

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN BASINÇSIZ SİNERLEME İLE  
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Feyzi Emrah BAŞAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**2011**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN BASINÇSIZ SİNERLEME İLE  
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Feyzi Emrah BAŞAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**Bu araştırma, Akdeniz Üniversitesi Araştırma projeleri Yönetim Birimi  
tarafından 2011.02.0121.010 numaralı proje ile desteklenmiştir.**

**2011**

## ÖZET

### ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN BASINÇSIZ SİNERLEME İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

**Feyzi Emrah BAŞAR**

**Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU**

**Temmuz 2011, 99 Sayfa**

Bu çalışmada  $TiB_2$  parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin basınçsız sinterleme ile üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Matris malzemesi olarak alüminyum-%4 bakır alaşımı kullanılmıştır. Hacimce %10, 15, 20 ve 30 oranlarında  $TiB_2$  içeren ve toz formunda olan başlangıç malzemeleri karıştırıldıktan sonra soğuk preste 800 MPa basınçta preslenmiştir. Basınçsız sinterleme işlemi nitrojen atmosferi altında 620 °C'de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kompozitler yoğunluk ölçümlerine, mikroyapı incelemelerine, 3 nokta eğme, sertlik ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Çökelti sertleştirme işleminden sonra aynı testler tekrarlanmıştır.

Katkısız numune ısıtma işlem sonrasında en yüksek 940 MPa 3 nokta eğme mukavemetine, % 28 uzama ve 100 HB10 sertlik değerine ulaşmıştır. Aşınma oranı katkısız numunede  $12,16 \pm 3,16 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{N.m}$  olmuştur. En düşük aşınma oranına % 20  $TiB_2$  içeren kompozitte ulaşılmıştır. Bu kompozit 867 MPa mukavemet, %7,41 uzama ve 130 HB10 sertlik göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Toz Metalurjisi, Sinterleme, Alüminyum Matrisli Kompozitler, Metal Matrisli Kompozitler, TiB<sub>2</sub>

JÜRİ: Prof. Dr. Narin ÜNAL

Yrd. Doç. Dr. H. Erdem ÇAMURLU

Yrd. Doç Dr. N. Uğur KOÇKAL

## **ABSTRACT**

### **PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES VIA PRESSURELESS SINTERING**

**Feyzi Emrah BAŞAR**

**M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering**

**Adviser: Asst. Prof. Hasan Erdem ÇAMURLU**

**Jul 2011, 99 pages**

In this thesis, pressureless sintering and characterization of TiB<sub>2</sub> particulate reinforced aluminium matrix composites were studied. As a matrix material 96% Al – 4% Cu alloy was used. Al-TiB<sub>2</sub> powder mixtures containing 10%, 15%, 20% and 30% TiB<sub>2</sub> by volume were prepared and were cold pressed uniaxially at 800 MPa. Pressureless sintering was performed in a nitrogen gas atmosphere at 620 °C. Obtained composites were subjected to density measurements, microstructural examinations, 3 point bending tests, hardness tests and wear resistance tests. Same tests were repeated after age hardening of the composites.

After age hardening treatment, unreinforced sample presented a maximum 3 point bending strength of 940 MPa, 28% strain and 100 HB10 hardness value. Wear rate was  $12,16 \pm 3,16 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{N.m}$  in the unreinforced sample. The least wear rate was seen in 20% TiB<sub>2</sub> containing samples. This composite presented 867 MPa bending strength, 7,41% strain and 130 HB10 hardness.

**KEY WORDS:** Powder Metallurgy, Sintering, Aluminum Matrix Composites, Metal, Matrix Composites, TiB<sub>2</sub>

**COMMITTEE:** Prof. Dr. Narin ÜNAL

Asst. Prof. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU

Asst. Prof. Dr. N. Uğur KOÇKAL

## ÖNSÖZ

Mühendislik daha dayanıklı, daha hafif ve daha ucuz yapma sanatıdır. Mühendisliğin malzeme ile ilgilenen kolları ise bu arayışa cevap vermek için ortaya çıkmıştır. Tarih boyunca karşılaşılan problemlere çözümler geliştiren malzeme mühendisleri, günümüzde de bu görevlerinden vazgeçmemiş, yüksek teknolojinin nimetlerinden faydalanarak mühendisliğin işine yarayacak malzemeleri geliştirme görevlerine devam etmektedirler.

Son zamanlarda doğanın sunduğu doğal malzemelerin ve elementlerin fiziksel sınırlarına yaklaşıldığı için malzeme mühendisliği bu sınırları aşmanın yollarını aramıştır. Sınırları aşmanın yolu kompozit malzemelerden geçmektedir. Çelik kadar sert plastik kadar esnek ve hafif malzemeler en ucuz şekilde kompozit malzemelerden üretilebilir.

Kompozitler ise aralarında çeşitli gruplara bölünmektedir ve bu alanda öne çıkan gruplardan en önemlilerinden biri metal matrisli kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitler olduğu metalin özelliklerini korurken içine koyulan takviye elemanın özelliklerini de malzemeye yansıtmaktadır. Hafiflik söz konusu olduğu için metal matrisli kompozitlerin en çok çalışılan kolu da alüminyum matrisli kompozitlerdir.

Bu çalışma kapsamında alüminyum matrisli kompozitlerin son derece sert ve aşınmaya dayanıklı olan  $TiB_2$  seramik tozuyla basınçsız sinterleme yoluyla takviyelendirilmesi incelenmiştir. Ortaya hafif, her açıdan dayanıklı ve görece ucuz bir malzeme çıkmıştır.

Bana bu konuda çalışma olanağı veren, yüksek lisans çalışmam sırasında bana göstermiş olduğu destek ve deneysel çalışmalarım sırasındaki yardımlarından dolayı danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan Erdem ÇAMURLU'ya, tezim süresince destek ve yorumlarını esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Narin ÜNAL'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımın laboratuvar kısmında bana her türlü desteği sağladıkları

için Yrd. Doç. Dr. N. Uğur KOÇKAL'a ve Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederim.

Laboratuar ve yazım çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Mak. Müh Tarık KÖMÜ'ye, Mak. Müh Hatice ÖZER'e, Mak. Müh Özgün ERDEM'e ve Onur AYDEMİR'e maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma; tez çalışmam süresince göstermiş oldukları her türlü anlayış ve yardımlardan dolayı, Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Bu araştırma, Akdeniz Üniversitesi Araştırma projeleri Yönetim Birimi tarafından 2011.02.0121.010 numaralı proje ile desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi ve Fen Bilimleri Enstitüsü yetkililerine ayrıca teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK TARAMASI ve KURAMSAL BİLGİLER .....	3
2.1. Kompozit Malzemeler .....	3
2.2. Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	6
2.3. Alüminyum Matrisli Kompozitler (ALMK) .....	11
2.4. Konu ile İlgili Önceki Çalışmalar .....	14
2.5. ALMK ve MMK Üretim Yöntemleri .....	18
2.5.1. Karıştırma Döküm .....	19
2.5.2. Toz metalurjisi yöntemleri .....	20
2.5.3. Katı faz sinterleme .....	21
2.5.4. Basınçsız sinterleme .....	22
2.5.5. Basınçlı sinterleme .....	24
2.5.6. Sıvı faz sinterleme.....	26
2.6. Al-Cu Faz Sistemi .....	29
2.7. Çökelti Sertleştirilmesi İşlemi .....	31
2.8. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanları .....	35
3. DENEYSEL YÖNTEM .....	42
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler .....	42
3.2. Deneylerde Kullanılan Donanım.....	44
3.3. Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı .....	57
3.3.1. Toz karışımlarının hazırlanması .....	57
3.3.2. Tozların sıkıştırılması .....	58
3.3.3. Sinterleme aşaması .....	59

3.3.4. Çökelti sertleştirmesi ısıl işlemi .....	60
3.3.5. Analizler ve testler .....	61
3.3.6. Yoğunluk ölçümleri .....	63
3.3.7. Aşınma testi ve ölçümleri .....	64
4. BULGULAR VE DEğERLENDİRME .....	65
4.1. Katkısız Numunler .....	65
4.2. %10 Katkılı Numuneler .....	70
4.3. %15 Katkılı Numuneler .....	75
4.4. %20 Katkılı Numuneler .....	75
4.5. %30 Katkılı Numuneler .....	81
5. SONUÇLAR .....	86
6. KAYNAKLAR .....	95
ÖZGEÇMİŞ	

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

%	Yüzde
~	Yaklaşık
<	Küçüktür
>	Büyüktür
±	Artı eksi
a	Parçacık çapı
Al	Alüminyum
B	Bor
b	En
C	Karbon
C, °C	Santigrad derece
cm	Santimetre
cm <sup>3</sup>	Santimertreküp
Cu	Bakır
Dak	Dakika
D	Orta noktadaki eğilme miktarı
D	Numunenin kalınlığı
E <sub>f</sub>	Takviye elemanının elastiklik modülü
E <sub>m</sub>	Matris malzemesinin elastiklik modülü
Fe	Demir
g, gr	Gram
GPa	Gigapascal
H	Yükseklik
HB10	Brinell sertlik değeri
HV	Vickers sertlik değeri
K	İkincil faz içermeyen Al Çözeltisi
Kg	Kilogram
KJ	Kilojul
Km	Kilometre
kN	Kilonewton

L	Boy
Li	Lityum
Lt	Litre
M	Metre
Mg	Magnezyum
Mm	Milimetre
Mo	Molibdenum
MPa	Megapaskal
N	Newton
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
O	Oksijen
Psi	İnçkare başına
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
TiB <sub>2</sub>	Titanyum Diborür
W	Volfram
W	Watt
X	Boyun çapı
X <sub>c</sub>	Kompozit malzemenin herhangi bir özelliği
X <sub>f</sub>	Takviye elemanının herhangi bir özelliği
X <sub>m</sub>	Matris malzemesinin herhangi bir özelliği
Zr	Zirkonyum
$\gamma_{lv}$	Sıvı katı arasındaki yüzey enerjisi
$\gamma_{sl}$	Sıvı yüzey enerjisi
$\gamma_{sv}$	Katı yüzey enerjisi
E	Eğilme gerilimi
$\Theta$	Islatma açısı
Mm	Mikrometre
$\mu\text{m}^2$	Mikrometrekare
$\Sigma$	Gerilme
$v_f$	Takviye elemanının hacimce yüzdesi

$V_m$

Matris malzemesinin hacimce yüzdesi

### **Kısaltmalar**

ALMK

Alüminyum matrisli kompozit

ASTM

Amerikan test ve malzeme birliği

MMK

Metal matrisli kompozit

XRD

X ışını difraksiyonu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Doğal kompozitlerden odun ve mikroskopik yapısı (SHACKELFORD 1998) .....	4
Şekil 2.2 A- Lif yönünde ve lif yönüne dik elastiklik modülünün değişimi B- Lif yönüne dik uygulanan gerilme (SHACKELFORD 1998) .....	5
Şekil 2.3 MMK takviye türleri sırasıyla kesintisiz uzun iplikçikler, sakalcıklar veya kısa iplikçikler, parçacıklar (KAINER 2006).....	8
Şekil 2.4 Bir yüzeye damlatılan sıvı metal (NIKOLOPOULOS 1987).....	13
Şekil 2.5 Islatma açısının metal üzerine etkisi (AGUILAR-SANTILLAN 2008).....	14
Şekil 2.6 Das ve arkadaşlarının elde ettiği yaşlanma verileri (DAS 2006).....	16
Şekil 2.7 MMK üretim yöntemleri (CLYNE 2001).....	18
Şekil 2.8 Sinterlemenin aşamaları (GROOVER 2007) .....	21
Şekil 2.9 Herhangi bir çekme olamadan boyun oluşumunu gösteren bu şekilde “a” parçacık çapıyken, “x” boyun çapıdır (KANG 2005).....	22
Şekil 2.10 Sıvı faz sinterlemesinde mikroyapısal değişimler (GERMAN 1996) ....	27
Şekil 2.11 W parçacıkları arasında bağlama görevi yapan Cu (KANG 2005) .....	28
Şekil 2.12 Al-Cu faz diyagramının Al tarafı.....	30
Şekil 2.13 Yavaş soğuma sonucunda tane sınırlarında ikincil faz yığılması (SHACKELFORD 1998).....	32
Şekil 2.14 Çökelti sertleştirme işlemi (SHACKELFORD 1998).....	33
Şekil 2.15 Aşırı yaşlandırmanın mikroyapıya etkisi (SHACKELFORD 1998).....	33
Şekil 2.16 Yaşlandırma süresinin üzerine etkisi (ASKELAND 2008).....	34
Şekil 2.17 Taşıtların ağırlığının yakıt tüketimine etkisi (ÜNAL 1988).....	37
Şekil 2.18 F-16 Gövde Arkası Kanatları (MIRACLE).....	39
Şekil 2.19 Yakıt Kapağı Kapakları (MIRACLE).....	39
Şekil 2.20 Helikopter Rotor Ceketleri (MIRACLE) .....	40
Şekil 2.21 Spor ve hobi amaçlı ALMK kullanımı (FROYEN 1994).....	40
Şekil 3.1 (a) deneylerde kullanılan $TiB_2$ tozunun optik mikroskop görüntüsü, (b) deneylerde kullanılan alüminyum tozunun elektron mikroskobu görüntüsü, (c) bakır tozunun elektron mikroskobu görüntüsü (KARAKAŞ 2007) .....	43
Şekil 3.2 Kare Kalıp.....	44

Şekil 3.3 Kardeşler Makine 50 Tonluk Pres .....	45
Şekil 3.4 Beton test presi 5000kN.....	46
Şekil 3.5 Protherm Kül Fırını.....	48
Şekil 3.6 Fırın içi sıcaklık dağılım grafiği .....	49
Şekil 3.7 Metkon Metacut M250 Testere.....	51
Şekil 3.8 Metkon Polisaj Cihazı (Zımpara).....	52
Şekil 3.9 Metkon Polisaj Cihazı (Parlatma).....	52
Şekil 3.10 Sertlik ölçüm cihazı .....	53
Şekil 3.11 Nikon Eclipse Işık Mikroskobu .....	54
Şekil 3.12 Shimadzu AG-IJ Autograph (50 kN) test cihazı ve üç nokta eğme testi aparatu.....	55
Şekil 3.13 Üç nokta eğme testi düzeneğinin şematik olarak gösterimi (ANONİM-1 2000) .....	61
Şekil 3.14 Üç nokta eğme testinde numunede oluşan eğilmenin ve kırılma bölgesinin şematik gösterimi.....	62
Şekil 4.1 200 ve 500 büyütmede katkısız numunelerin mikroyapı fotoğrafı.....	65
Şekil 4.2 Isıl işlemlili ve ısıl işlemsiz katkısız numunelerin 3 nokta eğme mukavemet-% uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıl işlemlili numuneye aittir.).....	67
Şekil 4.3 Aşınma test süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değişimi.....	68
Şekil 4.4 Katkısız numunelerin aşınma izinin mikroyapı fotoğrafı .....	69
Şekil 4.5 Katkısız numunenin aşınma izi üzerinden alınmış kesit profili.....	69
Şekil 4.6 500 ve 1000 büyütmede %10 katkılı numunelerin mikroyapı fotoğrafı.....	70
Şekil 4.7 Isıl işlemlili ve ısıl işlemsiz %10 katkılı numunelerin 3 nokta eğme mukavemet-% uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıl işlemlili numuneye aittir.).....	72
Şekil 4.8 Aşınma test süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değişimi.....	73
Şekil 4.9 %10 katkılı numunelerin aşınma testi sonrası mikroyapı fotoğrafı .....	74
Şekil 4.10 %10 katkılı numunenin aşınma izi üzerinden alınmış kesit profili.....	75
Şekil 4.11 500 ve 1000 büyütmede %20 katkılı numunelerin mikroyapı fotoğrafı...	76

Şekil 4.12 Isıl işlemlili ve ısıll işlemlisiz %20 katkıllı numunelerin 3 nokta eğme mukavemet % uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıll işlemlili numuneye aittir.) .....	78
Şekil 4.13 Aşınma test süresine bağıll olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değışimi.....	79
Şekil 4.14 %20 katkıllı numunelerin aşınma testi sonrası mikroyapı fotoğrafı .....	80
Şekil 4.15 %20 katkıllı numunenin aşınma izi üzerinden alınmış profil izi .....	80
Şekil 4.16 500 ve 1000 büyütmede %30 katkıllı numunelerin mikroyapı fotoğrafı...	81
Şekil 4.17 Isıl işlemlili ve ısıll işlemlisiz %30 katkıllı numunelerin 3 nokta eğme mukavemet - % uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıll işlemlili numuneye aittir.).....	83
Şekil 4.18 Aşınma test süresine bağıll olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değışimi.....	84
Şekil 4.19 %30 katkıllı numunelerin aşınma testi sonrası mikroyapı fotoğrafı .....	85
Şekil 5.1. Numunelerin sertlik değıerlerinin $TiB_2$ oranına göre değışimi .....	89
Şekil 5.2 Numunelerin üç nokta eğme mukavemeti değıerlerinin $TiB_2$ oranına göre değışimi .....	91
Şekil 5.3 Numunelerin gerinim değıerlerinin $TiB_2$ oranına göre değışimi.....	92
Şekil 5.4 Numunelerin gerilme-gerinim değıerlerinin $TiB_2$ oranına ve ısıll işlem durumuna göre değışimi.....	93
Şekil 5.5 Numunelerin katkı oranlarına göre aşınma oranları .....	94



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 MMK'larda kullanılan takviye malzemelerinin geometrileri görülme (CHAWLA 2001) .....	7
Çizelge 2.2 Bazı kompozit malzemelerde yüzey reaksiyonları(MITRA 1993).....	10
Çizelge 2.3 Alüminyumun genel özellikleri .....	11
Çizelge 2.4 Alüminyum alaşımları sınıflandırılması (ANONİM-2 1999) .....	12
Çizelge 2.5 sinterleme sırasında malzeme taşınım mekanizmaları (KANG 2005)	23
Çizelge 2.6 Bazı ALMK ve kullanım alanları (FROYEN 1994) .....	36
Çizelge 3.1 Hazırlanan 5mm x 12mm x 30mm ölçüsündeki numunelerin, hacimce % TiB <sub>2</sub> oranları ve bileşenlerinin ağırlıkları .....	57
Çizelge 4.1 Isıl işlemsiz (mavi), ısıl işlemlili (kırmızı) numune listesi .....	66
Çizelge 4.2 Isıl işlemsiz (mavi), ısıl işlemlili (kırmızı) numune listesi .....	71
Çizelge 4.3 Isıl işlemsiz (mavi), ısıl işlemlili (kırmızı) numune listesi .....	75
Çizelge 4.4 Isıl işlemsiz (mavi), ısıl işlemlili (kırmızı) numune listesi .....	77
Çizelge 4.5 Isıl işlemsiz (mavi), ısıl işlemlili (kırmızı) numune listesi .....	82
Çizelge 5.1. Numunelerin yoğunluk değerlerinin TiB <sub>2</sub> oranına göre değişimi .....	86
Çizelge 5.2 Üretilen kompozitlerin sertlik, 3 nokta eğme mukavemeti, % uzama ve aşınma oranları .....	88

## 1. GİRİŞ

İnsanlar var olduğu sürece, alet yapacak malzeme arayışı da var olmuştur. İlk olarak tahta, kemik gibi doğadan doğrudan elde edilebilen malzemeleri kullanan insanoğlu, zamanla doğal malzemelerin ihtiyaçlarını karşılamadığını fark etmiştir. Taş çağında kullanılan cilalı ve yontma taş malzemelerden sonra insanoğlu topraktan çıkan madenleri işlemeyi ve eriterek şekil vermeyi keşfetmiştir. Bakır ve kalay elde edildikten sonra saf halleri yumuşak olduğu için kullanımlarının sınırlı olduğu görülmüş ve sonrasında saf metaller birbirleriyle karıştırılarak alaşımlandırma yöntemi bulunmuştur. Tek başlarına hem yumuşak hem de atmosfer etkilerine açık olan bu metaller bir araya geldiklerinde korozyona dayanıklı gayet sert bir malzeme oluşturmaktadırlar.

Gerekli ocak teknolojileri geliştikten sonra insanlık demiri de işlemeyi öğrenmiş, bir miktar korozyona uğrasa da hem sert hem de dayanıklı olan bu metali çelik haline getirerek neredeyse her alanda kullanmışlardır. Çağlar içinde metalurji mühendisliği gelişme göstermiş ancak bütün bu gelişmeler malzemelerin mekanik sınırlarına dayanınca ve hafif fakat mukavemetli malzemelere olan ihtiyaç artınca, başka arayışlar ortaya çıkmıştır.

Son birkaç on yılda üzerindeki çalışmalar artmış olan kompozit malzemeler bu sınırları aşmanın yollarından biridir. Malzeme bilimi ve mühendisliğinin gelişmesi ile kompozitler alanında büyük bir atılım yapılmıştır. Kompozitler, temelde plastik ve metalin sünekliği ile seramiklerin sertliğini birleştirmiştir.

Metal matrisli kompozitler metallerin reaktifliği ve erime noktalarının yüksek olması nedeniyle geçmişte fazla çalışılmamış bir konudur. İçine konulan malzemelerin erime noktasının metalinkinden yüksek olması şartı da bir başka zorluktur. Ancak hafif, dayanıklı, aşınma dayanımı yüksek, gevrek olmayan sert metallerin üretilebilmesinin en kolay yollarından birisi metal matrisli kompozitlerdir.

Metal matrisli kompozitler ilk olarak 1980'li yıllarda otomobil sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraları fiyatları ucuzladıkça kullanım alanları artan metal matrisli kompozitler, havacılık sektöründe de önemli yer tutmaktadır.

Metal matrisli kompozitler arasında alüminyum matris malzemesi olarak öne çıkar. Alüminyumun sağlam yapısı, korozyon direnci, hafifliği ve erime noktasının düşük olması onu ideal bir matris malzemesi haline getirir. Çelik parçaların üçte biri ağırlığında olan alüminyum parçalar, kompozit haline getirilerek mekanik özellikleri çelikler kadar iyileştirilebilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin içine konulan seramikler de malzeme mühendisliğinin en önemli kollarından birini oluşturmaktadır. Alüminyum matris içinde yaygın olarak bor karbür, silisyum karbür gibi seramikler kullanılmıştır. Bu seramik malzemeler, monolitik olarak sert ancak gevreklerdir. Bir metalin içerisinde küçük parçacıklar veya fiberler halinde kullanıldıklarında, oluşan kompozite sertlik ve mukavemet sağlarlar.

Alüminyum matrisli kompozitlerin oluşturulmasında, üretilmesinde ve kullanılmasında bir takım problemler bulunmaktadır ve bu konulardaki çalışmalar devam etmektedir. Bu tezde titanyum diborür katkılı alüminyum matrisli kompozitlerin toz metalurjisi yoluyla üretimi ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Titanyum diborür, alüminyum ile reaksiyona girmediği için mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilememektedir.

## 2. KAYNAK TARAMASI ve KURAMSAL BİLGİLER

### 2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler özellikle ikinci dünya savaşı sırasında artık istenilen özellikleri yerine getiremeyen metal, seramik ve polimer sınıfı mühendislik malzemelerinin, karıştırılarak iki veya daha çok bileşenli yeni bir malzeme haline getirilmesiyle oluşturulmuştur.

Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanı olarak iki bileşenden oluşurlar. Takviye elemanları çeşitli morfolojilerde olabilir ve asıl görevleri rijitlik, sertlik gibi malzeme özelliklerini kompozite kazandırmaktır. Matris malzemesi ise takviye elemanlarını birbirine bağlayan ve kuvvet iletimini sağlayan plastik, metal vs olabilen elemandır.

Kompozit malzemelerin avantajları olduğu kadar dezavantajları da vardır. Avantajları:

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- Mükemmel aşınma direnci
- Yüksek ısı sığası
- İyi korozyon direnci
- İyi termal ve ısı iletkenliği
- Düşük ağırlık
- Estetik görünüm

Dezavantajları arasındaysa:

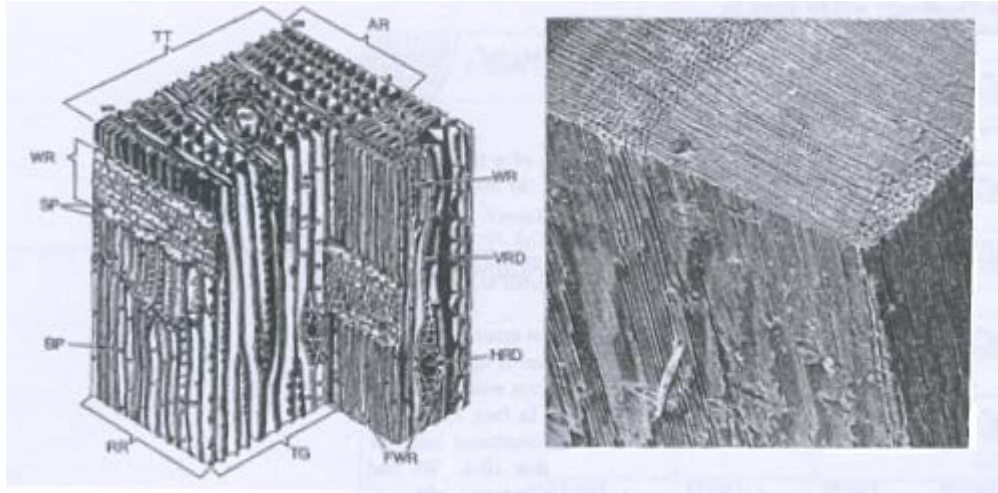
- Üretim güçlüğü
- Maliyet

- İşleme zorluğu
- Geri dönüşümünün olmaması veya sınırlı olması
- Gevreklik

sayılabilir (ŞAHİN 2000).

Kompozitler sınıflandırılırken matris fazının kimyasal veya fiziksel durumuna göre sınıflandırılırlar. Örneğin, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitler (SURAPPA 2003).

Kompozit malzemeler çok karışık proseslerle üretilebileceği gibi, her gün kullandığımız çok basit yollarla da üretilebilir. Örneğin odun, lignin ve hemiselülöz tarafından tutulan hücrelerden oluşan doğal bir kompozit malzemedir (Şekil 2.1). Aynı şekilde fiberglas ve beton da yapay birer kompozit malzemedir. Bunlar sıradan her gün kullanılacak malzemelerken, uçak uzay endüstrisinde kullanılan binlerce dolar değerinde kompozitler de üretilmektedir.



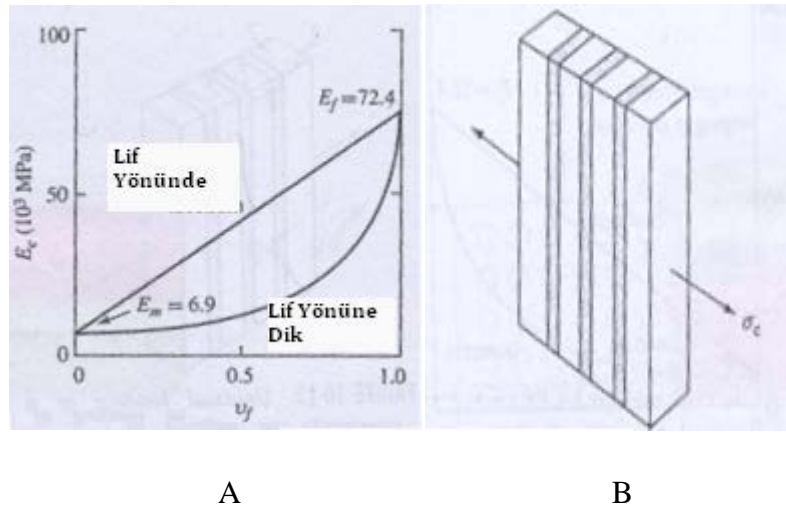
Şekil 2.1 Doğal kompozitlerden odun ve mikroskobik yapısı (SHACKELFORD 1998)

Kompozit malzemelerin özellikleri karışımlar kuralı ile bulunur. Bu özellik ister ısı genleşme kat sayısı olsun, ister elastiklik modülü olsun aşağıdaki formülle bulunabilir:

$$X_c = \vartheta_m X_m + \vartheta_f X_f$$

Burada  $X_c$  kompozitin herhangi bir özelliği iken,  $\vartheta_m$  matrisin hacimce yüzdesi,  $X_m$  matrisin herhangi bir özellik değeridir.  $\vartheta_f, X_f$  ise takviye elemanına ait değerlerdir.

Kompozit malzemelerde bir diğer dikkat edilmesi gereken husus, kesintisiz takviyeli elemanlarda kuvvetin uygulanma yönüdür. Uygulama yönü liflere dik olduğu takdirde takviye malzemesi matrisle birlikte kuvvetlerin taşınmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 2.2). Grafikte de anlaşıldığı üzere elastiklik modülü liflere dik olduğu takdirde, elastiklik modülündeki artış, kompozitteki lif oranına bağlı olarak doğrusal artan bir çizgi izlemektedir. Şekil 2.2 B de olduğu gibi lif yönüne dik bir kuvvet uygulandığında ise matris ve lifler birbirinden ayrılmaya zorlanmakta bu nedenle yük taşıma kapasitesi çok düşmektedir (SHACKELFORD 1998).



Şekil 2.2 A- Lif yönünde ve lif yönüne dik elastiklik modülünün değişimi B- Lif yönüne dik uygulanan gerilme (SHACKELFORD 1998)

Yukarıda bahsi geçen husus kesintili takviyeli kompozit malzemeler için geçerli değildir. Bu konu Bölüm 2.2 Metal matrisli kompozitler başlığında detaylandırılacaktır.

## 2.2. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozit çok geniş anlamda kullanılan bir terimdir. MMK'lar çok çeşitli parçacık ve mikro yapı sistemlerine sahip olabilirler. Genelde matrisleri metaliktir ve tek parça şeklindedir. Takviye malzemesi ise çoğu zaman parçacık veya fiber formunda seramik olmakla birlikte bazı örnekler bu duruma istisna oluşturabilir (CLYNE 2001).

Metal matrisli kompozitler, günümüzde pek çok kullanım alanı bulmakla beraber üretim tekniklerindeki gelişmelerden dolayı her geçen gün hayatlarımıza biraz daha girmektedirler. Pek çok araştırmacı hafif metal matrisleriyle çalışır ve hafif metallerle yapılan MMK'lar otomotiv, uçak gibi ağırlığın mühim olduğu alanlarda kendilerine uygulama alanı bulurlar (KAINER 2006).

Amerika Birleşik Devletleri, Savunma Bakanlığı, Kompozit Malzemeler El Kitabına göre, metal matrisli kompozitlerde kullanılan metal malzemeler erime sıcaklıklarına göre de sıralanabilir. Çalışma sıcaklığına göre bu elementlerden uygun olanı seçilmelidir. Mo, Nb ve W gibi metaller refrakter malzeme sınıfına girer ve çok yüksek sıcaklıklara dayanabilirler. Fe, Ni ve Cu gibi metaller ortalama sıcaklıklarda çalışabilirler ancak çok yüksek sıcaklıklarda eriyerek kullanılmaz hale gelirler. Al ve Mg ise düşük sıcaklık metalleridir. Yüksek ve ortalama sıcaklıklarda çalışamazlar (ANONİM-2 1999).

Metal matrisli kompozitlerin sıradan malzemelerden farklı kılan özellikleri seramiklerin yüksek mukavemet yüksek elastiklik modülünü metallerin ise tokluk ve sünekliğini birleştirmeleridir. Bütün metaller arasında diğerlerinden daha hafif olması, düşük sıcaklıkta erimesi ve atmosferik koşullardan etkilenmemesi sebebiyle MMK üretiminde alüminyumun yeri ayrıdır (ŞEN 2005). Kesintili parçacıklarla takviye

edilmiş alüminyumun özgül mukavemeti günümüzde kullanılmakta olan uzay çağı alaşımlarını aşarak neredeyse bu değeri ikiye katlamaktadır. Kompozit içerisindeki parçacık oranı arttırıldıkça özgül mukavemet artsa da kırılmalıkta artış, toklukta düşüş yaşanmaktadır. Bu nedenle en ideal malzeme özellikleri hacimce %25 oranında karıştırılan seramik ve alüminyumda elde edilmektedir(MIRACLE). Takviye elemanının tane boyutu bu oranı etkileyebilmektedir.

Metal matrisli kompozitlerin matrisleri bir metalden veya bir alaşımdan oluşur. Takviye malzemesi olarak parçacıklar, kısa iplikçik parçaları, sakalcıklar veya kesintisiz uzun iplikçikler kullanılır. Üç çeşit metal matrisli kompozit(MMK) malzeme vardır (Çizelge 2.1, Şekil 2.3):

- 1-) Parçacık takviyeli MMK
- 2-) Kısa iplikçik veya sakalcık takviyeli MMK
- 3-) Sürekli iplikçikler veya örgü takviyeli MMK.

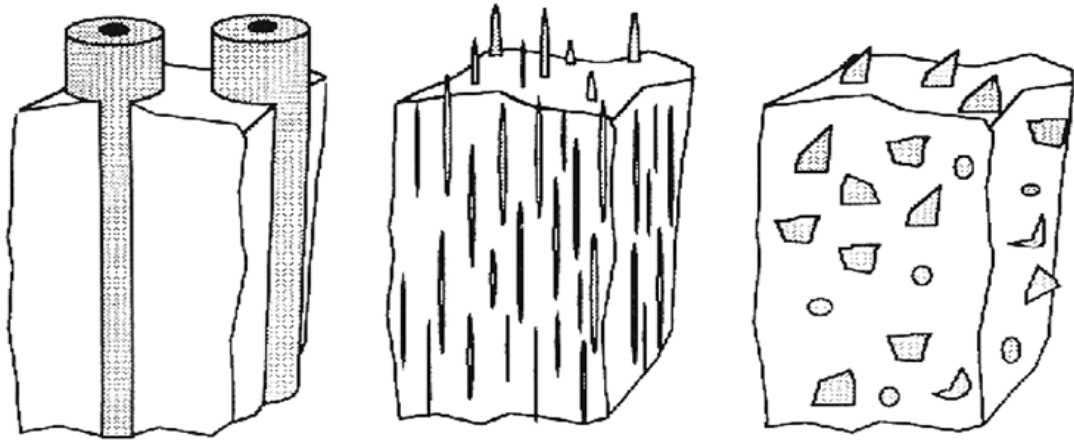
Çizelge 2.1 MMK’larda kullanılan takviye malzemelerinin geometrileri görülmektedir (CHAWLA 2001)

TİP	Boyut Oranı	Çap, $\mu\text{m}$	Örnekler
Parçacık	~1-4	1-25	<i>SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BN, B<sub>4</sub>C</i>
Kısa İplikçik veya Sakalcık	~10-1000	0,1-25	<i>SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub>, C</i>
Kesintisiz İplikçik	>1000	3-150	<i>SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C, B, W</i>

Katkı için kullanılan malzemeler yukarıda bahsedilen şekilde sınıflandırılabilir de katkı malzemelerinin ne zaman parçacık ne zaman iplikçik olduğunu tanımlamak gereklidir. Parçacık terimi bütün boyutları kabaca eşit olan metal matrisli kompozit



takviye elemanı için kullanılır. Bu nedenle parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler denildiğinde parçacık şekli küre, çubuk veya yaprak şeklinde olabilir. Önemli olan boyutlarının kabaca eşit olmasıdır. Kısa iplikçik veya sakalcık ise boyutları arasında 20 ve 100 arasında oran olan parçacıklara denir. Bu iki sınıf malzeme bir arada isimlendirilir ve bunlara “kesintili takviye” denir. Bunun sebebi parçacıkların çok yüksek karışma yüzdeleri dışında birbiriyle temas etmemesi ve matris malzemesinin tek parçalığını bozmamasıdır.



Şekil 2.3 MMK takviye türleri sırasıyla kesintisiz uzun iplikçikler, sakalcıklar veya kısa iplikçikler, parçacıklar (KAINER 2006)

Son sınıf takviye malzemeleri de sürekli iplikçikler veya örgülerdir. Bu ikisi birlikte “kesintisiz takviye” grubunu oluşturur. Bir malzemenin kesintisiz takviye olabilmesi için ilk olarak ortalama kesit çapı ve malzeme boyu arasındaki oranın çok büyük olması gerekir. Buna ek olarak kesintisiz takviye malzemelerin uzunlukları arttırıldığı halde malzeme özelliklerine bir etkide bulunmaması gerekir. Örneğin kesintisiz takviye elemanına sahip metal matrisli kompozitlerde elastiklik modülünün artışı takviye elemanının uzunluğuyla alakalı olmamalıdır. Kesintili takviye malzemeleri daha çok izotropik özellik gösteren kompozit malzemeler oluştururken kesintisiz takviyeli malzemeler anizotropik özellik göstererek pek çok uygulama için ideal davranış

gösterirler. Uygulamada ihtiyaç duyulan yönler göre örgü veya iplikçik sistemleri yerleştirilerek uygulamaya yönelik malzeme üretmek mümkündür (DONALDSON).

Metal matrisli kompozitlerde takviye malzemeleri ve takviye çeşidi ne olursa olsun takviye edilecek metalle takviye elemanın metal matrisiyle arasındaki fiziksel ve kimyasal bağın iyi olması gerekir. MMK'ya gelen kuvvetler parçacık ve matris tarafından birlikte taşınır. Bu nedenle matris malzemesi ve parçacık arasında oluşacak olan parçacık metal etkileşimi mukavemet özelliklerine doğrudan etki eder. Fiziksel kuvvetlerin önemi sadece fiber tipi uzun takviye elemanları kullanıldığında ortaya çıkar. Fiber tipi parçacıkların yüzeyindeki pürüzler ve metal malzemesi arasındaki ilişki bu tip kompozitlerde mukavemeti etkiler. Kimyasal bağ ise bütün kompozit tipleri için önemlidir. Kimyasal bağ matris malzemesi ve parçacık çiftinin doğrudan temasta olmasına ve elektron alış verişi yapmasına bağlıdır. Elektron alışverişinin çeşidi de bu bağın çeşidini belirler. Temas bölgesindeki atomik düzeydeki bağ çeşidi ve çökeltiler makroskopik ölçüdeki özellikleri doğrudan etkiler. Örneğin metalik bir bağ yönlenmeden bağımsızken, iyonik veya kovalent bağlar farklı yönlerde farklı dayanımlar gösterir.

Rahul Mitra ve Yashwant R. Mahajan yayınladıkları *Interfaces in Discontinuously Reinforced Metal-matrix Composites*'de Çizelge 2.2'yi yayınlamış, metal matrisi ile seramik parçacıkların arasında oluşan bileşikler listelemişlerdir (MITRA 1993).

Metal matrisli kompozitler simgelenirken önce alaşımı temsil eden kısaltma ardından da malzeme tipi, hacim yüzdesi ve seramik katkının türü ve şekli yazılır. Örneğin 6061AL/30v/o SiCp parçacık takviyeli SiC'ün %30 hacim oranında 6061 alüminyum alaşımına karıştırıldığını gösterir (ANONİM-2 1999).

Çizelge 2.2 Bazı kompozit malzemelerde yüzey reaksiyonları(MITRA 1993)

MATRİS	TAKVİYE	REAKSİYON SONUCU AÇIĞA ÇIKANLAR VE ÇÖKELTİLER
<b><u>ALÜMİNYUM</u></b>		
Al	SiC	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> , Al(Si)
Al-Mg	SiC	Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> , MgO
Al-Cu-Mg	SiC	CuMgAl <sub>2</sub> , MgO
Al	B <sub>4</sub> C	AlB <sub>2</sub> , Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>
Al-Mg	B <sub>4</sub> C	Al <sub>x</sub> Mg <sub>(1-x)</sub> B <sub>2</sub> , Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> , Al <sub>x</sub> (B-C-O) <sub>1-x</sub> , MgB <sub>6</sub>
Al	TiC	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> , Al <sub>3</sub> Ti
Al	TiB <sub>2</sub>	Reaksiyon Vermez
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Reaksiyon Vermez
Al-Mg	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Al-Cu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Al-Li	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	a-LiAlO <sub>2</sub> , LiAl <sub>5</sub> O <sub>8</sub> , LiO
<b><u>TİTANYUM</u></b>		
Ti	SiC	TiC, Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> , Ti <sub>x</sub> Si <sub>q</sub>
Ti	TiC	Ti <sub>2</sub> C
Ti-Al-V-Nb	TiC	Ti <sub>2</sub> (Al, Nb)C
Ti	TiB <sub>2</sub>	TiB
<b><u>MAGNEZYUM</u></b>		
Mg	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Mg	SiC	Mg <sub>2</sub> SiC
Mg-Li	SiC	Mg <sub>2</sub> SiLi <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
Mg-Li	SiO <sub>2</sub> kaplı SiC	Mg <sub>2</sub> SiLi <sub>2</sub> O
<b><u>İNTERMETALİKLER</u></b>		
NiAl	SiC	Ni <sub>x</sub> Si <sub>q</sub> , Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>
NiAl	TiB <sub>2</sub>	Reaksiyon Vermez
NiAl	TiC	Reaksiyon Vermez
Ni-Al-Cr-Zr-B	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Reaksiyon Vermez
Ni-Al-Cr-Zr-B	TiB <sub>2</sub>	(Ti,Zr)B <sub>2</sub>
Ni-Al-Cr-Zr-B	TiC	Zr ve B çökmesi
Al <sub>3</sub> Ti	TiC	Reaksiyon Vermez
TiAl/Ti <sub>3</sub> Al	TiB <sub>2</sub>	Reaksiyon Vermez
MoSi <sub>2</sub>	SiC	Reaksiyon Vermez
MoSi <sub>2</sub>	TiC	Reaksiyon Vermez
MoSi <sub>2</sub>	TiB <sub>2</sub>	Reaksiyon Vermez
MoSi <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO(g), Al(g)
Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	SiC	TiSi, TiC
Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	TiC	Reaksiyon Vermez

### 2.3. Alüminyum Matrisli Kompozitler (ALMK)

Bir metal matris olarak alüminyumun tercih edilmesinin sebebi; yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek dayanım, kolay işlenebilirlik, piyasadaki bulunabilirliği ve fiyatı gibi özellikleridir (Çizelge 2.3). Alüminyumun bu özellikleri alüminyum matrisli kompozit malzemelerde takviye malzemelerin yardımıyla daha da iyileştirilebilir.

Çizelge 2.3 Alüminyumun genel özellikleri

Özgül Ağırlığı gr/cm <sup>3</sup>	2,78
Ergime Sıcaklığı °C	660
Ergime Isısı KJ/kg	-390
Elastiklik Modülü GPa	66
Isı iletim katsayısı W/mK	230
Elektrik iletim katsayısı m/Ωmm <sup>2</sup>	40

Saf alüminyumun 660 °C'da eriyor olması düşük sıcaklıklarda sinterlenebilmelerini sağlar. Katı faz sinterlemeye de 660 °C'da, erimesi yardımcı olur. Alüminyum alaşımları genelde iki şekilde sınıflandırılır. Bu sınıflandırma dökme ve dövme olarak adlandırılır. Dövme alüminyum döküldükten sonra alüminyumun şekillendirilerek levha, çubuk, boru, tel haline getirilmesine denir.

Alüminyum alaşımları sınıflandırılırken dövme ürünleri dört rakamla dökme ürünleri de üç rakamla simgelenir. Çizelge 2.4'te bu sınıflandırma görülmektedir (ANONİM-2 1999).

Çizelge 2.4 Alüminyum alaşımları sınıflandırılması (ANONİM-2 1999)

Dövme Alüminyum	Dökme alüminyum	Ana Alaşımlama Elementleri	Çökelti Sertleştirilmesi Yapılabilirlik
1xxx	1xx	-	-
2xxx	2xx	Cu	Yapılabilir
3xxx	-	Mn	
-	3xx	Si+Mg; Si+Cu; Si+Mg+Cu	Yapılabilir
4xxx	4xx	Si	
5xxx	5xx	Mg	
6xxx	-	Mg+Si	Yapılabilir
7xxx	7xx	Zn	Yapılabilir
8xxx	-	Yukarıdakiler Hariç Herhangi bir metal	
	8xx	Sn	Yapılabilir

Alüminyum matrisli kompozitler de diğer metal matrisli kompozitler gibi farklı takviye türleriyle takviye edilebilirler. Parçacık takviyeli, kesintisiz uzun iplikçik takviyeli, sakalcık ve kısa iplikçik takviyeli olabilirler.

Araştırmalar alüminyum matrisli parçacık takviyeli kompozit malzemelerin pek çok faydalı özellik sergilediklerini göstermiştir. Yüksek rijitlik, aşınma dayanımı, titreşim sönümlenme ve sıradan alaşımlara göre düşük genleşme bu özellikler arasındadır. Diğer kompozit takviye çeşitleri içeren ALMK'nın üretim maliyetleri ve üretimlerindeki teknik zorluklar ilginin daha çok parçacık takviyeli ALMK'ya yönelmesine sebep olmuştur. (O'DONNELL, 2001)

ALMK üretimi yaygın kullanım yönünden iki şekilde sınıflandırılabilir:

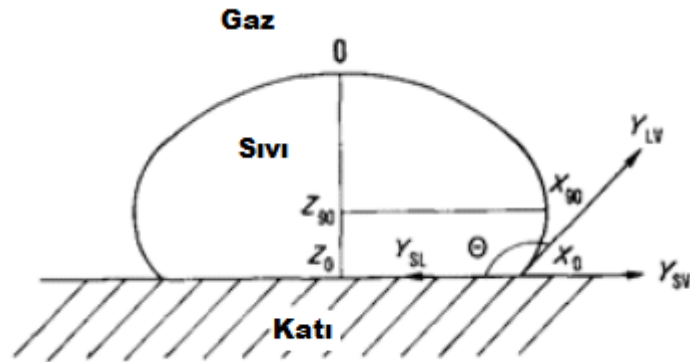
a) Katı faz üretim yöntemleri

b) Sıvı faz üretim yöntemleri

Üretim yöntemleri 2.3.1 başlığında detaylı bir şekilde incelenecektir.

Alüminyum ve seramik parçacık arasındaki ıslatma açısı, ALMK üretiminde kilit rol oynar. Islatma açısı  $90^{\circ}$ 'dan büyük olmadığı takdirde, elde edilecek alüminyum matrisli kompozitin dayanımı son derece düşük olacaktır (LLOYD 1994). Aşağıda ıslatma açısı ile ilgili şekil görülmektedir.

Islatma açısının tayininin en kolay yolu temiz parlatılmış bir seramik yüzeyine erimiş metalin damlatılmasıdır. Şekil 2.4'te bir yüzeye damlatılan sıvı ve yarattığı açılar görülmektedir.



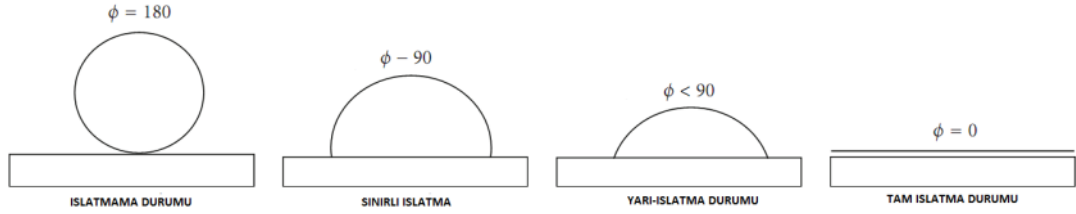
Şekil 2.4 Bir yüzeye damlatılan sıvı metal (NIKOLOPOULOS 1987)

Şekil 2.4'e göre, farklı ortamlar arasındaki yüzey enerjileri aşağıdaki bağıntı ile ilişkilendirilir,

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta$$

$\gamma_{sv}$  ve  $\gamma_{lv}$  sırasıyla katının ve sıvının yüzey enerjilerini temsil etmektedir.  $\gamma_{sl}$  ise sıvı katı arasındaki ara yüzey enerjisi ve  $\theta$  ise ıslatma açısıdır (NIKOLOPOULOS 1987).

Aşağıdaki şekilde ıslatma açısının sıvı metal üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 2.5 ıslatma açısının metal üzerine etkisi (AGUİLAR-SANTİLLAN 2008)

#### 2.4. Konu ile İlgili Önceki Çalışmalar

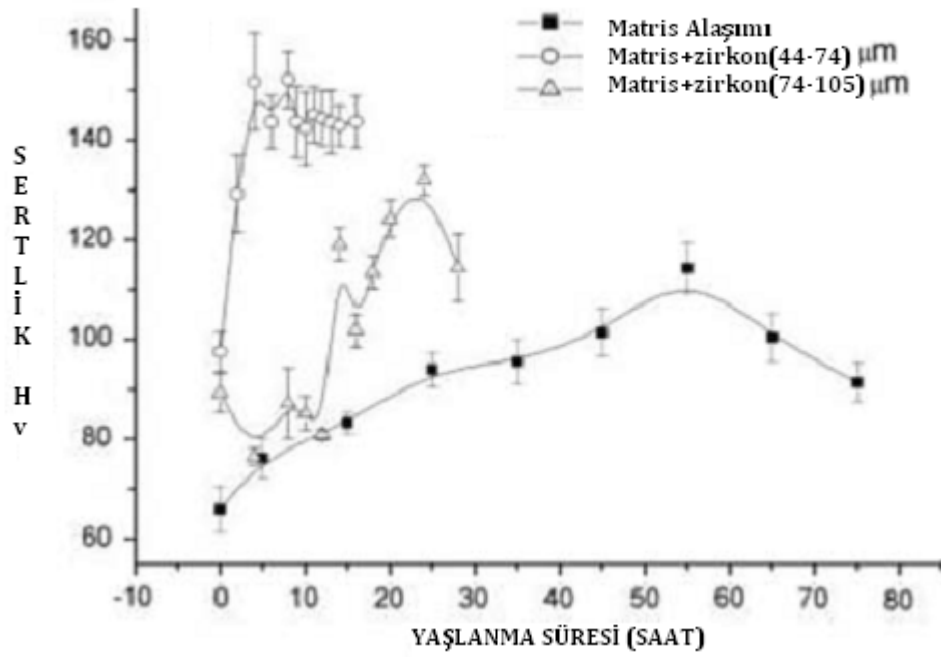
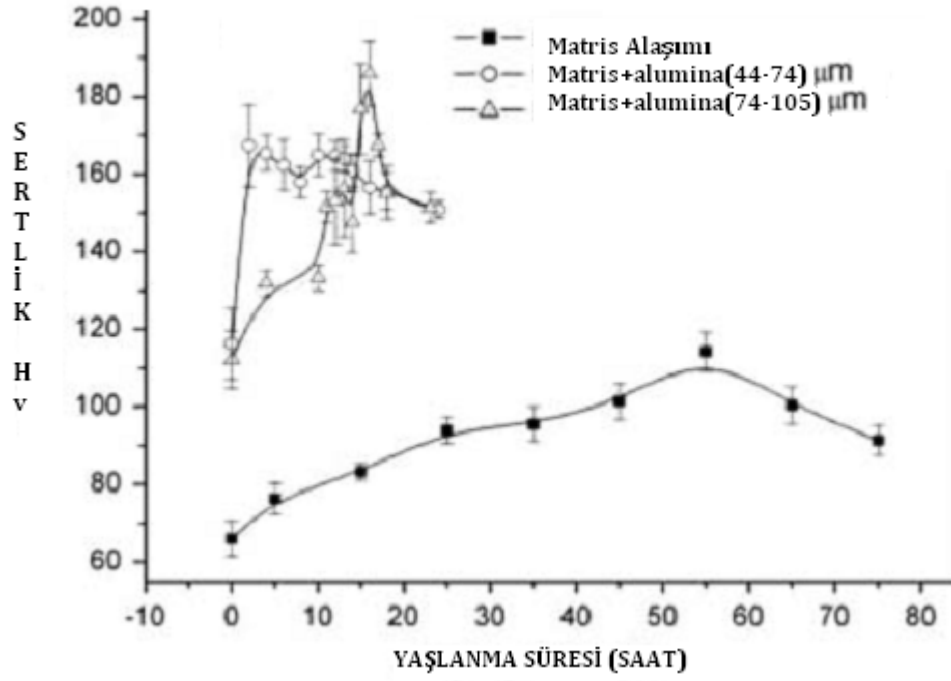
D.B. Miracle 2005 yılında yayınladığı Metal Matrix Composites-From Science to Technological Significance isimli makalesinde ilk keşfinden günümüze metal matrisli kompozitleri incelemiş, tarihsel gelişimleriyle birlikte üretim metotları, kullanım alanları ve gelecekte neler yapılabileceği konusunu işlemiştir. Metal matrisli kompozitlerin son yirmi yıl içerisinde laboratuvar tezgâhlarından inip mühendislikte geniş bir kullanım alanı bulduğuna dikkat çeken yazar, gelecekte de ikinci nesil MMK'ların geniş kullanım alanı bulabileceğini ve bunlar üzerine çalışma yapılması gerektiğini salık vermiştir (MIRACLE 2005).

Durmuş ve arkadaşları 2009'da yaptıkları çalışmada, çökeltme sertleştirilmesi uygulanmış AA7012 alüminyum alaşımlarında sertliğin mikro yapı ile değişimini incelemiştir. %0,1 Si, %0,15 Fe, %1,7 Cu, %0,3 Mn, %2,3 Mg, %5,9 Zn, %0,05 Cr içeren alüminyum alaşımıyla çalışan araştırmacılar 56 HB10 olan yaşlandırma öncesi sertliğin, 160 °C 'da 33 saat yaşlandırma sonrası 112 HB ye kadar çıktığını bulmuşlardır. Aşırı yaşlanma 40 saat sonunda gerçekleşmiştir (DURMUŞ 2009).

O'Donnel ve Looney yaptıkları çalışmada alüminyum matrisli kompozitlerin konvansiyonel toz metalurjisi metoduyla üretimini incelemiştir. Silisyum karbür ile çalışan araştırmacılar, toz hazırlamadan başlayarak kullanıma hazır parçaya kadar üretimin basamaklarına makalelerinde yer vermiştir. Toz hazırlama aşamasında 4 ve 2 dakikalık plastik bir kap içerisinde 4 ve 2 dakikalık karıştırma söz konusudur. Toz sıkıştırma genelde 235 MPa basınçta gerçekleşmiştir. Sinterleme azot gazı altında 617 °C'da gerçekleşmiştir. Sonuç olarak elde edilen numuneler çekme testlerine tabi tutulmuş ve numuneler arasında büyük farkların ortaya çıktığı görülmüştür. İç ve dış hataların çekme sırasında numune dayanımına büyük etkisi olmuştur (O'DONNEL 2001).

Das ve arkadaşları 2006'da yaptıkları çalışmada, %4,5 bakır katkılı alüminyum matrisli, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ZrSiO<sub>4</sub> takviyeli kompozitleri incelemiştir. Çalışma sonucunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ZrSiO<sub>4</sub> tozlarının karıştırma döküm yoluyla alüminyum içerisinde homojen dağıtılabildiğini, takviye elemanının tane boyutunun küçülmesinin elde edilen son malzemenin yaşlandırma yeteneğine olumlu bir etki yaptığını, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün karıştırma sırasında kırılmasından dolayı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı kompozitlerin diğerlerine göre daha kolay yaşlandığını bulmuşlardır. Yaşlanma süreleriyle ilgili grafikler Şekil 2.6'dadır (DAS 2006).





Şekil 2.6 Das ve arkadaşlarının elde ettiği yaşlanma verileri (DAS 2006)

Min ve arkadaşları 2004 yılındaki çalışmalarında silisyum karbür parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin yaşlanma davranışı ve yaşlanma kinetiğini

incelemişlerdir. Hacimce yüksek oranda silisyum karbür içeren kompozitlerin yaşlanma davranışının katkısız alaşıma göre zayıf olduğunu ve eklenen parçacık miktarı arttıkça yaşlanma süresinin kısaldığını bulmuşlardır (MIN 2004).

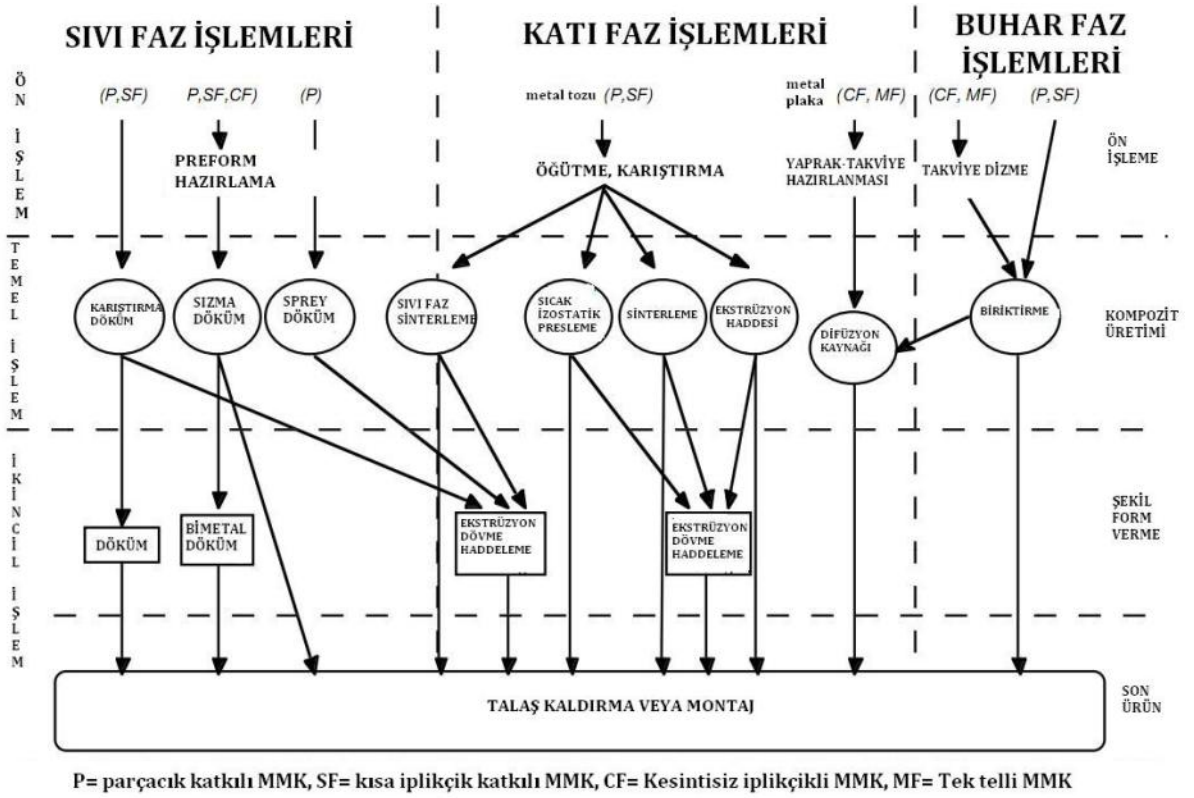
Schaffer ve arkadaşları 2001 yılında yaptıkları çalışmada alüminyum alaşımlarının sıvı faz sinterlemesi üzerine çalışmıştır. Alüminyum tozlarının yüzeyindeki film tabakasına da değinen araştırmacılar, alüminyum ile alaşımlandırılan üç alaşım elementinin testini yapmışlardır. Al-Cu, Al-Zn, Al-Sn alaşımlarının testlerini yapan araştırmacılar az miktarda magnezyum katılmasının alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasını spinel oluşturarak kıracağı, ideal sıvı faz sinterleme alaşımının da teorik yoğunluğun %99'una varan sinterleme sonrası yoğunluğa sahip Al-Sn-Mg sistemi olduğunu öne sürmüşlerdir (SCHAFFER 2001).

Tu ve arkadaşları  $TiB_2$  parçacıklarını bakır matrisine alarak, bakır matrisli kompozit malzeme üretmişlerdir. Bakırın erime sıcaklığının yüksek olmasından dolayı  $TiB_2$  oksijen, karbon gibi istenmeyen elementlerle bir miktar reaksiyona girmiştir. Sonuçta elde edilen kompozit, bakır alaşımından daha mukavim çıkmıştır.  $TiB_2$ 'nin elektrik iletkenliği yüksek olduğu için elektrik iletimi de ilk duruma göre kötü etkilenmemiştir (TU 2002).

Wang, Jiang Wang, Ma ve Zhao 2004'te yaptıkları çalışmada magnezyum matrisli  $TiB_2$  katkılı kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretim toz metalurjisi yoluyla yapılmıştır. Üretim esnasında  $TiB_2$  miktarı hacimce %10, %20, %30 olarak kullanılmış ve bu değerler için sertlik testleri yapılmıştır. Saf Mg için 32 HB olan sertlik, %10, %20, %30 için sırasıyla 45 HB, 66 HB, 90HB olmuştur. Artış miktarı saf Mg'ye göre sırasıyla %41, %106, %181 olarak gerçekleşmiştir. Mg ve  $TiB_2$  temas bölgelerinde EDS analizi sonucu oksijenin mevcut olduğu bulunmuştur. Tane sınırlarındaki oksijen MgO olarak bulunabilse de XRD analizlerinde bu bileşik bulunamamıştır. Bunun sebebi düşük MgO konsantrasyonlarıdır (WANG 2004).

## 2.5. ALMK ve MMK Üretim Yöntemleri

Şekil 2.7’de görüldüğü üzere MMK üretim yöntemleri elde edilmek istenen malzemeye göre değişiklik gösterir. Karıştırma döküm, sızma – sıkıştırma döküm, toz metalurjisi yöntemleri ve sıcak izostatik presleme bu yöntemlerin en yaygın kullanılanlarıdır. MMK üretim metodu istenilen özellik kadar ekonomiklik ve zamana göre de seçilir. Alüminyum matrisli kompozitler de şekilde gösterilen yöntemlerle üretilmektedir.



Şekil 2.7 MMK üretim yöntemleri (CLYNE 2001)

### 2.5.1. Karıştırma döküm

Karıştırma döküm yöntemi genelde erimiş bir metal içinde seramik parçaları atılarak yapılır. Parçacıklar yüksek enerjili karıştırma işlemleriyle veya başka uygun bir işlemle metal eriği içinde homojen olarak dağıtılır ve sıvı içerisinde asılı kalırlar (MIRACLE 2005).

Bu karıştırma metodunda soğuma ve katılaşma sırasında mikro yapıdaki düzensizlikler askıdaki parçacıkların kümelenmesine veya çökmesine yol açabilir. Bu düzensizlikler karıştırma esnasında ortaya çıkan sıvı-katı etkileşiminden dolayı ortaya çıkabilir (SURAPPA 2003). Karıştırma esnasında vakum uygulaması veya asal gaz eklenmesi eriyik metalin içerisine gazların girmesini engellemek için şarttır (EJIOFOR 1997).

Karıştırma mekanik, elektromanyetik veya gaz ekleme yoluyla yapılabilir. Asıl problem parçacıkların kümelenmesinin ve dibe çökmesinin önüne geçmektir. Bunlara ek olarak sıvı metalin eklenen parçacıkları ıslatmaması sonucu parçacıkları reddetmesi de söz konusudur. Bütün bunlar da elde edilen son parçanın mekanik özelliklerini etkilemektedir.

Bu problemleri çözmek için karıştırma sırasında oluşan girdaba parçacıkları ekleme, parçacıkların yüzeyini kaplama, parçacıklara ön ısıtma yapma, ultrasonik veya elektromanyetik titreşimler uygulama, parçacıkları pelet olarak eriğiye atmak gibi yöntemler uygulanmaktadır (FROYEN 1994). Ancak bu işlemlerin detayları genelde ticari sır olarak saklanmaktadır (MIRACLE 2005).

### 2.5.2. Toz metalurjisi yöntemleri

Literatürde “Sinterleme” olarak geçen toz metalurjisi yöntemleri üzerine pek çok çalışma yapılmış, kitaplar yazılmıştır.

Yeni bir teknoloji gibi görünse de toz metalurjisinin tarihi çok eskilere dayanmaktadır. Tarih öncesi dönemlerde seramiklerin fırınlanması sırasında kullanılan bu yöntem üzerinde ancak 1940’lı yıllarda çalışılmaya başlanmıştır. Toz metalurjisinde parçanın nasıl sıkıştırıldığından, alaşımlamaya ve sinterleme sıcaklığından atmosfer koşullarına kadar pek çok değişken önem taşımaktadır.

Toz metalurjisi yöntemleri yinelenabilir üretim yaparken mümkünse iç yapıyı da kontrol etme hedefi taşır. Tozların iyice sinterlenmesi, küçük taneli bir yapı elde etme, yüksek yoğunluk değerlerine çıkmak gibi hedefler bu konuyu pek çok bilim adamının ilgi alanı haline getirmiştir.

Sinterleme iki şekilde olabilmektedir. Bunlar katı faz sinterleme ve sıvı faz sinterlemedir. Bu iki sinterleme çeşidi ilerleyen başlıklarda ele alınacaktır.

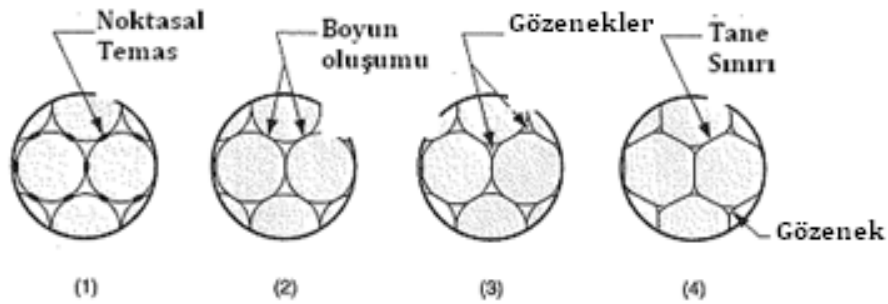
Alüminyum matrisli kompozit üretiminde çok çeşitli metodular uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin arasında toz metalurjisi parçacıkların düzenli dağılımını ve düşük maliyetle hassas boyut toleransları elde etmeyi sağladığı için en avantajlısıdır. Toz metalurjisi yöntemleri ile farklı türdeki farklı bileşimlerdeki tozlar kolaylıkla karıştırılarak istenilen kompozisyonda son ürünler elde edilebilir (POPESCU 2010).

### 2.5.3. Katı faz sinterleme

Katı faz teknikleri arasında en geniş uygulama alanı toz metalurjisi alanındadır. Katı faz sinterlemenin avantajları arasında düşük işlem sıcaklığı, düşük takviye matris reaksiyonu ve bunlara bağlı olarak iyi mekanik özellikler sayılabilir. Ancak üretim sıvı tabanlı tekniklere göre biraz daha masraflıdır. Tozların patlayıcı ve yanıcı özellikleri, sağlığa zararları da dezavantajları arasındadır (FROYEN 1994).

Araştırmacılar arasında kabul edilen görüşe göre yüzey alanının azaltılması sinterlemenin temel mekanizmaları arasındadır. Sinterlenmemiş malzeme pek çok farklı parçacık içerir. Bu pek çok parçanın yüzey alanı toplamı çok büyüktür. Isı altında bu yüzey alanı parçacıkların birbirine kaynaması sonucu azalır. Toz büyüklüğü ne kadar küçükse yüzey alanı o kadar artar. Yüzey alanı artışı sinterlenme kalitesini de artırır (GROOVER 2007).

Katı faz sinterlemede difüzyon hızı çok düşük olduğu için sinterleme süreleri uzundur. Şekil 2.8’de katı faz sinterlemenin aşamaları görülmektedir.

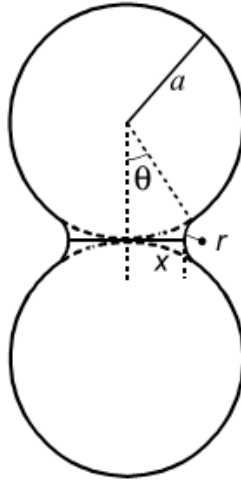


Şekil 2.8 Sinterlemenin aşamaları (GROOVER 2007)

#### 2.5.4. Basınçsız sinterleme

Basınçsız sinterleme, belirli basınçlarla sıkıştırılmış metal tozlarının sinterleme esnasında fırında başka bir dış kuvvete maruz kalmadan sinterlenmesine denir. Sinterleme esnasında herhangi bir dış basınca maruz kalmayan sıkıştırılmış tozlar içsel kuvvetlerin etkisiyle birbirine kaynar. Bu kuvvetler sıkıştırma basıncı, boşluk yoğunluğu farkı ve gaz basıncı farkıdır. Bu kuvvetler farklı oranlarda parçacıklar arası malzeme geçişine katkıda bulunarak sinterlemenin mümkün olmasını sağlar.

Teorik açıdan iki parçacığın sinterlenmesinin hesaplanması yapılabilir ancak bu hesaplama iki parçacığın da küresel olduğu basitleştirmesinin yapılması durumunda mümkündür. Şekil 2.9 de görüldüğü üzere iki küresel toz parçacığı bir boyun yaparak birbirine birleşmektedir.



Şekil 2.9 Herhangi bir çekme olamadan boyun oluşumunu gösteren bu şekilde “a” parçacık çapıyken, “x” boyun çapıdır (KANG 2005)

İki parçacık arasındaki basınç farkları küresel iki parçacık arasındaki malzeme geçişini olumlu yönde etkiler ve parçacıklar arasındaki boşluk bu malzeme geçişi sayesinde kapanarak iki parçayı birbirine kaynatır. Basıncsız sinterlemenin temel mekanizması olan malzeme aktarımı Çizelge 2.5 deki yollarla olur (KANG 2005).

Çizelge 2.5 sinterleme sırasında malzeme taşınım mekanizmaları (KANG 2005)

<b>Malzeme Taşınım Mekanizması</b>	<b>Malzeme Kaynağı</b>	<b>Malzemenin Biriktiği Yer</b>	<b>Alakalı Parametre</b>
1.Kafesler arası difüzyon	Tane sınırı	Boyun	Kafes difüzyon katsayısı
2.Tane sınırı difüzyonu	Tane sınırı	Boyun	Tane sınırı difüzyon katsayısı
3.Viskoz akış	Tane gövdesi	Boyun	Viskozite
4.Yüzey difüzyonu	Tane yüzeyi	Boyun	Yüzey difüzyon katsayısı
5.Kafesler arası difüzyon	Tane yüzeyi	Boyun	Kafes difüzyon katsayısı
6.Gaz fazı taşınımı			
6.1 Buharlaşma \ Yoğunlaşma	Tane yüzeyi	Boyun	Gaz basıncı farkı
6.2 Gaz difüzyonu	Tane yüzeyi	Boyun	Gaz difüzyon katsayısı

Temel mekanizması difüzyon olan basınçsız sinterlemenin difüzyonu kolaylaştıran bir çeşidi de sıvı faz sinterlemedir. Sinterleme sırasında basınç uygulanması da, yukarıda bahsedilen sinterlenme mekanizmalarını hızlandırmaktadır.



### 2.5.5. Basınçlı sinterleme

Basınçlı sinterleme, sinterlenme özellikleri kötü olan malzemeler için uygulanabilecek iyi bir seçenektir. Sıcaklık arttıkça çok sağlam da olsa malzemelerin plastik deformasyona olan dirençleri azalır. Bu azalış da beraberinde daha düşük basınçlarda çalışılabilme olanağını getirir. Basıncsız sinterlemede önemli olan parçacık boyutu, parçacık şekli, toz karakteristiği gibi özellikler basınçlı sinterlemede önemini büyük ölçüde yitirir. Bunların yerini sıcaklık, basınç ve süre alır.

Basınçlı sinterleme altı adıma indirgenebilir:

1. Toz veya önceden sıkıştırılmış preform kalıp gözüne konulur
2. Kalıp direnç yardımıyla veya indüksiyon akımlarıyla istenilen sıcaklığa çıkarılır
3. Daha sonra kalıptaki malzeme basınçla sıkıştırılır
4. Sıcaklık basınç sabit tutulurken yavaş yavaş artırılır, malzemenin sinterleneceği maksimum sıcaklığa ulaşılır
5. Maksimum sıcaklığa ulaşıldıktan sonra bu noktada daha önceden belirlenmiş bir süre beklenir
6. Kalıp basıncı azaltmadan yavaş yavaş soğutulur ve metalin artık havayla reaksiyona girmeyeceği bir sıcaklık değerinde kalıptan çıkarılır

Yüksek hız çelikleri, süper alaşımlar, berilyum ve diğer refrakter malzemeler bu üretim metoduna uygundur. Basınçlı sinterleme muhtemelen saf karbürler gibi malzemelerin üretilmesinin tek yoludur.

Oksit ve karbür seramiklerinin sinterlenmesinde kalıp malzemesinin de önemi büyüktür. Bilinen en yaygın kalıp tür olan çelik kalıplar seramiklerin sinterlendiği

yüksek sıcaklıklara dayanamazlar. Ancak grafit iyi bir kalıp malzemesi olarak görev yapabilir. 500 °C'un üzerindeki sıcaklıklarda grafitin ömrü oksidasyondan dolayı azalsa da ucuzluğu ve kolay işlenebilirliği yüzünden yaygın bir şekilde kullanılır. Grafitin bir başka özelliği de 2500 °C'a kadar dayanımının artmasıdır. 2500 °C'daki dayanımı oda sıcaklığındaki dayanımının neredeyse iki katıdır.

Sinterleme atmosferi de sinterlenecek parça üzerinde büyük etki yapar. Sinterleme amacıyla pek çok gaz kullanılabilir. İnert gazlar bu gazlardan en çok kullanılanlarıdır. Ancak inert gazların varlığı tozların yüzeyine birikmiş olan hidratlı bileşiklerin temizlenmesine yardımcı olmaz. Vakum uygulanması hem bu hidratlı bileşiklerin toz yüzeyinden uzaklaştırılmasında, hem de parça içerisinde çözünecek olan gazların temizlenmesine olanak sağlar (UPADHYAYA 2002).

Basınçlı sinterleme metal matrisli kompozit üretiminde, kabul edilebilir sıcaklıklarda diğer toz metalurjisi yöntemlerinde oluşan gözeneklerin kapatılabilmesini sağlar. Bu gözeneklerin alüminyum ve seramik parçacıkların arasındaki fiziksel etkileşim sonucu oluştuğu bilinmektedir. Yaklaşık 100 MPa sabit basınçta alüminyum ve TiB<sub>2</sub> sinterleyen S.C. Tjong yüksek seramik parçacık oranları söz konusu olduğunda basıncın ve sıcaklığın gözenek oluşumunu büyük ölçüde engellediğini bulmuştur (TJONG 2006).

Suk-Joong L.Kang Sintering isimli kitabında katı içerisinde kalmış gazların dışarı çıkabilmesi için yüksek hızda yayınabilmesi gerektiğini yazmıştır. Katı içerisinde kalan gazların soy gazlar gibi yavaş yayınabilen gazlardan olması durumunda tamamen boşlukların kapanması için geçen süre çok uzamaktadır. Bu süreyi azaltmanın en kolay yoluysa gazların dışarı çıkmasını kolaylaştıracak dış basıncın parçaya uygulanmasıdır. Yüksek yoğunluk isteyen ileri teknoloji uygulamalarında gözeneklilik minimuma indirebilmek için yüksek basınçlar altında uzun süreler sinterleme yapmak gerekmektedir. Basınçlı sinterleme pek çok durumda basınçsız sinterlemeye göre daha iyi sonuçlar verse de seri üretime uygun olmaması ve üretilen parçaların parça başı

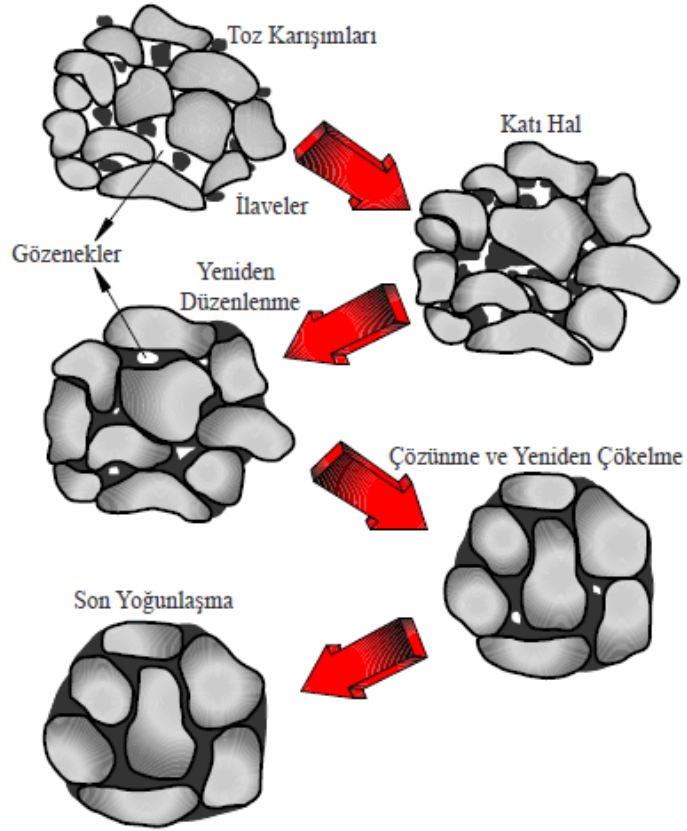
maliyetinin çok olması nedeniyle pek tercih edilmemektedir. Alüminyum ve magnezyum parçacıklarının yüzeyinde bulunun oksit filmi, basınçlı sinterleme sırasında genelde zarar görmez ve tek parça kalır. Bu da sabit basınçta sıcak sinterlenmiş parçaların tozları arasında zayıf bağların oluşmasına sebep olabilir.

#### **2.5.6. Sıvı faz sinterleme**

Sıvı faz sinterleme kabaca bir katı fazın ve bir sıvı fazın termal çevrim içerisinde aynı anda bulunduğu bir yöntemdir (GERMAN 1985).

Sıvı faz sinterleme farklı toz çeşitlerinin bir arada bulunduğu sıkıştırılmış toz karışımlarını sinterlemek için kullanılan bir yöntemdir. Karışanların solidus sıcaklığı üzerine çıktığında gerçekleşir. Mikro yapı ve malzeme taşınması katı faz sinterlemeden hızlıdır, bunun sebebi sıvı fazda difüzyonun katı fazdan çok daha hızlı olmasıdır.

Şekil 2.10'da sıvı faz sinterlemenin temel aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.10 Sıvı faz sinterlemesinde mikro yapısal değişimler (GERMAN 1996)

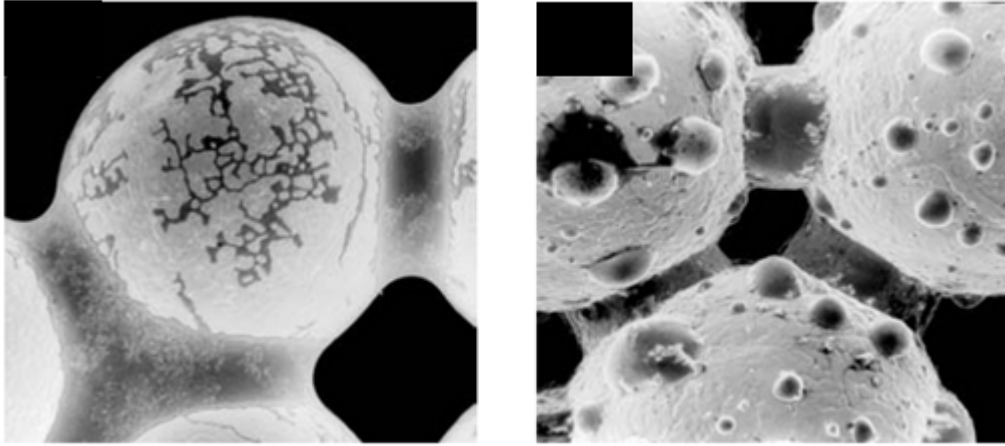
Sıvı faz sinterlemenin Cannon ve Lennel tarafından ortaya konan üç aşaması vardır (KANG 2005).

Birinci aşama sıvı akışı aşamasıdır. Bu aşamada solidusun üzerine çıkan alaşımda bir miktar sıvı oluşur ve bu sıvı kılcallık etkisiyle parçanın geneline yayılır. Bu yayılış boşlukların dolmasına doğal olarak da sinterleme sonrası yoğunluğun artmasına yol açar.

Boşluklara dolan sıvının tutunması ve yüzey gerilimi nedeniyle parçaları birbirine sinterlemesi Şekil 2.11'deki W-Cu sisteminde görülmektedir.

İkinci aşama çökeltme ve yeniden kristallenme aşamasıdır. Sıvı faz katılaşmadan önce topladığı malzemeyi tanelerin arasına getirerek burada soğur ve katılaşarak katı parçacıkları birleştiren bir yapıştırıcı gibi parçaların arasında kalır.

Son aşamadaysa bir miktar katı faz sinterleme görülür. Bunun sebebi sıvılaştırma sıcaklığının altında bile malzeme difüzyonunun devam etmesidir.



Şekil 2.11 W parçacıkları arasında bağlama görevi yapan Cu (KANG 2005)

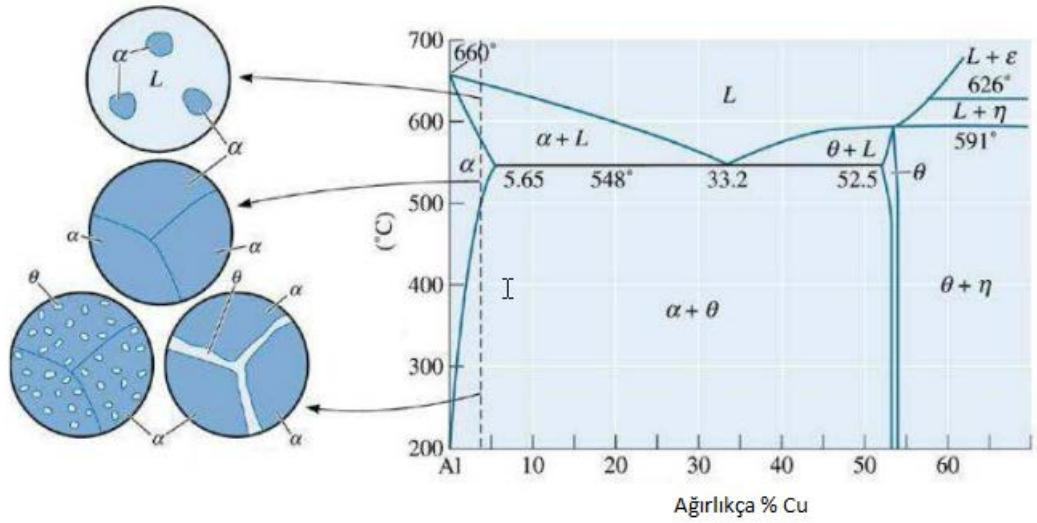
Genel olarak sinterleme yöntemleri düşünüldüğünde basınç akla gelen ilk değişkendir. Ancak sinterleme işlemlerinin çoğu basınçsız yapılmaktadır. Yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda tozlar sinterlenirken dışarıdan bir basınç uygulanır ve bu basınç sinterlenen parçanın yoğunluğunu büyük oranda artırır (GERMAN 1985). Sıvı faz sinterlemede yüksek yoğunluklara ulaşılacak istendiğinde basınçlı sinterleme yoluna başvurulur. Sabit basınçlı sıcak presleme, ekstrüzyon gibi dışarıdan basınç uygulayabilen sistemler yoğunluğu arttırmakla birlikte parça üretim maliyetlerini de artırır.

Her ne kadar sıvı faz sinterleme genel olarak üretilecek parçadaki yoğunluğu arttıracak olsa da, sıvı fazın oluşuyor olması istenmeyen intermetalik bileşiklerin oluşmasına ve matris ile takviye fazın reaksiyona girmesine yol açabilir. Bu nedenle sıvı faz sinterlemede sıvı fazın oluşumunun ve sıcaklığının çok iyi kontrol edilmesi gerekir (KARAKAS 2007).

Katı faz sinterleme yerine sıvı faz sinterleme kullanıldığında, sıvı fazın toz taneleri arasındaki kılcal etkisi dışarıdan uygulanacak olan çok yüksek basınçlarla aynı etkiyi yapar (GERMAN 1985). Başka bir deyişle sıvı faz sinterlemede basınçlı sinterlemedeki ara işlemler atlanarak aynı dayanım ve yoğunluk yakalanabilir.

## **2.6. Al-Cu Faz Sistemi**

Bakır alüminyum içerisine katılan temel alaşım elementlerinden birisidir. Alüminyumun sıvı faz sinterlenmesinde ve çökelme sertleştirmesinde önemli rol oynar. Alüminyum bakır çifti tartışmasız en çok çalışılan toz metlurjisi konularından birisidir. Şekil 2.12 da Al-Cu sisteminin faz diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.12 Al-Cu faz diyagramının Al tarafı

Bu faz diyagramının avantajlarından biri ağırlıkça %4-5 civarında alüminyum ve bakırın tek faz oluşturduğu bir burun olmasıdır. Soğuma gerçekleşince ikincil faz ortaya çıkmaktadır. Diğeriyse bakırın ergime sıcaklığı alüminyumun iki katı olmasına rağmen 548,2 °C’da alüminyumun içerisinde ağırlıkça %5,65 oranında çözünmesidir.

Alüminyum ve bakır karışımlarının sinterlenmesi esnasında aşağıdaki olaylar gerçekleşir.

- Oda sıcaklığından ısıtılmaya başlandığında parçacıklar arası difüzyon gerçekleşir ve bir dizi Al-Cu intermetalik bileşiği oluşur.
- İlk sıvı faz 548 °C civarında Al ve Al<sub>2</sub>Cu temas noktalarında görülmeye başlar
- Sıvıdaki bakır alüminyum çözeltilisine karışır ve yerini alüminyum çözeltilisinde oluşan intermetalik bileşikler alır.
- Bütün Cu çözüldüğünde intermetalikler kaybolur
- Bakır miktarı az ise bütün sıvı alüminyum tarafından emilir, ancak pratikte pek çok alaşım geride sıvı faz bırakır.

Al-Cu sistemindeki asıl sıkıntı alüminyum içerisindeki bakırın yayılma hızının bakır içerisindeki alüminyumdan 5000 kat fazla olmasıdır. Hızlı yayılma sinterlenme esnasında yoğunluğun artmasına yardımcı olsa da Kirkendall etkisi yüzünden genişlemeye de neden olur. Al-Cu sisteminin sinterlenmesi bu nedenden dolayı pek çok değişkene bağlıdır. Özellikle de bakır parça boyutu ve ısıtma hızı sinterlemede önemli rol oynar (SCHAFFER 2001).

Sıvı faz sinterlemede alüminyumu eritmeden bakırın alüminyum içerisinde çözünübilirliğini ve oluşan çözeltinin düşük erime sıcaklığını kullanarak görece düşük sıcaklıklarda sıvı faz elde edilebilmektedir.

Katı faz sinterlemede görünmeyen bu durum, difüzyonu hızlandıran bir ortam yaratarak intermetalik bileşiklerin oluşma hızını artırır. Bu tezde yapılan çalışmada bu başlık altında bahsedilen avantajlardan yararlanılmıştır. Bir sonraki bölümde Al-Cu alaşımlarının yaşlandırılması ele alınacaktır.

## **2.7. Çökelti Sertleştirilmesi İşlemi**

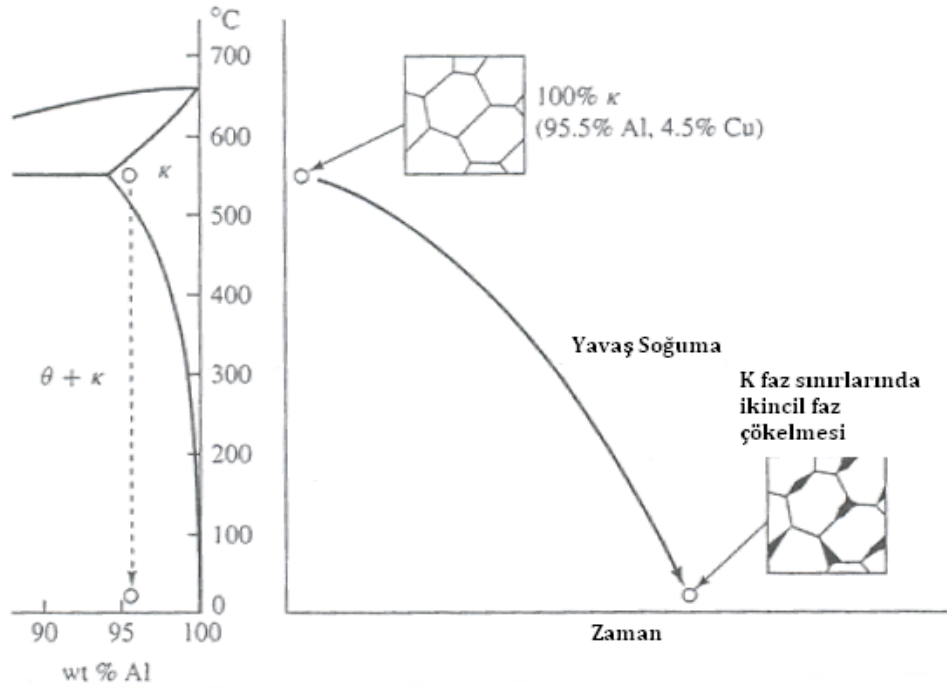
Çökelti sertleştirilmesi olgusu Alfred Wilm tarafından neredeyse yüz yıl önce keşfedilmiştir. Tamamen bir tesadüf eseri yapılan keşfin değeri hemen anlaşılacak yaklaşmakta olan birinci dünya savaşında kullanılmıştır.

Bir hafta sonu yarım bıraktıkları deney durduğu yerde sertleşince Alfred Wilm %3,5 - %5,5 aralığında Cu ve %1 den az Mg ve Mn içeren Al alaşımları için patent başvurusunda bulunmuştur. Wilm elde ettiği patenti Durener Metalwerke isimli şirket adına lisanslamayı uygun görmüş bu nedenle de günümüzde de kullanılan “Duralumin” markası oluşmuştur.

İlk başlarda bu sertleşmenin nedeni anlaşılmasa da Count von Zeppelin tarafından Freidrichhafen kentinde büyük hava gemileri üretiminde rijit kafes olarak kullanılmıştır (POLMEAR 2004).

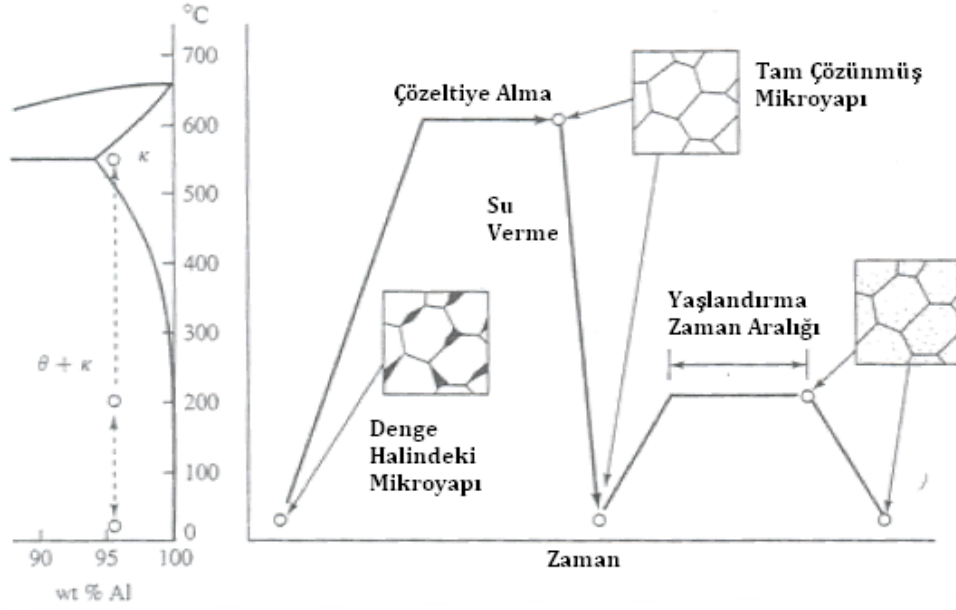


Alüminyumda çökelti sertleşmesi, yüksek sıcaklıklara çıkarılmış alüminyum bakır alaşımının, Şekil 2.13'te verilen faz diyagramında görüldüğü üzere, bakır fazının tamamen alüminyum içerisinde çözünmesiyle başlar. Bu nedenle ilk adıma çözeltiye alma denir. Çözeltiye alma aşamasından sonra yavaş soğuyan alaşımda, bakır fazı tane sınırlarına geri toplanarak sertlik üzerine çok az katkı yapar. Şekil 2.13 K faz sınırlarına çöken ikincil fazı göstermektedir.



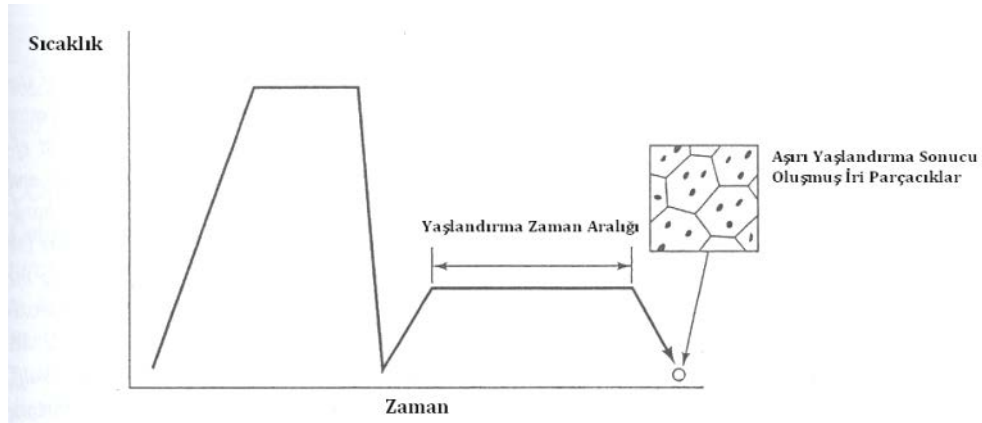
Şekil 2.13 Yavaş soğuma sonucunda tane sınırlarında ikincil faz yığılması  
(SHACKELFORD 1998)

Ancak çözeltiye alınan alüminyum bakır alaşımı çözelti içerisindeyken yavaş soğumak yerine suda soğutulursa çözelti aşırı doymuş bir şekilde oda sıcaklığında kalır. Daha sonra yaşlandırma işlemine tabi tutulan parça difüzyona izin verecek görece düşük bir sıcaklıkta belli bir süre tutulur (Şekil 2.14).



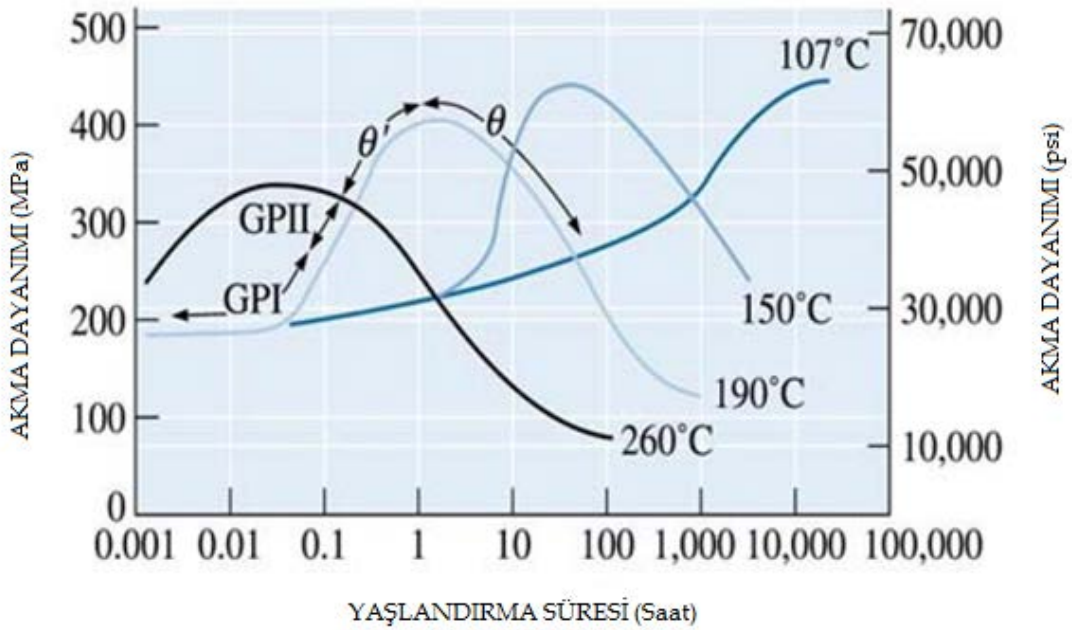
Şekil 2.14 Çökelti sertleştirme işlemi (SHACKELFORD 1998)

Bu süre yaşlandırma adı verilen bir sürecin parçasıdır (Şekil 2.13). Yaşlandırma işlemi belli bir yere kadar sertlikte büyük artışlara sebep olurken, aşırı yaşlandırma durumunda ise ikincil faz yavaş soğutmadaki haline yaklaşarak mekanik özellikleri olumsuz etkiler (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Aşırı yaşlandırmanın mikro yapıya etkisi (SHACKELFORD 1998)

Yaşlandırma işlemi sırasında aşırı doymuş metal çözeltisi, sıcaklık düşük olduğu için, ikincil fazları yavaş yavaş salarak ince dağıtılmış ikincil fazın taneciklerin her yerine eşit dağıtılması sağlanır. Bu ikinci faz dislokasyonların hareketini olumsuz yönde etkileyerek metal malzemelerin kafes yapısını bozar. Bu bozma germe ya da büzme şeklinde olabilir. Bu büzme veya gerilme olan bölgelere Guinier-Preston bölgeleri denir ve kristal matrisindeki uyumlu fazlar sayesinde ayırt edilir. Her şartta dağınmış ince ikincil faz sertliği büyük oranda arttırmaktadır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Yaşlandırma süresinin üzerine etkisi (ASKELAND 2008)

Yaşlandırma süresi ideal sürenin üzerine çıktığında dislokasyonları engelleyen ikincil ince fazlar, bir araya gelmeye başlarlar. Tane içerisinde dislokasyon hareketini engelleyecek küçük bölgeler genişler, sertlikte ve dayanımda düşümlere yol açarlar. Bu düşüş “aşırı yaşlanma” olarak adlandırılır. Şekil 2.15 ve şekil 2.16 aşırı yaşlanmanın etkilerini göstermektedir (SHACKELFORD 1998).

## 2.8. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanları

Malzeme mühendisliği alanındaki son 25 yıldır yapılan en büyük atılımlardan biri metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesi olmuştur. Sıra dışı özellikleri sayesinde üreticilerden ve kullanıcılardan büyük oranda talep görmektedir. MMK'larda elde edilmek istenen dayanımı, aşınma dayanımı ve rijitliği en yüksek; en hafif malzemeyi elde etmektir. Yayınlanan birçok makale alüminyum matrisli kompozitlerle ilgilidir. Hafifliği, alaşımlanma kabiliyet, ısıl işlem görebilmesi ve üretim esnekliği ilgi odağı olmasının sebebi olmuştur (KEVORKIJAN 2002). Alüminyum matrisli kompozitlerin başka bir özelliği de istenilen malzeme özelliklerinin parçaya işlenebilmesidir. Yüksek dayanımın, sünekliğin değil de yüksek aşınma dayanımının ve düşük genleşmenin gerektiği yerlerde buna uygun malzemelerin mühendisliğini yaparak üretmek mümkündür.

Alüminyum matrisli kompozitlerin pek çok kullanım alanı olmasına rağmen bu malzemeler daha çok 4 alanda talep görmektedir:

1. Otomotiv Sektörü
  2. Uçak Uzay Uygulamaları
  3. Elektronik ve Haberleşme Uygulamaları
  4. Spor ve Hobi Uygulamaları
- Otomotiv Uygulamaları

Otomotiv sektörü yüksek teknolojiyle çalışan ve üretim hacmi çok yüksek olan bir sektördür. Otomotiv sektöründe maliyetler mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Bir civatanın bile hesabı yapılır. Otomotiv sektöründe alüminyum matrisli kompozitlerin iyileştirebileceği çeşitli alanlar bulunur. Motorun ve motora bağlı parçaların ağırlığının azaltılması, motorun çalışma sıcaklık aralığını düzenlenmesi, kendi kendini yağlayabilen parçaların üretilmesi gibi pek çok malzeme özelliğinin

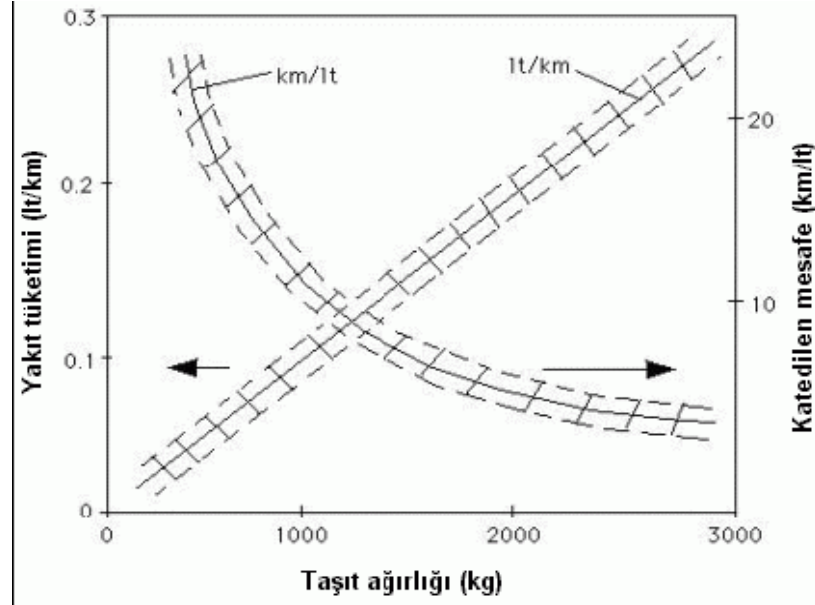
ön plana çıktığı alanlarda ALMK'lar kullanılabilir (FROYEN 1994). Çizelge 2.6'da otomotiv sektöründeki ALMK uygulamaları ve bunu yapan firmalar yer almaktadır.

Çizelge 2.6 Bazı ALMK ve kullanım alanları (FROYEN 1994)

Malzeme	Uygulama	İyileştirilen Özellik	Üretici
Kısa İplikçik - AL	Piston Halkası	Aşınma Dayanımı Düşük Maliyet	TOYOTA
Kısa İplikçik - AL	Piston Yanma Odası	Yüksek Sıcaklık Performansı	CONSORTIUM
Kısa İplikçik - AL	Motor Bloğu Parçaları	Yüksek Sıcaklık Performansı	PEUGOT
Kısa İplikçik - AL	Silindir İç Yüzü	Rijitlikte İyileşme Aşınma Dayanımı Daha İyi Toleranslar Daha İyi Isı İletimi	HONDA
SiC Parçacık- AL	Rot	Özgül Dayanım Özgül Rijitlik	DWA, DURALCAN, NISSAN
Alumina Fiber-AL	Rot	Özgül Dayanım Özgül Rijitlik	DUPONT, CHRYSLER

Alüminyum alaşımlarının araçlardaki dökme demirin yerini doldurabilmesi için gereken çalışmalar 1960 lardan beri süregelmektedir. Bütün yumuşak metaller gibi alüminyum da başka bir metalle veya metal olmayan bir malzemeyle birlikte çalıştığı zaman kolayca aşınmakta veya pul pul olup dökülmektedir. Alüminyumun sıradan araçlarda kullanımını sayesinde 100kg'a kadar ağırlıktan tasarruf etmek mümkündür. Ağır vasıtalarda ise aracın ağırlığının %15-17'si kadar tasarruf etmek mümkündür. Bu nedenle alüminyum alaşımlarının iyileştirilmesi için pek çok öneri öne sürülmüştür, bu önerilerden biri de alüminyuma silisyum karbür, alumina ve grafit parçaları eklemektir

(KEVORKIJAN 2002). Şekil 2.17’de taşıt ağırlığına bağlı olarak yakıt tüketimine karşılık kat edilen mesafe grafiği verilmiştir.



Şekil 2.17 Taşıt ağırlığının yakıt tüketimine etkisi (ÜNAL 1988)

Özetle otomotiv sektöründe alüminyum matrisli kompozit kullanımı, ilk kullanıldığı zaman olan 1983 yılından beri çok fazla yol kat etmiştir. Üretim metotları geliştikçe alüminyum alaşımı kullanımı ile ALMK kullanımı arasında maliyet açısından hiçbir fark kalmamıştır, basınçlı döküm yöntemleri maliyet azaltmada büyük etken olmuştur.

- Uçak Uzay Uygulamaları

Uçak uzay sektörü otomobil sektörünün aksine maliyetlerin değil ağırlığın ön planda olduğu bir sektördür. Sektörde kullanılan parçaların sadece %10'u talaşlı imalat gibi geleneksel metotlarla üretilmektedir. Bu nedenle bu sektöre malzeme geliştirirken üretimin tam ölçülere yakın olması büyük avantajdır (FROYEN 1994).

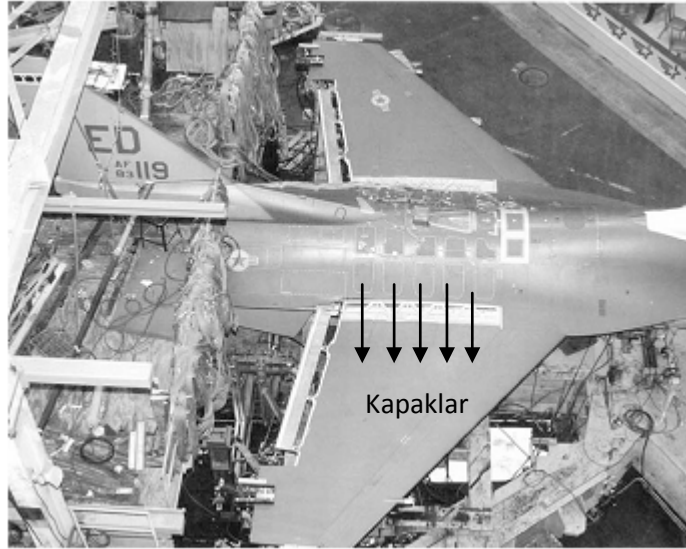
Uçak uzay sektörüne malzeme üretmek için dünya çapında çalışmalar devam etmektedir. MMK ve ALMK'ların bu sektörde kullanılmalarının sebebi ağırlık, rijitlik ve dayanım dengelerinin diğer rakip malzemelerden çok daha iyi olmasıdır. Başarıya ulaşan ilk yapılan çalışmalar bor katkılı filamentlerin ve grafit filamentlerin alüminyum içerisine katılarak oluşturulan kompozitleri konu almıştır.

Ancak bu çalışmalar hiçbir zaman uçak uzay sektöründe kullanılmamıştır. Bunun yerine kesintili takviyeli titanyum ve alüminyum üzerine çalışılmıştır. Parçacık katkılı titanyum ile egsoz çıkış vanaları gibi parçalar üretilse de daha sonraları titanyum alaşımlarının alüminyum alaşımları kadar değiştirilebilir, isteğe göre şekil verilebilir olmadığı fark edilmiştir. Çalışmalar daha sonra alüminyum matrisli kompozitler üzerine yoğunlaşmış ve sonuçta bazı parçalar değiştirilerek yerlerine ALMK kullanılmıştır.

F16 uçağında sık sık bakımda sorun çıkaran gövde arkası kanatları alüminyum alaşımından SiC katkılı ALMK ile değiştirilerek servis hayatı uzatılmış ve 26 milyon dolar civarında tasarruf sağlamıştır (Şekil 2.18). F16 uçaklarında yakıt deposu kapaklarının üstünü örten kapaklar da yeniden tasarlanarak çatlama riskinin önüne geçilmiş 6092/SiC/17.5p gibi ALMK lar kullanılarak çatlamalara karşı daha dayanıklı hale getirilmişlerdir (Şekil 2.19). Eurocopter France EC120 ve N4 helikopterlerinde rotor kısmında kullanılan pervanelerin santrifüj kuvvetlerine karşı koymasına yardımcı olan rotor ceketleri titanyumdan yapılmıştır. Bu ceketler 2009/SiC/15p-T4 kompozitiyle değiştirilmiştir. Bu değişim yaklaşık 14 kg lik bir ağırlıktan tasarruf sağlamıştır (MIRACLE) (Şekil 2.20).

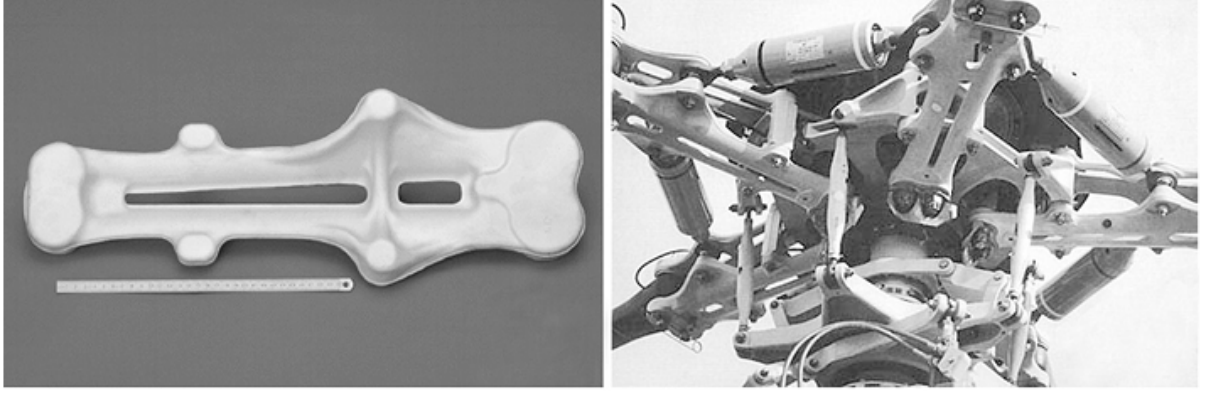


Şekil 2.18 F-16 Gövde Arkası Kanatları(MIRACLE)



Şekil 2.19 Yakıt Kapağı Kapakları(MIRACLE)





Şekil 2.20 Helikopter Rotor Ceket (MIRACLE)

Elektronik alanında yeni nesil elektronik aletlerin ürettiği ısıyı dağıtabilmek için alüminyum matrisli kompozitlerden faydalanılır. Isıyı dağıtmak için kullanılan malzemelerin ısıl genleşmeleri silikon çiplerinkiyle aynı olmalıdır. En ufak bir uyuşmazlık dahi zamanla çatlamalara yol açabilir. Eskiden molibden kullanılan bu uygulamalarda artık genleşme katsayıları ayarlanabilen, içine konulan seramiğin miktarına göre genleşme katsayısı değişen alüminyum matrisli kompozitler kullanılarak bu cihazlardaki ısı atımı gerçekleştirilmektedir. Bunlara ek olarak elektronik paketlemede kullanılan koruyucu hermetik paket malzemeleri, camdan metale geçişler içeren katmanlı malzemelerdir. Bu nedenle ayarlanabilen genleşme katsayılı malzemelere ihtiyaç vardır.



Şekil 2.21 Spor ve hobi amaçlı ALMK kullanımı (FROYEN 1994)

Spor ve hobi sektöründe balık oltaları, tenis ve squash racketleri, bisiklet kadrolarında ve golf sopası uçlarında alüminyum matrisli kompozitler kullanılmaktadır (FROYEN

1994). Bu tip yüksek performans gerektiren uygulamalarda bir gramın bile önemi olduğu için ağırlığı ve yoğunluğu düşük rijit mühendisliği yapılabilen ALMK lar ön plana çıkmıştır.

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

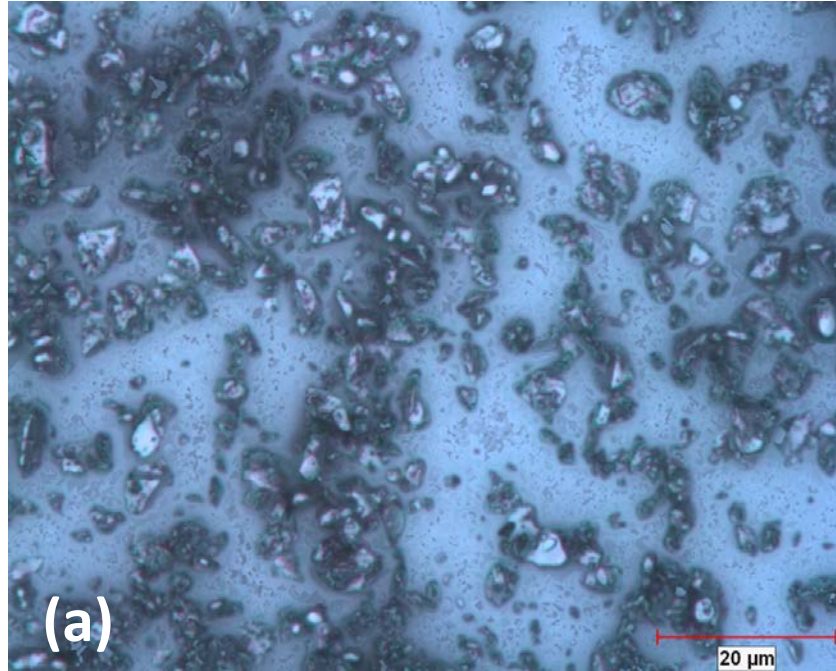
#### 3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

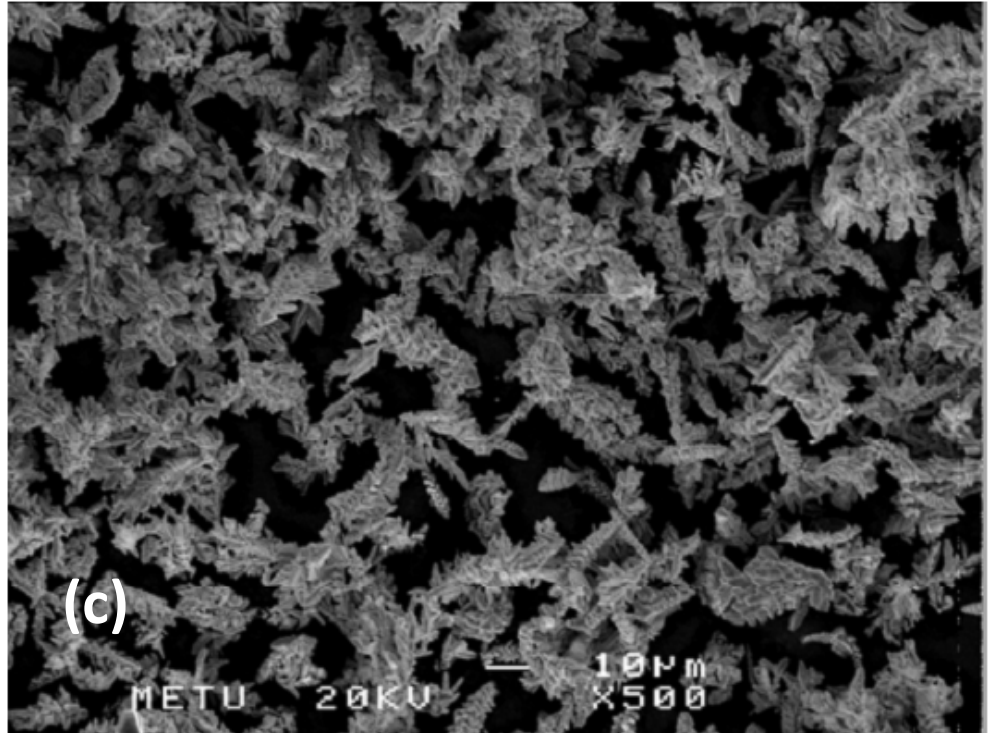
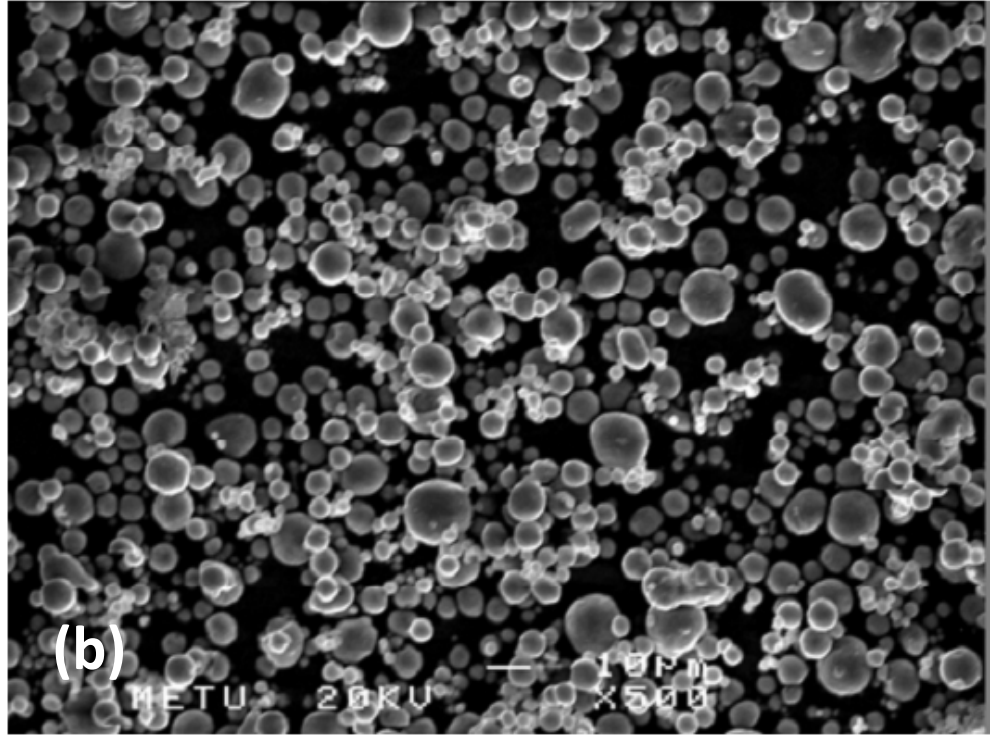
Yapılan deneylerde toz metalurjisi yoluyla alüminyum %4 bakır matrisli kompozit malzeme elde edilmeye çalışılmıştır. Takviye olarak parçacık yapıdaki titanyum diborür seçilmiştir. Elde edilen numunelere daha sonra yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Deneyde sarf malzeme olarak:

- Alfa Aesar marka 7-15 $\mu$ m tane boyutunda alüminyum tozu (Şekil 3.1)
- Alfa Aesar marka 20 $\mu$ m tane boyutunda bakır tozu (Şekil 3.1)
- Alfa Aesar marka 10 $\mu$ m tane boyutunda titanyum diborür tozu (Şekil 3.1)
- Molykote marka molibden sülfür esaslı yağlayıcı

kullanılmıştır



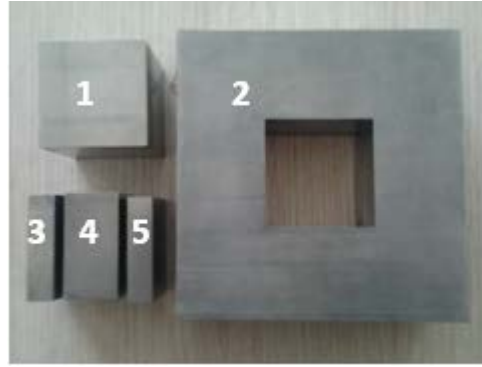


Şekil 3.1 (a) deneylerde kullanılan TiB<sub>2</sub> tozunun optik mikroskop görüntüsü, (b) deneylerde kullanılan alüminyum tozunun elektron mikroskobu görüntüsü, (c) bakır tozunun elektron mikroskobu görüntüsü (KARAKAŞ 2007)

### 3.2. DeneYlerde Kullanılan Donanım

DeneYler Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarlarında yapılmıştır. DeneYlerde:

- Kare Kalıp



Şekil 3.2 Kare Kalıp

Takım çeliğinden imal edilmiş kare kesitli bir kalıp ve oval şekilli kalıp numuneleri basmak için kullanılmıştır. Kalıp 5 farklı parçadan oluşmaktadır. Birinci parça kalıbın tabanına konularak tozu aşağıdan sıkıştırılmaktadır. Birinci parçanın yüzeyi parlatılmıştır, parlatılmış olması basılan tozun kalıp yüzeyine yapışma olasılığını azaltmaktadır. İkinci parça kalıbın ana gövdesidir. 150mm x 150mm boyutlarındaki kalıbın ortasında 50mm x 50mm boyutlarında kare bir boşluk bulunmaktadır. Üçüncü ve dördüncü parçalar kalıbın yan duvarlarına konularak tozun kalıbın ikinci parçasıyla temasını engellemek için kullanılmışlardır. Numuneye temas eden yüzeyleri parlatılmıştır. Bu engellemenin sebebi basıldıktan sonra tozun kalıbın içinde sıkışması ve çıkarılma esnasında yüksek kuvvetlere maruz kalmasıdır. Kalıbın sabit duvarlarına çıkarma esnasında sıkıştırılan tozun temas etmesi numunede çatlaklara yol açmaktadır. Sağa ve sola konulan iki parça olduğunda sıkıştırılan toz ve kalıp parçaları beraber hareket ederek tek parça halinde çıkmakta böylece numuneler minimum sürtünme kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Beşinci parça basan parça olarak kullanılmıştır. Diğer

parçalar yerleştğinde tozun üzerine yavaş ve dikkatlice yerleştirilen beşinci parçanın da numuneye temas eden yüzeyleri parlatılmıştır. Hazırlanan tozlar iyice molykote yağlayıcı ile yağlanmış kalıba konulmuştur.

- Kardeşler Makine 50 tonluk el tahrikli hidrolik pres



Şekil 3.3 Kardeşler Makine 50 Tonluk Pres

El ile tahrik edilen pres, yükleme karakteristiği lineer olmadığı için hassas laboratuvar işlemlerinde kullanılamamıştır. El ile yükleniyor olması sabit bir basınç artışı yerine darbeli bir yüklemeye olanak sağlamaktadır. Bu yüklemeye toz metalurjisi parçalarında çatlaklara yol açmaktadır.

Bu nedenle basma işlemi sırasında bu prestan faydalanılamamıştır. Pres basma işlemi sonrası kalıpta sıkışan numunelerin kalıptan çıkarılmasında kullanılmış, darbeli yüklemeye karakteristiğinin numunelere düşük basınçlarda etki etmediği görülmüştür.

- Beton Test Presi 2000kN

Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan hidrolik presin asıl amacı beton numuneleri kırmaktır. Bunu yaparken sabit bir üst tabla ve ilerleyen bir alt tabla kullanır. Tamamen çelikten yapılmış pres gövdesi son derece rijittir. İçerisindeki kuvvet ölçer 18 kN'dan sonra ölçmeye başlamaktadır. Göstergelerinden kuvvet okunabilmektedir.



Şekil 3.4 Beton test presisi 2000kN

Bu prese konulan kalıp yaklaşık 500kN kuvvet ile basılmıştır. Kalıbın hazne ölçüleri 50mm x 12mm olduğu için;

$$50mm \times 12mm = 600mm^2 \quad \frac{500000N}{600mm^2} = 833,3333MPa$$

etmektedir. Bu da literatürde kullanılan maksimum değer 850 MPa a yakın bir değerdir ancak onu aşmamaktadır. Yapılan bazı hatalarda 850MPa değeri aşılmıştır bu da yaylanmadan dolayı numunelerde ciddi boyutlarda çatlaklara yol açmıştır.

Hidrolik preste sıkıştırma işlemi lineere yakın bir seyir izleyen motor yardımıyla yapılmıştır. Darbeli yükleme olmadığı için çok daha sağlıklı bir basma işlemi gerçekleşmiştir. Sıkıştırma işlemi sırasında 100 kN, 250 kN değerlerinde pres boşaltılarak kademeli yükleme yapılmıştır. Kademeli yükleme numune içerisinde hapis kalabilecek havayı minimuma indirmek içindir. 250 kN değerinden sonra 500 kN ile sıkıştırılan numuneler bu değerde 15-20 sn kadar tutulmuştur. Daha sonra pres boşaltılarak kalıp presten alınmıştır.

- Nüve 200 °C Kapasiteli Vakum Etüv

Etüv alüminyum parçaların üzerinde atmosfer koşullarından dolayı oluşan su içeren bileşiklerin uzaklaştırılması için kullanılmıştır. Daha önceleri kül fırınında kurutulup ve su içeren bileşikleri uzaklaştırmaya çalışılan numunelerin yapılarında suyu muhafaza etmeleri ve sinterleme esnasında şişme vb. sorunlar çıkarmaları nedeniyle vakum altında kurutma ve gazının alınmasına karar verilmiştir.

Etüve 0.01 atm basınca yaklaşacak kadar teflon diyaframı bir vakum motoru eşlik etmektedir. Vakum motoru yaklaşık 10 dakikada etüv içerisindeki havayı emebilmektedir. Etüv içerisinde konulan toz karışımları yüksek sıcaklık ve düşük basınç altında parçacık yüzeylerine tutunan suyu ve gazları kaybetmişlerdir. Tozlardaki bu eksilme tozun akışkanlığını ve havada yayılmasını değiştirmektedir. Örneğin kurutulmamış bir toz bir yere döküldüğünde hemen dağılmazken kurutulmuş toz karbon buzu gibi döküldüğü yerin üzerine yayılmakta kalmakta veya bir bulut oluşturmaktadır.

Tozlar hazırlandıktan sonra alüminyum folyodan yapılmış kayıkçıklar üzerinde etüvün içerisine yerleştirilmişlerdir. Etüvden çıkarılan tozlar preslenene kadar vakumlu bir desikatörün içerisinde saklanmışlardır.



- Protherm Kül Fırını



Şekil 3.5 Protherm Kül Fırını

Protherm kül fırını atmosfer koşullarından etkilenmeyecek işler için kullanılabilir çok amaçlı bir fırındır. Fırın 1200 °C'a kadar ısıtabilmektedir. Üzerindeki kontrolör ise programlamaya olanak vermektedir.

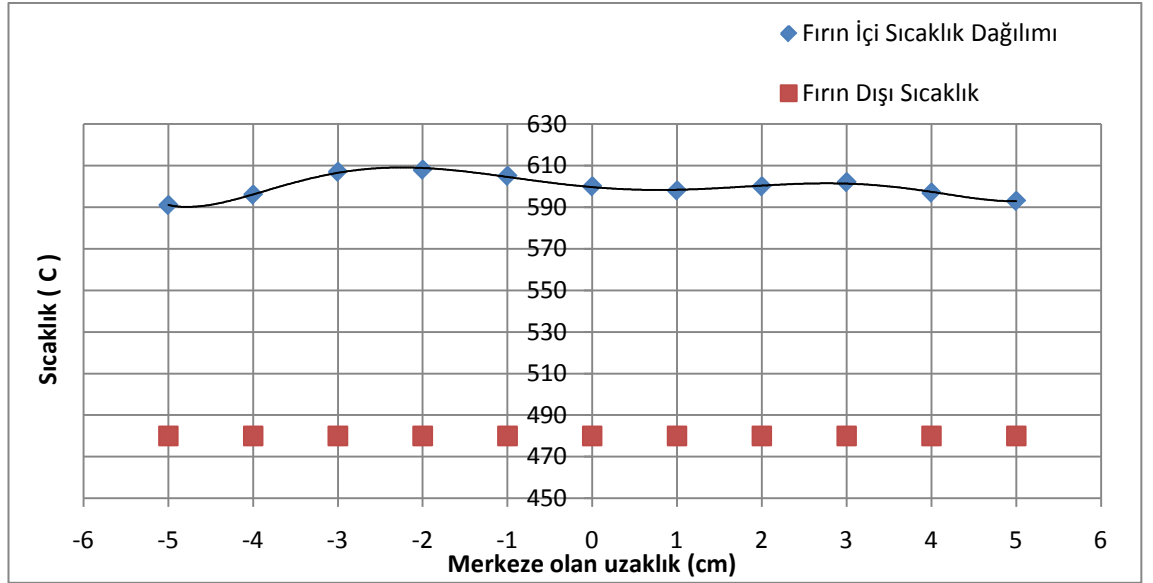
Bu çalışmada kullanılan alüminyum ve titanyum diborür tozları atmosferdeki oksijen ile reaksiyon verdiği için kül fırını bu çalışmada sinterleme amaçlı kullanılamamıştır. Basılmış tozların hala daha gözenekli yapısı bulunduğu için oksijen derinlere kadar nüfuz edebilmektedir.

Sinterleme sonrasında bu gözenekler kapanarak parçayı dışarıdan gelebilecek etkilere karşı koruma altına almaktadır. Sıvı faz sinterlemede elde edilen az boşluklu yapı nedeniyle sinterleme sonrası numunelere ısıl işlem bu fırında uygulanabilmiştir. 550 °C'a kadar beklemesi gereken numuneler toplu halde bu fırına atılmış ve başarılı bir şekilde çökelme sertleştirmesi işleminin çözeltiye alma safhası gerçekleştirilmiştir.

- Boru Fırın

Uzun yüksek sıcaklığa dayanıklı bir seramik boru, onu taşıyan ısıya dayanıklı tuğlalar ve iskelet sistemi bulunan bu fırın Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında imal edilmiştir. Isıya dayanıklı seramik bir boru etrafına sarılan bir direnç teli gerekli ısıyı boru içerisine iletmektedir. Seramik borunun iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 900 mm'dir.

Boru içerisindeki sıcaklık dağılımını iki ısı eleman çifti kullanılarak kalibre edilmiştir. Fırının içerisindeki sıcaklık farkları şekil 3.6 da görülmektedir.



Şekil 3.6 Fırın içi sıcaklık dağılım grafiği

El yapımı fırının kontrolü Ordell marka PC990 kontrolör ve bir voltaj düzenleyici tarafından sağlanmaktadır. Kontrolör programlama yapmaya olanak veren gelişmiş bir elektronik cihazdır. Sıcaklık ölçümleri de kontrolöre bağlanmış olan K tipi bir ısı eleman çifti yardımıyla yapılmaktadır.

Boru fırının hava geçirmezliği iki adet kauçuk tıpa yardımıyla gerçekteşmektedir. Ortalarından cam tüp geçirilen bu tıplar biri giriş biri çıkış olmak üzere iki adettir ve boruyu hava geçirmeyecek şekilde kapatmaktadırlar.

Giriş gazı olarak sanayi tipi yüksek saflıkta azot kullanılmıştır. Deneye başlarken azot gazı miktarı arttırılmış (1,2 – 1,5 lt/d) böylece seramik tüp içindeki havanın tamamen süpürülmesi sağlanmıştır. Daha sonra ise 0,2 lt/d hacimsel debi ile geçirilen gaz fırın sıcaklığı metalin reaksiyon vermeyeceği sıcaklığa inene kadar kapatılmamıştır. Borunun çıkış kısmınaysa bir plastik tüp bağlanmış bu tüp ise yağ dolu bir behere daldırılmıştır. Kabarcık çıkması gazın geçtiğine dair görsel bir kanıt teşkil etmekle beraber gaz geçişi herhangi bir şekilde dursa dahi görebilmek içindir. Buna ek olarak gazın yağın altından kabarcık yapması boru içerisindeki basıncın atmosfer basıncından fazla kalmasını böylece dışarıdan içeriye herhangi bir hava girişinin olmamasını sağlamıştır.

Numuneler fırının sıcak bölgesine seramik bir kayık içerisinde şerit metrenin de yardımıyla yerleştirilmişlerdir. Alüminyumun yüksek ısı iletkenliği sebebiyle fırın içerisinde oluşacak birkaç derecelik sıcaklık farkının önemi kalmamıştır.

- Metkon Metacut M250 Dairesel Testere



Şekil 3.7 Metkon Metacut M250 Testere

Bu çok amaçlı testere laboratuarda pek çok farklı işte kullanılabilir. Üç farklı bıçağa sahip bu testerede sert numuneler için yumuşak bıçaklar, yumuşak numuneler için sert bıçaklar ve çok amaçlı orta sertlikte dairesel karbür kesme taşları bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan bıçaklar çok amaçlı orta sertlikte bıçaklardır.

Metkon Metacut 250 güvenlik önemleri ile ön plana çıkmaktadır. Tamamen kapanabilen kesme odası çalışan araştırmacılar için güvenli bir ortam oluşturmaktadır. Buna ek olarak çalışırken veya elektrik yokken kapak kilidi kapağın açılmasını engellemektedir. Makinede aktif bir pompa devir daim mantığıyla devamlı soğutma suyu püskürtmektedir. Bu da yüksek sertlikteki bazı çelik parçaların kesilirken aşırı ısınmasını engellemektedir.

Çalışmada 50mm uzunluğunda fırından çıkarılan numunelerin 30mm ve 20mm uzunluklarda iki parçaya kesilmesi için kullanılmışlardır.

- Metkon Polisaj Cihazları



Şekil 3.8 Metkon Polisaj Cihazı (Zımpara)



Şekil 3.9 Metkon Polisaj Cihazı (Parlatma)

Polisaj cihazları normal şartlar altında mikroskopta görülmeyen mikro yapıların görülebilmesi için yüzey hazırlamada kullanılırlar. Çalışmada kullanılan polisaj cihazı Metkon marka su soğutmalı 600 devire kadar çıkabilen bir polisaj cihazıdır. Üç adet zımpara bu çalışma dahilinde kullanılmıştır 120, 600 ve 1200 grit değerlerine sahip zımparalardan 120 olan numune yüzeyindeki kaba talaşı almak ve alttaki metale ulaşmak için kullanılmıştır. 600 grit tane boyutuna sahip zımpara 120'nin yol açtığı

çizikleri kapatmada kullanılmıştır. 1200 grit zımpara ise metale parlaklık kazandırarak en hassas işlem basamağını oluşturmuştur.

1200 grit zımpara ile yüzeyi taşlanan numuneler ardından bir başka polisaj cihazında 1µm elmas pasta yardımıyla mavi kadife çuhada parlatılmışlardır. Parlatma sonrası mikroskopta bakmaya hazır hale gelen parçalar fotoğrafları çekilmek üzere mikroskop odasına alınmışlardır.

Zımparalamada dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise sertlik arttıkça zımparalama işlem süresinin uzaması ve zımpara kâğıtlarının ömrünün kısalmasıdır. Çalışmada karşılaşılan en büyük zorluklardan biri %30 ve %20 numunelerin zımparalanmasıdır. Zira titanyum diborür; elmas, bor karbürden sonra bilinen en sert malzemelerden biridir.

- Bulut Makine Sertlik Ölçüm Cihazı



Şekil 3.10 Sertlik ölçüm cihazı

Bulut Makine sertlik ölçüm cihazı geniş bir yelpazede farklı metaller için sertlik ölçümü yapabilmektedir. Entegre mikroskobu sayesinde de Vickers ve Brinell

mikrosertlik ölçümü yapabilmektedir. Bu çalışmada Brinell 10 sertlik testi kullanılmıştır. 2,5mm çaplı çelik bilye kullanılmış ve 62,5 kg yük uygulanmıştır.

Test yapılırken numunenin kenarlara yakın kısımlarından ölçüm yapmamak, parçanın altındaki ve üzerindeki çapakları alarak iki yüzeyde tam düzlük sağlamak, ölçüm yapılan bir noktadan en az 3 iz çapı kadar uzak bölgelerden ölçüm yapmak gibi ölçümlerin sağlıklı yapılabilmesi için gereken tedbirler alınmıştır.

- Nikon Eclipse Işık Mikroskobu



Şekil 3.11 Nikon Eclipse Işık Mikroskobu

Polisaj cihazlarında parlatılan yüzeyleri temizlenen parçalar bu mikroskop yardımıyla incelenmektedir. Oküleri olmasına rağmen derinliğin önemli olmadığı çalışmalarda bu oküler kullanılmamaktadır. Bunun yerine mikroskobun tepesine bağlı bir kamera görüntüyü bilgisayara aktarmaktadır. Birkaç kişinin aynı numune üzerinde çalışmasına olanak veren bu sistem aynı zamanda görüntü üzerinde çeşitli ölçümler yapabilmeyi olanaklı kılar.

Bilgisayarda yüklü olan Clemex Vision Lite lisanslı programı kapsamlı programlanabilen bir görüntü işleyicidir. Mikroskoptan gelen görüntülerdeki fazların yüzdeleri, farklı fazların boyanması gibi birçok işlemi yerine getirirken, ilk aşamada net olmayan eğri parlatılmış eğik duran numunelerin fotoğrafının çekilebilmesini sağlar. Program yardımıyla görüntüler bilgisayara tif, jpg gibi formatlarda kaydedilir alt taraflarına da büyütmeye göre bir ölçek çizgisi yerleştirilebilir.

- Shimadzu AG-IC Autograph 50kN Çekme-Basma Cihazı



Şekil 3.12 Shimadzu AG-IJ Autograph (50 kN) test cihazı ve üç nokta eğme testi aparatı

Shimadzu marka bu test cihazı çekme testi yanında basma ve üç nokta eğme testleri de yapabilmektedir. Hem el hem de bilgisayar kontrollü bu cihaz bu çalışmada toz metalurjisi ürünlerinin mukavemetinin ölçülmesinde kullanılmıştır. Üç nokta eğme aparatı standartlar (ASTM B528) göz önünde tutularak imal ettirilmiştir. Alt iki destek arası 25mm desteklerin çapları 3mm dir. Eğme testi etraflica ileriki bölümlerde ele alınacaktır.



Test cihazı bilgisayara bağlıdır. Bilgisayarda TrapeziumX isimli bir program yardımıyla çalıştırılır. Bu yazılım pek çok deney şartını sağlamak için programlanmıştır. Metal, kauçuk plastik gibi farklı malzemeleri test edebildiği gibi üç nokta eğme çekme basma gibi farklı testleri de yapabilmektedir. Numune ölçüleri ve numune tipi bilgisayara girilmekte, test esnasında bilgisayar otomatik olarak gerilme ve yüzde uzama grafiğini çizmektedir. Bu grafikler bir rapor sayfasına maksimum ve minimum noktaları işaretlenecek şekilde aktarılabilmektedir. Bunun dışında veriler işlenmemiş veri olarak txt formatında da alınabilmekte ve bu veriler Microsoft Excel'de grafik oluşturmak için kullanılabilmektedir.

Deney sırasında ve deneyden sonra oluşan kırılma bölgeleri ve kırılma yüzeyleri numunelerin mekanik özellikleri hakkında da bilgi sağlamaktadır

- Tribotester Aşınma Test Cihazı

Tribotester aşınma test cihazı, laboratuarda elde edilen malzemelerin sürtünme katsayılarını ve oluşan sürtünme kuvvetlerini veren bir cihazdır. Bilgisayar bağlantısı olan cihazın yazılımı da bilgisayardadır ve tamamen bu yazılımla kontrol edilmektedir. Alümina bir bilyanın malzeme üzerinde gidip gelmesiyle malzemeyi aşındırması bu esnada da ölçümlerin yapılması esasına dayanan bir ölçüm biçimi vardır. Çok sert ve dayanıklı malzemeler için aşınma cihazına çeşitli ağırlıklar bağlanabilmektedir. Bu ağırlıklar cismin daha kolay aşınmasını sağlamaktadır. Tribotester cihazı profilometre cihazı ile birlikte aşınma izlerinin derinliğini ve iz alanını hesaplayabilir ve bunu bilgisayarda görüntüleyebilir. Üzerine takılacak olan fazladan birkaç sensör ile cihaz hava sıcaklığı havanın nemi gibi değişkenleri de hesaplara dahil edebilir.

### 3.3. Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı

#### 3.3.1. Toz karışımlarının hazırlanması

Toz karışımı hassas bir tartıda tartılan alüminyum, bakır ve titanyum diborür tozlarından oluşmaktadır. Alüminyum içerisine alüminyum bakır sistemi de göz önüne alınarak %4 bakır konulmuştur. %4 bakır hem sıvı faz sinterlemeyi garanti altına alırken hem de daha sonra yapılacak çökelme sertleştirilmesi işleminde önemli bir rol oynayacaktır. Alüminyum bakır karışımına hacimce %0, %10, %15, %20, %30 oranında titanyum diborür tozu konulmuştur. Bu oranlar yaşlandırma, sinterlemede, sertlikte ve üç nokta eğme testlerinde farkı gözlemleyebilmek için seçilmiştir.

Çizelge 3.1 Hazırlanan 5mm x 12mm x 30mm ölçüsündeki numunelerin, hacimce % TiB<sub>2</sub> oranları ve bileşenlerinin ağırlıkları

Hacimce % TiB <sub>2</sub>	Al (g)	Cu (g)	TiB <sub>2</sub> (g)
0	6,1162	0,2548	-
10	5,5046	0,2293	0,9763
15	5,1988	0,2166	1,4644
20	4,8930	0,2038	1,9526
30	4,2814	0,1783	2,9289

Bileşenler ağırlık, hacim ve yoğunlukları göz önüne alınarak tartıldıktan sonra 150 ml hacimli cam laboratuvar tipi bir şişenin içine yerleştirilmiştir. Daha sonra bu şişeye zirkonyum oksit bilyeler eklenmiştir. Çapları 2mm olan bu bilyeler sert yapıları nedeniyle tozdaki sert seramiklerin aşındırıcı etkisinden korunabilmektedirler.

Numuneler 10 dakika boyunca el ile çalkalanmıştır. Bilyelerin ağırlığı ve sayısı çalkalanmanın da etkisiyle tozu homojen bir şekilde karıştırmaya yetmiştir.

Aynı zamanda cam şişe ile bilyeler arasına sıkışan ve darbe alan toz parçaları, yumuşak topak şeklinde birbirine yapışmışlarsa ayrılmakta veya kırılarak daha küçük parçalara bölünmektedirler. Cam şişenin cidarlarında defalarca yapılan karıştırma işlemine rağmen çok az çizikler oluşmuş, mikroskop görüntüleri de bilyelerden veya cam şişeden kopan herhangi bir parçanın varlığını göstermemiştir.

Şişeden alınan toz karışımı ve bilyeler 200µm gözenekli çelik bir elekten geçirilerek birbirlerinden ayrılmışlardır. Bu sırada karışımının içine düşmüş olabilecek yabancı maddeler de eleğin üzerinde kalmaktadır. Elekten geçirilen toz vakumlu etüvde 195 °C’da 0,01 atm’e yakın bir basınçta bir gece bekledikten sonra basma işlemine geçilmiştir.

### **3.3.2. Tozların sıkıştırılması**

Önceden hazırlanmış toz karışımı etüvden çıkarıldıktan sonra vakit kaybedilmeden basma işlemi için kalıba konur. Kalıba konmadan önce kalıp parçaları yerlerine yerleştirilir ve Molykote yağlayıcı ile yağlanır. Tozlar kalıbın gözüne yerleştirildikten sonra, Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde bulunan prese konur.

Presine konan kalıp merkezleştikten sonra, pres çalıştırılır. İlk başta maksimum hızda çalıştırılan pres, kalıp sıkışmaya başladıktan sonra maksimum hızın altıda birine indirilir.

Yavaş sıkışma bir yandan darbesiz bir yükleme sağlarken, bir yandan da yavaş yavaş tozları sıkıştırarak numunede çatlakların oluşmasını engellemektedir. Kuvvet değerleri 100 kN'da, 250 kN'da birer defa pres boşa alınarak kademeli yükleme yapılır. Kademeli yükleme numune içerisinde kalabilecek havayı dışarıya atmak içindir.

500kN kuvvete ulaşıldıktan sonra kalıp beton presinden alınarak el tahrikli hidrolik prese konur. Bu presin deplasmanı yüksek olduğu için sıkışan parçanın kolayca çıkarılmasını sağlar. Parça çıkarıldıktan sonra kenara ayrılır ve kalıp bir sonraki kullanım için alkolle silinerek, temizlenir ve tekrar yağlanır. Aynı kompozisyona sahip 8'er numune üretilmiş ve incelenmiştir.

### **3.3.3. Sinterleme aşaması**

Sinterleme aşaması basılan tozların boru tipi fırına konularak belli bir sıcaklıkta pişirilmesiyle oluşur. Bu çalışmada kullanılan sıcaklık değeri 620 °C'dur. Bu sıcaklığa 10°C/dak hızla ısıtma sağlanmıştır. 620 °C'da farklı zaman aralıklarında farklı toz yüzdeleri sinterlenmiştir. Yapılan ön deneylerde, 15 dakika sinterleme süresinin yeterli olduğu ve daha uzun süre sintelemenin mukavemette bir artış sağlamadığı anlaşılmıştır.

Seramik bir kayıkçık içerisine konulan numuneler, boru tipi fırının içine bir şerit metre yardımıyla konulmuştur. Parçalar fırına yerleştirildikten sonra iki adet alumina refrakter plaka fırının iki ucuna takılır. Amaç iki uca takılan kauçuk tıpların ısınlama ile ısınmamasıdır. Bir seferde dört adet numune sinterlenmektedir.

Tıplar da takıldıktan sonra azot gazı açılır ve fırının içi süpürülene kadar yüksek debide gaz geçirilir. Bu gaz geçişi sonrası tüp içerisindeki hava büyük oranda

azalmaktadır. Geçişten sonra deney boyunca metal artık hava ile reaksiyon vermeyecek bir sıcaklığa inene kadar 0,2 lt/dak debi ile azot geçirilmeye devam edilir.

En son olarak da kontrolör yardımıyla fırının sıcaklık davranışı ve ısıtma süreleri ayarlanır. İşlem bittikten sonra sıcaklığın 300 °C civarına inmesi beklenir ve numuneler demir bir çubuk yardımıyla fırından dışarıya alınır. Bir süre soğuması beklenen numunelerin ikisi hemen tes edilirken ikisi ısıl işlem için kenara ayrılır.

#### **3.3.4. ökelti sertleştirmesi ısıl işlemi**

ökelti sertleştirmesi işlemi bazı alüminyum alaşımlarına uygulanabilen dayanımı ve sertliği olumlu etkileyen bir işlemdir. Bu işlem bu çalışmada da numunelere uygulanmıştır.

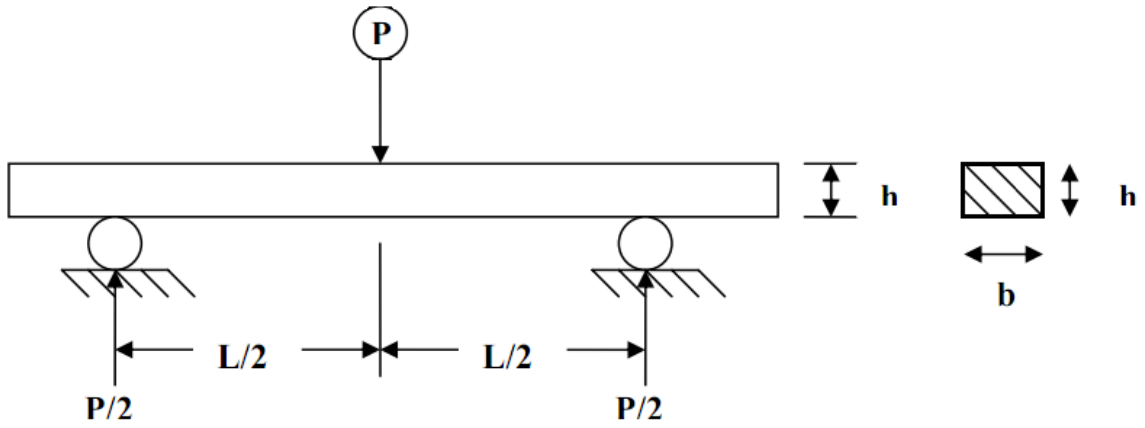
Önceden hazırlanmış ve sinterlenmiş alüminyum matrisli kompozit parçalar kül fırınında 550 °C’da 1 gece (16 saat) boyunca bekletilerek daha önce de bahsedilen çözeltiye alma işlemine tabii tutulur. Bu işlem sonrasında numuneler hiç bekletilmeden suya atılır ve aşırı doymuş bir mikroyapı elde edilir.

Sudan ıkarılan numuneler kurulandıktan sonra 130 °C sabit sıcaklıkta gliserin içerisinde 30 saat bekletilmiştir. Aşırı doymuş mikroyapı yavaş yavaş içerisindeki bakır fazı salarak sertleşmeye ve mukavemet artışına yol açar.

### 3.3.5. Analizler ve testler

Analizler envanterde bulunan mikroskop ve üç nokta eğme test cihazıyla yapılmaktadır.

Üç nokta eğme deneyi ASTM B528 - 99 standartlarına uygun olarak (ANONİM-1 2000), sabit köprü şeklinde duran malzemenin üzerine uygulanan kuvvetin birim alan başına maksimum miktarının tespit edilmesidir. Malzeme iki adet silindir üzerine yatay şekilde yerleştirilir ve üçüncü silindir tarafından kuvvet uygulanarak birim alan üzerine etkiyen kuvvet bulunur.



Şekil 3.13 Üç nokta eğme testi düzeneğinin şematik olarak gösterimi (ANONİM-1 2000)

ISO 3325-1975 standartlarına göre hazırlanan düzenekte  $L = 25$  mm,  $b = 12$  mm,  $h = 6$  mm olmalıdır. Düzenekte bulunan üç silindirin çapları ise 3 mm olmalı ve sertlikleri en az 700 HV olmalıdır. Çapraz kopma eğme mukavemeti hesabında Denklem 2.1 kullanılır.

$$R_{tr} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (2.1)$$

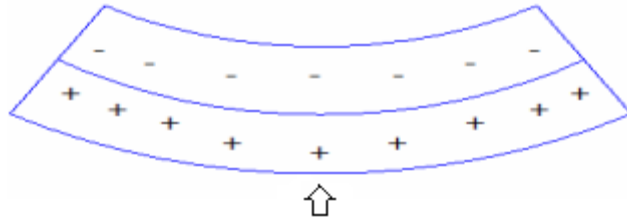
$R_{tr}$  : Çapraz kopma mukavemeti (Transverse Rupture Strength) (N/mm<sup>2</sup>)

F : Eğme için uygulanan kuvvet (N)

l : Destekler arasındaki uzaklık (mm)

b : Test edilecek numunenin genişliği (mm)

h : Test edilecek numunenin yüksekliği (kalınlığı) (mm)



Şekil 3.14 Üç nokta eğme testinde numunede oluşan eğmenin ve kırılma bölgesinin şematik gösterimi

Numunelerin gerinimlerini belirlemek için ise aşağıda belirtilen Denklem 2.2 kullanılır.

$$\varepsilon = \frac{6 \times D \times d}{L^2} \quad (2.2)$$

$\varepsilon$  : Eğme gerinimi

D : Orta noktadaki eğme miktarı (mm)

d : Numunenin kalınlığı (mm)

L : Destekler arasındaki uzaklık

Yukarıdaki bilgiler ışığında yapılan üç nokta eğme testi, toz metalurjisi parçalarının mukavemetinin belirlenmesine olanak sağlar.

Üç nokta eğme testinden numuneler sonra mikro yapı incelemesi için polisaj cihazlarında parlatılır. Mikroskop altında incelenen parçaların 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x büyütmede fotoğrafları çekilir ve bilgisayara kaydedilir.

### **3.3.6. Yoğunluk ölçümleri**

Yoğunluk ölçümleri numuneler test edildikten sonra hassas bir terazi yardımıyla yapılmıştır. Toz metalurjisinin doğasından dolayı üretilen parçaların içinde dahi gözenekler oluşmaktadır. Gözenekler malzeme içerisinde yoğunluk düşüşüne sebep olmakta, bu düşüş de sinterlemenin kalitesini etkileyen faktörlerden biri olmaktadır. Sinterleme sıcaklığı, tozların saflığı, atmosfer koşulları gibi değişkenler gözenek oluşumuna yol açabilmektedir. Bu nedenle üretim koşullarının çok sıkı bir şekilde denetlenmesi gerekir.

Yoğunluk ölçümleri ilk olarak hassas bir terazide numunelerin kuru ağırlıklarının ölçülmesiyle başlar. Tartımın atmosfer koşullarından etkilenmemesi için tartı rüzgar geçirmez cam bir hazne içerisinde çalışmaktadır. Daha sonra numuneler içerisinde saf su bulunan bir beherin içine bir sepet yardımıyla daldırılır. Saf suyun yoğunluğunun yaklaşık  $1 \text{ gr/cm}^3$  olduğu kabul edilirse, numune suya daldırıldığında tartıda oluşacak değişim de doğrudan numunenin hacmini verecektir. Önceden ölçülmüş olan kuru ağırlık yardımıyla da numunenin yoğunluğu bulunabilir.



Deneysel yoğunluk dışında bir de teorik yoğunluk bulunmaktadır. Teorik yoğunluk karışımın yüzde oranlarına göre  $TiB_2$ , Al ve Cu'nun karışımının verdiği bir yoğunluk değeridir. Daha önce tartıda hesaplanmış hacim ile çarpıldığında teorik ağırlık da ortaya çıkar. Teorik yoğunluk ile deneysel yoğunluğun oranı, yüzle çarpılarak % cinsinden teorik yoğunluk bulunur.

### **3.3.7. Aşınma testi ve ölçümleri**

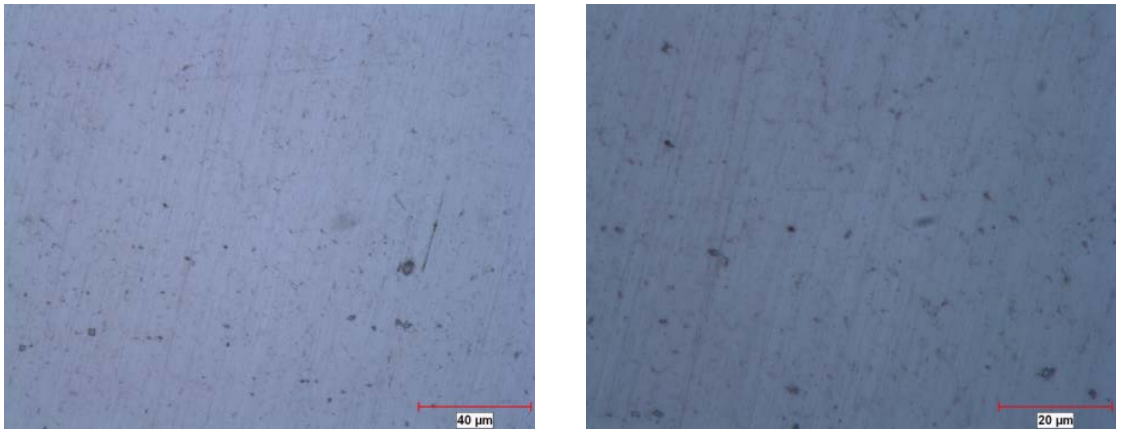
Aşınma testi Tribotester marka aşınma cihazında yapılmıştır. Cihaz bilgisayar programı aracılığıyla programlanmıştır. 2000 mm uzunluğundaki bir mesafeyi, 5mm'lik periyotlarla salınım şeklinde kat etmiştir. Cihazın üzerine 5N yük bağlanmıştır. Yükün bağlanması sebebi aşınmaya çok dirençli parçaları aşındırabilmektir. Cihazdan çıkan parçaların aşınma izlerinin mikro yapı fotoğrafları çekilmiş sonra da profilometre cihazıyla aşınma profili çıkarılmıştır ve aşınma oranları hesaplanmıştır.

## 4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Yapılan deneyler sonucunda hacimce %0-%30 aralığında farklı oranlarda TiB<sub>2</sub> içeren 5 farklı numuneye ait veriler elde edilmiştir. Deney sonuçları mikroyapı incelemeleri, üç nokta eğme, sertlik ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi olarak dört alanda incelenmiştir. Daha sonra yeni birer set numune üretilmiş ve çökelti sertleştirme ısı işlemine tabi tutulmuş ve aynı testler uygulanmıştır.

### 4.1. Katkısız Numuneler

Katkısız numuneler kontrol grubu olarak düşünülebilir. Yapılacak katkıların mekanik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkisi bu şekilde kontrol edilebilmiştir. Buna ek olarak sinterlemenin gerçekten başarılı olup olmadığı konusunda da bilgi edinilmiştir. Şekil 4.1’de katkısız numunelerin mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. Gözeneklerin çok az olması sinterlemenin iyi yapıldığına işaret etmektedir. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde katkısız numunelerin % teorik yoğunluk değerlerinin % 98’in üzerinde olduğu hesaplanmıştır. Bununla birlikte, mikroyapı incelemelerinden sinterlenmiş numunede alüminyum tane sınırlarının temiz olduğu anlaşılmıştır. Bu gözlemden, koruyucu atmosfer (yüksek saflıkta nitrojen) altında uygulanmış olan sinterleme işleminin başarılı olduğu söylenebilir.



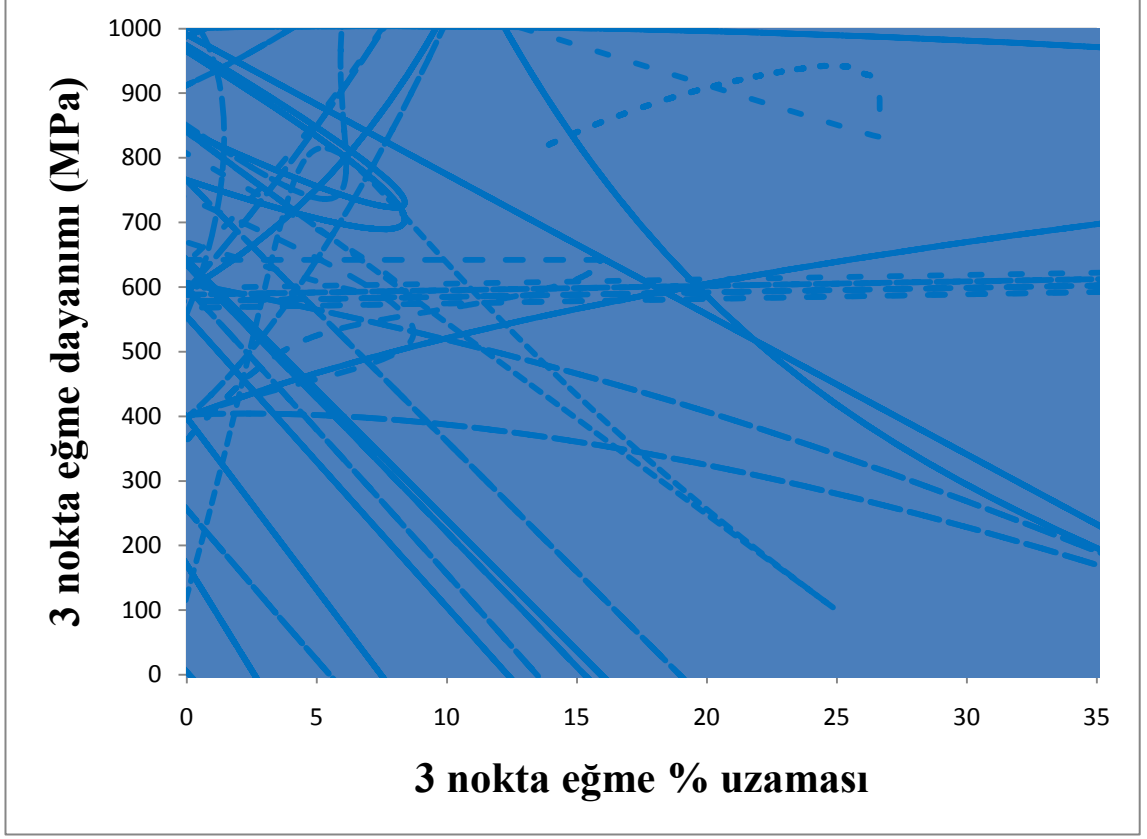
Şekil 4.1 200 ve 500 büyütmede katkısız numunelerin mikroyapı fotoğrafı

Çizelge 4.1’de üzerinde çalışılmış ve sinterlenmiş bütün katkısız numunelerin listesi yer almaktadır. 54-1 ısılsız ve 61-2 ısılsız numaralı numuneler Şekil 4.2’de mukavemet grafiğinde 61-2 ısılsız numune aşınma grafiklerinde kullanılmıştır. Isıl işlem öncesinde katkısız numuneler 420-550 MPa eğme mukavemeti, %20-28 uzama ve 50-55 HB10 sertlik göstermişlerdir. Isıl işlem sonrasında mukavemet 810-940 MPa aralığına yükselmiş, % uzama % 16-24 aralığına inmiş ve sertlik 90-100 HB10 aralığına yükselmiştir.

Çizelge 4.1 Isıl işlemsiz (mavi) ve ısılsız (kırmızı) numune listesi

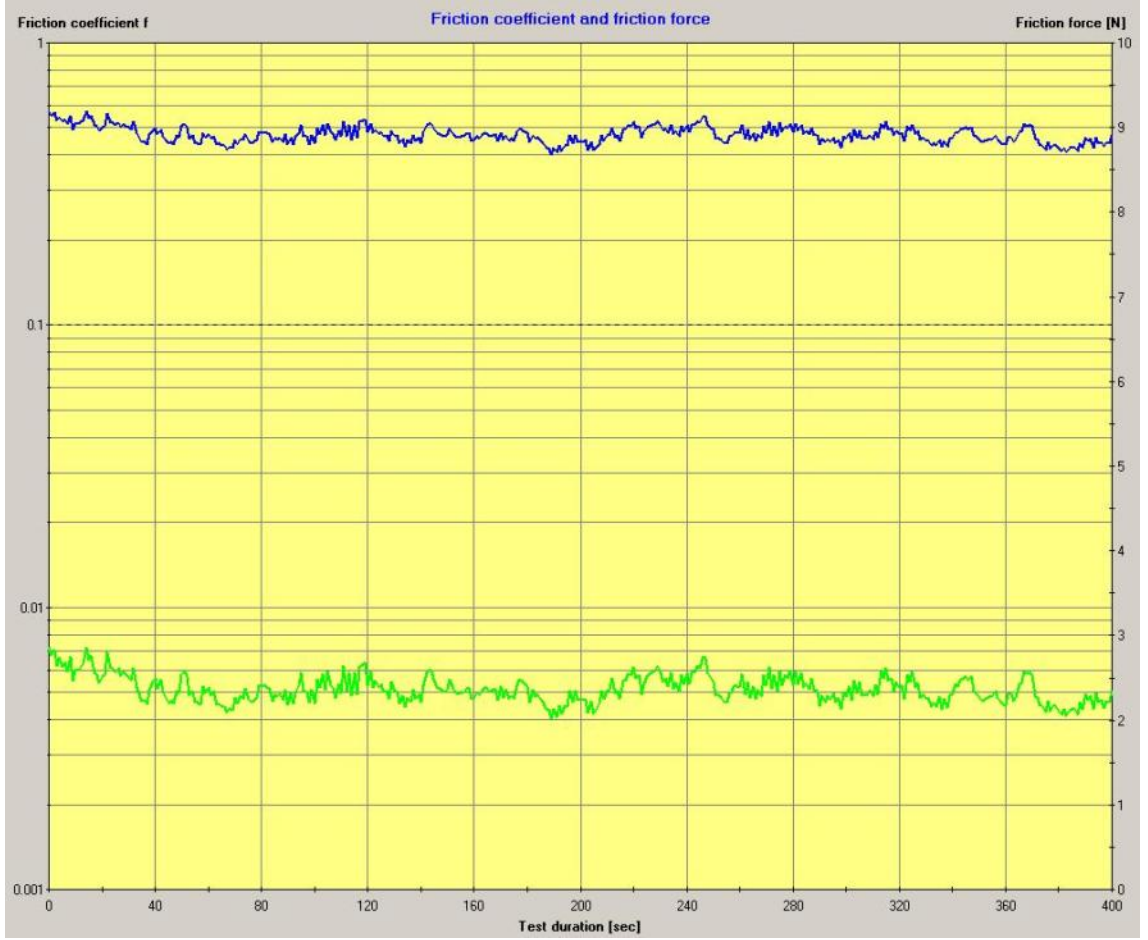
Katkı %'si	Numune Numarası	Ortalama Sertlik (HB 10)	Sertlik Standart Sapması	Mukavemet (MPa)	% Uzama	Aşınma Oranı ( $\times 10^{-3}$ ) ( $\text{mm}^3/\text{N.m}$ )
0	39-1-2	49,26	0,66	435,92	20,76	
0	39-2-1	52,60	3,53	418,12	20,36	
0	54-1	56,68	0,91	556,69	28,03	
0	54-2	55,40	1,72	542,35	27,86	
0	61-1	89,06	3,48	833,70	16,47	
0	61-2	98,38	1,42	942,80	24,69	12,16 $\pm$ 3,16
0	61-3	99,92	1,96	809,97	21,35	

Şekil 4.2’de ısılsız işlem görmemiş ve ısılsız işlem görmüş katkısız numunelerin 3 nokta eğme testlerinden elde edilmiş olan mukavemet-%uzama grafikleri yer almaktadır. Uzama değerinin yüksek olması katkısız numunenin sünekliğinin yüksek olduğunu ve sinterlemenin iyi olduğunu göstermektedir.



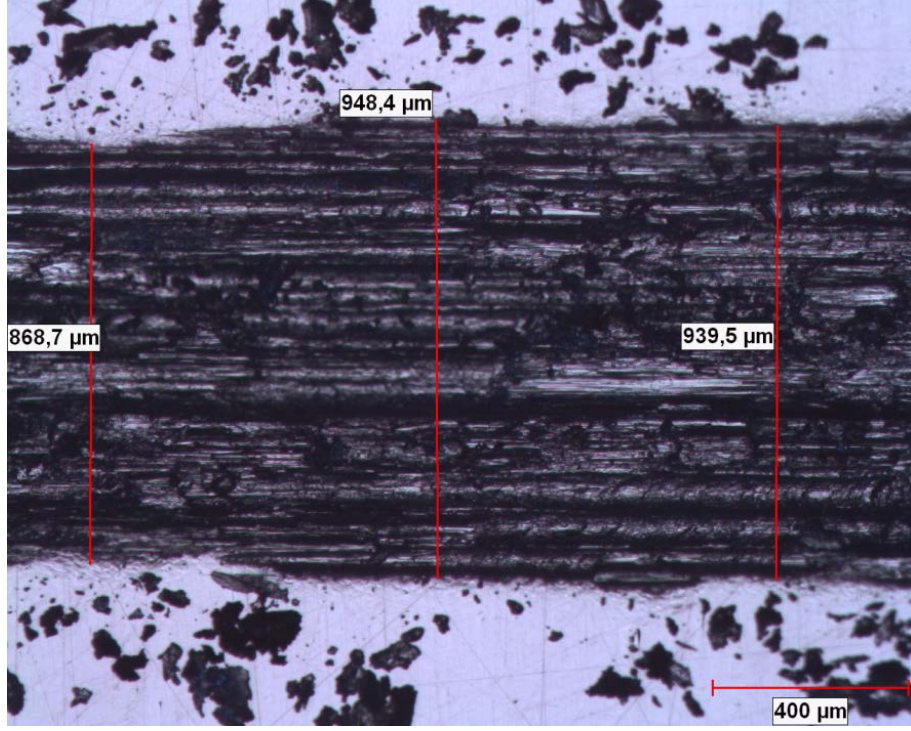
Şekil 4.2 Isıl işlemlili ve ısıl işlemsiz katkısız numunelerin 3 nokta eğme mukavemet-% uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıl işlemlili numuneye aittir.)

Şekil 4.3'te aşınma testleri sonucu elde edilen sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti grafikleri görülmektedir. Aşınma testinin hemen başlangıcında, numune yüzeyinde bir aşınma çiziği oluşmuştur ve sürtünme katsayısı deney boyunca 0,4-0,6 aralığında olmuştur. Katkısız alüminyum yumuşak olduğu için kolay aşınmıştır ve nispeten geniş bir aşınma izi oluşmuştur.



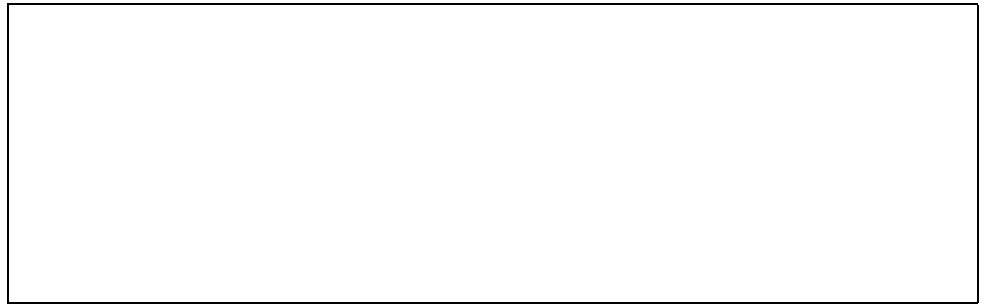
Şekil 4.3 Aşınma test süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değişimi

Şekil 4.4'te katkısız numunelerin aşınma izlerinin mikro yapı fotoğrafı yer almaktadır. İzin genişliği aşınmanın fazla olduğuna işaret etmektedir. İzin genişliği  $919 \pm 44$  mikrometre olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4 Katkısız numunelerin aşınma izinin mikroyapı fotoğrafı

Şekil 4.5'te katkısız numunenin aşınma izinin kesitinin örnek bir profili yer almaktadır. Aşınma iz kesit alanı  $24322 \pm 6324 \mu m^2$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak yapılan hesaplamada aşınma oranının  $12,1611 \pm 3,16 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N.m}$  olduğu belirlenmiştir.

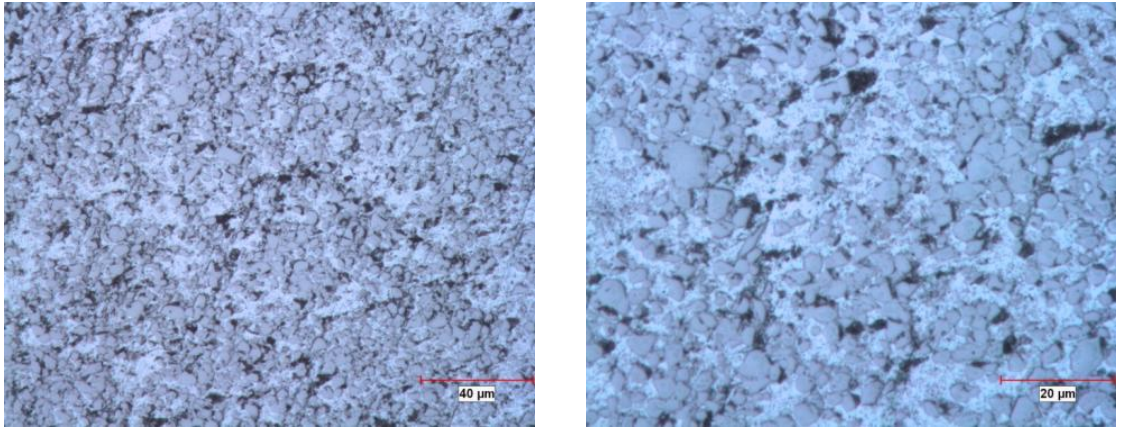


Şekil 4.5 Katkısız numunenin aşınma izi üzerinden alınmış kesit profili

## 4.2. %10 Katkılı Numuneler

%10 TiB<sub>2</sub> katkıli numuneler takviye eklemenin ilk aşamasını oluşturmaktadır. TiB<sub>2</sub>'nin yoğunluğunun Al'den çok olması sebebiyle, titanyum diborür eklendiğinde kompozitin özgül ağırlığı artmaktadır. % 10 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitik teorik özgül ağırlığı 2,95 g / cm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde, kompozitin yoğunluğu 2,91 g / cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Bu değer, % 98,7 teorik yoğunluk anlamına gelmektedir.

Şekil 4.6'da %10 katkıli numunelerin mikro yapı fotoğrafları verilmektedir. % 10 oranında TiB<sub>2</sub> içeren kompozitin mikroyapısında TiB<sub>2</sub> parçacıklarının düzenli dağıldığı görülmektedir. Bu fotoğraflarda yer yer görülen siyah bölgelerin TiB<sub>2</sub> parçacıklarının sökülmesi ve kayması sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Zımparalama ve parlatma sırasında sert TiB<sub>2</sub> parçacıkları yumuşak alüminyum matristen sökülebilmekte veya bu matris üzerinde sürüklenebilmektedir. Bu siyah bölgelerin bir kısmı gözenek olabilir, çünkü yoğunluk ölçümlerinden bu numunede % 1,3 civarında gözenek bulunduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.6 500 ve 1000 büyütmede %10 katkıli numunelerin mikroyapı fotoğrafı



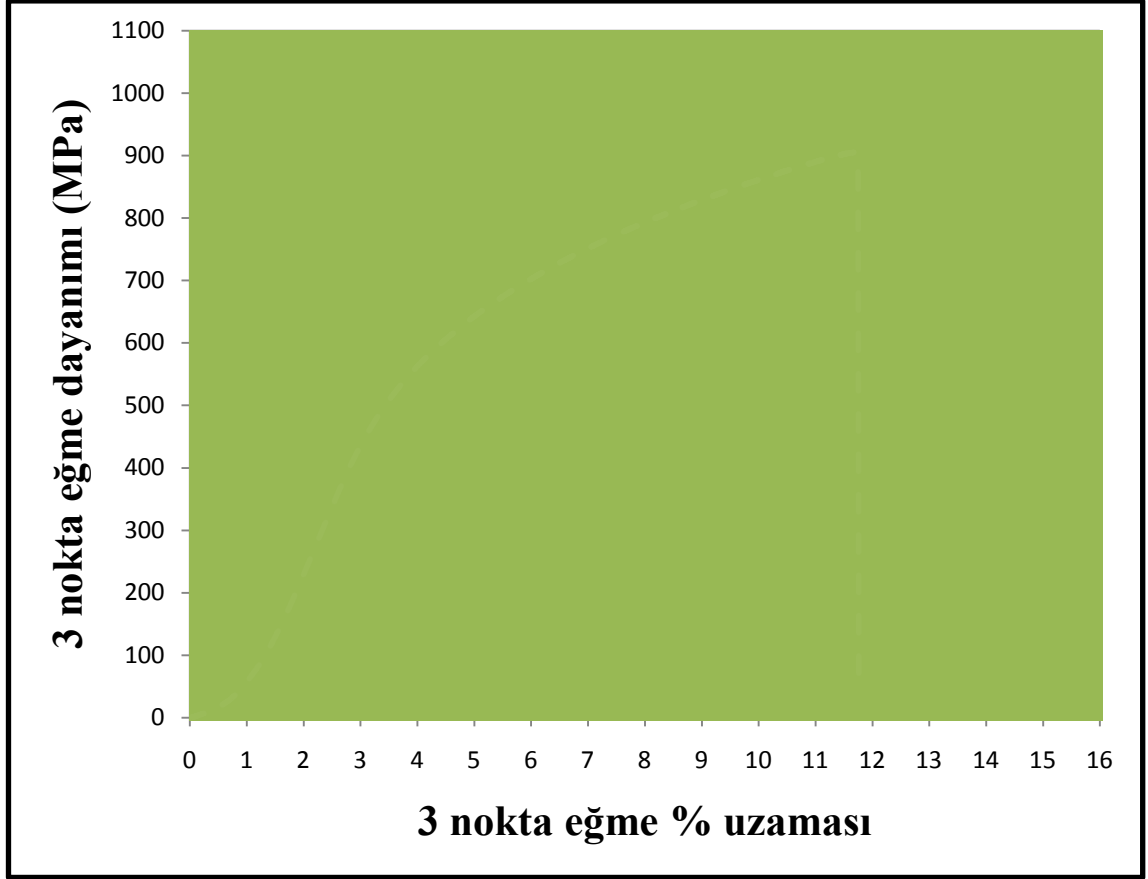
Çizelge 4.2’de üzerinde çalışılmış bütün %10 katkılı numunelerin bir listesi görülmektedir. Katkısız numunelerle karşılaştırıldığında, ısıl işlemsiz numunelerde % 10 oranında TiB<sub>2</sub> eklenmesi sonucunda mukavemette artış olduğu görülmektedir. Isıl işlem öncesinde %10 katkılı numuneler 670-690 MPa eğme mukavemeti, %10-12 uzama ve 84-86 HB10 sertlik göstermişlerdir. Isıl işlem sonrasında mukavemet 908-790 MPa aralığına yükselmiş, % uzama % 9-11 aralığına inmiş ve sertlik 90-100 HB10 aralığına yükselmiştir. Isıl işlemlenmiş numunelerde, katkısız numunelerle karşılaştırıldığında %10 oranında TiB<sub>2</sub> eklenmesi mukavemette artış sağlamamıştır. % uzamadaki düşüşün seramik parçacıklarının yarattığı çentik etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.2 Isıl işlemsiz (mavi), ısıl işlemlenmiş (kırmızı) numune listesi

Katkı %'si	Numune Numarası	Ortalama Sertlik (HRB 10)	Sertlik Standart Sapması	Mukavemet (Mpa)	% Uzama	Aşınma Oranı (x10 <sup>-3</sup> ) (mm <sup>3</sup> /N.m)
10	50-1	84,76	5,76	673,28	12,86	
10	50-2	82,20	3,71	668,11	14,18	
10	52	86,28	6,80	690,30	10,44	
10	37-3-2	111,80	4,94	789,64	9,19	
10	37-4-2	111,88	3,62	735,83	9,11	
10	62-1	109,48	2,88	852,54	10,04	
10	62-2	109,44	1,38	908,89	11,67	1,69 ± 0,13

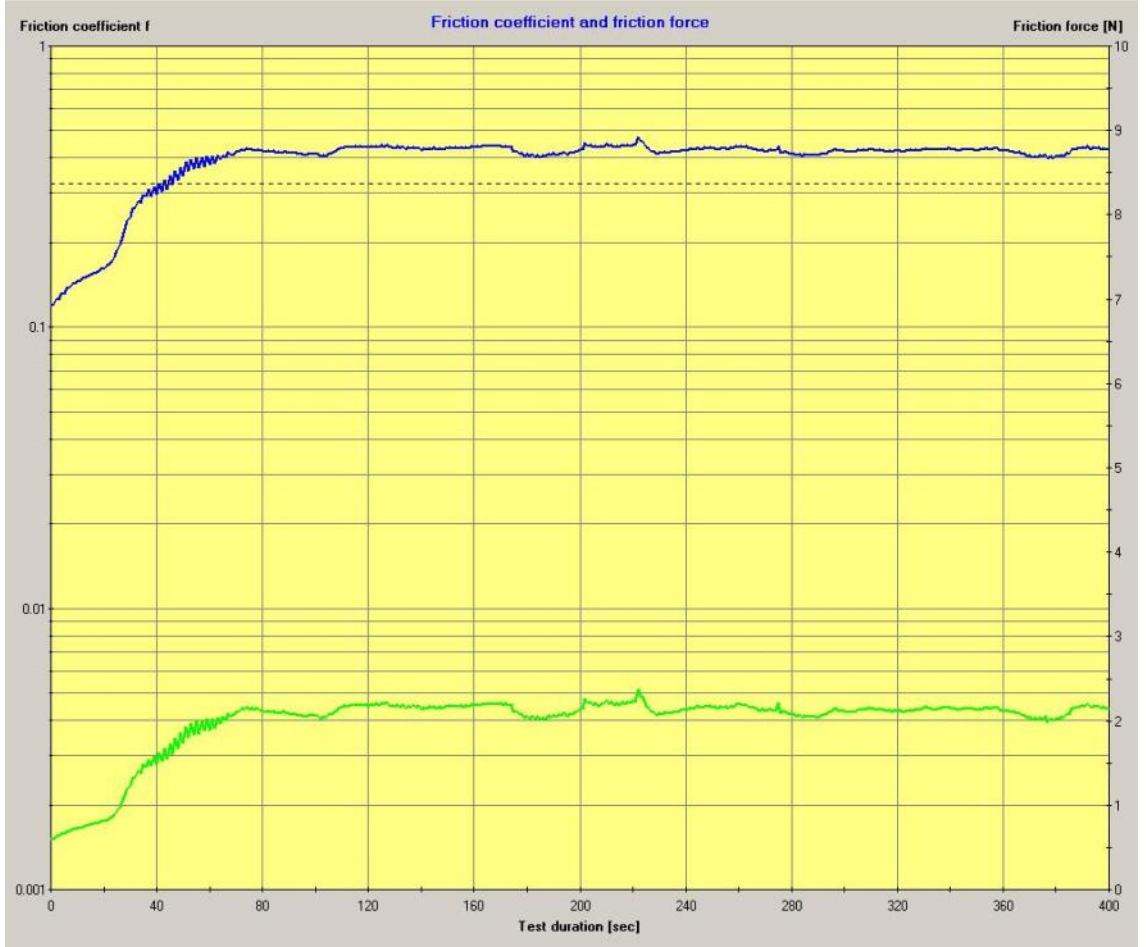
Şekil 4.7’de %10 katkılı ısıl işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş numunelerin 3 nokta eğme testlerinden elde edilmiş olan mukavemet-%uzama grafikleri yer almaktadır. Grafikte ısıl işlemsiz 50-2 numaralı ısıl işlemlenmiş 62-2 numaralı numuneler kullanılmıştır. Aşınma testleri ısıl işlemlenmiş 62-2 numaralı numune üzerinde yapılmıştır.





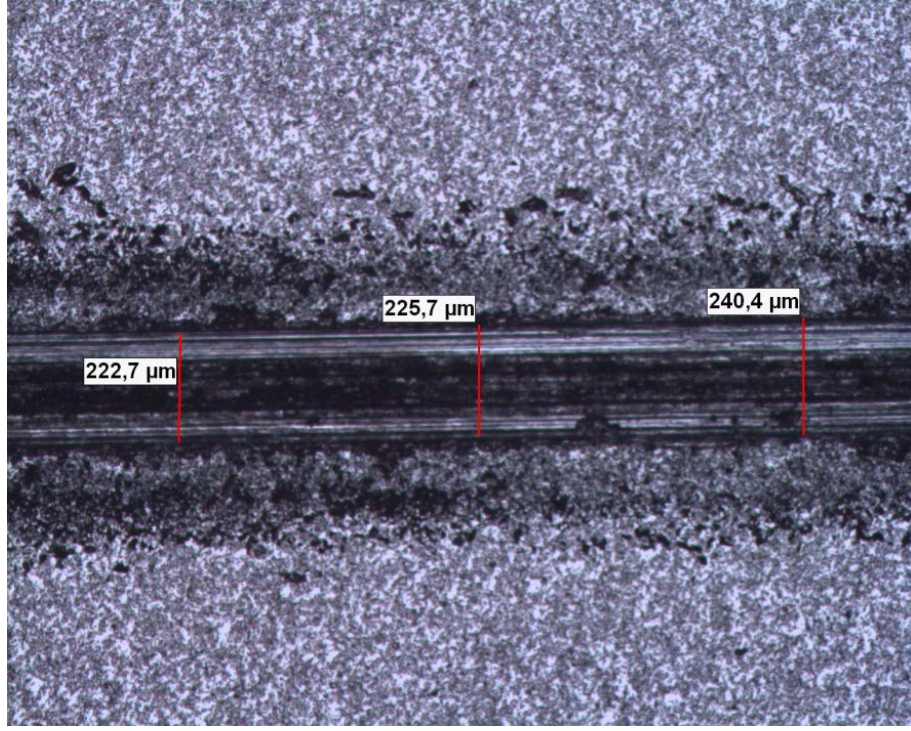
Şekil 4.7 Isıl işlemlili ve ısıl işlemsiz %10 katkılı numunelerin 3 nokta eğme mukavemet-% uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıl işlemlili numuneye aittir.)

Şekil 4.8’de aşınma testleri sonucu elde edilen grafikler görülmektedir. Sürtünme katsayısı testin başlangıcında 0,1 değerindedir ve zamanla aşınma izi derinleşmektedir sürtünme katsayısı artmaktadır. Daha sonra sürtünme katsayısı değeri 0,4 değerinin biraz üzerinde seyretmektedir. Katkısız numune ile karşılaştırıldığında  $TiB_2$  parçacıklarının yaratmış olduğu aşınma dayanımı açıkça görülebilmektedir.



Şekil 4.8 Aşınma test süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değişimi

Şekil 4.9’da aşınma testleri sonrasında %10 katkılı numunelerin aşınma izi görülmektedir. Aşınma izi genişliğinin katkısız numunelere göre daraldığı görülmektedir. Katkısız numunede 900  $\mu\text{m}$ ’den geniş olan aşınma izi genişliği %10  $\text{TiB}_2$  içeren kompozitte  $229,6 \pm 9,47 \mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 %10 katkılı numunelerin aşınma testi sonrası mikroyapı fotoğrafı

Şekil 4.10'da profilometre yardımıyla elde edilmiş aşınma izinin örnek bir kesit alanı görülmektedir. Profil alanı  $3384 \pm 269,34 \mu m^2$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak yapılan hesaplamada  $1,69 \pm 0,13 \text{ mm}^3/\text{N.m}$  aşınma oranının olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.10 %10 katkılı numunenin aşınma izi üzerinden alınmış kesit profili

### 4.3. %15 Katkılı Numuneler

%15 katkılı numuneler denenmiş ancak üzerinde detaylı bir çalışma yapılmamıştır. Bunun sebebi sertlik ve mukavemet değerlerinin %10 katkılı numunelere çok benzemesidir. Çizelge 4.3'te üzerinde çalışılmış %15 TiB<sub>2</sub> katkılı numuneler görülmektedir. Numunelerin sertlikleri %10 TiB<sub>2</sub> içeren numunelerle %20 TiB<sub>2</sub> içeren numunelerin sertlik değerlerinin arasındaki değerlerdedir.

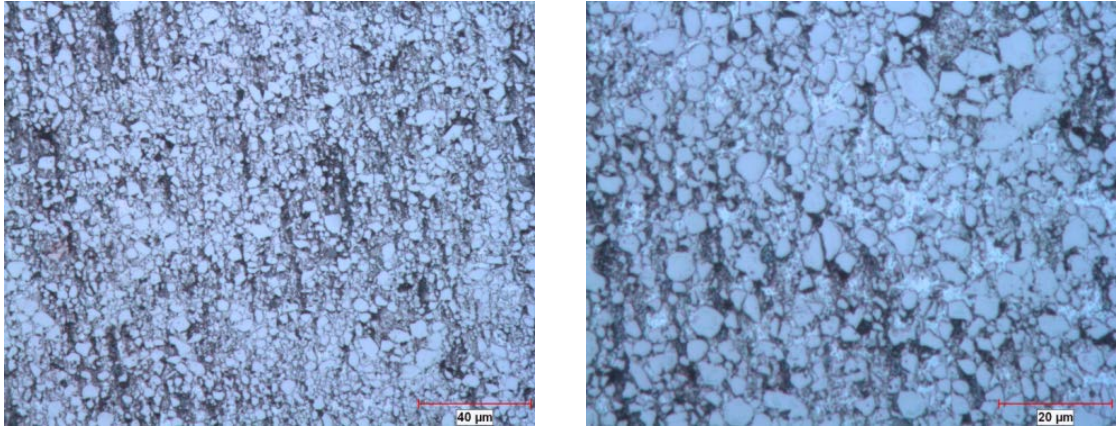
Çizelge 4.3 Isıl işlemsiz (mavi) ve ısıl işlemlili (kırmızı) numune listesi

Katkı %'si	Numune Numarası	Ortalama Sertlik (HRB 10)	Sertlik Standart Sapması	Mukavemet (Mpa)	% Uzama
15	45-1-2	79,84	3,43	494,33	7,86
15	45-3-1	123,12	5,48	757,66	8,00

### 4.4. %20 Katkılı Numuneler

Şekil 4.11'de %20 katkılı numunelerin mikro yapı fotoğrafları verilmektedir. %20 oranında TiB<sub>2</sub> içeren kompozitin mikroyapısında TiB<sub>2</sub> parçacıklarının düzenli dağıldığı ve %10 TiB<sub>2</sub> içeren numuneye kıyasla daha TiB<sub>2</sub> yoğunluğunun arttığı görülmektedir.

% 20 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitik teorik özgül ağırlığı 3,13 olarak hesaplanmıştır. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde, kompozitin yoğunluğu 3,02 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, % 96,7 teorik yoğunluk anlamına gelmektedir. TiB<sub>2</sub> oranının artması ile kompozitin % teorik yoğunluğu azalmıştır. Yapılan deneylerde tüm numunelerde aynı sinterleme sıcaklığı uygulanmıştır. TiB<sub>2</sub> oranı yüksek olan numunelerde sinterleme sıcaklığının artırılması % teorik yoğunluk değerlerindeki düşüşü engelleyebilir.



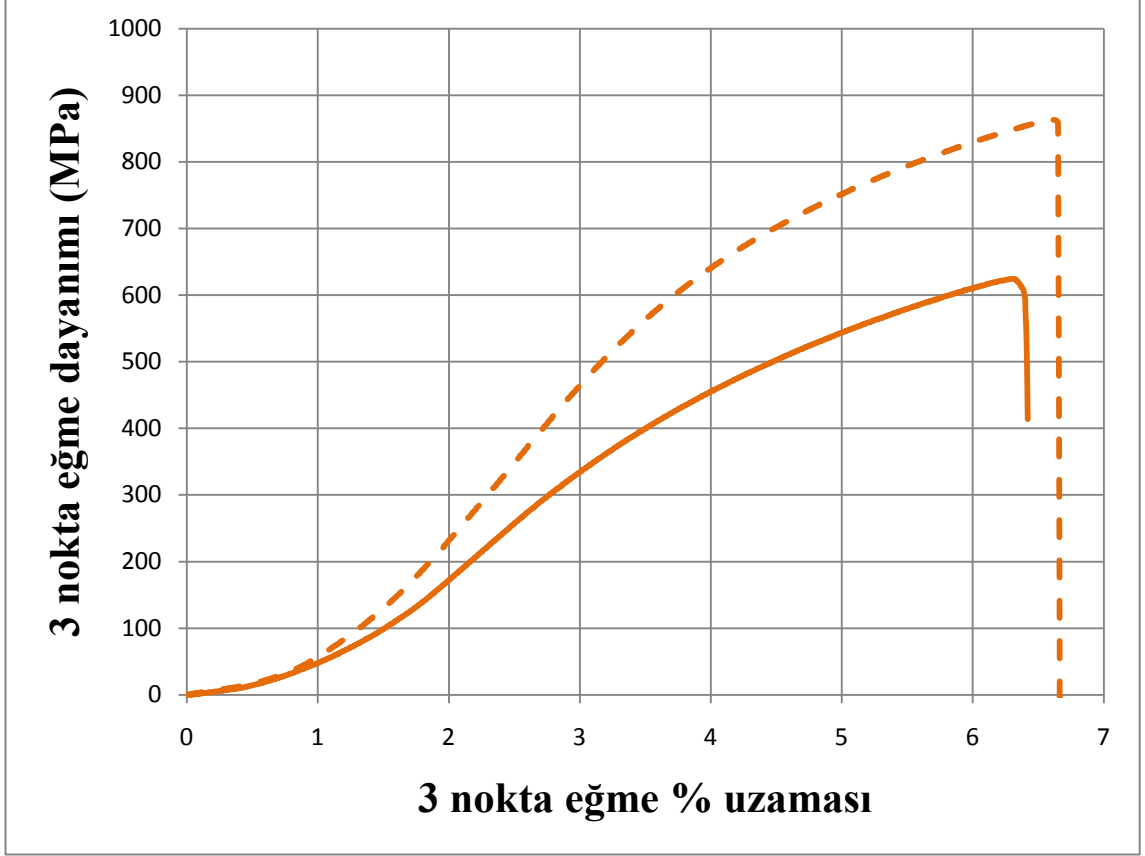
Şekil 4.11 500 ve 1000 büyütmede %20 katkılı numunelerin mikroyapı fotoğrafı

Çizelge 4.4'te üzerinde çalışılmış %20 katkılı numunelerin bir listesi yer almaktadır. Isıl işlem öncesinde katkısız numuneler 570-625 MPa eğme mukavemeti, %7,4-6,4 uzama ve 93-86 HB10 sertlik göstermişlerdir. Katkısız numunelerle karşılaştırıldığında, ısıl işlemsiz numunelerde % 20 oranında TiB<sub>2</sub> eklenmesi sonucunda mukavemette artış olmuştur. Isıl işlem sonrasında mukavemet 867-777 MPa aralığına yükselmiş, % uzama % 6,7-5,9 aralığına inmiş ve sertlik 130-123 HB10 aralığına yükselmiştir. Isıl işlemlenmiş numunelerde %20 oranında TiB<sub>2</sub> eklenmesi mukavemette artış sağlamamıştır. Isıl işlemlenmiş numunelerde TiB<sub>2</sub> oranı arttıkça %20 TiB<sub>2</sub> oranına kadar mukavemette az miktarda düşüş görülmektedir. % uzama oranı, %10 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitlere göre azalmış ve % 6-7 aralığına inmiştir.

Çizelge 4.4 Isıl işlemsiz (mavi) ve ısıl işlemlili (kırmızı) numune listesi

Katkı % 'si	Numune Numarası	Ortalama Sertlik (HRB 10)	Sertlik Standart Sapması	Mukavemet (Mpa)	% Uzama	Aşınma Oranı ( $\times 10^{-3}$ ) ( $\text{mm}^3/\text{N.m}$ )
20	38-2-2	86,80	3,17	571,28	7,41	
20	41-3-1	90,72	1,84	572,28	7,38	
20	60-1	93,80	2,00	621,60	6,39	
20	60-2	91,66	1,62	624,60	6,32	
20	41-1-2	123,68	3,26	789,60	6,37	
20	41-2-1	130,20	0,76	777,40	6,78	
20	57-1	128,60	4,60	858,03	5,93	
20	57-2	124,60	1,51	867,01	6,60	0,35 $\pm$ 0,06

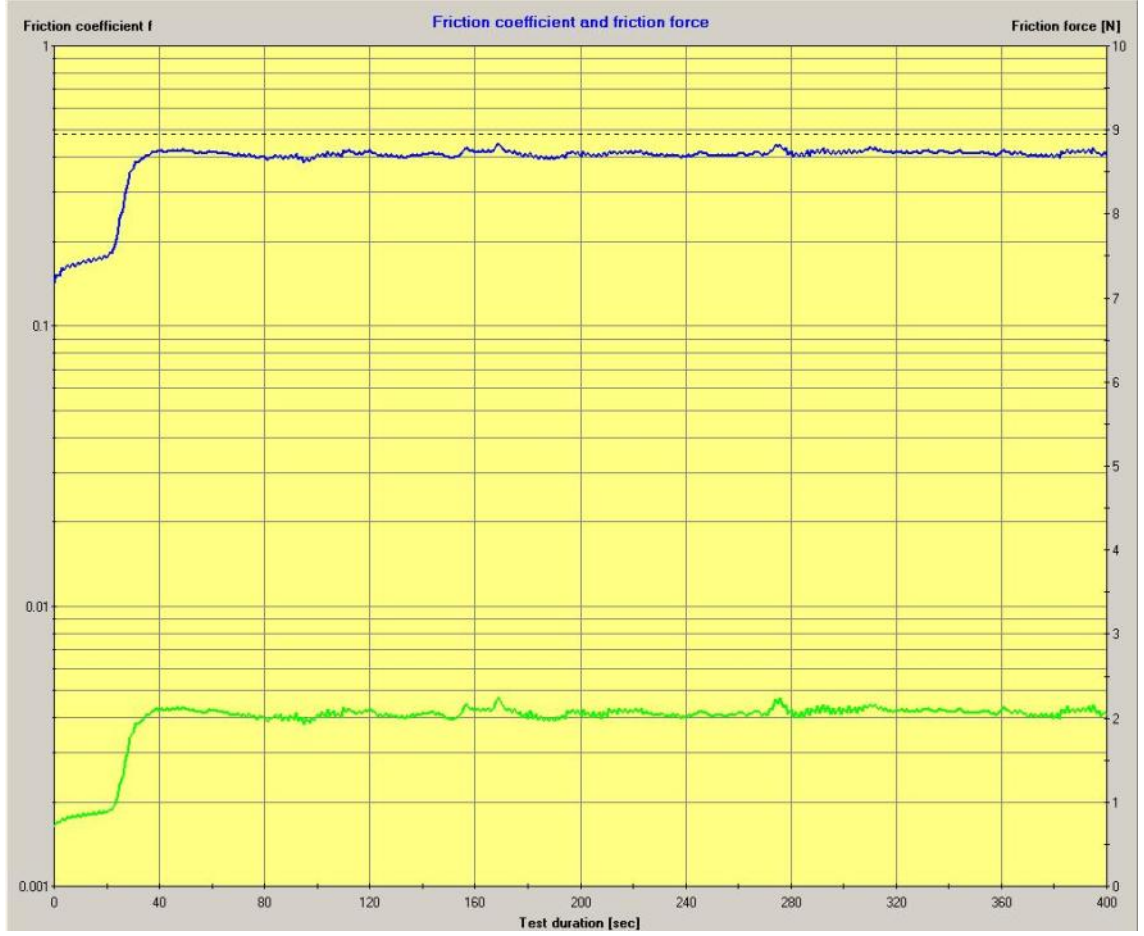
Şekil 4.12’de % 20 katkılı ısıl işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş numunelerin 3 nokta eğme testlerinden elde edilmiş olan mukavemet-%uzama grafikleri yer almaktadır. Grafikte 60-1 ısıl işlemsiz ve 57-2 ısıl işlemlili numunelerin değerleri görülmektedir. Aşınma testleri 57-2 numaralı numune üzerinde yapılmıştır.



Şekil 4.12 Isıl işlemlili ve ısıl işlemsiz %20 katkılı numunelerin 3 nokta eğme mukavemet % uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıl işlemlili numuneye aittir.)

Şekil 4.13 aşınma test cihazından elde edilen %20 katkılı numunelerin aşınma test grafiklerini göstermektedir. Sürtünme katsayısı testin başlangıcında 0,1 değerinin biraz üzerindedir ve zamanla sürtünme katsayısı artarak aşınma izi derinleşmektedir. Daha sonra sürtünme katsayısı değeri 0,4 değerinde devam etmiştir.

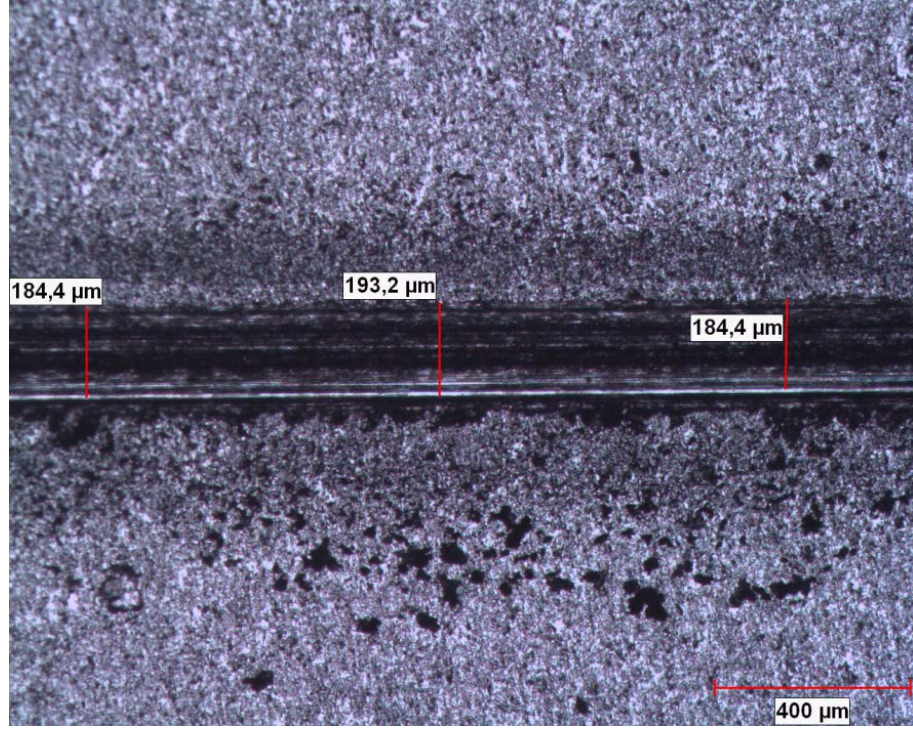




Şekil 4.13 Aşınma test süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değişimi

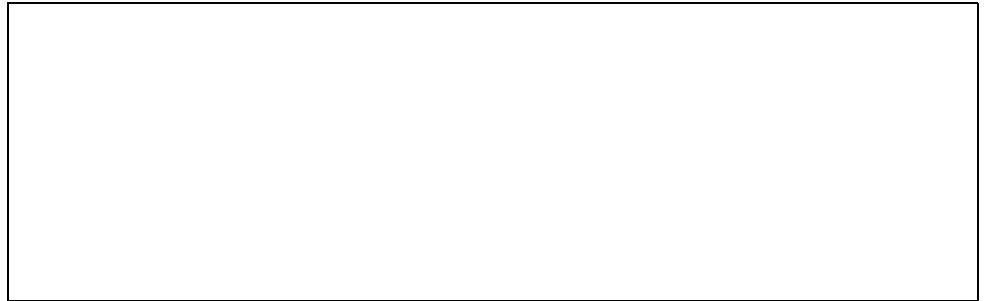
Şekil 4.14’de aşınma testleri sonucu oluşan aşınma izinin mikro yapı fotoğrafı görülmektedir. İz genişliği  $187 \pm 5 \mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.





Şekil 4.14 %20 katkılı numunelerin aşınma testi sonrası mikroyapı fotoğrafı

Şekil 4.15'te aşınma izi üzerinden profilometre ile alınmış aşınma izinin profili görülmektedir. Profil alanı  $704 \pm 121 \mu\text{m}^2$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak yapılan hesaplamada aşınma oranı  $0,35 \pm 0,06 \text{ mm}^3/\text{N.m}$  olarak belirlenmiştir. %20  $\text{TiB}_2$  içeren kompozitin aşınma oranı katkısız ve %10  $\text{TiB}_2$  içeren kompozitlere kıyasla daha düşüktür.

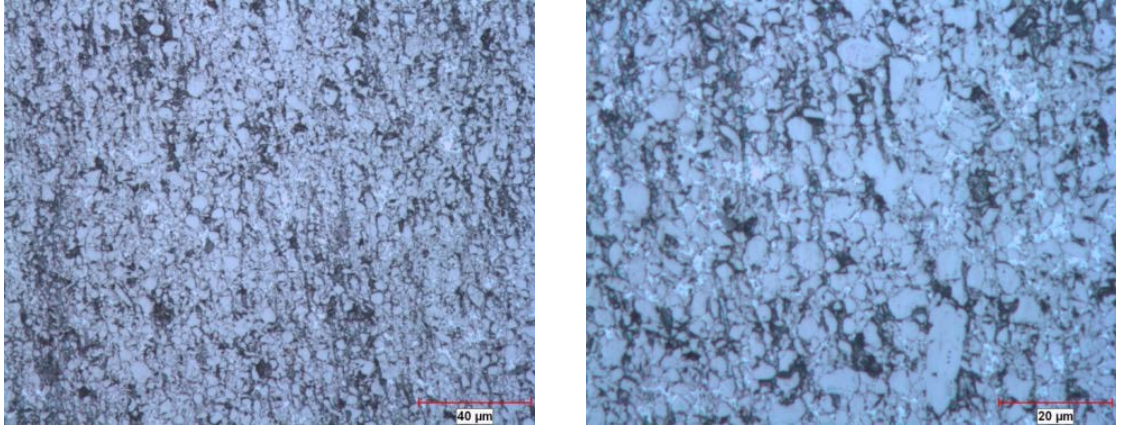


Şekil 4.15 %20 katkılı numunenin aşınma izi üzerinden alınmış profil izi

%20 katkılı numunelerin özgül ağırlığının %10 katkılı numunelerinkinden daha fazla olmasına karşılık, mekanik ve aşınma özellikleri göz önüne alındığında % 20 TiB<sub>2</sub> içeren numunenin içerisindeki katkı miktarı en uygun gözükmetedir. Elde edilen en yüksek aşınma dayanımı bu numunelerde elde edilmiştir. Bunlara ek olarak mukavemetleri ve % uzamaları kabul edilebilir seviyededir.

#### 4.5. %30 Katkılı Numuneler

Şekil 4.16'da %30 katkılı numunelerin mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. TiB<sub>2</sub> oranındaki artış sonucunda partiküller arasındaki matris fazının oranının çok azaldığı optik mikroskop incelemelerinden anlaşılmıştır.



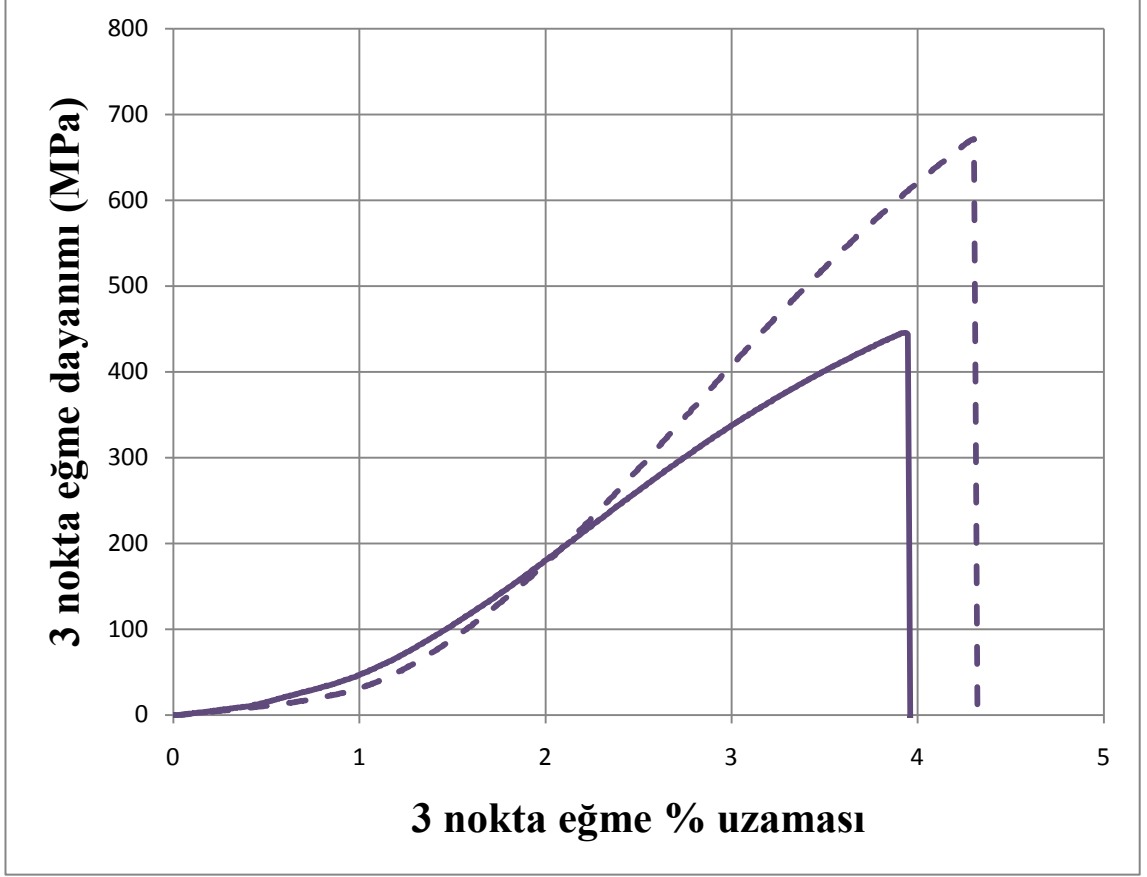
Şekil 4.16 500 ve 1000 büyütmede %30 katkılı numunelerin mikroyapı fotoğrafı

Çizelge 4.5'te üzerinde çalışılmış %30 katkılı numunelerin bir listesi yer almaktadır. Isıl işlem öncesinde katkısız numuneler 445-388 MPa eğme mukavemeti, %3,93-3,28 uzama ve 94-87 HB10 sertlik göstermişlerdir. Isıl işlem sonrasında mukavemet 654-570 MPa aralığına yükselmiş, % uzama % 4,49-3,75 aralığına inmiş ve sertlik 133-110 HB10 aralığına yükselmiştir. Bu değerler katkısız ve %20 oranına kadar TiB<sub>2</sub> içeren numunelerin mukavemet değerlerinin çok altındadır. % uzama değerleri ise % 4 civarına düşmüştür. Mukavemet ve % uzamadaki düşüşün, yapıdaki matris fazının oranının az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.5 Isıl işlemsiz (mavi) ve ısıl işlemlı (kırmızı) numune listesi

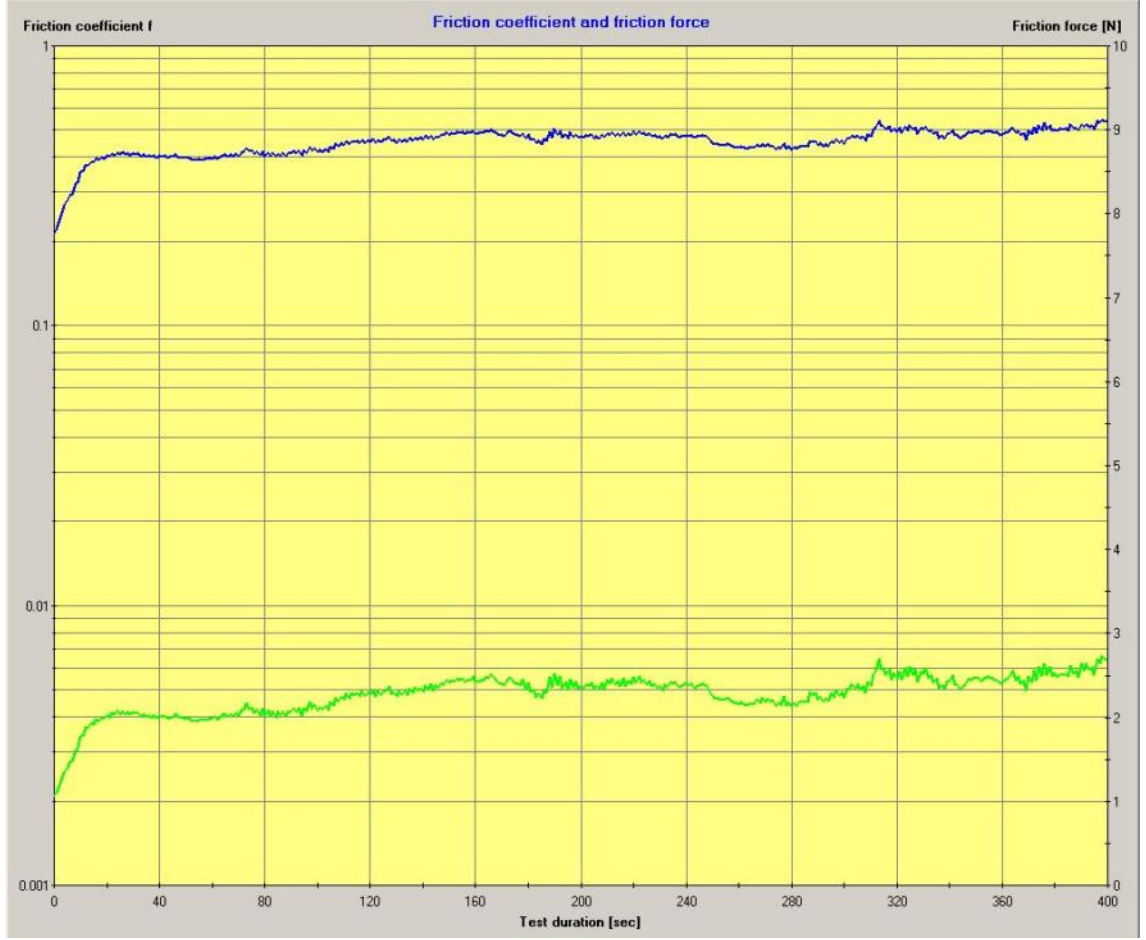
Katkı %'si	Numune Numarası	Ortalama Sertlik (HRB 10)	Sertlik Standart Sapması	Mukavemet (Mpa)	% Uzama	Aşınma Oranı ( $\times 10^{-3}$ ) ( $\text{mm}^3/\text{N.m}$ )
30	40-3-1	94,70	4,456	388,49	3,75	
30	59-1	86,96	2,29	423,90	3,28	
30	59-2	92,98	2,05	445,26	3,93	
30	40-1-1	110,52	17,53	570,56	4,49	
30	40-2-1	133,27	8,49	654,49	4,43	0,56 $\pm$ 0,09
30	40-2-2	112,92	9,76	579,75	4,21	
30	58-1	122,12	1,92	612,32	3,75	
30	58-2	119,48	0,71	596,57	4,26	

Şekil 4.17'de %30 katkılı ısıl işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş numunelerin 3 nokta eğme testlerinden elde edilmiş olan mukavemet-%uzama grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.17 Isıl işlemlenmiş ve ısıl işlemlenmemiş %30 katkılı numunelerin 3 nokta eğme mukavemet - % uzama grafikleri (kesikli çizgi ısıl işlemlenmiş numuneye aittir.)

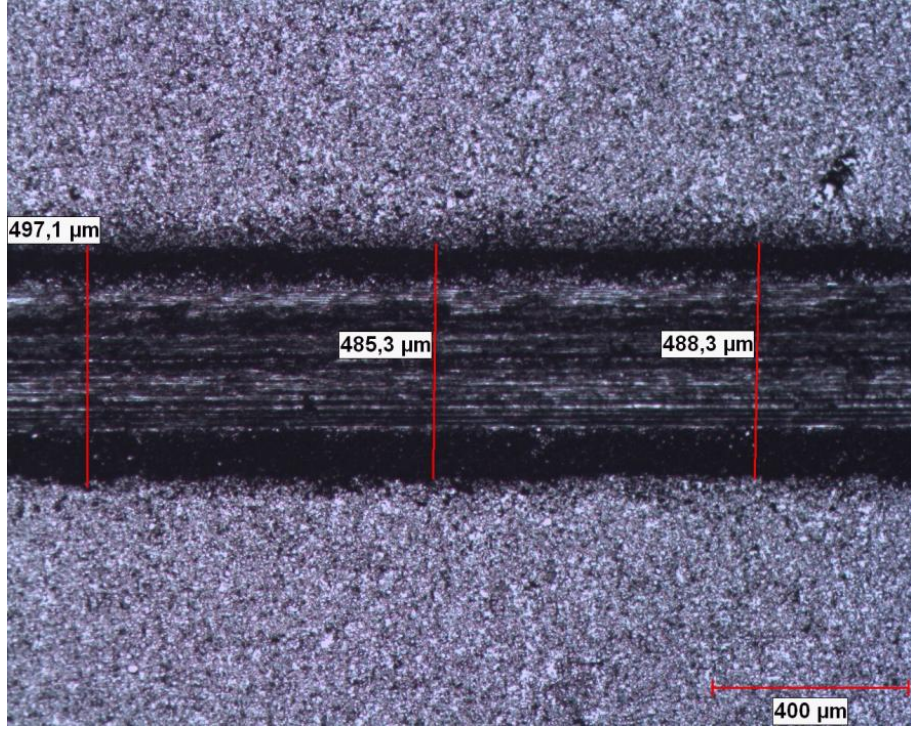
Şekil 4.18’de aşınma testi sonucu elde edilen aşınma grafiği görülmektedir. Sürtünme katsayısının test süresince değişim grafiği, % 10 TiB<sub>2</sub> içeren numunenin grafiğine benzemektedir.



Şekil 4.18 Aşınma test süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı (mavi) ve sürtünme kuvvetinin (yeşil) değişimi

Şekil 4.19 aşınma testi sonrası oluşan aşınma izinin mikro yapı fotoğraflarını göstermektedir. İz alanı  $490 \pm 6,13 \mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır.





Şekil 4.19 %30 katkılı numunelerin aşınma testi sonrası mikroyapı fotoğrafı

Şekil 4.20’de aşınma testi sonrası oluşan aşınma izininin profilometre ile yapılan ölçümü görülmektedir. İz kesit alanı  $1119,6 \pm 180 \mu m^2$  olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak hesaplanan aşınma oranı  $0,55 \pm 0,09 mm^3/N.m$ ’dir. Bu değer %20 oranında  $TiB_2$  içeren kompozitn aşınma oranından yüksektir.  $TiB_2$  oranındaki artış, % 20 değerine kadar aşınma oranını azaltmış, sonrasında aşınma oranı artmıştır.



Şekil 4.20 %30 katkılı numunenin aşınma izi üzerinden alınmış profil izi

## 5. SONUÇLAR

Tüm numunelerin yoğunluk değerleri Çizelge 5.1’de sunulmaktadır. Sinterlenmiş katkısız alüminyum bakır alaşımı, % 10 ve %15 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitlerin % teorik yoğunluk oranları %98’in üzerindedir. %20 ve %30 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitler ise %96,5’ten fazla % teorik yoğunluk değerine sahiptir. Katkı fazı miktarı arttıkça yoğunluğun azaldığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur, çünkü katkı fazı miktarının artması ile sinterleme sırasında sıvı faz tarafından ısıtılması gereken yüzey artmaktadır (KARAKAŞ 2007). Bu sonuçtan, yüksek oranda TiB<sub>2</sub> içeren numunelerde 620°C sinterleme sıcaklığının yetersiz olduğu ve % 20 ve fazla TiB<sub>2</sub> içeren kompozitlerde sinterleme sıcaklığının veya sinterleme süresinin artırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak bu değerlerin değiştirilmesi beraberinde erime, terleme gibi başka problemleri de getireceği için parametreler iyi ayarlanmalıdır.

Çizelge 5.1. Numunelerin yoğunluk değerlerinin TiB<sub>2</sub> oranına göre değişimi

Numune	Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Ölçülen Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	% Teorik Yoğunluk
Al-%4Cu	2,78	2,73	98,13
%10 TiB <sub>2</sub>	2,95	2,91	98,74
%15 TiB <sub>2</sub>	3,04	2,99	98,51
%20 TiB <sub>2</sub>	3,13	3,02	96,72
%30 TiB <sub>2</sub>	3,30	3,19	96,57

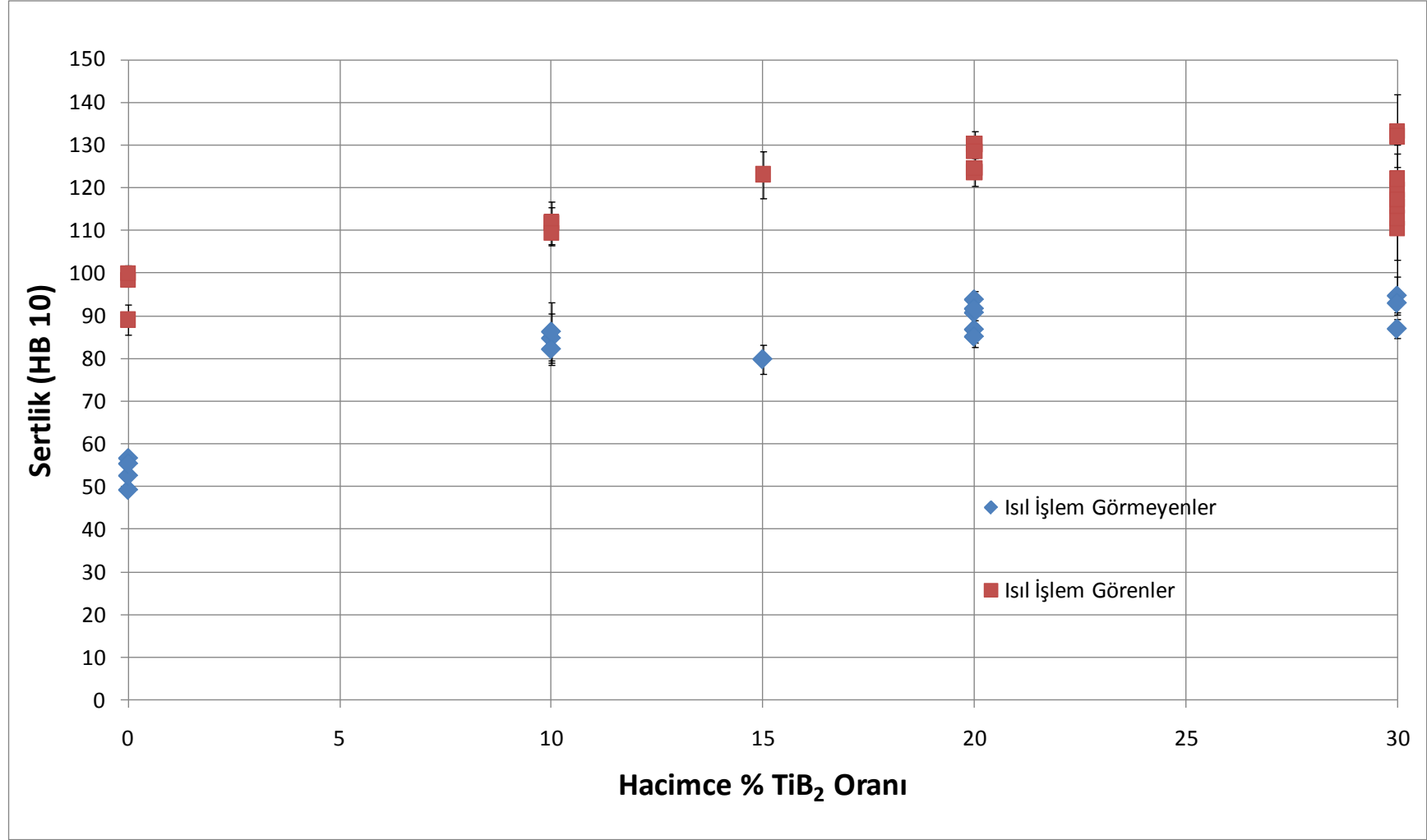
Katkısız Al-%4Cu alaşımının ve %10, 15, 20, 30 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitlerin optik mikroskop incelemelerinde mikroyapıda az miktarda gözenek olduğu ve sinterleme işleminin başarılı olduğu görülmüştür. Bu gözlem, yapılmış olan yoğunluk ölçümleri ile uyumludur.

Üretilen tüm alüminyum-TiB<sub>2</sub> kompozit numunelerin sertlik değerleri, TiB<sub>2</sub> oranının fonksiyonu olarak Çizelge 5.2’de ve Şekil 5.1’de verilmektedir. Kompozitlerin sertlik değerlerinin, %20 TiB<sub>2</sub> oranına kadar artan TiB<sub>2</sub> oranı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Isıl işlem uygulanmamış olan numunelerde sertlik değeri TiB<sub>2</sub> eklenmediği zaman 55 HB10 olurken, %20 TiB<sub>2</sub> eklenmesi sonucunda 90 HB10 değerine yükselmiştir. Isıl işlem uygulandığında bu değerler sırasıyla 100 HB10 ve 130 HB10 değerlerine yükselmiştir. %30 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitlerin sertlik değerlerinin % 20 TiB<sub>2</sub> içeren kompozitten farklı olmadığı görülmüştür. Bu durumun, artan TiB<sub>2</sub> oranı ile azalan matris miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Çizelge 5.2 Üretilen kompozitlerin sertlik, 3 nokta eğme mukavemeti, % uzama ve aşınma oranları

Katkı %'si	Numune Numarası	Ortalama Sertlik (HRB 10)	Sertlik Standart Sapması	Mukavemet (Mpa)	% Uzama	Aşınma Oranı ( $\times 10^{-3}$ ) ( $\text{mm}^3/\text{N.m}$ )
0	39-1-2	49,26	0,66	435,92	20,76	
0	39-2-1	52,60	3,53	418,12	20,36	
0	54-1	56,68	0,91	556,69	28,03	
0	54-2	55,40	1,72	542,35	27,86	
10	50-1	84,76	5,76	673,28	12,86	
10	50-2	82,20	3,71	668,11	14,18	
10	52	86,28	6,80	690,30	10,44	
15	45-1-2	79,84	3,43	494,33	7,86	
20	38-2-2	86,80	3,17	571,28	7,41	
20	41-3-1	90,72	1,84	572,28	7,38	
20	60-1	93,80	2,00	621,60	6,39	
20	60-2	91,66	1,62	624,60	6,32	
30	40-3-1	94,70	4,45	388,49	3,75	
30	59-1	86,96	2,29	423,90	3,28	
30	59-2	92,98	2,05	445,26	3,93	
0	61-1	89,06	3,48	833,70	16,47	
0	61-2	98,38	1,42	942,80	24,69	12,16 ± 3,16
0	61-3	99,92	1,96	809,92	21,35	
10	37-3-2	111,80	4,94	789,64	9,19	
10	37-4-2	111,88	3,62	735,83	9,11	
10	62-1	109,48	2,88	852,54	10,04	
10	62-2	109,44	1,38	908,89	11,67	1,69 ± 0,13
15	45-3-1	123,12	5,48	757,66	8,00	
20	41-1-2	123,68	3,26	789,60	6,37	
20	41-2-1	130,20	0,76	777,40	6,78	
20	57-1	128,60	4,60	858,03	5,93	
20	57-2	124,60	1,51	867,01	6,60	0,35 ± 0,06
30	40-1-1	110,52	17,53	570,56	4,49	
30	40-2-1	133,27	8,49	654,49	4,43	0,56±0,09
30	40-2-2	112,92	9,76	579,75	4,21	
30	58-1	122,12	1,92	612,32	3,75	
30	58-2	119,48	0,71	596,57	4,26	

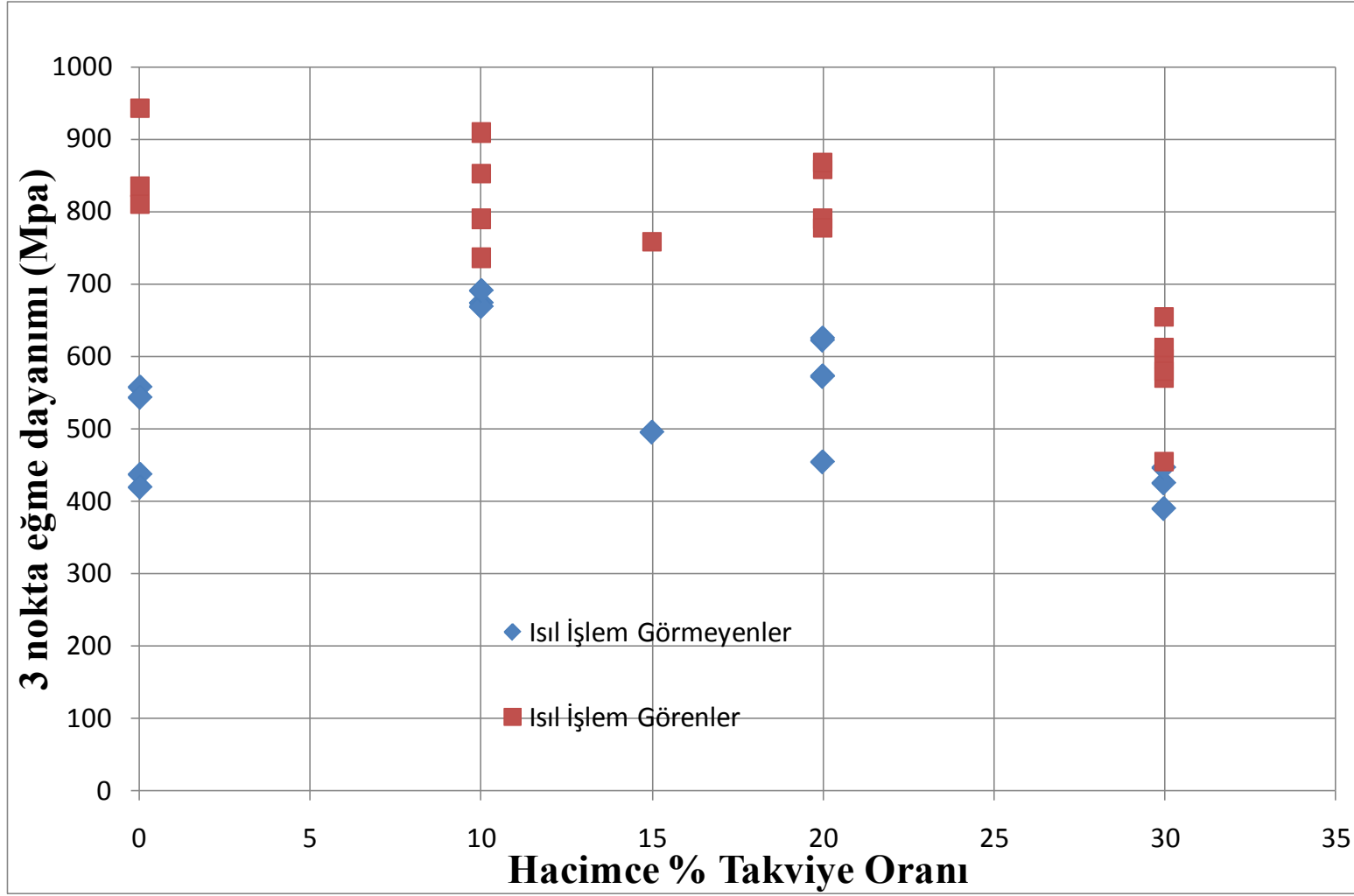


Şekil 5.1. Numunelerin sertlik değerlerinin TiB<sub>2</sub> oranına göre değişimi

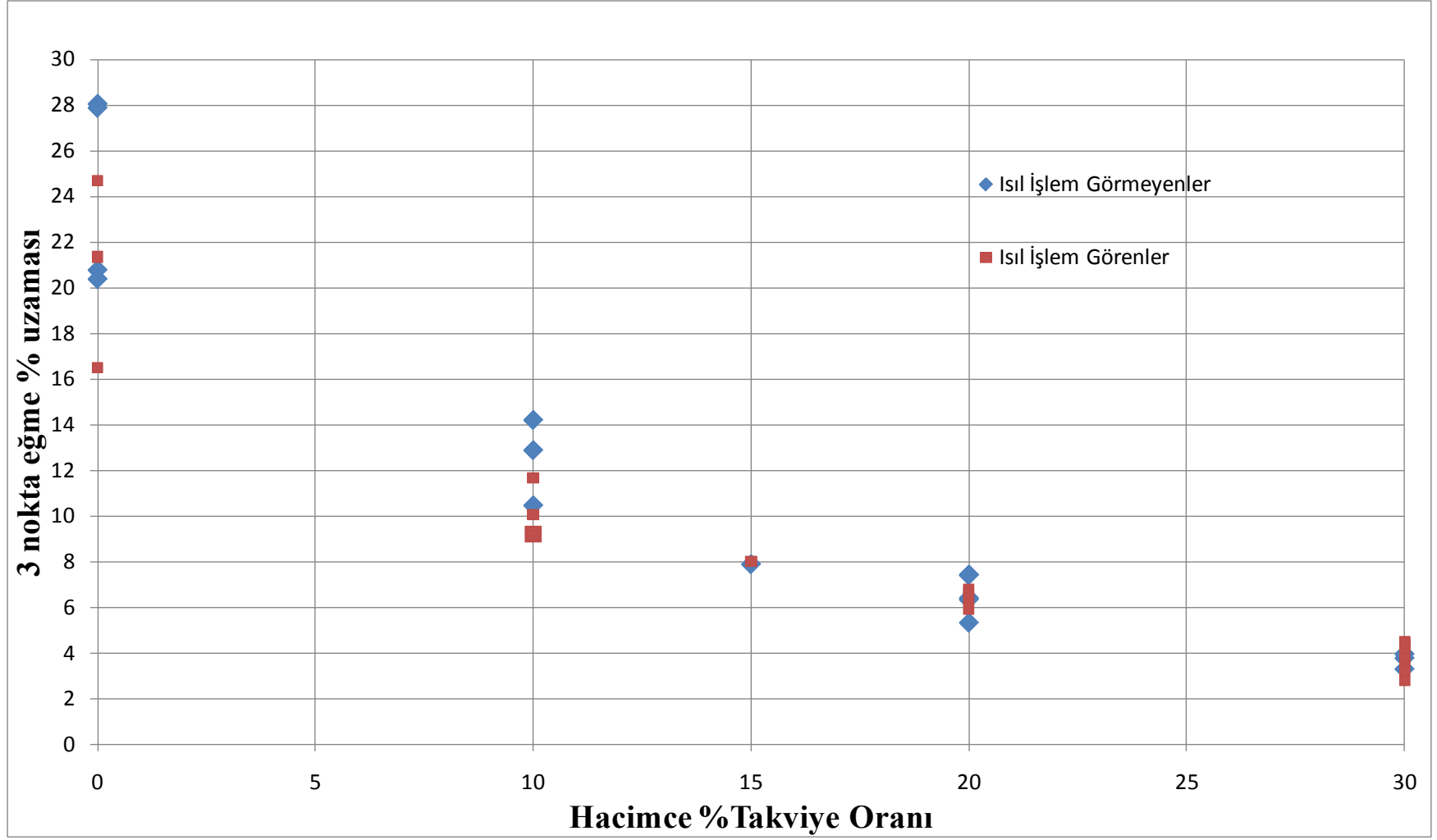
Üretilen kompozitlerin 3 nokta eğme mukavemet değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.2'de sunulmuştur. TiB<sub>2</sub> içermeyen numune için mukavemet değeri ısıtılma işlemi yapılmış 450 - 550 MPa, ısıtılma işlemi yapılmamış 800 - 950 MPa aralığındadır. Isıtılma işlemi yapılmamış numunelerde TiB<sub>2</sub> oranı % 20 ye kadar artırılması sonucunda mukavemette artış sağlanmıştır. Isıtılma işlemi uygulanması sonucunda mukavemet değerleri tüm numunelerde artmıştır. Isıtılma işlemi yapılmamış ve ısıtılma işlemi yapılmış durumlarda mukavemet değerleri, %10, 15 ve 20 oranlarında TiB<sub>2</sub> içeren kompozitler için benzer değerlerde olmuştur. Isıtılma işlemi yapılmamış numunelerde % 10 ve 20 oranında TiB<sub>2</sub> eklenmesi mukavemette az miktarda azalmaya sebep olmuştur. Bu kompozitler için ısıtılma işlemi yapılmamış durumda 450-700 MPa civarında olan gerilme değerleri, ısıtılma işlemi sonrasında 720-900 MPa aralığına ulaşmıştır. % 30 oranında TiB<sub>2</sub> eklendiğinde, mukavemet değerleri azalmıştır. Bunun sebebi, fazla miktarda titanyum

Üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen gerilme değerleri Şekil 5.3'te verilmektedir. TiB<sub>2</sub> eklenmemiş olan alüminyum-%4 bakır numunesi %25 civarında gerilme değerine sahiptir. Isıtılma işlemi uygulanmamış ve uygulanmış olan numunelerde artan TiB<sub>2</sub> oranı ile gerilmenin azaldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (KARAKAŞ 2007). % 10 TiB<sub>2</sub> içeren numunede gerilme %10-14 aralığına inerken, % 15 ve %20 TiB<sub>2</sub> içeren numunelerde %8-%6 civarındadır. %30 TiB<sub>2</sub> eklendiğinde ise gerilme %3-%5 aralığına düşmüştür. Isıtılma işlemi sonrasında gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir.

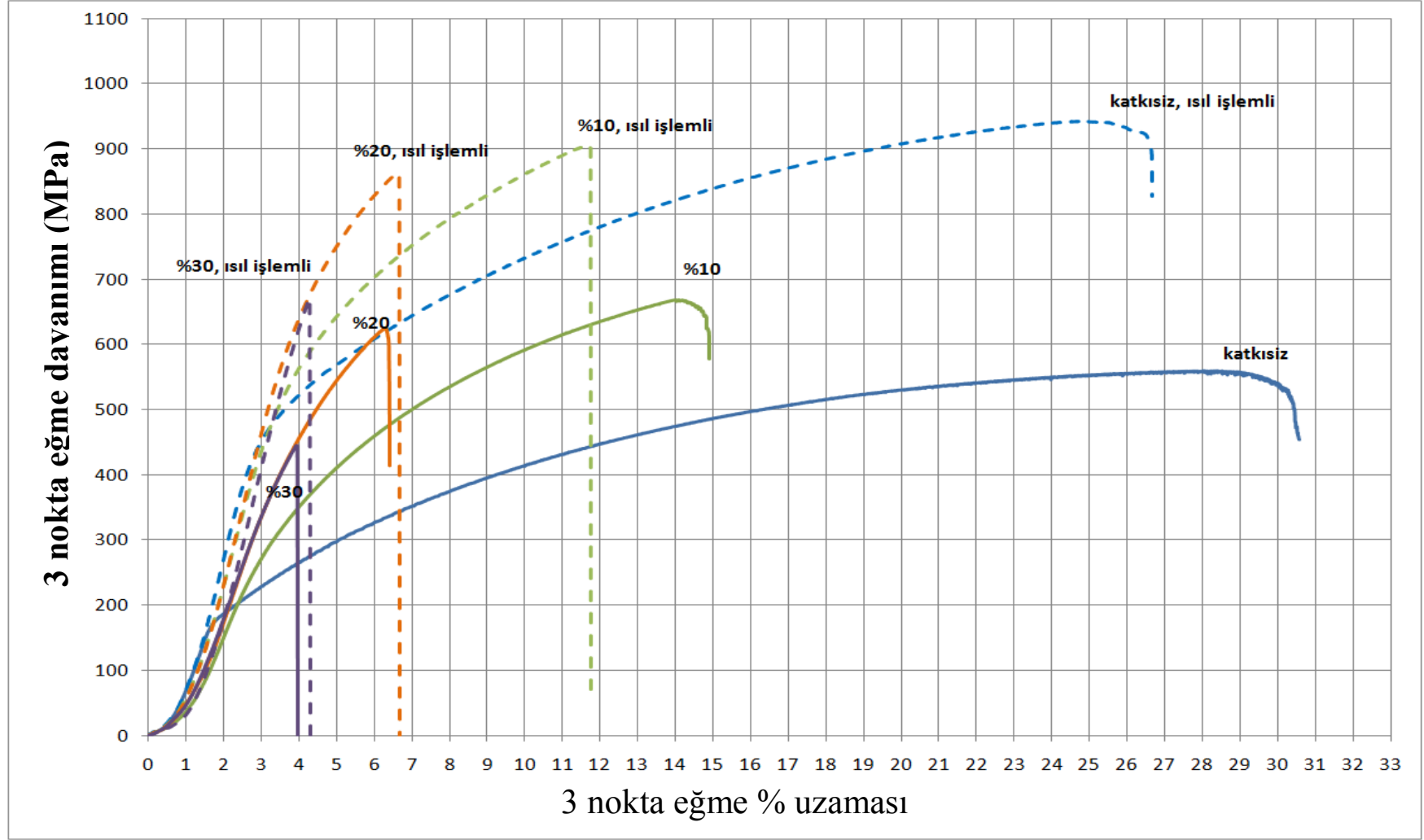
Farklı oranlarda TiB<sub>2</sub> içeren kompozitler için üç nokta eğme testleri sonucunda elde edilen tipik gerilme-gerilme grafikleri Şekil 5.4'te verilmektedir.



Şekil 5.2 Numunelerin üç nokta eğme mukavemeti değerlerinin TiB<sub>2</sub> oranına göre değişimi

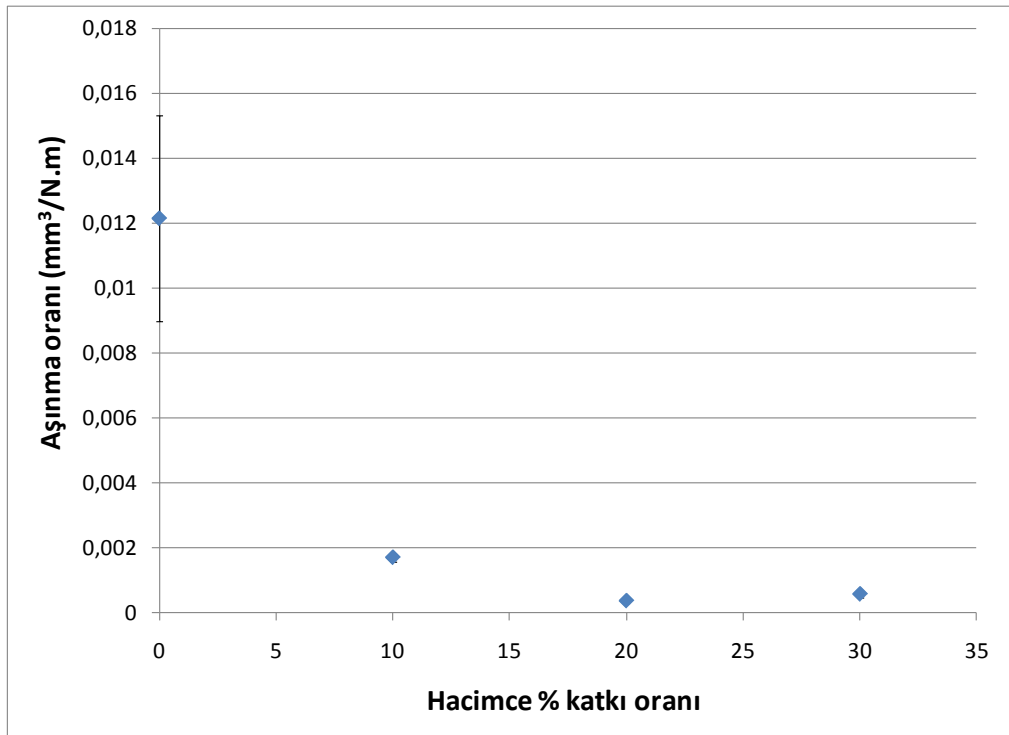


Şekil 5.3 Numunelerin gerinim değerlerinin TiB<sub>2</sub> oranına göre değişimi



Şekil 5.4 Numunelerin gerilme-gerinim değerlerinin TiB<sub>2</sub> oranına ve ısıtılma durumuna göre değişimi

Numunelerin içerdikleri  $TiB_2$  oranlarına göre aşınma oranları Şekil 5.5'te verilmektedir.  $TiB_2$  içeren numunelerin aşınma oranlarının, katkısız numunelere kıyasla çok daha düşük olduğu görülmektedir. En düşük aşınma oranı % 20  $TiB_2$  içeren kompozitte olmuştur. Mekanik özelliklerle birlikte aşınma değerleri dikkate alındığında, %20  $TiB_2$  içeren kompozitin en iyi değerleri verdiği görülmektedir. Uygulama alanına göre biraz daha kötü aşınma direnci ile birlikte daha yüksek tokluk gerektiren uygulamalarda %10  $TiB_2$  içeren kompozit de önerilebilir.



Şekil 5.5 Numunelerin katkı oranlarına göre aşınma oranları

## 6. KAYNAKLAR

- AGUILAR-SANTILLAN, J., 2008, "Wetting of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Molten Aluminum: The Influence of BaSO<sub>4</sub> Additions", Journal of Nanomaterials
- ANONİM-1, ASTM B528-99, 2000, "Standard test method for transverse rupture strength of metal powder specimens"
- ANONİM-2, 1999, USA Department of Defense Handbook, "Composite Materials Handbook", Vol.4
- ASKELAND, D. R., Fulay, P. P., 2006, "The Science & Engineering of Materials, 5th Edition",
- CHAWLA, K. K., 2001, "Composite Materials Science and Engineering", Springer Publishing,
- CLYNE, T. W., 2001, "Metal Matrix Composites: Matrices and Processing", Encyclopedia of Materials: Science and Technology", Elsevier,
- DAS, S., Das, K., 2006, "Ageing behavior of Al-4,5 wt% Cu matrix alloy reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrSiO<sub>4</sub> particulate varying particle size", J Mater Sci, 41:5402-5406
- DONALDSON, S. L., Miracle D. B., "Introduction to Composites", Air Force Research Laboratory
- DURMUŞ, H., Akgün S., Şahin, S., 13-15 Mayıs 2009, "Çökeltme sertleştirme uygulanan AA7012 Alüminyum alaşımlarında sertliğin mikroyapı ile değişiminin İncelenmesi", 5. Uluslararası ileri teknolojiler sempozyumu (IATS'09), Karabük Türkiye



- EJIOFOR, J. U., Reddy, R. G., 1997, "Developments in the Processing of Particulate Al-Si Composites", Journal of Materials
- FROYEN, L., Verilinden, B., 1994, "Aluminum Matrix Composites Materials", Training in Aluminum Application Technologies (TALAT Lecture 1402)
- GERMAN, M. R., 1996, "Sintering Theory and Practice", Wiley-Interscience Newyork USA
- GERMAN, R. M., 1985, "Liquid Phase Sintering", Plenum Press New York
- GROOVER, M. P., 2007, "Fundamentals of Modern Manufacturing, Third Edition, John Wiley and Sons
- KAINER, K. U., 2006, "Basics of Metal Matrix Composites", WILEY-VCH Verlag
- KANG, S., 2005, "Sintering Densification, Grain Growth and Microstructure", Elsevier
- KARAKAS, M. S., 2007, "Effect of aging on the mechanical properties of boron carbide particle reinforced aluminum metal matrix composites", ODTÜ Doktora Tezi
- KEVORKIJAN, V., Haziran 2007, "Development of Al MMC Composites for Automotive Industry", Deformation and Structure of Metals and Alloys Symposium Belgrade Yugoslavia
- LLOYD, D. J., 1994, "Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites", International Materials Reviews, vol.39, No.1

- MIN, Z., Gaohui, W., Longtao, J., 2004, "Aging behavior and precipitation kinetics of SiCp/6061Al composites", *Journal of Materials Science*, 39, 1759-1763
- MIRACLE, D. B., "Aeronautical Applications of Metal-Matrix Composites", Air Force Research Laboratory
- MIRACLE, D. B., 2005, "Metal Matrix Composites-From Science to Technological Significance", *Composites Sciences and Technology*, 65, 2526-2540
- MITRA, R., Mahajan, Y. R., Kasim 1993, "Interfaces in Discontinuously Reinforced Metal-Matrix Composites", *Defence Science Journal*, Vol 43, No 4, pp 397-418
- O'DONNELL, G., Looney, L., 2001, "Production of aluminum matrix composite components using conventional PM technology", *Materials Science and Engineering A*, 303, pp 292-301
- POLMEAR, I. J., 2004, "Aluminum Alloys – A Century of Age Hardening", *Materials Forum*, vol 28
- POPESCU, I. N., Zamfir, S., Anghelina, V. F., Rusanescu, C. O., 2010, "Processing by P/M route and characterization of new ecological aluminum matrix composites (AMC)", *International Journal of Mechanics*, vol 4, no 3
- SCHAFFER, G. B., Sercombe, T. B., Lumley, R. N., 2001, "Liquid Phase Sintering of Aluminum Alloys", *Materials Chemistry and Physics*, 67, pp 85-91
- SCHAFFER, G. B., Sercombe, T., Lumley, R. N., 2001, "Liquid phase sintering of aluminum alloys", *Materials Chemistry and Physics*, vol 67, pp 85-91
- SHACKELFORD, J. F., 2008, "Introduction to Materials Science for Engineers", Prentice Hall International

- SURAPPA, M. K., 2003, "Aluminum matrix composites: Challenges and opportunities", Sadhana, Vol. 28, Parts 1&2, 319s-334s
- ŞAHİN, Y. , 2000, "Kompozit Malzemelere Giriş", Gazi Kitabevi
- ŞEN, O., 2005, "TiO<sub>2</sub> partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi", YL Tezi
- TJONG, S. C., Tam, K. F., 2006, "Mechanical and thermal expansion behavior of hipped aluminum-TiB<sub>2</sub> composites", Materials Chemistry and Physics, vol 97, no 1, pp 91-97
- TU, J.P., Wang, N.Y., Yang, Y. Z., Qi, W. X., Liu, F., Zhang, X. B., Lu, H.M., Liu, M. S., 2002, "Preparation and properties of TiB<sub>2</sub> nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing" Materials Letters 52, pp 448-452
- UPADHYAYA, G. S., 2002, "Powder Metallurgy Technology, Cambridge International Science Publishing
- ÜNAL, A., Bakkaloğlu, A., 1988, "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Malzemelerdeki Son Gelişmelere Toplu Bir Bakış", 5. Metalürji Kongre ve Sergisi, İstanbul, pp 155-176
- WANG, H.Y., Jiang, Q.C., Wang, Y., Ma, B.X., Zhao, F., 2004, "Fabrication of TiB<sub>2</sub> particulate reinforced magnesium matrix composites by powder metallurgy", Materials Letters 58, pp 3509-3513

## ÖZGEÇMİŞ

Feyzi Emrah BAŞAR, 1985 yılında Adana’da doğdu. İlköğrenimini Adana Anadolu Lisesi’nde tamamladı. Orta öğretimini ise Özel Gündoğdu Lisesi’nde tamamladı. 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi’nde yüksek öğrenimine başladı ve 2009 yılında makine mühendisi unvanını alarak mezun oldu. 2009 yılında Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Yazar “Araştırma Görevlisi” olarak yüksek lisansına Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde devam etmektedir.