

**BOR KARBÜR ESASLI
SERAMİK ZIRH VE ADHESİV AŞINMA UYGULAMALARI**

Serhat GENÇOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TEKNOLOJİ EĞİTİMİ BÖLÜMÜ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2006

ANKARA

**BOR KARBÜR ESASLI
SERAMİK ZIRH VE ADHESİV AŞINMA UYGULAMALARI**

Serhat GENÇOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TEKNOLOJİ EĞİTİMİ BÖLÜMÜ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2006

ANKARA

Serhat GENÇOĞLU tarafından hazırlanan Bor Karbür Esaslı Seramik Zırh ve Adhesiv Aşınma Uygulamaları adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Doç.Dr. Mahmut İZCİLER
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr.H.Güçlü YAVUZCAN

Üye : Doç.Dr. Mahmut İZCİLER

Üye : Doç.Dr. Ramazan ÇITAK

Üye : _____

Üye : _____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

**BOR KARBÜR ESASLI
SERAMİK ZIRH VE ADHESİV AŞINMA UYGULAMALARI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Serhat GENÇOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mart 2006**

ÖZET

Bor, Türkiye için özel öneme sahip bir malzemedir. Geleceğin malzemesi olarak adlandırılan borun hammaddesini oluşturan minerallerin büyük bölümü ülkemizin topraklarında bulunmaktadır. Bu stratejik malzemenin yalnızca hammadde olarak değil, işlenerek katma değer kazandırılmış ara ve son ürünler olarak geliştirilmesi, üretilmesi ve pazarlanması, ülkemiz için çok büyük bir ekonomik değer oluşturacaktır. Bu çalışmada, öncelikle bor ve bileşikleri hakkında genel bilgi verilmiş, daha sonra bor karbürün zırh ve adhesiv aşınma uygulamaları ağırlıklı olarak incelenmiştir.

Bilim Kodu : 705 1.036
Anahtar Kelimeler : Bor, Bor Karbür, Zırh, Aşınma
Sayfa Adedi : 61
Danışman : Doç.Dr.Mahmut İZCİLER

**BORON CARBIDE BASED
CERAMIC ARMOR AND ADHESIVE WEAR APPLICATIONS
(M.Sc. Thesis)**

Serhat GENÇOĞLU

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
March 2006**

ABSTRACT

Boron is a material of high importance for Turkey. Boron is considered to be the material of future and the world's largest mineral reserves which are used as raw material for boron production, occur in our country. Development, Production and Marketing of this strategic material not only as raw material but also as value added mid- and end-products will provide outstanding economical value for Turkey. In this study, following the brief description of boron and its compounds, armor and adhesive wear applications of boron carbide is elaborated.

**Science Code : 705 1.036
Key Words : Boron, Boron Carbide, Armor, Wear
Page Number : 61
Adviser : Assoc.Prof.Dr.Mahmut İZCİLER**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yönlendirme ve katkılarıyla beni destekleyen Doç.Dr.Mahmut İZCİLER'e teşekkürü bir borç bilirim. Doç.Dr.Elif Ünal'a yardımları için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	.iii
ABSTRACT	.iv
TEŞEKKÜR.....	.v
İÇİNDEKİLER	.vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	.viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	.ix
RESİMLERİN LİSTESİ.....	.x
SİMGELER VE KISALTMALAR	.xi
1. GİRİŞ.....	.1
2. BOR VE BOR ÜRÜNLERİ	.2
2.1. Bor Mineralleri.....	.2
2.2. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları	.6
3. BOR KARBÜR MALZEMELER VE UYGULAMALARI	.9
3.1. Endüstriyel Bor Karbür Üretimi	.11
3.2. Bor Karbürün Zırh Uygulamaları	.15
3.2.1. Zırh sistemleri	.15
3.2.2. Bor karbür esaslı seramik zırhlar	.21
3.3. Bor Karbür Aşınma Uygulamaları	.26
3.3.1. Aşınma	.26
3.3.2. Bor karbür malzemelerin aşınma davranışı	.34
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	.40
4.1. Yöntem ve Hazırlık	.40
4.2. Deney Sonuçları	.44

5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ.....	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Dünya piyasasındaki ham bor ve rafine bor ürünleri	4
Çizelge 2.2. Önemli bor mineralleri ve bulunduğu yerler.....	5
Çizelge 2.3. Dünya bor rezervleri ($\times 10^3$ ton B_2O_3) ve rezerv ömrü	6
Çizelge 2.4. Bor ürünlerinin kullanım alanları.....	8
Çizelge 3.1. Bor Karbür üreticileri	11
Çizelge 4.1. Aşınma sistemi elemanlarının özellikleri	42
Çizelge 4.2. Numune aşınma oranları ve aşınma dirençleri.....	45

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Basınç altında sinterleme	14
Şekil 3.2. Tabakalı zırh malzemeleri	19
Şekil 3.3. Delici merminin seramik zırh içerisinde ilerlemesi	22
Şekil 3.4. Tanklar için çeşitli zırh uygulamaları.....	23
Şekil 3.5. Tribolojik sistem yapısı	28
Şekil 3.6. Bazı malzemelerin sertlik ve darbe dayanımının karşılaştırması	38
Şekil 3.7. Aşınma dirençlerinin karşılaştırması	39
Şekil 4.1. Aşınma mesafesine bağlı olarak numunelerin yüzey pürüzlülük değerinin değişimi.....	46
Şekil 4.2. Aşınma mesafesine bağlı olarak karşı malzeme yüzey pürüzlülük değerinin değişimi.....	46
Şekil 4.3. Numune yüzeylerinin aşınma öncesi ve sonrası SEM fotoğrafı	48
Şekil 4.4. B ₄ C numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri	50
Şekil 4.5. Al ₂ O ₃ numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri	51
Şekil 4.6. AISI H13 numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri	52
Şekil 4.7. Numune ve karşı malzemenin aşınma öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük profilleri	53
Şekil 4.8. Aşınma mesafesine bağlı olarak ortalama sürtünme kuvvetinin değişimi	54
Şekil 4.9. Sürtünme kuvvetinin aşınma süresine bağlı değişimi.....	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Kesme işlemi sonrası B_4C ve Al_2O_3 plakalar.....	41
Resim 4.2. Deney düzeneği.....	43
Resim 4.3. Aşınma sonrası numune yüzeyleri.....	44
Resim 4.4. Disk yüzey görüntüsü.....	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklama

Al₂O₃

Alumina

B

Bor

B₄C

Bor Karbür

Kısaltmalar

Açıklama

ABD

Amerika Birleşik Devletleri

ARGE

Araştırma, Geliştirme

BOREN

Türkiye Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü

CIP

Soğuk İzostatik Pres (İng.: cold isostatic press)

CVD

Kimyasal Buhar Biriktirme (İng.: chemical vapour deposition)

DİE

Devlet İstatistik Enstitüsü

DPT

Devlet Planlama Teşkilatı

HIP

Sıcak İzostatik Pres (İng.: hot isostatic press)

HP

Sıcak Pres (İng.: hot press)

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu (İng.: Scanning Electron Microscope)

TTGV

Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı

TÜBİTAK

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

1. GİRİŞ

Türkiye dünyanın en büyük bor kaynaklarına sahiptir. Halen yaygın olarak kullanılan ve gelecekte de en stratejik malzemelerden biri olmaya aday olan bor elementi ve bileşiklerinin ülkemizin ve dünyanın refahına önemli katkılar sağlayacağı açıktır. Bugün Bor'un; hammadde, rafine ürün ve bor bileşikleri şeklinde, birçoğu alternatifsiz olmak üzere, çok sayıda kullanım alanı oluşmuştur. Sanayinin en önemli temel taşlarından olan Bor, ilave edildiği malzemelerin katma değerlerini olağanüstü derecede yükseltmektedir.

Alumina, silisyum nitrür, silisyum karbür, elmas gibi pek çok sert ileri teknolojik seramik malzemeler içerisinde bor karbür bileşiğinin özel bir yeri vardır. Bor Karbür yüksek sertliği, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunluğu ve çok iyi nükleer radyasyon absorblama özellikleri ile pek çok sivil ve askeri uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Çok yüksek sertliği nedeniyle kara elmas olarak da adlandırılan bor karbür bileşiğinin yaygın olarak kullanıldığı zırh ve aşınma uygulamalarının incelenmesi bu çalışmanın ana eksenini oluşturmaktadır.

Bor karbürün diğer malzemelerle karşılaştırmalı olarak aşınma özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, bu önemli malzemenin göreceli bazı avantajlarının vurgulanması ve yüksek katma değerli bor ürünlerine yönelme arayışımıza katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. BOR VE BOR ÜRÜNLERİ

Bor, periyodik tabloda III A grubunda yer alan, B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atomik kütlesi 10,81 olan, iki kararlı izotop; B10 (%19,8) ve B11 (%80,2)'den oluşan, ergime noktası 2300°C, kaynama noktası 4002°C olan ve metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. Bor doğada serbest olarak değil diğer elementlerle bileşik halinde bulunur. Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunur. Rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır. Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken, kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik / hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte olup sadece yüksek konsantrasyonlu Nitrik Asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek Bor Oksit (B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile Bor Nitrit (BN), ayrıca bazı metaller ile Magnezyum Borit (Mg_3B_2) ve Titanyum Diborit (TiB_2) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir. Bor, bileşik halindeyken metal dışı bileşiklere benzer özellikler gösterirken, saf Bor, karbon gibi elektrik iletkenidir. Kristalize bor, görünüm, sertlik ve optik özellikler açısından elmasa benzer bir yapıya sahiptir. Kökeni Buraq/Baurach (Arapça) ve Burah (Farsça) kelimelerinden gelen Bor'un, 4000 yıllık bir kullanım geçmişine sahip olduğu bazı kaynaklarda ifade edilse de, elementer Bor ilk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy tarafından Bor Oksit'in Potasyum ile ısıtılmasıyla elde edilmiştir. (1-4).

2.1. Bor Mineralleri

Bor mineralleri değişik oranlarda Bor Oksit (B_2O_3) içeren minerallerdir. Ekonomik anlamda bor mineralleri kalsiyum, sodyum ve magnezyum

elementleri ile hidrat bileşikleri halinde teşekkül etmiş olarak bulunurlar. Bor minerallerinden ticari değere sahip olanları; Tinkal, Kolemanit, Üleksit, Probertit, Borasit, Datolit, Pandermit, Szaybelit (Asharit), Hidroborasit ve Kernit'tir. Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki B_2O_3 ile ölçülmekte, yüksek oranda B_2O_3 bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir (1,3-5).

Bor minerallerin üretim yöntemleri bulundukları yer ve derinliğe göre değişmektedir. Karada masif olarak bulunan bor bileşikleri; cevherin bulunduğu derinliğe ve fiziksel yapısına bağlı olarak açık ocak veya kapalı ocak yöntemi veya çözelti madenciliği yöntemi ile üretilmektedir. Sularda çözelti olarak bulunan borlar ise özellikle çözelti madenciliği yöntemi ile üretilmektedir (2).

Bor mineralleri ve bunlardan elde edilen ticari ürünlerin gruplandırılması konusunda literatürde kesin bir sınıflandırma bulunmamaktadır. Ülkemizde bor ürünleri için, "ham (konsantre) bor ürünleri" ve "rafine bor ürünleri" tanımları kullanılmaktadır (1).

Ayrıca bor bileşikleri, kullanım alanları ve üretim teknolojileri yönünden iki grupta incelenebilmektedir: 1. Büyük miktarlarda üretilen ve yaygın kullanım alanlarına sahip bor mineralleri ve ticari boratlar, 2. Özel tüketim alanları olan ve kısıtlı miktarda üretimi yapılan özellikli bor ürünleri (6).

Bu tanımlar ve dünyadaki diğer sınıflandırmalar göz önünde bulundurularak, ortak bir dil oluşturmak maksadıyla, gruplandırmanın; bor mineralleri, ham bor ürünleri, rafine bor ürünleri, özel bor ürünleri ve bor kullanılan sanayi ürünleri başlıkları altında yapılması BOREN¹ tarafından önerilmektedir (1).

¹ Türkiye Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü

Bor cevherlerinin yapılarındaki kil bileşiklerinin arındırılması için uygulanan zenginleştirme işlemi ile elde edilen konsantre ürün ham bor olarak tanımlanmaktadır. Sanayi girdisi olarak çok sınırlı alan ve miktarlarda kullanılan ham borun rafine edilmesiyle, daha sonra nihai sanayi ürünlerine dönüştürülecek olan ara ürünler (rafine bor ürünleri) elde edilmektedir. Dünya piyasasındaki belli başlı ham bor ve rafine bor ürünleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Dünya piyasasındaki ham bor ve rafine bor ürünleri (3)

HAM (KONSANTRE) BOR	RAFİNE BOR ÜRÜNLERİ
Tinkal, Üleksit, Kolemanit, HidroBorasit ve Pinnoit ile Szaybelit (Asharit) Konsantreleri	Boraks Pentahidrat (Rafine, Kalsine), Boraks Dekahidrat (Rafine, Kalsine), Susuz Boraks, Borik Asit, Sentetik, Kalsine, Rafine Kolemanit, Kalsine Üleksit, Kalsine HidroBorasit, Kalsine Tinkal

Ülkemizin bilinen bor yatakları Kuzey Batı Anadolu'da; özellikle Eskişehir-Kırka, Balıkesir-Bigadiç, Bursa-Kestelek ve Kütahya-Emet'te bulunmaktadır. Bu bor yataklarından, sodyum kökenli olanları tinkal, kalsiyum kökenli olanları kolemanit, sodyum-kalsiyum kökenli olanları ise üleksit olarak adlandırılır (2,3).

Türkiye'de bor minerallerinin işletmeciliği yalnızca ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmektedir. ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nün ham ürün olarak pazarladığı ve ağırlıklı olarak rafine ürün üretiminde kullandığı iki çeşit konsantre bor cevheri vardır; Tinkal konsantre ve Kolemanit konsantre. Üleksit ülkemizde rafine ürün üretiminde kullanılmamakta olup, sadece konsantre ürün olarak satılmaktadır. Elde edilen başlıca rafine ürünler ise; Boraks Pentahidrat, Boraks Dekahidrat, Susuz Boraks, Borik Asit ve Sodyum Perborat olarak sıralanabilir (3,5).

Dünya bor rezervleri genellikle 3 bölgede toplanmaktadır; ABD’de Güney-Batı Mojave Çölü, Türkiye’yi de içeren Güney-Orta Asya Alp Kuşağı, Güney Amerika And Dağları kuşağı. Bu bölgelerdeki ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri halinde daha çok Türkiye, ABD, Rusya, Çin, Şili, Bolivya, Peru, Arjantin ve Kazakistan’da bulunmaktadır. Türkiye bu ülkeler arasında sadece en büyük bor rezervlerine sahip olmakla kalmayıp, aynı zamanda, bor içeriği en yüksek ve işletilmesi en kolay yataklara da sahiptir. Ülkemizden sonra dünyanın bilinen en önemli bor yatakları ABD’nin Kaliforniya eyaletindeki Mojave Çölü’ndedir. Dünyada ticari değeri olan bor mineralleri ile bulundukları ülkeler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Önemli bor mineralleri ve bulunduğu yerler (1-3,6)

MİNERAL ADI	KİMYASAL FORMÜLÜ	% B ₂ O ₃	BULUNDUĞU ÜLKELER
TİNKAL	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	36, 5	Türkiye-ABD-Arjantin
KERNİT	Na ₂ B ₄ O ₇ · 4H ₂ O	51, 0	Türkiye-ABD-Arjantin
KOLEMANİT	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ · 5H ₂ O	50, 8	Türkiye-ABD-Meksika
ÜLEKSİT	NaCaB ₅ O ₉ · 8H ₂ O	43, 0	Türkiye-ABD-Arjantin
PROBERTİT	NaCaB ₅ O ₉ · 5H ₂ O	49, 6	Türkiye-ABD
SZAYBELİT	MgBO ₂ (OH)	41, 4	Kazakistan-Çin
PANDERMİT	Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ · 7H ₂ O	49, 8	Türkiye
BORASİT	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2	Almanya
HİD.BORASİT	CaMgBO ₁₁ · 6H ₂ O	50, 5	Türkiye
DATOLİT	Ca ₂ B ₄ Si ₂ O ₁₂ · 2H ₂ O	26, 7	Kazakistan-Rusya
SASOLİT	H ₃ BO ₃ ·	56, 3	İtalya
GÖL SULARI	ERİMİŞ TUZLAR		ABD-Şili-Bolivya

Dünya bor rezervlerinin dağılımı ve rezerv ömürleri Çizelge 2.3’de verilmiştir. Bor minerallerinin %B₂O₃ içerikleri çok farklı olduğundan, Çizelge 3’teki veriler, ekonomik olarak kullanılabilecek cevherlerin %100 B₂O₃ bazındaki miktarlarına dayandırılmıştır. Rezerv açısından bakıldığında B₂O₃ bazında 369 milyon ton görünür, 807 milyon ton muhtemel+mümkün olmak üzere toplam dünya bor rezervi 1176 milyon tondur. Türkiye’nin bor rezervi 227 milyon ton görünür, 624 milyon ton muhtemel+mümkün olmak üzere toplam

851 milyon tondur. Dünya toplam bor rezervinde Türkiye'nin payı %72,2'ye karşılık gelmektedir. ABD ise 40 milyon ton görünür, 40 milyon ton muhtemel/ mümkün rezervle dünya toplam bor rezervinin % 6,8'ine sahiptir (7).

Bu veriler Türkiye'nin dünyanın en büyük bor kaynaklarına sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Yeni arama çalışmalarıyla, ülkemizin tespit edilen rezervleri çok daha fazla artabilecektir. Ülkemiz, safsızlıkların çok düşük olmasının sağladığı yüksek talep ve açık işletmeciliğin getirdiği maliyet avantajlarına da sahiptir. Bu durum ülkemizi diğer ülkeler arasında rakipsiz bir konuma sokmaktadır. Büyük rezervlere sahip olmak, kendi başına bir anlam ifade etmemektedir. Bu rezervden sağlanacak faydanın en üst seviyeye çıkarılabilmesinin şartlarını oluşturmak ve katma değerli ürünler üretebilmek çok daha önem kazanmaktadır (3).

Çizelge 2.3. Dünya bor rezervleri ($\times 10^3$ Ton B_2O_3) ve rezerv ömrü

ÜLKE	GÖRÜNÜR EKONOMİK REZERV	MUHTEMEL MÜMKÜN REZERV	TOPLAM REZERV	TOPLAM REZERVDEKİ PAY (%)	TOPLAM REZERV ÖMRÜ (YIL)
Türkiye	227 000	624 000	851 000	72,20	567
A.B.D.	40 000	40 000	80 000	6,80	53
Rusya	40 000	60 000	100 000	8,50	67
Çin	27 000	9000	36 000	3,10	24
Arjantin	2000	7000	9000	0,80	6
Bolivya	4000	15 000	19 000	1,60	13
Şili	8000	33 000	41 000	3,50	27
Peru	4000	18 000	22 000	1,90	15
Kazakistan	14 000	1000	15 000	1,30	10
Sırbistan	3000	0	3000	0,30	2
TOPLAM	369 000	807 000	1 176 000	100,00	784

2.2. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Bor bileşiklerinin Sümerler, Etiler, Babilliler, Mısırlılar, Romalılar, Araplar ve Çinliler gibi bazı medeniyetlerce çok eski zamanlardan beri kullanıldığı yönünde kaynaklar mevcuttur. Boraks, Orta Çağ'a kadar ağırlıklı olarak; metal işleme, kaynak, lehim, cam yapımı, altın ve gümüş işleme alanlarında

ve ilaç yapımında kullanılmıştır. Özellikle 2. Dünya Savaşı'ndan sonra bor kimyası hızla gelişmiştir. Bor, günümüzde bir çoğu alternatifsiz olmak üzere hammadde, rafine ürün ve bor bileşikleri şeklinde, çok çeşitli endüstri dallarında ve çok farklı malzeme ve ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. Gelişen teknolojiler, bor kullanımını ve bora bağımlılığı artırmakta, borun stratejik mineral olma özelliği giderek daha da belirginleşmektedir. Ham ve rafine ürünler dışında, genellikle yüksek teknoloji gerektiren yöntemler ile rafine bor ürünleri kullanılarak dünyada ticari olarak üretilen ve değişik kullanım alanları olan, Bor Sektöründe nihai ürün olarak ta sınıflandırılan "Özel Bor Bileşikleri" mevcuttur. Özel Bor Bileşikleri'nin en yaygın kullanım alanları; savunma, tarım, inşaat, metalurji ve malzeme, kimya, elektronik ve bilgisayar, ilaç ve kozmetik, iletişim, kimya, ahşap koruyucu, makine, otomotiv, seramik, spor malzemeleri, tekstil, tıp, uzay ve havacılık ve son yıllarda daha yoğun olarak gündeme gelen enerji olarak sıralanabilir. Bor; hafifliği, gerilmeye olan direnci ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sebebiyle; plastiklerde, sanayi elyafı üretiminde, lastik ve kağıt endüstrisinde, nükleer enerji santrallerinde, roket yakıtlarında da kullanılmaktadır. Camın ısıyla genişmesini önemli ölçüde indirdiği, camı asite ve çizilmeye karşı koruduğu, titreşim, yüksek ısı ve ısı şoklarına karşı dayanıklılığı sağladığı için ısıya dayanıklı cam gereçleri ve elektronik ve uzay araştırmalarında kullanılacak üstün nitelikli camların üretiminde de önemli yeri vardır. Bazı bor ürünlerinin kullanım alanları Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Bor ürünlerinin kullanım alanları (1,3,4)

ÜRÜN	KULLANIM ALANLARI
Kalsiyum borat minerali (Kolemanit)	Tekstil cam elyafı, boron alaşımları, metalurjik fluks
Sodyum borat mineralleri (Üleksit ve Probertit)	İzolasyon cam elyafı, borosilikat camları
Borik asit	Antiseptikler, bor alaşımları, nükleer endüstri, yangına dirençli malzemeler, naylon, fotoğrafçılık, tekstil, gübre, emaye ve sır, katalistler, cam, cam elyafı
Susuz boraks	Gübre, cam, cam elyafı, metalurjik fluks, emaye ve sır, yangına dayanıklı malzeme
Sodyum perborat	Deterjan ve beyazlatıcılar, dezenfekte ediciler, tekstil apreleme
Sodyum metaborat	Yapıştırıcılar, deterjanlar, bitki öldürücüler, fotoğrafçılık, tekstil apreleme
Sodyum pentaborat	Yangına dirençli malzeme, gübreler
Boraks dekahidrat Boraks pentahidrat	Yapıştırıcılar, çimento, korozyon önleyiciler, ilaç ve kozmetik, elektrolitik rafinasyon, yangına dirençli malzeme, cam, cam elyafı, zararlı bitki öldürücüler, böcek öldürücüler, deri renklendirici, tekstil apreleme

Özellikle son yıllarda, yakıt hücrelerinde hidrojen taşıyıcısı olarak sodyum borhidrür (NaBH_4)'ün ve geleceğin süper iletkeni olarak magnezyum diborid (MgB_2)'in kullanılması yönündeki çalışmalar dikkat çekicidir.

3. BOR KARBÜR MALZEMELER VE UYGULAMALARI

Bor Karbür (B_4C), Bor ve Karbon elementlerinden oluşan ve kimyasal yöntemlerle üretilen bir bileşiktir. 19. Yüzyılın ortalarında elde edilmiş, 1930'lı yıllardan itibaren ise borlu metallerin üretiminde kullanılmaya başlanmıştır (1).

Yoğunluğu $2,51 \text{ g/cm}^3$, ergime noktası 2450°C , kaynama noktası 3500°C , çekme dayanımı 155 N/mm^2 (980°C)- 162 N/mm^2 (1425°C), eğilme mukavemeti 345 N/mm^2 ve basma mukavemeti 2850 N/mm^2 olan Bor Karbür, yalnızca HF, H_2SO_4 , HNO_3 karışımlarında yavaşta olsa çözünebilmekte, bazı metaller, metal hidrürler ve metal oksitlerle borürler oluşturmaktadır. 3A ve 6A grubunun bazı metalleri, Lantanitler ve Aktinitler bor ve karbonla güçlü bor karbür fazlar oluştururlar. 4A ve 5A diborürleri bor karbürle reaksiyona girmezler (3).

İleri teknolojik seramik malzemeler içerisinde bor karbür bileşiğinin özel bir yeri vardır. Bor Karbür yüksek sertliği (Mohs skalasına göre 9,5; elmas ve kübik bor nitrürden sonra bilinen en sert malzeme), düşük yoğunluğu, kimyasallara karşı direnci, ısı dayanımı ve yüksek nötron absorblama özellikleri nedeni ile bir çok askeri ve sivil uygulama alanı bulmuştur. Bu özellikler en başta sert karbür endüstrisinde öğütücü ve parlatıcı abrasif toz olarak kullanılması ile kendini göstermiştir. Ayrıca, hafif ve sert olması nedeni ile zırhlı muharebe araç zırhlarının kuvvetlendirilmesinde, askeri amaçlı helikopter ve uçakların mekanik aksamaları ile personelin korunması amacına dönük olarak zırhlandırılmasında yaygın uygulama alanları bulmuştur. Bor Karbür'ün diğer bazı kullanım alanları aşağıda gösterilmiştir (1,3,8).

- a) Makine ve çalışma aletleri yüzeylerinin işlenmesi: Başta kesim plakaları olmak üzere, kesme ekipman bileyicileri, anaç taşlar, soğuk çekilmiş aletler, akıcı baskı aletleri, demircilik, matkap uçları, kılavuzlar, ok dövme keskisi, valfler, valf yatakları, piston ringleri, silindir düğmeleri, silindir

burçlar, silindirik yüzeyler, dişli mekanizmalar, rulman yatakları, salmastra kutuları, püskürtmeli pompalar, sertleştirilmiş oturma yüzeyleri, suni malzeme pres kalıpları, tel hadde lokmaları, ekstrüder memeleri, her türlü eğitim alet ve kesicileri, rendeler, frezeler, krank miller ve differansiyeller gibi alanlarda yüzey işlenmesinde kullanılır (1,3,8).

- b) Seramikler ve sert çalışma malzemelerinin işlenmesi: Oksitli olmayan seramikler (Si_3N_4 , SiC), oksitli seramikler (Al_2O_3 , ZrO_2), mineraller, kuvars, tabii ve sentetik taşlar, optik camlar vb. işlenmesinde kullanılır.
- c) Ateşe dayanıklı uygulamalar: İçinde bağlayıcı olarak karbon bulunan refrakterlerde karbonun oksitlenmesini önlemek için (antioksidant olarak) kullanılır.
- d) Nükleer sanayinde nötron absorblayıcı: Bor karbür termik nötronların absorpsiyonunda ve aynı zamanda nükleer kalkan ve kontrol çubukları ve şut daldırma peletlerinde kullanılır.
- e) Diğer uygulamalar: Uzay mekiklerinde dış yüzey koruyucu, yarı iletken parçaları, tekstilde iplik yönlendiriciler, filtreler, bujiler, yüzey polisaj pastaları, transformatörlerde Silisli sac yerine, mühendislik ve seramikli yapı parçaları imalatı hammaddesi, metal matriks kompozitlerde kullanılır.

ABD’de 2002 yılında toz bor karbür tüketimi 200 tonun üzerinde gerçekleşmiştir. Batı Avrupa bor karbür üretim kapasitesi 300 ton/yıl, yıllık tüketim miktarı 80-100 ton civarındadır. ABD ve Avrupa’da en önemli tüketim alanı aşındırıcılardır. Japonya’nın bor karbür tüketiminin 300-350 ton/yıl olduğu tahmin edilmektedir (1).

Devlet İstatistik Enstitüsü (DİE) verilerine göre, Türkiye 1995-2002 yılları arasındaki 8 yıllık dönemde, yaklaşık 15 tonluk Bor Karbür ithalatı yapmış ve karşılığında yaklaşık 520 Bin ABD Doları ödemiştir. Yurt içinde endüstriyel

anlamda birincil Bor Karbür üretiminin olmadığı bu dönemde (sadece 1996 ve 2001 yıllarında); aracılık hizmetleri, ara mamül işleme vb. yollarla, yaklaşık 12 581 ABD Doları karşılığı 8100 kg'lık Bor Karbür ihracatı yapılmıştır (8).

Dünyada ve Türkiye'de başlıca Bor Karbür üreticileri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Bor Karbür üreticileri (1)

BÖLGE / ÜLKE	ÜRETİCİ
<i>KUZEY AMERİKA</i>	
Amerika Birleşik Devletleri	American Elements Co.
	Boride Products
	Ceradyne Inc.
	Cercom Inc.
	Eagle Pitcher Tech.
	Elektro Abrasives
	Exolon
	Washington Mills Electro Minerals Co.
<i>AVRUPA</i>	
Almanya	Wacker Chemie GmbH-ESK (2004 yılında ABD'li Ceradyne firmasınca satın alınmıştır)
	A.C.Starck Group
	Elektroschmelzwerk Kempten GmbH
İngiltere	Sintec Ceramic
Türkiye	Büyükmihci Bor Teknolojileri A.Ş.
<i>ASYA</i>	
Hindistan	Boron Carbide India
Çin	Harwest Trading
	Mudanjiang Jingangzuan Boron Carbide Co.
Japonya	Denki Kagaku Kogyo

3.1. Endüstriyel Bor Karbür Üretimi

Bor karbür çeşitli prosesler sonucunda üretilmektedir. Endüstriyel boyutta en yaygın olarak kullanılan yöntem elektrik ark fırınlarında uygun sıcaklık ortamında, borik asit (H_3BO_3) veya bor oksitin (B_2O_3) karbon ile redüksiyonudur (karbotermik reaksiyon) (Eş. 3.1 ve Eş. 3.2).



Proses reaksiyonu endotermik olup, mol başına 1812 kJ veya 9,1 kWh/kg enerji gerekmektedir. Bu genellikle Elektrik Ark Fırınlarında 1500 - 2500°C sıcaklığa ulaşılması anlamına gelmektedir. Yani bir ton bor karbürün üretimi için gerekli olan enerji 9100 kWh tir. Reaksiyon sonucunda bor karbürün hammaddeye olan oranı: ¼ kadardır. Yani bir birim bor karbür elde etmek için dört birim hammadde kullanmak gerekmektedir (1,8).

Bor karbür üretiminde kullanılan diğer yöntemler arasında; bor oksiti, karbonun mevcudiyetinde magnezyum ile magnezotermik reaksiyona sokmak (Eş. 3.3), doğrudan bor ve karbondan sentezlemek (Eş. 3.4) ve bor triklorürü (BCl_3) karbonun mevcudiyetinde hidrojenle redüklemek (Eş. 3.5) bulunmaktadır (9).



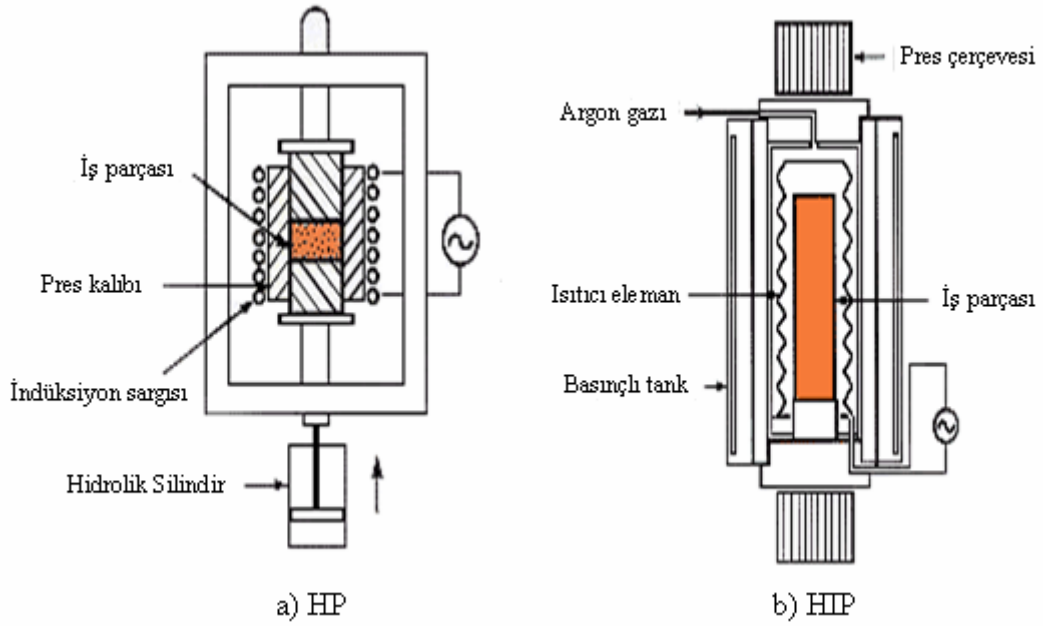
Yüksek saflıkta bor karbür, kimyasal buhar biriktirme (chemical vapour deposition – CVD) yöntemi ile de elde edilebilmektedir. Bu yöntemde bor, karbon ve hidrojen içeren çeşitli gaz karışımları ısıtılmış bir metal yüzey üzerinden geçirilerek, yüzey üzerinde bir film tabakası halinde bor karbür oluşumunu sağlayan reaksiyonlar meydana gelmektedir. En çok kullanılan gaz karışımları $\text{BI}_3\text{-CH}_4\text{-H}_2$, $\text{BCl}_3\text{-CH}_4\text{-H}_2$, $\text{BBr}_3\text{-CH}_4\text{-H}_2$ ve $\text{BCl}_3\text{-CCl}_4\text{-H}_2$ olup, rombohedral bor karbür geniş sıcaklık ve gaz oranları aralıklarında üretilmektedir (10).

Reaksiyon sonucunda elde edilen bor karbür kütleler, özel öğütme cihazları (Jet Mill vb.) kullanılarak öğütülür ve saflaştırma işlemine tabi tutulur. Bu şekilde toz boyutunda kullanım alanları bulan bor karbür ürünleri ayrıca özel prosesler kullanılarak şekillendirilerek de kullanılabilir.

İstenilen boyut ve saflıktaki bor karbür tozlarının şekillendirme prosesinde toz metalurjisi teknikleri uygulanmaktadır. Tozların şekillendirilmesi ve pekiştirilmesi sırasında; i) preslenip belirli ham yoğunluğa ulaşıldıktan sonra sinterleme, ii) aynı anda presleme ve sinterleme olmak üzere iki ayrı yöntem uygulanır. Geleneksel presleme işleminde, tek eksen boyunca uygulanan basınç sonucu kalıbı dolduran tozlar şekillendirilir. Karmaşık şekilli parçalar için Soğuk İzostatik Presler (Cold Isostatic Press - CIP) kullanılmaktadır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen CIP işleminde, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağla dolu basma hücresinin içine yerleştirilir. Basma pistonu sayesinde ortam olarak kullanılan yağ, kalıba her yönden eşit baskı yapar. Bu suretle numune bünyelerinde herhangi bir yoğunluk farkı oluşmadığı için takip eden sinterleme işleminde parçanın tüm bünyesinde yoğunluk ve yapısal homojenizasyon sağlanır. Sinterleme, yüksek sıcaklıklar kullanılarak, preslenmiş ve ham kompaktlardaki toz parçacıklarının birleştirilmesi işlemidir. Toz parçacıklarının yüksek yüzey enerjileri aşarak ya da ortadan kaldırılarak gerçekleşen sinterleme sonucu parçacıklar arasında tam ve mükemmel metalurjik bağlar oluşur (11).

Günümüzde, bor karbür de dahil olmak üzere bir çok malzeme için, hem presleme hem de yüksek sıcaklıklarda sinterlemenin aynı anda birlikte gerçekleştirildiği uygulamalar ön plana çıkmaktadır. Bu uygulamalar arasında en yaygın olanları; Sıcak Presleme (Hot Pressing – HP) ve Sıcak İzostatik Presleme (Hot Isostatic Pressing – HIP) teknikleridir (Şekil 3.1). HP işleminde çift taraflı etki eden su soğutmalı baskı plakaları arasına yerleştirilen tozlar endüksiyon ısıtma etkisiyle preslenir ve daha sonra baskı uygulamasına devam edilerek (normal veya inert gazler içeren koruyucu atmosfer altında) yüksek sıcaklıklarda sinterlenir. HIP karmaşık şekilli parçalarda kullanılır ve

Çalışma prensibi, kalıp etrafına sarılan ısıtma hücresi ve yağ yerine helyum vb. gaz kullanılması şartları haricinde CİP ile aynıdır. Ortam olarak kullanılan gazlar sayesinde yüksek sıcaklıklara çıkılabilir ve seramik esaslı tozlar pekiştirilerek sentezlenebilir (11).



Şekil 3.1. Basınç altında sinterleme a) Sıcak pres, b) Sıcak isostatik pres (DAIDO Steel)

Son yıllarda gelişen diğer yöntemler arasında; Osprey, Ceracon, ROC, STAMP ve “Kendilięinden İlerleyen Yüksek Sıcaklık Reaksiyon Sentezi (Self-propagating High-temperature reaction Synthesis - SHS)” sayılabilir. Özellikle SHS yöntemi, çok yüksek performans değerlerine sahip; refrakter, kesici takım, çok sert aşındırıcı vb. uygulamaları için geçiş metali esaslı borür, karbür, nitrür, silis gibi bileşiklerin üretimine son derece uygundur (11).

3.2. Bor Karbürün Zırh Uygulamaları

Bor karbür yüksek sertliği, düşük yoğunluğu ve diğer üstün özellikleri nedeniyle askeri amaçlı olarak havacılık ve personel koruma konularında zırh yapımına en uygun malzemelerden biridir. Bu iki temel amaç dışında tank ve hafif zırhlı araçların korunmasında da oldukça yaygın kullanımı vardır. Yeni nesil bütün helikopterlerde (Super Puma, Black Hawk, Super Cobra, Apache), uçaklarda (C-130, C-17, A400M), yüksek hız ve mobilite gerektiren zırhlı kara araçlarında (Hummer, Zırhlı Personel Taşıyıcı vb.), havadan taşınabilir araçlarda, personel koruyucu balistik yeleklerde, tanklarda (zırh tabakası veya ilave zırh olarak), komuta kontrol merkezlerinde zırh malzemesi olarak bor karbür kullanılabilmektedir.

Dünyada zırh sistemlerine ilişkin çalışmalar büyük bir gizlilik içerisinde yürütülmektedir. Ülkemizin bor madeni açısından doğal zenginliği de göz önünde bulundurulduğunda, bor karbür ve özel bor bileşiklerinin, zırh vb. savunma ihtiyaçlarına yönelik olarak yurt içinde geliştirilmesi ve üretilmesi stratejik önem taşımaktadır.

3.2.1. Zırh sistemleri

İlk çağlardan beri yapılan savaşlarda askerler ve askeri araçlarda, saldırıların doğrudan etkisinden korunma amaçlanarak çeşitli malzemeler zırh olarak kullanılmıştır. Günümüzde silahlı kuvvetlerin envanterinde yer alan zırhlı araçların zırh korunmasını artırırken, ağırlığı artırmayacak önlemler ile ilgili çalışmalar malzeme ve konfigürasyon üzerinde yıllardır yapılmaktadır. Zırh malzemeleri konusu; fiziksel metalurji, katı-hal fiziği, tekstil bilimi, kimya, delme mekaniği, balistik, yüzey bilimi ve malzeme analizi gibi muhtelif uzmanlıkları içine alacak şekilde büyük oranda disiplinler arası bir sahadır.

Malzeme Bilimi, yapısal zırh ve anti-zırh uygulamalarında silahlı kuvvetlerce ihtiyaç duyulan üst seviye malzemeler için temeli oluşturur. Malzemeler konusundaki askeri araştırmalar, performans ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla; yeni malzemelerin sentezlenmesi, mevcut malzemelerin değiştirilmesi ve mikroyapılar ile kompozit mimarilerinin tasarlanması gibi hayati alanları kapsar. Zırh ve anti-zırh malzemelerinin seçimi silahlı kuvvetlerce gereksinim duyulan performans ve özelliklerin elde edilmesinde çok önemli bir rol oynar. Seramikler, metal matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler gibi gelişmiş malzemeler, balistik koruma sistemlerine uygulanmaları amacıyla yeni işleme teknolojileri ve zırh tasarımlarıyla birleştirilmektedir. 2000'li yılların savunma teknolojilerinde yaygın kullanıma aday zırh malzemelerinde, her türde ileri malzemenin kullanılabileceği söylenebilir. Personel ve zırhlı araç koruması için öngörülen zırh malzemeleri şunlardır (12):

- a) Metalik: Sert çelikler, zırh çelikleri, hafif alüminyum alaşımları, hafif titanyum alaşımları.
- b) Seramik ve Cam: Oksit esaslı alumina, zirkonya, titanya ve kromya; oksit-dışı esaslı bor karbür, silikon karbür, borür ve nitrürler; sermet esaslı alumina/alüminyum, silikon karbür/alüminyum; camlar: S-2 zırh camları.
- c) Polimer Kompozit: Cam takviyeli plastik lamineler, aramid elyaf takviyeli plastikler, kevlar petek sandviç paneller, karbon kompozitler.

Belirli uygulamalar için malzemelerin seçimi karmaşık bir süreçtir. Etki dağılımı, çevresel faktörler, çalışma sıcaklığı vb. görev koşullarının çok iyi tanımlanması ve bilinmesi gereklidir. Zırh uygulamaları için gerekli olan malzemelerin seçimi, değişik türdeki silahlar ve bunlara ait mermi tipleri değerlendirilmesi gerektiğinden karmaşık bir çalışmadır. Zırh plakalarında bulunması gereken genel özellikler; süneklik ve dayanıklılık olarak sayılabilir (13).

Süneklik özelliği, malzemenin biçiminin bozularak yeniden şekil verilebilmesi kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Biçim deformasyonu enerjinin emilmesi, absorbe edilmesi için gereklidir. Zırh plakaları, kolay kırılabilir özellikte olmamalı, darbeye karşı enerji absorbe edebilmelidir. Genellikle metallerin ve metal alaşımların süneklik özelliğine sahip olduğu kabul edilebilir. Burada çelik, alüminyum ve titanyumdan bahsedilebilir. En çok polimerlerde bu özellik mevcuttur. Diğer taraftan sünekliğin karşıtı gevrekliktir (kırılganlık). Tebeşir, kireçtaşı buna bir örnektir. Tebeşiri ellerimizle kolayca kırabiliriz. Öte yandan porselen bir tabağı kırmak için bir alete ihtiyacımız vardır. Tebeşir ve porselenin her ikisi de seramik bazlıdır. Bu nedenle bu malzemelerin mimarileri çok önemli olup mekanik yapılarıyla ilişkilidir (13).

Zırh plakaları için diğer bir malzeme özelliği tokluktur (dayanıklılık). Tokluk enerjinin emilmesi kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Alüminyum ve çelik alaşımları dayanıklıdır. Bununla birlikte bir çekiç darbesiyle alüminyum deforme olurken, çelik fiziki formunu korur. Genellikle tokluk, kuvvetin ve sünekliğin bir kombinasyonudur. Zırh sistemlerinin hafif olması araç veya personelin hareket kabiliyetini artıracaktır. Bu nedenle zırh malzemelerine ilişkin önemli bir fiziksel özellik olarak, yoğunluktan bahsedilebilir (13).

Diğer bir unsur, malzemelerin tedarik edilebilirliğidir. Stratejik malzemelerin yurt dışından ithalinde zorluklarla karşılaşılabilir. Örneğin Türkiye'de Titanyum maden cevheri mevcut değildir. Buna karşılık Bor madeninin Dünyadaki toplam rezervlerinin %70'ten fazlası Türkiye'de bulunmaktadır (13).

Malzemelerin Balistik Darbe Davranışı

Yekpare Malzemeler

Yüksek hızlı merminin yüzeye vuruşunda, birtakım sonuçlar ortaya çıkar, bunlar; zırh plakasına kinetik enerji transferi ve zırh plakasında bölgesel yüksek sıcaklık dalgasıdır. Burada kinetik enerji ile ilgili olarak şundan bahsedilebilir: Bütün enerji, vuruş yüzeyine transfer edilir. Zırh plakasının mekanik özelliklerine bağlı olarak, plakanın tamamı veya bir kısmı delinebilir. Sünek malzeme için delinme kolay olabilir. Dayanıklı malzemelerin delinmesi zordur. Kırılgan malzemelerin delinme imkanı yapılarına bağlıdır. Ya zırh plakası kolaylıkla kırılır ya da mermi parçalanır. Yekpare malzemelerin delinme direnci malzemenin sertliğinin artırılmasıyla ve azaltılmasıyla ilgilidir. Uygun sonuç için hem sertliğin hem de kırılganlığın artırılması gereklidir. Bu nedenle zırh plakası yüksek sertlikte daha kolay kırılabilir. Delinme tamamlanmalıdır. Merminin vereceği hasar, sertliğin artırılmasıyla daha da yükselecektir. Bundan dolayı merminin kırılan parçaları zırh plakasına yeterince zarar vermeyecektir. Mermi yüzeye temas ettiğinde, temas bölgesinde bölgesel bir sıcaklık artışı oluşur. Yüksek sıcaklıklar, malzemelerin dayanıklılığını azaltır. Sonuç olarak zırh plakasında bölgesel değişimler ve kolay delinme gerçekleşir. Bu etkiye "Adiyabatik Kayma" denir. Alüminyum ve alüminyum alaşımları adiyabatik kaymalara karşı hassastır (13).

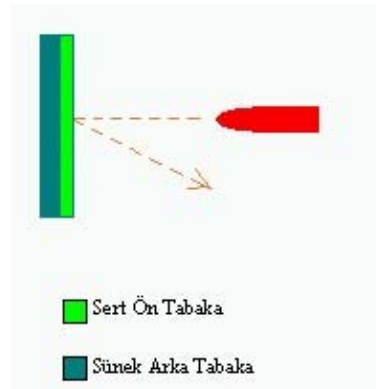
Elyaf Takviyeli Malzemeler

Elyaf takviyeli malzemelerin yapısı matris polimerlerin içerisine gömülmüş sert elyaflardır. Elyaflar kompozit dayanıklılık verir. Polimer matris elyafları bir arada tutar. Darbe anında vuruş enerjisi elyaflara dağıtılır. Darbenin yükü liflerin üzerinde farklı baskılar meydana getirir. Yüklenen gerilim elyaf parçaları üzerinde dağılır ve gerilim direnci dağıtılır. Elyafın diğer bir özelliği baskıyı kesmesidir. Bu yüzden elyaf takviyeli kompozitin dayanıklılığı

yapısındaki elyafla sağlanmaktadır. Elyaf lar matrisin içerisinde yalnız değildir. Ancak diğer elyaflarla desteklenmiştir. Merminin enerjisi elyafların içerisinde az veya çok homojen dağılır (13).

Tabakalı Malzemeler

Tabakalı malzemeler genellikle, yekpare malzemelere göre delinmeye karşı daha iyi direnç gösterirler. Tabakalı malzemelerde, art arda gelen tabaka dizaynı en iyi performansı verir. Genellikle darbenin etkisini minimize etmek için sert plaka öne konur. Sert yüzey zor delinir. Ya merminin parçalanmasına ya da merminin geri tepmesine neden olur. Öte yandan, öndeki sert yüzey kolaylıkla kırılabilir çünkü sert malzemelerin doğasında kırılganlık vardır. Bu nedenle, sert yüzey daha sünek malzemelerle desteklenir. En iyi örnek önde yüksek karbon çeliği (sert) ve arkasında düşük karbon çeliğinden (sünek) oluşan zırh yapısıdır (Şekil 3.2) (13).



Şekil 3.2. Tabakalı zırh malzemeleri (13)

Seramik zırh malzemesinin çalışma prensibi yüksek hızla gelen çelik veya diğer ağır metal esaslı zırh delici malzemelerin sivri uçlarının, yüksek sertliklerinden dolayı seramik ön yüz tarafından kırılarak durdurulması esasına dayanır. Bu işlem esnasında delici malzemenin kinetik enerjisinin yaklaşık %40'ı seramiğin konikal kırılması ile ön sert yüz tarafından absorbe edilirken geriye kalan enerji plastik altlığın deformasyonu ile absorblanır.

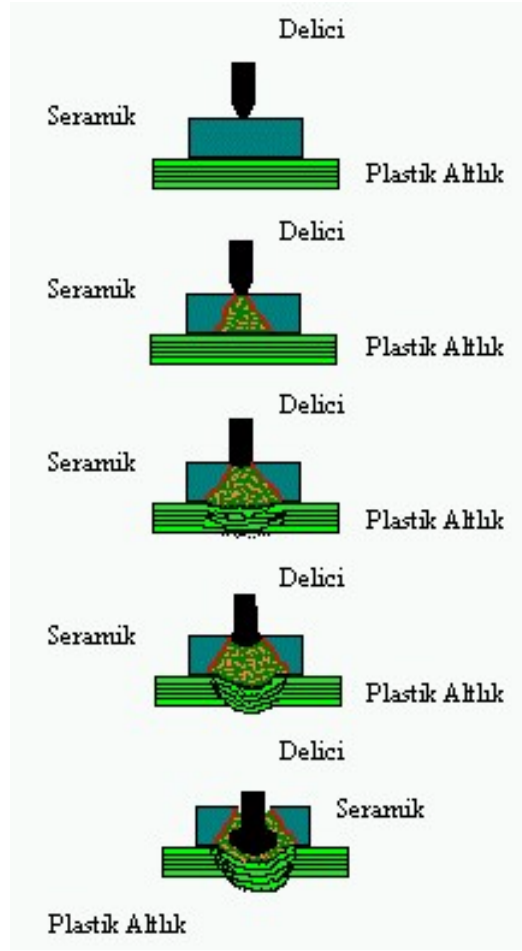
Mermi içeri doğru nüfuz ettikçe sivri uç körleştiği gibi bazı durumlarda çekirdek kısım kırılarak ufak parçalara da ayrılabilir. Bütün bu işlemin tamamı 15-30 mikro saniye içinde tamamlanır. Bu sürenin ilk 9 mikro saniyesi içerisinde seramik ve delici çekirdek kısımların kırılması gerçekleşirken geri kalan sürede ise altlık malzemedede deformasyon başlar. Merminin delici çekirdek kısmının kırılarak parçalanmasına malzeme sertliği yanısıra malzeme bünyesinde ses dalgalarının yayılma hızı da etki eder. Seramik malzemenin ses dalgalarını yayma hızı ne kadar yüksek ise delici ucun, darbe etkisi ile oluşan ve seramiğin alt yüzünden geri dönen ses dalgaları ile kırılması da o kadar kolay olur. Mermilerde kullanılan delici çelik çekirdek kısmın sonik hızı 4,8 km/sn civarındadır. Öte yandan, bor karbür esaslı seramiklerdeki sonik hız en fazla olduğundan ve sonik hızlar arasındaki farkın en fazla olması sebebi ile zırh delici mermilerin durdurulmasında en iyi balistik özellikleri göstermeleri doğaldır. Diğer seramik türlerinde sonik hız seviyesinin bor karbür dışında benzerlik gösteriyor olması balistik özelliklerinin de birbirine yakın olduğunu ifade eder. Merminin zırh sistemindeki seramik yüzeye çarpması sonucu seramik arkasındaki plastik destek malzemesi ve arayüzeyde kullanılan özel yapıştırıcı, seramik kısım kırılmış olsa bile ufak parçalar olarak yerinde kalmasını ayrıca da merminin daha fazla ileri gitmemesini sağlar (14).

Teknik seramik malzemeler yüksek sertlik, elastik modül ve sonik hızlara sahip olmaları, metallere göre daha düşük yoğunluk göstermeleri nedeni ile hafif zırh uygulamalarında plastik esaslı malzemelerle desteklenerek kullanılırlar. Aynı türdeki tehditlere karşı bor karbür en iyi balistik özelliği gösteren zırh seramiği iken normal sinterlenmiş aluminadan hazırlanmış numunelerin balistik performansı daha düşüktür. Bununla birlikte alumina esaslı zırh seramikleri oldukça ekonomik olmaları nedeni ile balistik uygulamalarda en yaygın kullanılan malzemedir (14).

3.2.2. Bor karbür esaslı seramik zırhlar

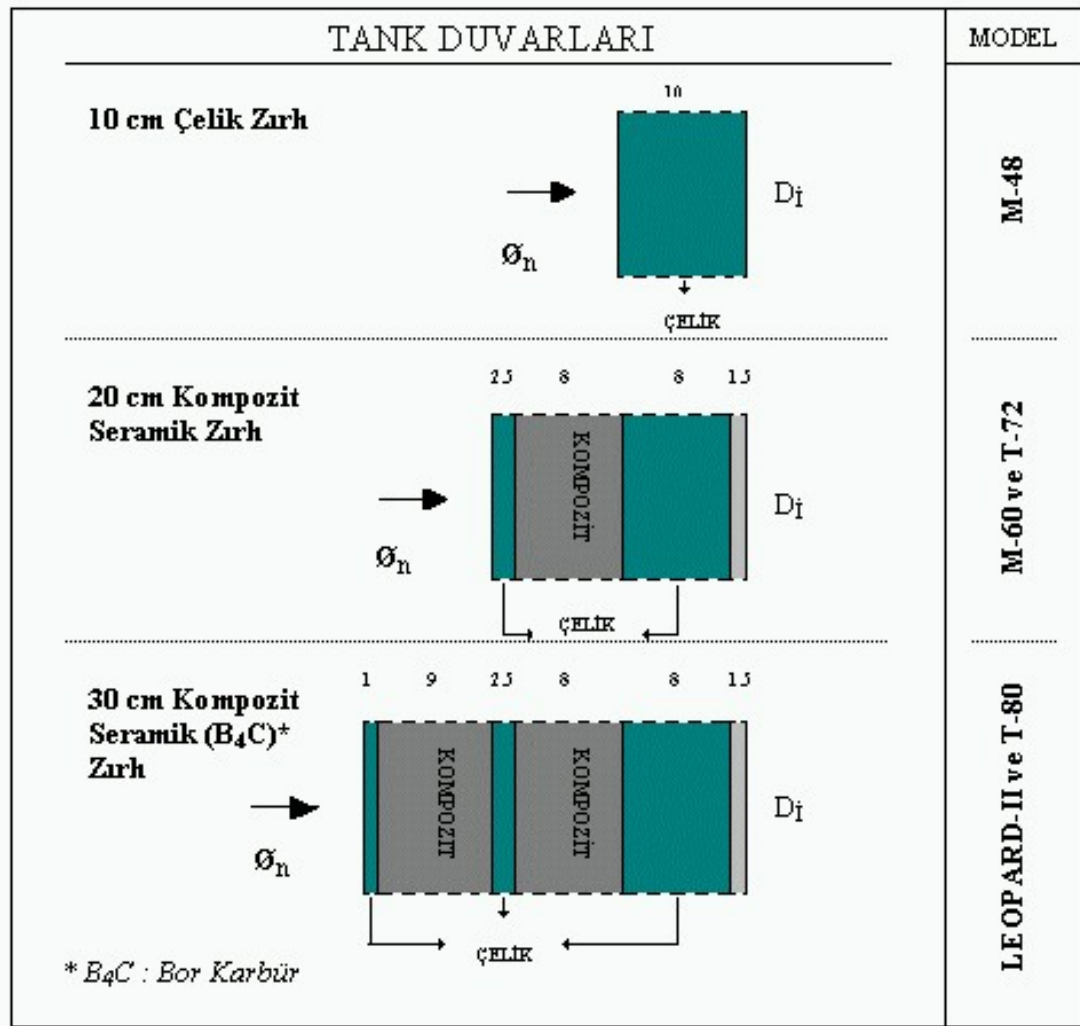
Hafif Zırhlı Araçlar için 1960 yıllarında başlatılan ikili sistemleri oluşturma çalışmaları, ilerleyen zaman içerisinde bu sistemlerde seramik malzemeleri de kullanma noktasına kadar varmıştır. Bu ikili sistemlerde, dışta yüksek sertlikte bir çelik zırh plakası ve altında daha az sert fakat tokluğu yüksek alüminyum alaşımından zırh plakaları yer almaktadır. Burada amaç, kinetik enerjili mükemmatın dıştaki çelik zırhta kırılmasını ve hızının düşürülmesini sağlayıp içindeki yüksek tokluktaki alüminyum alaşımından üretilmiş zırh delmesini önlemektir. Çeliğe göre çok daha yüksek sertliğe sahip seramik malzemeler de bu özellikleri nedeniyle anlatılan zırh sistemleri için cazip görünmektedirler (15).

Seramik zırh malzemesinin çalışma prensibi yüksek hızla gelen çelik veya diğer ağır metal esaslı delici malzemelerin yüksek sertliğinden dolayı bor karbür tarafından durdurulması prensibine dayanır. Bu işlem esnasında delici malzeme enerjisinin büyük bir kısmı seramiğin konikal kırılması ile bor karbür tarafından absorbe edilir ve Şekil 3.3'te şematik olarak gösterildiği gibi delicinin sivri uç kısmı malzeme içerisine nüfuz ettikçe yuvarlaklaşır. Böylece arkadaki plastik destek malzemesi tarafından seramiğin kırılma bile tek parça olarak kalması, ayrıca merminin daha fazla ileri gitmesi önlenmiş olur.



Şekil 3.3. Delici merminin seramik zırh içerisinde ilerlemesi (15)

Tanklarda ve zırhlı araçlarda seramik malzemelerin zırh amaçlı uygulamaları biraz daha yüksek ateş gücüne maruz kaldıklarından farklılık göstermektedir. Bu tür askeri araçlarda daha çok kompozit yapıli zırh malzemesinin kullanımı gerekmektedir. Şekil 3.4'te tank yüzeylerinde kullanılan değişik zırh uygulamaları gösterilmektedir (15).



Şekil 3.4. Tanklar için çeşitli zırh uygulamaları

ABD Ordu Araştırma Laboratuvarı (Army Research Laboratory-ARL)'nda vücut zırhı konusunda, önemli ölçüde azaltılmış ağırlıklarda, öldürücü hafif silah ve şarapnel tehditlerine karşı askeri personelin korunmasını sağlayacak yeni konseptler araştırılmaktadır. Hafif personel zırh sistemleri konusundaki başlıca araştırmalar ve amaçları aşağıda gösterilmiştir (16).

- a) Temel Araştırmalar: Malzemelerin Dinamik Özelliklerinin Karakterizasyonu, Malzeme Dinamik Modelleme ve Simülasyonu, Nanomalzemelerin Sentezi ve Karakterizasyonu, Polimerik Bariyer Malzemelerinin Formülasyonu ve Karakterizasyonu.

- b) Uygulamalı Araştırmalar: Aday Malzemelerin Balistik Performansının Deneysel Olarak Tespiti, Tasarım Prensipleri ve Aday Seçim Kriterleri Geliştirmesi, Aday Zırh Sistemlerinin İşlenmesi ve Üretilmesi, Kimyasal ve Biyolojik Tehditlere Karşı Nanomalzeme Kaplamaların Etkinliğinin Karakterizasyonu, Gelişmiş Soluyucu Komponentlerin ve Koruyucu Elbise Sistemlerinin İşlenmesi ve Karakterizasyonu.
- c) Amaçlar: Daha Yüksek Kütle Etkinliği (Geliştirilmiş Koruma, Daha Düşük Ağırlık), Genişletilmiş Uygulama Sahaları, Geliştirilmiş Kapsama Alanı, Geliştirilmiş Hareket Kabiliyeti, Düşürülmüş Maliyet (Tasarım Halindeki Teknolojilerin Olgunlaştırılması)

Seramikler, metal matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler gibi gelişmiş malzemeler, gizlenilebilir personel koruma sistemlerine uygulanmaları amacıyla yeni işleme teknolojileri ve zırh tasarımlarıyla birleştirilmektedir (16).

Üzerinde önemle durulan diğer bir konu da; azaltılmış alansal ağırlık yoğunluklarında zırh-delici (Armor Piercing-AP) küçük kalibreli tehditleri bertaraf edebilecek zırh tasarımları geliştirme ihtiyacıdır. ABD’de, 17 kg/m^2 ’lik veya daha az bir alansal ağırlık yoğunluğunda, 7,62 mm’lik AP M2 mermisini bertaraf edebilecek personel zırh sistemi geliştirmek amacıyla bir program yürütülmektedir. Bu çalışma, malzeme tasarımını deneysellik ve nümerik simülasyonla entegre etmektedir. Nümerik simülasyon; sistemin balistik performansı üzerinde, malzeme komponentlerinin kalınlık, ağırlık ve mekanik özelliklerinin etkilerini değerlendirmek amacıyla yürütülmektedir (16)

Bahsekonu çalışmada personel zırh sisteminin odak noktası, fiber takviyeli polimerik kompozit tabakası ile desteklenmiş seramik plakayı içeren bir malzeme sistemidir. Seramik plaka için aday malzemeler; alüminyum nitrat (AlN), alüminyum oksit (Al_2O_3), bor karbür (B_4C) ve silikon karbür (SiC)’ü

içermektedir. Kompozit tabakalar için aday malzemeler ise; cam/polyester, aramid/fenolik ve spectra/poliüretan'ı kapsamaktadır (16).

Sertliği yaklaşık 750 Vickers sertlik derecesinde olan en sert çelikle kıyaslanınca, 2000-3000 Vickers sertlik derecesindeki seramiklerin, aynı mühimmata karşı, çeliğe oranla birkaç kat daha etkin olabileceği rahatlıkla söylenebilir. Bunun yanında, sertliğin getirdiği parçalanma özelliği nedeniyle, ilk atıştan sonraki atışlarda yeterli koruma etkisini kaybetmesi, seramik zırhın olumsuz bir yanı olarak görülebilir. Burada ise, ikinci atışta hedefe isabet etme olasılığının büyüklüğü önem kazanır (15).

İkili zırh sistemlerinde kullanılan seramik zırh plakaları ağırlık bakımından, çelik zırh plakalarına göre çok önemli bir üstünlük sağlamamaktadır. Bu plakaların hafif zırhlı araçlarda kullanımının uygun görüldüğü araç bölümleri, kapak muhafazaları, kapılar ve benzeri parçalardır. Seramik esaslı malzemelerin hafif zırhlı sistemlerin bir parçası olarak kullanılmasındaki temel neden genel olarak yüksek sertlik ve düşük yoğunluk göstermelerinden ileri gelmektedir (15).

Zırh uygulamalarında kullanılan ileri teknoloji seramikleri, karşılanabilir maliyete, araç/personel üzerine getireceği ilave ağırlığa ve tehdide bağlı olarak genelde; sinterlenmiş ve HP veya HIP tekniği ile üretilmiş bor karbür, silisyum karbür, alümina ve volfram karbür malzemelerden oluşmaktadır (15).

Bor Karbür de yüksek kütle etkinliği gösteren pahalı bir malzemedir. Kullanımı daha çok yüksek maliyeti kaldırabilen helikopter üretiminde olmaktadır. Yaklaşık benzer özelliklere sahip ve biraz daha düşük maliyetli bir malzeme olan Silisyum Karbür için de benzeri bir uygulamadan bahsedilebilir (15).

Helikopterlerde ve zırhlı yelek yapımında kullanımı genellikle 10 x 10 x 1 cm boyutlarındaki bor karbür levhalarının kevlar veya spektra plastik malzemeleri

ile desteklenerek istenen boyutlarda koruma panellerinin yapılması ile gerçekleştirilir. Bu paneller aracın veya personelin korunması gereken kısımlarına gelecek şekilde yerleştirilirler. Bir askeri amaçlı helikopterde korunması gereken önemli yerler helikopterin alt kısımları, motor kabini ve pilot kabininin yan yüzleridir. Plaka şeklinin yanısıra yine helikopter pilot sandalyeleri de bor karbürden imal edilebilirler.

3.3. Bor Karbür Aşınma Uygulamaları

İnert (eylemsiz) metal olmayan katılar olan seramikler ve metalik bağlı seramikler olan sermetler tribolojik amaçlarla uzun bir süredir kullanılmaktadır. Yüksek üretim maliyetlerinin kullanımlarını kısıtlamasına rağmen, bu malzemelerden; yüksek sıcaklık veya yüksek korozif ortamlar ve aşınmaya karşı yüksek direncin istendiği durumlar gibi özel uygulamalarda yararlanılmaktadır (17).

Üstün aşınma direncine sahip oldukları bilinen ileri teknoloji ürünü semente karbürler ve metal matriksli kompozitler (oksitler, nitrürler, karbürler ve borürler), diğer tüm toz metalurjisi ürünlerinden daha çok ve çeşitli endüstriyel uygulama alanı bulabilmektedirler (18,19).

Elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert malzeme olan bor karbürün aşınma uygulamalarında özel bir yeri vardır. Kovalent bağ yapısı nedeniyle bor karbürün mükemmel kimyasal ve termal kararlılığı da bu uygulamalar için bir avantaj oluşturur.

3.3.1. Aşınma

Aşınma; i) Bir yüzey ile bu yüzeye temas eden madde veya maddeler arasındaki karşılıklı hareket nedeniyle, genelde ilerleyici malzeme kaybı içeren bir katı yüzey hasarı, veya, ii) Yüzeydeki karşılıklı hareketin sonucu

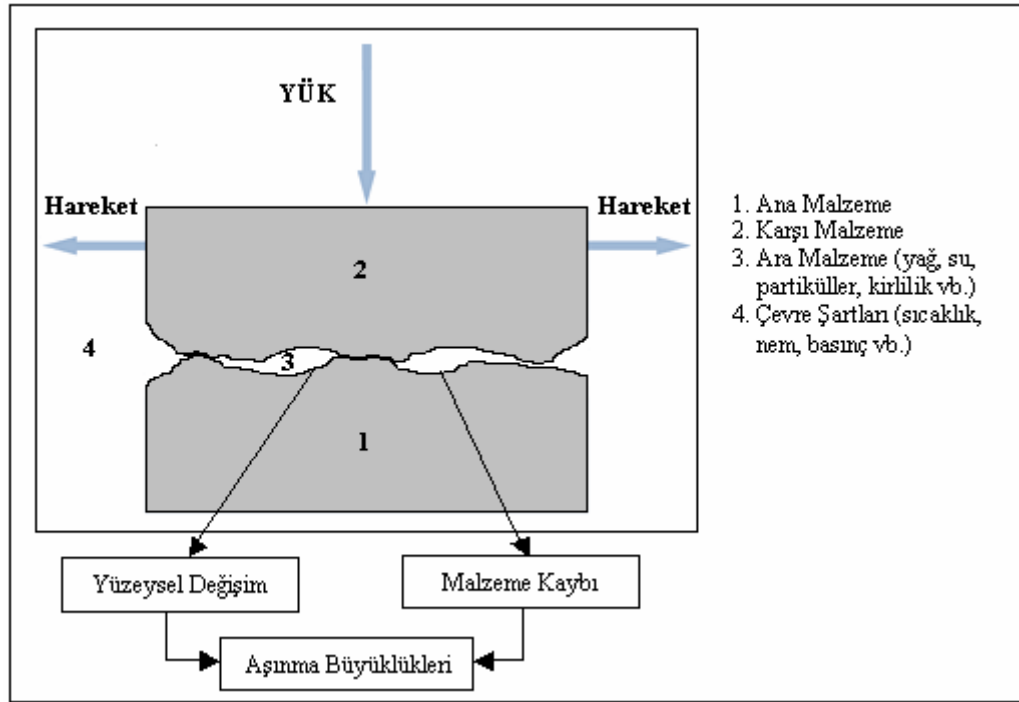
olarak, bir cismin işleyen yüzeyinden ilerleyici madde kaybı olarak tanımlanmaktadır (20).

Katı cisimlerin yüzeyleri oksitlerle ya da yağlayıcılarla kaplansalar bile, oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonunun zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı-katı teması olur. Bu temaslar ise aşınmaya neden olmaktadır.

Bir aşınma sisteminde;

- 1- Ana Malzeme (Aşınan)
- 2- Karşı Malzeme (Aşındıran)
- 3- Ara Malzeme
- 4- Çevre Şartları
- 5- Yük
- 6- Hareket

temel unsurlar olarak sayılabilir. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem (tribosistem) olarak adlandırılır. Triboloji; karşılıklı hareket halindeki etkileşen yüzeylere ilişkin bilim ve teknoloji alanıdır; sürtünme, yağlama ve aşınma bilimi olarak da tanımlanabilir. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi Şekil 3.5’de verilmiştir (20,21).



Şekil 3.5. Tribolojik sistem yapısı (21)

Aşınma hasarları

Makine ve konstrüksiyon tasarımında aşınma, dikkate alınması gereken çok önemli bir faktördür. Temas eden yüzeylerde sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının azalmasına, malzeme kaybına, üretim süreçlerinin aksamasına, iş yeri kazalarına, rakip firmalarla rekabet edememeye neden olmaktadır. Gelişmiş ülkelerde Gari Safi Milli Hasıla'nın tahminen %7'si aşınma nedeniyle harcanmaktadır (21).

Aşınma Türleri

Aşınma dört temel grupta incelenmektedir; adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, oyuklanma / kalkma ve kimyasal / korozyon etkisidir. Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi parametrelerden etkilenmektedir. Aşınmanın sonucu ortaya çıkan izler,

mekanizmanın belirlenmesinde oldukça önemlidir. Başlıca aşınma türleri aşağıda açıklanmıştır (21).

Yapışma aşınması olarak da bilinen adhesiv aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, bu tür aşınma hasarlarının hızlandırıcı etkisi bulunmaz. Adhesiv aşınma iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sırasında yapışması ve kayması sonucunda küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşmaktadır. Teorik olarak, malzeme yüzeyinde bulunan düzensizlikler sebebiyle birbirine temas etmekte olan iki yüzey arasında uygulanan yüke bağlı olarak bir çok noktada temas gerçekleşir. İki metal yüzeyi birbiri ile temas ettiği taktirde, malzemelerin yüzeylerinde bulunan izler ve/veya düzensizlikler malzeme yüzeyinde bölgesel yüksek basınçlar oluştururlar ve yüzey filmlerinin kırılmasına neden olurlar. Temiz metal yüzeyleri birbirlerine temas ettirildikleri zaman, yüzeylerdeki elektrostatik düzensizlikler sebebiyle, kaynama için bir eğilim söz konusudur. Eğer bir yüzey diğer yüzey üzerinde hareket halinde ise, kaynamanın olduğu bölgeler kırılacaktır. Kırılma düzlemi orijinal arayüzey olabilmekte ve ana malzemede bir zayıflamaya neden olmaktadır (21).

Aşınma ve yağlayıcılar üzerine yapılan çalışmalarda, yüzeylerde yağlayıcı olmazsa, yüzeye dik olan yükün artışına bağlı olarak, aşınmanın da lineer olarak arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca çoğu metaller için yapışma sabitinin sürtünme katsayısı ile ilişkili olduğu ve malzeme transferindeki azalmanın, yapışmanın boyut ve sayısındaki azalmanın bir sonucu olduğu bulunmuştur. Buna göre, adhesiv aşınmada, aşınma miktarı; normal yük, kayma mesafesi ve aşınan yüzeyin sertliği ile orantılıdır. Metalografik çalışmalar sonucunda belirlenen başlıca özelliklerden biri de, malzeme taşınımının yumuşak metal yüzeyinden sert olan metal yüzeyine doğru olmasıdır (21).

Adhesiv aşınmanın etkisinin azaltılması için yağlayıcı uygulanması tatmin edici çözümler sunabilecektir. Araştırmalar, malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde sert olmasının, adhesiv aşınmanın

azaltılmasında faydalı olduğunu göstermiştir. Genellikle sert malzemeler çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler. Ayrıca alaşımlama adhesiv aşınmada çok etkili bir parametredir. Malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olmalıdır (21).

Abrasiv Aşınma, çok hızlı bir şekilde gelişen, etkisini anında belli eden ve çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve sistemin hasarına sebep olacak şekilde gelişen bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınma iki yüzeyden birinin çok sert ve yüzeyin pürüzlü olduğu şartlarda meydana gelir. Benzer davranış çok sert partiküllerin daha yumuşak bir yüzeye batmasıyla da görülmektedir. Etki, yumuşak malzemenin üzerinde gelişen belirgin çizikler şeklinde ortaya çıkmaktadır. Aşınma etkisi sert partikülün, yumuşak malzemenin yüzeyinden parça kopartarak uzaklaştırmasıyla olur ve parçanın kopması sırasında yapışmanın olmadığı bir sistemle gerçekleşmektedir. Yüzeyden malzeme kaybının çok hızlı geliştiği bir aşınma mekanizmasıdır. Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrasiv aşınmaya tabi tutulabilmesi için, ikinci malzemeden çok daha yumuşak olması gerekir. Bu sebeple abrasiv aşınmayı minimuma indirmek için aşınmaya uğrayan malzemenin daha sert olması istenir. Malzeme sertliği; alaşımlama, ısıtma işlem ve yüzey sertleştirme (anodizasyon, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrürasyon, plazma sprey, borlama vb.) uygulamaları ile artırılabilir (21).

Oyuklanma ve Kalkma, aşınma mekanizmalarından biridir ve metal yüzeyinin yorulması sonucu ortaya çıkan hasarlardır. Oldukça düşük gerilmeler altında yapılan hızlı uygulamalarda metal yüzeyinde oyuklara benzer bir çok boşluk meydana gelebilir. Yüzeyin yorulma kusurunun karakteristiği normal yorulmadan farklılıklar içermektedir. Çalışmalar inklüzyon dokusunun, segregasyonun, bant teşekkülünün ve kalıntı ostenit miktarının oyuklanmayı etkilediğini göstermiştir (21).

Kazıma, korozyonla desteklenen aşınma türleri arasında çok yaygın olan bir aşınma türüdür. Yük altında birbirine temas eden iki yüzey arasında hafif

titreşimli hareket sebebiyle oluşmaktadır ve oksit kalıntıları tarafından çevrelenen yüzeyde oyuklanma gibi kendi kendini geliştirir. İki metal yüzey birbirine temas ettiği zaman, yük altında yüzeyde bulunan düzensizlikler sebebiyle yapışma oluşur. Bundan sonra yüzeyde bu yapışma noktalarından koparak kaynaklanmış alanlarda aşınma ürünü kırıntılar yer alır. Bu parçalar çok küçüktür ve oksitlenmek için gerekli olan ısıya ulaşmış durumdadır. Bu oksit kalıntıları küçük hareketlerin oluşması sebebiyle uzaklaştırılamazlar. Bu parçacıkların abrasiv karakterli olmaları sebebiyle, malzeme oldukça etkili aşınma hızına ulaşmaktadır (21,22).

Kimyasal veya Korozyon aşınma, ortam ile malzeme arasındaki kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonların etkin olduğu aşınma türüdür (20,22).

Aşınma deneyleri ve ölçüm yöntemleri

Aşınma miktarını, kantitatif ve kalitatif olarak ölçmek için çok sayıda farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunun sebeplerinden biri, aşınma hasarının çok sayıda farklı şekilde oluşmasıdır. Aşınma esnasında gerçek malzeme kaybının oluşması durumunda, genelde kullanılan ölçüm yöntemi, kaybedilen malzemenin miktarının, örneğin ağırlık eksilmesi olarak ölçülmesidir. Bir diğer alternatif olarak, aşınma prosesinin parça üzerinde yüzey bozulmasına sebep olması halinde, yüzey kabalaşması veya çatlama ölçülebilir. Aşınma miktarı da, ölçüm yöntemi seçimine etki eden sebeplerden biridir. Çok fazla miktarda aşınma gerçekleştiği takdirde, hacim veya kütle değişikliği gibi göreceli olarak basit ve ucuz ölçüm yaklaşımları benimsenebilir. Bunun tersi olarak çok az miktarda aşınma oluştuysa, daha hassas ve maliyetli tekniklerle hacim ve kütledeki küçük değişimler tespit edilebilir. İçinde bulunulan şartlar da, aşınma ölçümü yöntemi seçimini belirler. Laboratuvar ortamında malzeme üzerinde çok daha hassas bir ölçüm yapılabilecekken, açık sahada daha az kesin ölçümler yapılabilir. Aşınma ölçümü yöntemlerinin spesifik durumlara göre modifiye edilmesi uygun, bazen de gerekli olacaktır (22,23).

Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini artırdığı gibi, onarım için geçen süre de, üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin tespiti için de bir çok laboratuvar deneyinin yapılması gereklidir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model, basit geometrik şekile sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir (21,22).

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür (21):

- a) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler.
- b) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin abrasiv aşındırma etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler.

Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması, bu yöntemin dezavantajıdır (21,24).

Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} g hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı; (g/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybindan hareketle, kullanılan malzemenin

yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir (21,24,25).

Bu tanımlamalara göre, ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan eşitlik (Eş. 3.6) aşağıda belirtilmiştir (25):

$$W_a = \frac{\Delta G}{d.M.S} (\text{mm}^3.N^{-1}m^{-1}) \quad [3.6]$$

Burada:

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

ΔG : Ağırlık kaybı (mg),

M : Yükleme ağırlığı (N),

S : Aşınma yolu (m),

d : Yoğunluk (g/cm^3)

olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir (Eş. 3.7) (21).

$$W_r = \frac{1}{W_a} (\text{N.m} / \text{mm}^{-3}) \quad [3.7]$$

Kalınlık farkı metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla $\pm 1 \mu\text{m}$ duyarlılıkla ölçülmelidir (21,26).

İz değişimi metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir (21,26).

Radyoizotop metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya α -parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle ancak özel amaçlarla kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir yöntem değildir (21,26).

3.3.2. Bor karbür malzemelerin aşınma davranışı

Seramikler, farklı bileşimdeki kristal ve cam yapılı fazları içeren ve genellikle poroziteye sahip olan malzemelerdir. İyonik ve kovalent bağ yapısına sahip olan seramik malzemelerin, yüksek sıcaklıktaki mukavemet ve sertlikleri, korozyona karşı dirençleri (özellikle şiddetli koroziv ve oksitli atmosferde) ve yorulma dirençleri yüksektir. Bu özellikleri ile seramik malzemeler, aşınmanın etkili olduğu uygulamalarda kullanılan bir malzeme grubunu oluşturmaktadır (17,27).

Seramikler genel olarak iki sınıfa ayrılırlar (17):

- a) Hidratlı alüminasilikatların küçük kristallerini birinci derecede içeren pişmiş killer,
- b) Maliyeti yüksek ileri teknoloji ürünü saf yoğun oksitler, nitrürler, karbürler ve borürler.

İleri teknoloji ürünü seramikler, özellikle 20. yüzyılın sonlarına doğru geliştirilmiştir. Geleneksel seramiklerden hammadde, üretim yöntemleri ve mikroyapısal açılardan farklılıklar gösterirler. Çok ince tozlardan üretilen bu seramikler üstün mekanik özelliklere sahiptirler. İleri teknoloji ürünü seramik malzemelerinin aşınma davranışları incelendiğinde, ortam şartları (örneğin korozyon aşınma) gibi mekanik etkilerle de aşındıkları anlaşılmıştır (27).

Seramiklerde aşınma mekanizması; büyük çoğunlukla seramik bünyedeki tek tanelerin mekanik ve/veya kimyasal zorlamaların etkisiyle bünyeden ayrılması şeklindedir. Diğer bazı seramiklerde ise aşınma; bir taneden veya yüzeyden mikropartiküllerin kopması sonucu olmaktadır. Kopan bu mikro partiküller bir taneden daha küçük ve mikron altı boyutta olabilmektedir (17,27).

Seramik malzemeler gevrek yapıdadırlar. Talaş kalkması ile aşınabilirler. Seramik malzemelerin yüzeylerinde ve yüzeylerin altında çatlaklar oluşur. Daha sonra oluşan bu çatlaklar birleşerek seramik malzemelerde küçük talaşlar ortaya çıkarır. Seramik malzemeler, yüksek basma ve çekme gerilmelerine duyarlıdırlar. Metal ve polimer malzemeler, kırılma meydana gelmeden önce basma gerilmeleri karşısında plastik deformasyon gösterirler. Oysa seramik malzemelerin plastik deformasyon gösterebilmesinin tek bir koşulu vardır. Bu koşul, seramik malzemelerin hidrostatik gerilmelerle plastik deformasyon gösterebilmesidir. Ancak bu plastik deformasyon, metaller ve polimerler ile kıyaslandığında oldukça küçüktür (17).

Bir seramik malzemenin sıcaklığını, ergime sıcaklığının 0,6 katına yükseltmekle dislokasyonların hareketliliği ile plastik deformasyon potansiyeli artırılır. Mukavemette meydana gelen azalmayla birlikte yüksek sürtünme hızları, sıcaklığın yükselmesine eşlik eder. Ancak seramik malzemelerde sıcaklıktaki artışla birlikte plastisitedeki artış metallerde sık görülen sünekliğe sebep olmaz. Seramikler gevrek yada yarı gevrek bir davranış gösterirler (17).

Gevrek malzemelerde kayma teması olduğu zaman deformasyon türü aşınmaya neden olur. Abrazif aşınma ve erozyon durumunda ise aşınma problemlidir. Seramiklerde, düşük ısı iletkenlik nedeniyle, sürtünme sırasında oluşan ısı, büyük ısı eğimleri ve dolayısıyla sıcak noktalar oluşturabilir. Eğer seramik malzemeler hızlı şekilde soğutulurlarsa, bu sıcak noktalar büyük oranda çekme gerilmesi oluşturur ve bunun sonucunda çatlaklar oluşabilir. Sonuç olarak yüzeyden büyük parçaların kopması ve aşınmada artış söz konusu olur (17,27).

Seramikler, deformasyon hızına karşı oldukça duyarlıdır. Bu nedenle artan kayma hızıyla ve buna ilaveten sürtünme ısınması ile birlikte çatlak oluşma olasılığı artmaktadır. Bu duyarlılık; darbeye ve erozif aşınmaya karşı seramik malzemelerin kullanılmasını gündemden düşürmektedir (17,27).

Seramik malzemelerde aşınmayı etkileyen temel faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir (27):

- a) Sertlik: Aşınma ve aşınma uygulamalarında sertlik kritik bir özelliktir. Seramik malzemelerin özelliklerinden biri de iyi bir sertliğe sahip olmalarıdır. Çok sert bir malzemede aşınma hızı oldukça düşüktür. Seramiklerin yüksek elastisite modülüne sahip olmamaları ve aynı zamanda plastik deformasyon göstermemeleri nedeniyle, yüklemelerle ve keskin partiküller ile yüzeye etki yapılması durumunda bölgesel olarak gerilme yoğunlaşması meydana gelmektedir. Bu gerilmeler çekme gerilmesi şeklinde olursa, çok hızlı bir şekilde çatlak / mikro çatlak

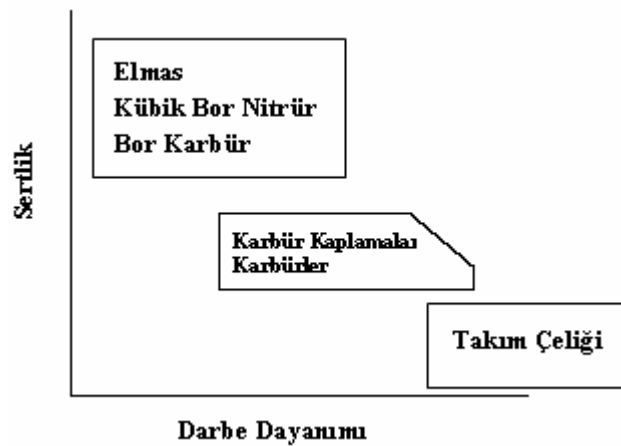
oluşumuna neden olurlar. Seramik bünyede oluşan mikro çatlaklar, malzemenin aşınma direncini düşürdüğünden, aşınmayı ve aşınma hızını artırıcı yönde etki eder.

- b) Termal iletkenlik: Bir çok seramik malzeminin termal iletkenliği metallerden daha düşüktür. Sürtünmenin ve/veya kaymanın etkili olduğu uygulamalarda, lokalize ısı birikimleri meydana gelmekte, bu da malzemelerin yüzeyleri arasında sıcaklık farkları oluşturmaktadır. Sürtünmeden dolayı bu sıcaklık farkları artarsa, oluşan bölgesel gerilmeler ve termal şok, mikro çatlakların meydana gelmesine yol açar. Bu mikro çatlaklar da, bilindiği gibi, aşınma ve aşınma hızını artırır.
- c) Kırılma Tokluğu: Seramik malzemelerin kırılma tokluğu, metaller ve mühendislik plastikleriyle karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyelerdedir. İleri teknoloji seramik malzemelerin, kırılma tokluğu 112 MPa civarında değişirken, seramik-seramik kompozitlerin kırılma tokluğu 20 MPa'a kadar çıkmaktadır. Seramik malzemelerin kırılma tokluğunun kısmen iyileştirilmesi amacıyla yapılan düzenlemelerde, seramiklerin aşınma direncinde bir miktar düşme olmuş, buna karşılık mikro çatlak oluşumu bariz şekilde engellenmiştir. Burada, bölgesel yüklenmeler, termal şok ve gerilmeler karşısında çatlak oluşumuna karşı direnç sertlikteki azalmayla dengelenmektedir.
- d) Korozyon direnci: Seramiklerde korozyon direnci sertlik kadar önemlidir. Çünkü, gerçek dünyada daima koroziv bir ortam mevcuttur. Korozyon, seramik yüzeylerde yavaş olarak çatlak büyümesine ve mikro çatlak oluşumuna neden olur. Bu da aşınma hızını artırıcı etki yaratır.
- e) Birleştirme / Birleşme Yöntemleri: Seramiklerde, diğer malzemelerle (metal veya plastik) konstrüksiyon yapımı için birleştirilmeleri esnasında oluşan basma ve çekme gerilmeleri önemlidir. Basma gerilmelerinde çok önemli bir aşınma söz konusu olmazken, birleşme yerlerinde oluşabilecek

çekme gerilmeleri yavaş olarak çatlak büyütmesini ve sonunda erozyon yoluyla aşınmayı meydana getirir. Ayrıca birleşme bölgelerinde oluşabilecek küçük salınımlı mekanik hareketler de malzemenin aşınmasında etkili olmaktadır.

- f) Porozite: Seramik malzemelerde bulunan poroziteler de aşınmada negatif bir etkiye sahiptir. Çekme yüklemelerinde porozite yüzünden çatlak oluşur ve hızlı bir şekilde ilerler. Basma yüklemelerinde de hasar oluşumu uzun sürede meydana gelmektedir. Yüklemelerin yanında porların bulunduğu yerler de aşınma için önemli faktördür. Ayrıca porun boyutu da başka bir kritik faktördür. Taneden daha büyük porlar çatlamada önemli bir etkiye sahiptirler. Eğer porlar yüzeye yakın ise bu porlar yüzeyin delinmesine neden olurlar.

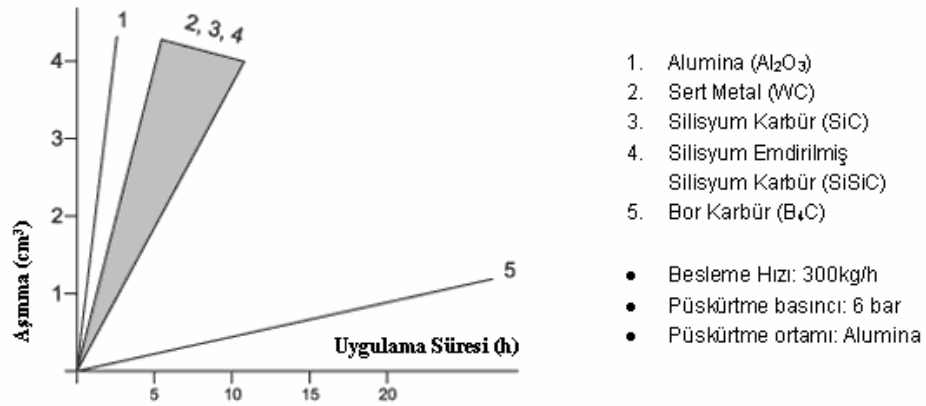
Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürün ardından bilinen en sert malzemedir. Ancak bor karbür malzemelerin kırılma tokluğu diğer seramik malzemelere benzer şekilde, metaller, karbür kaplamalar ve mühendislik plastikleriyle karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyelerdedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Bazı malzemelerin sertlik ve darbe dayanımının karşılaştırması
(28)

Yüksek sertlikleri nedeniyle, bor karbür tozlarından parlatma, lepleme ve kesme (su jeti ile kesme vb.) uygulamalarında aşındırıcı olarak yararlanılmaktadır. Ticari ürün olarak üretilen sıcak preslenmiş bor karbür malzemeler, abrasiv aşınmaya karşı çok yüksek bir direnç göstermektedirler. Bu ürünler çamur (sıvı-katı karışımı) pompalama, kumlama ve su jeti kesicilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bor karbür bazlı seramik kompozitlerden, refrakter özellikleri ve yüksek hacimsel ısı kapasiteleri nedeniyle, yüksek performanslı uçak freni uygulamalarında gelecek nesil sürtünme malzemeleri olarak yararlanılmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir.

Bor karbür ve diğer bazı seramik malzemelerden üretilen parçacık püskürtme nozülleri arasında aşınma dirençlerine ilişkin karşılaştırma Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Aşınma dirençlerinin karşılaştırması (29)

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Yöntem ve Hazırlık

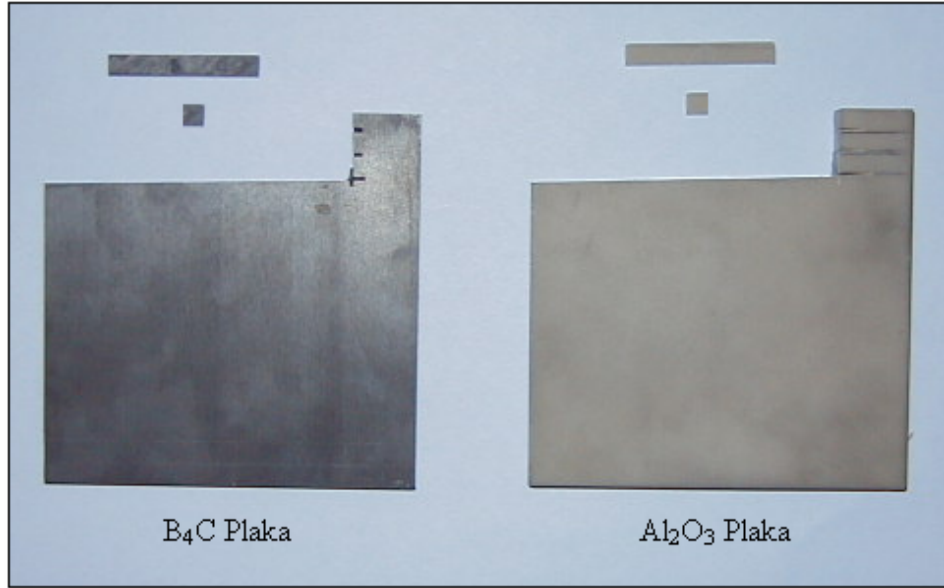
Bu çalışmada Bor Karbür (B_4C) seramiklerinin, Alumina (Al_2O_3) seramik ve AISI H13 (1.2344) sıcak takım çeliği ile mukayeseli olarak aşınma performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği'nde mevcut ölçüm alt yapısından yararlanılmıştır. Söz konusu malzemelerin tribolojik performans testleri, “disk üzerinde blok”² tribolojik sisteminde kuru sürtünme şartları altında gerçekleştirilmiştir.

Aşınma değerlendirmesi, aşınma yoluna bağlı olarak; ağırlık kaybı, sürtünme kuvvetindeki değişim, numune – karşı yüzey pürüzlülük değerindeki değişim ve SEM görüntüleri esas alınarak yapılmıştır.

Üretim parametreleri (toz tane boyutu, şekillendirme yöntemi, sinterleme sıcaklığı, sinterleme basıncı) yaklaşık olarak bilinen, 100 x 100 x 6 mm boyutundaki B_4C ve 100 x 100 x 10,5 mm boyutundaki Al_2O_3 plakalar, elmas diskle kesilerek 5 x 5 x 6 mm boyutlarında deney numuneleri elde edilmiştir.

Kesme işlemi sonrası B_4C ve Al_2O_3 plakalar Resim 4.1’de gösterilmiştir.

² İngilizce; “Block-on-Ring”



Resim 4.1. Kesme işlemi sonrası B_4C ve Al_2O_3 plakalar

600 HV sertliğindeki AISI H13 çeliğinden de B_4C ve Al_2O_3 numuneler ile aynı boyutta numuneler üretilmiştir. Karşı malzeme olarak kullanılan diskin çapı 60 mm, sertliği 800 HV'dir ve AISI 4620 çeliğinden üretilmiştir.

Aşınma deneyi öncesi B_4C ve Al_2O_3 numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemiyle ölçülmüş ve her dört malzemenin yüzey pürüzlülüğü değerleri Mutitoyo surf test 220 cihazıyla tespit edilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin aşınma öncesi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır.

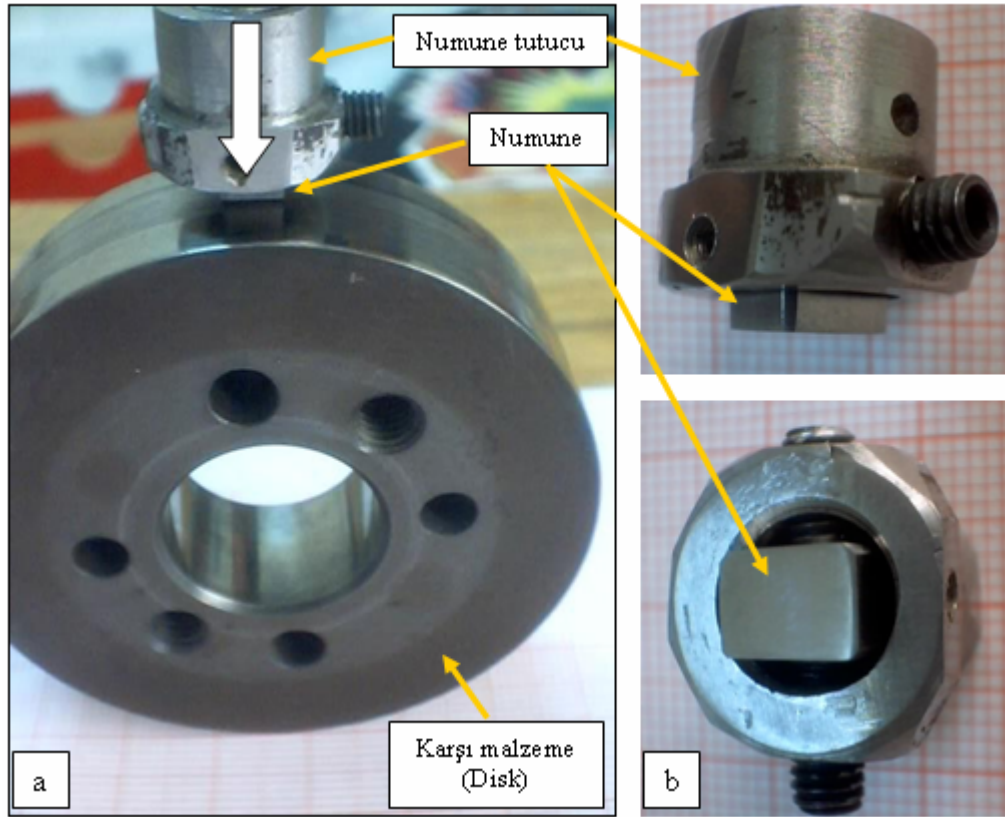
Aşınma sistemi elemanlarının özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Aşınma sistemi elemanlarının özellikleri

ÖZELLİK	B ₄ C	Al ₂ O ₃	AISI H13	Karşı Malzeme / Disk (AISI 4620)
Ortalama toz tane boyutu, µm	< 20	--	--	--
Bileşim	Top.Bor: %65-75 Top. C: %20-25 Serb.C: %2-5	--	--	--
Sinterleme yöntemi	HP	--	--	--
Sinterleme basıncı, MPa	30-50	--	--	--
Sinterleme Sıcaklığı, °C	1800-2300	--	--	--
Sertlik ³	Mohs 9-10	Mohs 9	600 HV	800 HV
Yoğunluk, g/cm ³	2,501	3,291	7,75	7,90
Aşınma öncesi yüzey pürüzlülüğü, Ra (µm)	0,48	1,18	0,19	0,08

Aşınma deneyleri; “disk üzerinde blok/numune” test düzeneği kullanılarak, 100 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Özel tasarlanan numune tutucu vasıtasıyla numuneler disk üzerine yerleştirilmiştir. Deney düzeneği detayı Resim 4.2’de gösterilmiştir.

³ Tabloda belirtilen Mohs sertlikleri B₄C ve Al₂O₃ malzemeler için tipik değerlerdir. Elmas için Mohs sertlik değeri 10’dur.



Resim 4.2. Deney düzeneği a) Disk üzerinde numune, b) Numune tutucu

Deneyler sabit yük altında her bir numune için üç farklı aşınma yoluna bağlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Aşınmadan dolayı oluşan ağırlık kayıpları, deney numunelerinin aşınma öncesi ve aşınma sonrasında (1 saatlik aşınma mesafesinde) 10^{-4} g hassasiyetinde terazide tartılmasıyla belirlenmiştir.

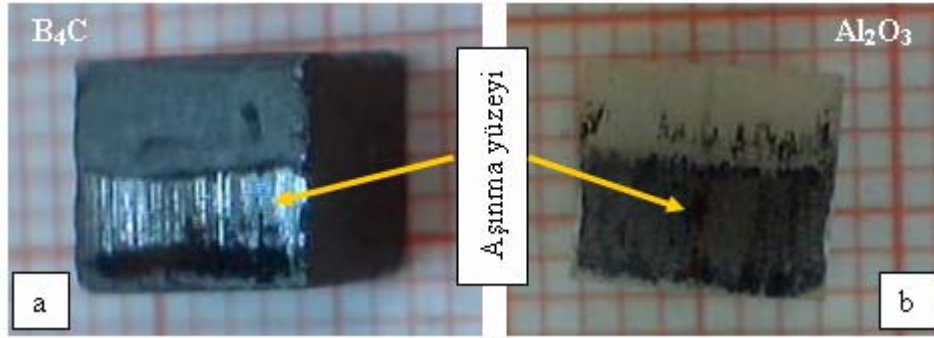
Sürtünme kuvvetinin aşınma süresine/yoluna bağlı değişimi, deney düzeneği üzerindeki bir gerilim ölçer vasıtasıyla alınan verilerin X-Y yazıcıda kaydedilmesiyle elde edilmiştir.

Deney esnasında (farklı aşınma mesafelerinde) ve sonrasında B_4C , Al_2O_3 ve AISI H13 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri tekrar ölçülmüştür. Bu üç numunenin aşınma sonrası SEM görüntüleri alınmıştır.

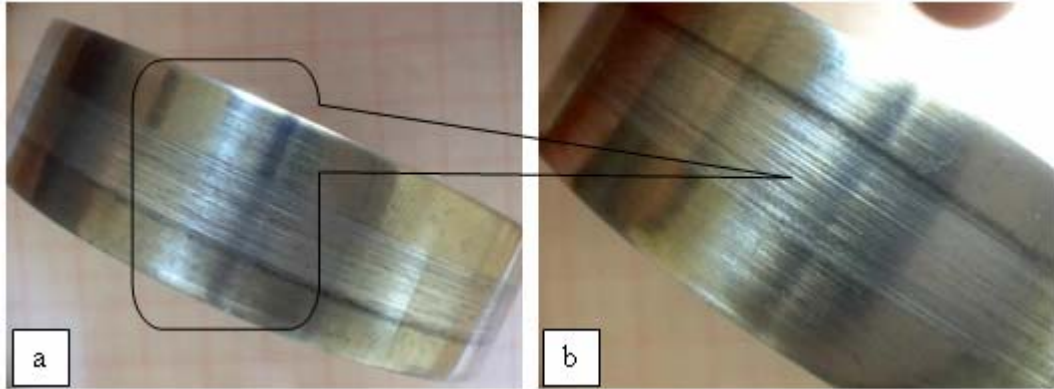
Deneylerde, aşınma süresine/yoluna bağlı olarak numunelerde meydana gelen ağırlık kaybı, sürtünme kuvveti değişimi ve yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimi tespit edilmiştir.

4.2. Deney Sonuçları

Aşınma testi sonrasında, B_4C ve Al_2O_3 'ün yüzey görüntüsü Resim 4.3'te, karşı malzemenin (disk) yüzey görüntüsü Resim 4.4'te sunulmaktadır.



Resim 4.3. Aşınma sonrası numune yüzeyleri a) B_4C , b) Al_2O_3



Resim 4.4. Disk yüzey görüntüsü a) Aşınmış disk yüzeyi, b) Disk yüzeyi detayı

B_4C , Al_2O_3 ve AISI H13 numunelerin, 1 saatlik (60 mm disk çapı ve 500 d/d devir sayısı için 5654,86 m aşınma yolu) aşınma süresi sonucunda, ağırlık

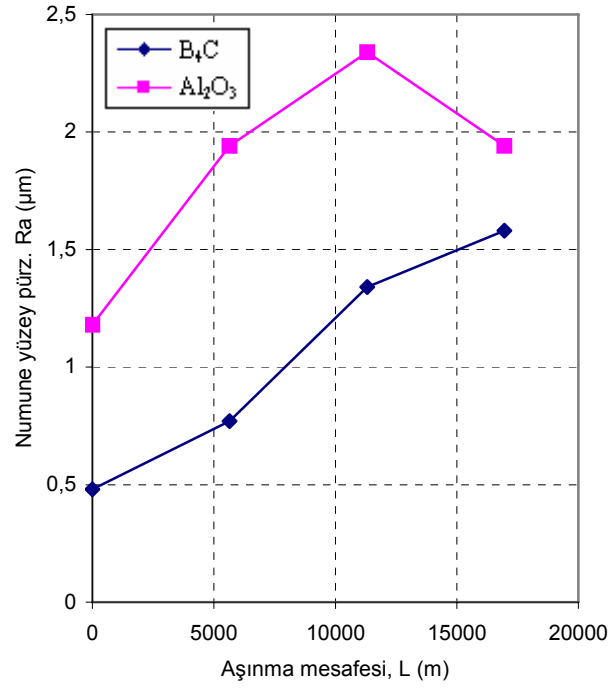
kayıpları (ΔG) ile Eş. 3.6 ve Eş. 3.7’de verilen eşitliklerden “Aşınma Oranı” ve “Aşınma Direnci”nin hesaplanması için gerekli diğer değerler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Numune aşınma oranları ve aşınma dirençleri

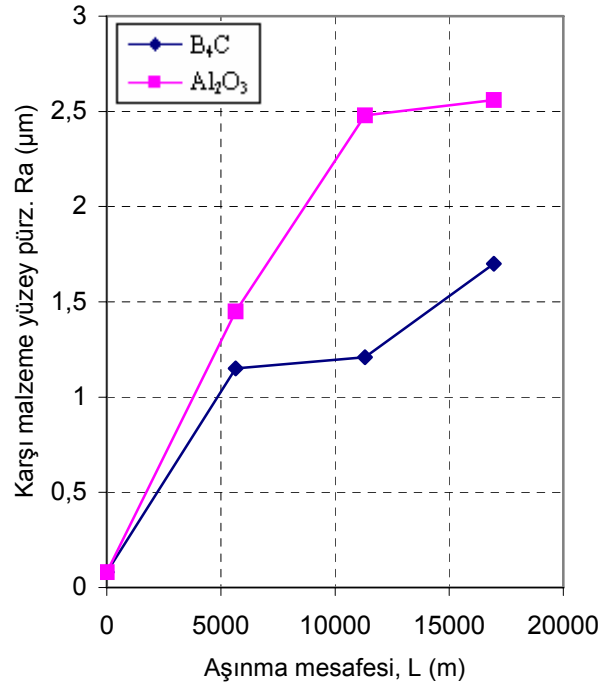
MALZEME	Ağırlık Kaybı ΔG (mg)	Yükleme Ağırlığı M (N)	Aşınma Yolu S (m)	Yoğunluk D (g/cm ³)	Aşınma Oranı Wa (mm ³ /N.m)	Aşınma Direnci Wr (N.m/mm ³)
B ₄ C	0,05	100	5654,86	2,501	$3,54 \times 10^{-8}$	$28,3 \times 10^6$
Al ₂ O ₃	0,1	100	5654,86	3,291	$5,37 \times 10^{-8}$	$18,6 \times 10^6$
AISI H13	96,7	100	5654,86	7,75	$2206,5 \times 10^{-8}$	$0,045 \times 10^6$

Ağırlık farkı yöntemi ile B₄C malzemenin “Aşınma Direnci”, Al₂O₃ ve AISI H13 malzemelere göre daha yüksek çıkmıştır.

Sabit yük altında farklı aşınma mesafelerinde yapılan testler sonucunda aşınma mesafesine bağlı olarak numune yüzey pürüzlülüklerinin değişimi Şekil 4.1’de, karşı malzeme yüzey pürüzlülüklerinin değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir.



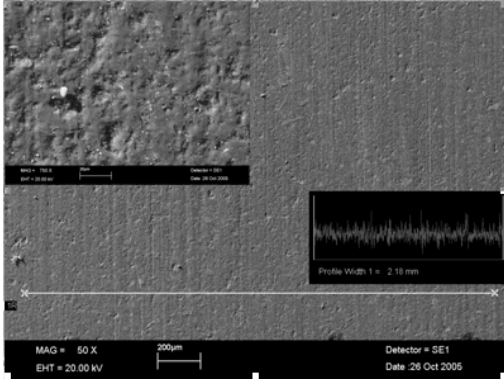
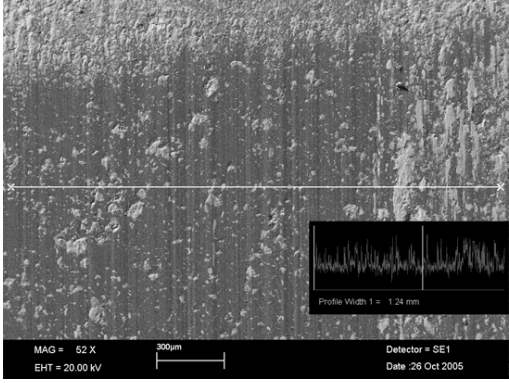
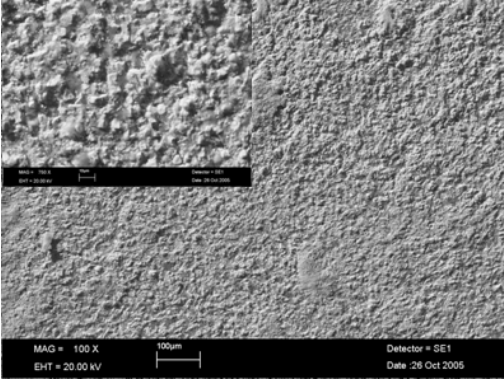
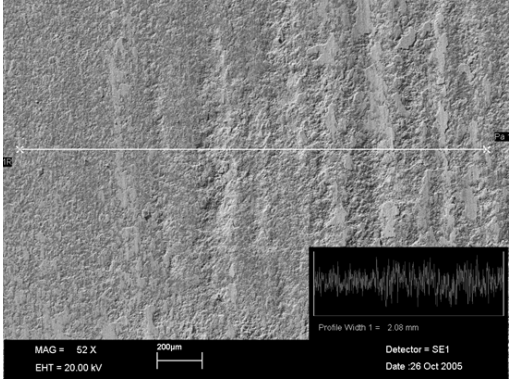
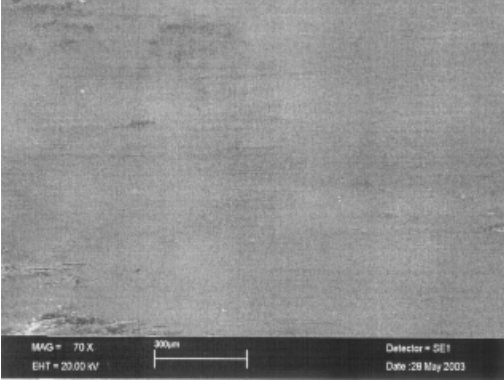
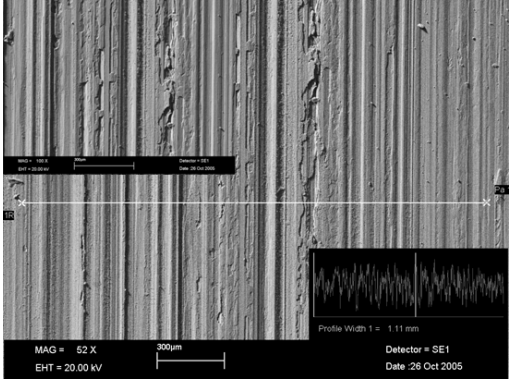
Şekil 4.1. Aşınma mesafesine bağlı olarak numunelerin yüzey pürüzlülük değerinin değişimi



Şekil 4.2. Aşınma mesafesine bağlı olarak karşı malzeme yüzey pürüzlülük değerinin değişimi

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de görüleceği gibi aşınma mesafesinin artmasıyla pürüzlülük değeri her iki numune malzemede de artmaktadır. Ancak B₄C malzemesindeki artış, Al₂O₃’e göre daha düşüktür (Şekil 4.1). Ayrıca aşınma mesafesindeki artışa bağlı olarak karşı malzeme yüzey pürüzlülük değeri de artmaktadır. Al₂O₃ numune karşısında çalışan karşı malzeme yüzey pürüzlülük değeri, B₄C’nin karşısındakine göre daha fazla artmıştır. Bu durum B₄C’nin Al₂O₃’e göre daha iyi aşınma performansı sergilediğini ortaya koyar.

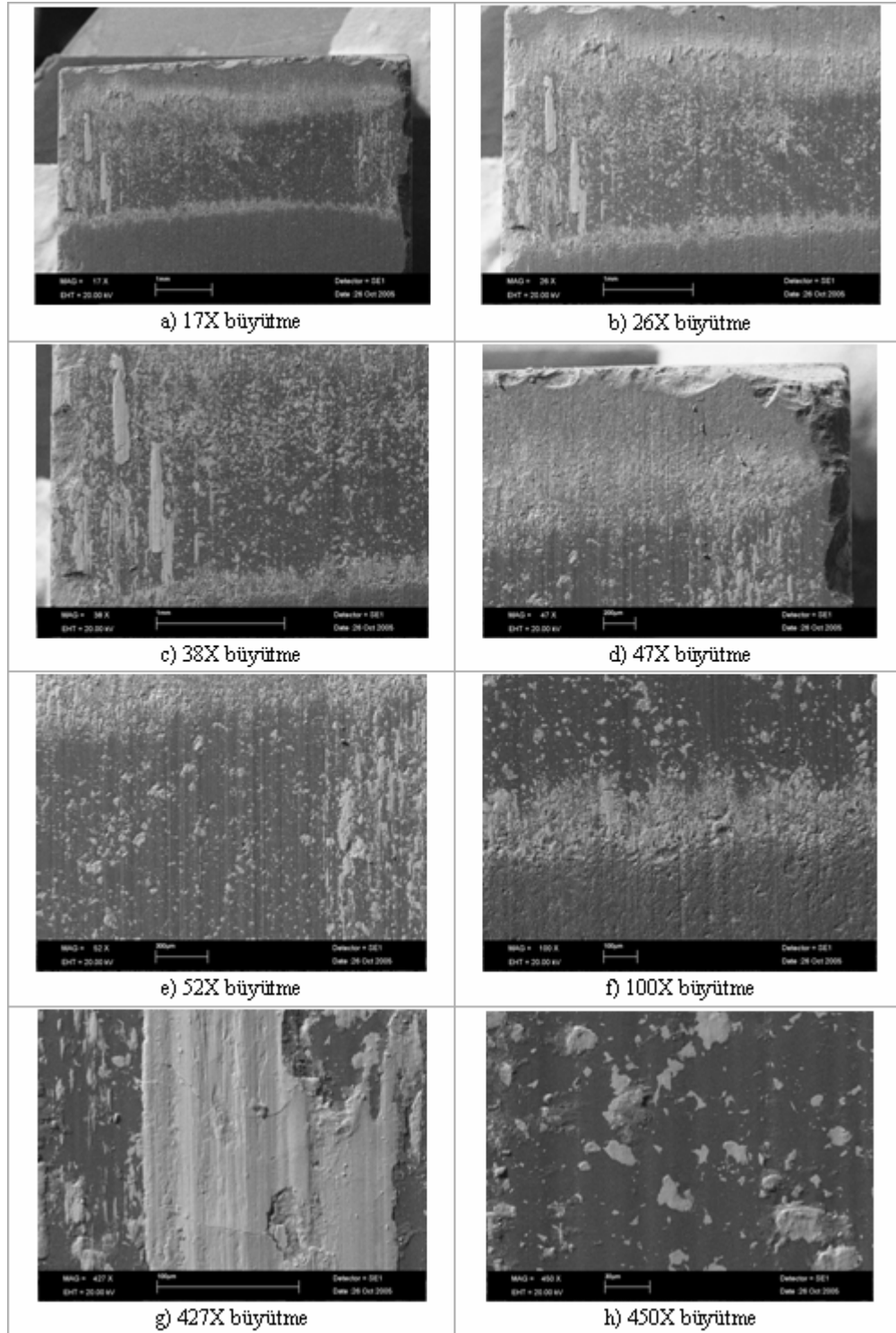
Şekil 4.3’de numune yüzeylerinin aşınma öncesi ve sonrası SEM fotoğrafı verilmiştir.

Malzeme	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞİŞİMİ	
	Aşınmadan Önce	Aşınmadan Sonra (1 saat)
B ₄ C		
Al ₂ O ₃		
AISI H13		

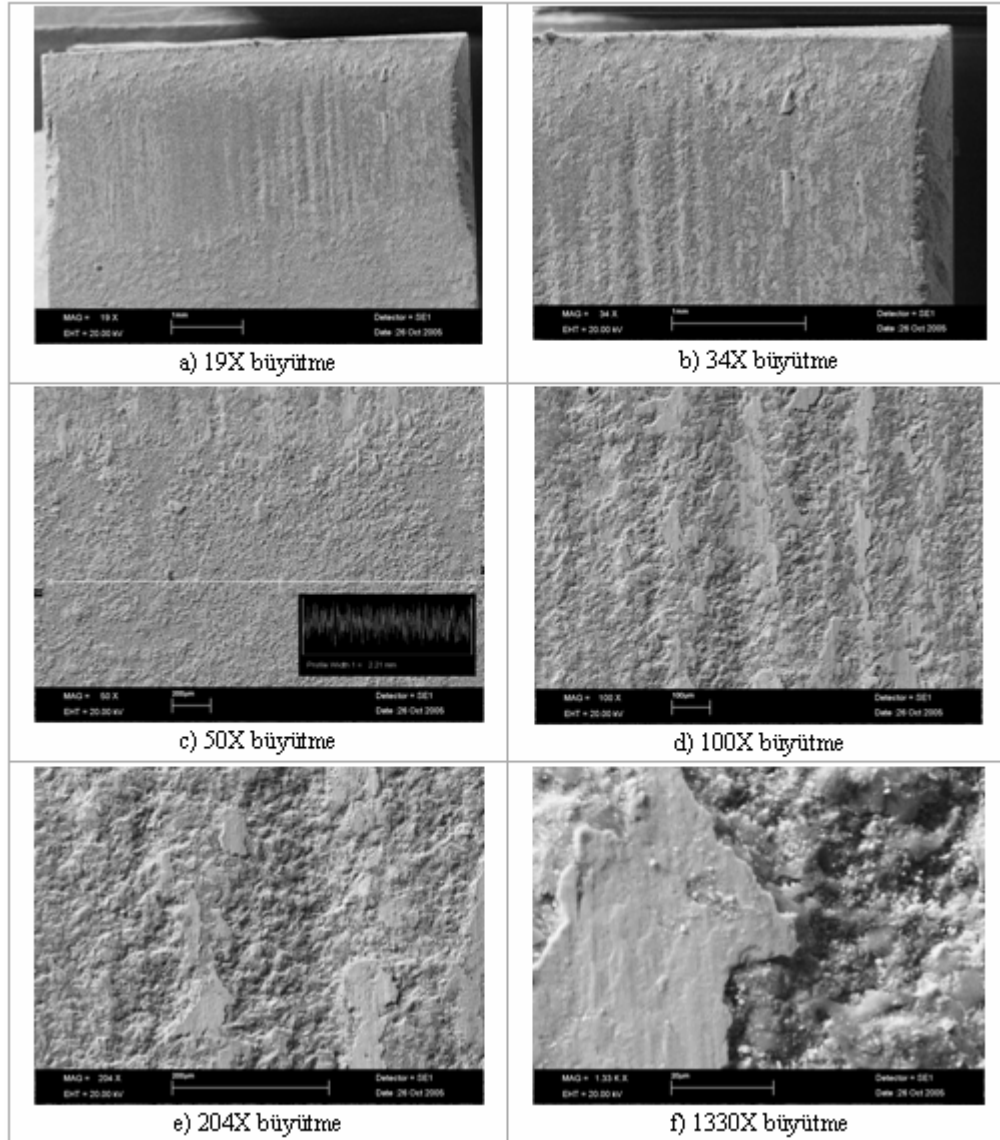
Şekil 4.3. Numune yüzeylerinin aşınma öncesi ve sonrası SEM fotoğrafı

Burada aşınma öncesi B_4C ve Al_2O_3 yüzeyleri incelendiğinde, B_4C yüzeyinin daha pürüzsüz bir görünüme sahip olduğu görülür. Aşınma sonrası B_4C ve Al_2O_3 yüzeyleri incelendiğinde, B_4C yüzeyinde sığ aşınma kanalları oluşurken, karşı malzeme sıvanmasının fazla olduğu, Al_2O_3 yüzeyinde ise daha derin aşınma kanallarının olduğu görülür. Ayrıca H13 çelik yüzeyinin başlangıçta seramiklere nazaran çok daha pürüzsüz olmasına rağmen aşınma sonrasında seramik yüzeylerden daha fazla aşınma kanalı içerdiği görülür.

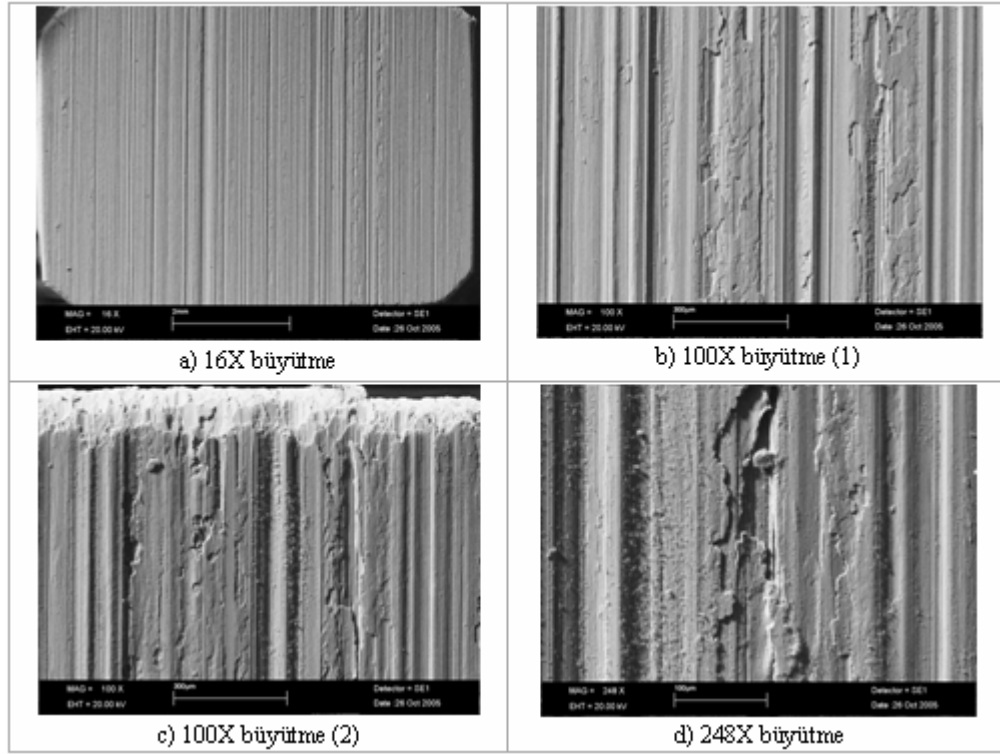
B_4C numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.4'te, Al_2O_3 numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.5'de ve AISI H13 çelik numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.6'da farklı büyütme oranlarıyla sunulmuştur.



Şekil 4.4. B₄C numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri
a) 17X büyütme, b) 26X büyütme, c) 38X büyütme, d) 47X büyütme, e) 52X büyütme, f) 100X büyütme, g) 427X büyütme, h) 450X büyütme

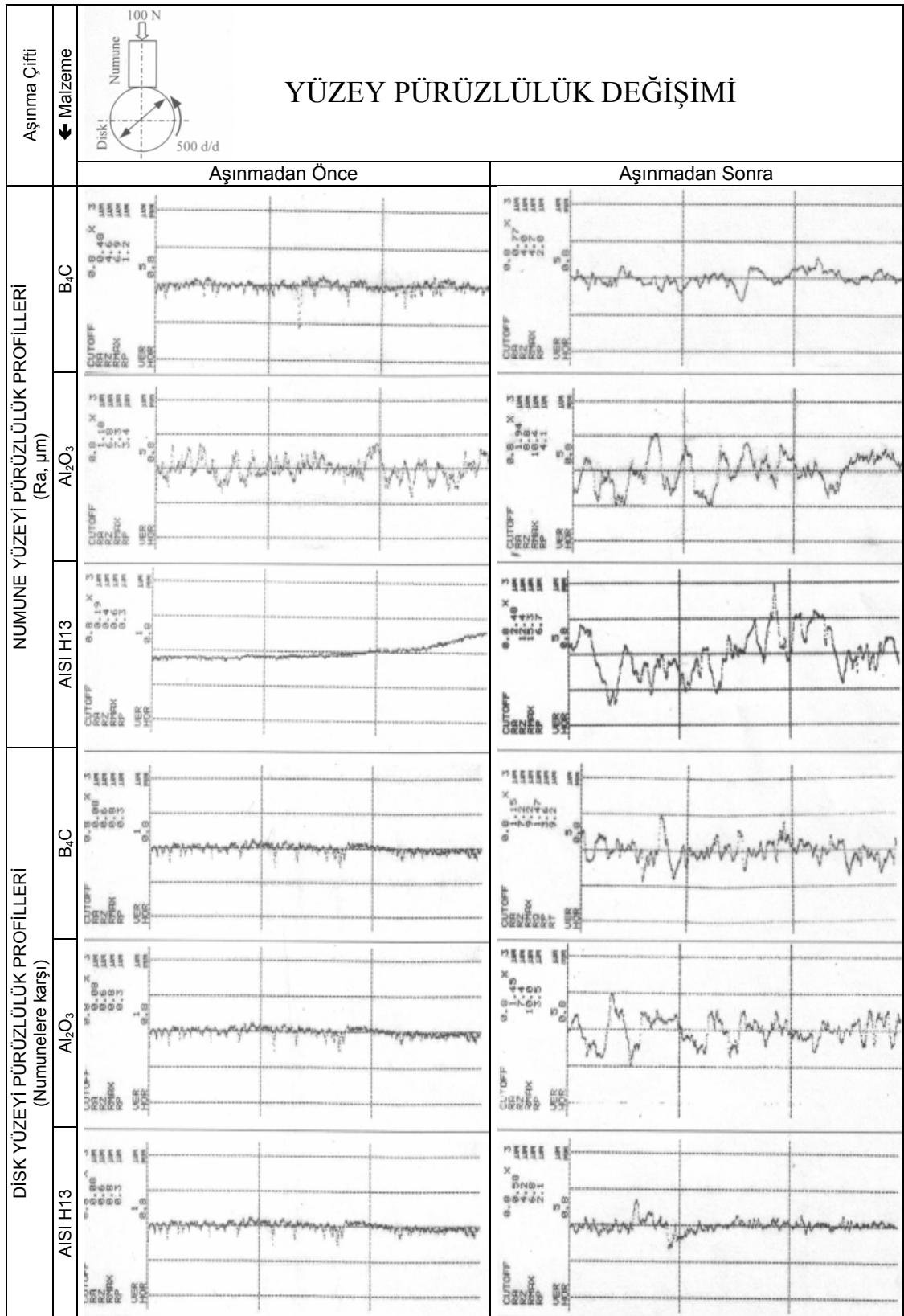


Şekil 4.5. Al_2O_3 numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri
a) 19X büyütme, b) 34X büyütme, c) 50X büyütme,
d) 100X büyütme, e) 204X büyütme, f) 1330X büyütme



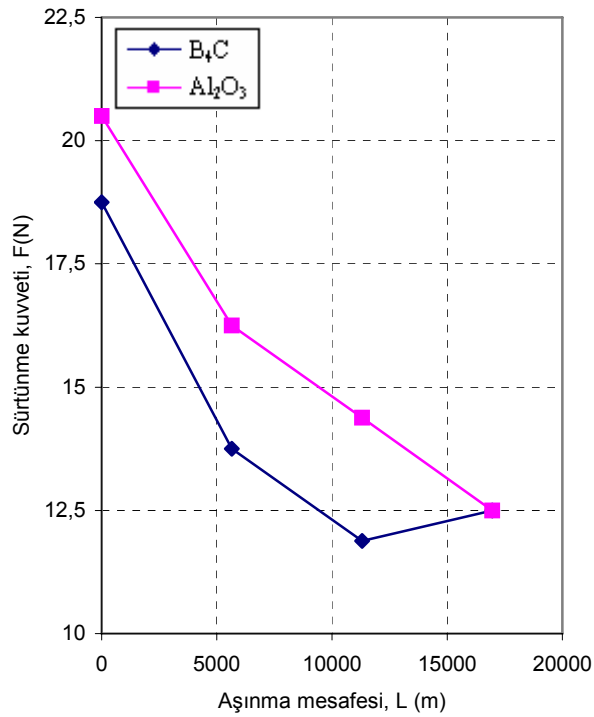
Şekil 4.6. AISI H13 numune yüzeylerinin aşınma sonrası SEM görüntüleri
a) 16X büyütme, b) 100X büyütme (1), c) 100X büyütme (2),
d) 248X büyütme

Şekil 4.7’de aşınmadan önce ve 1 saatlik aşınma süresi sonunda numune ve karşı malzeme yüzeylerinin pürüzlülük profili verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi B_4C ve Al_2O_3 numune yüzeyleri AISI H13 çeliğine göre daha düşük pürüzlülüğe sahiptir. Bu durum bahsekonu seramik malzemelerin çeliğe nazaran daha yüksek aşınma direncine sahip olduğunun bir diğer göstergesidir. Ancak bu malzemeler karşısında aşınan numune yüzey pürüzlülük profilleri incelendiğinde, B_4C ve Al_2O_3 seramik malzemelerin AISI H13 çeliğine göre karşı malzemeyi daha fazla aşındırdığı görülür.



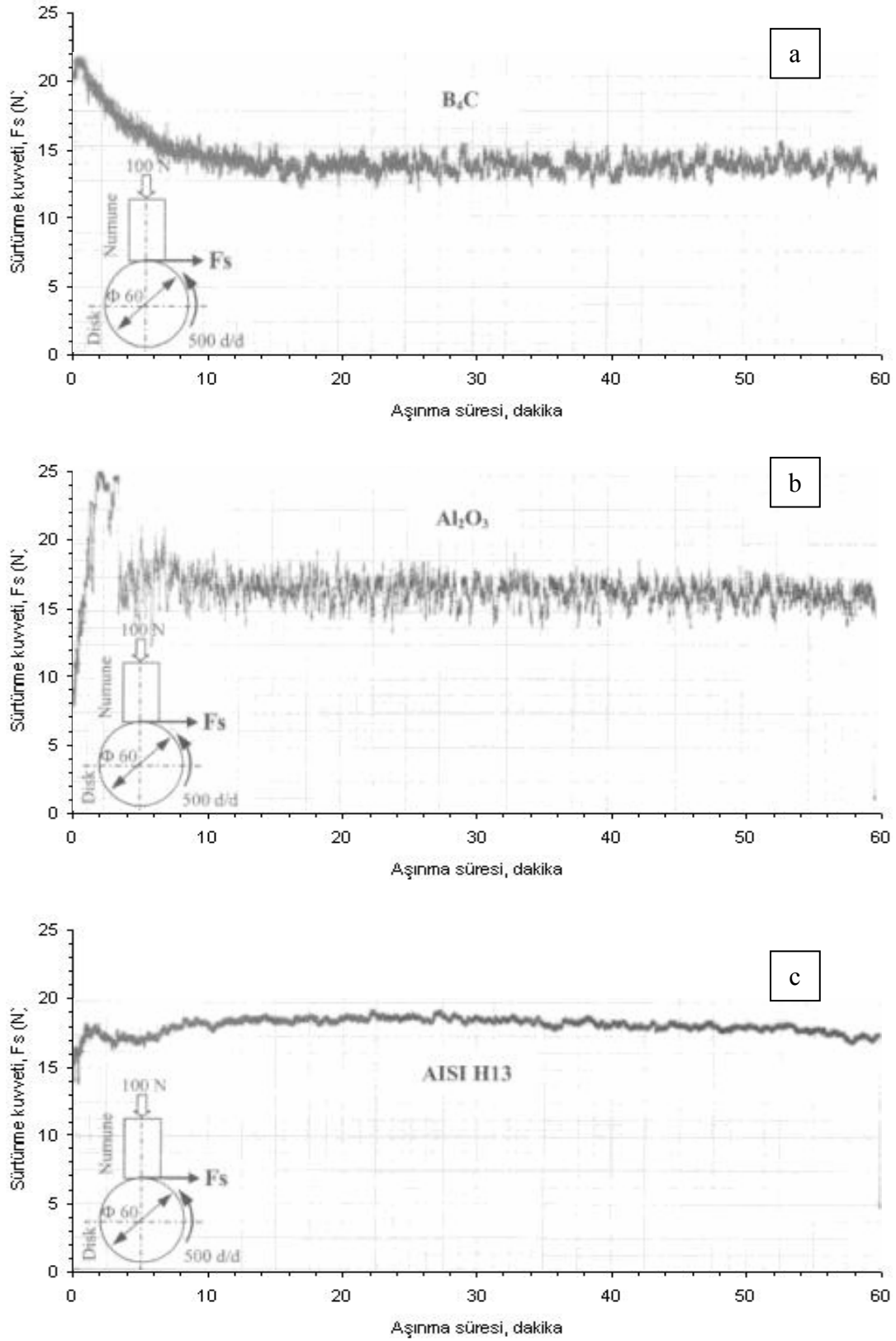
Şekil 4.7. Numune ve karşı malzemenin aşınma öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük profilleri

Şekil 4.8’de, aşınma yolundaki artışa bağlı olarak ortalama sürtünme kuvvetinin değişimi verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi aşınma mesafesine bağlı olarak sürtünme kuvveti düşmektedir. Ayrıca B_4C numunenin Al_2O_3 ’e göre daha düşük sürtünme kuvveti sergilediği görülmektedir. Bu durum B_4C ’nin, Al_2O_3 ’e nazaran daha düşük kayma direncine sahip olduğunu gösterir.



Şekil 4.8. Aşınma mesafesine bağlı olarak ortalama sürtünme kuvvetinin değişimi

Şekil 4.9’da, 1 saatlik aşınma esnasındaki sürtünme kuvvetinin değişimi verilmiştir. Burada B_4C ’de sürtünme kuvveti Al_2O_3 ’e göre daha düşük genliklerde değişme gösterirken, çelik numune en düşük değişme aralığını sergiler. Bu durum seramiklerde aşınma yüzeyi özelliklerinin ve aşınma mekanizmasının kararlı olmadığını gösterir. Yani aşınma çiftleri arasındaki aşınma mekanizması, zamana bağlı olarak hızlı bir şekilde değişmektedir.



Şekil 4.9. Sürtünme kuvvetinin aşınma süresine bağlı değişimi
a) B₄C numune, b) Al₂O₃ numune ve c) AISI H13 numune

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Çok büyük bir yer altı zenginliğine sahip olduğumuz Bor konusunda gerek teknik alt yapı ve gerekse ekonomik değer yaratma konusunda istenilen düzeyde olduğumuz söylenemez. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla Bor ara ve son ürünleri konusunda üniversite, araştırma ve sanayi kuruluşlarımızda ARGE çalışmalarına hız kazandırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bor ürün çeşitliliğinin artırılması ve teknolojik yeniliklerin teşvik edilmesi için, DPT, TÜBİTAK, TTGV, üniversitelerimiz ile diğer kamu ve özel ARGE fonlarının koordinasyonu ve yönlendirilmesi gerekmektedir. TÜBİTAK koordinasyonunda yürütülen Vizyon 2023 çalışması ve BOREN'in kurulması bu yönde atılan önemli adımlardır.
2. Düşük yoğunluğuna rağmen üstün balistik özellikleri haiz olan Bor Karbür, zırh uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Bu konuda yurt içinde yürütülecek ARGE çalışmalarıyla Türk Silahlı Kuvvetlerinin önemli bir ihtiyacı karşılanmış olacaktır.
3. Yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip Bor Karbür, bir çok endüstriyel uygulama için vazgeçilmez bir malzeme olmaya adaydır. Bor Karbürün aşınma davranışlarının bilinmesi ve bu konuda yeni ürün ve teknolojiler geliştirilmesi ulusal sanayimize önemli bir rekabet avantajı sağlayacaktır.
4. B_4C ve Al_2O_3 seramik malzemeler, AISI H13 çeliğine nazaran çok yüksek bir aşınma performansı sergilemiştir.
5. B_4C ve Al_2O_3 numuneler kendi aralarında değerlendirildiğinde, B_4C 'nin sürtünme ve aşınma özelliklerinin Al_2O_3 'e göre daha iyi olduğu görülmüştür.
6. Al_2O_3 numunenin başlangıç yüzey özelliklerinin kötü olmasının, bu malzemenin sürtünme ve aşınma performansı üzerinde etkisi olması mümkündür.
7. Deneylerde, adhesiv aşınmanın karakteristik özelliklerinden biri olan, malzeme taşınımının yumuşak malzeme yüzeyinden sert olan malzeme yüzeyine doğru olması durumu gözlemlenmiştir.
8. Seramik numunelerin, çeliğe nazaran daha az aşınırken karşı malzemeyi daha fazla aşındırmaları, bu malzemelerin çok iyi olan aşınma özellikleri

yanında sürtünme özelliklerinin de geliştirilmesi gereğini ortaya koymaktadır.

9. Seramiklerin üretim prosesleri (sinterleme sıcaklığı, sinterleme yöntemi vb.) mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir (17). Test sonuçlarının, farklı üretim prosesleri ile üretilen B_4C , Al_2O_3 ve diğer yüksek sertlikli seramiklerle tekrarlanması ve doğrulanması yararlı olacaktır.
10. B_4C ve Al_2O_3 benzeri ileri teknoloji seramiklerinin porozitesinin %0,5'den az olması tercih edilmektedir (17). B_4C numunenin ölçülen yoğunluğu ($2,501 \text{ g/cm}^3$), teorik yoğunluğunun ($2,51 \text{ g/cm}^3$) %99,6'sına karşılık gelmektedir ve bu haliyle yoğunluk gereksinimlerini karşılamaktadır. Ancak Al_2O_3 numunenin ölçülen yoğunluğu ($3,291 \text{ g/cm}^3$), teorik yoğunluğunun ($3,9 \text{ g/cm}^3$) yaklaşık %85'i kadardır. Al_2O_3 numunenin üretim prosesinden kaynaklandığı tahmin edilen bu durumun malzemenin aşınma da dahil olmak üzere diğer mekanik özelliklerine olumsuz bir şekilde yansımış olması mümkündür.

KAYNAKLAR

1. Altun, F., “Bor”, *BOREN Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü*, Ankara, 7-8, 12, 14, 23, 37-39 (2005).
2. Devlet Planlama Teşkilatı, “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik ÖİK Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Kimya Sanayii Hammaddeleri Cilt II (Bor Tuzları – Trona - Kaya Tuzu - Sodyum Sülfat - Stronsiyum) Çalışma Grubu Raporu”, *DPT: 2608 - ÖİK: 619*, Ankara, 8, 19, 21, 34 (2001).
3. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, “Bor Raporu”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, Ankara, 134: 11-14, 17-19 (2003).
4. İnternet: Bor Madeni ve Türkiye İçin Önemi, Dış Ticaret Müsteşarlığı. <http://www.foreigntrade.gov.tr/ead/bor/BOR%20VE%20TORYUM.doc> (2006).
5. ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, “Tanıtım Broşürü”, *ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü*, 3 (2005).
6. Kalafatoğlu, İ. E., Örs, S. N., “21. yüzyılda bor teknolojileri ve uygulamaları”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1): 62 (2003).
7. İnternet: Bor Ürünleri Hakkında Genel Bilgi, ETİ Maden İşletmeleri Gn.Md.. http://www.etimaden.gov.tr/tr/0_sayfa_ortakSayfa.asp?hangisayfa=4_sayfa_a_1 (2006).
8. ETİ Holding A.Ş. Genel Müdürlüğü Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı, “Bor karbür ön fizibilite etüdü”, *ETİ Holding A.Ş.*, Ankara, 4, 5, 7, 9, 10 (2003).
9. Chen, S., Wang, D. Z., Huang, J. Y. and Ren, Z. F., “Synthesis and characterization of boron carbide nanoparticles”, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 79 (7): 1757 (2004).
10. Karaman, M., Özbelge, H. Ö., Sezgi, N. A., Doğu, T., “Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile bor karbür üretimi”, *1.Ulusal Bor Çalıştayı*, Ankara, 297 (2005).
11. Öveçoğlu, M. L., “Toz metalurjisi: Tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğilimler”, *9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 451, 459-465 (1997).
12. Baykara, T., “Çağdaş savunma teknolojilerinde ileri malzemeler ve Türkiye için bir değerlendirme”, *Savunma Sanayiindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu*, Ankara, 885-892 (1997).

13. Ögel, B., “Malzemelerin Balistik Darbe ve Hafif Zırh Araştırmaları”, **Zırhlı Birlikler Dergisi**, 15: 48-51 (2000).
14. Ünal, E., “İleri Teknoloji Seramiklerin Hafif Zırh Yapımında Kullanılması”, **Savunma Sanayiindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu**, Ankara, 231-238 (1997).
15. Büyükkuşoğlu, M. Ş., “Aluminyum alaşımları ve savunma sanayii uygulamaları”, Uzmanlık Tezi, **SSM**, Ankara, 8-24 (1993)
16. İnternet: Lightweight Personnel Armor, ARL-Army Research Laboratory internet sitesi, <http://www.arl.army.mil/wmrd/Tech/tech.html> (2001).
17. ASM International, “Friction and wear of ceramics”, ASM Handbook Friction, Lubrication and Wear Technology 1992 ed., **ASM International**, Ohio, 813-815 (1992).
18. ASM International, “Friction and wear of cemented carbides”, ASM Handbook Friction, Lubrication and Wear Technology 1992 ed., **ASM International**, Ohio, 795 (1992).
19. ASM International, “Friction and wear of metal-matrix composites”, ASM Handbook Friction, Lubrication and Wear Technology 1992 ed., **ASM International**, Ohio, 801 (1992).
20. ASM International, “Glossary of Terms”, ASM Handbook Friction, Lubrication and Wear Technology 1992 ed., **ASM International**, Ohio, 6, 20, 21 (1992).
21. Yılmaz, F., “Sürtünme ve aşınma”, **9.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 229, 233-243, (1997).
22. İzçiler, M., "Yüksek Krom Alaşımlı Dökme Demirlerin Farklı Sıcaklıktaki Abrasiv Aşınma Davranışına Alaşım Katkı Oranının ve Isıl İşlem Şartlarının Etkileri", Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 20-60 (1997).
23. ASM International, “Wear measurement”, ASM Handbook Friction, Lubrication and Wear Technology 1992 ed., **ASM International**, Ohio, 362-369 (1992).
24. İzçiler, M., Çelik, H., “Two- and Three-body Abrasive Wear Behaviour of Different Heat Treated Boron Alloyed High Chromium Cast Iron Grinding Balls”, **Materials Processing Technology**, 105: 237-245 (2000).
25. İzçiler, M., Tabur, M., “Abrasive Wear Behavior of Different Case Depth Gas Carburized AISI 8620 Gear Steel”, **Wear**, 260 (1-2): 90-98 (2006).

26. İzçiler, M., Muratoğlu, M., “Wear Behaviour of SiC Reinforced 2124 Al Alloy Composite in RWAT System”, *Materials Processing Technology*, 132: 67-72 (2003).
27. Başman, G., Atar, E., Kayalı, E. S., “Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışı”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, 127: 39-42 (2001).
28. İnternet: Penn State Erie, The Behrend College internet sitesi, <http://engr.bd.psu.edu/rcv/470/ceramics.pdf> (2004).
29. İnternet: Sintec Keramik GmbH & Co. KG-Almanya internet sitesi, http://www.sintec-keramik.com/sintec-en/shot-blast-nozzles_properties.html (2006).

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Ankara’da doğmuştur. İlk, Orta ve Lise öğrenimini TED Ankara Koleji’nde tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü’nden 1993 yılında mezun olmuştur. 1993-1999 yılları arasında Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu Hafif Silah Sanayi ve Ticaret A.Ş. imalat bölümünde Mühendis ve Baş Mühendis pozisyonunda görev yapmıştır. Halen bir kamu kuruluşunda Araştırma-Geliştirme bölümünde çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.