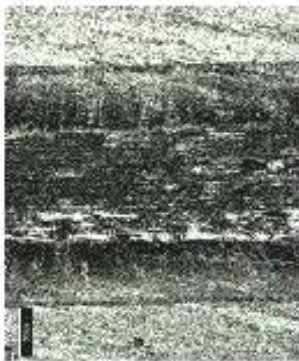
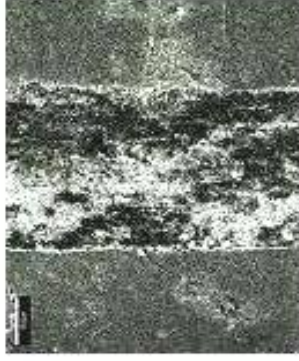
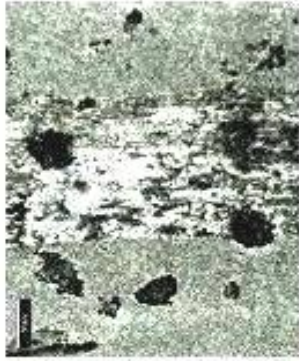
Ek A 1. Devam Üretilen kompozitlere ait mikroyapı resimleri

Ek B 1. İncelenen kompozitlerin yüzeylerinde aşınma deneyleri sonucunda oluşan izlerin boyutu

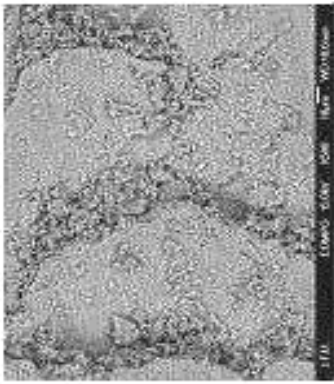
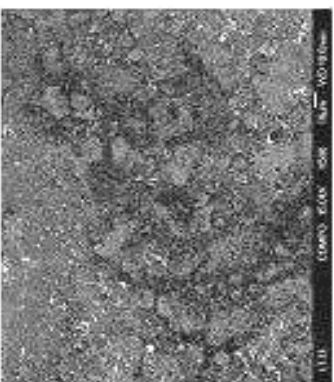
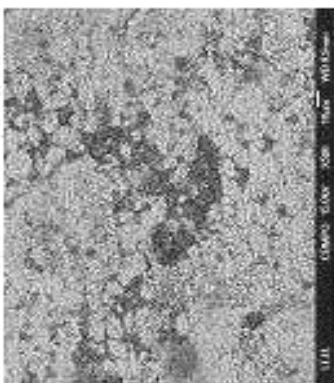
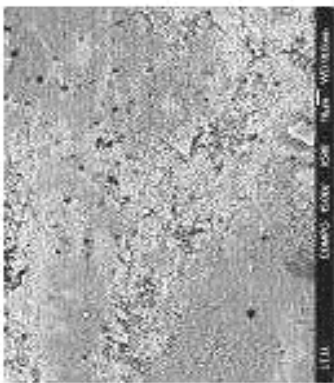
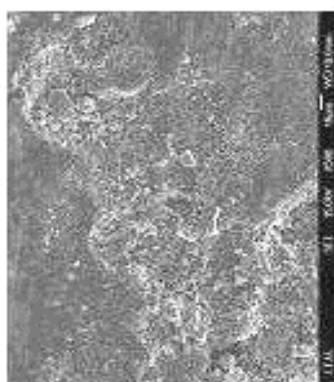
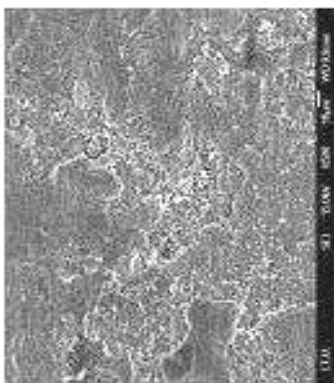
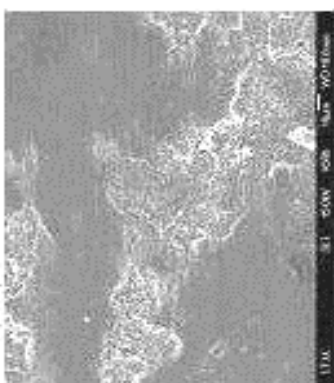
Matris	B ₁ C (%)	Ara İşlem	İz Boyutları		
			Genişlik (mm)	Derinlik (mm)	Alan (mm ²)
% 100 A	0	Yok	1, 80	0, 048	0, 0686
		% 20 deformasyon	1, 24	0, 036	0, 0361
	4	Yok	1, 53	0, 052	0, 0623
		% 20 deformasyon	1, 95	0, 019	0, 0298
	9	Yok	1, 29	0, 048	0, 0490
		% 20 deformasyon	1, 19	0, 030	0, 0285
	16	Yok	1, 63	0, 059	0, 0762
		% 20 deformasyon	1, 77	0, 035	0, 0490
	23	Yok	2, 28	0, 127	0, 2286
		% 20 deformasyon	1, 70	0, 064	0, 0857
%50 A + %50 A12Si	0	Yok	1, 17	0, 036	0, 0343
		% 20 deformasyon	1, 03	0, 026	0, 0214
	4	Yok	1, 11	0, 028	0, 0254
		% 20 deformasyon	1, 14	0, 019	0, 0180
	9	Yok	1, 16	0, 022	0, 0207
		% 20 deformasyon	1, 14	0, 017	0, 0155
	16	Yok	1, 25	0, 035	0, 0343
		% 20 deformasyon	1, 28	0, 031	0, 0311
	23	Yok	1, 42	0, 051	0, 0571
		% 20 deformasyon	1, 62	0, 041	0, 0527

Takviye	% 100 Al matris		% 50 Al - % 50 Al12Si matris	
	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma
0				
4				
9				

Ek B 2 İncelenen kompozitlerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin stereo mikroskop görüntüleri

Takviye	% 100 Al matris		% 50 Al - % 50 Al12Si matris	
	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma
16				
23				

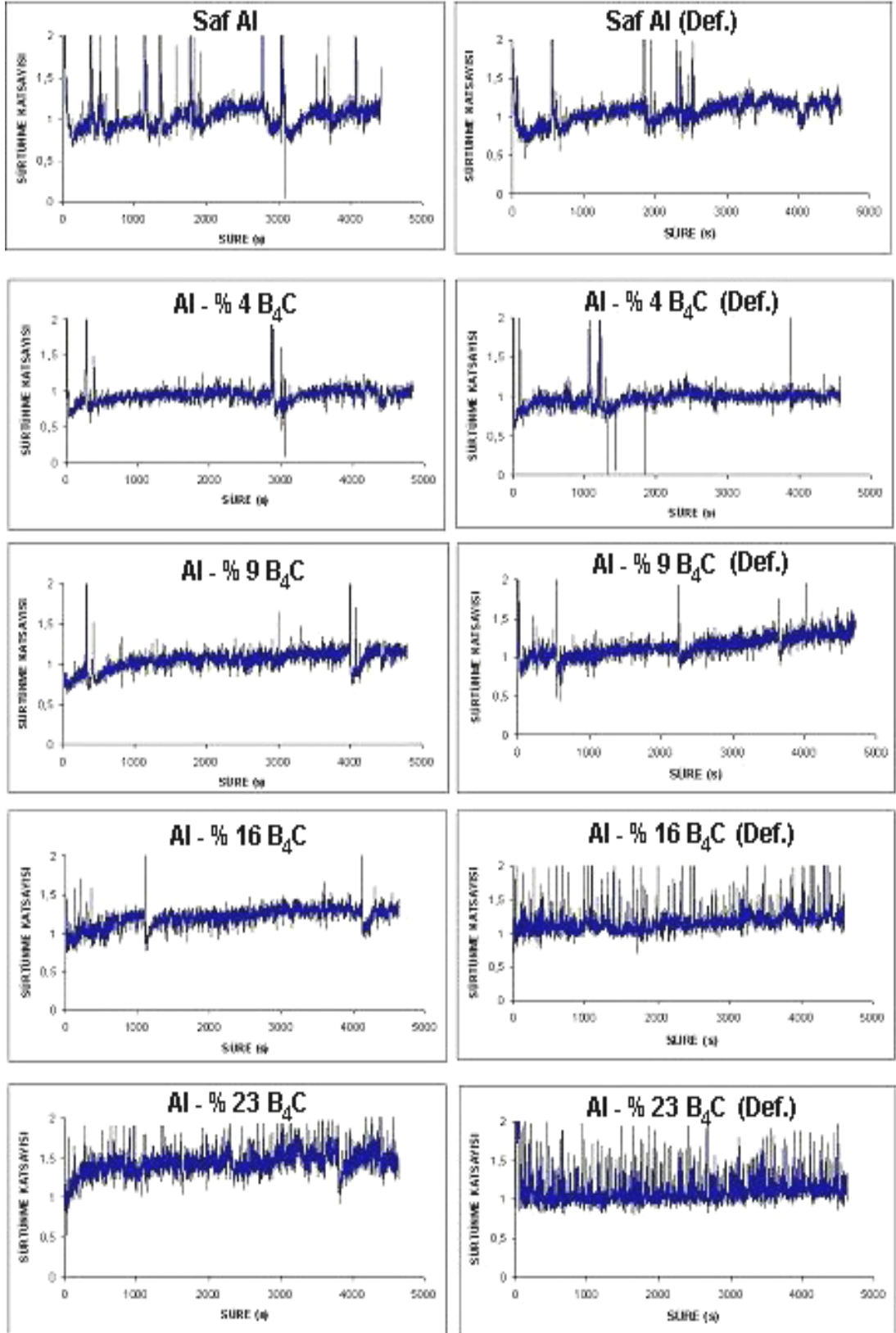
Ek B 2 Devam İncelenen kompozitlerin yüzeyinde oluşan nma izlerinin stereo mikroskop görüntüleri

	% 100 Al matris		% 50 Al - % 50 Al12Si matris	
	Saf Al	% 23 B ₄ C	% 9 B ₄ C	% 9 B ₄ C (Def.)
GSE				
İEG				

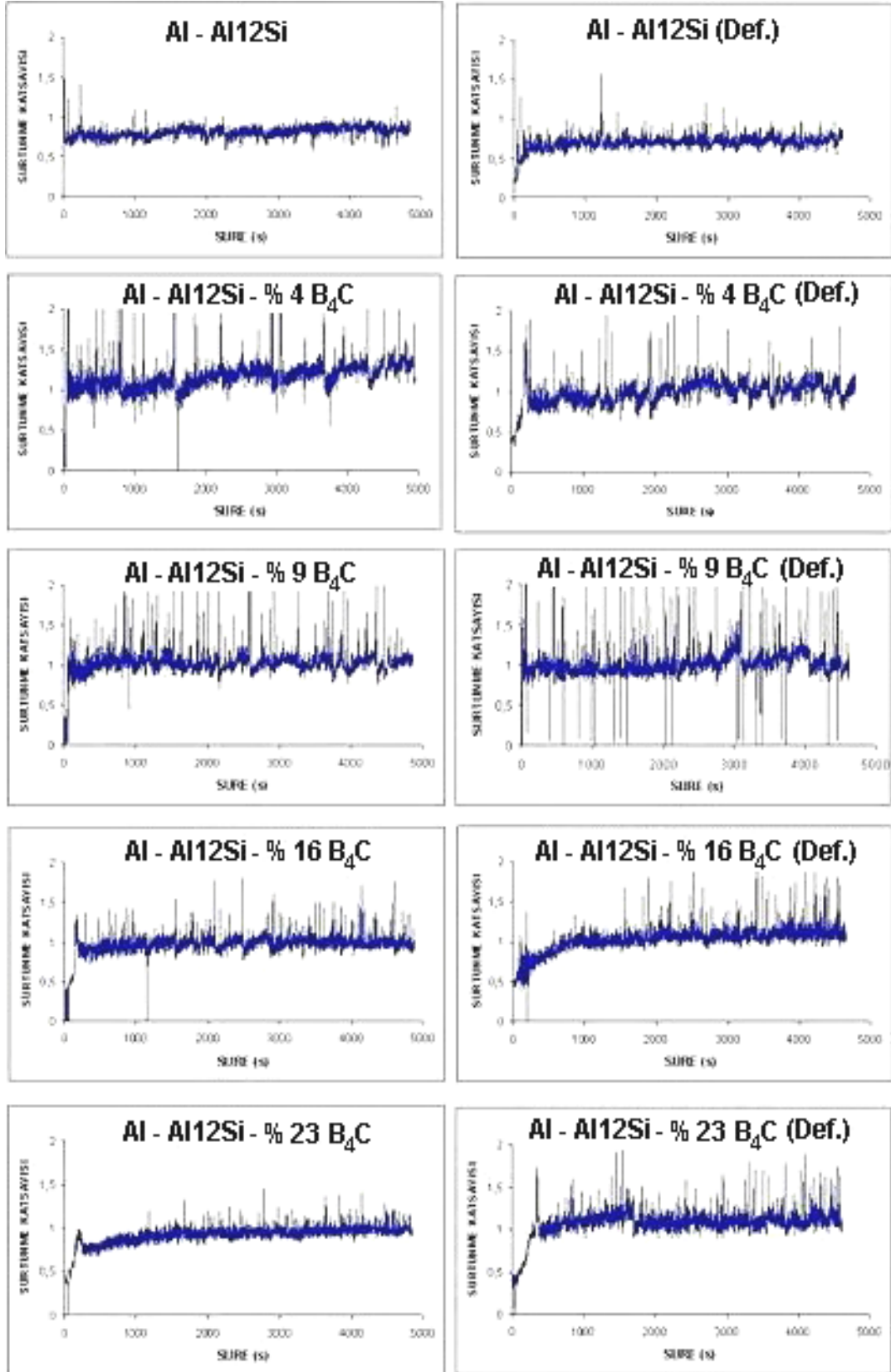
Ek B 3 İncelenen kompozitlerin aşınmış yüzeylerine ait taramalı elektron mikroskopu görüntüleri

Takviye	% 100 Al matris		% 50 Al - % 50 Al ₂ Si matris	
B ₄ C (%)	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma	Ara Deformasyon Yok	Ara Deformasyon % 20 basma
0				
4				
9				
16				
23				

Ek B 4 Aşınma deneylerinde aşındırıcı olarak kullanılan Al₂O₃ bilyenin temas yüzeylerine ait fotoğraflar



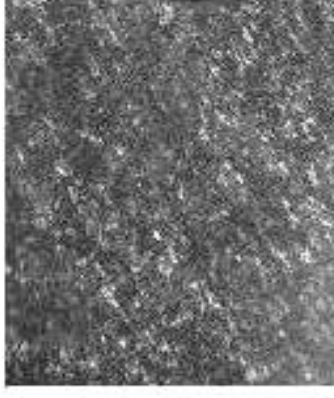
Ek B5. Matrisi alüminyum olan kompozitlerde sürtünme katsayısının aşınma deneyi süresince değişimi



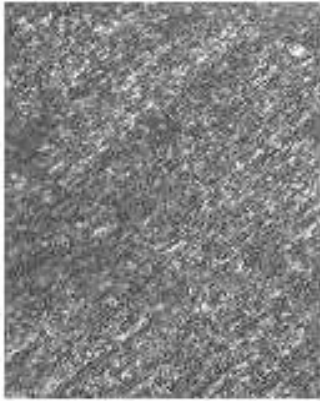
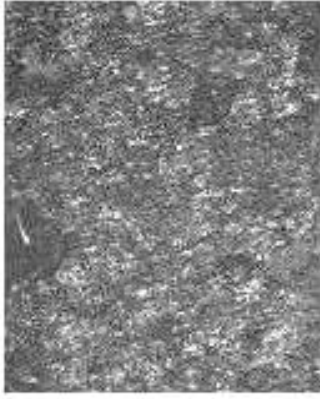
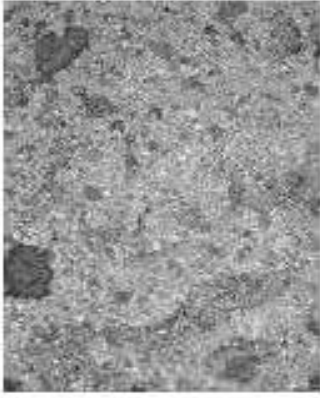
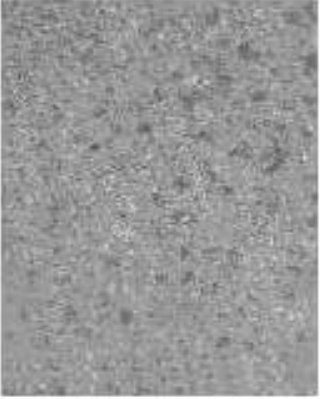
Ek B 6 Matrisi $Al - Al_{12}Si$ olan kompozitlerde sürtünme katsayısının aşınma deneyi süresince değişimi

Kompozit Adı	Ağırlık kaybı (mg)					Yüzey alan (mm ²)	Ağırlık Kaybı / Yüzey alanı (mg/mm ²)				
	3 saat	6 saat	9 saat	12 saat	24 saat		3 s	6 s	9 s	12 s	24 s
Saf Al	0,7	2	2,5	3,6	13,1	450,168	0,001	0,004	0,005	0,008	0,029
Al – Al12Si – % 9 B ₄ C	5,6	8,4	14,8	19,6	33,2	101,336	0,055	0,0828	0,146	0,193	0,327
Al – Al12Si – % 9 B ₄ C (deformasyonu)	0,6	0,36	0,86	1,32	2,22	119,190	0,005	0,030	0,072	0,110	0,186
Al – % 23 B ₄ C	13,7	24,3	34	47,2	74	96,290	0,142	0,252	0,353	0,490	0,786

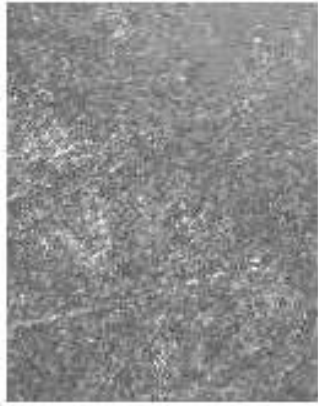
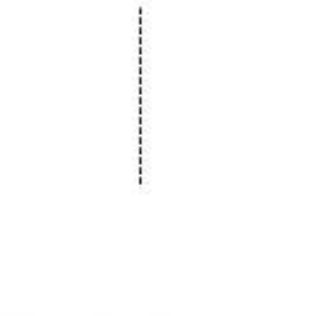
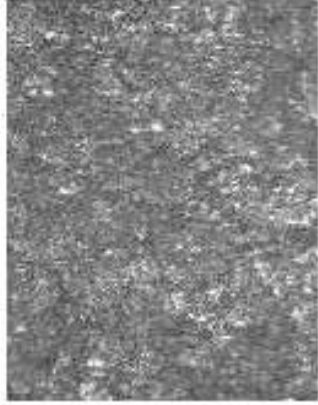
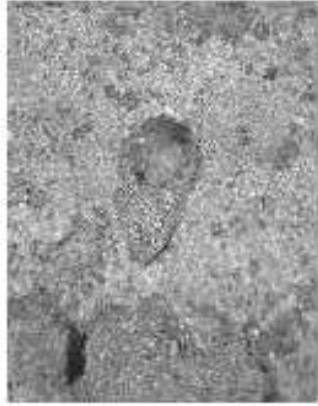
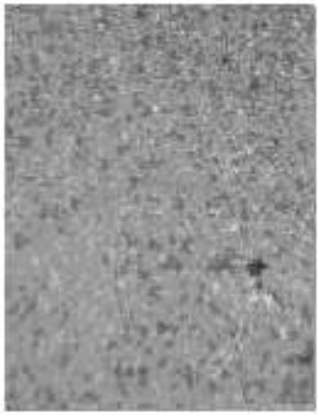
Ek C 1. Korozyon deney sonuçları

Normal Mikroskop	Matris: % 100 Al B ₄ C: Yok Deformasyon: Yok	Matris: % 100 Al B ₄ C: % 23 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: % 20 basma
				
Stereo Mikroskop				

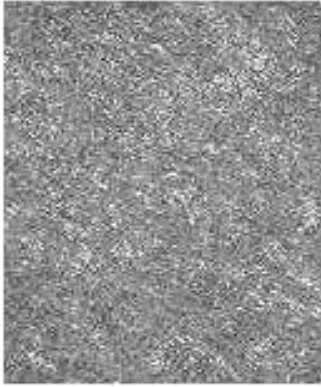
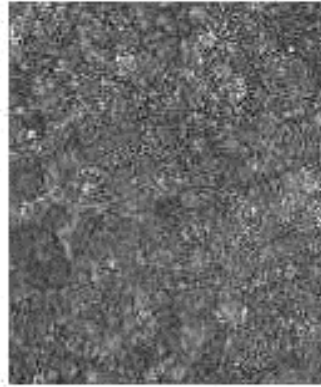
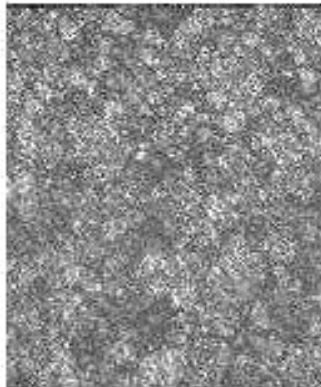
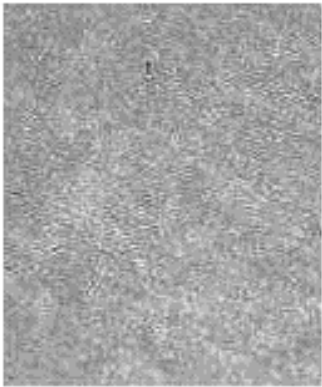
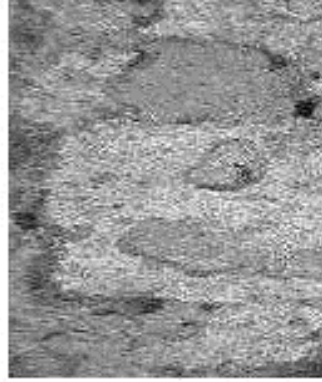
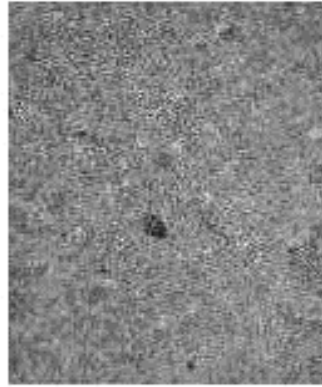
Ek C 2 3 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görüntümleri

Normal Mikroskop	Matris: % 100 Al B ₄ C: Yok Deformasyon: Yok	Matris: % 100 Al B ₄ C: % 23 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: % 20 basma
				
Stereo Mikroskop				

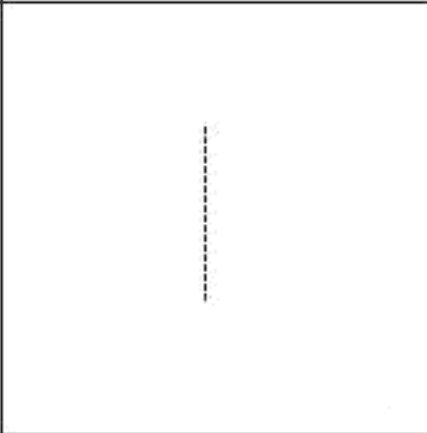
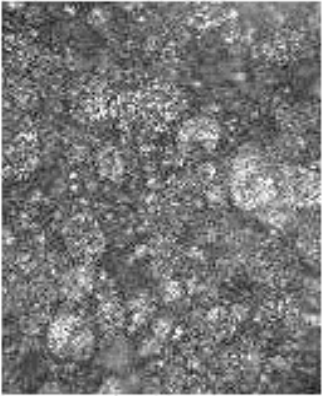
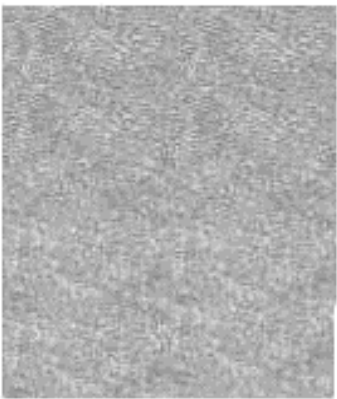
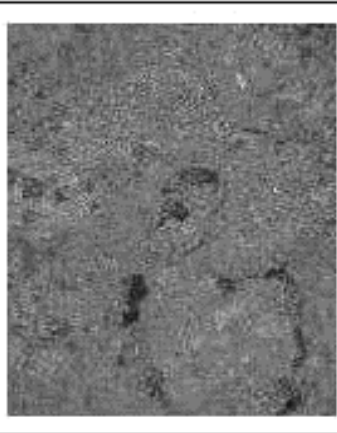
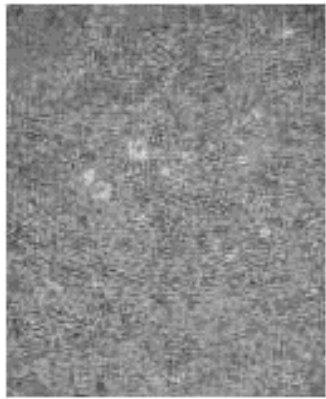
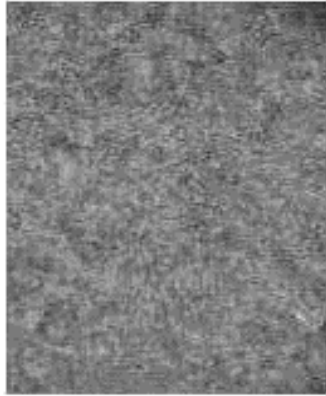
Ek C.3 6 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görünümleri

Normal Mikroskop	Matris: % 100 Al B ₄ C: Yok Deformasyon: Yok	Matris: % 100 Al B ₄ C: % 23 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: % 20 basma
				
Stereo Mikroskop				

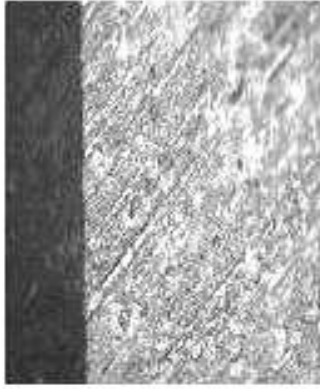
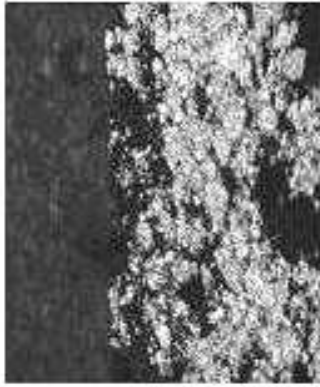
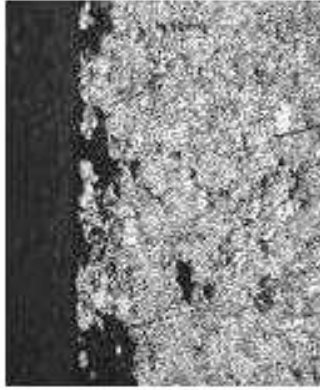
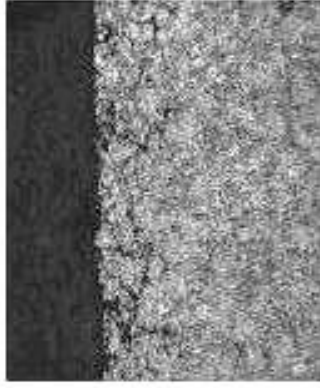
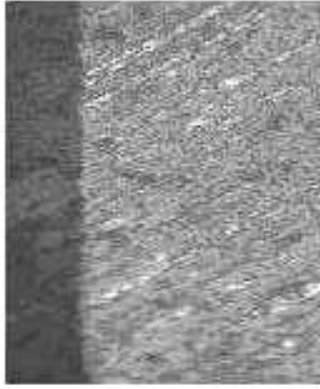
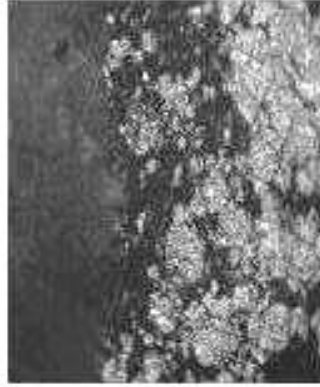
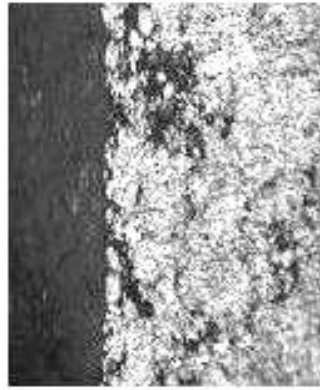
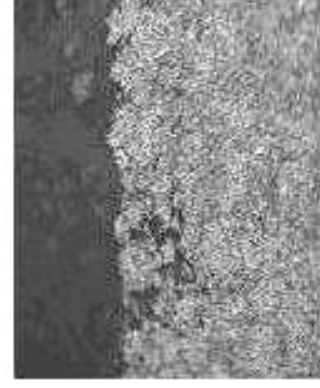
Ek C 4 9 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görüntüleri

Normal Mikroskop	Matris: % 100 Al B ₄ C: Yok Deformasyon: Yok	Matris: % 100 Al B ₄ C: % 23 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: % 20 basma
				
Stereo Mikroskop				

Ek C.5. 12 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görünümleri

Normal Mikroskop	Matris: % 100 Al B ₄ C: Yok Deformasyon: Yok	Matris: % 100 Al B ₄ C: % 23 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: % 20 basma
				
Stereo Mikroskop				

Ek C 6 24 saat süreyle korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin yüzey görüntümleri

10 X	Matris: % 100 Al B ₄ C: Yok Deformasyon: Yok	Matris: % 100 Al B ₄ C: % 23 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: Yok	Matris: % 50 Al - % 50 Al12Si B ₄ C: % 9 Deformasyon: % 20 basma
				
20 X				

Ek C 7. 24 saat süreyle korozyon deneyleri netabı tutulan numunelerin kesit mikroyapıları

ÖZGEÇMİŞ

Gürkan AKI N 1980 yılında Sakarya'da doğmuştur. Orta öğrenimini Sakarya Anadolu Meslek Lisesi'nde tamamladıktan sonra girdiği Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında bölüm birincisi olarak mezun olmuştur. Aynı yıl İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Programı Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış olup 2006 Ocak ayı itibariyle bu programdan mezun olma durumundadır. Gürkan AKI N Aralık 2004'den bu yana Türk Hava Yolları A O Mühendislik Başkanlığı'nda Yapısal Sistemler Mühendisi olarak çalışmaktadır.