

**BOR KARBÜR TAKVİYELİ  
METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDEN  
KAM ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**AHMET YÜCEL**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
2015**

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

**BOR KARBÜR TAKVİYELİ  
METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDEN  
KAM ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Ahmet YÜCEL**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Burhan SELÇUK**

**SİVAS  
2015**



Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır.  
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Ahmet YÜCEL, 2015

## **ETİK**

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

02.10.2015

Ahmet YÜCEL

## TEŞEKKÜR

Akademisyenliğe adım attığım ilk g¼n¼mden bug¼ne kadar, yapmış olduğum t¼m giriőimlerde desteğini ve ođ¼d¼n¼ esirgemeyen, danıőmanım saygideğer hocam Prof. Dr. Burhan SELÇUK'a tez boyunca yaptığı maddi ve manevi katkılarından dolayı teőekk¼rlerimi sunarım.

Deneyisel çalıőmalarımnda yapmış olduğu katkılar ve desteklerinden dolayı ESTAŞ firması Ar-Ge çalıőanlarına ve beni g¼n¼lleriyle, emeğiyle destekleyen t¼m b¼l¼m elemanlarımıza ve Makine M¼hendisi Mehmet BALTA'ya ayrıca teőekk¼r ederim.

Her zaman ve her őart altında daima yanımda olan, akademisyen donanımlı sevgili eőim ve yavrularımızın annesi Serpil Y¼CEL'e, bizleri bug¼nler için hazırlayan kıymetli aile b¼y¼klerimize g¼n¼lden teőekk¼r ederim.

## ÖZET

### **BOR KARBÜR TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDEN KAM ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Ahmet YÜCEL**

**Doktora Tezi**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Burhan SELÇUK**

**2015, 100+ xv sayfa**

Bu çalışmada, bor karbür takviyeli metal matrisli kompozitten (MMK), toz metal (T/M) yöntemiyle kam üretilip, içten yanmalı motorlardaki kam-takipçi mekanizmasının uyarlandığı bir test sisteminde, aşınma dayanımları araştırılmıştır. MMK için toz elde etmek için iki farklı bağlayıcı ön alaşımlı Distaloy DC demir tozuna %10'a kadar (%1, %3, %5, %10) bor karbür ( $B_4C$ ) katılmıştır. Hazırlanan tozlar 175 kN basma kuvvetiyle preslendikten sonra, Argon atmosferde  $1120^{\circ}C$  sıcaklıkta 30 dakika boyunca serbest sinterlenerek MMK kamlar üretilmiştir. Aşınma testleri sonucunda %1  $B_4C$  içeren MMK kamların aşınma performanslarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca %1  $B_4C$  içeren %98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF4 + %0.6 LubeE bağlayıcı içeriğe sahip tozdan üretilen MMK kamların aşınma performanslarının en yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** aşınma, kam, metal matrisli kompozit, bor karbür



## **ABSTRACT**

### **THE INVESTIGATION OF MANUFACTURING CAM LOBE MADE FROM METAL MATRIX COMPOSITES REINFORCED BORON CARBIDE**

**Ahmet YÜCEL**

**Ph. D. Thesis**

**Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Burhan SELÇUK**

**2015, 100+xv pages**

In this study, the wear resistance of a cam lobe produced with powder metal (P/M) consisting of metal matrix composites (MMC) reinforced with boron carbide were investigated by use of the wear system simulated by cam-follower mechanism in internal combustion engines. In order to obtain MMC powder, boron carbide ( $B_4C$ ) up to 10% (%1, %3, %5, and %10) was added in pre-alloyed iron powders consisting of two different lubricated whose commercial name is Distaloy DC. The prepared powder mixtures were pressed with 175 kN to take the shape of cam lobe and then these compacts were sintered freely at 1120°C for 30 minutes under argon atmosphere. In consequence of wear tests, high wear performance was observed in MMC cam lobe including 1%  $B_4C$ . In addition to, it was observed that MMC cam lobe consisting of %98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF4 + %0.6 LubeE + %1  $B_4C$  has the highest wear performance.

**Key words:** wear, cam lobe, metal matrix composites, boron carbide

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	x
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Kam Milinin Tarihçesi .....	1
1.2 Kam Mili Üretim Yöntemleri.....	1
1.2.1 Geleneksel kam mili üretimi.....	2
1.2.2 Yeni nesil kam mili (Montajlı kam mili) üretimi .....	3
1.3 Montajlı Kam Milleri Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	4
1.4 Tezin Amacı ve Literatürdeki Yeri .....	10
<b>2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ve TOZ METAL</b> .....	23
2.1 Giriş.....	23
2.2 Kompozit Malzeme Teknolojisinin Gelişimi.....	24
2.3 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması .....	25
2.4 Metal Kompozit Malzemeler .....	27
2.5 Toz Metalürjisi ve MMK Malzemeler .....	30
2.5.1 Toz Üretimi.....	31
2.5.2 Karıştırma .....	33
2.5.3 Presleme.....	33
2.5.4 Sinterleme .....	34
2.6 B <sub>4</sub> C Takviyeli MMK Malzemelerde Görüntülenmiş İçyapılar.....	35
<b>3. TRIBOLOJİK ÖZELLİKLER</b> .....	39
3.1 Giriş.....	39
3.2 Triboloji İçin Temel Esaslar.....	39
3.3 Sürtünme .....	41
3.3.1 Sürtünme kanunları.....	42
3.3.2 Sürtünme katsayısı.....	43
3.3.3 Sürtünme çeşitleri .....	44
3.4 Kuru Sürtünme .....	46
3.5 Sürtünmenin Aşınma Üzerine Etkileri ve Aşınma.....	47
3.6 Aşınma Çeşitleri.....	48
3.7 Aşınmaya etki eden faktörler .....	52
3.8 Aşınma Test Yöntemleri .....	54
<b>4. MALZEME ve YÖNTEM</b> .....	57
4.1 Metal Matrisli Kompozit Toz Seçimi .....	57
4.2 MMK Malzemelerin Ön Deneyleri.....	61
4.2.1 MMK numunelerin mekanik testleri .....	66
4.2.2 Ön aşınma deneyleri .....	68
4.3 MMK Kam Üretimi .....	71
4.3.1 MMK kamların aşınma testleri.....	74
<b>5. SONUÇLAR</b> .....	77
5.1 MMK Ön Deney Sonuçları .....	77
5.2 MMK Kam Deney Sonuçları .....	87

<b>6. YORUMLAR ve ÖNERİLER</b> .....	93
6.1 Yorumlar .....	93
6.2 Öneriler .....	95
<b>KAYNAKLAR</b> .....	96
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	99

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 1.1</b>	Farklı yöntemlerle üretilen kam mili örnekleri (Estaş). .... 2
<b>Şekil 1.2</b>	Çelik ve dökümlü montajlı kam mili (Estaş). .... 2
<b>Şekil 1.3</b>	Örnek bir montajlı kam mili kesiti (Hamada, 1976). .... 4
<b>Şekil 1.4</b>	US4835832 nolu patente ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> ). .... 5
<b>Şekil 1.5</b>	US4597365 nolu patente ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> ). .... 6
<b>Şekil 1.6</b>	US5469759A nolu patente ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> ). .... 6
<b>Şekil 1.7</b>	US4809562 nolu patente ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> ). .... 7
<b>Şekil 1.8</b>	US2006/0005385A1 nolu patente ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> ). .... 7
<b>Şekil 1.9</b>	US6802111 nolu patente ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> ). .... 8
<b>Şekil 1.10</b>	US6502538B2 nolu patente ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> ). .... 9
<b>Şekil 1.11</b>	Mubea firmasının patentine ait şematik resim ( <a href="http://www.freepatent.com">http://www.freepatent.com</a> )..... 9
<b>Şekil 1.12</b>	Aşınma test sonuçları ve farklı hacimsel oranlarda B <sub>4</sub> C ile takviye edilmiş kompozit numunelerin aşınmış yüzey fotoğrafları (Karamış ve ark., 2012). .... 10
<b>Şekil 1.13</b>	Farklı numuneler için aşınma test sonuçları (Şimşir ve ark., 2011). .... 11
<b>Şekil 1.14</b>	Aşınmış yüzeylerin 2 m/s kayma hızı ve 2500 m kayma yolu deney şartlarındaki SEM görüntüleri (Thiyagarajan ve ark., 2015). .... 12
<b>Şekil 1.15</b>	Aşınma test grafiği (Thiyagarajan ve ark., 2015). .... 12
<b>Şekil 1.16</b>	Elde edilen iç yapının SEM görüntüleri (a) saf Ti, (b) B <sub>10</sub> kompozit, (c) B <sub>20</sub> kompozit ve (d) B <sub>30</sub> kompozit (Vadayar ve ark., 2014). .... 13
<b>Şekil 1.17</b>	650°C'de sinterlenmiş Al kompozit içerisindeki ağırlıkça B <sub>4</sub> C dağılımı (a) %5 B <sub>4</sub> C, (b) %7.5 B <sub>4</sub> C, (c) %10 B <sub>4</sub> C, (d) %12.5 B <sub>4</sub> C, (e) %15 B <sub>4</sub> C, (f) %17.5 B <sub>4</sub> C, (g) %20 B <sub>4</sub> C, (h) saf (Topçu ve ark., 2009) .... 14
<b>Şekil 1.18</b>	Elde edilen iç yapının SEM görüntüleri (a) %7 B <sub>4</sub> C (b) %10 B <sub>4</sub> C (Çanakçı ve ark., 2013)..... 15
<b>Şekil 1.19</b>	Sürtülmeli karıştırma yöntemi ile elde edilen iç yapının SEM görüntüleri (a) 630 dev/dak, (b) 1000 dev/dak (c) 1600 dev/dak (Alidokht ve ark., 2013). .... 16
<b>Şekil 1.20</b>	B <sub>4</sub> C-Fe tozları karışımının SEM ve EDX analiz görüntüleri (Uygunçarlar, 2010). .... 17
<b>Şekil 1.21</b>	AA2124/B <sub>4</sub> C/30 kuru şartlardaki aşınma sonrası kompozit kamın makro yüzey görüntüsü (Cerit, (2010). .... 17
<b>Şekil 1.22</b>	AA2124/B <sub>4</sub> C/30 kompozit kamın kuru şartlardaki aşınma sonrası yüzeyin SEM görüntüleri (Cerit, 2010). .... 18

<b>Şekil 1.23</b>	Distaloy AB numunelerinin mikroyapı fotoğrafları (F: Ferrit, NZ: Nikelce zengin ferrit, P: Perlit, B: Beynit, G: Gözenek) (Çetinkaya, 2005). .....	19
<b>Şekil 1.24</b>	Fe-Co Matrisi içindeki elmasın deformasyon sonundaki SEM görüntüleri (Öksüz, 2011). .....	19
<b>Şekil 1.25</b>	Aşınmış AISI 5115 (100 d/dk, 4 saat, 0.30 µm, 20-52 N) kam numunesinin fotoğrafları (Sevimligül, 2002). .....	20
<b>Şekil 1.26</b>	Aşındırılmış kam yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: (a) borlanmış GGG50; (b) TiN kaplanmış GGG50; (c) sertleştirilmiş GGG50; (d) borlanmış ve TiN kaplanmış GGG50; (e) sertleştirilmiş ve TiN kaplanmış GGG50; (f) indüksiyonla sertleştirilmiş CK45 çelik (Sert ve ark., 2006). .....	21
<b>Şekil 1.27</b>	90 d/dak ile yapılan aşınma test sonuçları (Sert ve ark., 2006). ....	21
<b>Şekil 2.1</b>	Takviye elemanlarının iç yapıda bulunabileceği başlıca üç formunun şematik gösterimi (Kainer, 2006). .....	27
<b>Şekil 2.2</b>	Kompozit malzemeleri oluşturan grupların malzeme tipleri (Kainer, 2006). .....	28
<b>Şekil 2.3</b>	Metalik toz işleme akış şeması (Karagöz vd., 2009). .....	30
<b>Şekil 2.4</b>	Çeşitli üretim teknikleri ile üretilmiş toz şekilleri (Saritaş vd., 2007). .....	31
<b>Şekil 2.5</b>	Atomizasyon yöntemi ile demir ve çelik tozu üretiminin şematik gösterimi (Çetinkaya, 2005). .....	32
<b>Şekil 2.6</b>	Saf Argon gaz atmosferde 2187°C’de sinterlenmiş numunenin (a) parlatılmış ve dağlanmış yüzeyinin SEM görüntüsü ve (b) tüm yüzey görüntüsünün EDS analizi (Miyazaki ve ark., 2010). .....	36
<b>Şekil 2.7</b>	Metal/seramik ara yüzeyinin SEM görüntüleri (a) B <sub>4</sub> C/Fe; (b) B <sub>4</sub> C/(Fe-%17 B) and (c) B <sub>4</sub> C/(Fe-%28 B-%6 C) (Aizenshtein ve ark., 2008). .....	36
<b>Şekil 2.8</b>	59 µm B <sub>4</sub> C tane boyutuna ve ağırlık % 10 takviye oranında B <sub>4</sub> C ile takviye edilen Al-MMK’nin SEM görüntüsü (Toptan ve ark., 2006). .....	37
<b>Şekil 2.9</b>	Tarama elektron mikroskobu (SEM) mikroyapı görüntüleri (a) A6063-SiC, (b) A413-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (c) A6063-SiC+B <sub>4</sub> C melez (Kıyasöz ve ark., 2014). .....	37
<b>Şekil 2.10</b>	Üretimleri gerçekleştirilen MMK’ların 100X büyütmede çekilmiş optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları (Sur ve ark., 2005). .....	38
<b>Şekil 3.1</b>	Tribosistemin yapısı (Czichos ve Habig, 1992). .....	40
<b>Şekil 3.2</b>	Kuru sürtünme modeli ve sürtünme katsayısı (Koç, 2004). .....	43
<b>Şekil 3.3</b>	Kay-dur (Stick-Slip) olayına ait model (Akkurt, 1990). .....	43
<b>Şekil 3.4</b>	Sürtünme çeşitleri (Akkurt, 1990). .....	44
<b>Şekil 3.5</b>	Sürtünme çeşitleri (Babalık ve Çavdar, 2013). .....	45
<b>Şekil 3.6</b>	Tipik bir kayma çiftindeki büyüklükler (Akkurt, 1990). .....	46
<b>Şekil 3.7</b>	Aşınma zaman bağıntısı (Akkurt, 1990). .....	48
<b>Şekil 3.8</b>	Bazı aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Czichos ve Habig, 1992). .....	49
<b>Şekil 3.9</b>	En çok rastlanan temas şekilleri (Czichos ve Habig, 1992). .....	55
<b>Şekil 4.1</b>	Distaloy tabanlı heterojen bir malzemedeki çok fazlı yapı örneği (Höganas AB, 2015). .....	58
<b>Şekil 4.2</b>	Yağlayıcı ve presleme arasındaki etkileşim faktörleri (Knutsson ve Larsson, 2013). .....	59

<b>Şekil 4.3</b>	Sinterlenmiş (a) Fe, (b) Fe-C ve (c) Fe-Mo-C malzemelere ait iç yapı fotoğraf örneği (Höganas AB, 2015). .....	60
<b>Şekil 4.4</b>	1120 °C’de 30 dakika sinterlenmiş yüzeyi Picral ile dağlanmış (a) % 0.2C, (b) % 0.5C ve (c) % 0.8C içeren Distaloy DC malzemelere ait iç yapı fotoğraf örnekleri (Höganas AB, 2015). ...	61
<b>Şekil 4.5</b>	Metal tozlarını karıştırma ünitesi. ....	62
<b>Şekil 4.6</b>	MMK numune üretiminde kullanılan kalıp a) kovan, b) zımba, c) alt zımba ve numune boyutları d) cihazın önerdiği e) üretilen. ....	63
<b>Şekil 4.7</b>	MMK üretiminde kullanılan pres. ....	63
<b>Şekil 4.8</b>	MMK aşınma numunelerin kalıp ile üretiminde kullanılan sistem. ....	64
<b>Şekil 4.9</b>	Üretilen MMK aşınma numuneleri ve kalıp parçalarının fotoğrafı. ....	64
<b>Şekil 4.10</b>	Aşınma numunelerinin preslenmesine ait Kuvvet-Şekil değişimini gösteren grafik örneği. ....	65
<b>Şekil 4.11</b>	Sinterleme yapılan tüp fırın. ....	65
<b>Şekil 4.12</b>	Sertlik ölçüm cihazı. ....	66
<b>Şekil 4.13</b>	Analitik hassas terazi ve yoğunluk ölçme kiti. ....	66
<b>Şekil 4.14</b>	Pürüzlülük ölçüm cihazı. ....	67
<b>Şekil 4.15</b>	Numune parlatma cihazı. ....	67
<b>Şekil 4.16</b>	Metal mikroskobu. ....	67
<b>Şekil 4.17</b>	Numune kesme cihazı. ....	68
<b>Şekil 4.18</b>	XRD Analiz cihazı. ....	68
<b>Şekil 4.19</b>	Çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazı. ....	68
<b>Şekil 4.20</b>	Üniversal aşınma deney cihazının şematik gösterimi. ....	69
<b>Şekil 4.21</b>	Ön aşınma deneyleri için numune ve karşı eleman boyutları. ....	70
<b>Şekil 4.22</b>	Pin-on-Ring deney düzeneğinin şematik gösterimi. ....	70
<b>Şekil 4.23</b>	Hassas terazi (0.1 mg). ....	71
<b>Şekil 4.24</b>	Tasarlanan kam kalıbının detayları. ....	72
<b>Şekil 4.25</b>	MMK kam numunelerinin kalıplanmasında kullanılan sistem. ....	72
<b>Şekil 4.26</b>	Isıl işlem fırını. ....	73
<b>Şekil 4.27</b>	Üretilen MMK kam numuneleri ve kam kalıbının parçaları. ....	73
<b>Şekil 4.28</b>	Kam aşındırma testlerinde kullanılan numune ve karşı eleman boyutları. ....	74
<b>Şekil 4.29</b>	Borlanmış aşındırıcı plakaya ait içyapı fotoğrafı (100x). ....	74
<b>Şekil 4.30</b>	MMK kam aşındırma test düzeneği. ....	75
<b>Şekil 4.31</b>	MMK kam aşındırma test sisteminin şematik gösterimi. ....	75
<b>Şekil 4.32</b>	Kam aşındırma test düzeneğinde ortaya çıkan temas yük değerleri. ....	76
<b>Şekil 5.1</b>	“DE3B” kodlu aşınma numunesinin yüzey pürüzlülük grafikleri...	78
<b>Şekil 5.2</b>	“DE3B” kodlu aşınma numunesinin basma testine ait grafik. ....	79
<b>Şekil 5.3</b>	“DE3B” Kodlu MMK aşınma numunelerinin mikro yapı resimleri. ....	79
<b>Şekil 5.4</b>	“DE5B” Kodlu MMK aşınma numunelerinin mikro yapı resimleri. ....	80
<b>Şekil 5.5</b>	“DE10B” Kodlu MMK aşınma numunelerinin mikro yapı resimleri. ....	80
<b>Şekil 5.6</b>	“MATCH” isimli programda analiz edilen XRD verileri sırasında ortaya çıkan ekran görüntüsü. ....	81
<b>Şekil 5.7</b>	Aşınma testleri sırasında ölçülen değerlere ait örnek grafik (n=400 d/dak, F=67 N, s=500 m). ....	82
<b>Şekil 5.8</b>	Aşınma testleri sırasında yapılan termal kamera çekim görüntüsü. ....	82

<b>Şekil 5.9</b>	Aşınma testlerine ait “Kayma Mesafesi – Aşınma Miktarı” grafiği (400 d/dak – 67 N). .....	83
<b>Şekil 5.10</b>	Aşınma testlerine ait “Temas Yüğü – Aşınma Miktarı” grafiği (400 d/dak – 67 N). .....	84
<b>Şekil 5.11</b>	Aşınma testleri sırasında oluşan yüzey deformasyonları. ....	85
<b>Şekil 5.12</b>	“DE3B” Kodlu MMK numunelerinin aşınma yüzey resimleri (50x). .....	86
<b>Şekil 5.13</b>	“DE5B” Kodlu MMK numunelerinin aşınma yüzey resimleri (50x). .....	86
<b>Şekil 5.14</b>	“DE10B” Kodlu MMK numunelerinin aşınma yüzey resimleri (50x). .....	86
<b>Şekil 5.15</b>	“DW3B” kodlu kam numunelerine aşındırılmış yüzey fotoğrafları. ....	88
<b>Şekil 5.16</b>	“DW5B” kodlu kam numunelerine aşındırılmış yüzey fotoğrafları. ....	88
<b>Şekil 5.17</b>	“DW10B” kodlu kam numunelerine aşındırılmış yüzey fotoğrafları. ....	89
<b>Şekil 5.18</b>	MMK kam ve diğerk kam numunelerin aşınma grafiği. ....	90
<b>Şekil 5.19</b>	Kam aşındırma test düzeneğinde aşınma sonucu ortaya çıkan, iki farklı zaman arasında oluşan takipçi yükselme değerkleri. ....	92

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 3.1</b> Tribometrik sistemlerle ilgili bazı veriler (Czichos ve Habig, 1992). ....	56
<b>Çizelge 4.1</b> Distaloy tozlarının içerikleri (Höganas AB, 2013). ....	58
<b>Çizelge 4.2</b> Höganas firmasının geliştirdiği iki tip bağlayıcının özellikleri (Höganas AB, 2013). ....	60
<b>Çizelge 4.3</b> MMK çalışması için oluşturulan matris malzemelerinin içerikleri (Höganas AB, 2013). ....	60
<b>Çizelge 4.4</b> MMK aşınma numuneleri için hazırlanan toz içerikleri. ....	62
<b>Çizelge 4.5</b> MMK kam numuneleri için hazırlanan toz içerikleri. ....	73
<b>Çizelge 5.1</b> Üretilen MMK numunelere ait bazı fiziksel ve mekanik değerler. ....	78
<b>Çizelge 5.2</b> Üretilen MMK numunelerin kayma yoluna göre aşınma test sonuçları.....	83
<b>Çizelge 5.3</b> Üretilen MMK numunelerin temas yüküne göre aşınma test sonuçları.....	84
<b>Çizelge 5.4</b> Üretilen MMK kam numunelere ait bazı fiziksel ve mekanik değerler.....	87
<b>Çizelge 5.5</b> Kam aşınma testlerinde kullanılan malzemelerin kimyasal içerikleri (Estaş – Sivas). ....	89
<b>Çizelge 5.6</b> MMK kam numuneler ve diğer malzemelerin aşınma test sonuçları.....	90
<b>Çizelge 5.7</b> Mukayeseli kam aşınma testlerindeki aşınma performans değerleri.....	91



## SİMGELER DİZİNİ

<b>A<sub>R</sub></b>	Sürtünme işi [J]
<b>d</b>	Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>F<sub>N</sub></b>	Normal yük [N]
<b>F<sub>R</sub></b>	Sürtünme kuvveti [N]
<b>F<sub>RD</sub></b>	Dinamik sürtünme kuvveti [N]
<b>F<sub>R</sub></b>	Statik sürtünme kuvveti
<b>H</b>	Sertlik [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>K</b>	Archard aşınma katsayısı
<b>M<sub>R</sub></b>	Sürtünme momenti [Nm]
<b>P<sub>R</sub></b>	Sürtünme gücü [W]
<b>S</b>	Kayma yolu [m]
<b>W<sub>a</sub></b>	Aşınma oranı [mm <sup>3</sup> /Nm]
<b>W<sub>r</sub></b>	Aşınma direnci [Nm/mm <sup>3</sup> ]
<b>W<sub>V</sub></b>	Hacimsel aşınma miktarı [mm <sup>3</sup> ]
<b>ρ</b>	Sürtünme açısı
<b>ΔG</b>	Ağırlık kaybı [mg]
<b>μ</b>	Kinetik sürtünme katsayısı
<b>μ<sub>0</sub></b>	Statik sürtünme katsayısı

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Kam Milinin Tarihçesi

Kam ve kam mili mekanizmalarının gerçek anlamdaki gelişimi, ortaçağ Avrupa teknolojisi sayesinde olmuştur. 18. ve 19. Yüzyıllarda metal bir silindirin üzerine yerleştirilmiş çok sayıda kam sayesinde, ardışık veya döngüsel hareketler elde edilebilmekteydi. Aynı düzenek müzik kutularında ve laterna mekanizmalarında kullanılmıştır. Mekanik robotlar ve otomatlar için bir tür programlayıcı sayılabilecek kam düzenekleri, bugün özellikle patlamalı ve yanmalı motorlarda gaz giriş ve çıkışını sağlayan supapların hareketinin oluşturulmasında, saatlerde, kilitlerde, dikiş makinelerinde, vida tezgâhlarında kalem hareketinin sağlanmasında ve diğer otomatik çalışan makinelerde kullanılmaktadır (Meneghetti ve Maggiore, 2011).

İçten yanmalı motorlardaki kam milleri genellikle, değişken doğrusal hareket elde etmek için kullanılır. İlk kam milleri, üzerinde basit birkaç çıkıntısı olan şaftlardır. Çıkıntılar mekanizmanın, hareket edebilen parçasına değdiği an ile temasını kaybettiği ana kadar geçen sürede parça yer değiştirme yapar.

## 1.2 Kam Mili Üretim Yöntemleri

Kam mili olarak da adlandırılan eksantrik mili, hareketini krank milinden alan motorun yardımcı milidir. Kam milinin görevi, supapların açılma/kapanma sürelerini ve zamanlamasını ayarlamaktır. Motorun çalışır durumdaki devri ile orantılı olarak hareket etmekte olup, motorun sorunsuz çalışmasını temin etmek için motorun üzerine konuşlandırılmıştır. Kam mili motorun önemli parçalarından biri olup, dökme demir ve dökme çelikten döküm (Şekil 1.1-a), karbonlu çelikten dövme (Şekil 1.1-b) ve doludan boşaltma (Şekil 1.1-c) yöntemleri ile tek parça olarak geleneksel metotlarla üretilebilmektedir (Şekil 1.1). Bu üretim metotlarına alternatif olarak, günümüz teknolojisinin sunduğu gelişmiş imkânları ve teknikleri kullanmak suretiyle, mil üzerinde yer alan kamlar ve diğer parçalar ayrı, mil ayrı olarak üretilip, montajlama ile bu parçalar birleştirilmek suretiyle kam mili de imal edilebilmektedir. Bu yeni nesil kam mili üretim teknolojisinde, boru mil karbonlu çelikten ve diğer parçalar metal tozlarından toz metalürjisi ile veya direkt olarak karbonlu çelikten üretilirler (Şekil 1.2).



(a) Döküm



(b) Dövme çelik



(c) Doludan boşaltma

**Şekil 1.1** Farklı yöntemlerle üretilen kam mili örnekleri (Estaş).



**Şekil 1.2** Çelik ve dökümlü montajlı kam mili (Estaş).

Sonuç olarak kam mili üretim yöntemlerini; geleneksel kam mili üretim yöntemleri ve yeni nesil kam mili (montajlı kam mili) üretimi olarak iki ayrı sınıfta incelemek mümkündür.

### 1.2.1 Geleneksel kam mili üretimi

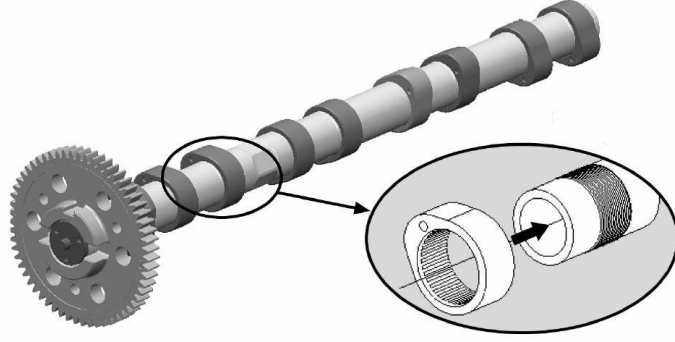
Geleneksel kam milleri; dövme, döküm ve doludan boşaltma (talaşlı imalat) yöntemleri ile bir bütün parça olarak üretilmektedir. Milin üzerinde yer alan çeşitli parçalar (kamlar, zincir dişlisi, yatak yerleri, sensör diski, yakıt pompası kamı v.s.) mil ile birlikte tek parça şeklinde üretilmektedir (Şekil 1.1). Önce dövme ve döküm yoluyla üretilen kam millerinin çalışan yüzeyleri (kamların yüzeyleri, yatak yerleri,

dişli yüzeyi vs) talaşlı imalat ile işlenmektedir. Daha sonra gerekiyorsa ısıtma işlemi tabii tutulmaktadır. Döküm yöntemi ile biçimlendirme ya normal döküm ya da çil döküm şeklinde uygulanmaktadır. Döküm yöntemiyle üretilen kam millerinin, özellikle kam bölgelerine uygun soğutucular yerleştirilmesiyle çil döküm kam milleri üretilmektedir. Soğutucu kullanımının amacı eksantrik bölgelerde yüksek sertlik değerlerine ulaşabilmektir.

Geleneksel yöntemlerle üretilen kam milleri (döküm, dövme ve doludan boşaltma) üzerinde yer alan kamlar, yatak yerleri ve dişliler, daha sonra aşınmaya karşı dirençleri artırılmak üzere değişik yöntemlerle sertleştirilmektedir. Özellikle dövme ve doludan boşaltma yöntemleri ile üretilen kam millerinde, malzemenin karbon oranına bağlı olarak sertliği artırılacak kısımlara birkaç ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Karbon oranı yeterli olan malzemeden üretilen kam millerinin aşınmaya maruz kalan yerleri (kamların, dişlinin ve yatak yerlerinin yüzeyleri) doğrudan sertleştirilebilmektedir. Karbon oranı yetersiz olan malzemeden üretilen kam millerinin aşınmaya maruz kalan (kamların, dişlinin ve yatak yerlerinin) yüzeylerindeki karbon oranını artırmak için sementasyon işlemi uygulanmaktadır. Ardından değişik yöntemlerle (doğrudan sertleştirme veya indüksiyon, alev, lazer, ışın, iyon bombardımanı ile sertleştirme, v.s.) yüzey sertleştirme işlemleri uygulanabilmektedir. Malzemenin karbon oranına bağlı olmaksızın nitrürasyon, karbonitrürasyon, borlama, v.s. yöntemleri ile sertleşmesi gereken kısımların yüzeylerinin sertlikleri ayrıca artırılmaktadır.

### **1.2.2 Yeni nesil kam mili (Montajlı kam mili) üretimi**

Yeni nesil kam millerinde gövde, boru mil olarak imal edilmektedir. Kam milinin üzerinde çalışan diğer parçalar (kamlar, sensör diski, dişli vs) ayrıca üretilmektedir. Bu parçalar daha sonra, değişik yöntemlerle boru mil üzerine monte edilmektedir (Şekil 1.3). Bütün bu parçalar montajdan önce son ölçüsüne yakın olarak veya son ölçüsünde üretilmektedir. Özellikle kamların üretim şekilleri de farklıdır. Kamların kimi çelik parçalardan şekillendirilip, sertleştirilip monte edilirken, kimi de toz metalürjisi yöntemi ile üretildikten sonra, gerekirse sertleştirilip monte edilmektedir. Bazı kam milleri, ağırlığı hafifletmek üzere boru üzerine kamların dökülmesi tarzında da üretilmektedir. Daha sonra bu döküm kısımları talaşlı imalatla işlenip, eğer gerekliyse sertleştirilmektedir.



**Şekil 1.3** Örnek bir montajlı kam mili kesiti (Hamada, 1976).

### **1.3 Montajlı Kam Milleri Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Montajlı kam mili üretim tekniğinin ilk denemeleri 1976 yılında gerçekleştirilmiş, ancak gelişmesi ve uygulamaya geçilmesi 1990'lı yılları bulmuştur. Şimdilerde ise otomotiv sektörü çoğunlukla montajlı kam milini tercih etmektedir ve hatta ağır araç grupları için montajlı kam mili üretimine başlamıştır (Hamada, 1976).

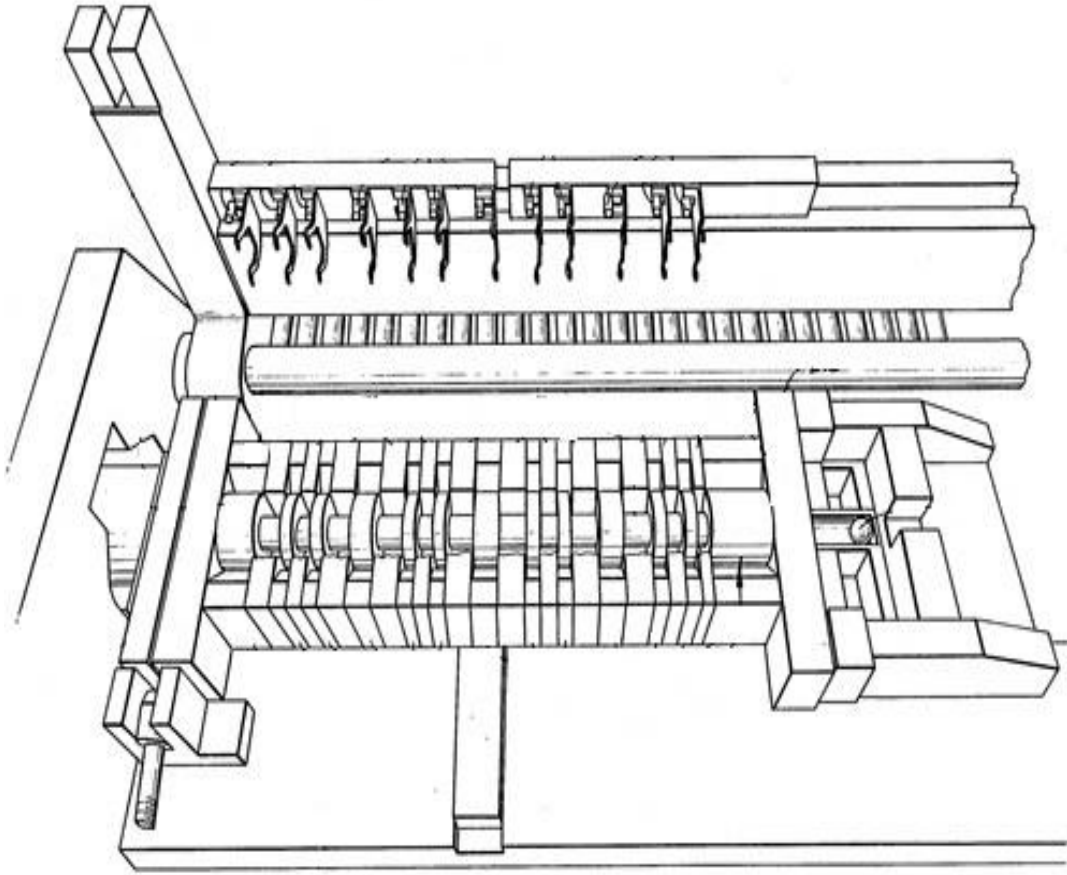
Montajlı kam millerinin üretim yöntemlerinin ortak yönü, montaj edilecek parçaların elastikiyet (esneklik) sınırları içerisinde kalacak şekilde, boruda meydana getirilen plastik deformasyon sonucu, kam ve diğer montaj edilecek parçalar ile (sensör makarası, zincir dişli, yatak, yakıt pompası gibi) boru arasında bir sıkılık oluşturmaktır. Ayrıca plastik şekil değiştirme yöntemlerinin dışında, sinter parçaların boruya montaj edildiği difüzyon yöntemi de uygulanmaktadır.

Bu teknikle üretilen kam millerin birçok avantajı vardır. Şaft malzemesi olarak dolu silindirik çubuk yerine boru tercih edilen yöntemlerde, ağırlık geleneksel dövme millerinden %45 kadar daha hafiftir ve tek parça kam milleri gibi çok yüksek dinamik moment değerlerini iletebilirler. Sağladığı düşük ağırlık avantajı nedeniyle son zamanlarda, motor tasarımlarında tercih edilen kam mili tipidir. Düşük ağırlık; yüksek motor performansı, düşük yakıt tüketimi ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonu için önemli katkı sağlar (Bechtold ve Körner, 2007).

Montajlı kam mili üretim yöntemlerinin ana konsepti borudur. Borunun üzerine kamlar ve motorun yapı şekline göre diğer montaj edilecek parçalar sensör diski, zincir dişli, yatak, yakıt pompası kamı vs. ilave edilir. Montaj işlemi, genişletici takım, yüksek sıvı basıncı, presleme veya sıcak geçme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Üretim yöntemlerinin ortak yönü montaj edilecek parçaların elastikiyet sınırları içerisinde kalacak şekilde, boruda meydana getirilen

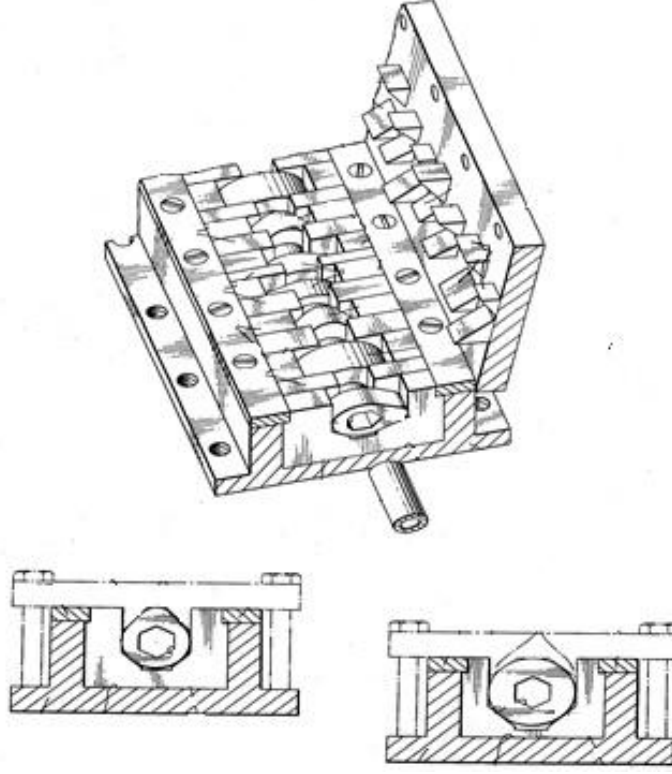
plastik deformasyon sonucu parçalarla boru arasında bir sıkı geçmeyi temin etmektedir.

Otomotiv sektöründe montajlama tekniğini kullanarak kam mili üretimi gerçekleştiren önemli firmalar bulunmaktadır. Patent sahibi firmalardan General Motors firması US4835832 nolu patenti ile genişletici takım kullanarak montajlı kam mili üretimi yapmaktadır. Boru üzerine kamlar, yataklar ve diğer parçalar yerleştirildikten sonra geniş çaplı bilyenin boru içerisinden geçirilmesi ile bu parçalar sabit hale getirilir (Şekil 1.4). Kamların içerisinde üç veya daha fazla çıkıntı (kama) bulunur. Bu çıkıntılar yüksek tork kapasitesi elde etmede yardımcı olmaktadır. (<http://www.freepatent.com>).



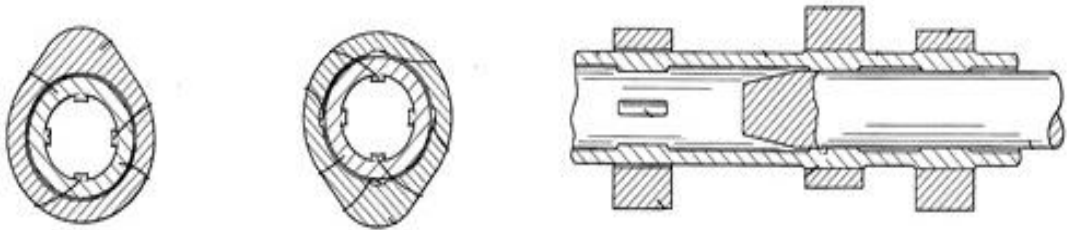
**Şekil 1.4** US4835832 nolu patente ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

Aynı firmanın bir diğer uygulamasında ise (Patent No: US4597365) kamların merkez delikleri altıgen şekilli olup, içten genişletme tekniği ile borunun kam bölgelerinde altıgen şekle dönüşmesiyle ortaya çıkan sıkı geçme işlemidir (Şekil 1.5; <http://www.freepatent.com>).



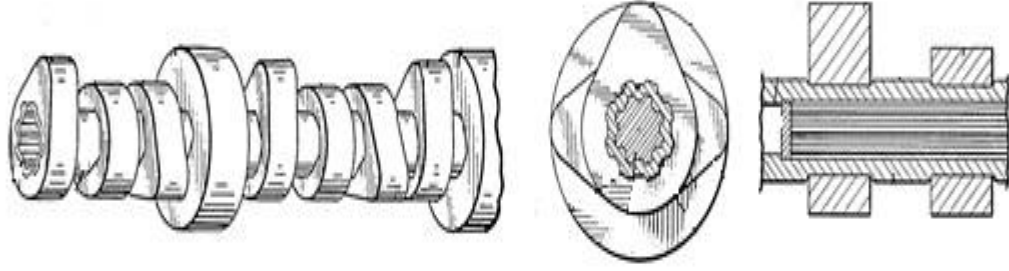
**Şekil 1.5** US4597365 nolu patente ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

Torrington firması genişletici takım kullanarak montajlama tekniği uygulamaktadır (Patent No: US5469759A). Kam ve borunun iç çapında belirli aralıklı çevresel dar kesitler bulunmaktadır. Kamlar, aksel olarak dar kesitlerin olduğu bölgelerde borunun üzerine yerleştirilir ve dar kesitler mekanik olarak dışarıya doğru deforme edilir. Dar kesitlerin deformasyonu gerçekleşip kamlar boru üzerine sabitlendiğinde borunun dış çapında herhangi bir genişleme görülmez (Şekil 1.6; <http://www.freepatent.com>).



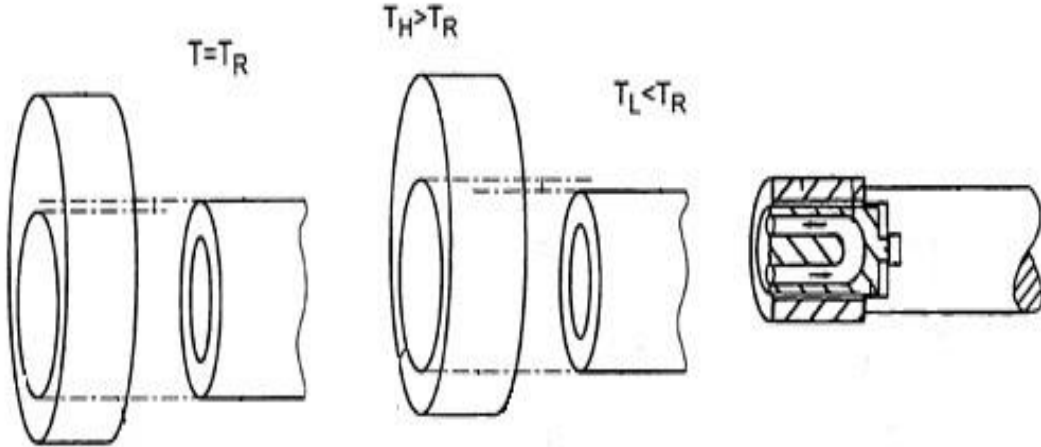
**Şekil 1.6** US5469759A nolu patente ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

Benzer bir uygulamada (Patent No: US4809562) ise boru üzerine yerleştirilen kamlar ve yataklar, belirli sayıda çıkıntıya sahip genişletici takım ile konumlandırılmaktadır (Şekil 1.7; <http://www.freepatent.com>).



**Şekil 1.7** US4809562 nolu patente ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

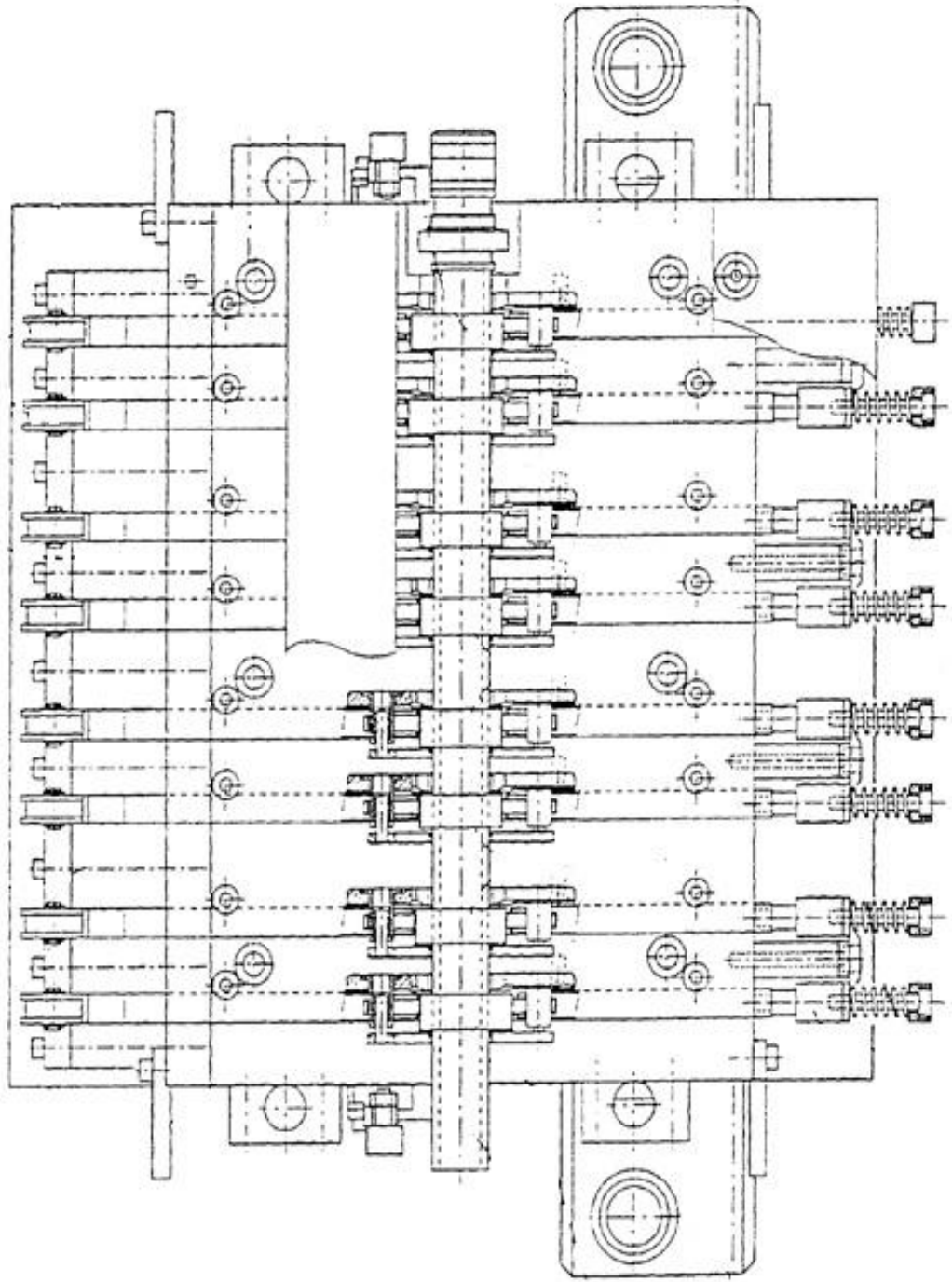
Daimler Chrysler AG firmasının montajlı kam mili metodunda ise (Patent No: US2006/0005385A1), montajlanacak parçalar ve kamlar ısıtılıp, boru üzerinde önceden belirlenen bir pozisyona getirilmekte sonra bu parçalar soğutulurak boru üzerine sabitlenmektedir. Şaft tercihen içerisine yerleştirilen soğutma kanalları yardımıyla soğutulmaktadır (Şekil 1.8; <http://www.freepatent.com>).



**Şekil 1.8** US2006/0005385A1 nolu patente ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

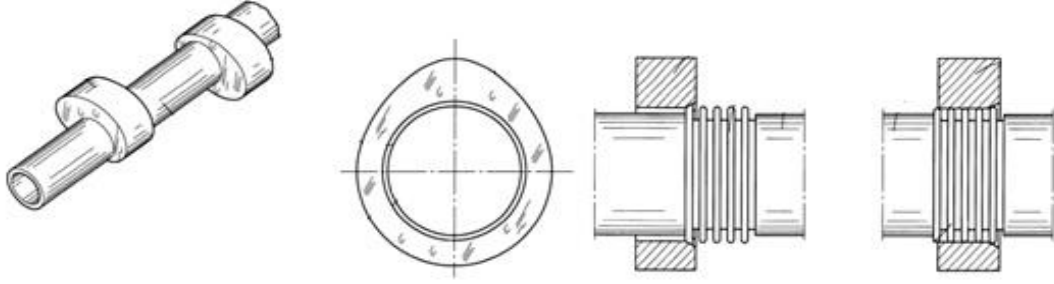
Bir diğer montajlı kam mili üreticisi olan Fabricom firması, açılı konumlandırılmış sekiz kanallı genişletici takım kullanarak montaj işlemini gerçekleştirmektedir (Patent No: US6802111). Otomasyon kullanılarak çalışan bu sistemde farklı kam milleri için kalıp değişimi yapılmaktadır. Kalıplara yerleştirilen kamlar karşılıklı olarak sıkıştırılarak borunun geçeceği eksen doğrultusunda hizalanmakta ve genişletme işlemi uygulanmaktadır (Şekil 1.9; <http://www.freepatent.com>).





**Şekil 1.9** US6802111 nolu patente ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

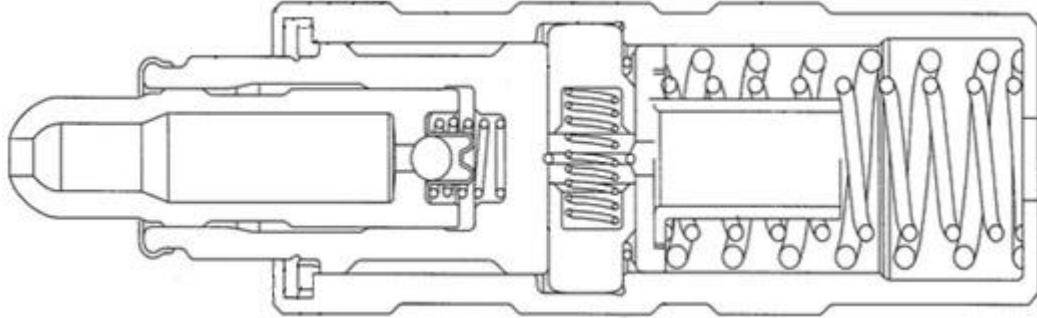
Thyssen Krupp firması ise borunun dış yüzeyinde radyal şekilli bir genişletme işlemi yaparak, iç çapı broşlanmış olan kamlar ile sıkı geçme metodunu kullanmaktadır (Patent No: US6502538B2). Bu metod, kalıp kullanımı gerektirmemekle birlikte bilgisayarlı nümerik kontrol sistemiyle çalışmaktadır (Şekil 1.10; <http://www.freepatent.com>).



**Şekil 1.10** US6502538B2 nolu patente ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

Farklı bir üretim metodu olarak Mubea firması montajlı kam millerinin üretiminde yüksek basınçlı sıvı kullanmaktadır (Şekil 1.11). Boru üzerine kamlar konumlandırıldıktan sonra boru, yüksek hidrolik basıncına maruz bırakılır. Kamlardaki genişlemenin elastikiyet bölgesinde kalması ve borunun plastik deformasyona uğratılmasıyla parçalar arasında sıkılık elde edilir. Nümerik olarak kontrolü yapılan bu sistemde kalıp kullanımına gerek duyulmaz.

Benzer yöntemle kam mili üretimi yapan Mahle ve Neumayer firmaları, sıcak geçme tekniğini kullanmaktadır. Bu teknikte kamlar ısıtılarak iç çaplarının genişlemesi sağlanır. Konumlandırma işlemi gerçekleştirildikten sonra boru ve kamlar arasında istenilen sıkılık soğutma işlemiyle elde edilmektedir (<http://www.freepatent.com>).



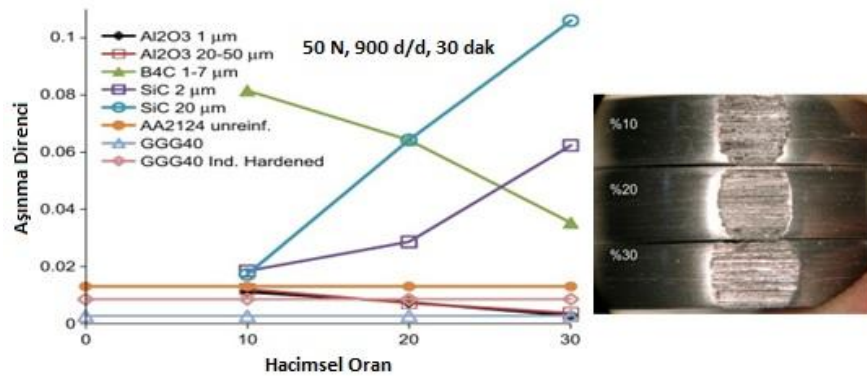
**Şekil 1.11** Mubea firmasının patentine ait şematik resim (<http://www.freepatent.com>).

Verilen bu bilgiler ışığında ve gelişen teknolojiyle, kam mili üretiminin montajlı kam mili üretimine doğru kaydığını söylemek mümkündür. Bu öngörüyle, gelecekte, kam mili üretimi yerine kam üretiminin daha genel ve geçerli, teknolojik ve seri bir uygulama olacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda çalışmamızın amacı, değişik kompozisyondaki “Metal Matrisli Kompozit” (MMK) malzemeleri esas alarak, aşınmaya dayanıklı kam üretimi üzerinde çalışmak olacaktır.

#### 1.4 Tezin Amacı ve Literatürdeki Yeri

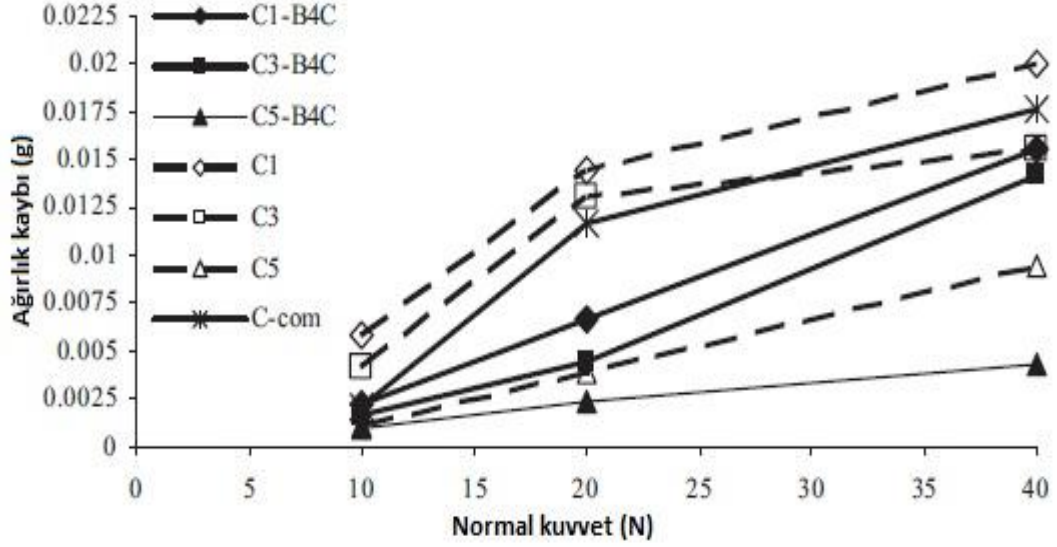
Bu çalışmadaki amaç; “Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozitten toz metalurjisi (T/M) yöntemiyle kam üretmek, içten yanmalı motordaki kam-takipçi mekanizmasının uyarlandığı bir test sisteminde, üretilen kamların aşınma davranışlarını çeşitli kompozisyonlar için saptamak” şeklinde özetlenebilir. Bu amaca yakın nitelikteki MMK malzeme üretimiyle ilgili yapılmış olan literatür çalışmalarından bazı örnekler aşağıda özetlenmiştir.

Karamış ve ark. (2012), tribolojik özelliklerini belirlemek üzere çok sayıda MMK üretmiştir. Toz metalurjisi ile farklı tane boyutuna sahip SiC, B<sub>4</sub>C ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilmiş AA2124 matris malzemesi kullanarak MMK üretmiştir. Takviye parçacıkları %10, %20 ve %30'luk hacimsel oranlarda kullanılmıştır. Toz karışımların presleme işlemleri, 600MPa basınç altında ve 615°C'de 30 dakika boyunca Argon atmosferinde bekletilmesiyle yapılmıştır (Cerit 2010). Aynı zamanda takviye edilmemiş AA2124 ve GGG40 kam malzemeleri de indüksiyonla sertleştirme sonrasında herhangi bir işlem görmemiş olarak triboloji testleri yapılmak üzere hazırlanmıştır. Tribolojik testler, 50N yük altında 900d/dak ile 30 dakika süresince kuru ortamda yapılmıştır. Aşınma testleri sonucunda, hacimsel olarak %10 B<sub>4</sub>C veya SiC ile takviye edilmiş kompozitlerin aşınma oranı GGG40 malzemedan imal edilmiş kamin aşınma oranından düşük seviyede gerçekleşmiştir. Ayrıca, 20µm tane boyutuna sahip hacimsel olarak %30 SiC ve %10 B<sub>4</sub>C ile takviye edilmiş AA2124 kompozitler en iyi aşınma performansın göstermiştir. Şekil 1.12, aşınma test sonuçlarına ait aşınma grafiği ve farklı hacimsel oranlarda B<sub>4</sub>C ile takviye edilmiş kompozit numunelere ait aşınmış yüzey fotoğrafını göstermektedir.



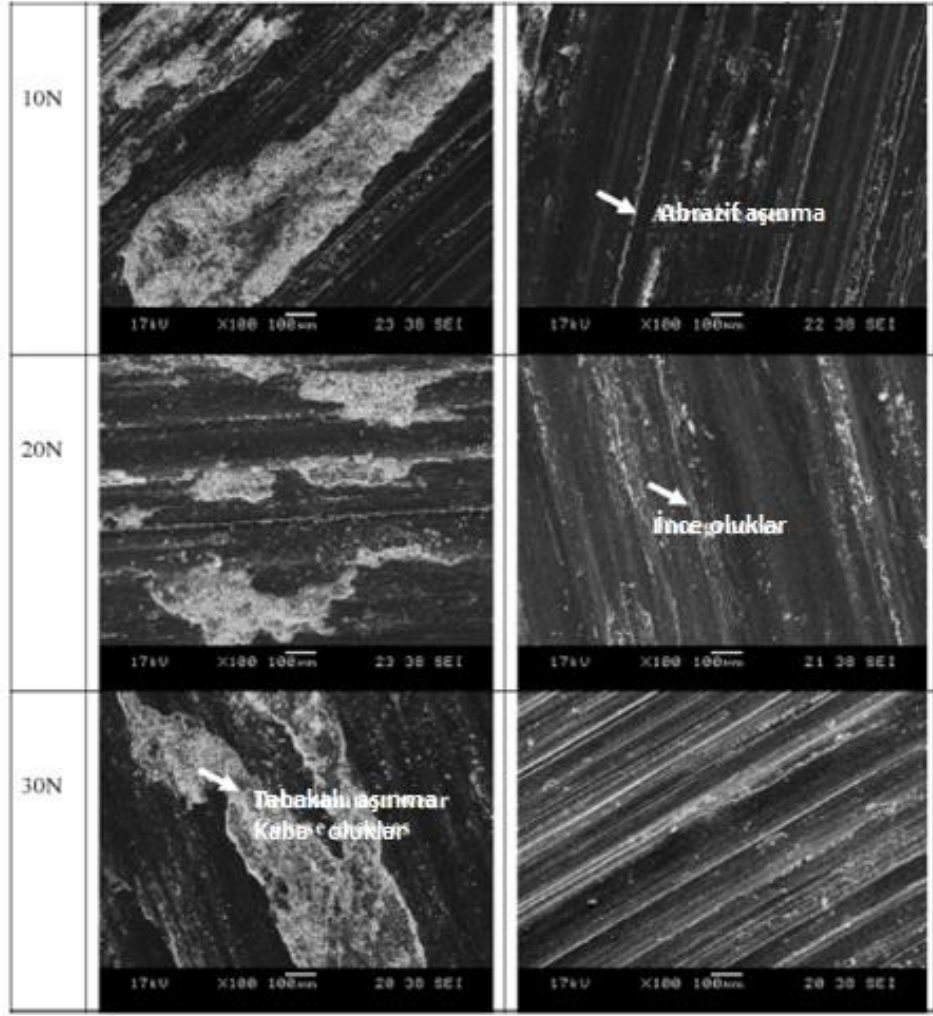
**Şekil 1.12** Aşınma test sonuçları ve farklı hacimsel oranlarda B<sub>4</sub>C ile takviye edilmiş kompozit numunelerin aşınmış yüzey fotoğrafları (Karamış ve ark., 2012).

Şimşir ve ark. (2011), elmas içeren Co matrisine, Fe ve B<sub>4</sub>C ilave ederek sıcak presleme tekniğiyle kompozit üretmiştir. Üretilen kompozitler B<sub>4</sub>C ilaveli ve B<sub>4</sub>C ilavesiz olarak 900°C’de 25MPa basınç altında preslenmiştir. Sonuç olarak, B<sub>4</sub>C ile takviye edilmiş Fe-Co MMK numunelerin aşınma direnci, takviye edilmemiş numunelere göre daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu duruma ait aşınma grafiği Şekil 1.13’de verilmiştir.

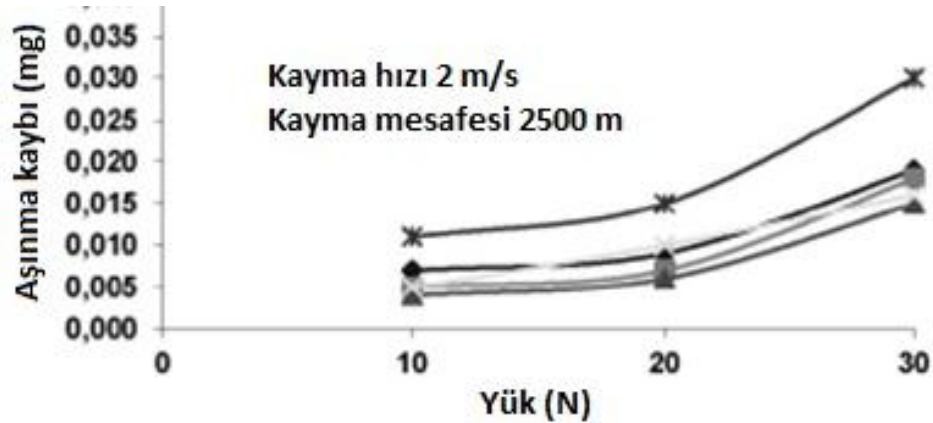


Şekil 1.13 Farklı numuneler için aşınma test sonuçları (Şimşir ve ark., 2011).

Thiyagarajan ve ark. (2015), B<sub>4</sub>C takviyeli alüminyum alaşımının aşınma direncini artırmak için B<sub>4</sub>C takviyesinin optimum düzeyini belirlemeye yönelik bir çalışma yapmıştır. Alüminyum hibrit kompoziti üretmek için, Al alaşımına dört farklı miktarda (%3, %6, %9 ve %12) B<sub>4</sub>C takviyesi ve %3 grafit (Gr) eklemiştir. Üretilen hibrit kompozitleri, çeşitli kayma hızları ve yüklemelerde test ederek aşınma dirençlerini bulmuştur. Sonuç olarak, çeşitli miktarlarda B<sub>4</sub>C takviyesi içeren karıştırmalı döküm ile üretilen Al-B<sub>4</sub>C-Gr kompoziti için, %9’a kadar B<sub>4</sub>C takviyesinin, aşınma direncini artırmak için faydalı olduğunu göstermiştir. B<sub>4</sub>C ilavesi, temel malzemenin (Al) dayanımını artırırken, %3 grafit miktarı da ilave yağlama etkisi sağlamıştır. SEM mikro yapı fotoğraflarında, kompozitin düşük yükleme ve kayma hızlarında, numune yüzeyinde daha az aşınma kalıntısı ve derinliği daha az aşınma izleri olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmaya ait %3 grafit %9 B<sub>4</sub>C ile takviye edilmiş Al kompozitinin 10 N, 20 N ve 30 N yük altındaki aşınmasında elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 1.14’de, aşınma grafiği ise Şekil 1.15’de verilmiştir.



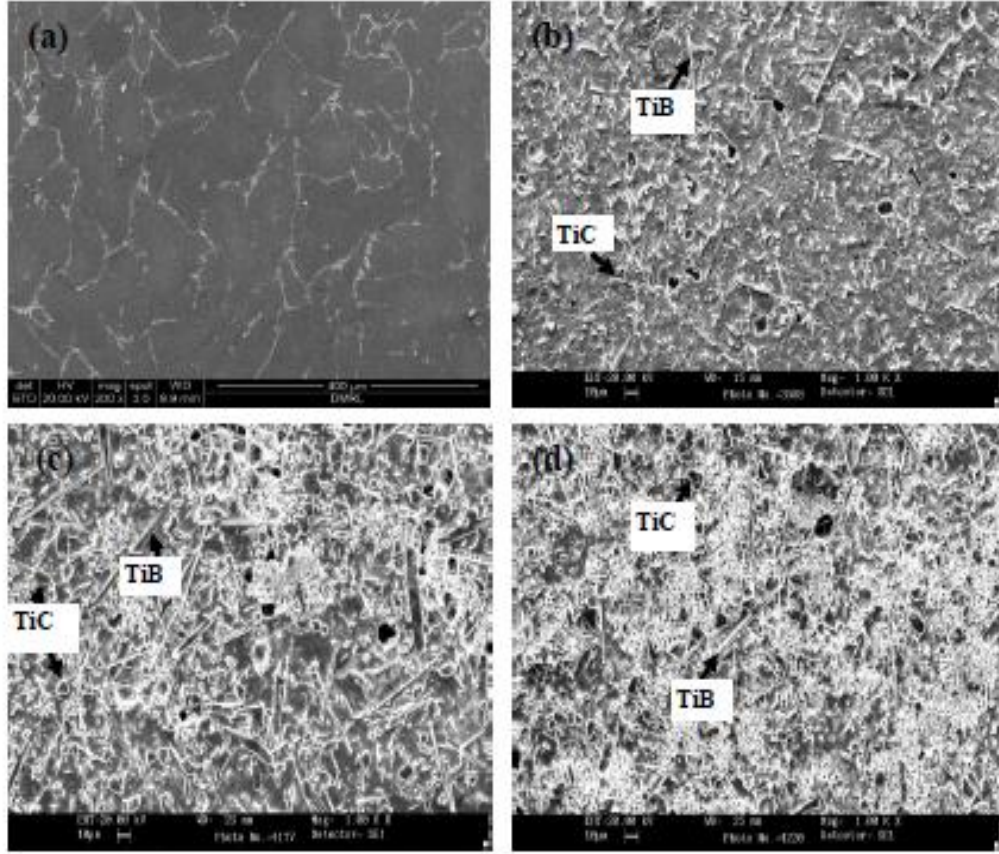
Şekil 1.14 Aşınmış yüzeylerin 2 m/s kayma hızı ve 2500 m kayma yolu deney şartlarındaki SEM görüntüleri (Thiyagarajan ve ark., 2015).



Şekil 1.15 Aşınma test grafiği (Thiyagarajan ve ark., 2015).

Vadayar ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada T/M yöntemiyle ürettikleri titanyum matrisli kompozitte takviye elemanı olarak kullandıkları bor karbürün boyut ve

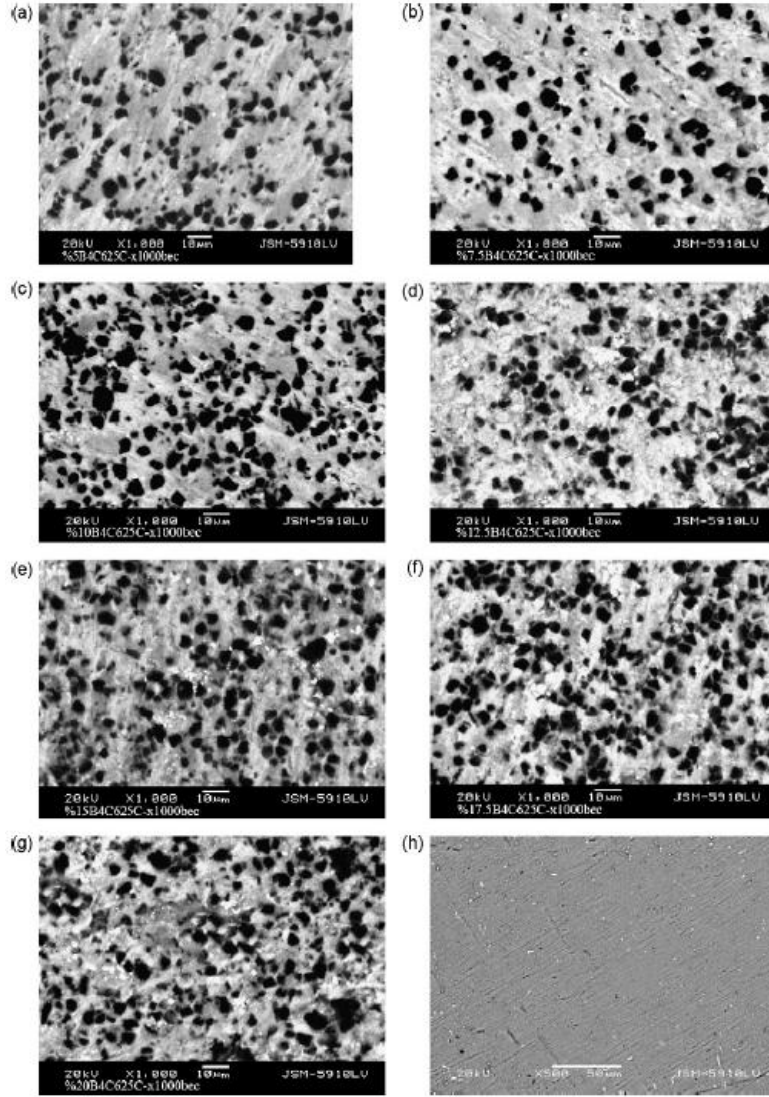
hacimsel oranının kırılma üzerine etkisini araştırmıştır. Hazırladıkları Ti-B<sub>4</sub>C toz karışımını sinterleyerek TiB ve TiC ile takviyelendirilmiş titanyum kompozit elde etmiştir. Elektron mikroskopuyla yapılan taramada, iğnemsî yapılı TiB ve TiC parçacıklar görülmüştür. Elde edilen bu yeni kompozit malzeme, iğne şeklindeki TiB takviyelerin varoluşundan dolayı, benzer koşullarda işlenen güçlendirilmemiş titanyum karşısında gelişmiş eğilme mukavemeti sergilemiştir. Çalışmada elde edilen içyapı Şekil 1.16’da verilmiştir.



**Şekil 1.16** Elde edilen iç yapının SEM görüntüleri (a) saf Ti, (b) B<sub>10</sub> kompozit, (c) B<sub>20</sub> kompozit ve (d) B<sub>30</sub> kompozit (Vadayar ve ark., 2014).

Topçu ve ark. (2009), B<sub>4</sub>C takviyeli Al matrisli MMK malzeme üretimi ve mekanik özellikleri üzerine bir dizi çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, kütlece %5, %10, %15 ve %20 B<sub>4</sub>C ile güçlendirilen, yaklaşık 10 µm ortalama partikül çapına sahip alüminyum matris kompoziti, 650°C’de sinterlenmiştir. Elde edilen malzeme 400°C ile 450°C aralığında değişen sıcaklıklardaki sürünme testine tabi tutularak, yüksek sıcaklıktaki deformasyon davranışı incelenmiştir. B<sub>4</sub>C partikülleri sayesinde Al kompozitin sürünme direncinin geliştirildiğini gözlemlemiştir. Kompozitin çarpma ve sertlik özelliklerinin ölçümü, takviyelerin kütle dağılımının artmasıyla, sertlik

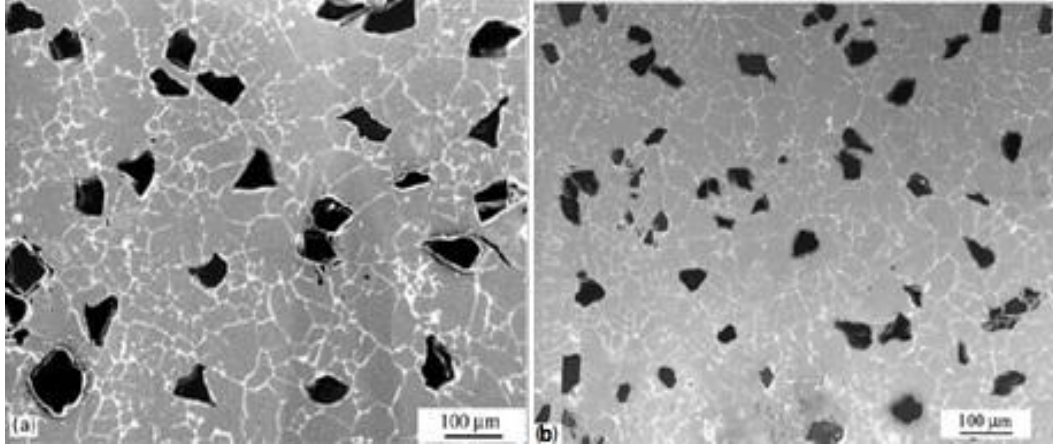
değerinin arttığını ve çarpma değerinin düştüğünü göstermiştir. Çalışmada elde edilen içyapı Şekil 1.17’de verilmiştir.



**Şekil 1.17** 650°C’de sinterlenmiş Al kompozit içerisindeki ağırlıkça B<sub>4</sub>C dağılımı (a) %5 B<sub>4</sub>C, (b) %7.5 B<sub>4</sub>C, (c) %10 B<sub>4</sub>C, (d) %12.5 B<sub>4</sub>C, (e) %15 B<sub>4</sub>C, (f) %17.5 B<sub>4</sub>C, (g) %20 B<sub>4</sub>C, (h) saf (Topçu ve ark., 2009).

Çanakçı ve ark. (2013), iki farklı boyut ve %10’a kadar B<sub>4</sub>C partikülü içeren alüminyum alaşım matrisli kompozit elde etmek üzere bir karıştırmalı döküm sistemi geliştirmiştir. Bu amaçla, A2024 alüminyum alaşımının eritilmesi sırasında B<sub>4</sub>C partiküllerinin karışımını artırmak amacıyla, karıştırmalı döküme geçilmeden önce yeni bir ön işlem yapılmış ve önemli bir iyileşme elde edilmiştir. Bu sistem ile oksitlerin ortamdan uzaklaştırılmasıyla bor karbürün yüzey şartlarının iyileştiği gözlenmiştir. Eklenen ve hali hazırda bünyesinde bulunan B<sub>4</sub>C karşılaştırıldığında, yapıda bulunan partikül miktarı artan hacimle azalmış, azalan partikül boyutları ve

artan hacimle birlikte bünyedeki partikül oranı da azalmıştır. Sonuç olarak, artan partikül hacmi ve azalan partikül boyutu kompozitin yoğunluğunu azaltırken, gözeneklilik ve sertlik değerlerinin artmasına neden olmuştur. Çalışmada elde edilen içyapı Şekil 1.18’de verilmiştir.

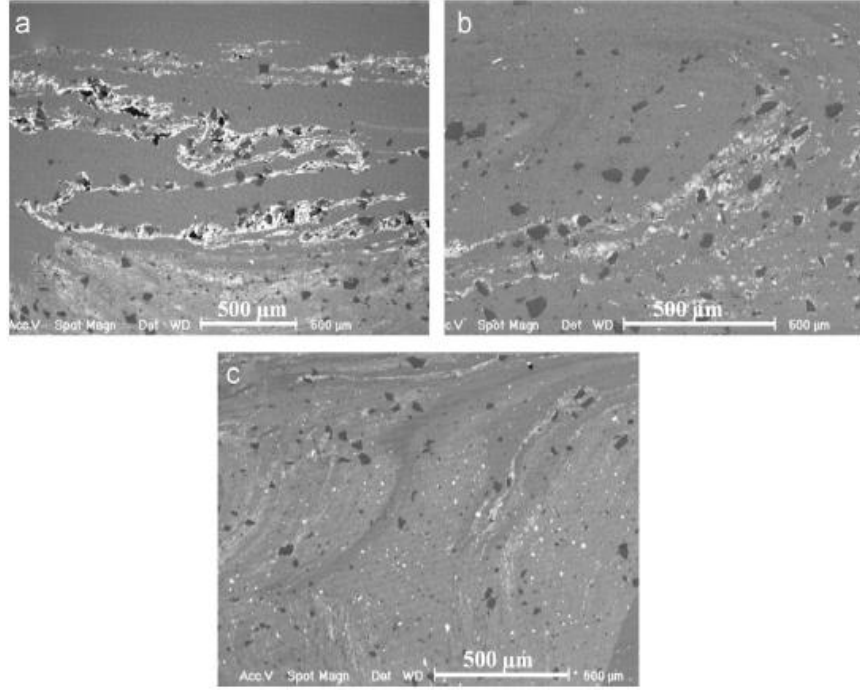


**Şekil 1.18** Elde edilen iç yapının SEM görüntüleri (a) %7 B<sub>4</sub>C (b) %10 B<sub>4</sub>C (Çanakçı ve ark., 2013).

Alidokht ve ark. (2013), SiC ve MoS<sub>2</sub> partikülleriyle takviye edilmiş A356Al alaşım matrisiyle oluşturulmuş hibrit kompozit malzemenin yüzeyini şekillendirmek üzere, yeni bir teknik olan sürtünmeli karıştırma sistemini (FSP) kullanmıştır. Sistemde kullanılan cihazın mili, eksene göre 31 derecelik eğimle, 630-1600 dev/dak arasında değişen hızlarda dönmektedir. Bu işlem sonucunda, yüksek devir sayılarında takviye partiküllerinin daha düzgün dağılım ortaya çıkardığı ve böylece partikül kümelenmesinin azaldığı gözlenmiştir. Kuru kayma aşınması testleri pin-on-disk sisteminde yapılmıştır. Yüzey altı deformasyonu, yıpranmış yüzey profilinin normalinin derinliği boyunca mikro sertlik değişimi ölçülerek değerlendirilmiştir. Sistemde elde edilen numunelerinin aşınma dirençlerinin, döküm alaşımlarla karşılaştırıldığında ciddi oranda arttığı bulunmuştur.

Mikro yapı analizleri sonucunda, yıpranmış yüzeyin üstündeki MoS<sub>2</sub> bakımından zengin katmanın, yüzey altı bölgedeki plastik deformasyonu azaltmaya ve şiddetli aşınmayı bastırmaya fayda sağladığı anlaşılmıştır. Yüksek yük değerleri altında, hibrit kompozitin yüzey aşınma direncinin, döküm alaşımındaki aşınmaya göre bariz bir şekilde geliştirildiği gözlenmiştir. Çalışmada elde edilen içyapı Şekil 1.19’da verilmiştir.



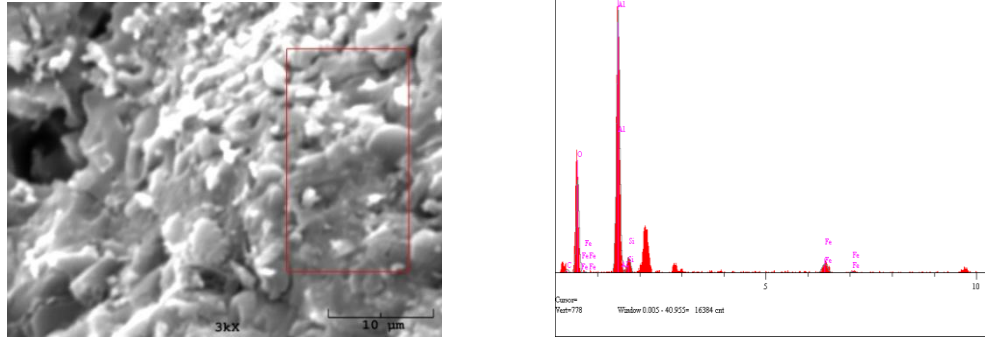


**Şekil 1.19** Sürtülmeli karıştırma yöntemi ile elde edilen içyapının SEM görüntüleri (a) 630 dev/dak, (b) 1000 dev/dak (c) 1600 dev/dak (Alidokht ve ark., 2013).

Mohantya ve ark. (2008), Al1100 matrisini  $B_4C$  ile güçlendirerek kompozit üretimini gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda, yapıya ilave edilen bor karbürün artan yüzdesi ile tane sınırlarında Al-B-C yapısının bor ile daha zengin olan Al-B yapısına dönüştüğünü gözlemlemiştir. Bu geçiş sırasında türeyen bor karbürden dışarı atılan kısmın alıkonulması ara yüzey geriliminin azalmasına sebep olmuştur. Bu yüzden artırılan  $B_4C$  takviyesi, Al- $B_4C$  kompozitlerin gerilme dayanımını düşürmüştür.

Uygunçarlar (2010) yüksek lisans çalışmasında, bor karbürün ( $B_4C$ ) aşındırmayan ve aşınmayan özelliklerinden yararlanılarak toz metalürjisi ile kam üretip, kimyasal yonden irdelenmesini yapmıştır. Çalışmada  $B_4C$ , silisyum karbür (SiC), demir (Fe) ve kobalt (Co) tozları tercih edilmiştir. Kam üretiminde kullanılacak tozların sıkıştırılması sırasında birbirleri ile tutunabilmeleri için, potasyum silikat ( $K_2OSiO_2$ ) ile alüminyum fosfat ( $Al_2O_3P_2O_5 \cdot nH_2O$ ) ve fenolik reçineden oluşan bağlayıcı çeşitleri kullanılmıştır. Sonuç olarak  $B_4C$  ve Co tozu alüminyum fosfat veya fenolik reçine gibi bağlayıcılarla uyumlu olduğu ve çok iyi kompozit malzeme oluşturacağı gözlemlenmiştir. Yanlış veya uygun olmayan bağlayıcı kullanıldığında iyi bir ürün elde edilemeyeceği sonucuna da varılmıştır. % 50  $B_4C$  + % 50 Fe tozları ile alüminyum fosfat ( $Al_2O_3P_2O_5 \cdot nH_2O$ ) bağlayıcısı karışımından üretilen kamın

1060°C sıcaklıkta sinterlendikten sonraki yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve EDX analizi Şekil 1.20’de gösterilmiştir.

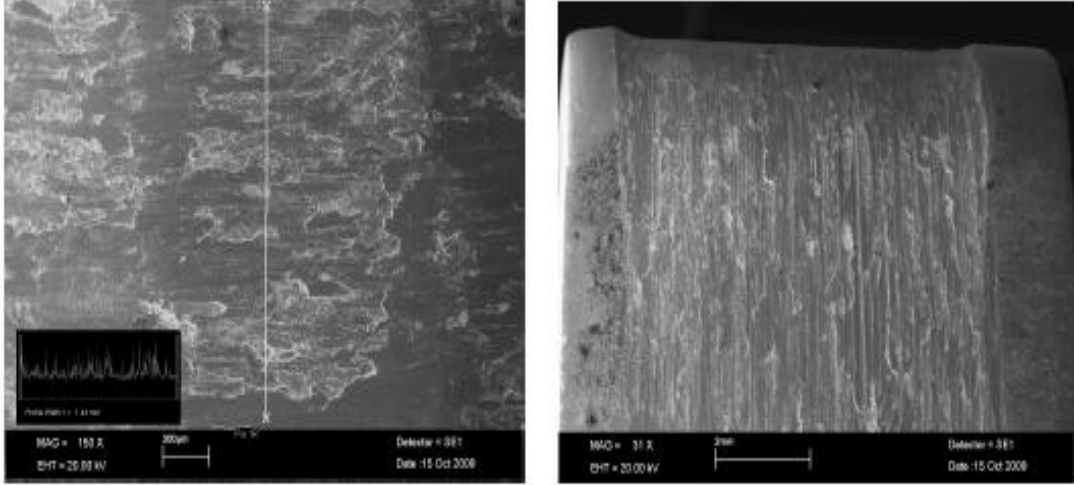


**Şekil 1.20** B<sub>4</sub>C-Fe tozları karışımının SEM ve EDX analiz görüntüleri (Uygunuçarlar, 2010).

Cerit (2010), doktora tezinde, hafif kam üretimine yönelik olarak, kamların hafifletilmesiyle ilgili bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada iki temel hedef öngörülmüştür. Birinci hedef, MMK esas olmak üzere; karıştırmalı döküm, toz metalürjisi, ekstrüzyon teknikleriyle kam üretimi, ikinci hedef ise üretilmiş numune kamların yüzey ve tribolojik özelliklerinin test edilmesidir. Matris malzemesi olarak toz ve kütük formundaki AA2124 alaşımı, seramik malzemesi olarak farklı tane boyutlardaki SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub>C kullanılmıştır. Sonuçta, AA2124 alüminyum tozlarının %30 hacim oranında 2µm’lik SiC partikülleriyle takviye edilerek imal edilen kompozit kam, küresel grafitli dökme demirden imal edilmiş olan kamin aşınma davranışını %77 performans değeriyle karşılamıştır. Kuru sürtünme ortamı sağlanmış şartlar altında, %30 B<sub>4</sub>C içeren kompozit kam için yapılan aşınma testleri sonrasında ortaya çıkan aşınmış yüzeylere ait makro görüntü örnekleri Şekil 1.21’de, SEM görüntüleri ise Şekil 1.22’de verilmiştir.



**Şekil 1.21** AA2124/B<sub>4</sub>C/30 kuru şartlardaki aşınma sonrası kompozit kamin makro yüzey görüntüsü (Cerit, (2010)).

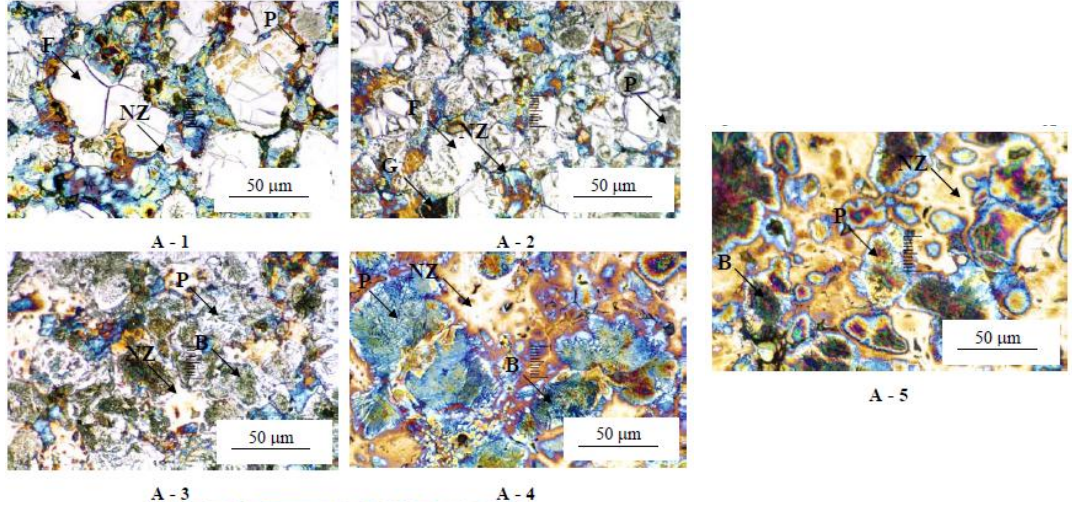


**Şekil 1.22** AA2124/B<sub>4</sub>C/30 kompozit kamın kuru şartlardaki aşınma sonrası yüzeyin SEM görüntüleri (Cerit, 2010).

Çetinkaya (2005) yüksek lisans tezinde, sinterlenmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için ön alaşımlandırılmış demir tozu ile alaşımsız demir tozu kullanımına yönelik bir dizi araştırma yapmıştır. Çalışmada, Distaloy AB, Astaloy Mo ve Distaloy AE ticari isimli üç farklı bileşimdeki ön alaşımlı demir tozuna %1'e kadar (%0.2, %0.4, %0.6, %0.8, %1) farklı oranlarda karbon ilave edilerek karbon katkısının sinterleme sonrası fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla değişik oranlarda karbon içeren ön alaşımlı demir tozu karışımları hazırlanmış ve hazırlanan toz karışımlar çelik kalıpta çift yönlü preslenerek yaklaşık  $7 \text{ g.cm}^{-3}$  yoğunluğunda silindirik ham peletler (ham numuneler) üretilmiştir. Üretilen ham numuneler parçalanmış amonyak atmosferinde, 1120°C sıcaklıkta ve 25 dakika sürede sinterlenmiştir.

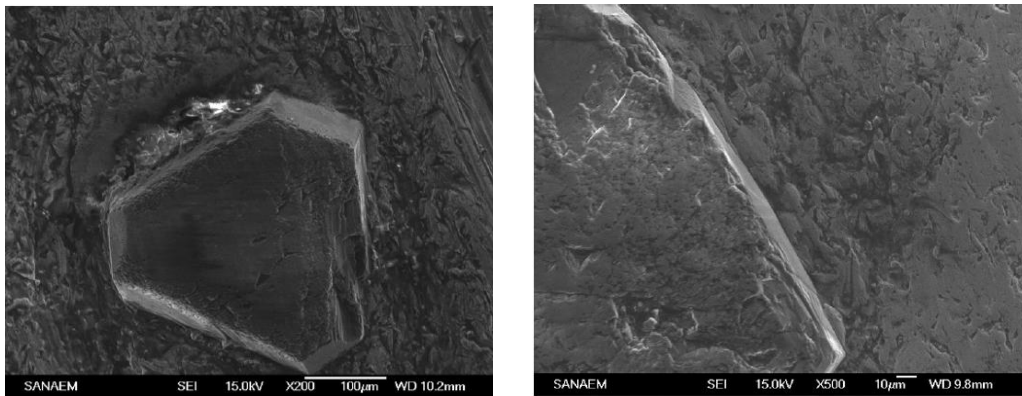
Sinterleme sonrası numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri tespit edilip metalografik çalışmaları yapılmış ve mikro yapı–mukavemet ilişkisi ortaya konulmuştur. Artan karbon miktarı ile birlikte perlitik ve beynitik yapının oluştuğu ve bunun sonucunda üretilen numunelerin sertlik ve mukavemet değerlerinde artışların gerçekleştiği belirlenmiştir. Distaloy AB, Astaloy Mo ve Distaloy AE tozlarından üretilen numunelerin sertliklerinde sırasıyla %30, %9, %35; akma mukavemetlerinde sırasıyla %98, %36, %48'lere varan artışlar gerçekleşmiştir. Ultrasonik yöntem kullanılarak her üç toz grubundan üretilen numunelerin elastisite modülü 131 GPa, kayma modülü 52 GPa, sıkıştırma modülü 162 GPa ve Poisson

oranı 0.27 olarak tespit edilmiştir. Distaloy AB numunelerinin örnek mikroyapı görüntüleri Şekil 1.23’de verilmiştir.



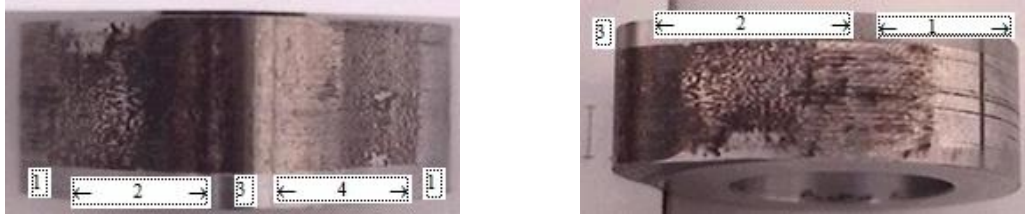
**Şekil 1.23** Distaloy AB numunelerinin mikroyapı fotoğrafları (F: Ferrit, NZ: Nikelce zengin ferrit, P: Perlit, B: Beynit, G: Gözenek) (Çetinkaya, 2005).

Öksüz (2011) yüksek lisans tez çalışmasında, Fe ve B<sub>4</sub>C ilavesinin toz metalürjisi yöntemiyle sıcak preslenmiş elmas emdirilmiş Fe-Co matrisli kompozitler üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneysel sonuçlarda, Fe ilavesiyle birlikte matris sertliğinin bir miktar azaldığı, B<sub>4</sub>C takviye elemanın katılmasıyla matris sertliğinin bir hayli arttığı gözlemlenmiştir. B<sub>4</sub>C takviyeli Fe-Co metal matris kompozitlerin farklı yükleme şartlarındaki aşınma direncinin, B<sub>4</sub>C takviyesiz malzemelere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Şekil 1.24’de, aşınma testleri sonrasında oluşan yüzeydeki Fe-Co matrisi içindeki deformasyona uğramış olan bölgedeki elmasın SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 1.24** Fe-Co Matrisi içindeki elmasın deformasyon sonundaki SEM görüntüleri (Öksüz, 2011).

Sevimligül (2002) yüksek lisans çalışmasında, motorlardaki kam millerinin çalışma prensibinin simüle edildiği bir aşınma test sisteminde çeşitli kamların teknik kuru sürtünmesindeki aşınmasını incelemiştir. Deneylerde üç tip kam mili üzerinde araştırma yapılmış ve aşınma performansları kıyaslanmıştır. Karşılaştırılmalı testlerde kayma süresi, devir ve yük esas alınmıştır. Yapılan deneylerde, hem ağırlık kaybı hem de kam profilindeki boyut değişimi cinsinden aşınma durumu incelenmiştir. Daha sonra aşınmaya en dayanıklı kam için yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri için ilave deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda, AISI 5115 ve AISI 8822 alaşımli çeliklerden dövme yoluyla imal edilmiş kam millerinin, çil döküm millere göre aşınmaya karşı daha dayanıklı ve aşınma direnci en yüksek kam milinin AISI 8822 çeliğinden imal edilen olduğu gözlemlenmiştir. Örnek bir aşınmış kam numunesinin görüntüleri Şekil 1.25’de verilmiştir.

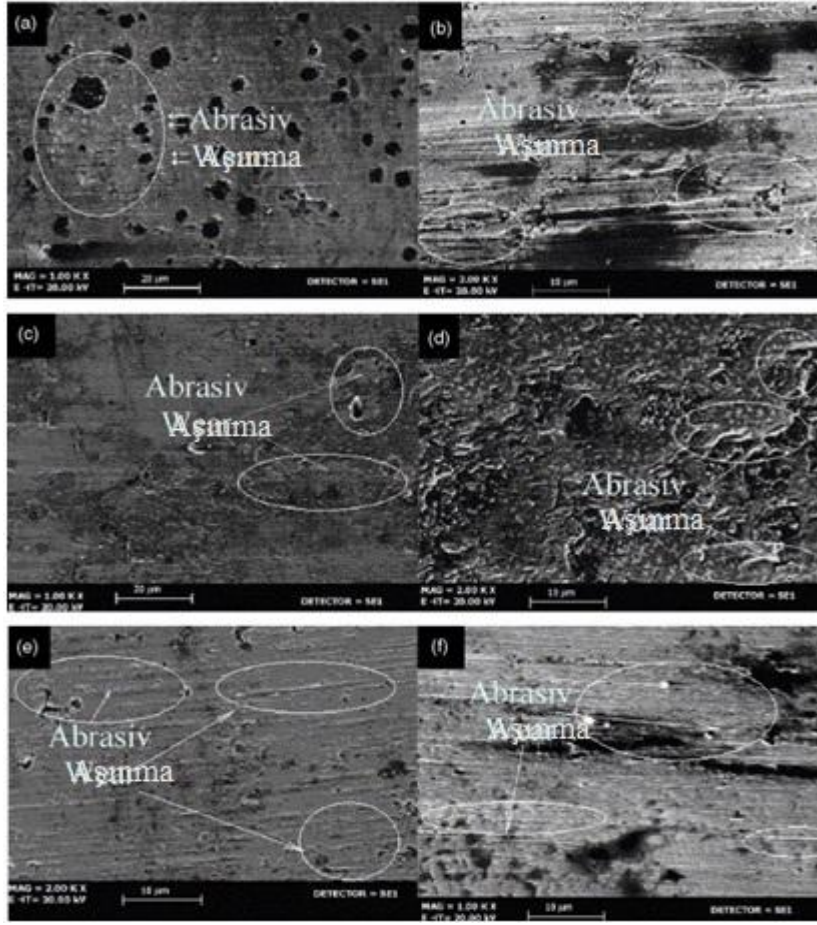


**Şekil 1.25** Aşınmış AISI 5115 (100 d/dk, 4 saat, 0.30  $\mu$ m, 20-52 N) kam numunesinin fotoğrafları (Sevimligül, 2002).

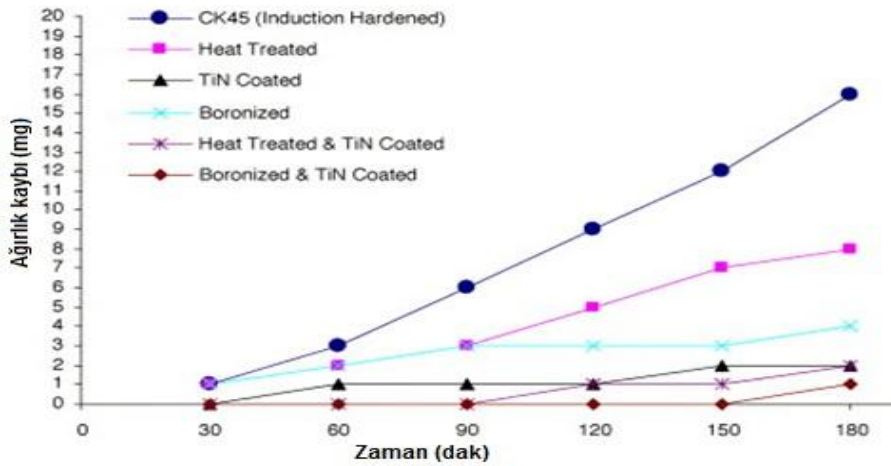
Yapılan literatür taramaları neticesinde B<sub>4</sub>C ile takviyelendirilmiş demir esaslı kompozit kam üretimiyle doğrudan ilgili bir çalışma bulunamamıştır. Genellikle çalışmalar Al esaslı B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin üretim yöntemlerinin çeşitlendirilmesi ile mikro yapıları ve mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerinedir. Kam üretimiyle ilgili bir çalışmaya ulaşılabilmektedir.

Sert ve ark. (2006), beş farklı yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuş kam milinin aşınma davranışını incelemiştir. Kam milleri GGG50 küresel grafitli dökme demir, indüksiyonla sertleştirilmiş Ck45, PVD-TiN kaplanmış küresel grafitli dökme demir ve ayrıca bunun borlanmış halinden imal edilmiş kam numuneler kullanmıştır. Bu çalışmada bor kaplamanın ve PVD ile TiN kaplamanın küresel grafitli dökme demire uygulanabilirliğini göstermiştir. Kamların mukayeseli aşınma testleri sonucunda, uygulanan yüzey kaplama işlemleri sayesinde, GGG50 küresel grafitli dökme demirin aşınma direncinin artmış olduğunu gözlemlenmiştir. Aşınma yüzeylerinden

alınmış olan SEM görüntüleri Şekil 1.26'da, aşınma test sonuçlarını gösteren grafik Şekil 1.27'de verilmiştir.



**Şekil 1.26** Aşındırılmış kam yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri: (a) borlanmış GGG50; (b) TiN kaplanmış GGG50; (c) sertleştirilmiş GGG50; (d) borlanmış ve TiN kaplanmış GGG50; (e) sertleştirilmiş ve TiN kaplanmış GGG50; (f) induksiyonla sertleştirilmiş CK45 çelik (Sert ve ark., 2006).



**Şekil 1.27** 90 d/dak ile yapılan aşınma test sonuçları (Sert ve ark., 2006).

Sonuç olarak, bu çalışma demir bazlı  $B_4C$  takviyeli MMK malzemedeki T/M yöntemiyle kam üretimi ve  $B_4C$  miktarının MMK kamlardaki aşınma direncine olan etkisini incelemeye yönelik olup, literatüre yeni ve farklı bir çalışma olarak katkı sağlayabilir diye düşünülmektedir.

$B_4C$  takviyeli MMK kam üretimi ve değerlendirilmesi şeklinde özetlenebilecek çalışmamıza esas olacak üretim sürecinin ve kullanılacak malzemelerin belirlenmesinde, yukarıda bahsi geçen çalışmalarda yapılan araştırmalardan azami ölçüde faydalanmaya çalışılmıştır. Araştırmalarda kullanılan malzeme ve yöntemlerin bir sentezi oluşturulup, MMK malzemedeki kam üretimi çalışmalarına başlanmıştır.

## 2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ve TOZ METAL

### 2.1 Giriş

Birbirlerinin zayıf yönünü iyileştirmek ve üstün özellikler elde etmek amacıyla farklı iki veya daha fazla malzemenin belirli şartlar ve oranlarda bir araya getirilmesi ile oluşturulan makro veya mikro fazlı malzemeye kompozit malzeme denir. Üç boyutlu bir araya getirmede, bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesi, diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir. Böylece üretilen kompozit malzemenin özelliği kendisini oluşturan orijinal malzemelerin özelliklerinden farklı olmaktadır.

Kompozitler, içyapılarında sürekli bir ana faz ile onun içinde dağılmış pekiştirici bir donatı fazı içerirler. Yapı bileşenleri olarak tanımlanan ve sonradan bir araya getirilerek üstün özelliklerdeki kütleleri oluşturan bu fazların boyutları 0.1 mm'nin üzerinde çıplak gözle (makroskobik muayene) seçilip ayırt edilmeleri mümkündür.

Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, yani kimyasal olarak inert davranırlar, diğer bir ifade ile kimyasal bağ oluşturmazlar. Ancak özellikle metalik sistemlerde çözünmez bileşenler arasında düşük oranlarda bile olsa, kompozit özelliklerini etkileyebilen bir miktar ara yüzey reaksiyonları görülebilir.

Kompozit malzemelerde donatı fazı olarak tanımlanan ve değişik özelliklere sahip bir çekirdek malzeme ve bunun çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan ve matris olarak tanımlanan sürekli bir faz bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, çekirdek malzeme kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da çekirdek malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü çekirdek malzemeye homojen olarak dağılımını sağlamaktır. Böylece çekirdek malzemedeki plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkan çatlak ilerlemesinin önüne geçilmiş olur.



Kompozit malzemeler rijitlik, dayanım, hafiflik, sertlik, iletkenlik, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyona dayanıklılık gibi fevkalade özelliklerinden dolayı tercih edilirler (Şahin, 2006).

## **2.2 Kompozit Malzeme Teknolojisinin Gelişimi**

Günümüzde ev aletleri ve spor malzemeleri üretiminden uzay teknolojisine, otomobil ve gemi yapımından bina inşasına kadar hemen hemen her alanda çok yaygın bir kullanımı bulunan kompozit malzemenin üretimi son birkaç yüzyıla mal edilse de ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. Kompozit malzeme kavramının ortaya atılması ve bir mühendislik konusu olarak ele alınması ise 1940'lı yılların başında gerçekleşmiştir.

İlk çağlardan beri insanlar kırılabilir malzemelerin içine bitkisel veya hayvansal lifler koyarak kırılabilirlik özelliğinin giderilmesine çalışmışlardır. Bu konuda bilinen en eski kompozit malzemelerden biri inşaat sektöründe kullanılan kerpiç malzemedir. Kerpiç üretiminde killi çamur içine katılan saman, sarmaşık dalları gibi sap ve lifler, malzemenin hem üretim, hem de kullanım sırasındaki dayanımını artırmaktadır.

Bugün ise inşaat sektöründe; taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan betonarme yapılar ile selüloz ve reçineden oluşan kâğıt kompozit malzemeye verilebilecek en güncel örneklerden ikisidir.

Öte yandan, günümüzde kompozit malzemenin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamanın da çok yeni olmadığı eski Mısır'a kadar uzandığı eldeki bulgulardan anlaşılmaktadır. Örneğin; M.Ö 1600 yıllarında Mısır'da çeşitli renkte ince cam lifleriyle bezenmiş amforaların yapıldı bilinmektedir. Cam liflerinin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt, 1877 tarihidir. Bu yüz yılın başında hidrolik bağlayıcılar ve elyaf malzeme kullanılarak yapay taş plakaları üretilmiş ve bu üretim yöntemi ile ilgili alınmış patentler bulunmaktadır. Günlük uygulamalarda en yaygın kullanılan liflerle donatılmış kompozit malzemelerden ikisi, asbest lifleriyle donatılı kompozit malzemeler ve cam lifleriyle donatılı polyester kompozitlerdir. İlk kez ince levha yapımında kullanılan çimento ve asbest kompozitler bu gün hala kullanılan önemli bir malzemedir.

Liflerle donatılı sentetik reçineler 1950’li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en tanınmış grubu, cam lifi donatılı polyester reçinesi kompozitidir. Ülkemizde “fiberglas” diye tanınan bu malzeme 1960’lı yılların başından itibaren kullanılmıştır. Sıvı depoları, çatı levhaları, küçük boyda deniz tekneleri ve ayrıca ilk yerli otomobil olan “Anadol”un kaportası bu malzemedan üretilmiştir. Cam lifleriyle donatılı sentetik reçine matrisli malzemeler, dilimizde "Cam Takviyeli Plastik" (CTP) adı ile bilinmektedir. CTP malzemelerin üretiminde en çok kullanılan malzeme polyesterdir. Günümüzde, diğer termoset ve termoplastik reçineler de kullanılmaktadır (<http://www.muhandisiz.net>).

### **2.3 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması**

Kompozit malzemelerin birçok özellikleri metallerinkinden çok farklıdır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük olması hafif konstrüksiyonlarda tercih edilmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik yalıtımı sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır. Bu nedenle metal malzemelere göre önem kazanmışlardır.

Kompozit malzeme üretiminde genelde aşağıdaki özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özellikler şöyle sıralanabilir:

- Çekme, basınç, yorulma, eğilme, çarpma dayanımı,
- Korozyon direnci, aşınma direnci,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık,
- Isı iletkenliği veya ısıl direnç,
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç,
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- Rijitlik,
- Ağırlık (Hafiflik),
- Görünüm (Boyut Kararlılığı),
- Maliyet

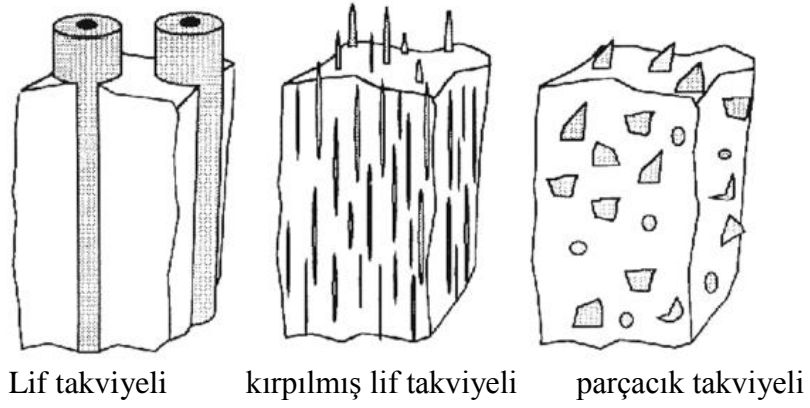
Kompozit malzemelerin dezavantajlı olduğu durumlar da vardır. Bunları ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta ve bu çalışmaların olumlu

sonuçlanması halinde kompozit malzemeler metalik malzemelerin yerini alabileceği düşünülmektedir.

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme bulunduran kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapılarındaki donatı fazını oluşturan malzemenin boyutuna, formuna ve cinsine göre üç ayrı şekilde sınıflandırılmak mümkündür. Bu sınıflandırma tarzı aşağıda verilmektedir (Ersoy, 2001; Şahin, 2006).

- Kompozit Fazların Boyutuna göre
  - Doğal Kompozit Malzemeler
  - Yapay Kompozit Malzemeler
  - Mikro Kompozit Malzemeler
  - Makro Kompozit Malzemeler
- Donatı Fazının Dağılım Şekline göre
  - Fiberli (Elyafli, Lifli) Kompozitler
  - Partiküllü (Parçacıklı) Kompozitler
  - Lamelli (Tabakalı) Kompozitler
  - Karma (Hibrid) Kompozitler
- Donatı Fazı Malzemesinin Cinsine göre
  - Metal Kompozitler
    - Metal-Metal Kompozitler
    - Metal-Seramik Kompozitler
    - Metal-Polimer Kompozitler
  - Seramik Kompozitler
    - Seramik-Seramik Kompozitler
    - Seramik-Polimer Kompozitler
    - Seramik-Metal Kompozitler
  - Polimer Kompozitler
    - Polimer-Seramik Kompozitler
    - Polimer-Metal Kompozitler
    - Polimer-Polimer Kompozitler

Şekil 2.1’de kompozit malzemelerdeki takviye elemanlarının içyapıda bulunma şekline göre yer alabilen üç değişik türünün gösterimi yer almaktadır (Kainer, 2006).



**Şekil 2.1** Takviye elemanlarının iç yapıda bulunabileceği başlıca üç formunun şematik gösterimi (Kainer, 2006).

## 2.4 Metal Kompozit Malzemeler

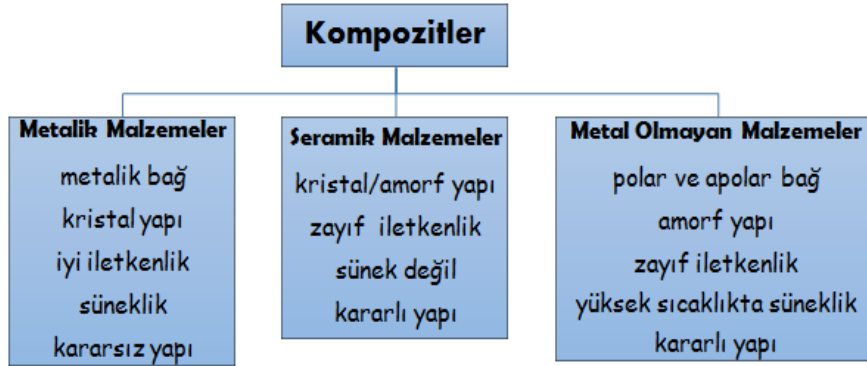
Metal matrisli kompozitler MMK veya metal kompozit malzemeler MKM günlük yaşamımızın oldukça büyük bir kısmında pek çok alanda uygulama imkânına sahiptir. Çoğu zaman etrafımızdaki kompozit malzeme uygulamalarını fark etmeyiz. Bu malzemeler metallerin geleneksel olarak işlenmesi ve üretilmesi sırasında bile kendiliğinden ortaya çıkabilmektedir. Örneğin bu durum, iki tip çeliğin dövülerek kaynak edilmesiyle ortaya çıkan kıvrımlı ve zikzaklı Dalmaçya Kılıcının iç yapısında rahatlıkla gözlenebilmektedir. Yine, grafit içeren dökme demir veya yüksek karbonlu çeliklere benzer şekilde, bir metal ve karbondan oluşan WC (tungsten karbür) de bu grup kompozit malzemelere birer örnektir.

Çoğu araştırmacılar genellikle MMK terimini hafif MMK terimi ile bir tutmaktadırlar. Ancak, son yıllarda hafif MMK malzemelerin en önemli uygulamalarda ortaya çıkmasıyla birlikte, bunların geliştirilmesinde büyük ölçekli ilerlemeler kaydedilmiştir. Trafik mühendisliğinde, özellikle otomotiv endüstrisinde fiber takviyeli pistonlar, Al krank milleri ve parça takviyeli fren diskleri ve bunlara benzer şekilde güçlendirilmiş silindir yüzeyleri gibi uygulamalar ile MMK malzemeler ticari anlamda kullanılmaya başlanmıştır.

MMK malzemelerin karakteristiği, üreticiden talep edilen uygulamaya bağlı olarak düzenlenebildiğinden, bu yenilikçi malzemeler modern malzeme bilimi ve gelişimi

açısından ucu açık sonsuz imkânlar sunmaktadır. MMK malzemelerin bu potansiyeli, bir tasarımcının arzulayabileceği istekleri ve tüm düşüncelerini yerine getirebilmesi için bir enstrüman sunmaktadır (Trumper, 1987; Easterling 1990).

Özel taleplerle yükselen malzeme standartlarına ulaşamayan veya probleme çözüm olamayan geleneksel malzemelerin düşük mekanik özelliklerinden dolayı yapısal ve fonksiyonel özellikleriyle üstünlük sağlayan MMK malzemeler grubu ilgi çeker hale gelmiştir. Bununla birlikte MMK teknolojisi diğer modern malzeme teknolojileriyle, (örneğin toz metalürjisi) bir rekabet içerisinde. Kompozit malzemelerin avantajları yalnızca üretilen parçalarda makul bir fiyat/performans ilişkisi olduğu zaman fark edilir. Sadece bu malzemelerin uygulanmasıyla mekanik özellikler elde edilebilecekse, kompozit malzemenin kullanılması kaçınılmazdır. Çeşitli malzeme sistemlerinin (metal, seramik, ametal) bir arada kullanılmasıyla kompozitler limitsiz çeşitliliğe imkân tanımaktadırlar. Ortaya çıkacak olan yeni malzemelerin özellikleri temel olarak tek tek bileşenlerinin özellikleri tarafından belirlenir. Şekil 2.2’de kompozit malzemeleri oluşturan grupların malzeme tipleri verilmiştir (Thümmel ve Oberacker, 1993; Kainer, 2006).



**Şekil 2.2** Kompozit malzemeleri oluşturan grupların malzeme tipleri (Kainer, 2006).

Takviyeli metaller çok farklı amaçlara hizmet verebilmektedir. Takviyeli hafif metaller ağırlık azaltılmasının birinci öncelikli olduğu yerlerde kullanılacak malzemeler için ucu açık imkânlar sunmaktadır. Bileşenlerin özelliklerinin geliştirilmesi ön şarttır. Hafif metal kompozit malzemelerin hedeflenen geliştirilmesi şunlardır:

- Minimum sünekliği veya tercihen tokluğu değiştirmeden oda sıcaklığı ve üzerindeki sıcaklıkta akma ve çekme dayanımlarının artırmak

- Geleneksel alaşımlarla karşılaştırıldığında daha yüksek sıcaklıklardaki sünme dayanımını artırmak
- Yüksek sıcaklıklardaki yorulma dayanımını yükseltmek
- Termal şok direncini geliştirmek
- Korozyon direncini geliştirmek
- Elastisite modülünü yükseltmek
- Termal uzamayı azaltmak

Özetle, önerilen uygulama alanlarının genişlemesine yol açan belirli özellik değerlerine sahip MMK malzemelerdeki gelişme, yaygın olarak kullanılmakta olan malzemelerin yerlerine geçmesi ve malzeme bileşenlerinin özelliklerinin optimize edilmesi ile sonuçlanabilmektedir. Bu fonksiyonel özellikli MMK malzemelerin bir diğer hedefi, malzemelerin uygun fonksiyonunu korumaktır. Olası örnek hedefler şöyle sıralanabilir.

- Yüksek iletkenliğin yanı sıra iletken malzemelerin dayanımını artırmak
- Düşük sıcaklıklardaki sünmeyi (sürünmeyi) geliştirmek (tepkisiz malzemeler)
- Yanma davranışını geliştirmek (anahtarlama / geçiş teması)
- Aşınma dayanımının geliştirmek (kayma teması)
- Nokta direnç kaynağında elektrotların yanarak tükenmesini azaltarak kaynak işletme zamanını artırmak
- Elektronik bileşenler için tabakalı malzemeler üretmek
- Sünek kompozit süper iletken üretmek
- Özel nitelikli manyetik malzemeler üretmek

Daha önce bahsedilenlerden farklı olarak özel uygulamalar için ileri hedefler de vardır. Örneğin tıbbi uygulamalarda, biyolojik uyumluluk beklentisinin yanı sıra son derece yüksek korozyon dayanımı ve düşük indirgenme gibi mekanik özellikler de istenmektedir (Dowson, 1991; Jenkins ve Wood, 1991; Muhammad, 1997).

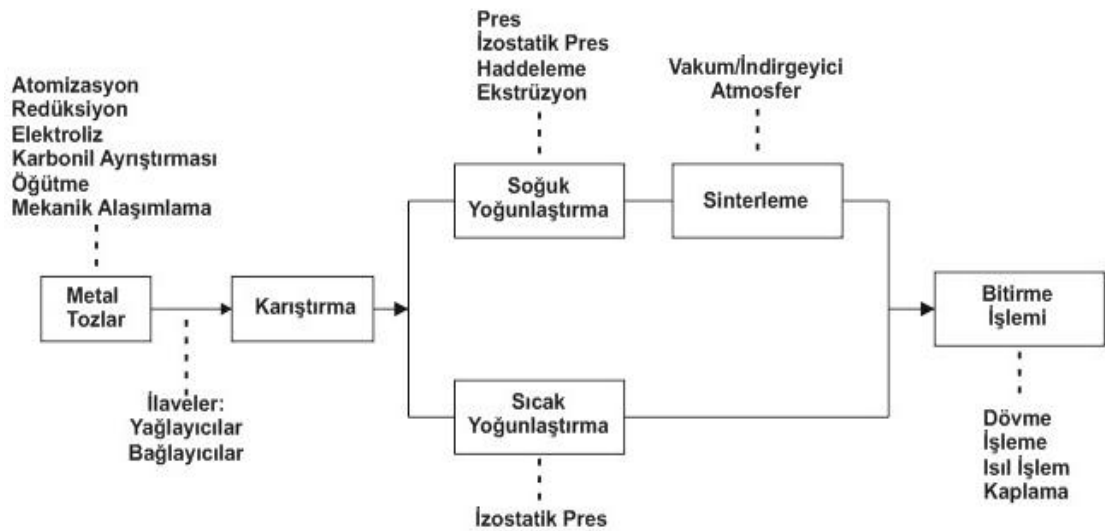
MMK kullanımını artırmaya yönelik geliştirme çabaları neticesinde bazı sistem problemlerine çözüm bulunmasına karşın, özellikle yenilikçi sistemlerdeki kullanımı ve özellikle hafif metal alanındaki kullanımı henüz fark edilememiştir. Bunun sebebi yetersiz işlem kararlılığı ve güvenilirliği, üretim ve işlem sorunlarının birleşimi ve yetersiz ekonomik verimliliğidir. Uygulama alanları maliyete dayalı ve tutucu olan

trafik mühendisliği gibi alanlarda ve endüstride bu tip malzemelerin kullanılmasıyla ortaya çıkabilecek ek bir külfet istenilmemektedir. Tüm bu sebeplerden ötürü MMK modern malzemelerin gelişim eğrisinin başlangıcında yer almaktadır (Kainer, 2006).

## 2.5 Toz Metalürjisi ve MMK Malzemeler

Toz metalürjisi yöntemi ile yüksek üretim hızlarında, istenilen boyutsal toleranslarda ve özelliklerde parçalar üretilebilmektedir. Yöntemin geleneksel metal üretim tekniklerine göre ekonomik olması nedeniyle toz metalürjisi ile üretim yöntemi, ülkemizde gün geçtikçe gelişmektedir. Günümüzde ülkemizin toplam demir bazlı sinterlenmiş malzeme üretimi 3000 ton civarında olup, bu üretim yöntemiyle başta otomotiv sektörüne olmak üzere, dayanıklı tüketim malları sektörüne, elektronik ve savunma sanayine ve diğer birçok sektöre yönelik parça üretimi yapılmaktadır (<http://www.turkishpm.org>).

Metalik toz işleme teknolojisi açısından toz üretimi, toz karışımı hazırlama, toz karakterizasyonu gibi metalik/alaşım toz karakteristikleriyle, presleme ve sinterleme gibi işlem kademeleri, nihai ürünün tüm özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Genel akış şeması açısından basit seviye bir üretim teknolojisi gibi görünen bu yöntem, özünde birçok parametrik ilişkiler barındırmakta olup ürünün mikro yapı üzerinden mekanik ve fiziksel-kimyasal özelliklerine doğrudan kuvvetli bir etkisi vardır. Şekil 2.3, temel metalik toz işleme teknolojisi üretim kademelerini göstermektedir (Karagöz vd., 2009).



Şekil 2.3 Metalik toz işleme akış şeması (Karagöz vd., 2009).

## 2.5.1 Toz Üretimi

Metal tozun üretimi birçok teknikle gerçekleştirilir. Burada amaç toz üretimini belirli şekil ve boyut dağılım aralığında, herhangi bir kirlenme içermeksizin üretmektir. Bu aşamada toz karakterizasyonu bir sonraki üretim kademeleri açısından önemlilik arz eder. Kontrollü bir başlangıcın, istenen kalitede parça üretimini sağlaması kaçınılmazdır. Tozun şekil ve boyut özellikleri ön-hazırlama aşamasında iyi bir harmanlama veya karışım oluşumu açısından önemli rol oynarken özellikle presleme esnasında homojenlik, iyi sıkıştırabilirlik ve yüksek ham yoğunluk kazandırılması açısından kontrol edilmesi gereken kavramlar olarak düşünülmelidir. Tüm bunların ötesinde sinterleme aşamasında ilk kademelerin optimizasyonun sağlanması ile arzulanan seviyede mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliğe sahip parça üretimi gerçekleştirilmiş olacaktır. Şekil 2.4, çeşitli yöntemlerle üretilmiş toz şekillerini örneklemektedir (Sarıtaş vd., 2007).



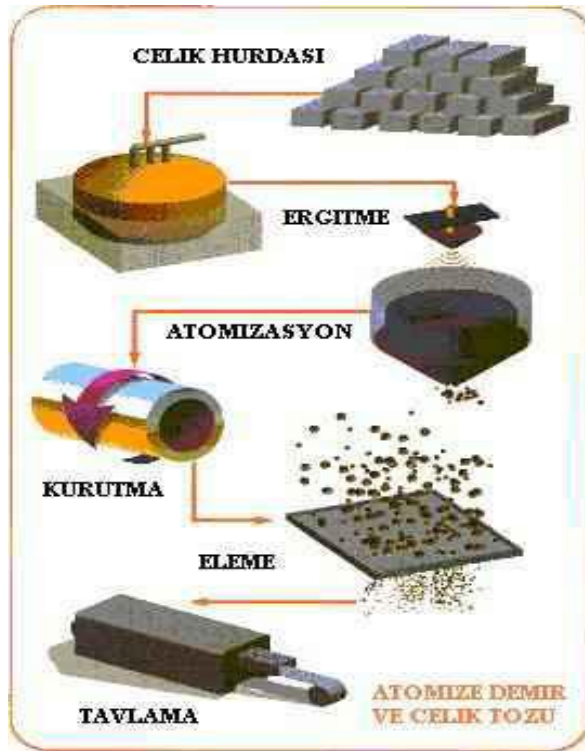
Şekil 2.4 Çeşitli üretim teknikleri ile üretilmiş toz şekilleri (Sarıtaş vd., 2007).

Başlıca toz üretim yöntemleri, öğütme, elektroliz, kimyasal indirgeme ve atomizasyondur. Bu üretim metotlarına ilave olarak, bazı malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılır. Tozları üretmek için seçilen yöntemler malzeme



özelliklerine bağlıdır. Endüstride kullanılan tozların %60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir (Höganas AB, 2013).

Şekil 2.5'de atomizasyon yöntemi ile demir ve çelik tozu üretiminin şematik gösterimi verilmektedir. Atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde, ergimiş metal yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakılarak daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Bu yöntemde en çok kullanılan gazlar, hava, azot ve argon; sıvı ise sudur. Atomizasyon yönteminde tane boyutu, nozülün tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış hızı ile kontrol edilmektedir. Tane şekli ise, katılma hızı ile belirlenmektedir. Gazlar suya göre daha düşük soğutma kapasitesine sahip olduğundan gaz atomizasyonunda küresel şekilli taneler, su atomizasyonunda ise karmaşık şekilli taneler elde edilmektedir. Ergitilebilen tüm malzemeler için atomizasyon yöntemi uygulanabilir ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır. Atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlarda, kimyasal bileşim her toz tanesinde aynı olduğundan özellikle alaşımlı tozların üretilmesinde avantajlı bir yöntemdir (Çetinkaya, 2005).



**Şekil 2.5** Atomizasyon yöntemi ile demir ve çelik tozu üretiminin şematik gösterimi (Çetinkaya, 2005).

### 2.5.2 Karıştırma

Metalik tozlar, yağlayıcı ve alaşım elementleri ile homojen bir karışım elde etmek için karıştırılmaktadır. Karışım içerisine genellikle %0.5 – %1.5 arasında yağlayıcı eklenir. Yağlayıcı kullanmanın amacı, toz kütleleri ile kalıp cidarları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, tozların sıkıştırma esnasında kaymalarını sağlamaktır. Böylece parçanın tabanından tavanına kadar düzgün bir yoğunluk dağılımı sağlanmış olur. Sürtünmenin azaltılması, parçaların kalıptan kolayca çıkartılmasını sağlamaktadır. Önceden alaşımlanmış tozlara alternatif olarak alaşım elementleri, karıştırma aşamasında da katılabilir. Böylece saf demirin yüksek olan sıkıştırılabilirliği korunmuş ve alaşım elementlerinin demiri sertleştirme önlenmiş olur. En çok kullanılan alaşım elementi karbondur ve grafit tozu olarak demir tozuna ilave edilir (Çetinkaya, 2005).

### 2.5.3 Presleme

Toz metalürjisindeki en önemli adımlardan birisi de preslemedir. Metalik tozlar, özel olarak hazırlanmış çelik kalıp içerisinde basınç etkisiyle kompakt hale getirilir. Bu işlemde hidrolik, mekanik veya pnömatik presler kullanılmaktadır. Bu işlemin amacı, metal tozlara presleme ile istenilen parçanın şeklini vermek ve sinterleme öncesi parçaya ham mukavemet kazandırmaktır. Presleme işlemi, tek yönlü veya çift yönlü presleme, sıcak veya soğuk presleme olarak değişik şekillerde yapılabilmektedir.

Demir tozlarında en yaygın şekillendirme yolu, bir çelik veya sert metal kalıp içerisinde 300 MPa – 800 MPa arasındaki basınç altında çift yönlü preslemedir. Tek bir işlemle karmaşık şekilli parçaları yüksek üretim hızıyla (dakikada 25 parça) üretmek mümkündür. Presleme sonrası parça kalıptan çıkarılabilecek yeterli mukavemete sahiptir. Yüksek sıkıştırılabilir kabiliyetindeki demir tozları, 800MPa basınç altında  $7.3 \text{ g.cm}^{-3}$  (%93 teorik yoğunluk) yoğunlukta şekillendirilebilmektedir. Sıcak presleme ile özel 8 yağlayıcı katılmış toz 130 °C ve kalıp 150 °C sıcaklığa ısıtılmakta, yoğunluk soğuk preslemeye göre  $0.2 \text{ g.cm}^{-3}$  daha artırılabilir (Çetinkaya, 2005).

#### 2.5.4 Sinterleme

Sinterleme, oksidasyona karşı metali korumak için atmosfer kontrollü veya vakum altındaki fırınlarda yapılmaktadır. Sinterleme işlemi, metalin ergime sıcaklığının altında yapılır. Bu işlem sırasında metalik tozlar, difüzyonla birbirlerine bağlanmakta ve malzeme içindeki gözenek miktarı azalmaktadır. Böylece parçanın bulk yoğunluğu artmaktadır. Bu işlem sonucunda malzeme gerekli mukavemet ve istenilen özellikleri kazanmaktadır.

Demir tozlarının sinterlenmesinde kullanılan en yaygın sinterleme sıcaklık aralığı 1100 °C - 1150 °C değerindedir. Bazı durumlar için 1250 °C'ye kadar olan yüksek sinterleme sıcaklıklarına ihtiyaç duyulur. Uygulamaya bağlı olarak sıcaklıktaki bekleme zamanı 10 ile 60 dakika arasında değişmektedir. En yaygın kullanılan fırın sürekli bant fırınıdır.

Sinterleme fırını içinde oksitlenmeyi önleyen bir atmosfer gereklidir. Parçalanmış amonyak, endo-gaz veya azot bazlı atmosferler demir tozlarının sinterlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sinterleme işlemi yağlayıcı giderimi, sinterleme ve soğutma kademelerini kapsamaktadır. Fırının yağlayıcı giderimi bölgesinde, organik bazlı yağlayıcı parçalanmaktadır. Sinterleme sırasında, tozların yüzeyindeki oksitler fırın atmosferinin etkisiyle indirgenmekte ve birbirleri ile temas halindeki tozlar arasında difüzyon yoluyla bağlar oluşmaktadır. Difüzyon ile toz partikülleri arasında boyun oluşumu gerçekleşir ve alaşım elementleri demir içerisine yayılırlar. Böylece gözenek küreselleşmesi meydana gelir ve küçük gözenekler yok olurlar. Sinterlenmiş parçalar, fırının soğutma bölgesinde koruyucu atmosfer içinde soğutulur. Özellikle 850 °C - 500 °C sıcaklıklar arasındaki soğutma hızı, malzeme içerisindeki faz dönüşümlerinden dolayı mekanik özellikleri etkilemektedir.

Sinterleme sonrası parçanın kullanım alanına ve isteğe bağlı olarak infiltrasyon, yağ emdirme, boyutlandırma, ikinci presleme, buhar işlemi, talaşlı imalat, çapak alma, birleştirme, ısıl işlem, yüzey kaplama gibi son işlemler uygulanarak mamul piyasaya sunulur (Çetinkaya, 2005).

Gözeneklilik, T/M teknolojisinin ayrılmaz ve doğal bir karakteristiğidir. Malzeme yüzeyinde bulunan gözenekleri yağ, polimer veya metalle doldurarak özel mamuller oluşturulabilir. Sinterlenmiş bir T/M parçanın gözeneklerine, yağ veya başka bir sıvı

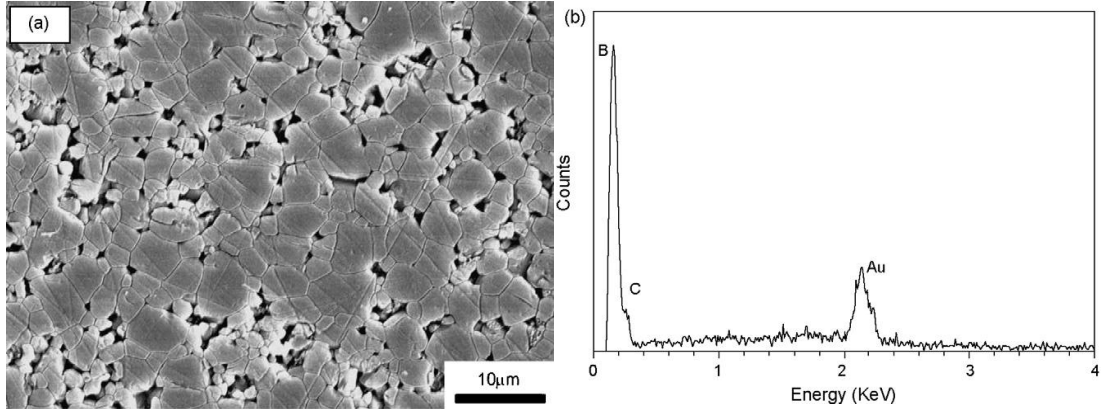
emdirilmesi işlemine emprenye adı verilir. Emprenye işlemi görmüş yaygın mamuller, yağ emdirilmiş yataklar, dişliler ve benzer parçalardır. Alternatif bir uygulama, parçalara polimer reçine emdirilerek, gözenek boşluklarının sıvı formda doldurulması ve katılaştıktan sonra basınç altında sızdırmazlık özelliğine sahip bir parça elde edilmesidir. T/M parçanın gözeneklerinin erimiş bir metalle doldurulması işlemi infiltrasyondur. Dolgu metalinin erime sıcaklığı, T/M parçanınkinin altında olmalıdır. Bu işlem, sinterlenmiş parça ile temas halindeki dolgu metalinin ısıtılmasını ve dolgunun kapiler etkiyle gözeneklere dolmasını içerir. Oluşan yapı, göreceli olarak gözeneksizdir ve infiltre edilmiş parça daha üniform bir gözenekliliğe sahip olup tokluğu ve dayanımı artmıştır.

T/M parçanın şekillendirilmesinde alternatif presleme ve sinterleme teknikleri geliştirilmiştir. Geleneksel pres ve sinter sırası, toz metalurjisinde en yaygın kullanılan şekillendirme teknolojisidir. T/M parçalar için ilave yöntemler şunlardır (Dikicioğlu ve ark., 2011):

- İzostatik presleme (Soğuk=CIP ve Sıcak=HIP)
- Toz enjeksiyon kalıplama
- Toz haddeleme, Ekstrüzyon ve Dövme
- Kombine presleme ve sinterleme
- Sıcak presleme
- Kıvılcım sinterleme
- Sıvı faz sinterleme (Erime sıcaklıkları farklı iki tür tozun karıştırılması ve tozlardan birinin eritilmesi)
- Basınçlı gaz ile sinterleme
- Lazer sinterleme

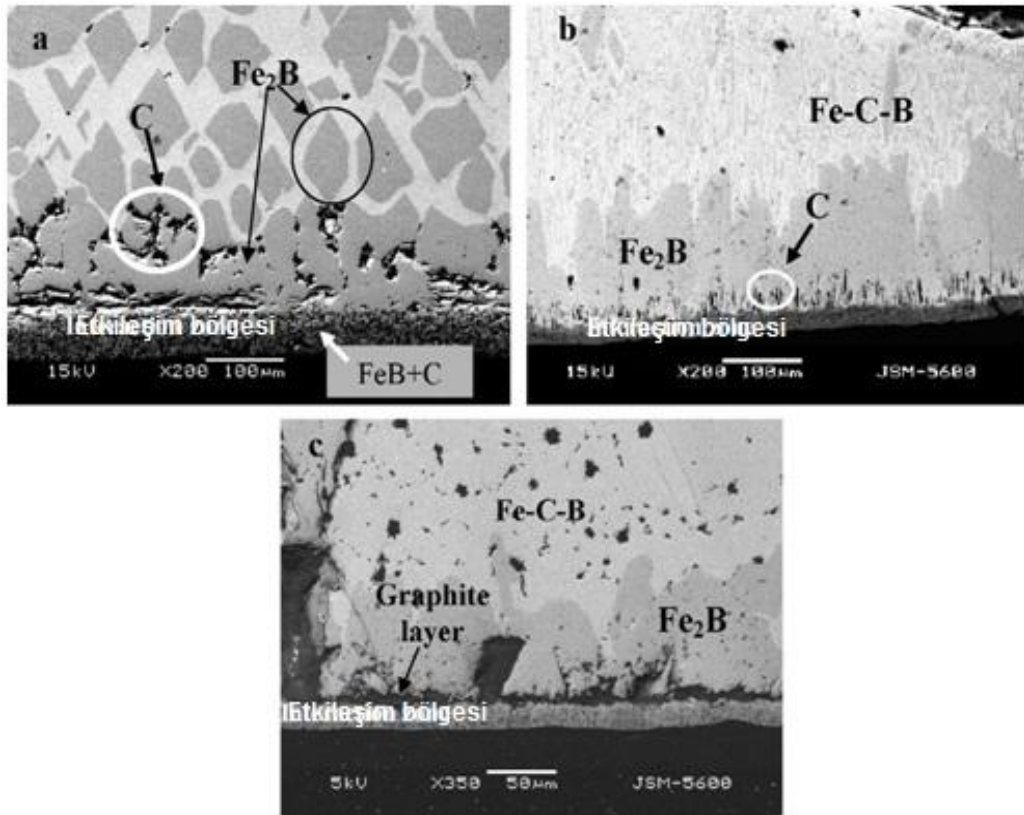
## **2.6 B<sub>4</sub>C Takviyeli MMK Malzemelerde Görüntülenmiş İçyapılar**

Miyazaki ve ark. (2010), bor karbürü maksimum 2226 °C'de argon atmosferde harici basınç olmaksızın gaz haldeki Al ve Si tozlarıyla izostatik preste sinterleyerek %97.4 teorik yoğunluğa ulaşmıştır. Sinterleme sırasında Al ve Si taneli yapıyı kaplayarak, SiC, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> and Al<sub>4</sub>SiC<sub>4</sub> bileşiklerini oluşturmuştur. Sonuçta ortaya çıkan yapılardan yazarın tercihi olan, 2187 °C'de sinterlenmiş numunenin iç yapısına ait örnek resimler Şekil 2.6'da verilmiştir.



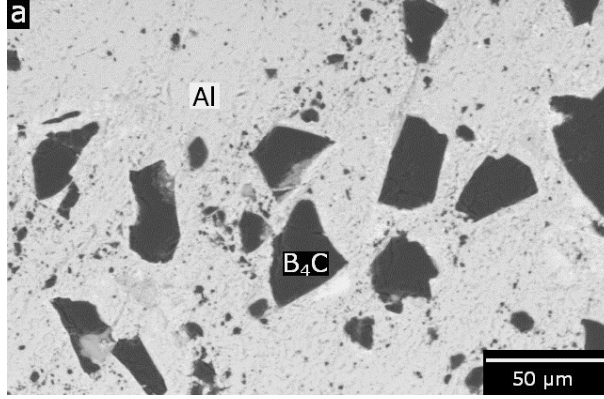
**Şekil 2.6** Saf Argon gaz atmosferde 2187°C’de sinterlenmiş numunenin (a) parlatılmış ve dağlanmış yüzeyinin SEM görüntüsü ve (b) tüm yüzey görüntüsünün EDS analizi (Miyazaki ve ark., 2010).

Aizenshtein ve ark. (2008), bor karbürün sinterlenmesinde, ilave edilen demirin rolünü açıklamak için  $B_4C/(Fe-C-B)$  sisteminin ıslatma davranışını incelemiştir. Demir, demirin karbon ile yaptığı alaşım ve bor,  $B_4C$  ile reaksiyona girerek ince taneli  $FeB$  ve grafitten oluşan bir reaksiyon bölgesi ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada ortaya çıkan içyapılar Şekil 2.7’de verilmiştir.



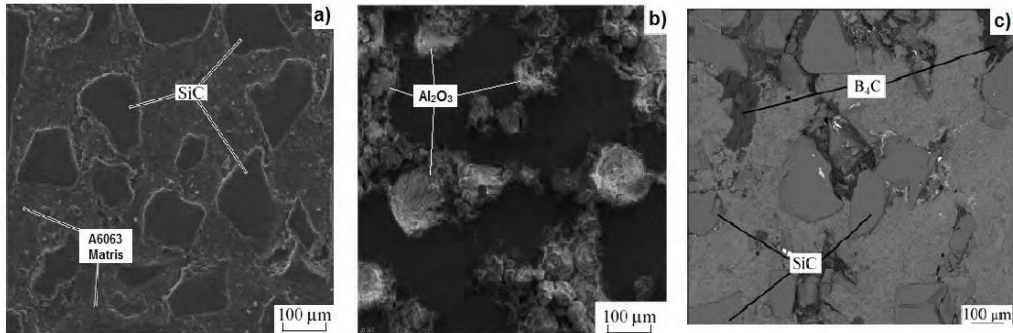
**Şekil 2.7** Metal/seramik ara yüzeyinin SEM görüntüleri (a)  $B_4C/Fe$ ; (b)  $B_4C/(Fe-17\%B)$  and (c)  $B_4C/(Fe-28\%B-6\%C)$  (Aizenshtein ve ark., 2008).

Toptan ve ark. (2006), Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerinin fren diski olarak kullanılabilirliği ve bu malzemelerin üretiminde karşılaşılan, B<sub>4</sub>C (bor karbür) ile sıvı alüminyum metali arasındaki ıslatma problemini incelemiştir. Bu çalışma sırasında elde edilen içyapı Şekil 2.8’de verilmiştir.



**Şekil 2.8** 59 µm B<sub>4</sub>C tane boyutuna ve ağırlık % 10 takviye oranında B<sub>4</sub>C ile takviye edilen Al-MMK'nin SEM görüntüsü (Toptan ve ark., 2006).

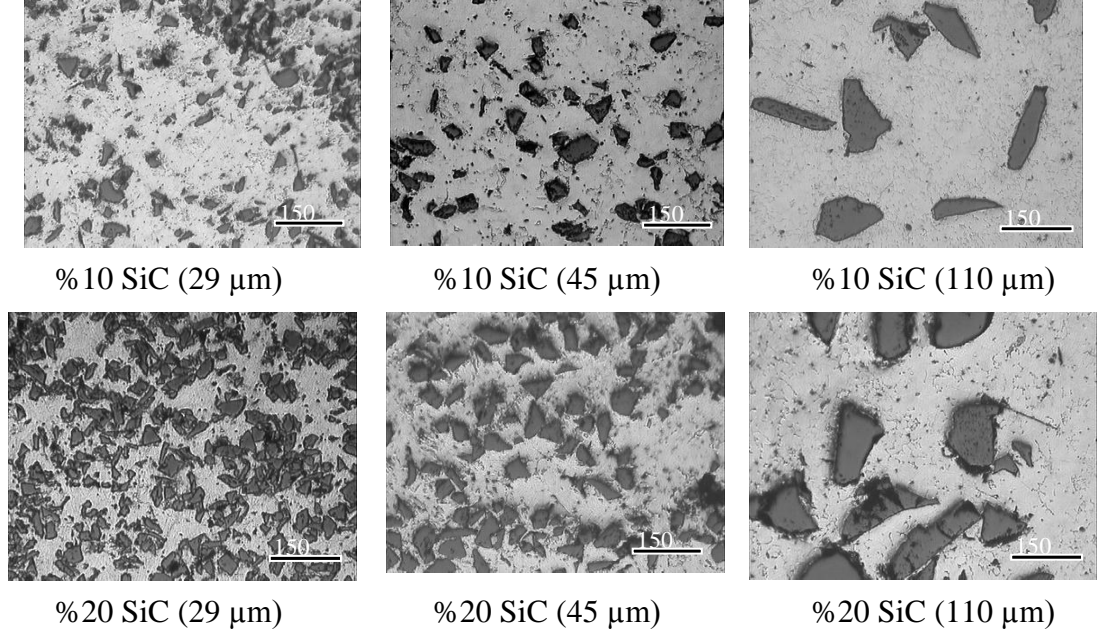
Kıyasöz ve ark. (2014), Silisyum karbür (SiC), alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve bor karbür (B<sub>4</sub>C) seramik takviyeler ile A6063 ve A413 alüminyum alaşımları kullanılarak metal matrisli kompozitler üretmiştir. Kompozitlerin üretimi dereceli hassas döküm yönteminden yararlanarak gerçekleştirilmiştir. Yöntemde, seramik tozlar yüksek oranda gözenekliliğe sahip olacak şekilde ön şekillendirildikten sonra hassas döküm kalıbı içerisinde sıvı metal infiltre ettirilmiştir. Çalışmada elde edilen malzemelerin iç yapıları Şekil 2.9’da verilmiştir.



**Şekil 2.9** Tarama elektron mikroskobu (SEM) mikroyapı görüntüleri (a) A6063-SiC, (b) A413-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c) A6063-SiC+B<sub>4</sub>C melez (Kıyasöz ve ark., 2014).

Sur ve ark. (2005), argon gazı koruyucu atmosferli ergitme fırınında MMK malzeme üretimi yapmak üzere yeni bir karıştırma ünitesi tasarlayıp imalatını yapmıştır. Tasarlanan ünite ile üretilen MMK'larda, matris malzemesi olarak A2014 alüminyum alaşımı, takviye elemanı olarak da 29 µm, 45 µm ve 110 µm

boyutlarında SiC seramik tanecikleri kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen malzemelerin içyapılarına ait görüntülerden bazıları Şekil 2.10'da verilmiştir.



**Şekil 2.10** Üretimleri gerçekleştirilen MMK'ların 100X büyütmede çekilmiş optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları (Sur ve ark., 2005).

### **3. TRİBOLOJİK ÖZELLİKLER**

#### **3.1 Giriş**

Günlük işlerimizin birçok alanında kullandığımız makinaları oluşturan, metal veya metal olmayan makina elemanları, birbirleriyle hareketli veya hareketsiz olarak temas halindedirler. Temasta olan ve birbirlerine göre rölatif hareket yapan iki elemanın temas yüzeyleri arasında hareketi engelleyici özelliğe sahip, şiddeti sınırlı olan sürtünme kuvveti mevcuttur. Bu kuvvet sonucu elemanlarda aşınma meydana gelirken, sistemde de sıcaklık artışına bağlı olarak enerji kaybı ortaya çıkar. Hareket sonucu sürtünerek çalışan bütün makina elemanlarında oluşan aşınma karmaşık bir özelliğe sahiptir.

Günümüzde önemini gittikçe artıran makina aksamlarındaki aşınma, boyut değişikliğine neden olur ve onların hassaslığını bozar. Bu durum üretimdeki kalite ve hassaslığı etkiler. Bu yüzden karmaşık yapıları aşınmaya bir çözüm oluşturmak amacıyla tribolojik sistem fikri ortaya çıkarılmıştır.

Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makina elemanlarının yaklaşık olarak %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Aşınmanın bilinmesi ve önlenmesi ya da en azından azaltılması için gerekli tedbirlerin alınması ile hızla artan nüfusun ihtiyaçlarını, zaten sınırlı olan doğal kaynaklarla ekonomik bir şekilde karşılanması sağlanacaktır (Akkurt, 1990; Sarı ve Kaluç, 1996).

#### **3.2 Triboloji İçin Temel Esaslar**

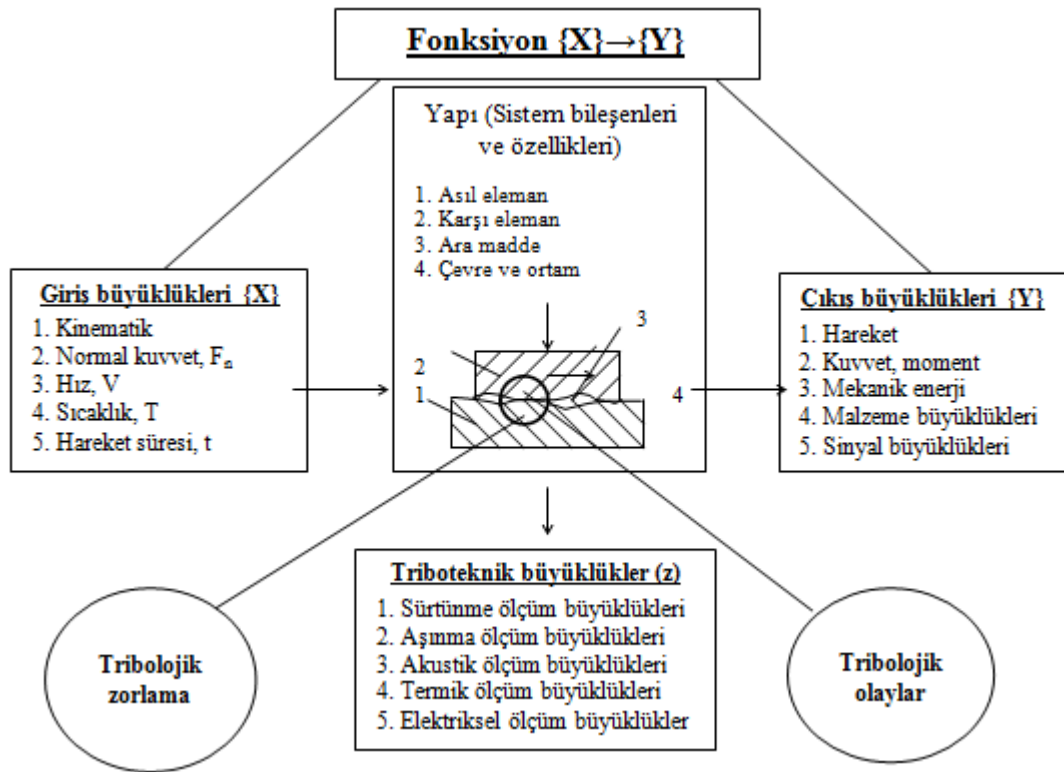
Sürtünme ve aşınma, katı cisim yüzeylerinin rölatif hareketi sonucu olur. Sürtünme, genel olarak birbiri üzerinde temas ederek hareket eden katı cismin hareketini engelleyen kuvvet olarak tarif edilir. Aşınma ise, mekanik olaylar sonucu, küçük parçacıkların kopmasıyla, yüzeyde meydana gelen ve arzu edilmeyen değişimlerdir. Ancak bu tarifler, bugünün bakışı ile biraz değişiklikler göstermektedir. Sürtünme, yalnızca kuvvet ve momentle değil, ayrıca mekanik enerjinin, büyük ölçüde ısı olmak üzere diğer enerji formlarına dönüşmesiyle olur. Bundan dolayı, Fleischer'e (1986) göre sürtünme kavramının, rölatif harekette, hareketin başlamasında ve sona ermesinde, temas eden madde sahasında meydana gelen mekanik enerji kaybı olarak incelenmesi gerekir.



Aşınmanın görünüm formu da, yalnızca parçacıkların kopması değil, aynı zamanda sürtünme işlemi esnasında yüzeyde kaynak olma, yapışma, bağlanma, şekil değiştirme, pekleşme, ergime, adsorbsiyon, absorpsiyon, difüzyon, oksitlenme, yapı dönüşümü ve benzeri değişiklikler olabilir. Bundan dolayı, aşınma teriminin de yeni bir yaklaşımla açıklanması gerekir.

Yeni yaklaşımı Fleischer (1986), şu şekilde formüle etmektedir: Aşınma, sürtünme sonucu meydana gelen, katı cismin yüzeyini teşkil eden malzeme sahasında ve teknolojik olarak bilinen form değiştirme ya da madde değişimi dışında kalan, kalıcı form değişimi ve madde değişimidir.

Sürtünme ve aşınma ile ortaya çıkan tribolojik olaylar, yalnızca iştirak eden malzemeler ve onların özelliklerine değil, tüm madde çiftlerinin karşılıklı etkileri ve dıştan etki eden zorlama çiftlerine bağımlı olur. Triboteknik yapı elemanlarını açıklayabilmek ve amaçlanan malzeme seçimini yapabilmek için, çoğu zaman Şekil 3.1'de şematik olarak gösterildiği gibi, sistem analizine gidilir. Tribosistemin yapısı, ana cisim, karşı cisim, ara madde ve çevre ortamı elemanlarından meydana gelir.



Şekil 3.1 Tribosistemin yapısı (Czichos ve Habig, 1992).

Triboişlem esnasında çeşitli değişken etkiler meydana gelebilir ve malzeme çiftinin yüzey özelliklerinde önemli değişimler olabilir. Dıştan etki eden yük, hız, hareket tarzı ve çalışma, yol, zaman ve sıcaklık temel büyüklükler (kollektif zorlanma) tribosistemin yapısı üzerinde arzu edilen yararlı büyüklüklere de dönüştürülebilir. Bu duruma örnek olarak hareket ve dönme momentinin taşındığı kaymalı taşıyıcılar, burçlar, yataklar, malzeme şekillendiren çekme silindirleri ya da hareketi durduran frenler söylenebilir. Tüm bu olaylarda, sürtünme ve aşınmanın sebep olduğu kayıp büyüklükler görülür ve tribosistem, teknik fonksiyona uygun olarak düzenlenebilir (Topbaş, 1993; Dowson, 1979).

### 3.3 Sürtünme

Sürtünme, bir katı cismin kendisi ile temas eden başka bir katı cismin bağıl hareketine veya hareket ihtimaline karşı gösterdiği dirençtir. Birbiriyle temasta olan yüzeyler arasındaki sürtünme hareketi kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin bileşimi şeklindedir. Sürtünme genelde kuvvete ve enerjiye bağlı ölçü büyüklükleri ile tanımlanır. Bu büyüklükler şunlardır (Czichos ve Habig, 1992):

- Sürtünme Kuvveti ( $F_R$ ): Bu kuvvet sürtünmeden dolayı bir rölatif harekete karşı mekanik direnç olarak meydana gelir ve hareket yönüne zıttır. İki şekli vardır ve bunların arasında belli bir farkın gözetilmesi gerekir.

$F_{RS}$  → Statik sürtünme (rölatif hareket olmadan)

$F_{RD}$  → Dinamik sürtünme (rölatif hareket varken)

- Sürtünme Momenti ( $M_R$ ): Sürtünmeden dolayı dönen rölatif harekete karşı direnç olarak ortaya çıkar.
- Sürtünme Katsayısı ( $\mu$ ): Sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır. Normal kuvvet  $F_N$  ile gösterilirse denklem (3.1) elde edilir.

$$\mu = F_R / F_N \quad [3.1]$$

- Sürtünme İşisi ( $A_R$ ): Sürtünme altında bir hareket olayının meydana getirdiği işidir.
- Sürtünme Gücü ( $P_R$ ): Sürtünme altındaki hareket ile harcanan güçtür.
- Sürtünme Açısı ( $\rho$ ): Normal kuvvet ile sürtünme kuvvetinin oluşturduğu bileşkenin doğrultusu ile normal kuvvetin doğrultusu arasındaki açıdır.

$$\rho = \arctan(\mu) \text{ veya } \mu = \tan(\rho) \quad [3.2]$$

Bunun dışında bir de statik sürtünme açısı vardır. Statik sürtünme açısı kayma olayının başlama anından önceki sürtünme açısıdır. (3.2) bağıntısına ‘sıfır’ indisi eklenerek tanımlanır ( $\rho_0 = \arctan \mu_0$ ).

Sürtünme ölçü büyüklüğü tek bir maddenin veya malzemenin özelliği olarak değil, bilakis malzeme çiftiyle, yani genelde triboloji ile ilgili sistemle belirlenir. Bu da basitleştirilmiş olarak;

$$\text{Sürtünme Ölçü Büyüklüğü} = f \text{ (Sistemin yapısı, Zorlama bileşenleri)}$$

şeklinde yazılır. Sistem yapısında, sürtünmeye doğrudan iştirak eden cisimler ve malzemeler ile onların özellikleri yer alır. Birleşik zorlama denilince kinematik, normal kuvvet, hız, sıcaklık ve zorlama süresi anlaşılır. Sürtünmenin karmaşıklığından dolayı, sürtünme büyüklüklerini genelde teorik olarak hesaplamak mümkün değildir (Weck, 1991).

### 3.3.1 Sürtünme kanunları

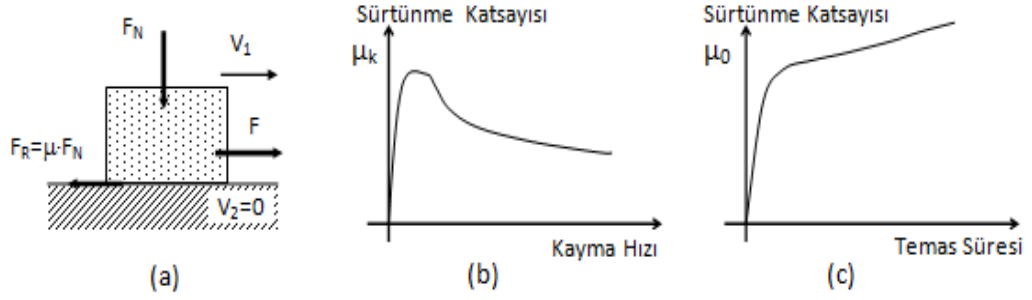
Sürtünme kuvvetinin ilk özelliği; sürtünme kuvveti cismi harekete zorlayan kuvvetten küçükse hareket oluşur. Sonuç olarak ortaya çıkan sürtünme kuvveti uygulanan kuvvete eşit fakat zıt yönlüyse hareket olmaz. Parçayı harekete zorlayan kuvvet sürtünme kuvvetinden büyük olduğu zaman cisim bu kuvvet doğrultusunda hareket eder ve sürtünme kuvveti bu kuvvetten küçük olup yüzeye paraleldir. Sürtünme kuvvetinin ikinci özelliği ise yatay hareket oluştuğunda sürtünme kuvveti yüzeyin bağıl hızına zıt yönde ortaya çıkar.

Sürtünme kanunları sürtünme kuvvetinin büyüklüğü ile ilgilidir. Birbirine temasta olan katı cisimler için klasik sürtünme kanunlarını Amontus (I.ve II. Yasa,1699) ve Coulomb (III. Yasa, 1781) ortaya koymuşlardır. Bunlar, kuru sürtünme kanunları olarak bilinir. Bu kanunların doğruluk kontrolü mikroskobik ölçekte rahatlıkla görülebilir. Bu üç yasa şu şekildedir:

- Sürtünme kuvveti normal kuvvet ile orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti sürtünen yüzeylerden bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti küçük kayma hızları için kayma hızından bağımsızdır (Akkurt, 1990).

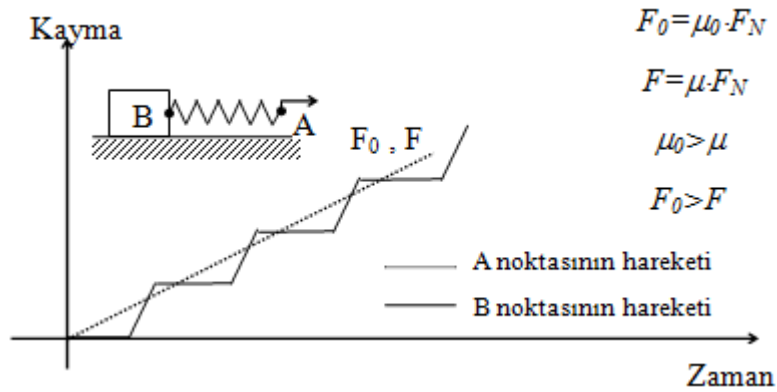
### 3.3.2 Sürtünme katsayısı

Sürtünme katsayısının kayma mesafesi ve süresine, sertliğe, temas yüzeyinin ortalama tane büyüklüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu çeşitli deneylerle gösterilmiştir. Bu katsayı, artan kayma mesafesi ve süresi, yüzey tabakasının artan tane büyüklüğü ile belirli bir değere kadar artar ve daha sonra yaklaşık bir değerde devam eder. Genellikle statik sürtünme katsayısı  $\mu_0$ , kinematik sürtünme katsayısı  $\mu'$  den daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça kinematik sürtünme katsayısı az da olsa azalır. Şekil 3.2-b'de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Buna karşılık normal kayma hızlarında, hıza göre sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan sürtünme katsayısı sabit sayılabilir (Akkurt, 1990).



Şekil 3.2 Kuru sürtünme modeli ve sürtünme katsayısı (Koç, 2004).

Hareketin başlangıcında ilk harekete geçiş anında bir kay-dur olayı gerçekleşir. Bu olay statik sürtünmenin, kinematik sürtünmeden daha büyük olması ve sürtünme halinde bulunan elemanı harekete geçiren ara elemanının, şekil değiştirme kabiliyetine sahip olmasına bağlıdır. Ara eleman bir yay olarak düşünülürse, olayı incelemek için Şekil 3.3'deki model oluşturulabilir.



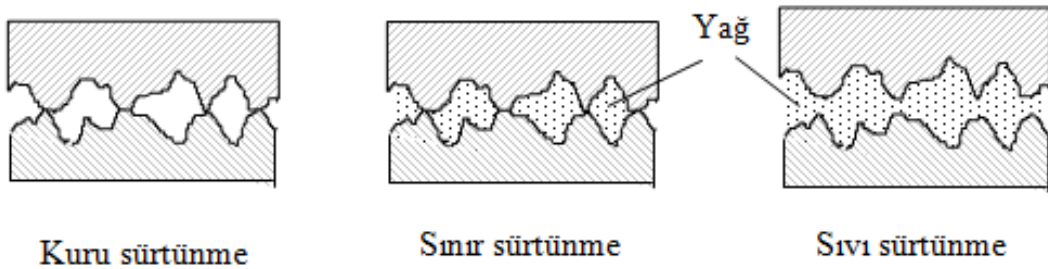
Şekil 3.3 Kay-dur (Stick-Slip) olayına ait model (Akkurt, 1990).

Hareketsiz haldeki B elemanını harekete geçirmek için yayı,  $F_0 = \mu_0 \cdot F_N$  değerinde bir kuvvetle çekmek gerekir. Eleman harekete geçtikten sonra çekme kuvveti  $F = \mu \cdot F_N$  olur.  $\mu_0 > \mu$  olduğuna göre  $F_0 > F$ 'dir. Başlangıçta B elemanı, çekme kuvveti  $F_0$  değerine ulaşmadan, yani sürtünme kuvveti yenilmeden harekete geçmez. Bu süre içerisinde çekme elemanlarında (yayda) şekil değiştirme meydana gelir. Verilen enerji şekil değiştirme enerjisine dönüştürülür. Hareket başladığında, sürtünme aniden azalır ve çekme elemanında biriken şekil değiştirme enerjisi B elemanını bir sıçrama şeklinde ileri kaydırır. Elemanın ataletinden dolayı, bu enerji çabuk tükenir ve eleman durur. Olaylar tekrarlanır ve B elemanı kay-dur şeklinde hareket eder. Sistemin A noktası doğrusal bir yol alırken, B elemanı kademeli bir yol çizer.

### 3.3.3 Sürtünme çeşitleri

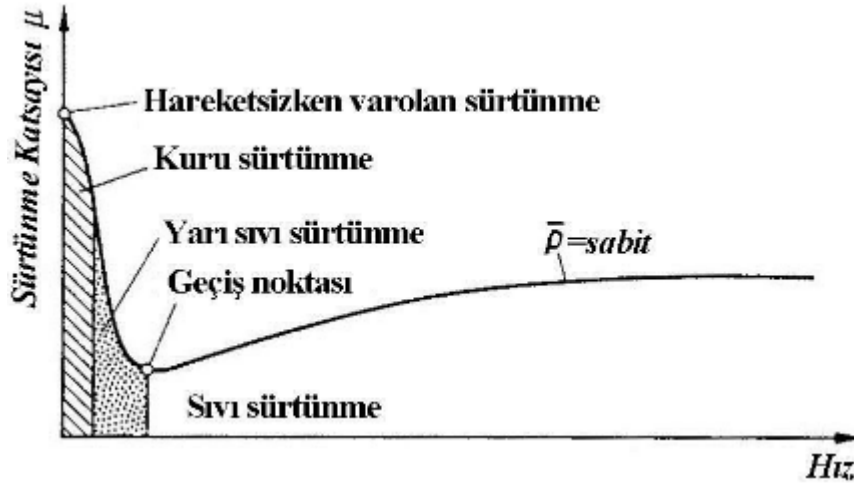
Triboloji çerçevesinde temas çiftinin durumuna göre sürtünme beş grupta toplanabilir. Sürtünme çeşitlerinden bir kısmı Şekil 3.4'de verilmiştir.

- Katı cisim (kuru) sürtünmesi: Katı maddenin doğrudan doğruya temastaki sürtünmesidir.
- Sınır sürtünme: Sürtünme çiftinin yüzeyi moleküler boyutta, örneğin bir yağlama maddesinin ince bir tabaka şeklinde malzeme yüzeyine yapışması durumundaki sürtünmedir.
- Sıvı Sürtünmesi: Sürtünme çiftini boşluksuz ayıran bir sıvı film içinde oluşan sürtünmedir. Bu sıvı film, hidrostatik veya hidrodinamik olarak meydana gelir.
- Gaz Sürtünmesi: Sıvı sürtünmesinde olduğu gibidir. Ancak burada çift arasında gaz filmi meydana gelir. Bu gaz filmi ise, aerodinamik ve aerostatik olarak iki şekilde bulunur.
- Karışık Sürtünme: Katı cisim sürtünmesinin sıvı veya gaz sürtünmesi ile bir arada oluşmasına denir.



Şekil 3.4 Sürtünme çeşitleri (Akkurt, 1990).

İki katı cisim arasındaki izafi harekete göre, sürtünme hallerinden birinden diğerine geçiş ve sürtünme katsayısının kalitatif değişimi Şekil 3.5’de verilen Stribeck Eğrisinden görülebilir (Babalık ve Çavdar, 2013).



Şekil 3.5 Sürtünme çeşitleri (Babalık ve Çavdar, 2013).

Fiziksel anlamda kuru sürtünme sadece vakum ortamda mevcuttur. Makine tekniğinde sürtünme, sürtünmenin meydana geldiği çevre ve çevreyi oluşturan elemanların (oksit, yağ, su buharı, pislik vb.) etkisindedir. Atmosferin etkisindeki sürtünme yüzeylerinde absorbe edilmiş gazlar, bu gazların oluşturduğu oksitler, yağlar ve pislikler gibi kimyasal bileşikler vardır. Bunlar sürtünmeyi kısmen azaltır ve bir yağlayıcı gibi rol oynarlar. Bu yüzey tabakaları çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle vakumlu bir ortamda temizlendiğinde metalsel temiz bir yüzey elde edilir. Bu tip yüzeylerde metal-metal teması sağlamak mümkün olur ve böylece kuru sürtünme meydana gelir.

Kuru sürtünmede, yüzey tabakalarının hareketi sonucunda üst tabaka metal yüzeyinin yırtılmasıyla metal-metal teması ortaya çıkmaktadır. Metalik temas olan noktalarda ise soğuk kaynaklaşma olayı rahatlıkla meydana gelmektedir. Bu kaynaklaşma genelde tam temas eden yüzeylerdeki çeşitli kimyasal bileşikleri içeren tabakalar arasında meydana gelir. Sürtünme sırasında bu kaynama noktaları, ya hareketi engeller ya da yüzeylerden parçacıklar kopartarak yırtılmalara neden olurlar.

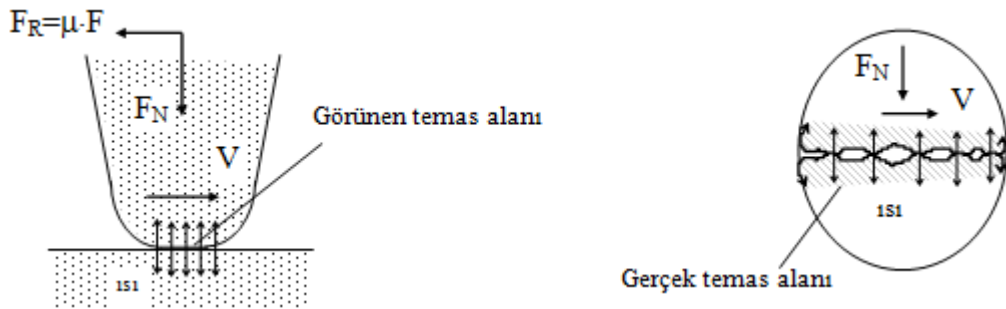
Bu duruma göre sürtünme; metal kaynak bağları ile çeşitli kimyasal bileşikleri içeren tabakalar arasındaki bağların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti ise hem kaynak bağlarının hem de kimyevi bileşiklerin meydana getirdiği tabakaların

arasındaki bağları koparan kuvvettir. O halde sürtünme kuvveti temas yüzeylerindeki düzensizlikler ve moleküler çekme kuvvetleri nedeni ile temas eden yüzeylere etkiyen çok sayıdaki kuvvetlerin bileşkesidir (Hutchings, 1992).

### 3.4 Kuru Sürtünme

Sürtünen iki cisimde aşınmanın meydana geldiği temas alanı önemlidir. Çünkü tribolojik olayların meydana geldiği yer burasıdır. Temas alanını, gerçek ve görünen temas alanı olarak ikiye ayırmak mümkündür. Gerçek temas alanı görünen temas alanından küçüktür (Şekil 3.6). En hassas işleme yöntemleriyle de olsa işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiç bir zaman düz değildir. Çünkü imalat tekniğinde tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi malzemeyi oluşturan atomların yapısından dolayı imkânsızdır.

Yüzeyi elde etmede kullanılan kesici ve yontucu araçlar ne kadar itina ile hazırlanırsa hazırlansın, işlem neticesinde elde edilen yüzey üzerinde mutlaka birkaç mikron yüksekliğinde mikroskobik pürüzler bulunur. Bu yüzeylerin temas etmesiyle karşılıklı pürüzler etkileşirler. İlk temas birkaç pürüz tepeleri arasında olur. Pürüz tepeleri arasındaki girintilerde temas söz konusu değildir. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır.



Şekil 3.6 Tipik bir kayma çiftindeki büyüklükler (Akkurt, 1990).

Yüklemenin şekli ve yük, temas alanının büyüklüğünü etkiler. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar ve ezilirler. Bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yüklemenin devam etmesi ile de pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görünen temas alanına yaklaşır. Sürtünme deneylerindeki pek çok faktörden biri olan gerçek temas alanı, uygulanan yük ile orantılı olup malzemenin boyutundan bağımsızdır. Temas eden pürüzsüz yüzeylerde meydana

gelen adhezyon yapışması soğuk metal kaynağına benzer bir işlemdir (Akkurt, 1990; Czichos ve Habig, 1992).

### **3.5 Sürtünmenin Aşınma Üzerine Etkileri ve Aşınma**

Cisimlerin yüzeylerinin sürtünmesiyle bir cismin yüzeyinden çok küçük parçaların kopup ayrılmasına aşınma denir. Olayın başlıca nedenlerinin; yüzey pürüzlerinin sürtünme sırasında kırılmaları ve sürtünen cisimlerin yer yer birbirlerine atomsal mertebede yaklaşp karşılıklı bağlandıktan (soğuk kaynak) sonra küçük bir parçanın kopması suretiyle ayrılabilmeleri olduğu düşünülmektedir.

Aşınma hakkında tam açıklayıcı bir tanım yapmak zor olmasına rağmen kabul edilen birkaç tanım şöyle verilebilir.

- Rölatif hareket ve yüzey basıncı altında kalan iki cismin teması sonucu ortaya çıkan mekanik enerjinin etkisi sonucunda, malzeme yüzeyinden parçacıkların kopması ile oluşan malzeme yıpranmasıdır.
- Mekanik etkenler ile cisimlerin yüzeyinde zamanla oluşan malzeme kaybıdır.
- Katı cismin yüzey bölgesinden tribolojik zorlamalar sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybıdır.
- Dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki ve kimyevi değişimlerin sonucundaki yıpranmadır.

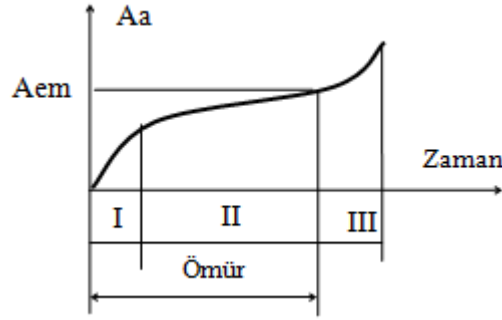
Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için şu şartların mevcut olması gerekir.

- Mekanik bir etken olması,
- Sürtünmenin (bağlı hareketin) olması,
- Yavaş ve devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İsteğimiz dışında oluşmasıdır.

Aşınma, malzeme ya da o malzemenin yüzey özelliği değildir. Aksine bir sistem özelliğidir. Çeşitli makine elemanlarının, mühendislik malzemelerinin kullanma ömürlerine büyük oranda etki eden aşınma giderilememekte ve birbiriyle sürtünerek çalışan makine elemanlarının temas yüzeyleri zamanla aşınarak değişikliğe uğramaktadır. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın sürekli incelenmesi gerekir (Blau, 1997; Hutchings, 1992; Kragelskii, 1965).



Aşınma pratikte; zaman ile gelişen aşınma ve aniden meydana gelen aşınma olarak ikiye ayrılır. Zamanla gelişen aşınma, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi üç safhada meydana gelir. Birinci safha (I) parçaların birbirine alıştığı rodaj isimli aşamadır. Bu safhada parçaların ilk çalışmaları sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu aşınma daha sonraki aşınmayı büyük ölçüde etkiler. İkinci safha (II) aşınmanın çalışma sırasında temas noktalarında meydana gelmesidir. Üçüncü safha (III) ise, artan aşınma hızı ile şiddetli aşınmanın başlamasıdır.



**Şekil 3.7** Aşınma zaman bağıntısı (Akkurt, 1990).

Aniden meydana gelen aşınmada ise, parçaların yüzeyleri aniden bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir ve çalışamaz duruma gelir. Genellikle eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersizliğinden meydana gelir.

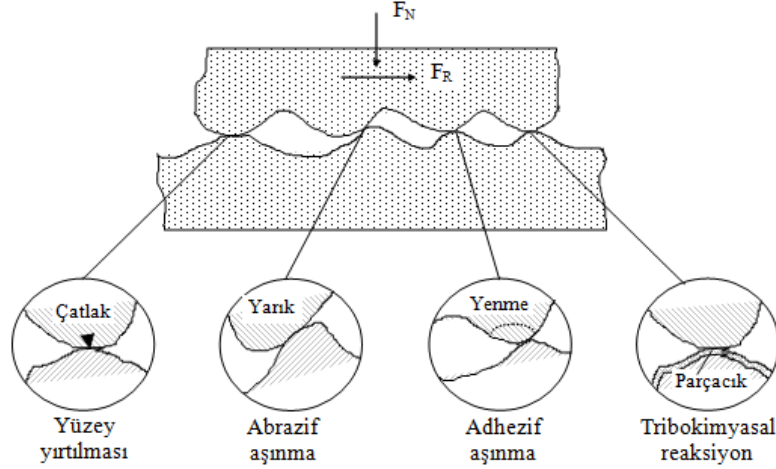
### 3.6 Aşınma Çeşitleri

Malzemelerin aşınması üzerine yapılan araştırmalar sonucu, aşınma çok farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Aşınmanın çeşitlerini şöylece sıralamak mümkündür (Hutchings, 1992; Blau, 1997; Kragelskii, 1965; Dowson, 1979):

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Korozif aşınma
- Yorulma aşınması
- Tabaka aşınması
- Yenme aşınması
- Erozyon aşınması
- Kavitasyon aşınması
- Erozyonlu kavitasyon aşınması
- Püskürtme aşınması

- Kimyasal aşınma

Sık karşılaşılan aşınma çeşitlerinin bir kısmı şematik olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8** Bazı aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Czichos ve Habig, 1992).

- Adhezif aşınma: Özellikle kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhezif çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, temasta olan çok küçük pürüz tepelerine, metal ağırlığı veya bir kuvvetten dolayı çok yüksek değerlerde bir basınç etkir. Bu basıncın değeri temas noktalarındaki pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyon meydana gelerek, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaşmasına neden olur (Onaran, 1985). Adhezif aşınma ile ilgili deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir (Akkurt, 1986):
  - Adhezif aşınma, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.
  - Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hız ve yüklemelerde görülen bir aşınma şeklidir.
  - Adhezif aşınma, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmemektedir.
  - Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür. Çünkü, temiz yüzeylerde olay daha küçük hız ve yüklemelerde cereyan eder.

- Yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adhesyon aşınmasını önlemektedir.
  - Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise, kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemelerde olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.
  - Kalay (Sn), Selenyum (Se), Arsenik (As) ve Tellür (Te) gibi metallerde adhezyon aşınması görülmemiştir.
  - Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abrazyon aşınmayı meydana getirecek koşullar bulunduğu takdirde, adhezif aşınma oluşmaz. Bu nedenle adhezif aşınma, yüzeyler arasında abrazyon bir etkenin bulunmaması halinde oluşan aşınma türü olarak ifade edilmektedir.
- Abrazyon aşınma: Sert ve keskin köşeli mineral tanelerinin, metal yüzeyini mikroskobik bölgede çizerek talaş kaldırması ve malzeme üst yüzeyinin altındaki bir derinlikte değişiklik yapmasına abrazyon aşınma denir. Bu aşınma farklı kristalografik yapıya sahip iki cisim arasında meydana gelir. Eğer küçük ve sert parçacıklar bir cisimde sürtünmenin etkisi ile çizilmeler oluşturuyorsa (mesela; mineral-metal çiftinde aşınma mineralin etkisi ile oluşuyorsa) veya kayma hareketi esnasında hareketin etkisi ve uygulanan kuvvet ile sert cisim yüzeyi kendine ait olan pürüzlerin tepeleri ile yumuşak cismin yüzeyinden ufak parçacıkları (mikro talaşları) kesip çıkarıyorsa, abrazyon aşınma söz konusudur (Pigors, 1979). Abrazyon aşınmayı önlemek için yüzeyler sertleştirilmeli, dışarıdan sert maddelerin yüzeyler arasına girmesi iyi bir sızdırmazlık tertibatı ile önlenmeli, makineler ve sistemler talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir (Akkurt, 1986).
  - Korozif aşınma: Temas yüzeylerinde oluşan mekanik yıpranmaların yanı sıra kimyasal ve elektrokimyasal tahribatların oluşmasına korozyon denir. Metal veya metal alaşımlarının, çevreleri ile (katı, sıvı ve gaz ortamlar) kimyasal, elektrokimyasal veya metalurjik ilişkilerden dolayı, yüzeylerinde yapısı farklı tabakalar oluşur. Bu tabakanın sürtünme hareketi ile parçalanarak taşınması sonucu meydana gelen hasara korozif aşınma denir (Lülsdorf, 1979; Kragelskii, 1965).

- Tabaka ve yenme aşınması: Daha önce belirtildiği gibi, yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamlarda çalışan, makina elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek, ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılırlar ve aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder. Bu olaydaki tabaka aşınmasına, oksidasyon aşınması veya sürtünme oksidasyonu denir (Gürleyik, 1986; Kragelskii, 1965).
- Yorulma Aşınması: Makine parçalarında tekrarlanan yüklerden veya düşük genlikli titreşimlerden dolayı zamanla yorulma meydana gelir. Özellikle yüzeylerin sürekli ve değişken yüklere maruz kalmaları, yüzeyin hemen altında yorulma çatlakları oluşmasına neden olur. Bu mikro çatlaklar zamanla ilerleyerek, malzemenin yüzeyinden pulcuk şeklinde parçaların kopmasına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya yorulma aşınması denir (Halling, 1975; Hutchings, 1992; Blau, 1997).
- Difüzyon Aşınması: Birbiriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasında sürtünmeden dolayı bir sıcaklık yükselmesi ile birlikte temas yüzeyinde bulunan atomların kristal kafes içinde yoğunluğu yüksek olan bölgelerden düşük olan bölgelere doğru hareket ederek difüzyon meydana gelir. Yapılan araştırmalarda pullanmayı başlatan çatlakların bazen yüzeyde bazen de yüzeyin altında kendini gösterdiği tespit edilmiştir (Halling, 1975; Hutchings, 1992; Blau, 1997).
- Tribo-oksidasyon Aşınması: Temas yüzeylerinde en az birinin çalışma ortamında korozyona uğraması ve izafi hareket sebebiyle meydana gelen korozyon tabakasının ve bunun devamlı olan tekrarı ile meydana gelen aşınmadır. Malzemenin izafi hareketi sırasında statik ve dinamik sürtünme kuvvetlerinin farklılık göstermesi sebebiyle düşük kayma hızlarında yüzeyler arasında titreşimler meydana gelir. Bu titreşimler yüzeyler arasında bir oksit filminin oluşmasına yol açar. Bu olay tribolojik zorlanma esnasında meydana gelir. Sürtünen elemanlar arasında oluşan oksit tabakası ana malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde etkiler. Meydana gelen oksit filmi adhesiv

aşınmaya karşı direncini artırmasına rağmen, izafi hareketin devam etmesiyle birlikte, parçalanan oksit filmi malzemeler arasında aşındırıcı tane oluşturarak abrasif aşınmayı hızlandırır (Halling, 1975; Hutchings, 1992; Blau, 1997).

- Erozyon ve Kavitasyon Aşınması: Erozyon, ortam ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozunma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz ve sıvı ortamında taşınan abrasif tanelerinin yüzeye belli bir açıda çarpmasıyla oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana getirerek yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bunun sonucu yüzey aşınır. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Aşındırıcı parçaların hızı, şekli, büyüklüğü, sertliği ve çarpma açısının değeri erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerdir.

Kavitasyon aşınması, izafi hareket halinde bulunan sıvı ile katı bir cisim arasında meydana gelir. Sıvı içerisinde bulunan zerreciklerin, basıncı buharlaşma basıncından daha küçük bir ortamda geçerken, zerreciklerin büyümesi ve patlamasıyla oluşan basınç dalgalarının katı cisim yüzeyine çarpması sonucu kavitasyon meydana gelir (Halling, 1975; Hutchings, 1992; Blau, 1997).

### 3.7 Aşınmaya etki eden faktörler

Yapılan çeşitli çalışmalar ile aşınmaya etki eden faktörler belirlenmiş, ancak aralarındaki ilişki tam olarak tespit edilememiştir. Yapılan birçok aşınma deneylerinde gözlemlenen başlıca deney değişkenleri şunlardır.

- Malzemenin cinsi ve kimyasal bileşimi
- Malzemenin mikro yapısı
- Malzemenin kristal yapısı
- Malzemenin sertliği
- Isıl işlem
- Kayma çifti
- Malzeme çiftlerinin pürüzlülükleri
- Yük ve hız
- Sıcaklık
- Çalışma süresi veya kayma süresi

Şimdiye dek aşınma üzerine yapılan çalışmalarda genel itibariyle şu esaslar gözlemlenmiştir (Dowson, 1979).

- Farklı yüzey basıncı ve çalışma hızlarında yürütülen deneyler neticesinde yüzey basıncının artması ile aşınmanın hızlandığı aynı yükte çalışma hızının artması ile aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Basınç artışına paralel olarak çalışma hızının da artması aşınmayı hızlandırmaktadır. Ayrıca sürtünmeyi artıran yük, aşınmanın da artmasına neden olmaktadır.
- Sürtünme enerjisinin ısıya dönüşmesi ile gerçek temas alanının sıcaklığı artmakta, artan sıcaklığın etkisi ile sürtünen yüzeylerde bölgesel ergimeler oluşmakta ve böylece yüzeylerden küçük parçacıklar koparak aşınmayı hızlandırmaktadır. Sürtünme ve aşınma sonucu meydana gelen yapı dönüşümleri ise ısıl çatlamalara ve sürtünme esnasında parçacıkların koparak aşınmanın artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle katı cisimlerin aşınmasında sürtünen yüzeylerin sıcaklığı çok önemlidir.
- Metal-metal sürtünme aşınmasında aşınma miktarı, zamana veya kayma yoluna bağlı olarak belirtilmektedir. Aşınma miktarı parçanın ağırlık kaybı (gravimetrik aşınma) veya sürtünme yüzeyinin yükseklik kaybı (volumetrik aşınma) olarak ifade edilmektedir (Selçuk, 1994).

Malzemelerin aşınma davranışlarının karşılaştırılması, deney öncesi ve sonrası numunelerin hassas olarak ağırlıklarının ölçümlerinin farkıyla belirlenen ağırlık kaybından, (3.3) ve (3.4)'deki bağıntılar kullanılarak yapılabilir (Çelik ve ark., 1993).

$$W_a = \frac{\Delta G}{d \cdot F_N \cdot s} \quad [3.3]$$

$$W_r = \frac{1}{W_a} \quad [3.4]$$

$W_a$ : Aşınma oranı ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )

$W_r$ : Aşınma direnci ( $\text{Nm}/\text{mm}^3$ )

$\Delta G$ : Ağırlık kaybı (mg)

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

$s$ : Kayma (aşındırma) yolu (m)

Ayrıca adhezif aşınmada, malzemede meydana gelen aşınma hacmi ile zorlama parametreleri arasında, farklı modellerde yapılan deneyler sonucunda denklem (3.5)'deki gibi nicel bir bağıntının olduğu gözlenmiştir (Czichos ve Habig, 1992).

$$W_V = k \cdot \frac{F_N \cdot s}{H} \quad [3.5]$$

$W_V$ : Hacimsel aşınma miktarı ( $\text{mm}^3$ )

k: Archard aşınma katsayısı (etki büyüklüğü ve temas çiftine bağlı)

s: Kayma yolu (m)

H: Sertlik ( $\text{N/mm}^2$ )

Aşınmaya etki eden faktörlerin çok ve çeşitli oluşu ile birlikte sertlik, yüzey pürüzlülüğü, gerilmeler ve kristal eş yönlendirmeleri gibi başlangıç büyüklüklerinin sürtünme ve aşınma işlemleri sırasında da değişerek kendilerini oluşturan diğer faktörleri tekrar değiştirmeleri, bu konudaki her türlü girişimleri ve hesaplamaları çok sınırlı bırakmaktadır (Czichos ve Habig, 1992).

### 3.8 Aşınma Test Yöntemleri

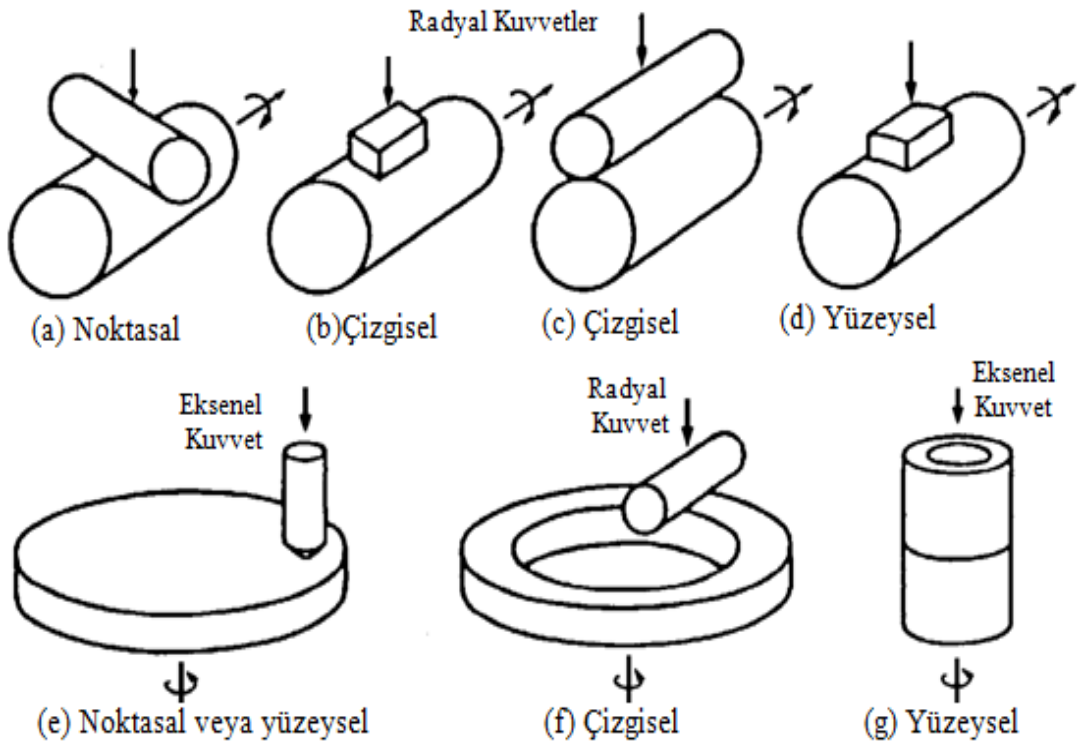
Kuru temaslarda dinamik sürtünme katsayısının, uygulanan yük, yüzey pürüzlülüğü, kayma hızı, sıcaklık ve temas bölgesinin elastik ve plastik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Teorik modellemeler yaparak elde edilen; çalışma şartları ile temas parametrelerinin dinamik sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi üzerinde bazı ilerlemeler olmasına rağmen pratik değerleri elde etmenin en önemli yolu deneysel çalışmalardır.

Tribolojik laboratuvar deneylerinin uygulanabilmesi için çok sayıda ölçü ve deney cihazları (kısaca Tribometri) geliştirilmiştir. Tribometride genellikle basit geometrik deney numuneleri kullanılmaktadır. Çok çeşitli deney veya testler için oluşturulmuş laboratuvar tribometrileri American Society of Lubrication Engineers (ASLE) araştırmaları kapsamında analiz edilmiştir. Yaklaşık 250 adet laboratuvar tribometrisinin ele alındığı bu analiz sonucunda laboratuvar deneylerinde kullanılan deney numunelerinin geometrileri şöyle sınıflandırılmıştır:

- Küre-küre teması (genellikle)
- Çapraz silindir

- Pim-disk (aynı veya zıt yönde hareketli)
- Yüzey-yüzey teması (aynı veya zıt yönde hareketli)
- Diske karşı dönen pim (alın yüzey teması)
- Pime karşı dönen disk (alın yüzey teması)
- Bilezik-bilezik (alın yüzey teması)
- Pime veya bileziğe karşı dönen makara (dış yüzey teması)
- Küp geometrisine karşı dönen makara (dış yüzey teması)
- Makara-makara veya disk-disk (dış yüzey teması)
- Çoklu deney numunesi (dört bilya)

Şekil 3.9'da laboratuvar tribometrisinde sıkça kullanılan basit deney numune temas geometrilerinden bir kısmı gösterilmiştir (Czichos ve Habig, 1992).

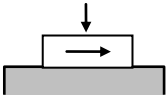
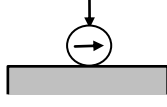



Şekil 3.9 En çok rastlanan temas şekilleri (Czichos ve Habig, 1992).

Çizelge 3.1'de ise temas geometrilerine bağlı olarak hareketin şekli, hareketin seyri, zorlama şartları ve bu şartların uygun bölgeleri tanımlanmıştır (Czichos ve Habig, 1992; Halling, 1975).



**Çizelge 3.1** Tribometrik sistemlerle ilgili bazı veriler (Czichos ve Habig, 1992).

Deney sisteminin yapısı			
Temas geometrisi	benzer (yüzeysel temas) $\longrightarrow$		zıt (çizgisel veya noktasal temas)
Örnek	Pin-Disk Siebel-Kehl	Bilye-Plaka Bilye-Disk	Amsler Dört bilye
Kullanım oranı(%)	35	40	25
Hareket tipi	Kayma Delme (çarpma)	Kayma Dönme-Yuvarlanma Delme (Çarpma)	Dönme-Yuvarlanma (çarpma) (kayma)
Hareket akışı	Sürekli Salınımlı Aralıklı	Sürekli Salınımlı Aralıklı	Sürekli Aralıklı
Yüzey basıncı (N/mm <sup>2</sup> )	$10^{-4} - 4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^3$ Hertz'e göre	$10^{-4} - 5 \cdot 10^3$ Hertz'e göre
Hız (m/sn)	$10^{-4} - 40$	$10^{-5} - 80$	$10^{-1} - 60$
Sıcaklık (°C)	-100 ile 1500		

## 4. MALZEME ve YÖNTEM

### 4.1 Metal Matrisli Kompozit Toz Seçimi

Metal matrisli kompozit (MMK/MMC) üretiminde, matris malzemesi ve takviye elemanı olmak üzere iki temel unsur ortaya çıkmaktadır. Literatür taramalarının değerlendirilmesi tamamlandıktan sonra, MMK yapının elde edilebilmesi için, matris ve takviye malzemelerinin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır.

Matris tozu olarak başlangıçta, günümüz üretim teknolojisinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş olan, toz metalürjisinde sinterleme için kullanılan tozlar incelenmiştir. Daha sonra, fiyat/performans açısından düşük alaşımli tozlar araştırılmıştır. Bu tozlardan, ön alaşımlandırılmış olanları üzerinde yoğun çalışmalar yapıldıktan sonra, düşük alaşımli Distaloy ve Astaloy toz malzemelerden bir tanesiyle çalışmalara başlanmaya karar verilmiştir.

Astaloy malzemeler atomize olarak elde edilmiş mukavemet ve performans açısından ideal olan alaşımli çelik tozlardır. Cr, Ni, Mo ve Mn gibi alaşım elementlerinin ergime sırasında ana metale katılmasıyla elde edilen homojen bir yapıya sahip olan Astaloy tozlarının mükemmel sertleştirilme özellikleri bulunmaktadır.

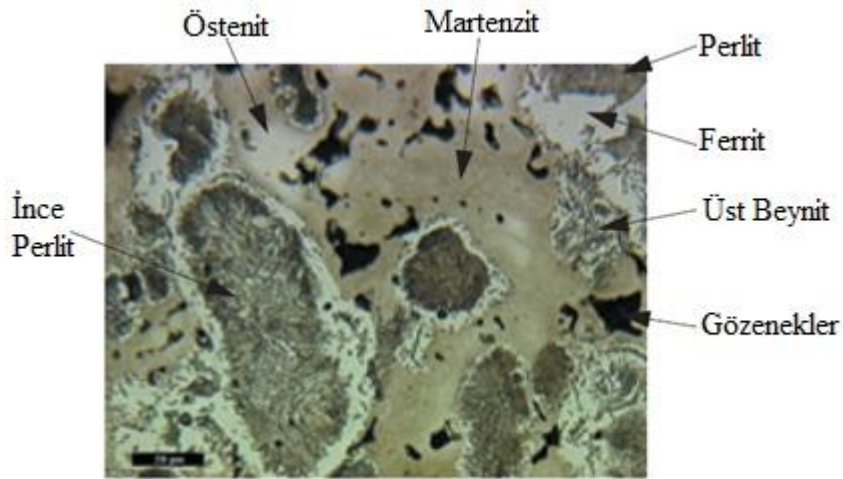
Öte yandan, Distaloy malzemeler mukavemetli hassas parça üretimi için müşteri istekli özelliklere sahip alaşımli tozlardır. Kararlılık ve parça performansını yükseltmek için üretim sürecinde Cu, Ni ve Mo elementleriyle esas toz desteklenmiştir. Esas toz, hem demir tozlarından hem de Astaloy tozlarından seçilebilmektedir. İçerisine katılacak parçacıklar olmaksızın alaşım elementlerinin korunduğu esas toz, yüksek sıkıştırılabilirlik özelliğine sahiptir (Höganas AB, 2013; Çetinkaya, 2005).

Çalışmamıza esas teşkil eden kam üretimi sürecinde, parça ve boyut hassasiyeti son derece önemli olduğundan, mukavemetli hassas parça üretimine yönelik olan Distaloy tipi toz malzeme, matris malzemesi olarak tercih edilmiştir. Distaloy tip toz malzemelere ait kodlamalar ve alaşım element içerikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir (Höganas AB, 2013).

**Çizelge 4.1** Distaloy tozlarının içerikleri (Höganas AB, 2013).

Alaşım Elementleri (%)	DISTALOY Tip Kodları									
	AQ	AB	AE	SA	SE	DC	DH	HP	LH	
Cu		1.5	1.5	1.5	1.5		2.0	2.0	2.0	
Ni	0.5	1.75	4.0	1.75	4.0	2.0		4.0	0.9	
Mo	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	1.5	1.4	0.9	
Mn									0.2	

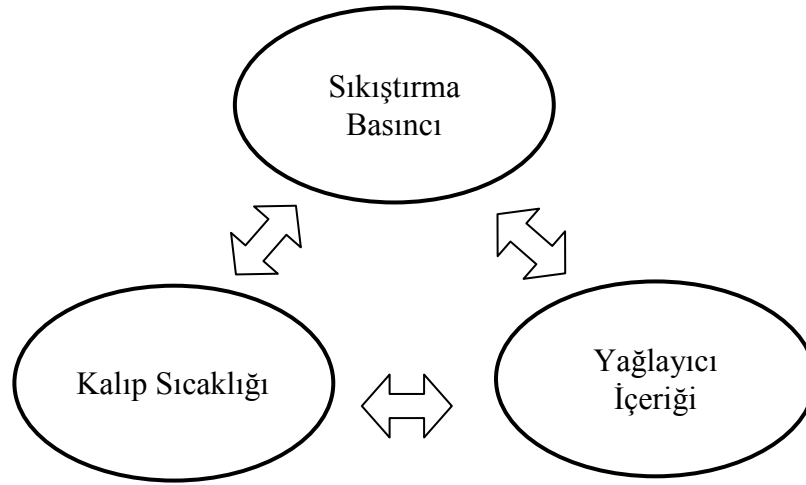
Tüm bu araştırmalar sonucunda, MMK malzemedan kam üretimi için matris malzemesi olarak, toz metalürjisinde sinterlemeye elverişli ön alaşımlandırılmış “DC” tip Distaloy tozu tercih edilmiştir. Burada “DC” kodu, boyutsal kontrolü (Dimensional Control) temsil etmektedir. Zira kamlar için boyut hassasiyeti çok önemli olduğundan ve ham haldeki kamların nihai boyutlarına işlenmesi çok fazla enerji ve zaman istediğinden, nihai boyutlara en yakın kam boyutunu elde etmek son derece önemlidir. Şekil 4.1’de Distaloy tabanlı bir toz malzemenin içerebileceği olası fazların ve mikro yapıların yer aldığı bir resim verilmiştir (Höganas AB, 2015).



**Şekil 4.1** Distaloy tabanlı heterojen bir malzemedeki çok fazlı yapı örneği (Höganas AB, 2015).

Metal kompozit üretiminde hazırlanacak malzeme veya karışımda yer alacak çok önemli bir unsur da yağlayıcılardır. Özellikle yüksek yoğunluk elde etmeye yönelik sıkıştırma işlemlerinin optimizasyonu sırasında; presleme basıncı, yağlayıcı içeriği ve kalıp sıcaklığı üçlüsü devreye girer (Şekil 4.2). Karışım tozlarının düşük teorik (ham) yoğunluklarından dolayı, sıkıştırma işleminde yağlayıcılar önemli rol oynar. Yağlayıcı içeriği, sıkıştırılabilirlik için bir sınırlama faktörü olarak ortaya çıkar. Artan kalıp sıcaklığıyla birlikte, yağlayıcının sıkıştırılabilirlik üzerine olan etkisi de artar. Sonuç olarak ısıtılmış bir kalıpta, özelleştirilmiş ve geliştirilmiş bir yağlayıcı

kullanılarak, hem sıkıştırma basıncını hem de yağlayıcı miktarını düşük tutmak olasıdır (Knutsson ve Larsson, 2013; Yang ve ark., 2014).



**Şekil 4.2** Yağlayıcı ve presleme arasındaki etkileşim faktörleri (Knutsson ve Larsson, 2013).

Piyasada mevcut olan ve toz metalürjisinde kullanılabilir pek çok yağlayıcı vardır. Örneğin, Höganäs firmasının parça üreticilerinin toz kullanımına yönelik olarak hazırladığı, en uygun performans için direkt preslemeye geçişte ideal olan taşıma ve boşaltma özelliği sağlayacak preslemeye hazır esnek yağlayıcı çeşitlerinden tercih ettiğimiz yağlayıcılar şunlardır:

- Premix: Standart presleme işleminde kullanılan toz karışımlarındaki tüm alaşımlar, yağlayıcılar ve katkılarına uygun orta seviye yoğunluk için yağlayıcı ve bağlayıcı
- Intralube®E: Sıcak kalıp kullanımına uygun olarak Premix tip bağlayıcının geliştirilen yağlayıcı özelliğiyle kusursuz parlak parça üretimine yönelik yüksek seviye yoğunluk için geliştirilen yağlayıcı ve bağlayıcı (Höganäs AB, 2013).

Bu iki tip bağlayıcı için Höganäs firmasının katalogunda vermiş olduğu genel özellikler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

MMK kam üretimine yönelik olarak, orta seviyede ve yüksek seviyede yoğunluk yeteneği veren iki farklı bağlayıcılı “Distaloy DC” tozu Höganäs firmasından yağlayıcılarıyla birlikte karıştırılmış şekliyle temin edilerek deneysel çalışmaya başlanmıştır.

**Çizelge 4.2** Höganas firmasının geliştirdiği iki tip bağlayıcının özellikleri (Höganas AB, 2013).

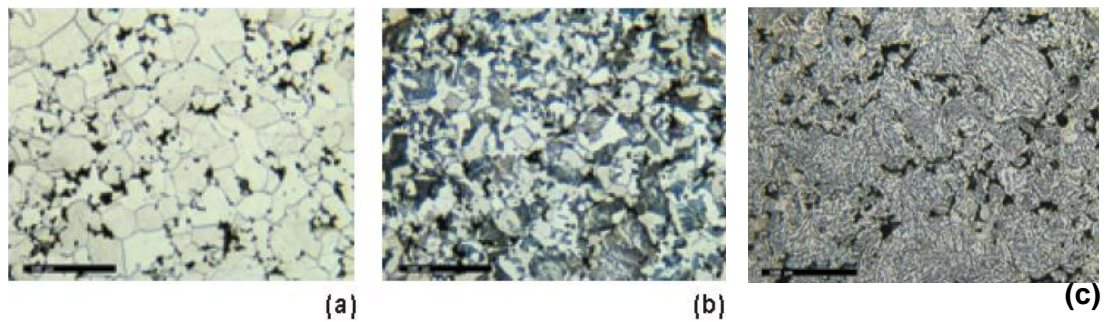
Yağlayıcı	Intralube E mix		Premix	
	Lub E		Amide wax	Kenolube®
Miktar (%)	0.6		0.8	0.6
Yoğunluk	3.0		3.1	3.0
Çinko	Yok		Yok	Var
Kalıp Sıcaklığı	20°C	70°C	20°C	
Ön yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	7.11	7.16	7.05	7.11
Ön dayanım (N/mm <sup>2</sup> )	17	21	12	16
Sökme enerjisi (J/cm <sup>2</sup> )	37	30	40	38
Sökme kuvveti (N/mm <sup>2</sup> )	33	28	33	35

Çalışmada tercih edilen matris tozlarının içeriği ve oluşturulan kısa kodları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

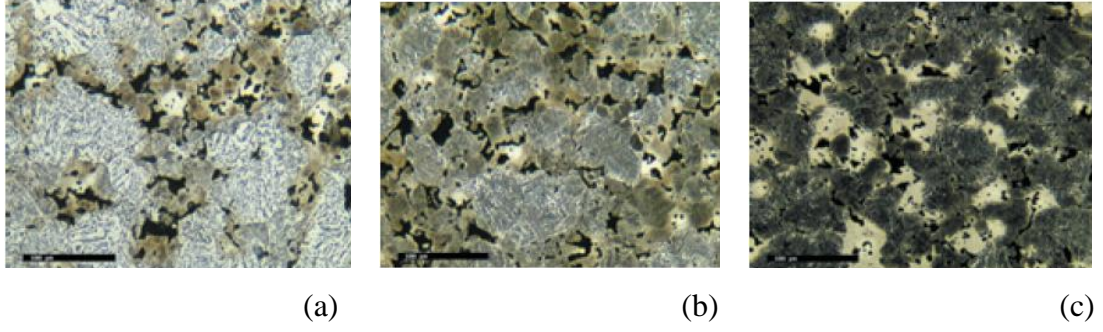
**Çizelge 4.3** MMK çalışması için oluşturulan matris malzemelerinin içerikleri (Höganas AB, 2013).

Matris	İçerik
DW	%98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF4 <sup>(1)</sup> + %0.8 Amide Wax <sup>(2)</sup> bağlayıcı
DE	%98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF4 + %0.6 LubeE <sup>(3)</sup> bağlayıcı
<sup>(1)</sup> karbon verici ve preslemeyi kolaylaştırıcı yağlayıcı etki amacıyla	
<sup>(2)</sup> orta seviyede yoğunluk amaçlı bağlayıcı katkı	
<sup>(3)</sup> yüksek seviyede yoğunluk amaçlı bağlayıcı katkı	

Höganas (2015) firmasının ürettiği tozlarla ilgili olarak yapmış olduğu pek çok ısıl işlem ve metalografik araştırma vardır. Sinterlenmiş Fe, Fe-C ve Fe-Mo-C malzemenin iç yapısına ait bir örnek görüntü Şekil 4.3’de, Distaloy DC tozu için incelenmiş bazı iç yapı resim örnekleri Şekil 4.4’de verilmiştir.



**Şekil 4.3** Sinterlenmiş (a) Fe, (b) Fe-C ve (c) Fe-Mo-C malzemelere ait iç yapı fotoğraf örneği (Höganas AB, 2015).



**Şekil 4.4** 1120 °C’de 30 dakika sinterlenmiş yüzeyi Picral ile dağlanmış (a) % 0.2C, (b) % 0.5C ve (c) % 0.8C içeren Distaloy DC malzemelere ait iç yapı fotoğraf örnekleri (Höganas AB, 2015).

Höganas (2013) firması tarafından, Distaloy DC toz için en uygun sinterleme sıcaklığı olarak 1120 °C ve 30 dakikalık bekletme süresi önerilmektedir. Soğutma hızına bağlı olarak 40 HRc sertlik değerine ulaşılabilmenin mümkün olduğu belirtilmektedir. Ayrıca bu işlemten sonra 200 °C sıcaklıkta 60 dakika bekletilme süresinin ardından yapılan havada soğutma işlemiyle gerçekleştirilen temperleme sonucunda, sertlik değerlerinde bir miktar daha iyileşme olacağı verilen bilgiler arasındadır. Sertleştirilme sıcaklığı 920 °C ve bu sıcaklıkta önerilen bekletme süresi 20 dakika olarak verilmektedir.

#### 4.2 MMK Malzemelerin Ön Deneyleri

Metal matrisli kompozit kam üretimine geçilmeden önce karıştırma ve şekillendirme yöntemlerinin belirlenmesi, istenen mekanik özellikleri sağlayacak toz kompozisyonlarının elde edilmesi için birinci kademe ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde, Çizelge 4.3’de içerikleri verilmiş olan, Fe esaslı (74 µm – 180 mesh) “DW” ve “DE” kodlu matris tozlarıyla B<sub>4</sub>C ve SiC takviye elemanlarının değişik oranlarda karıştırıldığı tozlar kullanılmıştır.

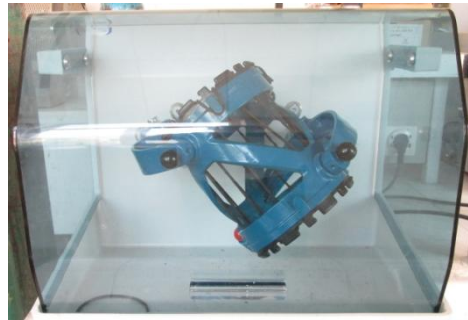
Ön çalışmada kullanılacak MMK numunelerde, takviye elemanı olarak bor karbür (B<sub>4</sub>C) için iki farklı tane boyutu (53 µm - 280 mesh ve 12 µm - 1200 mesh) tercih edilmiştir. İkincil takviye elemanı olarak 37 µm – 500 mesh tane boyutlu silisyum karbür (SiC) tozu seçilmiştir. SiC tozu, bor karbür ile aynı anda toz karışımında kullanılmıştır. SiC takviyesinin seçilmesinin nedeni, literatürde Al ve alaşımlarıyla birlikte kullanılması neticesinde yapıyı daha rijit hale getirip mekanik değerleri artırmasıdır. Böylece her iki tozun bir arada takviye elemanı kullanılmasıyla çok daha üstün mekanik özelliklere sahip MMK üretilebileceği ön görülmüştür.

MMK toz kompozisyonlarının belirlenmesi amacıyla, Fe esaslı “DW” ve “DE” kodlu matris malzemesi ile B<sub>4</sub>C ve SiC seramik tozları, çeşitli oranlarda kullanılarak kombinasyonlar oluşturulup, aşınma deneyleri için numuneler üretilmiştir. Karıştırılmasında ve üretiminde topaklanma, hetorejen yapı, yetersiz yoğunluk, parçalanma gibi problemler yaşanılmayan numunelere ait kompozisyon içerikleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Karıştırma işleminde takviye elemanı olarak kullanılan 12 µm - 1200 mesh tane boyutuna sahip B<sub>4</sub>C ile topaklanma problemleri yaşandığından, bu içerikteki MMK kompozisyonundan vazgeçilmiştir.

**Çizelge 4.4** MMK aşınma numuneleri için hazırlanan toz içerikleri.

Karışım Kodu	Matris Kodu	Takviye Malzemesi
DW1B	DW (74 µm)	%1 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DW3B		%3 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DW5B		%5 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DW10B		%10 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DW3B1Si		%3 B <sub>4</sub> C (53 µm) + %1 SiC (37 µm)
DE1B	DE (74 µm)	%1 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE3B		%3 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE5B		%5 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE10B		%10 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE3B1Si		%3 B <sub>4</sub> C (53 µm) + %1 SiC (37 µm)

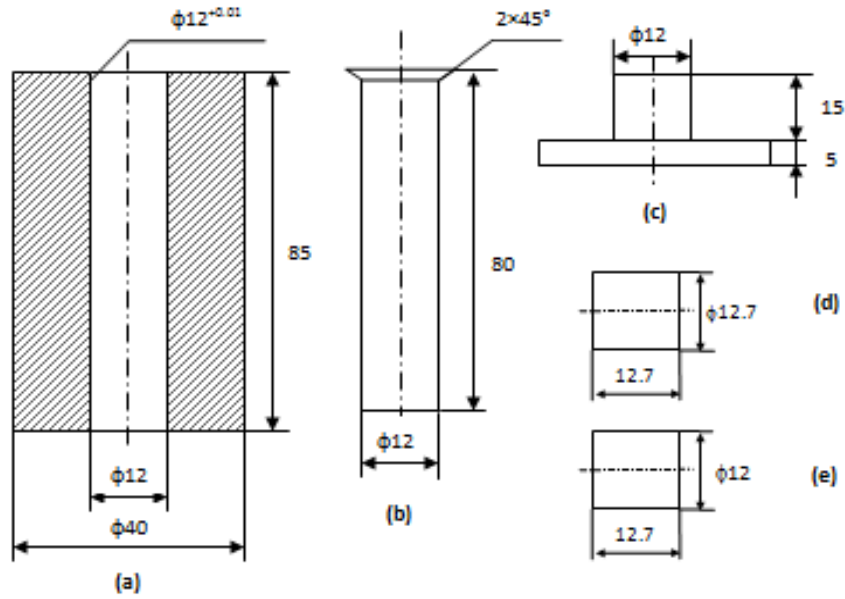
Karıştırma işlemi Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm laboratuvarındaki Turbula marka (Şekil 4.5) eksantrik mekanik karıştırıcıda yapılmıştır.



**Şekil 4.5** Metal tozlarını karıştırma ünitesi.

Ön deney numuneleri hazırlanırken, numune boyutunun belirlenmesinde aşınma testlerinin yapılacağı aşınma cihazında kullanılan numune boyutları ve geometrisi esas alınmıştır. Kalıp tasarımını kolaylaştırmak amacıyla silindirik geometriye sahip numune tercih edilmiştir. Aşınma cihazında kullanılan silindirik numune (Şekil 4.6-d)  $\phi 12.7$  mm x 12.7 mm boyutunda olup (Şekil 4.6-d), teknik ekipman ve malzeme kısıtlamasından ötürü, bu boyutlara en yakın numune boyutu olan  $\phi 12$  mm x 12.7

mm değerlerini (Şekil 4.6-e) sağlayacak şekilde bir kalıp tasarlanmıştır. Kalıp sistemi; (Şekil 4.6) kovan (a), zımba (b) ve alt zimbadan (c) oluşmaktadır. Kalıptan çıkacak numunenin boyutu  $\phi 12$  mm x 12.7 mm (e) olacaktır.



**Şekil 4.6** MMK numune üretiminde kullanılan kalıp a) kovan, b) zımba, c) alt zımba ve numune boyutları d) cihazın önerdiği e) üretilen.

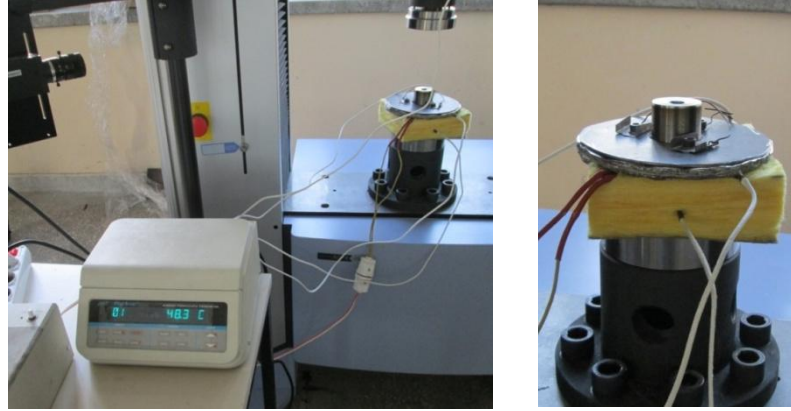
Tozların karıştırma işlemi Şekil 4.5’de görülen mekanik karıştırıcıyla, presleme işlemi ise Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan SHMADZU marka 250 kN’luk universal çekme-basma tezgâhında kontrollü olarak yapılmıştır. Şekil 4.7’de tezgâhın genel görünümü resim olarak verilmiştir.



**Şekil 4.7** MMK üretiminde kullanılan pres.



Şekil 4.8’de ön ısıtma ile kalıpta numune elde edilmesi sırasında kullanılan sistem resimlenmiştir.



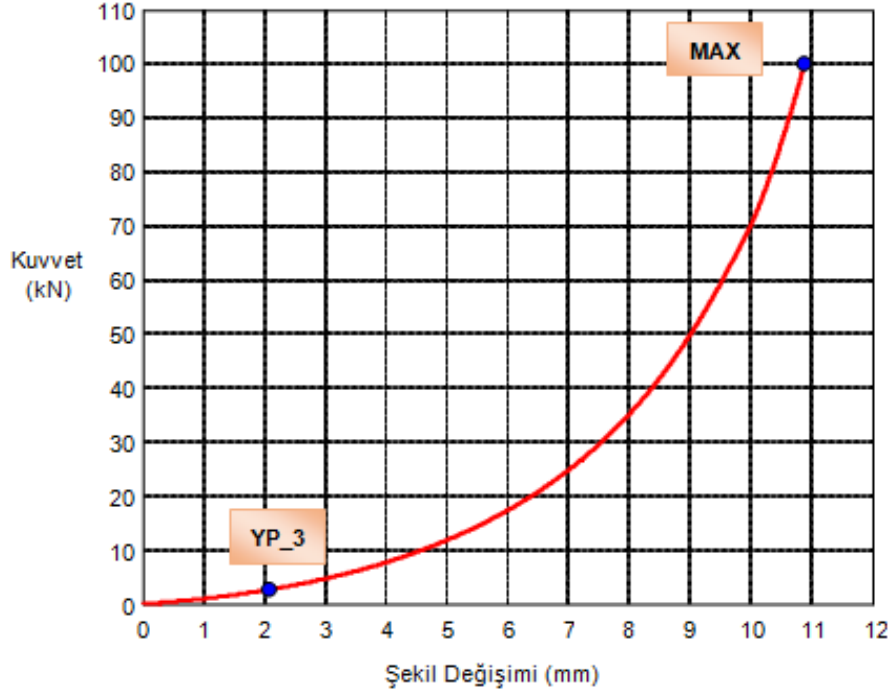
**Şekil 4.8** MMK aşınma numunelerin kalıp ile üretiminde kullanılan sistem.

Aşınma numunelerinin hazırlanması 70-100°C arasında ön ısıtmalı olarak yapılan presleme işleminde yaklaşık 75 kN (660 MPa) değerinde basma kuvveti uygulanıp bu yük altında, yaklaşık 15 dakika süreyle bekletilmek suretiyle yapılmıştır. MMK tozların preslenmesi sırasında deneme maksatlı olarak 50 kN - 100 kN arasında basma yükleri uygulanmıştır. Üretilen MMK aşınma numuneleri ve kalıba ait fotoğraflar Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



**Şekil 4.9** Üretilen MMK aşınma numuneleri ve kalıp parçalarının fotoğrafı.

Presleme sırasında çıkılan maksimum yükleme değeri olan 100 kN basma yükü için elde edilen kuvvet-Şekil değişimi grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir (YP\_3: Akma değeri, MAX: Maksimum basınc kuvveti).



**Şekil 4.10** AŞınma numunelerinin preslenmesine ait Kuvvet-Şekil değişimini gösteren grafik rneği.

MMK toz malzemedен preslenen aşınma numunelerinin sinterleme işlemi, Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm laboratuvarındaki Carbolite marka tüp fırında (Şekil 4.11) %90 teknik saflıktaki (%90Ar+%10H) Argon (Ar) atmosferinde 1120 C sıcaklıkta 30 dakika bekletilerek serbest olarak yapılmıştır.



**Şekil 4.11** Sinterleme yapılan tüp fırın.

Çevresiyle olan hava alış-verişi kesilen fırında, ısıtma işlemine geçilmeden önce, 3-5 kez tam olarak Argon gazı ile fırın içi süpürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Isıtma işlemi yaklaşık 4 °C/dak hızında gerçekleştirilirken, 300 °C sıcaklıkta bir müddet bekleme yapılarak yağlayıcıların yapıdan uzaklaştırılması tercih edilmiştir. Sinterleme sıcaklığı olan 1120 °C'ye yaklaşıldığında, bu sıcaklığa kademeli olarak daha yavaş şekilde çıkılarak, olası sıcaklık salınımları bertaraf edilmeye çalışılmıştır. Numuneler sinterleme sıcaklığında 30 dakika bekletildikten sonra, tüp fırın içerisine yoğun bir şekilde Argon gazı gönderilerek 700 °C sıcaklığa kadar hızlı bir soğutma (maksimum 1.7 °C/s) işlemi gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç, ek bir sertleştirme işlemi uygulanmadan mümkün olabilecek en büyük sertlik değerine ulaşabilmektir.

#### 4.2.1 MMK numunelerin mekanik testleri

MMK tozların preslenerek sinterlenmesiyle elde edilen aşınma numuneleri; yoğunluk, sertlik, basma dayanımı, pürüzlülük gibi mekanik özellikleri açısından incelenerek, test edilmiştir. Numunelerin yüzey sertlik ölçümleri Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan WOLPERT marka (Şekil 4.12) çok amaçlı analog sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır.

Numunelerin yoğunluk ölçümleri Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan yoğunluk ölçme kitine sahip AND GR-200 marka analitik hidrostatik terazi (Şekil 4.13) ile yapılmıştır.



Şekil 4.12 Sertlik ölçüm cihazı.



Şekil 4.13 Analitik hassas terazi ve yoğunluk ölçme kiti.

Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan “Taylor Hobson” marka (Şekil 4.14) pürüzlülük ölçer test cihazında yapılmıştır.



**Şekil 4.14** Pürüzlülük ölçüm cihazı.

Numunelerin basma dayanım testleri Şekil 4.7’de verilen çekme-basma test cihazında yapılmıştır.

Üretilen MMK aşınma numunelerinden bazıları için mikro yapı ve XRD incelemeleri yapılmıştır. Aşınma numunelerinin mikro yapı resimlerini çekmek üzere numune parlatma işlemi, Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan “METKON” marka “GRIPO 2V” model parlatma cihazında (Şekil 4.15) yapılmıştır. Numune yüzeylerinin dağlama işlemi için %4’lük Picral sıvısı (100 ml etil alkol + 4 g pikrik asit) hazırlanıp dağlamada kullanılmıştır. Numunelerin yüzey parlatma ve dağlama işlemlerinden sonra, mikro yapı fotoğraf çekme işlemi, Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan “Nikon” marka “CLEMEX Captiva” görüntüleme arayüzüne sahip metal mikroskobu (Şekil 4.16) ile gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.15** Numune parlatma cihazı.



**Şekil 4.16** Metal mikroskobu.

MMK aşınma numunelerin XRD analizi için gerekli olan parça boyutunu elde etmek üzere numunelerin kesilme işlemleri Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan “PRESI” marka “Mecatome T260” model numune kesme cihazında (Şekil 4.17) gerçekleştirilmiştir. Numunelerin XRD analizleri, Cumhuriyet Üniversitesi Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümünün Nanoteknoloji Laboratuvarında bulunan “Rigaku” marka (Şekil 4.18) XRD analiz cihazında yapılmıştır.



Şekil 4.17 Numune kesme cihazı.



Şekil 4.18 XRD Analiz cihazı.

#### 4.2.2 Ön aşınma deneyleri

Elde edilen bor karbür takviyeli MMK aşınma numuneleri, kuru ortamda Pin-on-Ring sistemiyle aşınmaya tabi tutulmuştur. Aşınma deneyleri Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde Mekanik Laboratuvarında bulunan Pin-on-ring düzeneğinde kuru temas bağlantısı sağlanmış olan “PLINT” marka (Şekil 4.19) çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir.



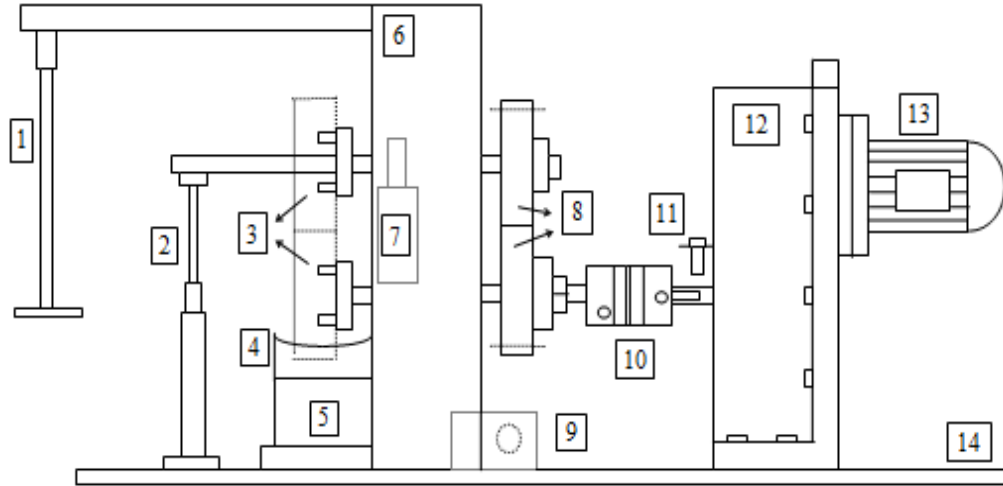
Şekil 4.19 Çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazı.

Cihazda, sürtünme kuvvetini ve aşınmayı gözleyip ölçebilmek için altı ayrı konfigürasyon mevcuttur. Şekil 4.20’de şematik çizimi verilmiş olan aşınma cihazı, mekanik işlemleri gerçekleştiren bir dönel sürtünme mekanizması ve deney sonuçlarını gözleyen bir kontrol kabininden ibarettir. Makinanın boyutları malzeme araştırma, geliştirme, kalite kontrol ve aşınma deneyleri gibi birçok görev için

uygundur. Yüklemenin yapıldığı kol oranı 1/5 ve kol ağırlığı 42N'dur. Yani, asılan yük (ölü ağırlık) ile temas yükü arasında,

$$\text{Temas Yüğü} = 42 + 5x \text{ (asılan yükün Newton cinsinden değeri)}$$

şeklinde bir orantı mevcuttur.



- 1) Ağırlık yükleme mekanizması
- 2) Değişim miktarını ölçen sensör (algılayıcı)
- 3) Sürtünmeli makara çifti
- 4) Yağlı ortam için yağ haznesi
- 5) Sıcaklık ayar sensörü ve ısıtma bölgesi
- 6) Sürtünme mekanizmasını taşıyan gövde
- 7) Sürtünme kuvvetinin sıfır ayarı
- 8) Devir oranını belirleyen dişli çifti
- 9) Kablo bağlantıları
- 10) Kavrama
- 11) Tur sayıcı sensör
- 12) Dişli kutusu
- 13) Elektrik motoru
- 14) Seti taşıyan pleyt



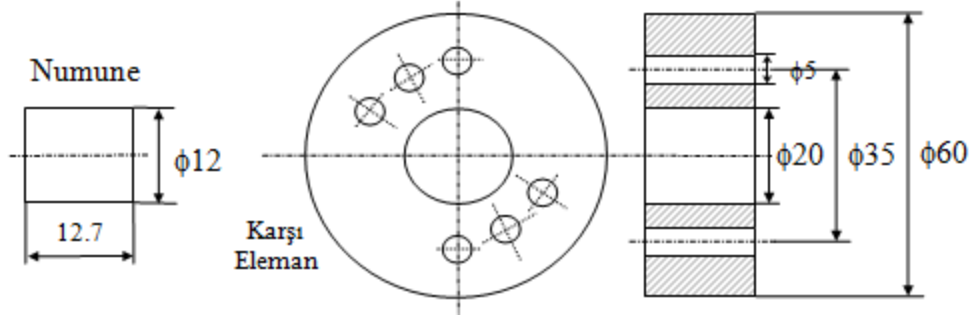
Şekil 4.20 Üniversal aşınma deney cihazının şematik gösterimi.

Aşınma test cihazında başlıca iki bağlantı durumu bulunmaktadır.

- Birleştirilmiş Yuvarlanma-Kayma Bağlantısı: Bağlantının bu tipinde, birbiri ile karşılıklı çalışan, yüklenmiş iki makara veya disk kullanılır. Alttaki makara motora bağlıdır. Üstteki makara ise uygun kayma-dönme oranındaki dişliler tarafından tahrik edilir. Bu bağlantı şekli; dişliler, kamlar ve kam mekanizmaları gibi birbirleri ile temasta olan sistemleri canlandırmak için kullanılır.
- Tek Yönlü Kayma Bağlantısı: Bu bağlama tipinde, hareketli numune ve birçok numune geometrilerinden biri (silindir, küre, makara, pim) test için kullanılabilir.

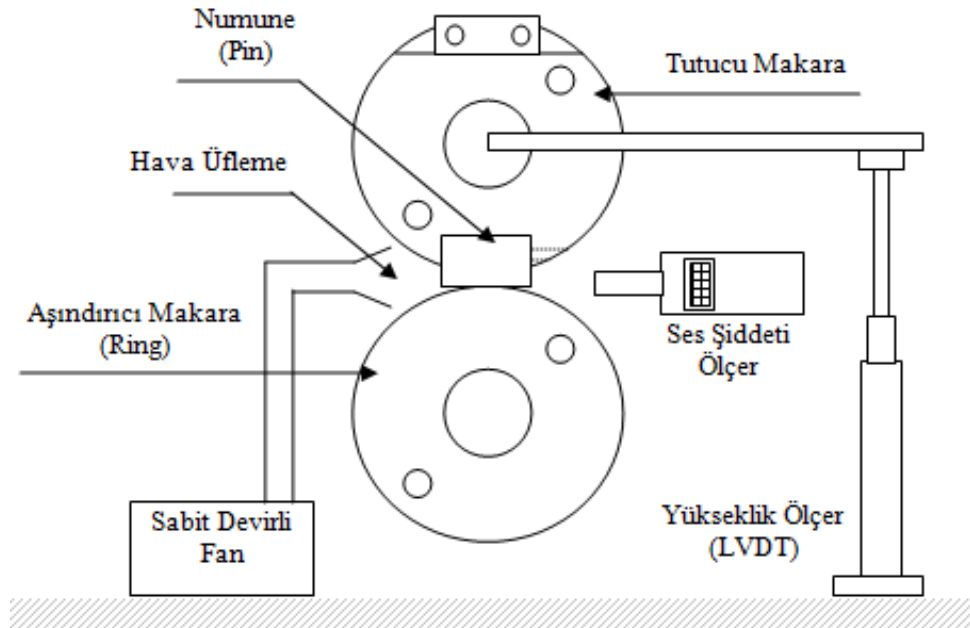
Bu bağlantının avantajı numunelerin, geniş malzeme yelpazesi aralığından, nispeten ucuz ve kolay şekilde elde edilebilmesidir. Az miktarlardaki yeni malzemelerle çalışırken bu önemli bir özellik olarak ortaya çıkar.

Numune ve karşı eleman (aşındırıcı makara) boyutları Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 Ön aşınma deneyleri için numune ve karşı eleman boyutları.

Aşınma deneylerinin yapılış aşamaları Şekil 4.22’de şematik gösterimi verilen Pin-on-Ring sisteminde çalışan deney düzeneğinde şu sıralama ile gerçekleştirilmiştir:



Şekil 4.22 Pin-on-Ring deney düzeneğinin şematik gösterimi.

- Öncelikle alkolle temizlenen numunenin ilk tartımı yapılmıştır.
- Numune uygun sürtünme yüzeyi oluşturacak şekilde tutucu makaraya, vida ve destekleme pimi yardımıyla sabitlendikten sonra, deney programındaki yük ve devir değerleri ayarlanıp, cihaz çalıştırılmıştır.

- Deney süresince anlık olarak sürtünme kuvveti (N), boydaki yükseklik değişimi (yer değiştirme) ve sürtünme sırasında ortaya çıkan sesin dBA (desibel A) cinsinden şiddeti, bir Analog/Dijital çevirici yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır.
- Deney sonunda, aşındırıcı makara yüzeyinde birikmiş olan kalıntı malzemeler P800 boyutlu zımpara ile temizlenmiştir.
- Numune alkolle temizlendikten sonra tekrar tartılarak, ağırlıkça malzeme kaybı cinsinden aşınma miktarı bulunmuştur.

Aşındırıcı eleman olarak, aşınma cihazına ait olan 63 HRc sertliğindeki AISI D3 (DIN X210Cr12) yüksek alaşımlı soğuk takım çeliği kullanılmıştır. Karşı makaranın sertlik ölçümü yine Şekil 4.12’de verilen cihazda yapılmıştır.

Deney sırasında ölçülen aşınma büyüklüğü miligram cinsinden kaybolan malzeme miktarı, yani malzeme ağırlık kaybıdır. Aşınma miktarının ölçümü, 0.1mg hassasiyetindeki dijital terazi ile yapılmıştır. Ağırlık kaybı ölçümü, Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.23’de fotoğrafı verilen AXIS marka hassas terazi ile yapılmıştır.

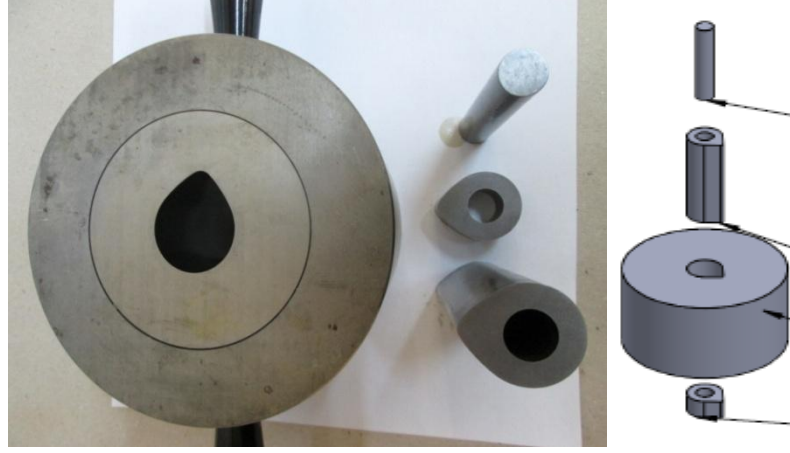


Şekil 4.23 Hassas terazi (0.1 mg).

### 4.3 MMK Kam Üretimi

Ön aşınma deneyleri neticesinde ortaya çıkan veriler göz önünde tutularak. MMK kam üretimi için toz kompozisyonları belirlenmiştir. Sonraki adımda MMK malzemelerden kam numunelerini üretmek üzere, Şekil 4.24’de detayları verilen ve Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan kalıp sistemi kullanılmıştır. Bu kalıpla soğuk presleme yöntemi kullanılarak tozlardan MMK kam üretimi gerçekleştirilmiştir.





**Şekil 4.24** Tasarlanan kam kalıbının detayları.

MMK kam numunelerin presleme işlemi Şekil 4.7’de resmi verilmiş olan üniversal çekme-basma tezgâhında, presleme işlemi kontrollü olarak yapılmıştır. Şekil 4.25’de kalıp ile MMK kam elde edilmesi sırasında kullanılan sistem resimlenmiştir.



**Şekil 4.25** MMK kam numunelerinin kalıplanmasında kullanılan sistem.

MMK kam üretiminde kullanılan toz karışımlarının içerikleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Ön aşınma deneylerinde kullanılan SiC tozunun, takviye elemanı olarak MMK numunelerinin mekanik ve aşınma özelliklerinin geliştirilmesinde bariz bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden, MMK kam numunelerinin üretiminde SiC ikinci bir takviye elemanı olarak kullanılmamıştır. Bunun yerine, %1 B<sub>4</sub>C içeren yeni bir toz kompozisyonun MMK kam üretimine dâhil edilmesi daha mantıklı görüldüğünden toz içeriği olarak eklenmiştir. Çünkü ön deneylerde gözlemlendiği gibi, MMK toz içerisindeki azalan B<sub>4</sub>C miktarı, mekanik özelliklerle birlikte aşınma dayanımını da iyileştirmiştir.

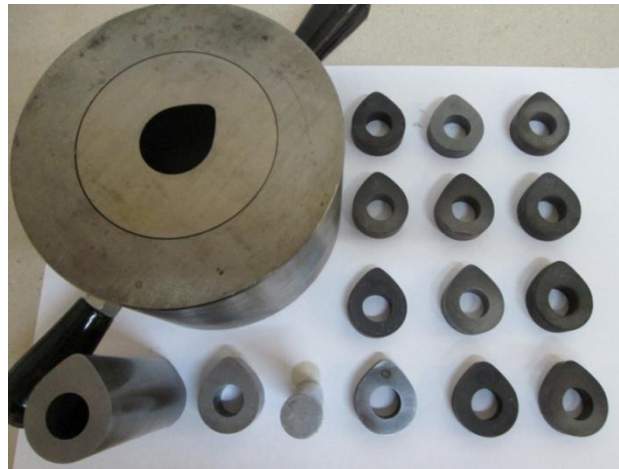
**Çizelge 4.5** MMK kam numuneleri için hazırlanan toz içerikleri.

Karışım Kodu	Matris Kodu	Takviye Malzemesi
DW1B	DW (74 µm)	%1 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DW3B		%3 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DW5B		%5 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DW10B		%10 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE1B	DE (74 µm)	%1 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE3B		%3 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE5B		%5 B <sub>4</sub> C (53 µm)
DE10B		%10 B <sub>4</sub> C (53 µm)

Kam numunelerinin hazırlanması sırasındaki presleme işleminde yaklaşık 175 kN değerinde basma kuvveti uygulanmıştır. MMK kam numunelerin sinterleme işlemi, ön aşındırma numunelerinin sinterlenmesinde uygulanan aynı teknik işlemler ve veriler kullanılarak aynı adımlarla, Şekil 4.11’de fotoğrafı verilen tüp fırında yapılmıştır. Sinterleme sonrasında MMK kam numunelere ayrıca 200 °C’de temperleme işlemi uygulanmıştır. Temperleme işlemi Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan “Hobbytherm” marka (Şekil 4.26), 1300 °C sıcaklığa çıkabilen sıcaklık ve zamanlama ayarı bulunan ısıtım işlem fırınında yapılmıştır. Üretilen MMK kamlara ait resim Şekil 4.27’de verilmiştir.



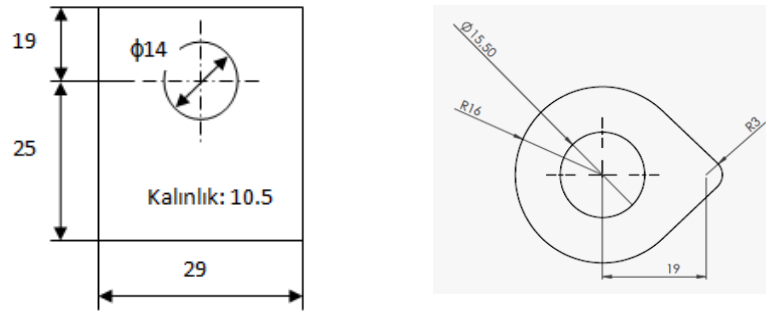
**Şekil 4.26** Isıtım işlem fırını.



**Şekil 4.27** Üretilen MMK kam numuneleri ve kam kalıbının parçaları.

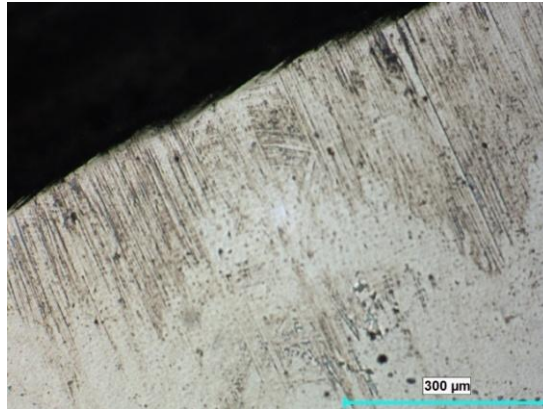
### 4.3.1 MMK kamların aşınma testleri

MMK kam numunelerin aşınma performanslarını ölçmek üzere Cumhuriyet Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde Mekanik Laboratuvarında bulunan kam analiz deney cihazı modifiye edilmiştir. Böylece, içten yanmalı motordaki kam-takipçi mekanizmasının uyarlandığı bir test sistemi elde edilmiştir. Üretilen kamların aşınma performansları, bu sistemde kuru ortamda test edilmiştir. Kam sistemindeki aşındırıcı eleman olarak (takipçi) kullanılmak üzere, AISI 5115 çeliğinden imal edilmiş bir dikdörtgen plakanın yüzeyi bor ile sertleştirilmiştir. Kam aşınma deneylerinde kullanılan numune ve aşındırıcı karşı eleman (takipçi) boyutları Şekil 4.28'de verilmiştir.



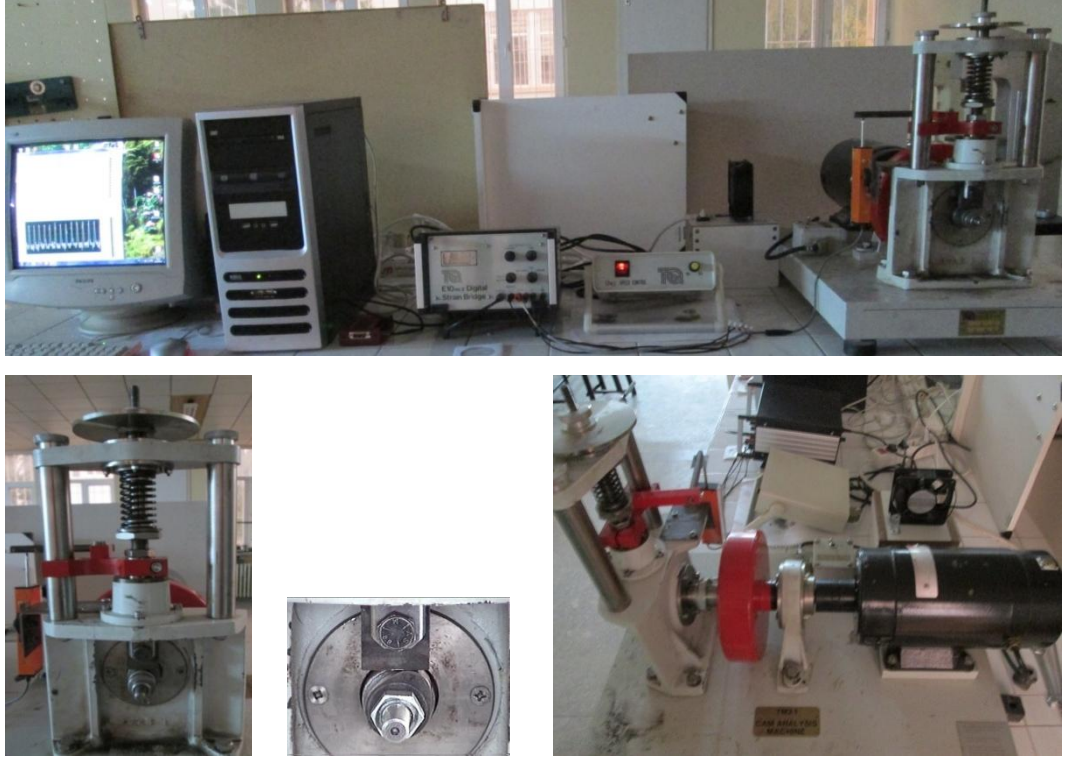
**Şekil 4.28** Kam aşındırma testlerinde kullanılan numune ve karşı eleman boyutları.

Borlama işlemi, aşındırıcı plaka bor karbür toz içerisinde gömülü haldeyken 920 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle bekletilerek yapılmıştır. Borlama işlemine ait yöntem, teknik çalışma ve değerler, Selçuk'a (1994) ait borlama tekniğiyle ilgili doktora tez çalışmasından alınmıştır. İşlem sonrasında maksimum 2120 HV 0.08 sertlikte ve 150 µm ile 250 µm arasında değişen kalınlıkta bir bor tabakası elde edilmiştir (Şekil 4.29).



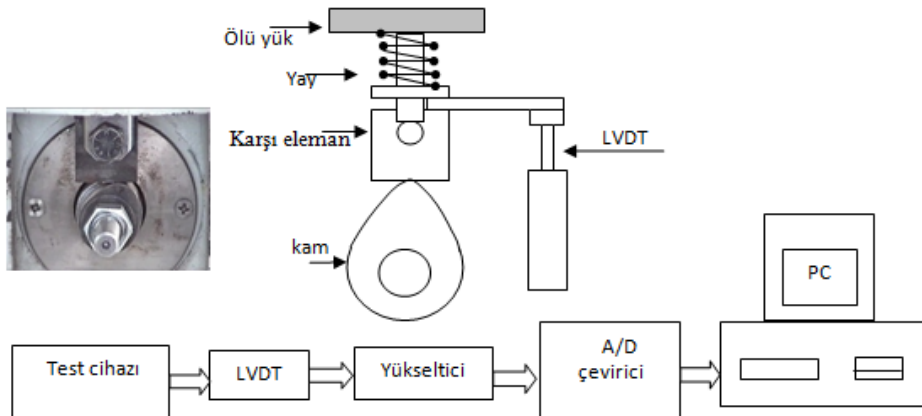
**Şekil 4.29** Borlanmış aşındırıcı plakaya ait içyapı fotoğrafı (100x).

Kam aşınma deneylerinde kullanılan kuru temaslı kam-takipçi mekanizmalı modifiye edilmiş test cihazının görünüşü Şekil 4.30'daki gibidir.



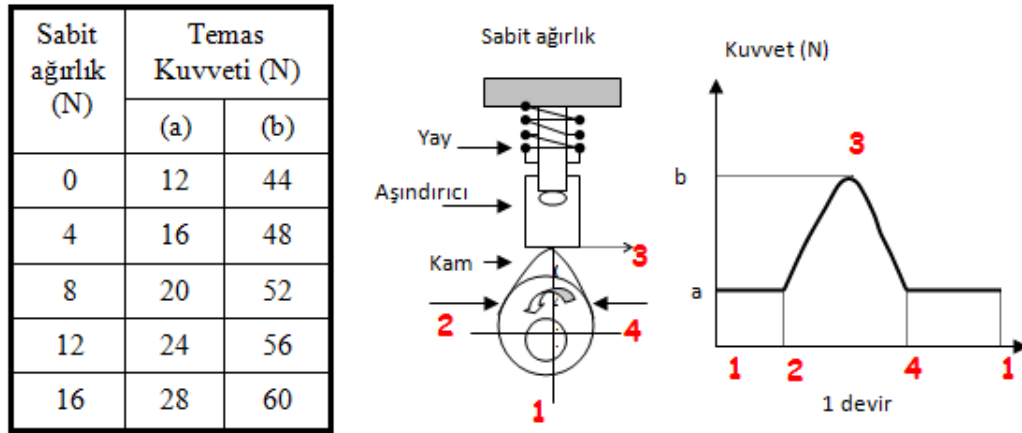
Şekil 4.30 MMK kam aşındırma test düzeneği.

Deney cihazında ölü ağırlıklı bir yay sistemiyle itici ve kamın birbirine teması sağlanmaktadır. Temas süresince iticinin doğrusal yer değiştirmesi bir yükseklik algılayıcısı olan (LVDT, Linear Vertical Displacement Transducer) ile ölçülerek bir weston köprü (strain bridge) amplifikatörü ile güçlendirildikten sonra Analog/Dijital çevirici ile bilgisayara kaydedilmektedir. Aşınma sisteminin şematik resmi Şekil 4.42'de verilmiştir.



Şekil 4.31 MMK kam aşındırma test sisteminin şematik gösterimi.

Deney sırasında kamın bir turu boyunca ölü yük ile temas yükü arasında gerçekleşen kuvvet değerleri Şekil 4.32’de verilmiştir.



**Şekil 4.32** Kam aşındırma test düzeneğinde ortaya çıkan temas yük değerleri.

Borkarbür takviyeli MMK malzemeden üretilmiş kamlar 2 ile 12 saat aralığında kuru ortamda aşınma testlerine tabi tutulmuşlardır. Aşınma testlerinde kamların devir sayısı 100 d/dak, uygulanan ölü yük ise 8 N değerinde sabit tutulmuştur. Şekil 4.32’deki tabloya göre, testlerde kullanılan 8 N’luk ölü yükün, aşınma bölgesinde oluşturacağı temas yük değeri, 20 N ile 52 N arasında değişmektedir. Burada tesis edilen MMK kamların aşındırılmasına yönelik test yöntemi, düzeneği ve teknik değerleri, Sevimgül (2002), Sert ve ark. (2006) ve Cerit (2010) tarafından yapılan çalışmalardan derlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bor karbür takviyeli metal matrisli kompozitten toz metal (T/M) yöntemiyle kam üreterek, içten yanmalı motordaki kam-takipçi mekanizmasının uyarlandığı bir test sisteminde, üretilen kamların aşınma dayanımları, çeşitli kompozisyonlar için test edilmiştir. Aşınma test sonuçlarına göre oluşturulan MMK kam kompozisyonlarının gerek kendi aralarındaki, gerekse piyasada hali hazırda kullanılan kam millerinin aşınma performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Çalışma iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, MMK kam numune üretiminde kullanılacak toz kompozisyonunu belirlemek üzere ön çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında, MMK kam numune üretiminde kullanılacak toz içeriğinde matris malzemesi olarak “DE”ve “DW” kodlu iki tip Distaloy DC tozu ve seramik takviye olarak ağırlıkça %1, %3, %5, %10 oranında B<sub>4</sub>C kullanılmıştır.

### 5.1 MMK Ön Deney Sonuçları

MMK kam numune üretiminde kullanılacak toz kompozisyonunu belirlemek üzere öncelikle bir dizi ön çalışma yapılmıştır. “DE” (%98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF<sub>4</sub> + %0.6 LubeE bağlayıcı) ve “DW” (%98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF<sub>4</sub>+ %0.8 Amide Wax bağlayıcı) kodlu iki tip matris malzemesi ve takviye elemanı olarak iki farklı tane boyutuna sahip (53 µm - 280 mesh ve 12 µm - 1200 mesh) bor karbür (B<sub>4</sub>C) ile İkinci takviye elemanı olarak 37 µm – 500 mesh tane boyutlu silisyum karbür (SiC) seramik tozları tercih edilmiştir. Takviyelendirme işleminde B<sub>4</sub>C ağırlıkça %3, %5, %10 oranında ve %3 B<sub>4</sub>C ile birlikte ağırlıkça %1 oranında SiC tozları kullanılmıştır. Bu farklı kompozisyonlarla üretilen numuneler 1120 °C’de 30 dakika %90 saflıktaki Argon atmosferinde sinterlendikten sonra, fiziksel (yoğunluk ve pürüzlülük) ve mekanik özellikleri (sertlik, basma dayanımı ve aşınma direnci) açısından incelenerek, test edilmiştir.

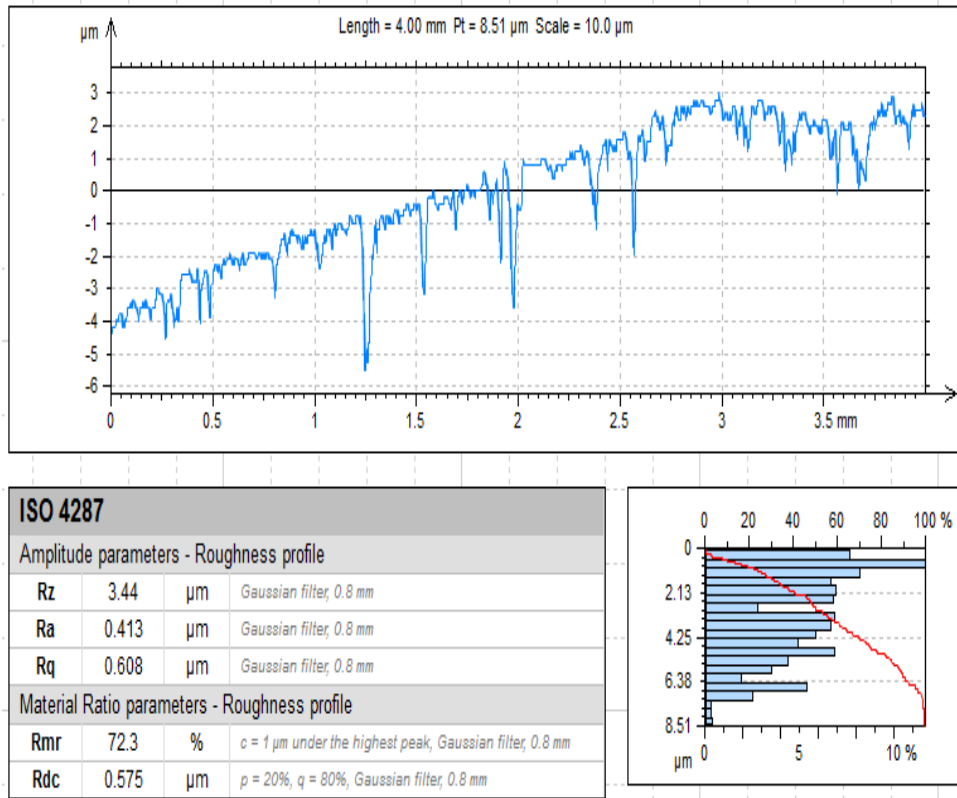
Mekanik özelliklerle ilgili elde edilen değerler tercih edilen toz kompozisyonları için Çizelge 5.1’de verilmiştir. Burada, artan B<sub>4</sub>C miktarı ile MMK numunenin yoğunluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Bor karbür, demir tozundan daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, demir tozlarının katalog değerindeki yaklaşık 7 g/cm<sup>3</sup> sıkıştırma yoğunluğuna çıkılmasını engellemiş olduğu düşünülmektedir. Bu düşük yoğunluk rijitlik sertlik ölçümüne de yansımıştır. Benzer şekilde, iki tozun yoğunluk

farkından ortaya çıkan iç yapıdaki çentik etkisiyle, matris malzemesi yeterli rijitliği sağlayamadığından, basma dayanımı, artan B<sub>4</sub>C miktarıyla azalmıştır.

**Çizelge 5.1** Üretilen MMK numunelere ait bazı fiziksel ve mekanik değerler.

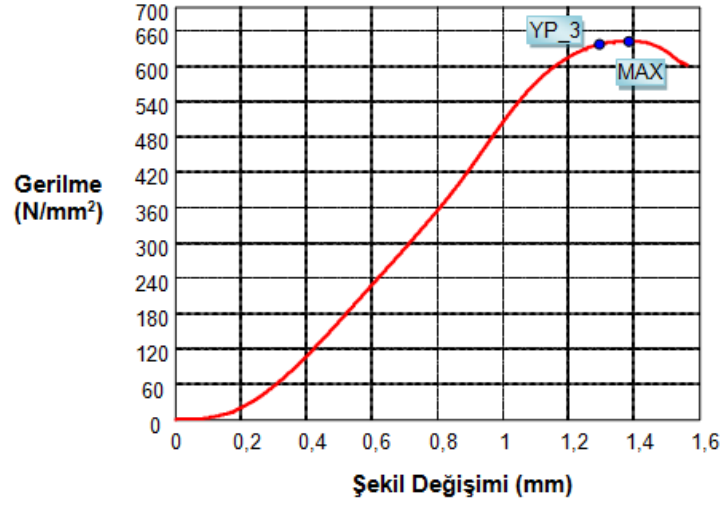
Karışımın Kodu	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Sertlik (HRC)	Basma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) (MPa)	Pürüzlülük Ra (µm)
DW3B	6.45	33	519.674	0.67
DW5B	6.12	31	350.809	0.72
DW10B	5.26	30	125.227	1.01
DW3B1Si	6.32	31	422.499	0.75
DE3B	6.55	36	642.513	0.49
DE5B	6.11	33	456.052	0.63
DE10B	5.35	30	165.300	0.93
DE3B1Si	6.37	31	568.596	0.81

Çizelge 5.1’de verilen yüzey pürüzlülük değerleri, silindirik numunelerin yanall yüzeylerinin üç farklı bölgesinden yapılan ölçümlerin ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir. Üretilen MMK aşınma numunelerinin pürüzlülük ölçümlerine ait örnek bir grafik DE3B kodlu numune için Şekil 5.1’de verilmiştir.



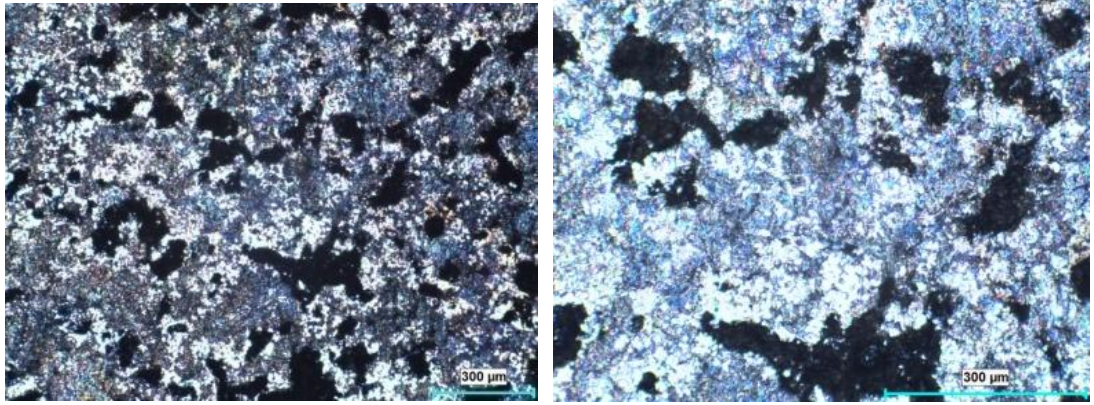
**Şekil 5.1** “DE3B” kodlu aşınma numunesinin yüzey pürüzlülük grafikleri.

Basma testi sırasında oluşan gerilme-şekil değişimi grafiklerinden bir örnek, “DE3B” kodlu aşınma numunesi için Şekil 5.2’de gösterilmiştir (YP\_3: Akma değeri, MAX: Maksimum basma gerilimi).



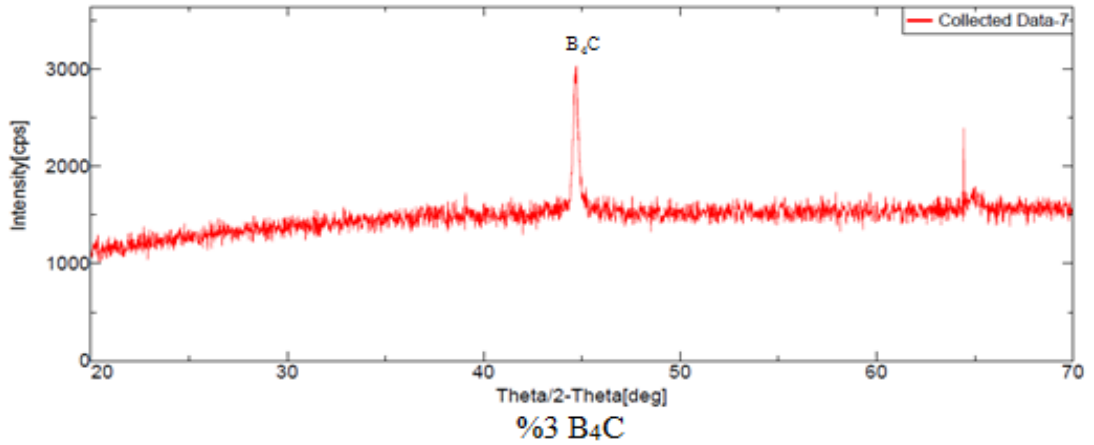
Şekil 5.2 “DE3B” kodlu aşınma numunesinin basma testine ait grafik.

Şekil 4.5.3’de, ağırlıkça %3 B<sub>4</sub>C içeren “DE” kodlu matris tozuna ait 50 ve 100 kat büyütülmüş içyapı fotoğrafları ve XRD analizi verilmiştir.



%3 B<sub>4</sub>C ve 50x

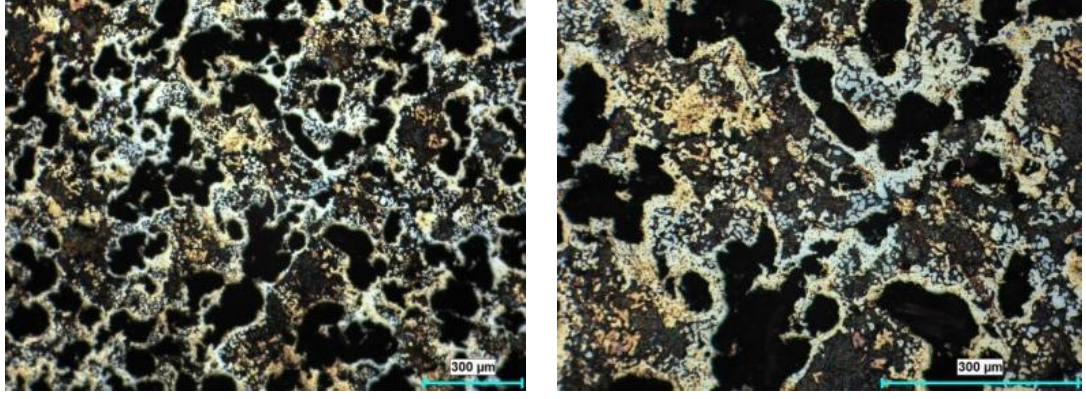
%3 B<sub>4</sub>C ve 100x



Şekil 5.3 “DE3B” Kodlu MMK aşınma numunelerinin mikro yapı resimleri.

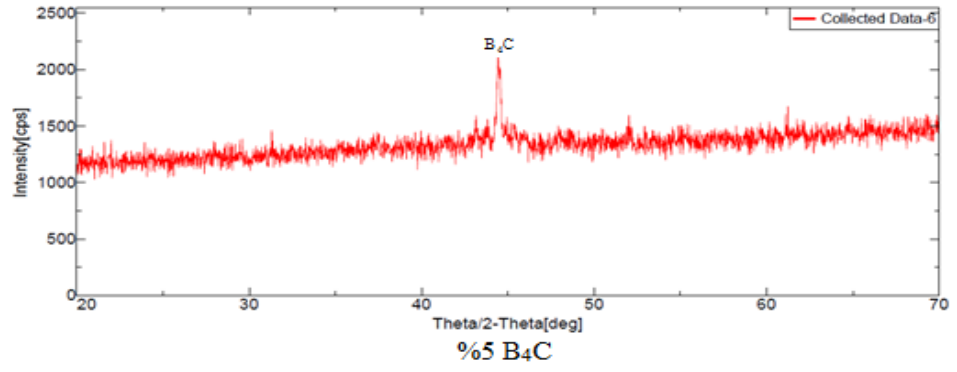
Benzer şekilde, ağırlıkça %5 ve %10 B<sub>4</sub>C içeren MMK numunelerin 50 ve 100 kat büyütülmüş içyapı fotoğrafları ve EDX analizleri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilmiştir.



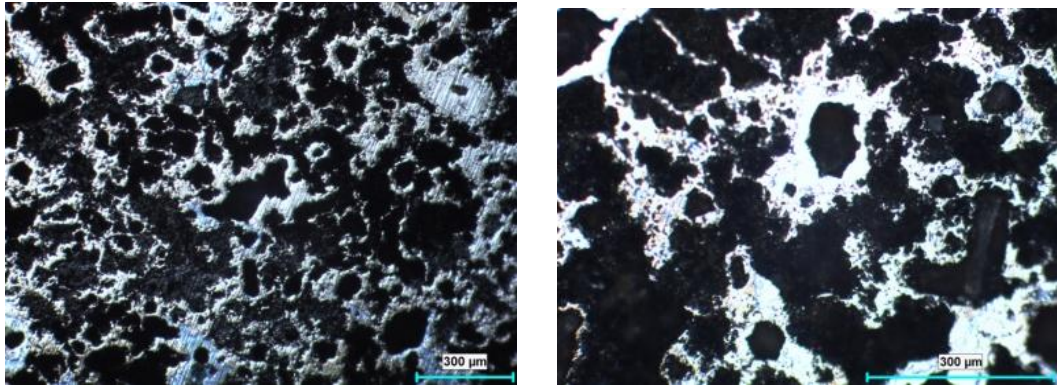


%5 B<sub>4</sub>C ve 50x

%5 B<sub>4</sub>C ve 100x

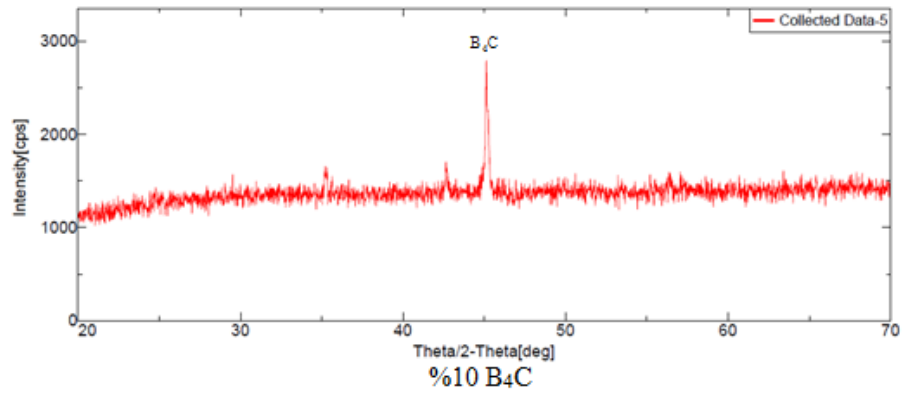


Şekil 5.4 “DE5B” Kodlu MMK aşınma numunelerinin mikro yapı resimleri.



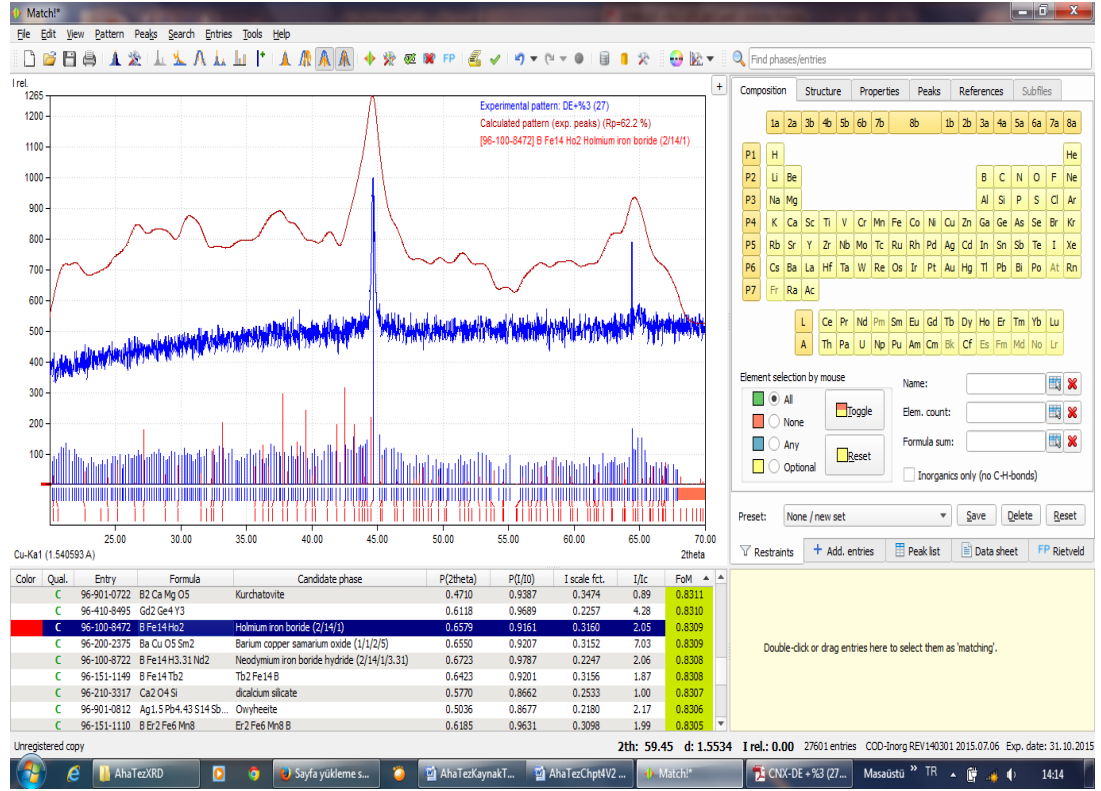
%10 B<sub>4</sub>C ve 50x

%10 B<sub>4</sub>C ve 100x



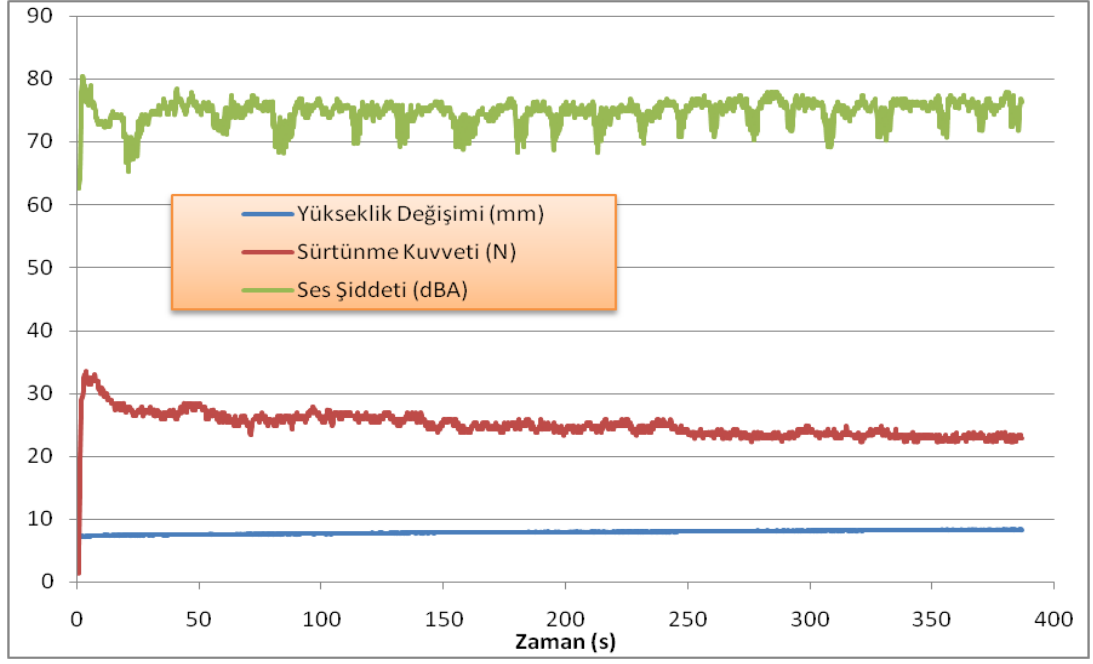
Şekil 5.5 “DE10B” Kodlu MMK aşınma numunelerinin mikro yapı resimleri.

İçyapı fotoğraflarından %3, %5 ve %10 B<sub>4</sub>C yoğunluğu koyu bölgeler şeklinde rahatlıkla gözlenmektedir. Buradaki koyu bölgelerin, B<sub>4</sub>C içerdiği XRD analizlerinden görülmüştür. Yine bu yapılara ait yüzey boyunca yapılan XRD analizinden alınmış olan veriler ayrıca, Almanya menşeli “Crystal Impact” firmasına ait (<http://www.gnu.org>) değerlendirme lisanslı “MATCH” isimli bir faz belirleyici programda analiz edildiğinde, yapı içerisinde B<sub>4</sub>C’den başka Fe, C, Fe<sub>p</sub>B (Aizenshtein ve ark., 2008), Ni ve Mo gibi element ve bileşiklerin bulunduğu saptanmıştır. Analize ait örnek bir ekran görüntüsü Şekil 5.6’da verilmiştir.



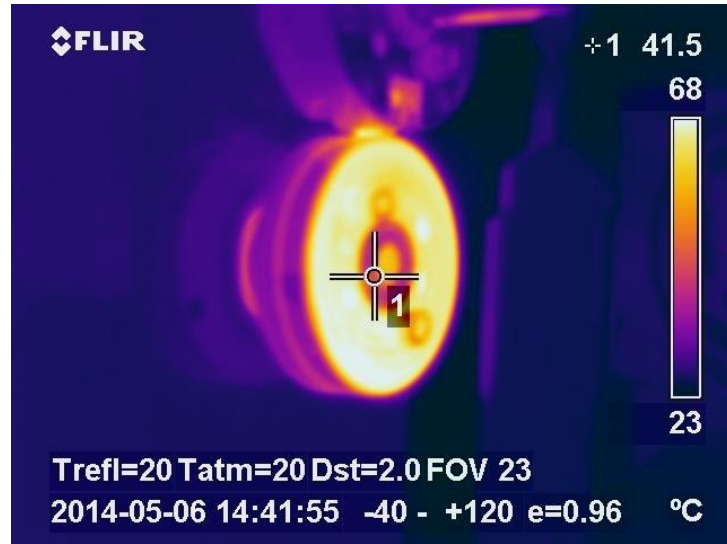
Şekil 5.6 “MATCH” isimli programda analiz edilen XRD verileri sırasında ortaya çıkan ekran görüntüsü.

Borkarbür takviyeli MMK numuneler, üç farklı temas yükü (42 N, 67 N ve 92 N) ve üç farklı kayma mesafesi (500 m, 1000 m ve 1500 m) için sabit devir sayısında (400 d/dak) aşınma testine tabi tutulmuştur. Değişken temas yükü için yapılan testlerde, aşındırıcı makara devir sayısı 400 d/dak ve kayma mesafesi 1000 m olarak alınmıştır. Farklı kayma mesafelerinde yapılan aşınmalar için, aşındırıcı makara devir sayısı 400 d/dak, uygulanan temas yükü 67 N değerinde sabit tutulmuştur. Aşınma testleri sırasında kaydedilen ses şiddeti (dBA), sürtünme kuvveti (N) ve yükseklik kaybı (mm) değerlerine ait örnek bir grafik Şekil 5.7’de verilmiştir.



**Şekil 5.7** Aşınma testleri sırasında ölçülen değerlere ait örnek grafik (n=400 d/dak, F=67 N, s=500 m).

Aşınma testleri sırasında oluşan sıcaklık dağılımını gözlemlemek için bir dizi termal kamera çekimi yapılmıştır. Bu çekimlerden bir tanesi Şekil 5.8’de örnek olarak gösterilmiştir.

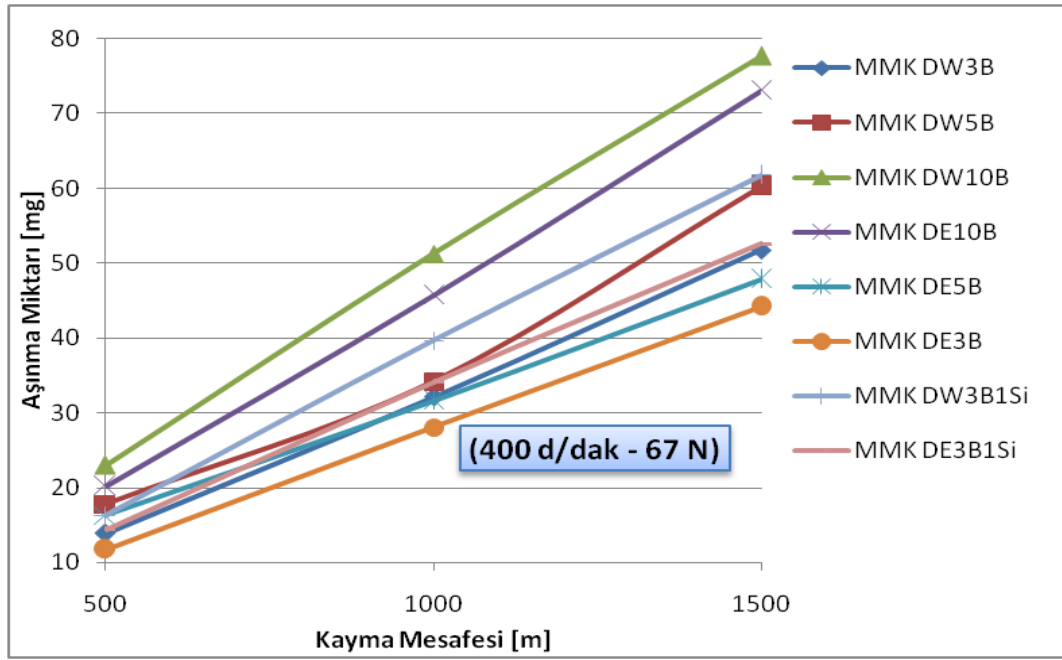


**Şekil 5.8** Aşınma testleri sırasında yapılan termal kamera çekim görüntüsü.

Aşınma testlerinin değişik kayma mesafeleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2’de, “Kayma Mesafesi – Aşınma Miktarı” grafiği ise Şekil 5.9’da verilmiştir. Aşındırıcı makara devir sayısı 400 d/dak, uygulanan temas yükü 67 N değerinde sabit tutulmuştur.

**Çizelge 5.2** Üretilen MMK numunelerin kayma yoluna göre aşınma test sonuçları.

Malzeme	Kayma Yolu (m)		
	500	1000	1500
	Aşınma Miktarı (mg)		
MMK DW3B	13.9	32.1	51.8
MMK DW5B	17.8	34.2	60.3
MMK DW10B	23.0	51.3	77.7
MMK DE10B	20.2	45.7	73.1
MMK DE5B	16.3	31.6	47.9
MMK DE3B	11.7	28.9	44.2
MMK DW3B1Si	16.3	39.7	61.8
MMK DE3B1Si	14.4	34.1	52.6



**Şekil 5.9** Aşınma testlerine ait “Kayma Mesafesi – Aşınma Miktarı” grafiği (400 d/dak – 67 N).

Şekil 5.9’da verilen, aşınma testlerine ait “Kayma Mesafesi – Aşınma Miktarı” grafiğine bakıldığında, tüm numunelerdeki aşınma miktarı kayma mesafesi ile doğrusal olarak artmaktadır. Örneğin, bu iki parametre arasındaki doğrusallık, lineer regresyon ile En Küçük Kareler (EKK) yöntemiyle hesaplandığında, MMK “DW3B” kodlu numune için:

$$y = 0.037x - 5.3 \quad (R^2 = 0,999)$$

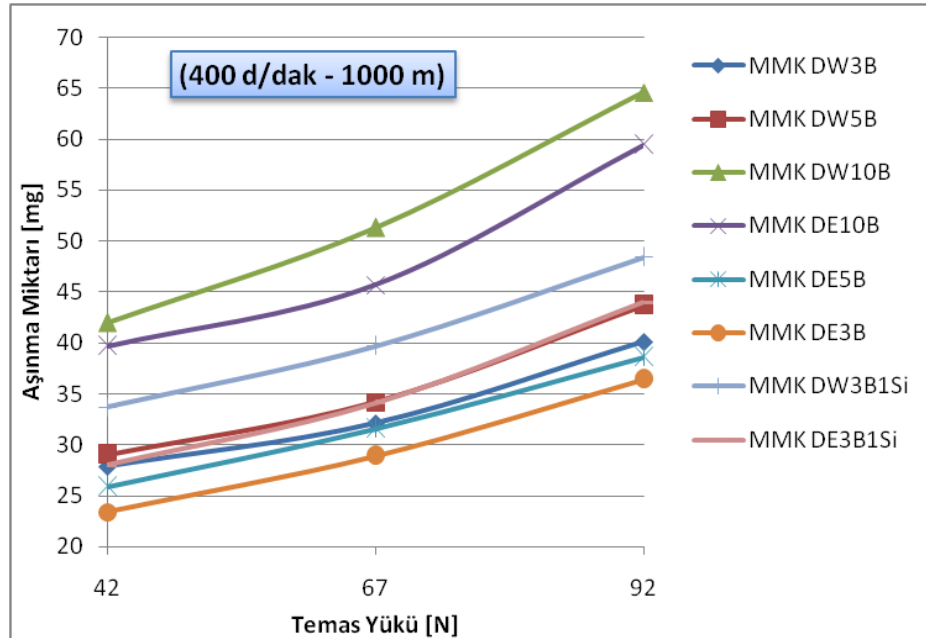
bağıntısıyla ifade edilebilir (Örn:  $y(500)=13.2$  Doğruluk= $13.2/13.9=\%95$ ). Yine grafikten görüldüğü üzere, aşınma dayanımı bakımından “DE” kodlu numunelerin “DW” kodlu numunelere göre bariz üstünlüğü ortaya çıkmıştır. Aşınmaya en dayanıklı olan MMK malzemenin, %3 B<sub>4</sub>C içeren %98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit

UF4 + %0.6 LubeE bağlayıcı içeriğe sahip tozdan üretilen “MMK DE3B” kodlu numune olduğu anlaşılmaktadır. Grafığe göre, genel itibariyle artan B<sub>4</sub>C miktarıyla bağıntılı olarak aşınma dayanımı düşmektedir. Bunun sebebinin, azalan ıslatılabilirlik olduğu düşünülmektedir (Karamış ve ark., 2012; Thiagarajan ve ark., 2015; Toptan ve ark., 2006).

Değişik temas yüklerindeki aşınma testlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3’de, “Temas Yüğü – Aşınma Miktarı” grafiğı ise Şekil 5.10’da verilmiştir. Aşındırıcı makara devir sayısı 400 d/dak ve kayma mesafesi 1000 m değerlerinde sabit tutulmuştur.

**Çizelge 5.3** Üretilen MMK numunelerin temas yüküne göre aşınma test sonuçları.

Malzeme	Temas Yüğü (N)		
	42	67	92
Aşınma Miktarı (mg)			
MMK DW3B	27.9	32.1	40.1
MMK DW5B	29.0	34.2	43.7
MMK DW10B	42.0	51.3	64.6
MMK DE10B	39.7	45.7	59.4
MMK DE5B	25.9	31.6	38.6
MMK DE3B	23.4	28.9	36.4
MMK DW3B1Si	33.7	39.7	48.4
MMK DE3B1Si	28.0	34.1	44.0



**Şekil 5.10** Aşınma testlerine ait “Temas Yüğü – Aşınma Miktarı” grafiğı (400 d/dak – 67 N).

Şekil 5.10’da verilen, aşınma testlerine ait “Temas Yüğü – Aşınma Miktarı” grafiğine bakıldığında, tüm numunelerdeki aşınma miktarı uygulanan temas yüğü ile doğrusal bir orantı dahilinde artmaktadır. Örneğin bu doğrusallık, lineer regresyon ile En Küçük Kareler (EKK) yöntemiyle hesaplandığında, “MMK DW3B” kodlu numune için:

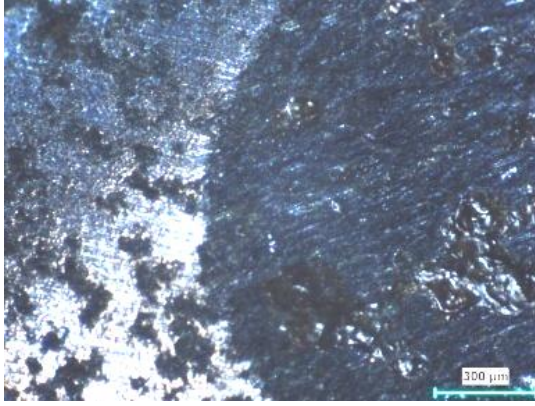
$$y = 0.244x + 17.01 \quad (R^2 = 0,968)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir (Örn:  $y(42)=27.3$  Doğruluk= $27.3/27.9=\%98$ ). Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’daki iki grafik karşılaştırıldığında, parametrik aşındırma etkinliği açısından, kayma mesafesinin temas yüküne göre daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.9’daki grafiklerdeki eğrilerin eğimi yaklaşık %30 civarında iken, Şekil 5.10’daki eğrilerin eğimi yaklaşık %4 civarındadır. Yine Şekil 4.32’de verilen grafikten görüldüğü üzere, uygulanan temas yükü açısından “DE” kodlu numunelerin aşınma dayanımının, “DW” kodlu numunelere göre daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu gruptaki aşınmaya en dayanıklı malzemenin “MMK DE3B” kodlu numune olduğu anlaşılmaktadır.

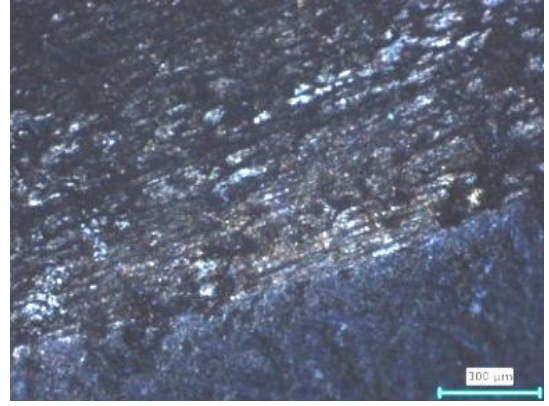
Aşınma testleri sonucunda ortaya çıkan aşınmış yüzeylere ait makro görüntüler Şekil 5.11’de, %3, %5 ve %10 B<sub>4</sub>C içeren “DE” kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin başlangıç ve aşınma bölgelerinin yan taraflarından alınan 50 kat büyütülmüş mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14’de verilmiştir.



Şekil 5.11 Aşınma testleri sırasında oluşan yüzey deformasyonları.

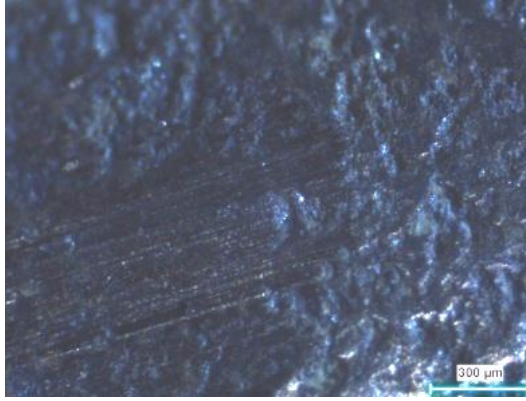


%3 B<sub>4</sub>C – Başlangıç

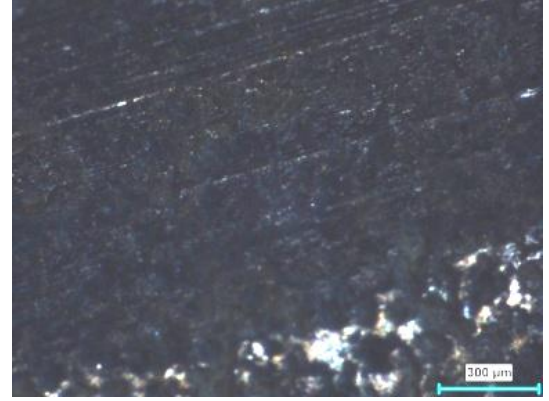


%3 B<sub>4</sub>C - Yan bölge

Şekil 5.12 “DE3B” Kodlu MMK numunelerinin aşınma yüzey resimleri (50x).

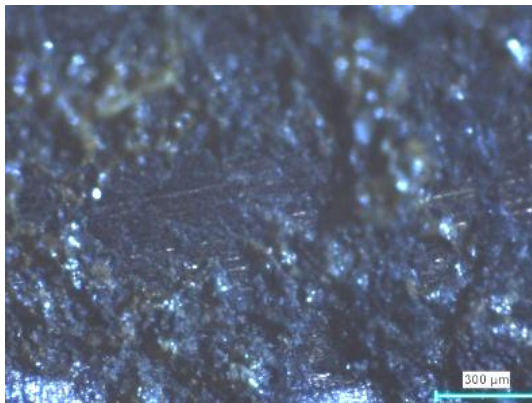


%5 B<sub>4</sub>C – Başlangıç

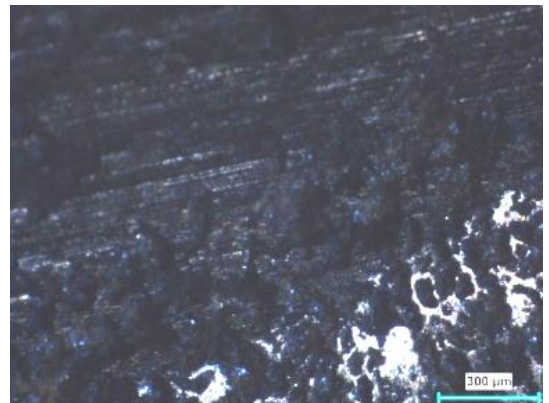


%5 B<sub>4</sub>C - Yan bölge

Şekil 5.13 “DE5B” Kodlu MMK numunelerinin aşınma yüzey resimleri (50x).



%10 B<sub>4</sub>C – Başlangıç



%10 B<sub>4</sub>C - Yan bölge

Şekil 5.14 “DE10B” Kodlu MMK numunelerinin aşınma yüzey resimleri (50x).

Mikroskopik görüntüler incelendiğinde, aşınmış yüzeylerde hakim olan yenme veya kazınma aşınmasıdır. Özellikle aşınmış bölgenin uç kısımlarında, aşındırıcı makaranın dönüş yönüne göre yırtılma aşınmasıyla birlikte malzeme yığılması da gözlemlenmiştir. Aşınmış bölgenin orta kısımlarında çizilme veya kazınma aşınmasına ait izler görülmüştür.

## 5.2 MMK Kam Deney Sonuçları

MMK kam numune üretiminde kullanılacak toz içeriğinde matris malzemesi olarak “DE”ve “DW” kodlu iki tip Distaloy DC tozu ve seramik takviye olarak ağırlıkça %1, %3, %5, %10 oranında B<sub>4</sub>C kullanılmıştır. Bu numuneler diğer ön çalışmadaki numunelerle aynı şartlarda 1120 °C’de 30 dakika %90 saflıktaki Argon atmosferinde sinterlenmiştir. MMK kam numuneler de yoğunluk, pürüzlülük, sertlik, basma dayanımı ve aşınma direnci açısından incelenerek, test edilmiştir.

Tozların preslenerek sinterlenmesiyle elde edilen MMK kam numuneleri yoğunluk, sertlik, basma dayanımı, pürüzlülük ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri açısından incelenerek test edilmiştir. Bu mekanik özelliklerle ilgili bazı değerler Çizelge 5.4’de verilmiştir.

**Çizelge 5.4** Üretilen MMK kam numunelere ait bazı fiziksel ve mekanik değerler.

Karışımın Kodu	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Sertlik (HRb)	Basma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) (MPa)	Pürüzlülük Ra (µm)
DW1B	5.94	42	-	0.58
DW3B	4.41	37	-	0.69
DW5B	5.27	32	312.382	0.82
DW10B	4.63	30	185.245	1.04
DE1B	6.01	44	-	0.44
DE3B	5.94	38	-	0.51
DE5B	5.62	34	339.504	0.73
DE10B	5.32	31	204.972	0.98

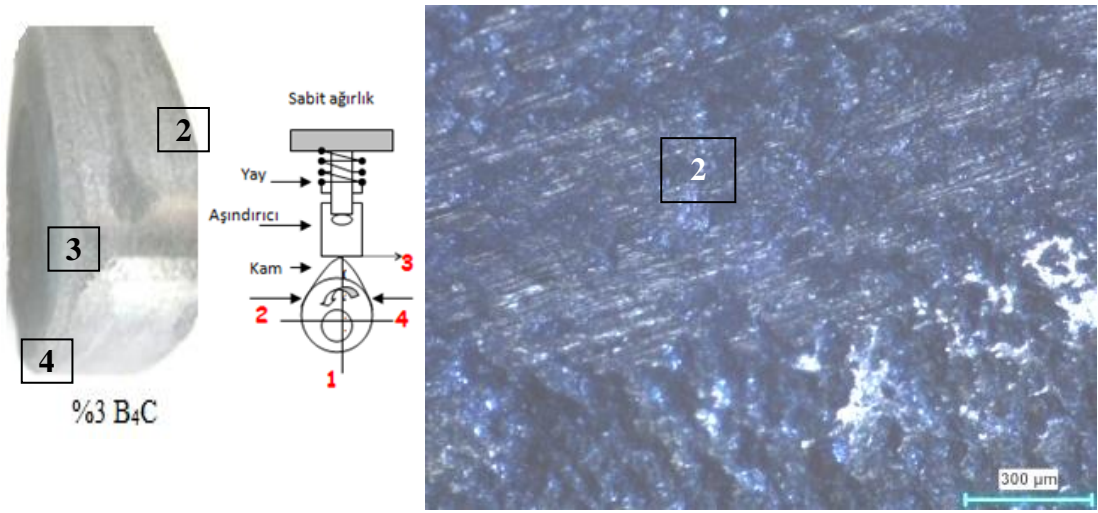
MMK kam numunelerine ait sertlik ölçümü Şekil 4.12’de gösterilen cihazla, yoğunluk ölçümü Şekil 4.13’de fotoğraflanmış cihazla, pürüzlülük ölçümü Şekil 4.14’de verilen cihazla ve son olarak basma dayanımı testleri ise Şekil 4.7’de verilen çekme-basma cihazı ile yapılmıştır. Ancak, deney setinin maksimum yükleme kapasitesi bazı numunelerin basma dayanımlarının ölçümüne izin vermemiştir.

Borkarbür takviyeli MMK malzemeden üretilmiş kamlar 2 ile 12 saat aralığında kuru ortamda aşınma testlerine tabi tutulmuşlardır. Aşınma testlerinde kamların devir

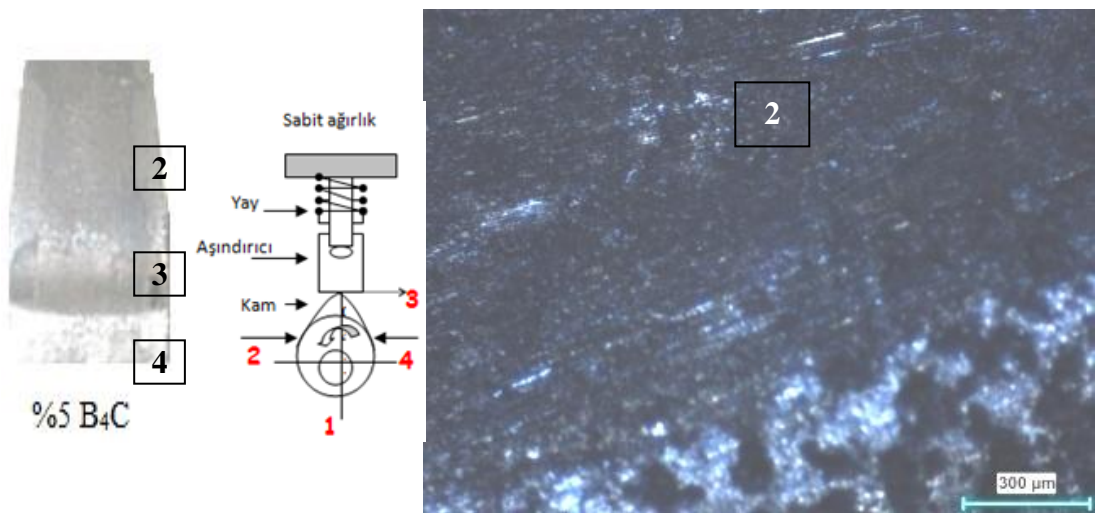


sayısı 100 d/dak, uygulanan ölü yük ise 8 N değerinde sabit tutulmuştur. Şekil 4.32'deki tabloya göre, testlerde kullanılan 8 N'luk ölü yükün, aşınma bölgesinde oluşturacağı temas yük değeri, 20 N ile 52 N arasında değişmektedir.

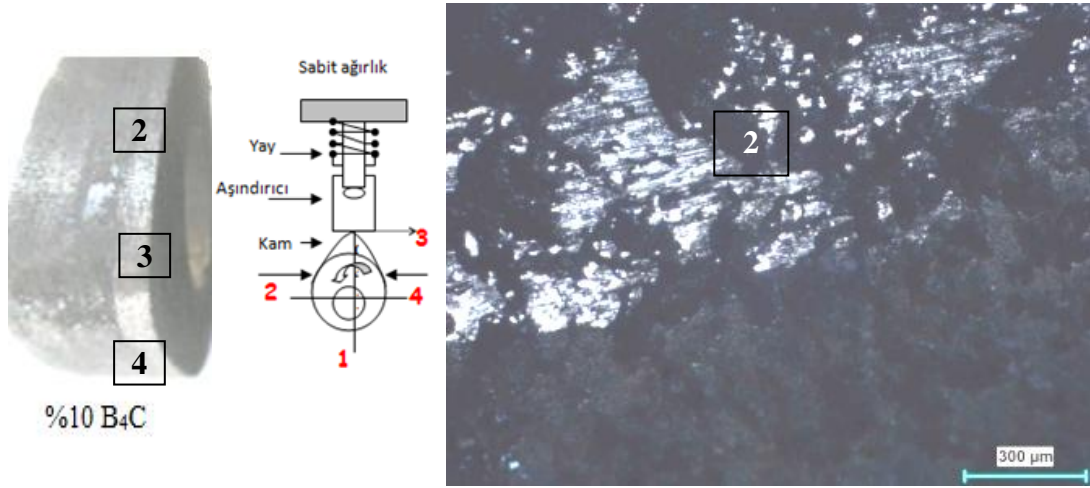
Burada tesis edilen MMK kamların aşındırılmasına yönelik test yöntemi, düzeneği ve teknik değerleri, Sevimligül (2002), Sert ve ark. (2006) ve Cerit (2010) tarafından yapılan çalışmalardan derlenmiştir. Aşınma sonrasında ortaya çıkan aşınmış kam yüzeylerine ait bir dizi makro ve 50 kat büyütülmüş mikroskopik aşınmış yüzey resimleri Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.15 “DW3B” kodlu kam numunelerine aşındırılmış yüzey fotoğrafları.



Şekil 5.16 “DW5B” kodlu kam numunelerine aşındırılmış yüzey fotoğrafları.



**Şekil 5.17** “DW10B” kodlu kam numunelerine aşındırılmış yüzey fotoğrafları.

Aşınma yüzeylerinin makro ve 50 kat büyütme fotoğrafları verilen kam numunelerine ait üç resim, kamların dönüş yönüne göre takipçinin yükselmeye başladığı yüzeyden alınmıştır. Bu yüzeye ait bölge, iki yüzey fotoğrafı arasında yer alan temsili kam aşındırma sistemini gösteren çizimdeki kamların “2” nolu bölgesidir. Genel itibariyle kazınma aşınmasının görüldüğü bölgedir (Sevimligül, 2002; Sert ve ark., 2006; Cerit 2010).

Üretilen MMK kamların aşınma dayanımları hakkında bir fikir sahibi olmak üzere, Estaş firmasının seri üretimindeki iki farklı malzemeden imal edilmiş olan kam milleri de aynı şartlar altında aşınma testine tabi tutulmuştur. Çil döküm ve doludan boşaltma yoluyla AISI 5115 çeliğinden imal edilmiş Estaş firmasına ait kam millerinden kesilerek çıkartılan kamlar aşınma testinde kullanılmıştır.

Aşınma testine tabi tutulan ve Estaş firmasına ait olan iki farklı malzemeden yapılmış kam millerinin kimyasal bileşim analizi, Estaş firması Laboratuvarında yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre kam millerinin içerdiği alaşım elementleri ve miktarları Çizelge 5.5’de, aşınma test sonuçları Çizelge 5.6’da verilmiştir.

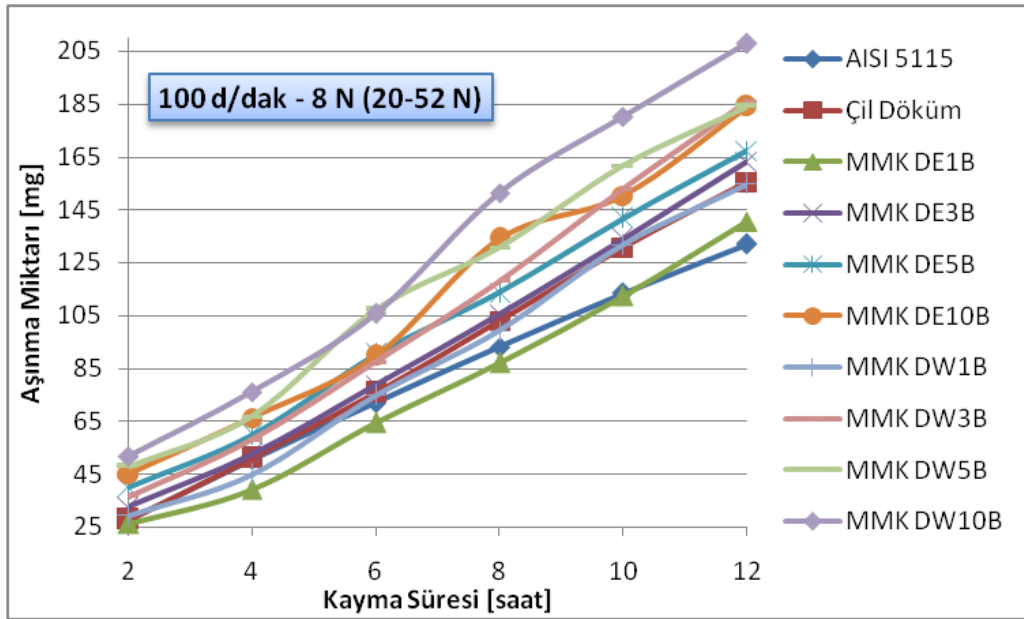
**Çizelge 5.5** Kam aşınma testlerinde kullanılan malzemelerin kimyasal içerikleri (Estaş – Sivas).

Element	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %
AISI 5115	0.645	0.279	1.077	0.019	0.018	0.994	0.131	0.032	0.236
Çil Döküm	3.43	2.13	0.813	0.062	0.043	0.558	0.344	0.270	0.230

Çizelge 5.6 MMK kam numuneler ve diğer malzemelerin aşınma test sonuçları.

Malzeme	Kayma Süresi (saat)					
	2	4	6	8	10	12
	Aşınma Miktarı (mg)					
AISI 5115	27.6	50.4	72.0	93.1	113.3	132.1
Çil Döküm	27.7	50.9	75.8	102.8	130.7	155.4
MMK DE1B	26.2	39.0	64.5	87.1	112.5	140.6
MMK DE3B	32.7	52.6	78.7	105.3	134.1	163.1
MMK DE5B	39.8	59.7	90.2	113.7	141.8	167.2
MMK DE10B	45.0	66.1	89.6	133.9	150.2	184.0
MMK DW1B	29.4	44.9	74.8	99.3	131.6	154.6
MMK DW3B	36.6	57.8	87.3	118.0	152.9	185.9
MMK DW5B	47.8	66.8	107.3	130.8	161.7	184.0
MMK DW10B	51.7	76.0	105.7	151.3	180.3	207.9

Üretilen MMK kam numuneler ile Estaş firmasından temin edilen kam millerinden alınan kam numunelerinin aşınma dayanımlarını gösteren grafik Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18 MMK kam ve diğer kam numunelerin aşınma grafiği.

Şekil 5.18’de verilen MMK kam ve diğer kam numunelerin aşınmalarını gösteren grafiği incelendiğinde, numunelerin yaklaşık olarak aynı karakteristikte olduğunu yani doğru orantılı olarak bir aşınma performansı gösterdiklerini söylemek mümkündür. Örneğin bu doğrusallık, lineer regresyon ile En Küçük Kareler (EKK) yöntemiyle hesaplandığında, “MMK DE1B” kodlu numune için:

$$y = 11.63x - 3.158 \quad (R^2 = 0,991)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir (Örn:  $y(6)=66.6$  Doğruluk= $64.5/66.6=\%97$ ). Grafikten, en iyi aşınma performansının AISI 5115 çeliğinden imal edilmiş kam mili numunelerine ait olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca %1 B<sub>4</sub>C içeren MMK kam numuneleri, çil döküm numunelere göre daha iyi aşınma performansı sergilemiştir. MMK kam numunelerinin aşınma test sonuçlarının geneline bakıldığında, ön aşınma deney sonuçlarında olduğu gibi, artan B<sub>4</sub>C miktarıyla bağıntılı olarak azalan ıslatılabilirlik nedeniyle aşınma dayanımı da düşmektedir.

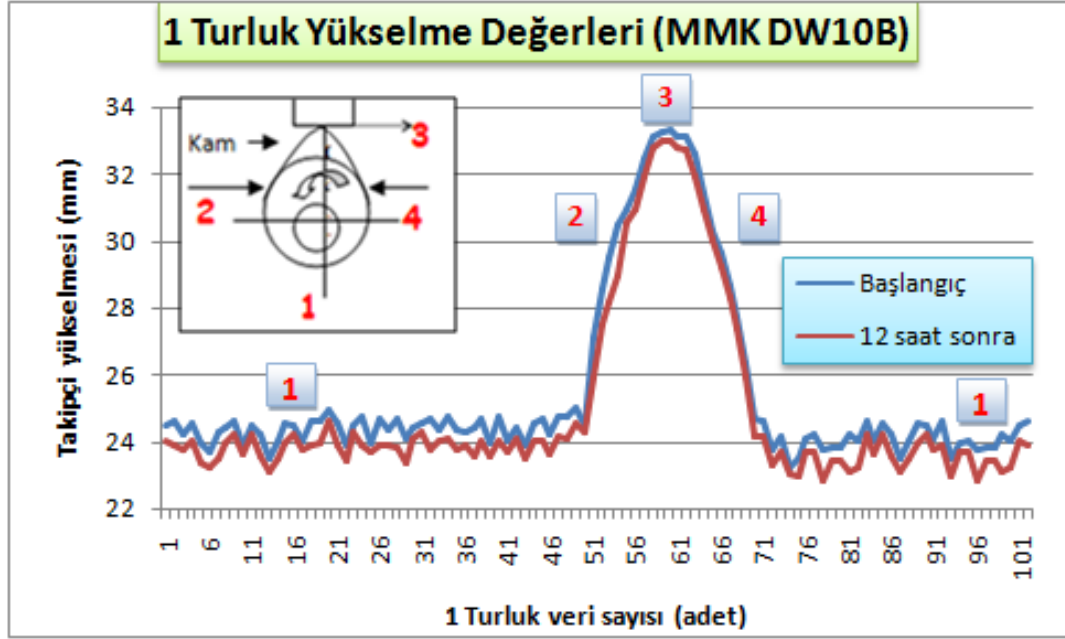
Aşınma testlerinde en iyi aşınma dayanımı sergileyen, AISI 5115 çeliğinden imal edilmiş kam numunelerinin aşınma dayanımı %100 performans değeri kabul edilip, Çizelge 5.7’de verilmiş olan bir mukayese tablosu oluşturulmuştur. Tabloya göre, ortalama aşınma performansı bakımından en yüksek değere sahip olan “MMK DE1B” kodlu numune olarak gözlemlenmiştir. Bu numune, 12 saatlik aşınma sonrasında her ne kadar %94 değerinde bir aşınma performansı sergilemiş olsa da, 12 saatten önceki aşınma performansları %100’ün üzerine çıktığından, kümülatif olarak en performanslı kam olarak kabul edilebilir.

**Çizelge 5.7** Mukayeseli kam aşınma testlerindeki aşınma performans değerleri.

Kam Malzemesi	% Performans						
	100	100	100	100	100	100	100
AISI 5115	100	100	100	100	100	100	100
Çil Döküm	99	99	95	91	87	85	93
MMK DE1B	105	129	112	107	101	94	108
MMK DE3B	84	96	92	88	84	81	88
MMK DE5B	69	84	80	82	80	79	79
MMK DE10B	61	76	80	70	75	72	72
MMK DW1B	94	112	96	94	86	85	95
MMK DW3B	75	87	82	79	74	71	78
MMK DW5B	58	75	67	71	70	72	69
MMK DW10B	53	66	68	62	63	64	63
	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>Ortalama % Performans</b>
	<b>Aşınma Süresi (saat)</b>						

Geliştirilen kam aşındırma test cihazında kayıt altına alınan ve kamların ortaya çıkardığı takipçi yüksekliklerine ait bir grafik, örnek olarak “MMK DW10B” kodlu numune için Şekil 4.47’de verilmiştir. Grafiğe göre, bir kam aşınma testinin başlangıç ve bitiş yükselimleri arasında meydana gelen değişiklikler, aşınma miktarı hakkında bir fikir verebilecek niteliktedir. Her noktadaki fark ile iki nokta arasındaki yay uzunluğu çarpımlarının genel toplamı ile kam genişliği çarpıldığında, iki

yükselim arasındaki yaklaşık hacim farkı elde edilebilir. Buradan, kabaca aşınma miktarına geçiş yapılabilir (Cerit 2010).



**Şekil 5.19** Kam aşındırma test düzeneğinde aşınma sonucu ortaya çıkan, iki farklı zaman arasında oluşan takipçi yükselme değerleri.

## 6. YORUMLAR ve ÖNERİLER

### 6.1 Yorumlar

Bu çalışmadaki amaç; “Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozitten toz metalürjisi (T/M) yöntemiyle kam üretmek, içten yanmalı motordaki kam-takipçi mekanizmasının uyarıldığı bir test sisteminde, üretilen kamların aşınma davranışlarını çeşitli kompozisyonlar için saptamak” şeklinde özetlenebilir.

Çalışma iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, MMK kam numune üretiminde kullanılacak toz kompozisyonunu belirlemek üzere ön çalışmalar yapılmıştır. “DE” (%98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF4 + %0.6 LubeE bağlayıcı) ve “DW” (%98.9 Distaloy DC + %0.5 Grafit UF4+ %0.8 Amide Wax bağlayıcı) kodlu iki tip matris malzemesi (74 µm) ve takviye elemanı olarak iki farklı tane boyutuna sahip (53 µm - 280 mesh ve 12 µm - 1200 mesh) bor karbür (B<sub>4</sub>C) ile İkinci takviye elemanı olarak 37 µm – 500 mesh tane boyutlu silisyum karbür (SiC) seramik tozları tercih edilmiştir. Takviyelendirme işleminde B<sub>4</sub>C ağırlıkça %3, %5, %10 oranında ve %3 B<sub>4</sub>C ile birlikte ağırlıkça %1 oranında SiC tozları kullanılmıştır. Bu farklı kompozisyonlarla üretilen numuneler 1120 °C’de 30 dakika %90 saflıktaki Argon atmosferinde sinterlendikten sonra, fiziksel (yoğunluk ve pürüzlülük) ve mekanik özellikleri (sertlik, basma dayanımı ve aşınma direnci) açısından incelenerek, test edilmiştir. Bu kısımdaki deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar:

- Ön deneyler için hazırlık aşamasında, takviye elemanı olarak kullanılan 12 µm - 1200 mesh tane boyutuna sahip B<sub>4</sub>C ile yapılan karıştırma işleminde topaklanma problemleri yaşandığından, bu içerikteki MMK kompozisyonundan vazgeçilmiştir.
- Yapıya ilave edilen B<sub>4</sub>C miktarı azaldıkça sertlik, basma dayanımı, yoğunluk ve aşınma direnci değerleri artmakta, pürüzlülük ise azalmaktadır.
- Tüm numunelerde gözlemlenen aşınma miktarı, kayma mesafesi ve temas yükü ile doğrusal olarak artmaktadır. Aşındırma etkinliği açısından, kayma mesafesinin (aşındırma eğrilerinin eğimi 1/30) temas yüküne (eğim=1/4) göre daha baskın olduğu gözlenmiştir.

- Aşınma dayanımı bakımından “DE” kodlu numunelerin “DW” kodlu numunelere göre bariz üstünlüğü ortaya çıkmıştır. Aşınmaya en dayanıklı olan MMK malzemenin, %3 B<sub>4</sub>C içeren “DE” tip numune olduğu anlaşılmaktadır.
- Genel itibariyle artan B<sub>4</sub>C miktarıyla bağıntılı olarak aşınma dayanımı düşmektedir. Bunun sebebinin, azalan ıslatılabilirlik olduğu düşünülmektedir
- Ön aşınma deneylerinde B<sub>4</sub>C ile birlikte kullanılan SiC tozunun, takviye elemanı olarak MMK numunelerinin mekanik ve aşınma özelliklerinin geliştirilmesinde bariz bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında, MMK kam numune üretiminde kullanılacak toz içeriğinde matris malzemesi olarak “DE”ve “DW” kodlu iki tip Distaloy DC tozu ve seramik takviye olarak ağırlıkça %1, %3, %5, %10 oranında B<sub>4</sub>C kullanılmıştır. Bu numuneler diğer ön çalışmadaki numunelerle aynı şartlarda 1120°C’de 30 dakika %90 saflıktaki Ar atmosferinde sinterlenmiştir. MMK kam numuneler de yoğunluk, pürüzlülük, sertlik, basma dayanımı ve aşınma direnci açısından incelenerek, test edilmiştir. Bu kısımdaki deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, birinci kısımdaki çalışma sonuçlarına benzer olarak:

- Yapıya ilave edilen B<sub>4</sub>C miktarı azaldıkça sertlik, basma dayanımı, yoğunluk ve aşınma direnci değerleri artmakta, pürüzlülük ise azalmaktadır.
- Tüm numunelerde gözlemlenen aşınma miktarı, kayma mesafesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır.
- Aşınma dayanımı bakımından “DE” kodlu numunelerin “DW” kodlu numunelere göre bariz üstünlüğü ortaya çıkmıştır.
- Genel itibariyle artan B<sub>4</sub>C miktarıyla bağıntılı olarak aşınma dayanımı düşmektedir. Bunun sebebinin, azalan ıslatılabilirlik olduğu düşünülmektedir.

MMK kam numunelerinin aşınma testleri yapılırken, kam mili üreticisi Estaş firmasının seri üretimindeki iki farklı malzemedan imal edilmiş olan kam milleri de aynı şartlar altında aşınma testine tabi tutulmuştur. Çil döküm ve doludan boşaltma yoluyla AISI 5115 çeliğinden imal edilmiş Estaş firmasına ait kam millerinden kesilerek çıkartılan kamlar aşınma testinde kullanılmıştır. Mukayeseli aşınma testleri sonrasında şu bulgulara ulaşılmıştır:

- En iyi aşınma performansının AISI 5115 çeliğinden imal edilmiş kam mili numunelerine ait olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca %1 B<sub>4</sub>C içeren MMK kam

numuneleri, çil döküm numunelere göre daha iyi aşınma performansı sergilemiştir.

- Aşınma testlerinde en iyi aşınma dayanımı sergileyen, AISI 5115 çeliğinden imal edilmiş kam numunelerinin aşınma dayanımı %100 performans değeri kabul edildiğinde, mukayese edilen malzemeler arasında aşınmaya en dayanıklı olan malzemenin, %1 B<sub>4</sub>C içeren “DE” tip MMK numune olduğu anlaşılmaktadır. Bu numune, 12 saatlik aşınma sonrasında her ne kadar %94 değerinde bir aşınma performansı sergilemiş olsa da, 12 saatten önceki aşınma performansları %100’ün üzerine çıktığından, kümülatif olarak en performanslı kam olarak kabul edilebilir.

## 6.2 Öneriler

Montajlı kam mili üretiminin hızla geliştiği şu günlerde, kam mili yerine sadece kam üretiminin yapılması ucuz, kolay ve sağlıklı bir biçimde ilerlemekte ve geliştirilmektedir. Çoğu otomobil üreticileri ve özellikle performanslı motor üreten ve otomobillerde kullanan üreticiler, motorlarda montajlı kam mili ürünlerini kullanmayı tercih etmeye başlamışlardır. Buradaki avantaj, mil malzemesinden bağımsız olarak istenilen özellik ve geometrideki kamların kullanılabilir olmasıdır. Hal böyle olunca, özel ihtiyaç dâhilinde çok daha yüksek aşınma performansına sahip kam millerinin MMK malzemelerden kam üretilerek elde edilmesi geleceğin kam milleri olarak görülmektedir. Bu bağlamda, MMK kam üretimine yönelik olarak yapılan bu çalışmanın önünün açık olabileceği öngörülebilir.



## KAYNAKLAR


- Aizenshtein, M., Mizrahi, M., Froumin, I., Hayuna, N., Dariel, S., Frage M.P.** (2008). Inter face interaction in the  $B_4C/(Fe-B-C)$  system. *Materials Science and Engineering*, A 495 70–74.
- Akkurt, M.** (1990). Makina Elemanları- Cilt I. *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 439s
- Akkurt, M.** (1986). Makina Elemanları- Cilt II. *İTÜ*, 288s, İstanbul.
- Alidokht, S.A., Abdollah-zadeh A., Assadi, H.** (2013). Effect of applied load on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite. *Wear*, Volume 305, Issues 1–2, 291–298.
- Babalık, F.C., Çavdar, K.** (2013). Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri. *Dora*, 840s, Bursa.
- Bechtold, M., Körner, E.** (2007). Powerful, Light-Weightand Cost Effective: Constructed Camshafts. *Schmiede-Journal*, pp30-32.
- Blau, P.J.** (1997). Fifty Years of Research on The Wear of Metals. *Tribology International*, Volume 30, Number 5, pp321-331.
- Cerit, A.** (2010). Metal Matrisli Kompozitlerin Kam Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği Anabilim Dalı* (Doktora Tezi), 238s, Kayseri.
- Czichos, H., Habig, K. H.** (1992). Tribologie Handbuch-Reibung und Verschleiss. *Vieweg*, 574s, Germany.
- Çanakçı, A., Arslan, F., Varol, T.** (2013). Effect of volume fraction and size of  $B_4C$  particles on production and microstructure properties of  $B_4C$  reinforced aluminium alloy composites. *Materials Science and Technology*, Volume: 29 Issue: 8, 954-960.
- Çelik, H., Çimenoğlu, H., ve Kayalı, E.S.** (1993). Nikel ve Demir Esaslı İki Alaşımın Yüksek Sıcaklıklardaki Aşınma Davranışları. 5. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, s454-462.
- Çetinkaya, Ş.** (2005). Karbon Katkılı Alaşımli Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Özellikleri. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 83s, İstanbul.
- Çiğdem, M.** (1996). İmal Usulleri. *Çağlayan Kitabevi*, 424s, İstanbul.
- Dikicioğlu, A., Vural M., Anık S.** (2011). İmal Usulleri. *BirsenYayınevi*, 300s, İstanbul.
- Dowson, D.** (1979). History of Tribology. *Longman*, p677, London.
- Dowson, G.** (1991). Introduction to Powder Metallurgy – The Process and its Products. *EMPA Eğitim Materyalleri Kitapçığı*, p32, England.
- Easterling, K.** (1990). Tomorrows Material. *The Institute of Metals*, pp55-57.
- Ersoy, H.Y.** (2001). Kompozit Malzeme. *Literatür Yayıncılık*, 277s, İstanbul.
- Ersümer, A.** (1970). Toz Metalürjisi: Sert Metal Sinterleme. *İTÜ Matbaası*, 270s, İstanbul.
- Fleischer, G.** (1986). Reibung und Verschleiss geschmieter Reibsysteme. *Akademie der Wissenschaften der DDR*, 78s, Troisdorf.
- Gürleyik, M.Y.** (1986). Makina Mühendisliğinde Aşınma Olayları. *Mühendis ve Makina Dergisi*, Cilt 27, Sayı 323, s3-14.
- Halling, J.** (1975). Principles of Tribology. *MacMillas Pres*, p452, London.
- Hamada, H.** (1976). Method of Manufacturing Assembly Type Camshaft.
- Höganäs, AB.** (2013). PM-School Handbook 1 – Material and Powder Properties, (Ch2 - Production of iron and steel powders). *Höganäs AB*, p116, Sweden.
- Höganäs, AB.** (2015). Metallography – Höganäs Handbook for Sintered Components (Ch2 - Metallographic Atlas). *Höganäs AB*, p301, Sweden.

- Hutchings, I.M.** (1992). Tribology: Friction and Wear Engineering Materials. *Butterworth-Heinemann*, p273 London.
- Jenkins, I., Wood, J.V.** (1991). Powder Metallurgy: An Overview. ISBN: 0901462-81-0, *Institute of Metals*, p385, London.
- Kainer, K.U.** (2006). Metal Matrix Composites. *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA*, 330p, Weinheim.
- Karagöz, Ş., Ymanoğlu, R., Atapek, Ş.H.** (2009). Metalik Toz İşleme Teknolojisi ve Prosesleme Kademeleri Açısından Parametrik İlişkiler. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt:XXII, Sayı:3, 77-87.
- Karamis, M. B., Cerit, A.A., Selcuk, B., Nair, F.** (2012). The effects of different ceramics size and volume fraction on wear behavior of Al matrix composites (for automobile cam material). *Wear*, Vol, 289, pp713-811.
- Kısaöz, A., Güler, K.A., Karaaslan, A.** (2014). Metal Matrisli Kompozitlerin Vakum İnfiltrasyonla Dereceli Hassas Döküm Kalıplarında Üretimi. *Metalurji* 170, 34-38, İstanbul.
- Knutsson, P., Larsson, M.** (2013). Advanced Mixes with Improved Lubrication for Compaction of High Density PM Components. *Höganäs AB*, p263, Sweden.
- Koç, E.** (2004). Makine Elemanları Cilt 2. *Nobel Kitabevi*, 430s, Adana.
- Kragelskii, I.V.** (1965). Friction and Wear. *Butterworths*, p346, Washington.
- Lülsdorf, P.** (1979). Verschleiss probleme mit Zylinder und Schnecke Beim Extrudieren. *VDI-Bildungswerk*, 319s, Troisdorf.
- Meneghetti, U., Maggiore, A.** (2011). Antique Applications of Cam Mechanis. (*13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, pp19-25.
- Miyazaki, H., Zhou, Y., Hyuga, H., Yoshizawa, Y., Kumazawa, T.** (2010). Microstructure of Boron Carbide Pressureless Sintered in an Ar Atmosphere Containing Gaseous Metal Species. *Journal of the European Ceramic Society* 30, pp999–1005.
- Mohantya, R.M., Balasubramanian, K., Seshadri, S.K.** (2008). Boroncarbide-reinforced alumnium 1100 matrix composites: Fabrication and properties. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 498, Issues 1–2, pp42–52.
- Muhammad, E.F.** (1997). "Handbook of Powder Science & Technology. ISBN: 0-412-99621-9, *Chapman & Hall Yayıncılık*, p882, New York.
- Onaran, K.** (1985). Malzeme Bilgisi. *İTÜ Çağlayan Basımevi*, 368s, İstanbul.
- Öksüz, K.E.** (2011). Toz Metalürjisi Yöntemiyle Kesici Uç (Soket) Üretilmesi ve Karakterizasyonu. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 114s, Sivas,
- Pigors, O.** (1979). Abrasiv Kerscheiss verhalten von Stahlen bei Gleit und Walz bewegungen. *Schmierungstechnik* 10, 599s, Germany.
- Sarı, N., Kaluç, E.** (1996). Karbonlu Çeliklerin Abrasif Aşınması. *Mühendis ve Makina Dergisi*, Cilt 37, Sayı 443, s19-26.
- Sarıtaş, S.** (1994). Toz Metalurjisi. *Makina Müh, El Kitabı*, 2. Baskı, I.Cilt, MMO., 182s, İstanbul.
- Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu N.** (2007). Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri. *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları*, 574s, Ankara.
- Selçuk, B.** (1994). Borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi. *EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Doktora Tezi), 156s Kayseri.
- Thümmel, F., Oberacker, R.** (1993). Introduction to Powder Metallurgy. ISBN: 0-901716-26-X, *Institute of Materials*, p320, London.

- Sert, H., Can, A., Arıkan, H., Selcuk, B., Toprak, H.** (2006). Wear behavior of different surface treated cam spindles. *Wear*, 260, pp1013–1019.
- Sevimligül, E.** (2002). Çil Döküm ve Çelikten Yapılmış Kam Millerindeki Aşınmanın İncelenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 70s, Sivas.
- Sur, G., Şahin, Y., Gökkaya, H.** (2005). Ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum esaslı tanecik takviyeli kompozitlerin üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi (EI)*, 20 (2): 233-238.
- Şahin, Y.** (2006). Kompozit Malzemelere Giriş. *Seçkin Yayıncılık*, 424s, Ankara.
- Şimşir, M., Öksüz, K.E., Şahin, Y.** (2011). Investigation of the Wear Behavior of B<sub>4</sub>C Reinforced Fe/Co Matrix Composites Produced by Hot Press. *Procedia Engineering* 10, pp3195–3201.
- Thiyagarajan, T., Subramanian, R., Dharmalingam, S., Radika, N., Gowrisankar, A.** (2015). Wear Behaviour of B<sub>4</sub>C Reinforced Hybrid Aluminum-Matrix Composites. *Materiali in Tehnologije*, Volume: 49 Issue: 1, pp9-13.
- Topbaş, M.A.** (1993). Endüstri Malzemeleri-II,Cilt. *Yıldız*, 335s, İstanbul.
- Topçu, I., Gülsoy, H.O., Kadioğlu, N., Güllüoğlu, A.N.** (2009). Processing and mechanical properties of B<sub>4</sub>C reinforced Al matrix composites”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 482, Issues 1–2, pp516–521.
- Toptan, F., Kumdalı, F., Kerti, I.** (2006). Al-B<sub>4</sub>C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış. *Metalurji Dergisi* 145, s11-18.
- Trumper, R.L.** (1987). Metal Matrix Composites, Applications and Prospects. *J. Int. of metals and materials*, 663, pp3-11.
- Url-1** <<http://www.freepatent.com>>, alındığı tarih: 20.11.2010.
- Url-2**<<http://www.muhendisiz.net>>, (rapor-pdf) alındığı tarih: 17.11.2014.
- Url-3**<<http://www.turkishpm.org>>, alındığı tarih: 28.03.2012.
- Url-4**<<http://www.gnu.org>>, alındığı tarih: 15.08.2015.
- Url-5**<<http://www.epma.com>>, alındığı tarih: 06.05.2015.
- Url-6**<<http://www.mpif.org>>, alındığı tarih: 08.05.2015.
- Url-7**<<http://www.turktoz.gazi.edu.tr>>, alındığı tarih:12.05.2015.
- Uygunuçarlar, H.** (2010). Toz Metalürjisi ile Kam İmalatı ve İmal Edilen Kamın Kimyasal Yapısının İncelenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği Anabilim Dalı* (Yüksek Lisans Tezi), 73s, Sivas.
- Vadayar, K.S., Devaki, S., Rani, S.D., Bhanu V.V.** (2014). Effect of boron carbide particle size and volume fraction of TiB-TiC reinforcement on Fractography of PM processed Titanium matrix Composites. *Procedia Materials Science* 6, pp1329 – 1335.
- Yang, J., Wang, J., Han, Y., Niu, S., Litström, O., Chen, L.** (2014). Sinter-Hardening PM Steels with Improved Dimensional Consistency for High Performance Components. *Presented at World Congress PM2014 in Orlando*, pp1-10, USA.
- Weck, M.** (1991). Werkzeug maschinen fertigungssysteme - Band 2: Konstruktion und Berechnung”, *VDI-Verlag*, 543s, Germany.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Ahmet YÜCEL	
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 02.05.1967	
Medeni Hali	Evli	
Yabancı Dil	İngilizce	
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 58140-Sivas	
E-posta Adresi	<a href="mailto:yucelas@cumhuriyet.edu.tr">yucelas@cumhuriyet.edu.tr</a> <a href="mailto:ahmetyucel@yahoo.com">ahmetyucel@yahoo.com</a>	

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Sivas Teknik Lisesi – Elektrik Bölümü, 1985
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 1989, Makina Mühendisi
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniv. Fen Bil. Enstitüsü, 1996-1999
Doktora	Cumhuriyet Üniv. Fen Bil. Enstitüsü, 2008-2015

### İş Tecrübesi

KÜMSAN Vinç Sanayi - Sivas	İmalat ve Montaj Mühendisi, 1989-1990
Donanma Komutanlığı	Bilgi-İşlem Uzmanı (Y. Subay), 1990-1992
Cumhuriyet Üniv. Divriği MYO	Bilgisayar Uzmanı, 1993
Cumhuriyet Üniv. Divriği MYO	Öğretim Görevlisi, 1993-1996
Cumhuriyet Üniv. Müh. Fak.	Araştırma Görevlisi, 1996-2004, Makina Müh.
Boğaziçi Üniv. Müh. Fak	Araştırma Görevlisi, 2004-2007, Makina Müh.
Cumhuriyet Üniv. Müh. Fak	Araştırma Görevlisi, 2008-, Makina Müh. Böl.

### Yayınlar

1. Selçuk, B., Yücel, A., Karamış, M.B. (1997). Borlanmış ve Borlanmamış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Korozyon Direncinin Belirlenmesi. *Metal Makina Dergisi*, Sayı 91, s 68-73, İstanbul
2. Selçuk B., Yücel A., Kuzucu M. (1997). Yeni Bir Sürtünme ve Aşınma Deney Düzeneği. *Makina Tek Dergisi*, Sayı 29, s 34-40, İstanbul
1. İpek, R., Selçuk, B., Karamış, M.B., Kuzucu, V., Yücel, A. (2000). An evaluation of the possibilities of using borided GG25 cast iron instead of chilled GG25 cast iron (surface properties). *Elsevier-Materials Processing Technology*, 105, pp 73-79, (2000)

### **Kongreler ve Bildiriler**

1. Selçuk, B., **Yücel, A.**, İpek, R. (2000). Çil ve borla yüzeyi sertleştirilmiş gri dökme demirin korozyon davranışı. *VII. Uluslararası Korozyon Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, s 462-469, Yıldız Teknik Üniv., İstanbul
1. İpek, R., Selçuk, B., Ertaş, H.A., **Yücel, A.**, Karamış, M.B. (1999). A wear study using acoustic emission techniques and computer. *Balkantrib 99, The 3<sup>rd</sup> International Conference of Tribology Proceedings*, Sinaia, Volume III, pp 277-282, Sinaia-Romania
2. Selçuk, B.,**Yücel, A.** (2000). Use of response surface methodology to minimize the wear on pair of materials. *The first Mediterranean Tribology Conference*, pp 38-43, Association of Engineers and Architects in Israel, Tel-Aviv
3. Selçuk, B., **Yücel, A.**, İpek, R., Sevimligül, E., Karamış, M.B. (2002). An Experimental Investigations on Cam Wear Profile. *Balkantrib'2002, 4<sup>th</sup> International Conference on Tribology Proceedings*, Volume II, pp 587-592, Erciyes University Engineering Faculty Department of Mechanical Engineering, Kayseri-Turkey
4. Selçuk, B.,**Yücel, A.**, İpek, R., Kuzucu, M., Karamış, M.B. (2002). A Study on Fracture Toughness of Chilled Cast Iron Under the Controlled Chilled Conditions. *2<sup>nd</sup> Mediterraneantrib' 2002, Internationale Conference on Tribology*, pp 123-128, Erciyes University Engineering Faculty Department of Mechanical Engineering, Kayseri-Turkey
5. B. Selçuk, T. Ünlü, **A. Yücel**, N. Namlı, (2002). Bor Karbürün Seramik Tozu ile Şekillendirilmesi ve Karakterizasyonu. *3<sup>th</sup> International Powder Metalurgy Conference*, Turkish Powder Metalurgy Association, Gazi University, Ankara, Turkey, pp 886-895
6. B. Selçuk, **A. Yücel**, E. Sevimligül, (2006). Çil Döküm, AISI 5115 ve AISI 8822'den Yapılmış Kam Millerinin Aşınma Dayanımının Araştırılması. *Materials 2006, 11<sup>th</sup> International Materials Symposium*, Pamukkale University, Denizli, Türkiye, pp 140-146
7. A.H. Ertaş, **A. Yücel**, C. Baykara, (2006). Kesme Gerilmesine Maruz Numuneler İçin Gerilme Yoğunluğu Değerleri. *Materials 2006, 11<sup>th</sup> International Materials Symposium*, April 19-21, 2006, Pamukkale University, Denizli, Türkiye, pp 842-848

### **Projeler**

1. SANTEZ Projesi: “Otomatik Sıkı Geçme Bağlantıları ile Montajlı Kam Mili Üretimi”, (Proje Kod No : 01470.STZ.2012-2) – Yardımcı Personel
2. AB Projesi: “ROBOLAB” – Robot Programlama Eğitmeni

### **Ödüller, Teşvikler ve Üvelikler**

TMMOB Makine Mühendisleri Odası üyeliği