133427

SERAMİK TAKVİYELİ BRONZ ESASLI TOZ METAL FREN BALATA ÜRETİMİ VE SÜRTÜNME-AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Mustafa BOZ

DOKTORA TEZİ
(METAL EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

133427

ARALIK 2003

Mustafa BOZ tarafından hazırlanan SERAMİK TAKVİYELİ BRONZ ESASLI TOZ METAL FREN BALATA ÜRETİMİ VE SÜRTÜNME-AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Adem KURT
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ali KALKANLI

Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Üye : Prof. Dr. Duran ALTIPARMAK

Üye : Doç. Dr. Adem KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Halil ARIK

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i

ABSTRACT iii

TEŞEKKÜR v

ÇİZELGELERİN İSTESİ vi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ viii

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. TOZ METALURJİSİ VE PARÇA ÜRETİM SÜRECİ 3

2.1. Toz Özellikleri 3

2.1.1. Kimyasal özellikler 3

2.1.2. Fiziksel özellikler 4

2.2. T/M Yöntemi ile Parça Üretim Süreci 7

2.2.1. Harmanlama 7

2.2.2. Presleme 7

2.2.3. Sinterleme 9

2.2.4. Sinterleme sonrası işlemler 10

2.3. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları 11

2.4. Toz Metalurjisi'nin Avantaj ve Dezavantajları 12

3. TRİBOLOJİ 14

3.1. Sürtünme ve Aşınmanın Önemi 14

3.2. Sürtünme 14
3.2.1. Sürtünme kanunları 15
3.2.2. Sürtünme teorileri 16
3.2.3. Sürtünme katsayısı 17
3.3. Aşınma 19
3.3.1. Aşınmanın temel unsurları 20
3.3.2. Aşınma mekanizmaları 21
3.4. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri 26
3.4.1. Ağırlık farkı metodu 27
3.4.2. Kalınlık farkı metodu 28
3.4.3. İz değişimi metodu 29
3.4.4. Radyoizotop metodu 29
4. SÜRTÜNME ÇİFTLERİ VE BALATALAR 30
4.1. Sürtünme Malzemeleri 30
4.1.1. Polimer bağlı asbest esaslı malzemeler 32
4.1.2. Yağda çalışan balata malzemeleri 33
4.1.3. Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri 33
4.2. Karşı Malzeme - Disk ve Kampana Malzemesi 39
4.3. T/M ile Üretilmiş Demir ve Bronz Esaslı Fren Balataların Üretimi 39
5. SERAMİK KATKILI SİNTER BALATA MALZEMELERİ 42
5.1. Seramiklerin Genel Özellikleri 42
5.2. Seramiklerin Uygulama Alanları 44
5.3. Seramiklerin Sürtünme ve Aşınma Özellikleri 45

5.4. Endüstriyel Frenlerde Sürtünme Mekanizması 47

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 53

6.1. Bronz Esaslı Toz Malzemesi 53

6.2. İlave Toz Malzemeler 53

6.3. Tozların Karıştırılması ve Preslenmesi 55

6.4. Sinterleme 57

6.5. Sinterlenmiş Numunelerinin Karakterizasyonu ve Performans Deneyleri 59

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 61

7.1. Silisyum dioksit'in Etkisi 61

7.2. Alümina'nın Etkisi 73

7.3. Sepiolit'in Etkisi 84

7.4. Antimon'un Etkisi 95

7.5. Zirkonya'nın Etkisi 106

7.6. Değerlendirme 118

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 120

KAYNAKLAR 123

ÖZGEÇMİŞ 130

SERAMİK TAKVİYELİ BRONZ ESASLI TOZ METAL FREN BALATA ÜRETİMİ VE SÜRTÜNME-AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Mustafa BOZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ARALIK 2003

ÖZET

Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada toz metalurjisi yöntemi ile bronz esaslı fren balataları üretilmiş ve üretilen balataların sürtünme-aşınma performansları test edilmiştir. İkinci aşamada bronz esaslı balata tozlarına farklı oranlarda değişik seramik tozları (SiO_2, Al_2O_3, $Mg_8Si_{12}O_{30}(OH)_4(OH_2)_4$ $8H_2O$, Sb_2S_3 ve $ZrSiO_4$) ilave edilerek, yeni balata numuneleri üretilmiş ve üretilen seramik ilaveli balata numunelerinin sürtünme aşınma davranışları belirlenerek seramik ilavesiz bronz esaslı balata numuneleri ile mukayesesi yapılmıştır. Bu amaçla fren balata numunelerinin yoğunluk, sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarları test edilmiş, numunelerden sinterleme öncesi ve sonrası mikro yapı görüntüleri ile aşınan yüzeylerden SEM görüntüleri alınmış ve numunelerdeki aşınma türleri tespit edilmiştir.

Deneyler sonucunda, bu çalışmada kullanılan metal tozundan üretilen fren balata numunelerinin optimum sürtünme-aşınma davranışlarının 350 MPa presleme basıncında ve 820 ^{o}C sinterleme sıcaklığında olduğu belirlenmiştir. Balata malzemelerine $ZrSiO_4$ ilavesi dışında ilave edilen diğer seramik tozlarının miktarı arttıkça, numunelerin yoğunluğunu düşürdüğü görülmüştür. En yoğun balata malzemesini $ZrSiO_4$ ilave edilmiş numuneler sağlamıştır.Bütün

numunelerin aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri SAE-J661 standart aralığında olurken en iyi sonucu %5 $ZrSiO_4$ ve %6 $ZrSiO_4$ numuneleri sağlamıştır.

Bilim Kodu : 710
Anahtar Kelimeler :Toz Metalurjisi, Fren balatası, Seramikler ve Sürtünme-Aşınma
Sayfa Adedi : 130
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Adem KURT

PRODUCTION OF CERAMICS REINFORCED BRONZE BASED POWDER METAL BREAKE LININGS AND INVESTIGATION OF THEIR FRICTION-WEAR BEHAVIOURS

(Ph.D. THESIS)

Mustafa BOZ

GAZI UNIVERSITY

INSTUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

DECEMBER 2003

ABSTRACT

This study consisted of two stages: In the first stage, bronze based break linings were produced and friction-wear properties of them were investigated. In the second stage, various amount of ceramics powder (SiO_2, Al_2O_3, $Mg_8Si_{12}O_{30}(OH)_4(OH_2)_4$ $8H_2O$, Sb_2S_3 ve $ZrSiO_4$) were added to bronze-based powders and ceramics reinforced bronze-based break lining were produced. Friction-wear properties of the ceramics reinforced samples were measured and compared to those of plain bronze based ones. For this purpose, density, hardness, friction coefficient and wear behaviour of the samples were tested. Microstructure of samples before and after sintering and also worn surfaces were investigated by using a scanning electron microscopy (SEM) and the wear type were determined.

At the end of experimental study, the optimum friction-wear behaviour was observed on the sample compacted at 350 MPa and sintered at 820°C. With increasing the amount reinforcing elements (except $ZrSiO_4$) resulted in a

decrease in density of the final samples. The most dense break-lining materials was obtained on the sample reinforced with $ZrSiO_4$. All samples exhibited friction-wear values which were within the values shown in SAE-J661 standard. However samples reinforced with 5% $ZrSiO_4$ and 6% $ZrSiO_4$ gave best results.

Science Code : 710
Key Words : Powder Metallurgy, Brake Lining, Friction-Wear and Ceramics
Page Number : 130
Adviser : Assoc. Dr. Adem KURT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli katkı ve yardımları ile beni yönlendiren hocam Doç.Dr.Adem KURT'a, Fren balatalarının testleri için fabrikayı bize açan çok kıymetli Eren Fren ve Debriyaj Balata AŞ. müdürü Sinan UZUN Bey'e ve eşi Şahika Hanımefendiye minnettar olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca Üretim bölümü şefi Timur bey'e ve fabrikada deneylerimde yardımını esirgemeyen Havva hanım'a minnettarım.

Kıymetli yardımlarından dolayı GÜTEF Metal Eğitimi Bölüm Başkanı Prof.Dr. Mehmet TÜRKER'e, Yrd.Doç.Dr. Halil ARIK'a, Doç.Dr.Ramazan ÇITAK'a, Yrd.Doç.Dr. Yusuf ÖZÇATABAŞ'a ve Tezimiz süresince bize morel desteği veren Yrd.Doç.Dr. Behçet GÜLENÇ ve ayrıca tez yazım işlemlerinde yardımlarını esirgemeyen Arş.Gör. Tayfun FINDIK, Uğur ARABACI, Ahmet DURGUTLU, Yunus TÜREN, Melik ÇETİN, Nizamettin KAHRAMAN, Kubilay KARACİF, Hasan OKUYUCU, Hanifi ÇİNİCİ, Bülent BOSTAN ve Ahmet GÜRAL'a ve resimlerin çizilmesinde yardımlarını esirgemeyen Makine Eğitimi Bölümü Arş.Görevlisi İsmail ŞAHİN kardeşime teşekkür ederim. GÜTEF Metal Eğitimi Bölümü teknisyenleri Rıdvan KARAAĞAÇ ve Hüseyin DELİGÖZ beylere teşekkürler.

Bu günlere gelmem için maddi ve manevi desteklerini hep üzerimde hissettiğim AİLEME, doktora çalışmalarım süresince sabrından dolayı EŞİME teşekkür ederim. Biricik oğlum Emirhan'a sevgilerimle.

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Standart elek analizi takımı 5

Çizelge 2.2. T/M' nin otomotiv sektöründe uygulama alanları 12

Çizelge 3.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler 22

Çizelge 4.1. Tipik ıslak ve kuru balata bileşimleri 31

Çizelge 4.2. Bazı ülkelerde kullanılan kuru ve yağlı sürtünme için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri 34

Çizelge 4.3. Bronz esaslı sinter balata malzemelerin kullanım karakteristikleri ve özellikleri 35

Çizelge 4.4. Yeni sürtünme malzemesi ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik ve karakteristikleri 36

Çizelge 4.5. Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler 37

Çizelge 4.6. Demir asıllı balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri 38

Çizelge 4.7. Sinterlenmiş demirin mekanik özelliklerine fosfor' un etkisi 38

Çizelge 4.8. Disk ve kampana için kullanılan dökme demir analizi 40

Çizelge 5.1. Yerküredeki elementlerin miktarı 42

Çizelge 5.2. Bazı ileri teknolojik seramiklerin özellikleri 43

Çizelge 6.1. Bronz esaslı toz metal fren balata numunelerinin kimyasal bileşimi 53

Çizelge 6.2. Bronz esaslı toz malzemelere ilave edilen katkı maddeleri ve oranları 56

Çizelge 6.3. Aşınma test şartları 60

Çizelge 7.1. Ana malzeme ve Silisyum dioksit bileşiminin karakterizasyon sonuçları 61

Çizelge 7.2. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış 63

Çizelge 7.3. SiO_2 balata numunelerinin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri 66

Çizelge 7.4. Ana malzeme ve Al_2O_3 bileşiminin karakterizasyon sonuçları.....75

Çizelge 7.5. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış..... .. .73

Çizelge 7.6. Al_2O_3 balata numunelerinin 2. yorma işlemi esnasındaki Özellikleri.....77

Çizelge 7.7. Kahverengi sepiyolitin kimyasal analiz Değerleri 84

Çizelge 7.8. Ana malzeme(A) ve sepiolit bileşiminin karakterizasyon sonuçları.....84

Çizelge 7.9. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış.....87

Çizelge 7.10. Sepiolit numunelerinin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri.....89

Çizelge 7.11. Ana malzeme ve antimon trisülfit bileşiminin karakterizasyon sonuçları 95

Çizelge 7.12. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış..... 97

Çizelge 7.13. Sb_2S_3 numunelerinin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri.....100

Çizelge 7.14. Ana malzeme ve Zirkonyum silikat bileşiminin karakterizasyon sonuçları 106

Çizelge 7.15. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış.....109

Çizelge 7.16. $ZrSiO_4$ numunelerinin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri.....110

Çizelge 7.17. SAE-J661 standardına göre deney numunelerinden alınan sonuçlar.....118

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Tek yönlü preslemede numune kesitinde görülen yoğunluk dağılımı 8

Şekil 2.2. Sinterleme sırasında metalurjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması 10

Şekil 3.1. Kuru kayma boyunca kristal kafesin elastik deformasyonu 15

Şekil 3.2. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları 17

Şekil 3.3. Kuru balatada basınç ve hızın sürtünme katsayısına etkisi 18

Şekil 3.4. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi 20

Şekil 3.5. Adhesiv aşınma 22

Şekil 3.6. Ahesiv aşınmada aşınma bölgeleri 23

Şekil 3.7. Abrasiv aşınma 24

Şekil 3.8. Tribo oksidasyon aşınması 25

Şekil 3.9. Yorulma aşınması 26

Şekil.3.10. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi 27

Şekil 4.1. Kuru balatada sıcaklığın dinamik sürtünme katsayısına etkisi 31

Şekil 4.2. Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliği 35

Şekil 5.1. Seramik ve metalik takım malzemelerin sertlik-sıcaklık ilişkisi 45

Şekil 5.2. Metal ve seramik malzemelerin erosiv aşınmasında partikül açısının etkisi 47

Şekil 5.3. Bir fren balatasının yüzeyindeki mikro temaslar sonucu meydana gelen çukurlar ve onların büyümesi 49

Şekil 6.1. SiO_2 toz tane boyut dağılımı 54

Şekil 6.2. Al_2O_3 toz tane boyut dağılımı 54

Şekil 6.3. Sepiolit toz tane boyut dağılımı 54

Şekil 6.4. Sb_2S_3 toz tane boyut dağılımı 55

Şekil 6.5. $ZrSiO_4$ toz tane boyut dağılımı 55

Şekil 6.6. Toz presleme kalıbı 57

Şekil 6.7. Sinterleme fırını şematik gösterimi 58

Şekil 6.8. Sinterleme işleminin aşamaları 59

Şekil 7.1. Değişen SiO_2 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi 62

Şekil 7.2. Sinterleme sonrası % 4 SiO_2 numunesinde 1 rakamı ile gösterilen bölgeden alınan EDS sonucu 64

Şekil 7.3. Değişen SiO_2 oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi 64

Şekil 7.4. SiO_2 deki değişime bağlı olarak, artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim 67

Şekil 7.5. Değişen SiO_2 oranlarına göre aşınma miktarındaki değişim 68

Şekil 7.6. A4 numunesinde 1 rakamı ile gösterilen (siyah bölgeler) bölgelerden alınan nokta analiz sonucu 71

Şekil 7.7. A4 numunesinde 2 rakamı ile gösterilen (beyaz bölgeler) bölgelerden alınan nokta analiz sonucu 71

Şekil 7.8. Değişen Al_2O_3 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi 73

Şekil 7.9. Sinterleme sonrası % 4 Al_2O_3 numunesinde 1 rakamı ile gösterilen bölgeden alınan EDS sonucu 75

Şekil 7.10. Değişen Al_2O_3 oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi 75

Şekil 7.11. Değişen Al_2O_3 miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim 78

Şekil 7.12. Değişen Al_2O_3 miktarına göre aşınma miktarındaki değişim 79

Şekil 7.13. B4-1 numunesinde 1 numaralı notadan (siyah renkli bölgelerden) alınan analiz sonucu.....81

Şekil 7.14. B4-1 numunesinde 2 numaralı noktadan (beyaz renkli bölgelerden) alınan analiz sonucu.....81

Şekil 7.15. Değişen sepiyolit oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi.....85

Şekil 7.16. Sinterleme sonrası % 4 sepiolit numunesinde 1 rakamı ile işaretli bölgeden alınan EDS sonucu.....87

Şekil 7.17. Değişen sepiyolit oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi.....87

Şekil 7.18. Değişen sepiyolit miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim.....90

Şekil 7.19. Değişen sepiyolit miktarına göre aşınma miktarındaki değişim.....91

Şekil 7.20. C4-4 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen noktadan alınan analiz sonucu.....93

Şekil 7.21. C4-4 numunesinde 2 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu.....93

Şekil 7.22. Değişen Sb_2S_3 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi.....95

Şekil 7.23. Sinterleme sonrası % 4 Sb_2S_3 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgeden alınan EDS sonucu.....98

Şekil 7.24. Değişen Sb_2S_3 oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişim.....98

Şekil 7.25. Değişen Sb_2S_3 miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim.....101

Şekil 7.26. Değişen Sb_2S_3 miktarına göre aşınma miktarındaki değişim.....102

Şekil 7.27. D4-4 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu.....104

Şekil 7.28. D4-4 numunesinde 2 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu.....104

Şekil 7.29. Değişen $ZrSiO_4$ oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi 106

Şekil 7.30. Sinterleme sonrası % 4 $ZrSiO_4$ numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgeden alınan EDS sonucu....108

Şekil 7.31. Değişen $ZrSiO_4$ oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi 109

Şekil 7.32. Değişen $ZrSiO_4$ miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim 111

Şekil 7.33. Değişen $ZrSiO_4$ oranına göre aşınma miktarındaki değişim 112

Şekil 7.34. E4-4 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu 115

Şekil 7.35. E4-4 numunesinde 2 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu....115

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Üretimi yapılan çeşitli T/M parçaları 12

Resim 7.1. Resim 7.1. SiO_2 artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim 63

Resim 7.2. Artan SiO_2 miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri 70

Resim 7.3. Al_2O_3 artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim 74

Resim 7.4. Artan Al_2O_3 miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri 80

Resim 7.5. Sepiolit artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim 86

Resim 7.6. Artan sepiolit miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri 92

Resim 7.7. Sb_2S_3 artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim 97

Resim 7.8. Artan Sb_2S_3 miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri 103

Resim 7.9. $ZrSiO_4$ artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim 108

Resim 7.10. Artan $ZrSiO_4$ miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri 114

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	**Açıklama**
μm	Mikron
μ	Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar	**Açıklama**
T/M	Toz metalurjisi
SİP	Soğuk izostatik presleme
TS	Türk standartları
TEK	Termo elastik kararsızlık

1.GİRİŞ

Bu çalışmada, taşıtların fren sistemlerinde sürtünme malzemesi olarak kullanılan fren balatalarının toz Metalurjisi (T/M) yöntemi ile üretiminin yapılabilirliğine araştırılmıştır. Bronz esaslı olarak üretilen balata malzemelerinin aşınma ve sürtünme özelliklerini geliştirebilmek amacıyla bazı seramik tozları kullanılmıştır.

1960'lı yılların sonlarına kadar, US yolcu arabaları ve hafif otomobillerde organik fren balataları kullanıldı. 1960'ların sonlarında ve 1970'li yılların başlarında otomotiv endüstrisinde önemli değişim oldu; sürtünme malzemelerinden asbestin çıkarılma ihtiyacı duyuldu, hafif ve küçük arabalardan büyük kamyonlara geçiş sağlandı. Bu da sürtünme malzemelerinde ve özellikle disk ve balatalarda yeni bir dönemin başlangıcı olmuştur (1).

Frenlerin birinci fonksiyonu, hareketli bir sistemi durdurmaktır. İkinci fonksiyonu ise hareket enerjisini absorbe ederek, ısıya çevirmek ve bu ısıyı da atmosfere yaymaktır. Eğer frenlere çıkabileceğinden daha fazla bir ısı verilirse fren balatalarındaki sürtünme katsayısının düştüğü görülecektir ve bu da frenlerin durdurma kabiliyetlerinin azalmasına neden olacaktır. Fren balatalarının etkisindeki bu azalmaya "balata aşınması" denir. Balatalar bu aşınma noktası sıcaklığının altına soğudukça normal görevlerini yaparlar. Fren balataları sürekli olarak veya uzun süreli aşırı sıcaklıklara maruz kaldıklarında, balataların daimi olarak zarar görmesine neden olacaktır. Bu zarar kendini frenlerin performansındaki azalma, hatalı çalışma, hızlı balata aşınması ve ses olarak gösterir (2-4).

Fren balatalarındaki aşınma noktasının giderilmesi için araştırmacılar iki yol izlemişlerdir. Birincisi; Fren balatalarının daha yeterli soğutulması, İkincisi ise; Fren balata malzemesini ısıya duyarlı olmayan bir sürtünme malzemesinden imal etmek. Delko-Moraine araştırmacıları çözüme ulaşabilmek için ikinci yaklaşımı seçmişlerdir. Bu yaklaşım; hiç sıcaklıktan etkilenmeden görevini yapabilecek bir balata malzemesi geliştirmektir. Fakat fren balatalarında aranan en önemli özellik, zor çevre ve şartlar altında bile güvenli kullanım ve rahatlık için; yüksek mukavemet,

sabit sürtünme katsayısı, düşük aşınma oranı, düşük gürültü ve anti-titreşim özellikleri gibi çok sayıdaki özellikleri gerektirmektedir (5-7).

Asbest esaslı sürtünme malzemelerinin yüksek sıcaklıklara dayanamadığı ve kısmen yapıları bozulduğu için istenen bu özellikleri yerine getirememektedirler. Asbest esaslı sürtünme malzemelerinin bu zararlı etkileri ve yüksek sıcaklıklara çok duyarlı olmaları sebebi ile, bilim adamları yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı ve insan sağlığını tehdit etmeyen, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş sürtünme malzemelerine yönelmiştir (8,9).

Toz metalurjisi üretim tekniğinin temel avantajlarından birisi, istenen homojenlikte karışmayan malzemeleri toz halinde karıştırabilmektir (10). Bu avantaj, debriyaj ve fren balataları üretimini mümkün kılmıştır (11).

Metalik balataların, asbest esaslı balata türlerine göre avantajları, daha büyük hızda enerji absorbe etmeleri ve daha fazla aşınma mukavemetine sahip olmalarıdır. Bunlar daha yüksek sıcaklıklara dayanabildikleri gibi aynı zamanda daha fazla ısı iletirler. Sürtünme katsayılarıda sıcaklık ve basınçla daha az değişir. Dinamometre testleri, metalik sürtünme malzemelerinin 230 ^{o}C'nin üstündeki sıcaklıklarda asbest esaslı sürtünme malzemelerinden daha yüksek aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. Bu sıcaklığın altında ise, metallerin sürtünmesi eşdeğerdir, ya da organiklerinkinden daha yüksektir (12,13).

Daha yüksek güçler için, metalik olmayan katkı içeren metalik bağlantılı balata malzemeleri kullanılır. Metalik olanlar; bakır alaşımları, demir ve demir alaşımları, metalik olmayanlar ise tercihen (SiO_2, Al_2O_3 veya mullit) ve silikatlardır. İlave katkı olarak düşük sıcaklıkta ergiyen metaller, sülfür ve sülfat, karbür, grafit ve sinter metalik tozlar kullanılabilir. Metalik olmayan miktar, hacim olarak % 50 veya daha fazla olabilir. Metal seramik balata malzemelerinin sürtünme katsayısı 0,3-0,7 arasındadır. Bunlar 1000 ^{o}C sıcaklığa kadar kullanılabilirler (14).

2. TOZ METALURJİSİ VE PARÇA ÜRETİM SÜRECİ

T/M; metal tozlarının karıştırılarak istenilen şekle sıkıştırılması, kontrollü atmosferde sinterlenmesi ile parça üretme yöntemidir (15-17). Bazı parçalar bu işlemi takiben kalibrasyon (yeniden presleme), yağ veya plastik emdirme, daha düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım sızdırma, ısıl işlem veya kaplama işlemlerine tabi tutulabilir. Diğer bir ifadeyle T/M, elementel tozların, tam ve/veya yarı ön alaşımlanmış tozların bağlayıcılar ve yağlayıcılarla birlikte harmanlanarak uygun sıkıştırma yöntemleri ve sıcaklıklar kullanılarak arzu edilen şekilde üretilmeleri süreçlerini içeren oldukça kapsamlı ve çok disiplinli bir malzeme üretim yöntemidir. Günümüzde ise T/M, yüksek gözenekli metal filtrelerden kendinden yağlamalı yataklara, kontrollü gözeneklilik ile sinterlenmiş parçalara ve son olarak tam yoğunluktaki mamüllere kadar geniş ürün yelpazesini içermektedir (18).

2.1. Toz Özellikleri

Toz metalurjisi çok geniş bir alanda hizmet verdiği için, kullanılacağı yere göre tozların özelliklerinin dikkatli şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Metal tozlarını, geniş bir aralıkta mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak üzere, toz metalurjisi yöntemi için oldukça fazla sayıda, tip ve derecede bulmak mümkündür. T/M parçalarının mekanik veya kimyasal özellikleri, üretim teknikleri ile ortaya çıktığı için tozların özelliklerinin belirlenmesinde, tozun boyutu, şekli ve yüzey alanı incelenmektedir (19).

Metal tozların özellikleri iki ana başlık altında incelenebilir.
a) Tozların kimyasal özellikleri
b) Tozların fiziksel özellikleri

2.1.1. Kimyasal özellikler

Kimyasal özellikler ifadesinden bileşim ve saflık anlaşılır. Tozlarda bulunabilen katı yabancı maddeler genelde kimyasal indirgeme sonucu ortaya çıkmaktadır. Tozlar

kimyasal indirgeme ile üretilmişse bazı oksit parçacıkları indirgemeden kalmış olabilir (Cu ve Fe oksit tozlarında olduğu gibi). Bu tanecikler tozun özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bazen de bu yabancı maddeler kendini yüzey filmleri olarak gösterir. Atmosferle temas sonucu belli bir süre sonra tozlar oksitlenir. Tozların preslenmesi sırasında Cr, Zr, Al, Mg, Pb, ve Sn gibi metallerin dengeli oksitlerinin kalıp ve zımba yüzeylerinde olumsuz etkileri gözlenmiştir (15).

Metal tozların kimyasal özelliklerini tespit edebilmek için, standart kimyasal analiz yöntemleri kullanılabilir. Mesela, tozlardaki oksijen tayini için 5 gr. kurutulmuş toz numunenin 30 - 60 dakika süre ile hidrojen gazı altında 550 °C ila 1150 °C sıcaklıkta indirgenerek tartılması ile yapılır.

$$\% O_2 = \frac{Wi - Ws}{Wi} x100 \qquad [1.1.]$$

Wi = İlk ağırlık Ws = Son ağırlık

Bu değer SiO_2, Al_2O_3, CaO, BeO, Mn_2O_3, TiO_2, Cr_2O_3, MgO v.b. gibi dengeli oksitleri içermez. Çünkü deney şartları altında bu gibi oksitler indirgenmez. Asitte çözünmeyen maddelerin tayini için ise, numune asit içinde kaynatılır ve filtre edilerek fırında 980 °C 'de yakılarak sonuç çıkarılır (15) .

$$\% \text{ Asitte çözünmeyen madde} = \frac{Ws}{Wi} x100 \qquad [1.2.]$$

Wi = İlk ağırlık Ws = Son ağırlık

2.1.2. Fiziksel özellikler

Tozların fiziksel özellikleri olarak; parçacık boyutu, şekli, özgül yüzey alanı, görünür yoğunluk ve akış hızı verilebilir. Bunları kısaca gözden geçirelim.

2.1.2.1. Parçacık boyutu

Herhangi bir teorik sınır bulunmamasına rağmen, pratik olarak maksimum toz tane boyutu, toz özellikleri, parça yoğunluğu ve mümkün pres kapasitesi tarafından

belirlenmektedir. Geleneksel preslenmiş T/M parçalarının büyüklüğü, tasarlanan alan 0.000 - 625 mm^2 ve yükseklik (presleme yönünde) 1 ila 150 mm arasındadır. Pratik yükseklik sınıri 3 inç 'e yakındır. Verilen bir metal toz için gerekli yoğunluk ne kadar düşükse, bir özel pres üzerinde üretilebilir parça boyutu da o kadar büyüktür. Presleme yönünde nispeten uzun parçaları, toplam uzunluğu boyunca yeterli yoğunlukta üretmek zordur. Parça uzunluğunu kısıtlayan diğer bir faktörde metal tozlarının görünür yoğunluğudur (19).

Tozların tane büyüklükleri genellikle elek analizi ölçüm tekniği ile yapılmaktadır. Elek büyüklüğü, delik büyüklüğü ile ölçülür. Elek büyüklüğü meş (mesh) ile belirtilir. Çizelge 2.1'de elek analizi takımı gösterilmiştir (20).

Çizelge 2.1. Standart elek analizi takımı

Meş	Delik büyüklüğü (μm)
30	600
40	425
50	300
60	250
80	180
100	150
140	106
200	75
230	63
325	46

2.1.2.2. Parçacık şekli

T/M işlemi için en uygun olan parçalar, presleme yönünde düzgün boyutlara sahip olanlardır (silindirik, kare ve dikdörtgen). Radyal projeksiyonlu ve çevreli kamlar ve dişliler. Bunların baskıları nisbeten basittir. Mükemmel küreler T/M yöntemi ile üretilemez. Parçacık boyu ve şekli çok yakından ilgili iki faktördür. Parçacıklar tek boyutlu (iğne, düzgün olmayan çubuk), iki boyutlu (dendiritik, pul), üç boyutlu (küresel, yumru, düzgün olmayan, köşeli, gözenekli) olarak sınıflandırılırlar.

Atomize Al ve Sn gibi demir dışı tozlar ve paslanmaz çelik gibi demirli alaşımlar, parçacık boyu azaldıkça daha küresel parçacıklar meydana getirme eğilimindedirler. Gaz veya hava atomizasyonu daha yuvarlak, su atomizasyonu düzgün olmayan şekiller oluştururlar. Parçacık şekli kontrolü, optik ve elektron mikroskopları ile yapılır (19,21). Parçacık şekli tozların şu özelliklerini etkilemektedir;

a) Akış hızı : Küresel tozlar kolay akarken, pul şeklindeki tozlar düşük akış özelliği gösterirler ve düzgün olmayan şekilli bazı tozlar ise hiç akmazlar. Akış hızı, 50 gr. kuru tozun hall akış hunisinden kendi halinde akış zamanıdır diye tanımlanır.

b) Görünür yoğunluk : Belli bir hacimdeki sıkıştırılmamış toz kütlenin ağırlığıdır. Görünür yoğunluk g/cm^3 olarak ifade edilir. Küresel tozlar en yüksek, köşeli tozlar yüksek ve gözenekli tozlar ise düşük görünür yoğunluktadır.

c) Sıkıştırılabilirlik : Metal toz kütlelerinin, kolay sıkışabilme ve teorik yoğunluğa yaklaşabilme derecesine sıkıştırılabilirlik denir. Düzgün olmayan şekilli tozlar zor sıkıştırılır. Bunun için yağlayıcılar kullanılarak sıkıştırma işlemi kolaylaşmış olur. Buna karşın düzgün şekilli tozlar daha rahat sıkıştırılabilirler. Sıkıştırılabilirlik yoğunlaşma parametresi ile belirlenebilir.

$$\text{Yoğunlaşma parametresi} = \frac{\text{ham yoğunluk} - \text{görünür yoğunluk}}{\text{teorik yoğunluk} - \text{görünür yoğunluk}}$$

d) Sinterlenebilirlik : Küçük taneli ve düzgün olmayan şekilli toz taneciklerin birim yüzey alanları daha büyük olduğu için difüzyon, düzgün tanelere oranla daha hızlı olacaktır.

2.2. T/M Yöntemi ile Parça Üretim Süreci

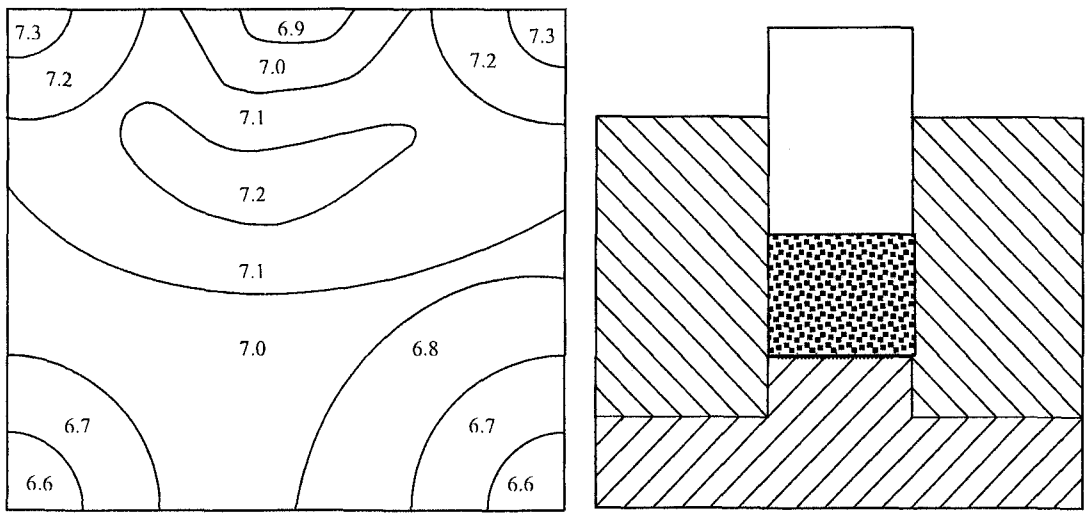
2.2.1. Harmanlama

İstenilen boyut, şekil ve bileşimdeki ham tozların yağlayıcı elemanlarla ve alaşım elemanlarıyla karıştırılması işlemidir. Bu işlem özel karıştırıcılarla homojen bir harman elde edilinceye kadar sürdürülür (15).

2.2.2. Presleme

Presleme genellikle oda sıcaklığında özel şekilde hazırlanmış çelik kalıpta yapılır. Tozun plastik şekil değiştirme özelliğine göre 1-10 ton / cm^2 arasında değişen basınç tatbik edilir. Sinterlenmiş cisimlerin fiziksel özellikleri üzerinde yapılan araştırmalarda ise bazen 30 ton / cm^2 ye kadar ulaşan basınçlar da kullanılmıştır (22).

Geleneksel toz sıkıştırılması işleminde şekil 2.1' de görüldüğü gibi, tek eksen boyunca uygulanan basınç sonucu kalıbı dolduran tozlar preslenerek şekillenir. Toz doldurulduktan sonra, üst baskı plakası (dalgıç piston) ile basma gerçekleşir ve sıkıştırılmış toz metal blok parça alt pistonun hareketi ile çıkarılır. Kalıp duvarlarının aşınmasını engellemek ve tozların kolay sıkıştırılabilirliği için tozlara ve kalıp duvarlarına yağlayıcılar eklenir (18).



Şekil 2.1. Tek yönlü preslemede numune kesitinde görülen yoğunluk dağılımı (18)

Tek yönlü preslemede uygulanan basınç arttıkça toz kütlesinin yoğunluğu artar. Yani bünyedeki gözeneklilik düşer. Tek yönlü presleme ekonomik bir yöntem olmasına karşın, bazı dezavantajları ve sınırlılıkları vardır. Karmaşık şekillerdeki parçalar ile boy/en oranı yüksek olan (L/D>2.5) metalik parçalarda istenen ham yoğunluklar gerçekleşemez. Bu yüzden karmaşık ve boy/en oranı fazla olan şekillerdeki parçaları basmak amacıyla soğuk izostatik presleme (SİP) ile tozların preslenmesi işlemleri gerçekleştirilir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen SİP işleminde, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağla dolu basma hücresinin içerisine yerleştirilir. Basma pistonu veya dalgıcı sayesinde yağ, kalıba her yönden eşit baskı yapar ve bu sayede basılmış numunelerin her tarafı aynı yoğunlukta olur (18).

İzostatik presleme, hedeflenene yakın boyut ve şekillerdeki T/M parçalarını üretmek için kullanılır. Geleneksel presleme veya kalıplamadan farklı, izostatik presleme yağ, gaz veya su gibi bir basınçlı sistemde gerçekleştirilir. İzostatik preslemenin faydaları arasında;

a) Karmaşık şekil kabiliyeti
b) En aza indirilmiş pahalı toz girişi
c) Azaltılmış malzeme kaybı (karmaşık şekil yapımında)
d) Preslenmesi zor parçalara üretebilme
e) Genellikle bağlayıcıya ihtiyaç yoktur.
f) Parçayı son şekil ve boyutuna yakın üretebilme
g) Homojen yoğunluk ve özellikler sıralanabilmektedir (19).

Sıcak presleme veya basınç altında sinterleme, soğuk presleme ve sonra sinterlemeye nazaran daha az pratiktir. Sadece tel çekme haddelerinin, elmas alaşımlarının imali gibi istisnai hallerde kullanılmış olan bu yöntem , tozların veya özel bir şekilde ısıtılmış kömür, çelik veya grafit bir matris içine yerleştirilerek sıkıştırılmış parçaların sinterlenmesi esnasında basıncın tatbik edilmesinden ibarettir (22).

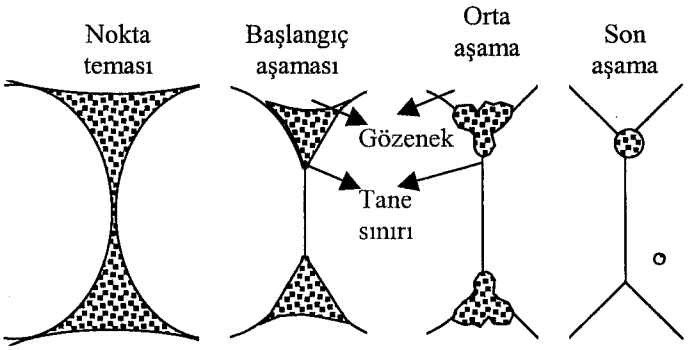
2.2.3. Sinterleme

Sinterleme toz metalurjisindeki önemli işlemlerden biridir. Şu an uygulama fırınlarındaki sinterleme, eskiden uygulanan birleştirme işlemi hataları üzerinde geliştirilmiştir (23). Sinterleme yüksek sıcaklıklar kullanılarak preslenmiş ve ham kompaktlardaki toz parçacıklarının birleştirilmesi işlemi olarak tanımlanır (24).

Sinterleme süreçlerinde kullanılan sıcaklıklar genellikle sinterlenecek olan parçada katı-hal atom yayınma ve ergime sıcaklığının altında seçilirse de özellikle çok sistemli alaşımlarda sıvı-faz sinterlemesi olarak bilinen bir sıvı fazın varlığında da gerçekleşebilir. Toz parçacıkların yüksek yüzey enerjileri aşılarak yada ortadan kaldırılarak gerçekleşen sinterleme sonucu parçacıklar arasında tam ve mükemmel bağlar oluşur ki bu suretle iç yapıdaki gözeneklilik sıfıra düşer. Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapının tersi ile doğru orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları büyüklere kıyasla daha kolay sinterlenirler (18).

Sinterleme işlemi kullanılırken sinterleme esnasında, birleştirme ve sıcaklık şartları istenilen özellikleri elde edebilmek için kontrol altında tutulur. Malzemenin sinterlenmesi esnasında bir çok işlem basamakları da (Oksit indirgenmesi, bağlayıcıların kaldırılması veya kimyasal reaksiyonlar) meydana gelir. Mesela ; Demirin sinterlenmesi esnasında, oksit indirgenmesi, yağlayıcıların dağılımı, karbon kaybı olması, sıcaklığa bağlı olarak azot çözünebilirliği ile değişir. Yüzeyin gazı dışarı atması (desorption) α' dan Υ fazına dönüşüm, 900 ^{o}C üzerindeki tane büyümesi ve sıcaklığa bağlı olarak (bu dönüşüm bronz için 800 ^{o}C dir) difüzyon artışı meydana gelir. Aynı zamanda boşluk morfolojisi değişir (23).

Sinterleme sırasında metalurjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması yayınmaya bağlı olarak şekil 2.2 ' da görüldüğü gibi ilk, orta ve son aşamaları olan bir geometrik sıra takip eder (18).



Şekil 2.2. Sinterleme sırasında metalurjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması (20)

2.2.4. Sinterleme sonrası işlemler

T/M parçası genellikle sinterlemeden sonra kullanıma hazırdır. Ekonomik bakımdan arzu edilmese de bazı sinter sonrası işlemlere gerek duyulabilir. İlk sıkıştırma işleminde farklı bir kalıpta yüzey hassaslığı, yoğunluk ve ölçü hassaslığını sağlamak amacıyla yapılan sıkıştırma işlemine kalibrasyon veya yeniden presleme adı verilir. T/M parçasının gözeneklerini yağ, plastik vs. gibi metal olmayan bir malzeme ile doldurma gerekebilir. Gözeneklere düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım emdirilerek yoğunluk, mukavemet, sertlik, süneklik ve darbe mukavemetinde artış sağlanabilir. Kaplama işlemi yapılmadan önce yüzeydeki gözenekler reçine veya deformasyonla kapatılmalı. Buhar işlemi ile demir asıllı parçaların yüzeyleri manyetik demir oksit ile kaplanarak sertlik, baskı mukavemeti, aşınma ve korozyon dirençleri artırılır. Bu işlem 600 ^{o}C' de kuru basınçlı buharın parçalara uygulanmasıyla yapılmaktadır (15).

2.3. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları

Çağın ekonomik dengeleri iletişim, yeni malzeme, biyoteknoloji, nükleer, uzay ve havacılık teknolojileri olmak üzere beş teknoloji üzerine kurulmuştur. Yeni veya ileri malzeme teknolojisi, aslında diğer teknolojilerin de temelidir. Çünkü bütün teknolojilerin gelişmesi, yeni üretilen malzemelerin özellikleri ve performansı üzerine kurulmuştur. Diğer teknolojilerle de iç içe olan malzeme teknolojisindeki başlıca atılım, doğal kaynaklarla rekabet eden sentetik malzeme kaynaklarının bulunmuş olmasıdır. Maddenin moleküler yapıda kontrolü sayesinde yeni özellikleri olan malzemeler gündeme gelmektedir. Yeni veya ileri malzeme teknolojisinin de temeli toz metalurjisidir. Çünkü pek çok özelliklere sahip sentetik malzeme üretimi ancak metal tozlarının karışım teknolojisi ile mümkün olmaktadır (25).

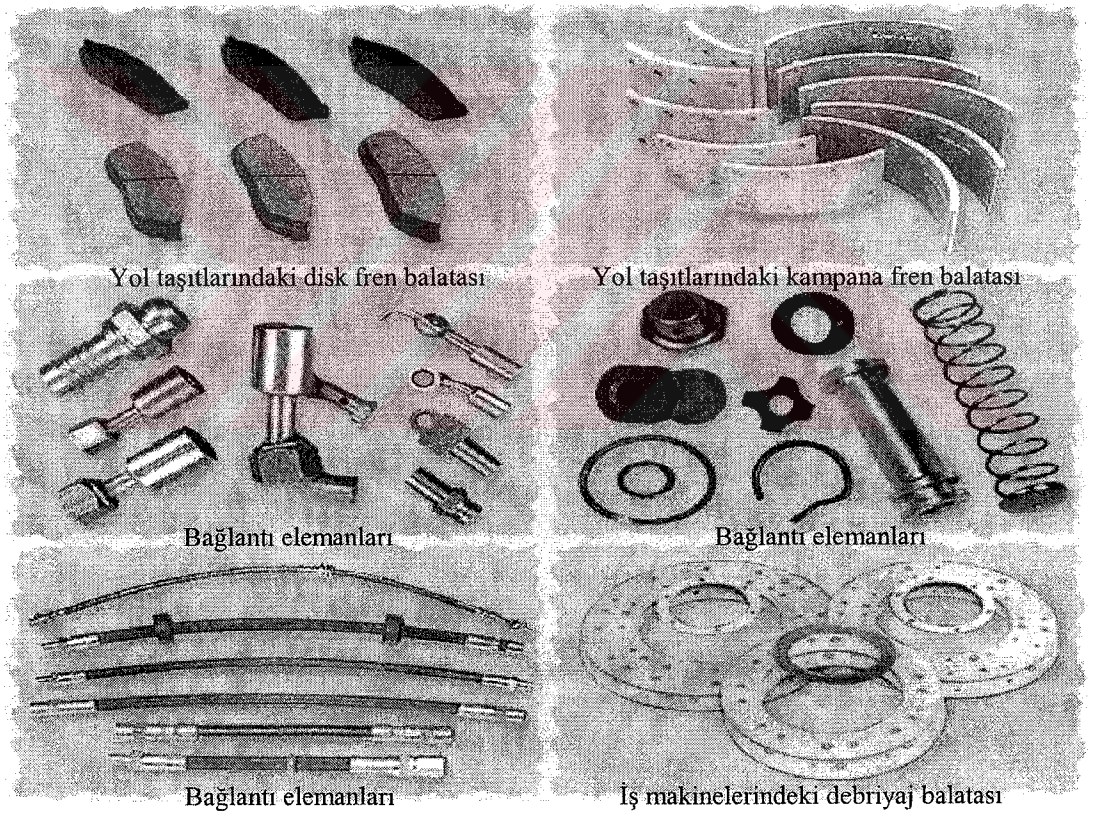
T/M parçaları otomobillerin hareket sistemleri, çamaşır makinaları, güç makinaları, spor malzemeleri, fotokopi makinaları, yol ekipmanları, av malzemeleri, hidrolik sistemler, x ışınlarının korunma sistemleri, petrol ve gaz kuyularının kapama sistemleri ve kaset çalar gibi pek çok yerde kullanılmaktadır. İmalat endüstrisinde kullanılan T/M parçaları büyük ölçüde demir, çelik ve alaşımları, bakır ve bakır esaslı alaşımlar (prinç, tunç ve nikel, gümüş), alüminyum, paslanmaz çelik, nikel ve kalay esaslı tozlardan elde edilen alaşımlardır (26).

Dünya çapında üretilen tüm metalik tozlardan imal edilen sinter parçaların pazar paylarından en büyük kısmı, % 86 ile demir-çelik esaslı sinter parçalar almaktadır. İkinci sırada % 11 pazar payı toplamı ile bakır ve bakır esaslı sinter parçalar, üçüncü sırada % 0.6 ile alüminyum takip eder (18). T/M' nin otomotiv sektöründe önemli uygulamaları çizelge 2.2' de sunulmuştur.

Çizelge 2.2. T/M' nin otomotiv sektöründe uygulama alanları (18)

Dinamo regülatörü kontaklar	Pt-alaşımları, Fe
Yataklar	Cu, Pb, Sn, Fe, Al, grafit, tunç
Fren balataları	Fe, grafit, Cu, Zn, Sn
ABS fren sistemi sensör halkaları	Fe, P
Debriyaj ve fren balataları	Fe, grafit, Cu, Zn, Sn, Pb
Elektrik kontakları	W, Cu, Ag
Amortisör	Fe, Cu, takım çeliği
Buji	Fe, Zn, seramik esaslı tozlar
Vites kutusu parçaları	Fe, Cu, çelik

Genel olarak kullanılan toz metal parçaların örnekleri şekil 2.3' da verilmiştir.



Resim 2.1. Üretimi yapılan çeşitli T/M parçaları

2.4. Toz Metalurjisi'nin Avantaj ve Dezavantajları

T/M üretim tekniği bütün dünya ülkelerinde hızla yayılmaktadır. ABD' de Japonya'da, Avrupa ve avusturalya'da T/M üretiminin sürekli olarak arttığı rapor

edilmektedir. Bunun en büyük nedeni, daha ekonomik bir üretim tekniği olması ve diğer tekniklere kıyasla daha az enerji tüketilmesi (27).

T/M, demir ve demir dışı parçaların üretiminde kullanılan, son derece gelişmiş bir yöntemdir. Elementel veya alaşım tozları karıştırılır ve bir kalıp içerisinde preslenerek sinterlenir veya ısıtılarak partiküller arasında metalurjik bağın oluşması sağlanır. Esası talaşsız metal işleme yöntemidir. T/M nihai parçada başlangıçtaki ham maddenin % 97' sinden fazlasını kullanmaktadır. Bundan dolayı, T/M bir enerji ve malzeme koruma yöntemidir (19).

Daha önce döküm, talaşlı üretim, dövme gibi tekniklerle üretildikleri halde ekonomik sebeplerle T/M tekniğine değiştirilen sayısız parça vardır. T/M' nin diğer tekniklerle karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır(19,27,28,).

T/M' nin avantajları;

a) İşlemeyi (talaş kaldırma) en aza indirir

b) Yakın töleranslar ve düzgün yüzeyler elde edilir

c) Yoğunluk ve ergime noktalarındaki farklılıklardan dolayı başka yollarla imkansız olan alaşım ve karışımların veya karmaşık parçaların üretimi mümkündür.

d) Metal olmayan malzemeler, metal asıllı ürünlerin içinde ince ve homojen şekilde dağıtılabilir

e) Isıl işlemle mukavemeti veya aşınma direnci yükseltilebilen malzemeler sağlanabilir (gözeneklere arzu edilen yağlayıcı maddeler emdirilebilir) (19).

T/M' nin dezavantajları;

a) İlk yatırım (takımlar, presler ve sinter techizatı) oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmazsa amortisman değerleri yüksektir.

b) Metal tozların maliyeti, ingot halinde üretilen malzemelerden haha yüksektir

c) Töleranslar talaşlı işlemlere göre daha kabadır

d) Tozların kalıp içinde akışkanlığı sınırlıdır. Bu nedenle yapılacak parçanın şekli kısıtlayıcı bir faktör olabilir.

3. TRİBOLOJİ

3.1. Sürtünme ve Aşınmanın Önemi

Triboloji, birbirine göre izafi hareket yapan ve temasta olan yüzeylerde sürtünme, aşınma ve yağlama konuları ile bunlara bağlı konuları inceleyen bilim dalıdır (29). Yeni bir bilim dalı olup 1967 'de ortaya çıkmıştır. Esas olarak Yunanca bir terim olan "TRIBOS" kelimesinden türetilmiş olup (ovalama, kaydırma), disiplinler arası bir bilim dalıdır (30).

Çok sayıda yapı elemanı sürtünmeli ya da kaymalı zorlamaya maruz kalır. Bu sırada meydana gelen aşınma, parçaların ömrünü ve güvenirliğini sınırlar. Tekniğin her sahasında malzemelerin sürtünme özelliklerinden ve sürtünme kuvvetlerinden faydalanılarak çeşitli konstrüksiyonların gerçekleştirildiği ve çok çeşitli görevlerin yerine getirildiği görülmektedir. Bu görev, kavramalarda olduğu gibi bir güç nakli, frenlerde olduğu gibi hareket halinde bulunan bir makina'nın kinetik enerjisinin alınarak durdurulması yani bir gücün yutulması veya sevk ve hareket silindirlerinde olduğu gibi bir hareketin iletilmesi gibi çok çeşitli hareketlerde olabilir (14).

Aşınma çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı esnasında kırılma kadar tehlikeli bir problem olmasa bile, çok büyük ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Sanayileşmiş ülkelerde aşınma nedeniyle gayri safi milli hasılanın (GSMH) % 7' sine eşdeğer bir harcamanın yapıldığı tahmin edilmektedir (14,31).

3.2. Sürtünme

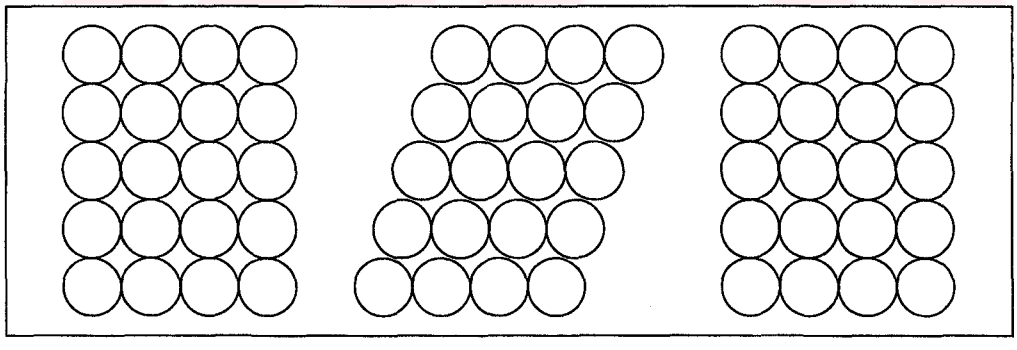
Genel anlamda sürtünme; temas halindeki yüzeylerin ve birbiri üzerinde hareket eden ya da, hareket ihtimaline karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır (31,32).

Hareketin cinsine göre sürtünme; kayma, yuvarlanma veya kayma yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olabilir. Birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı

madde konulup, konulmaması bakımından da, temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç halde de incelenebilir (9, 30, 33).

Leonardo da Vinci gibi bir çok bilim adamı, kuru sürtünme ile ilgilenmişlerdir. Çoğu araştırmacılar yüzey pürüzlülüğü, adhezyon, elastisite veya kuru sürtünme boyunca yüzey geçişleri gibi kuru sürtünmenin bir tek parametresi ile ilgilenmişlerdir (34). Son zamanlarda sürtünmenin meydana gelme nedenleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Sürtünmenin sebebi; bir yüzeydeki atomların diğer yüzeydeki atomlar üzerinde hareket ettiği zaman katı yüzeyin kayması esnasında meydana gelen kafes hareketidir. Çünkü bir yüzeyin diğer bir yüzey üzerinde hareketi sonucunda mekanik enerjinin bir bölümü ses dalgaları ve ısıya dönüşür. Birbirleri ile temastaki her katı malzemenin kristal kafesi atomik düzeyde denge durumundadır. Sürtünen çiftlerden birine kayma gerilmesi uygulandığında her kafes elastik olarak deforme olur(35). Eğer kayma daha da artarsa ve kararsız duruma gelirse atomlar yeni bir denge durumuna geri döner. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bütün deformasyon enerjisi yok olana kadar kristal kafes hareket eder (36).



Şekil 3.1. Kuru kayma boyunca kristal kafesin elastik deformasyonu

3.2.1. Sürtünme kanunları

Sürtünme kanunlarının belirlenmesinde iki temel esas vardır. Bunlar büyük oranda uyumluluk gösterirler. Birinci kanun; temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti, görünür temas alanında bağımsızdır. İkinci kanun; sürtünme kuvveti,

cisimler arasındaki normal yükle doğru orantılıdır. Böylece bir cisim diğeri üzerinde kayarken, eğer normal yük iki katına çıkarılırsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Bu kural daha çok "Amontos" kuralı olarak bilinir ve ilk kez 1699 yılında Fransız bilim adamı Amontos tarafından çıkarılmıştır. Üçüncü kural olarak da; kinetik sürtünme kayma hızından yaklaşık olarak bağımsızdır. Bu kuralın ilk ikisine göre uygulanabilirliği daha düşük değerdedir. Üçüncü kural Coulomb tarafından 1785 yılında açıklanmıştır (31).

3.2.2.Sürtünme teorileri

a) Mekanik kilitlenme teorisi; 1699 da Amontos tarafından bulunan bu teoriye göre yüzeylerdeki girintiler ve çıkıntılar bir biri içerisine geçerler. Yüzeyleri hareket ettirmek için uygulanan kuvvetin pürüzleri kesecek büyüklükte olması gerekir. Kesmeyi gerçekleştiren bu kuvvete sürtünme kuvveti denir. Bu teori sürtünmedeki enerji kaybını açıklayamamaktadır.

b) Moleküler çekim teorisi ; Tomlinson tarafından ortaya atılan bu teoriye göre temas eden yüzeylerin molekülleri arasında bir bağ oluşur ve sürtünme kuvveti moleküller arası bağı yenen kuvvettir. Bu teori yapışkan aşınmanın anlaşılmasına yardımcı olan bir teoridir.

c) Elektrostatik kuvvetler; bu teoriye göre sürtünme iki karşı yüzeyde zıt elektrostatik yük birikmesine sebep olur. Bu şekilde meydana gelen zıt yükler arasındaki çekme kuvveti yüzeyleri birlikte tutar.

a) Kaynaklaşma, kesme-kazıma; 1950 de Bowder ve Tabor tarafından ortaya atılan bu teori deneysel yolla elde edilen değerlerle uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu teoride birbiri üzerine bastırılan yüzeylerin temasta olan pürüzleri (asperitileri) yüksek basınçlar nedeni ile bölgesel olarak kaynaşır. Hareketi başlatabilmek için kaynayan noktaları kesmek gerekir. Eğer iki yüzeyden biri diğerine göre sert ise sert yüzeyin asperitileri yumuşak yüzeye gömülür. O halde de hareketi başlatabilmek için sert yüzeyin yumuşak yüzeyi kazıması gerekir.

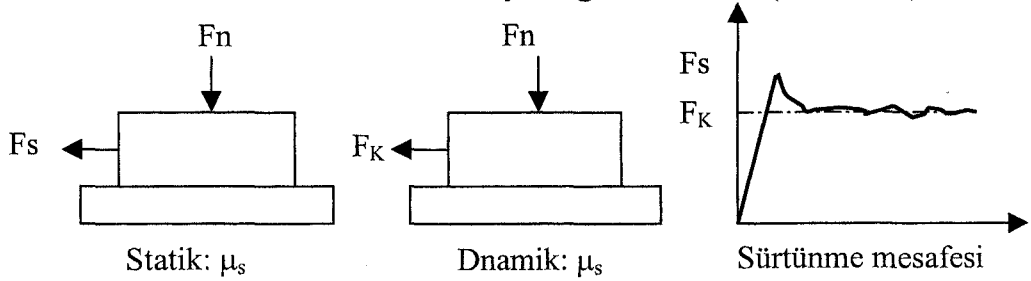
Yapılan ölçümlerde taşlanmış iki yüzeyin gerçek temas alanının görünen toplam yüzeyin çok küçük bir miktarı olduğu görülmüştür. Teorik olarak ilk değme halinde en yüksek üç noktada oturma olur. Bu noktaların elastik ve plastik deformasyonu sonucu değme alanı genişler ve diğer tepecikler birbiri ile temas eder. Yüzeyleri bastıran kuvvetin büyüklüğü kuvvete bağlı olarak, yüzey teması gittikçe genişler ve sonunda bir denge oluşur (37).

3.2.3. Sürtünme katsayısı

Sürtünme katsayısı TS 555'e göre, disk veya kampana ile disk veya kampana fren balatası arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır. Yine TS 555'e göre sürtünme katsayısı, sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Soğuk sürtünme katsayısı, aşınma deneyi esnasında 100, 150 ve 200 ^{o}C' de ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Sıcak sürtünme katsayısı ise, 300, 350 ve 400 ^{o}C' sıcaklıklarda ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır.

Bilindiği gibi iki malzeme birbiri ile temas edecek şekilde yerleştirilirse, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde bir sürtünme kuvveti (direnç) oluşur.

Kaymayı başlatan kuvvet (Fs) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (Fn) arasında; Fs = μs x Fn bağıntısı mevcuttur. Burada, μs statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur (Fk). Bu durumda; Fk = μk x Fn ilişkisi geçerlidir. Burada μk < μs kinetik sürtünme katsayısıdır. Şekil 3.2' de statik ve dinamik sürtünme katsayıları görülmektedir (31, 32, 38).

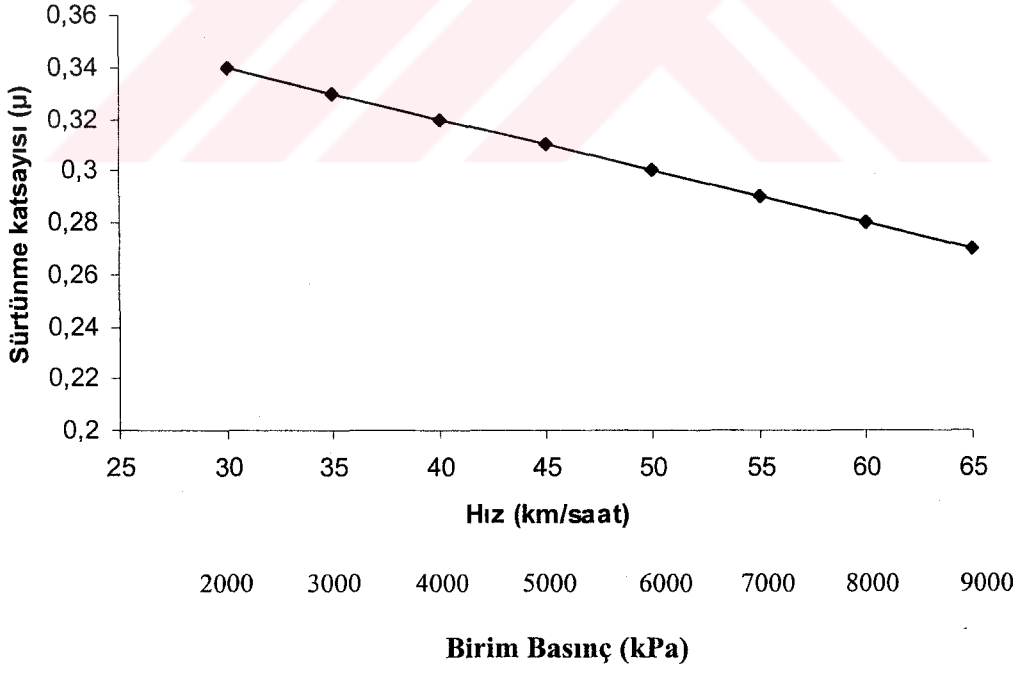


Şekil 3.2. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları (38)

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, sürtünme statik veya dinamik olarak tanımlanabilir. Statik sürtünme katsayısı, sıfır hızındaki iki yüzeyin sürtünme değeridir. Dinamik sürtünme katsayısı ise, sıfırdan büyük hızlarda ölçülen sürtünme değeridir. Sürtünme katsayısı; sürtünme hızı, basınç ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlıdır (11). İki yüzey arasındaki sürtünme hızının artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir. Uygulanan basınçta sürtünme katsayısı üzerinde benzer bir etki gösterir.

Islak balatalarda yüzey sıcaklığının 150 ^{0}C üzerine çıkmasıyla sürtünme katsayısında önemli miktarda düşme olacaktır. Bu sıcaklık genelde "bozunum sıcaklığı" olarak anılır. Islak balatalarda genellikle aşınma hızları düşüktür (11,27,39).

Kuru balatalar, ıslak olanlara göre daha basit ve hafiftir. Şekil 3.3 basınç ve hızın, otomobil disk freni dinamik sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Islak balatalarda olduğu gibi dinamik sürtünme katsayısında artan basınçla sürtünme katsayısında düşme meydana gelmektedir.



Şekil 3.3. Kuru balatada basınç ve hızın sürtünme katsayısına etkisi.

Pratikte sürtünme denilince akla gelen kinetik sürtünmedir. Aşınmada, enerji kaybı ve sıcaklık artışı gibi olaylar sürtünme sebebiyle oluşmaktadır. Bu duruma göre,

uygulama alanlarını göz önünde bulundurarak sürtünmenin hem istenen hem de istenmeyen bir olay olduğu söylenebilir. Fren, kavrama ve sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında istenilen bir olay olduğu için, sürtünme artırılmaya çalışılır. Oysa, diğer izafi hareket yapan bütün sistemlerde sürtünme istenmeyen bir olaydır ve azaltılması istenilir (31).

Buna göre sürtünme katsayısı (μ), sürtünme kuvvetinin değerini belirler. Sürtünme katsayısı, $0.001 < \mu \leq 1.0$ değerleri arasında değişir. Vakumda çok temiz yüzeyli metallerin birbirleri üzerinde kaydırılması sırasında sürtünme katsayısı $\mu > 1.0$ değerindedir. Çok hafif yüklü bir rulmanda ise $\mu = 0.001$ değerindedir. Birçok malzemenin havada birbiri üzerinde kayması durumunda sürtünme katsayısı ($0.1 < \mu < 1$) arasındaki değerlerde, yani daha dar bir aralıktaki değerlerdedir (38).

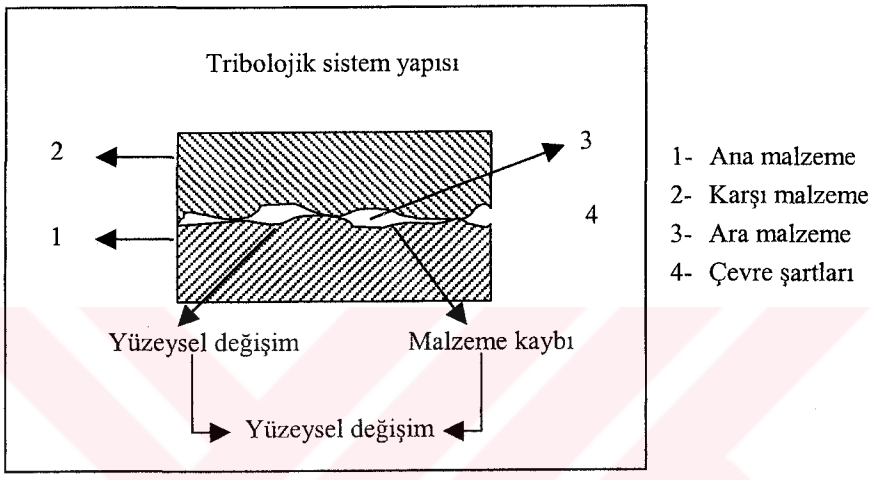
3.3. Aşınma

Birbirine göre bağıl hareket yapan ve aynı zamanda temasta olan iki yüzeyden küçük parçacıklar kalkar. Kalkan bu parçacıkların gitmesi ile aşınma meydana gelir. Mühendislik malzemelerinin ve makine elemanlarının ömürlerine bu aşınmanın büyük etkisi vardır. DIN 50320 'de aşınma cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak ayrılması nedeni ile istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesidir şeklinde tarif edilir (40).

Aşınma mekanik, kimyasal veya elektro-kimyasal etkenlerin tribo-sistem içinde etkileşimleri ile meydana gelir. Aşınma iş sertleşmesi, oksitlenme, metal transferi, faz değişikliği, yağ ve kir filmleri gibi çok sayıda olaya bağlıdır. Pek çok malzeme çiftinin sürtünme katsayısı 0.1 ile 1 (μ) arasında değiştiği halde aşınma hızları çok farklı değerlerde olmaktadır. Mühendislik malzemelerindeki yıpranmanın aşınma sayılması için ; a) Mekanik bir etkinin olması, b) Sürtünmenin olması, c) Yavaş fakat devamlı olması, d) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi, e) İsteğimiz dışında meydana gelmesi gerekir. Bu şartlardan biri sağlanmıyorsa meydana gelen yıpranma aşınma değildir (41).

Tribolojik sistem, karşılıklı etkileşen elemanlarda hız, ısılşartlar ve yükün etkisi ile sonuçlanan aşınma olayını inceler. Tribolojik sistemi, Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi ;

- ana malzeme (aşınan)
- karşı malzeme (aşındıran)
- ara malzeme
- yük, hareket (çevre ortamı) elemanlarından meydana gelir (38, 42, 43).



Şekil 3.4. Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi (31, 38).

Aşınmanın incelendiği eleman esas sürtünme elemanıdır. Karşı eleman katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Eğer ortam vakumlu ise iyi temizlenmeyen yüzeylerde yağlayıcı özellik gösteren ara maddeler olabilir. Bu haldeki sürtünmeye teknik kuru sürtünme denir. Vakumsuz ortamda ise çevre devreye girer ve sistem elemanları sayısı üç tanedir. Eğer yağlama da var ise eleman sayısı dörttür (37).

3.3.1. Aşınmanın temel unsurları

Aşınmanın başlaması ve devam etmesi için sürtünmenin olması gerekir. Sürtünen iki yüzeyin temas alanına mekanik etkileşim alanı denir. Bu alanın aşınmaya etkisi büyüktür. Yüzeylerin gerçek temas alanı görünen temas alanından çok küçüktür. Çok hassas işlenen yüzeylerde dahi yüzeylerde pürüzler bulunur. Yüzeylerin etkileşimi bu pürüzlerde olur. Pürüzler arası girintilerde ise etkileşim yoktur ve temas alanı dışında kalır. Yüklemenin şekli ve değeri temas alanını, dolayısıyla aşınmayı etkileyen iki

önemli faktördür. Yükün değeri arttıkça gerçek temas alanı artar. İki cisim birbirine göre kayma, yuvarlanma ve kaymalı-yuvarlanma hareketi veya çarpma hareketi yapabilir. Hareketin yönü ve hareketin miktarı aşınma miktarına ve aşınma cinsine tesir eder. Ayrıca sıcaklığın da aşınma üzerinde büyük etkisi vardır (44).

3.3.2. Aşınma mekanizmaları

Bir tribolojik sistemin elemanları arasındaki karşılıklı zorlamalar neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri ve bundan dolayı da farklı sınıflandırılmaları gerekmektedir (38, 43). Aşınma yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesinden etkilenmektedir (31).

Genelde üç tür aşınma vardır. Bunlar; adhesiv, abrasiv ve tribo oksidasyon aşınma olarak bilinen erozif aşınma türleridir (45). Bunlardan başka fretaj aşınması ve yorulma aşınması da aşınma türü olarak söylenebilir (37).

Evrensel bir aşınma türü olmadığı için, aşınmayı test edecek makine ve metot yoktur. Laboratuvar testleri, servis şartlarını taklit etmeyi amaçlar (46).

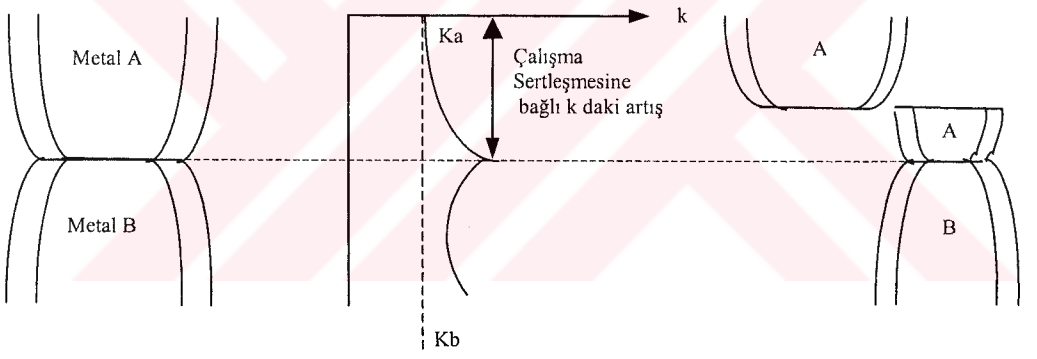
3.3.2.1. Yapışkan aşınma (Adhesiv)

Yapışma aşınma olarak ta bilinen adhesiv aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle adhesiv aşınma hasarlarının hazırlayıcı etkisi bulunmaz (31).

Bu aşınma çok düşük hızlarda da meydana gelmekte olup, uygulamada daha çok yüksek hız ve yüklerde görülen bir aşınma tipidir. Temasta olan yüzeyler birbirlerini pürüzlü noktalarda etkilerler. Gerçek temas alanı çok küçük olduğundan yüzeylere uygulanan yükün etkisi ile temas eden yüzeylerde temas artar. Temastaki pürüzler basıncı taşıyamayacak duruma geldiğinde akma sınırı aşılır ve plastik deformasyon meydana gelir (47). Eğer malzemenin plastik olma kabiliyeti yüksek ise mikro

adhezyon alanları hızlı bir şekilde temas yüzeyine tamamen yayılır. Malzeme molekülleri birbiri ile temasa geçerek temas noktalarında kaynak bağları meydana gelir. Yatay bir kuvvet ile yüzeyler birbirine göre hareket ettirilmek istenirse kaynak olan noktalar kesilebilir. Eğer kesilme tam ara yüzeyde gerçekleşir ise aşınma meydana gelmez. Eğer kopma yüzeylerden birinde gerçekleşir ise diğer yüzeye malzeme transferi olur. Sürtünmenin devam etmesi halinde transfer olan malzeme kopmak sureti ile aşınma ürününü meydana getirir (33, 37).

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi A ve B atomları arasındaki yapışma yeteri kadar iyi ise, yumuşak olan A metalinden kopan parçacıklar taşınacaktır. Eğer, A ve B malzemeleri aynı ise, aşınma her iki yüzeyde de meydana gelecektir. Çizelge 3.1.'de metallerin yapışmasını (adhezyonu) etkileyen faktörler gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Adhesiv aşınma (32).

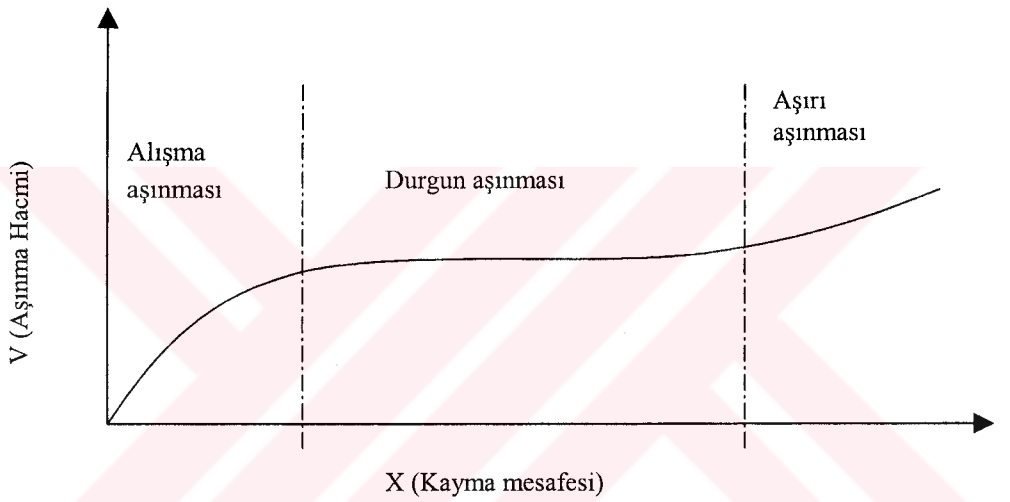
Çizelge 3.1. Metallerin yapışmasını etkileyen faktörler (31).

Özellik	Tür veya Büyüklük	Adhezyon Katsayısı
1. Yüzeye yardımcı bir madde sürme	Yüksek	Düşük
2. Kristal sistemi	Kübik	Yüksek
	Hegzegonal	Düşük
3. Deformasyon sertleşmesi katsayısı	Yüksek	Yüksek
4. Saflık	Yüksek	a
5. Sertlik	Yüksek	Düşük
6. Elastik Modül	Yüksek	Düşük
7. Ergime sıcaklığı	Yüksek	Düşük
8. Yeniden Kristalleşme sıcaklığı	Yüksek	Düşük
9. Atomik yarıçap	Düşük	Düşük
10. Yüzey enerjisi	Yüksek	b

a) Hegzagonal sıkı paket yapıda olan Zn metali üzerinde çalışılmıştır. Büyük oranlarda bir değişimin olmadığı görülmüştür. Aksine yüzey merkezli yapıda olan Cu üzerindeki çalışmalar büyük ölçüde etkinin varolduğunu göstermiştir.

b) Fiziko-kimyasal olarak yapılan araştırmalara bağlı olarak yüksek yüzey enerjisinin yüksek adhezyona sebep olacağı söylenmektedir. Mekanik açıdan yüksek yüzey enerjili malzemeler oldukça serttir ve düşük adhezyon katsayısına sahip malzemelerdir.

Alışma aşınması; Şekil 3.6' de görüldüğü gibi üç aşınma bölgesinden meydana gelmektedir (37).



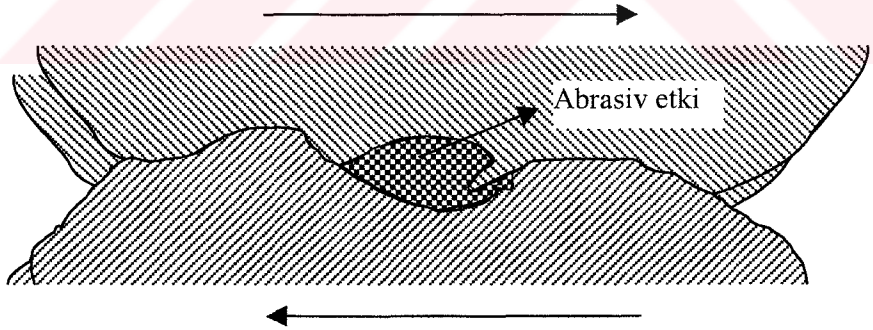
Şekil 3.6. Ahesiv aşınmada aşınma bölgeleri

Yüzeyler hareket ettirildiğinde başlangıçta yüzeylerin teması sivri tepeciklerde olduğundan yüksek gerilmeler meydana gelir ve aşınma hızla artar. Sivri noktaların düzleşmesi ile ve kopan partiküllerin yağlar tarafından uzaklaştırılması ile yüzey teması çok geniş bir alana yayılır. Dolayısıyla gerilme düşer ve aşınma miktarı azalır. Aşınmanın başlangıcına alışma aşınması (rodaj) denir. Bu aşınma halinde yüklerin yüksek olması tehlikelidir. Tüm yağlamalı sistemlerde alışma aşınması uygun şartlarda gerçekleşir ise faydalıdır. Alışma aşınması ile aşınma miktarı atılarak yüzeyler düzgünleşir. Dolayısıyla temas alanı artarak yük düşer. İkinci bölgedeki aşınmaya durgun aşınma denir ve uzun süre önemli bir aşınma meydana gelmez. Tezgah ve makinelerin ömrünü bu aşınma tayin eder. Durgun aşınma sonunda aşırı aşınma meydana gelir. Bu aşınma durumunda malzeme çiftleri birbirine tamamen yapışabilir (30).

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

3.3.2.2. Kazıma aşınma (Abrasiv)

Sürtünen iki yüzey arasına dışarıdan giren ya da iki yüzey arasında oksitlenmeden dolayı meydana gelen daha sert bir maddenin yüzeylerde yaptığı hasar olarak tanımlanır. Bu sert maddeler, yüzeylerde taşlama işleminde olduğu gibi bir malzemeden parça kopartılması olayı ile benzer işlem gösterirler (32). Yüzeylere baskı kuvveti uygulandığı zaman sert yüzey üzerindeki asperitiler yumuşak yüzeye gömülür. Dolayısıyla yüzeyleri hareket ettirmek için bir kuvvet uygulandığı zaman asperitiler yumuşak yüzeyi kazırlar. Aşınma yumuşak ve sert iki yüzey arasında olduğu gibi sert taneciklerin yüzey üzerinde akması ile de gerçekleşir. Şekil 3.7.'de tipik bir abrasiv aşınma görülmektedir. Üç cisimli aşınmada yüzeyler arasındaki sert tanecikler tam bir kayma hareketi yapmaz, bazen de yuvarlanırlar. Bu nedenle aşınma daha yavaş olur. Metalin (aşınan malzeme) sertliği (Hm) ve aşındırıcının sertliği (Ha) olmak üzere Hm/Ha bir kriter olarak kullanılır. $Hm/Ha < 0.8$ ise metalde çok aşırı kazıma aşınması meydana gelir. Talaşlı imalatta istenen durum budur. $Hm/Ha > 0.8$ ise kazıma aşınması düşüktür. $Hm/Ha \geq 1$ ise metalde kazıma aşınması meydana gelmediği kabul edilir (48).

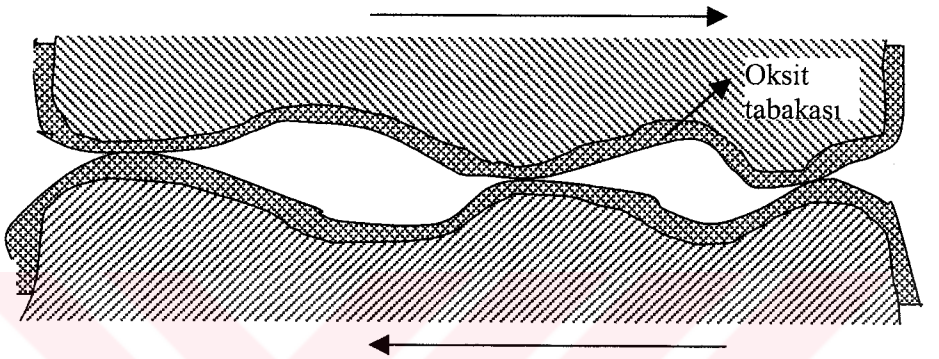


Şekil 3.7. Abrasiv aşınma

Kayma ve abrasiv aşınma arasındaki fark çok belirgin değildir. Her ikisi de temiz yüzeylerde partikül (talaş) oluşmadan önce, meydana gelen deformasyona bağlı olarak bir aşınma alanı halkasının parçalarıdır (49). Kayma aşınmasının ilerlemesine bağlı olarak abrasiv duruma göre değişik bir aşınma boyutuna geçebilir. Örneğin, kaymanın ilk aşamalarında oluşan partiküller her iki kayma bileşenini de aşındırabilir (50). Sert partiküllerin boyutunun kritik bir değerin altına düşmesine göre abrasiv aşınmadan kayma aşınmasına bir geçiş olduğu belirtilmiştir (51).

3.3.2.3. Erozyon aşınma (Erozif) veya tribo oksidasyon

Temas yüzeylerinden en az birinin çalışma ortamında korozyon'a uğraması ve izafi hareket sebebiyle meydana gelen korozyon tabakasının silinerek alınması ve bunun devamlı olarak tekrarı ile meydana gelen aşınmadır. Sert olan ve koparak sürtünme yüzeyleri arasına giren parçacıklar abrasiv bir tesir yaparak aşınmayı artırıcı rol oynarlar (33). Şekil 3.8.'de tribo oksidasyon aşınma görülmektedir.



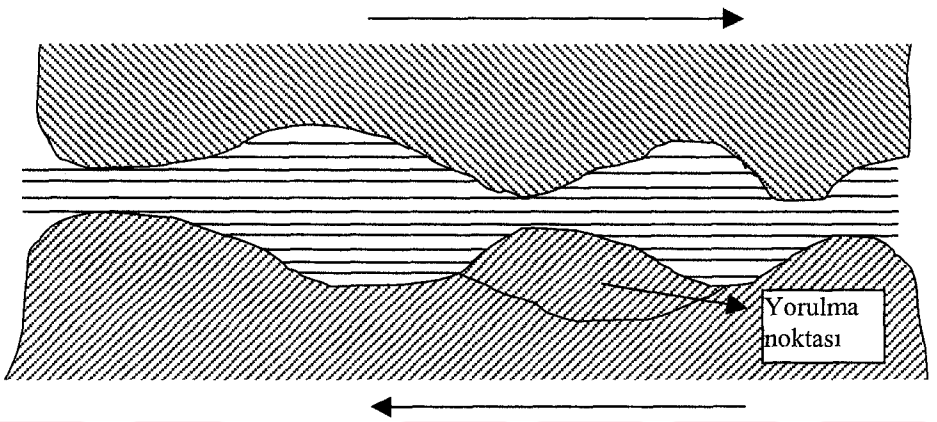
Şekil 3.8. Tribo oksidasyon aşınması (38).

Katı tanecik erozyonunda; katı bir cisim bir yüzeye dik olarak çarparsa ikinci yüzeyde plastik deformasyon veya kırılma meydana gelir. Çarpılan yüzey sünek ve çarpan cisim çok set ise yüzeyde çukur oluşur. Malzeme kaybı meydana gelmeyebilir. Darbeler devam ettiği taktirde yorulmadan dolayı malzeme kaybı başlar. Erozyon aşınması tanecik darbe hızı arttıkça aşınmada lineer bir değişim gösterir. Sıvı tanecik erozyonunda ise; basınçlı sıvı jetleri katı cisim gibi davranır. Sıvı jetleri yüzeye çarptığı zaman ses dalgaları oluşur ve bunlar çekme-basma şeklinde yüzeyde yayılır. Sonuçta yüzeylerde plastik deformasyon ve pürüzler oluşur (40).

3.3.2.4. Yorulma aşınması

Temas yüzeylerinde oluşan küçük çukurcuklar halinde kendini gösterir. Genellikle dişli çarklar, kamlar, rulmanlar gibi makine elemanlarında yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde oluşur ve zamanla yorulma sonucu zararlı hale gelirler (9). Bu elastik ve plastik olayların devam etmesi sonucu mikro çatlaklar

oluşur, çatlak büyümesi olur ve aşınma parçacıkları kopar. Burada harcanan enerji, malzemede belirli ölçüde tahribat yapar. Mesela, fazla zorlanan balata malzemelerindeki sürtünme ısısını almak için endotermik işlem kullanımı (balata soğutma işlemi) gereklidir (14). Şekil 3.9'da yorulma aşınması görülmektedir.



Şekil 3.9. Yorulma aşınması (38).

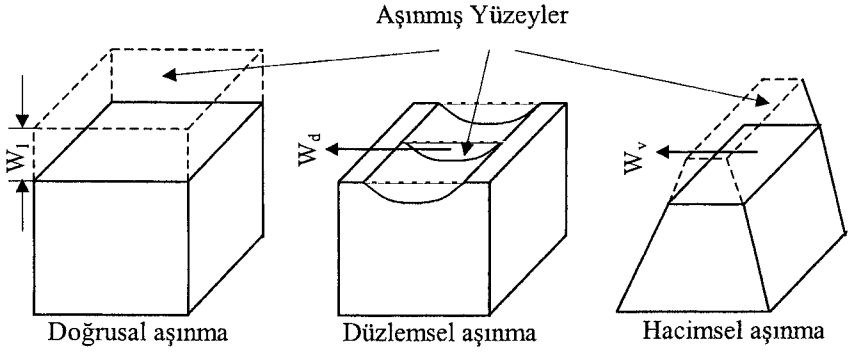
3.3.2.5. Fretaj aşınması

Küçük genlikli izafi hareket yapan iki yüzey arasında meydana gelen aşınmadır. İzafi hareket gel-git şeklinde olup genliği 20-400 μm olmalıdır. Fretaj aşınma kaybı çok azdır. Fakat yorulma çatlaklarının başlangıç yerlerini oluşturur. Hareket etmeyen makinelerde (kamyon ile taşınan otomobil), bilyeli yataklarda titreşim var ise fretaj meydana gelir. Titreşim çok sert kuvvetler oluşturursa yüzeylerden birinde izler meydana gelir (41).

3.4. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınmanın ölçümü, temas eden parçalardan birinde veya her ikisindeki hacim veya ağırlık kaybı esas alınarak yapılır. Aşınma doğrudan veya dolaylı ölçümlerle verilebilir. Aşınma deneyinde kullanılan deney sistemine bağlı olarak şekil 3.10'da doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınma söz konusudur (38).

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU



Şekil3.10. Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi (38)

Endüstride kullanılan alet ve ekipmanlarda aranılan özelliklerden biri de servis ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyeti artırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir (31).

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

a) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhesiv (metal-metal) aşınmanın değerlerinin ölçüldüğü deneylerdir.

b) Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma deneylerinin ölçüldüğü deneyler.

ASLE (American Socienty of Lubrication Engineers, 1976) tarafından yüz kadar deney sistemi belirtilmiştir. Ölçüm yöntemlerinden; ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyo izotop metotları aşağıda sırayla açıklanmıştır.

3.4.1. 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 alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr. 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, (gr / km), (mg / m) ile ifade gibi bir birim alan için hesap edilecekse, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir. Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntı şudur (31).

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

Wa = aşınma oranı ($mm^3 . N^{-1} m^{-1}$),

ΔG = ağırlık kaybı (mg),

S = kayma mesafesi (m),

M = yükleme ağırlığı (N,)

d = aşınan malzemenin yoğunluğu (gr / cm^3),

olarak verilmiştir. Aşınma oranının (Wa) ters değeri de aşınma direnci (Wr) olarak gösterilir. $Wr = \frac{1}{Wa}(N.m/mm^{-3})$ [1-4]

3.4.2. Kalınlık farkı metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımı ile ± μm duyarlılıkta ölçülmelidir (31).

3.4.3. 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 brinel sertlik ölçme ucudur. Elmas pramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutundaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir (31).

3.4.4. 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 nedeni ile ancak özel amaçlarda kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir (31).

4. SÜRTÜNME ÇİFTLERİ VE BALATALAR

4.1. Sürtünme Malzemeleri

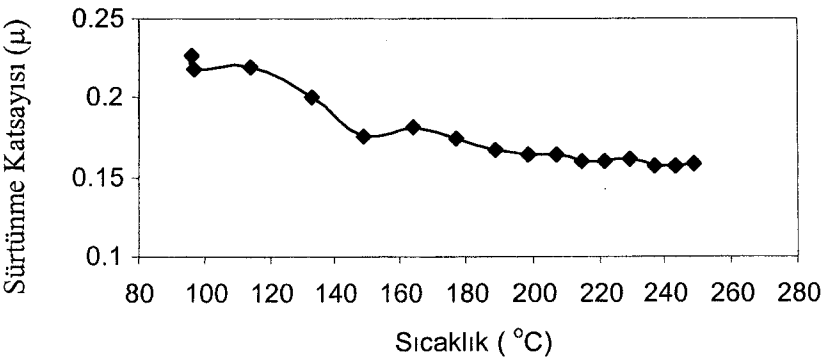
Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri mühendislikte yaygın olarak kullanılır. Bunlar ya sürtünme hareketinin iletimi, ya da frenleme ve yavaşlatma için kullanılır (11,39).

Sürtünme malzemelerinin kullanım sebepleri özellikle sürtünme katsayılarının yüksek ve kayma özelliklerinin iyi olmasındandır. Ancak sürtünme malzemelerinin fonksiyonlarını beklendiği gibi yapabilmeleri için, yalnız sürtünme katsayısının yüksek olması yetmez. Çok defa sürtünme katsayısının yüksek olmasından ziyade zorlanmalar altında ve özellikle yüksek sıcaklıklarda mümkün olduğu kadar sabit bir değeri muhafaza etmesi ve az bir dağılma göstermesi esas özelliği teşkil eder. Bundan başka aşınma miktarının az olması, karşı malzemenin çizilip hasara uğratılmaması, mekanik mukavemetin de maruz kalınan zorlamalara dayanabilecek değerde olması gerekir (2,33).

Türk standartlarında (TS), sürtünme malzemeleri (balatalar) için üç değişik standart hazırlanmıştır. TS 864 nolu standart debriyaj balataları için, TS 925 sürtünme kaplamaları adı altında, debriyaj balataları için kaplama malzemelerini sınıflandırmakta, TS 555 ise taşıtların fren balatalarını sınıflandırmaya yöneliktir (52).

Bilindiği gibi sürtünme esnasında yüzeylerin pürüzlülüğü ve enerji absorbisyonu sonucu meydana gelen sıcaklık, sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkiler, ısınan malzeme de sürtünme katsayısının düşmesine neden olur ve sistem görev yapamaz hale gelir.

Şekil 4.1. sıcaklığın kuru balata üzerindeki etkisini göstermektedir. Fren sırasında sıcaklık artmakta ve sürtünme katsayısı düşmektedir (53).



Şekil 4.1. Kuru balatada sıcaklığın dinamik sürtünme katsayısına etkisi(53)

Metal esaslı sürtünme malzemelerinin (balataların) aşınma dayanımı ve yüksek ısı dayanımı, organik esaslı sürtünme malzemelerine (balatalarına) göre daha yüksektir. Hatta daha yüksek enerji absorbe edebilme kapasitesine sahiptir. Örneğin bazı boyutlardaki kavrama ve frenler için daha çok enerji absorbe edebilirler (54).

Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri uygulama alanlarına göre kuru ve ıslak olmak üzere ikiye ayrılabilirler (14, 31). Islak şartlarda, güç değişimleri ve otomatik iletimleri sağlayan kavramalar şeklindeki sürtünme elemanları yağ içine daldırılır. Kuru şartlar altındaki sürtünme elemanları ise, (uçak frenleri ve standart kavramalar şeklindeki sürtünme elemanları) yağsız olarak direk kontak halindedir (54). Islak balatalarda Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi ana madde bakır, kuru balatalarda ise, daha az bakır ve daha fazla demir kullanılır (11).

Çizelge 4.1. Tipik ıslak ve kuru balata bileşimleri

	Cu	Fe	Pb	Sn	Zn	SiO_2	Grafit
Islak	65-75	-	2-5	2-5	5-8	2-5	10-20
Kuru	10-15	50-60	2-4	2-4	-	8-10	10-15

Fren balatalarında kullanılan sinter malzemeleri ayrıca bakır (bronz) asıllı ve demir asıllı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Çoğunlukla performansı geliştirmek için organik ilavesi ile katı durum sinterlemesi olur. Bu durum istenen çok yüksek güçler için geliştirilmiştir. Örneğin, sinterlenmiş bronz ve mullit balatalar yarış arabalarında

kullanılır. Grafit ile sinterlenmiş demir ağır iş makinelerinde, hem disk hem de kampana fren balataları için kullanılır (55). Bu gruplar da ayrıca karışımsız, grafit karışımlı, seramik karışımlı olmak üzere aralarında sınıflandırılabilir. Genellikle seramik karışımlı malzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar, fakat ısı iletkenlikleri biraz daha azdır. Büyük uçaklarda demir asıllı veya özel balata alaşımları tercih edilir. Çünkü bronz asıllı malzemelerin 850 ^{0}C civarında yumuşamalarına karşılık, demir asıllılar 1100 ^{o}C' nin üzerine çıkabilirler (11). Sürtünme malzemelerini (balataları) dört başlık altında toplamak mümkündür.

4.1.1. Polimer bağlı asbest esaslı malzemeler

Asbest esaslı malzemelerin kullanımı, hareketli sistemden ısı formunda enerji dağıtım problemlerinde ilk önemli ilerlemeyi temsil etmiştir. Gelişme, asbestin dayanımını ya da sürtünme özelliklerini artıran geliştirilmiş reçinelerle ilerlemiştir (5).

Asbest çeşitlerinin kimyasal bileşimi ve yapısı ayrı ayrıdır. Bunlardan tanınmış olanları, chrysotil, antophyllit, tremolit, actinolit ve krokydolittir. Bunlar çeşitli renklerdedirler. İlk yapılan balatalar, örülmüş asbest malzemelerden olup asfalt ve reçine emdirilmişlerdir. Balatanın sürtünme katsayısı kullanılan asbest miktarına, ona karıştırılan dolgu maddelerine ve bağlayıcı maddelere bağlıdır. Balatanın ana maddesi, asbest ; prinç, çinko veya demir olmayan bir maddeden yapılmış ve tel örgü ile donatılmıştır. Prinç ve çinko tellerin kullanılması ile balataların sürtünme katsayıları her durumda sabit olan bir özellik gösterir duruma sokulmuştur (56). Klasik üretim tarzı olarak kısa lifli asbest, diğer gerekli maddelerle karıştırılmakta, soğuk olarak preslenmekte ve ayrıca sıcak sıkıştırma yapılmaktadır. Normal şartlarda üretim sonrası 150 ila 250 ^{o}C sıcaklıklar arasında, sürtünme özelliklerini ve form dayanımını iyileştirmek için, sertleştirme (özel kalitelerde 24 saate kadar) yapılır. Bu işlem yapılmadığında, kullanım esnasında parçalanma meydana gelir (14).

4.1.2. Yağda çalışan balata malzemeleri

Yağ altında çalışan sürtünme kavramaları, giderek artan oranda kullanılmaktadır. Bunların sürtünme özellikleri, malzemenin bileşimi dışında gözeneğine, sürtünme yüzeyinin pürüzlülüğüne ve yağın kalitesine yakından bağlıdır. Kavrama olayında karışık sürtünmeye ulaşabilmek için, yağ filminin çok çabuk yırtılması gerekir. Bunun için, balata malzemesinin yapısı dışında, kanal, çıkıntı, sinüsoidal formda oyuklar açılması mümkündür (57). Ayrıca yağ akışını sağlayacak ve teşekkül edecek ısının % 50 ila 70' ini yağla dışarı atacak soğutma kanalları yapılabilir. Yağda çalışan aşınma malzemeleri; çelik plaketler, kağıt malzemeler, asbest esaslı polimer bağlantılı malzemeler ve bakır esaslı sinter malzemeler diye ayırmak mümkündür. Yağda çalışan balata malzemeleri yumuşak olması nedeni ile daha çok otomatik vitesli otomobillerde debriyaj balatası olarak kullanılırlar. Sürtünme katsayıları 0,002 ila 0,008 arasındadır ve çalışma sıcaklığı 120 ^{o}C' yi aşarsa aşınma hızla yükselir (14). Yağda çalışmanın en büyük avantajı, malzemedeki çizilmeleri önlemesidir. Mesela; küçük soğuk kaynak alanlarını sert partiküller aşındırırken, katı yağlamaların uygulamaları çizilme eğilimini azaltacaktır (4).

4.1.3. Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri

Organik esaslı sürtünme malzemelerinin kullanılmaları, dayanabilecekleri maksimum sıcaklık ile sınırlıdır. 400-450 ^{o}C de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sebebi ile organik maddeleri ihtiva eden (asbest vb.) yapı bozulmaya ve çok çabuk aşınmaya başlar. Özellikle sürtünme katsayısının değeri çok küçük değerlere düşer. Bu yüzden sinterlenmiş balatalara ihtiyaç duyulmaktadır (33).

Metalik balataların diğerlerine olan avantajları, daha büyük hızda enerji absorbe etmeleri ve daha fazla aşınma mukavemetine sahip olmalarıdır. Bunlar daha yüksek sıcaklıklara dayanabildikleri gibi, daha fazla ısı iletirler. Sürtünme katsayıları, sıcaklık ve basınçla daha az değişir ve sıcak, soğuk, yağ, tuzlu su gibi etkenlerden daha az etkilenirler (11).

Fren balatalarında kullanılan sinter malzemeleri genellikle bakır-kalay (bronz) asıllı ve demir asıllı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir (20,39,54). Bu gruplarda ayrıca karışımsız, grafit karışımlı ve seramik karışımlı olmak üzere aralarında sınıflandırılabilirler (2,11).

4.1.3.1. Bakır esaslı balata malzemeleri

Bakır esaslı malzemeler genellikle sıvı veya yarı sıvı sürtünmenin olduğu yerlerde kullanılır. Kuru sürtünmede ise ancak ısı etkisinin daha hafif olduğu yerlerde kullanılır (14,39).

Servis sıcaklığının 1000 °C den yüksek olduğu yerlerde demir matrikslerin kullanılmasına rağmen, yüksek sürtünme şartlarında yaygın olarak kullanılan malzemeler bakır ve bronzdur (4). Çizelge 4.2' de bazı ülkelerde kullanılan kuru ve yağlı sürtünme için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri görülmektedir (14)

Çizelge 4.2 Bazı ülkelerde kullanılan kuru ve yağlı sürtünme için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri (14)

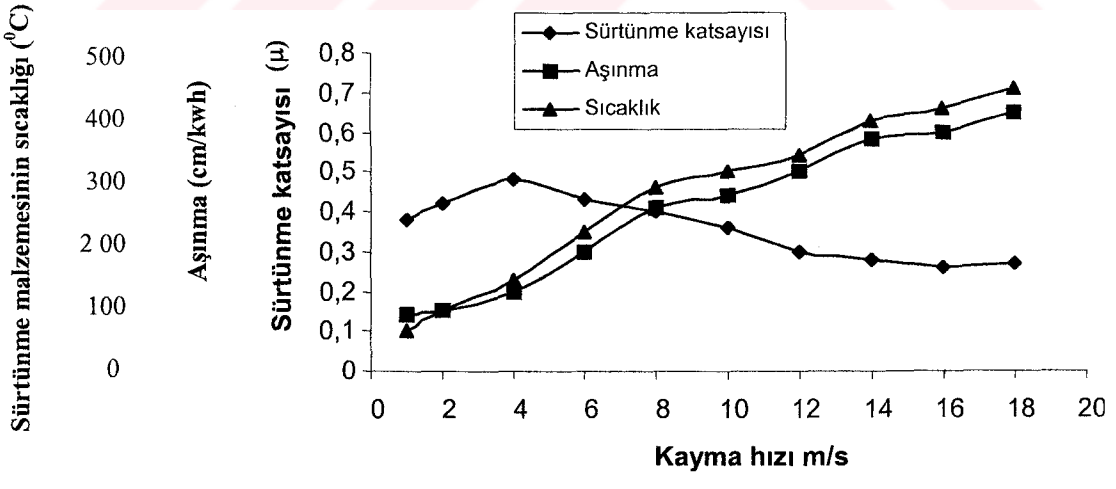
Ülke	Fe %	Cu %	Sn %	Grafit %	Pb %	SiO_2 %	MoS_2 %	Diğer %
A.B.D	5-10	60-75	4-10	3-10	7,5	2-7	3-12	
Almanya	7,9	67,8	5,2	6,5	1,8	3,3	< 4	%3Al_2O_3
Avustralya	8	68	5	6,2	1,5	2,5	< 3	%3Al_2O_3
B.D.T.	4-7	65-80	7-9	3-8	5-10	2-4		
İngiltere	5-10	Bakiye	3-10	0,8	1-10	1,5-5	< 4	
İsveç	4,5	68,5	8	6	3	4	6	
İtalya	7	68	5,5	6	9	4,5		

Bakır esaslı (bronz) balata imali için bronz madeninin elde edilmesinde, bakır-çinko alaşımı oranı 9:1 olarak alınmaktadır. Bazı durumlarda çinkonun yerini kalay almakla beraber, bu sürtünme katsayısına hiçte iyi tesir etmez. Sinter bronz balataların imalinde, kayma özelliğini verecek olan grafit tozu, molibden-sülfid, kalay, bismut ve sürtünme özelliğini meydana getirecek olan silisyum, demir tozu ve

korund tozu gibi dolgu maddeleri kullanılmaktadır (56). Çizelge 4.3' te bronz esaslı balata malzemelerinin kullanım ve özellikleri ve Şekil 4.2'de ise %17 grafit, %5 kurşun, %5 mullit, %5 kalay ve % 63 bakır içeren malzemenin sürtünme ve aşınma özellikleri görülmektedir.

Çizelge 4.3. Bronz esaslı sinter balata malzemelerin kullanım karakteristikleri ve özellikleri (14)

Kullanım şartları	Baskı basıncı $p \leq 5$ MPa Kayma hızı $v \leq 40$ m / s $p \cdot v \leq 1{,}5$ kW / cm^2
Sürtünme katsayısı μ	0,15 ... 0,50
Aşınma	$p \cdot v = 0{,}8 \ldots 1{,}0$ kW / cm^2 olan orta yüklerde, 0,5 cm^3 / kWh
Sıcağa dayanıklılık	Sürekli çalışmada max. 450 °C Kısa süreli ççalışmada max. 650 °C
Özgül ağırlık	5 ... 7 gr. / cm^3
Isı iletme kabiliyeti	6 ... 35 W / m.K
Sertlik	10 ... 50 BSD



Şekil 4.2. Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliği (14).

Sürtünme ve aşınma miktarı, kayma hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak değişir. Eğriler, yalnızca kullanım için bir fikir vermek üzere örnek olarak alınabilir. Bu malzemenin karşısında dökme demir, alaşımsız ve düşük alaşımlı ıslah çelikleri kullanılabilir (14).

Bakır esaslı sinterlenmiş malzemenin avantajları literatürde geniş olarak yer almaktadır. Fakat avantajları yanında dezavantajları da vardır (39).

a) Yağlamanın olduğu yüksek kayma hızlarında, yetersiz sürtünme katsayısı,
b) Yüksek kayma hızlarında ve yüksek yüklerdeki yetersiz aşınma direnci,
c) Kuru sürtünmenin olduğu uygulamalarda, sınırlı olarak kullanılır,

Ukrayna Bilimler Akademisi Metal Seramik ve Özel alaşımlar Enstitüsü (39) tarafından yeni bir bakır esaslı sinterlenmiş malzeme geliştirildi. Deneyler gerçek şartlarda test edildi. Bu malzeme kalay (Tin) içermez ve sahip olduğu özellikler mevcut sürtünme malzemelerinden daha iyidir. Ancak diğerlerine göre daha pahalıdır. Bu yeni malzemenin üretimi, geleneksel sürtünme malzemelerinden farklı değildir. Sadece, yüksek sinterleme sıcaklığı (950-980 ^{0}C) ve sinterleme sırasında basınç (10-14 kg / cm^2) dir (39).

Bu yeni malzeme ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik karakteristikleri çizelge 4.4' de görülmektedir.

Çizelge 4.4. Yeni sürtünme malzemesi ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik ve karakteristikleri (39)

Sürtünme malz. Özellikleri	**Bakır esaslı sürt. malz.**	**Yeni sürtünme malz.**
Brinel sertlik (kg / mm^2)	11-23	27-45
Kesme mukavemeti (kg / mm^2)	4-5	7-9
Burulma (kg / mm^2)	5-7	9-14

4.1.3.2. Demir esaslı balata malzemeleri

Sinter demir balataları, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı dayanıklı olup, sadece eğilmeye karşı dayanıklı değildirler. Bu problemi ortadan kaldırmak için sinter demir balatalar, bir saç levha üzerinde sinterlenerek kullanılırlar. Sinter demir balataların ısıyı çok iyi iletme özelliklerinden dolayı yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği yerlerde kullanılmaktadırlar. Sinter demir balataların bu ısıyı iletme özelliği, balatanın soğuk kalmasını temin etmekte ve bu durum balatanın ömrünü artırmaktadır. Sinter demir balataları, yüksek sıcaklıklarda perlit bünyenin meydana gelmesi ile iyi bir sürtünme özelliği sağlar. Fakat aşırı yüksek sıcaklıklar, madeni toz taneciklerinin yanması ve kömürleşmesi ile arzu edilmeyen bir sert sementit bünye meydana getirebilir (56).

Demir esaslı balata malzemeleri, özellikle kuru çalışan kavramalarda tercih edilir. Bronz esaslı malzemelere göre daha ucuzdur. Belirli kullanım alanları için, değişik bileşimlerde imal edilirler. Çizelge 4.5' de bazı ülkelerde kullanılan kuru sürtünme için demir esaslı malzemelerin bileşimleri görülmektedir.

Çizelge 4.5. Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler ve bileşimleri (14).

Ülke	Fe	Cu	Sn	Grafit	Pb	SiO_2	MoS_2	Diğer
A.B.D.	60	-	5	15	-	-	-	%3 Bi, %14Mullit
	67,5	-	-		-	-	-	%5 Si, %7,5 Bi, %20 Mullit
	60-77	-	-	20-30	-	-	-	%3-10 Bi
	80	-	-	4	2	-	2	%3 Al_2O_3
Almanya	70-90	16	-	15-20	< 5	-	-	Max. %o,8 P
B.D.T.	60-72	< 15	-	9	< 13	3	-	$BaSO_4$, %3 Asbest
İtalya	62	16	-	13,4	8	0,6	-	-

Sürtünme olayı esnasında şekillenmeyle, yapı elemanları ve atmosfer arasında değişik etkiler meydana gelerek, sürtünme çiftlerinin yüzeyinde metal elemanlar oksit karbür ve grafitten oluşan karmaşık yapılı bir tabaka oluşur ve böylece aşınma

direnci önemli ölçüde yükselebilir. Bundan dolayı malzemenin bileşimi öyle seçilmelidir ki, karmaşık tabaka geniş zorlanma sahasında dayanıklı olsun (14).

Çizelge 4.6. Demir esaslı balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri (14).

Kullanım şartları	Baskı basıncı $p \leq 6$ Mpa Kayma hızı $v \leq 60$ m / s $p \cdot v \leq 3$ kW / cm^2
Sürtünme katsayısı (μ)	0,25 ... 0,65
Aşınma	$p \cdot v = 1,5 \ldots 2,0$ kW / cm^2 olan orta yüklerde, 0,5 cm^3 / kWh
Sıcağa dayanıklılık	Sürekli çalışmada max. 660 °C Kısa süreli ççalışmada max. 880 °C
Özgül ağırlık	5 ... 7 gr. / cm^3
Isı iletme kabiliyeti	1,2 ... 35 W / m.K
Sertlik	15 ... 40 BSD

Son yıllarda yabancı literatürde çok az bilgi bulunmakta, üretim metotları veya kompozisyonları hakkında bilgi vermeden sinterlenmiş demir asıllı sürtünme malzemelerini geliştirme amacıyla araştırmalar yapılmıştır. Genel olarak demir-grafit kompozisyonları % 50 üzerinde grafit içerir. Sonuç olarak bu malzemelerin, avantajları hakkında fazla bilgi edinilememiştir. Aynı zamanda, literatür verilerinden bilindiği gibi (Çizelge 4.7) fosfor, metallerin ve demir esaslı alaşımların sürtünme özellikleri ve mekanik özellikleri üzerine olumlu etkiler sağlar (58).

Çizelge 4.7. Sinterlenmiş demirin mekanik özelliklerine fosfor'un etkisi(42)

Fosfor % Ağırlık	Akma muk. kgf / mm^2	% uzama	Brinel sertlik (BSD)	Darbe muk. kgf / cm^2
0	13,14	6,7	30	0,28
0,4	33,3	14,7	76	0,5
0,8	56,9	18	146	0,1

Fosfor eklemek, demir tozunun sinterleme özelliğine oldukça iyi bir şekilde etki eder. Bu durum, demir tozunun oluşumuna göre, partiküllerin yüzeyinde görülür ve

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

demir tozu 1050 °C' de erir. Bu durum dökme demirlerin sürtünme özelliklerinde fosforun etkisi ile ilgili çalışmaların sonucudur (58).

4.1.3.3. Seramik katkılı sinter balata malzemeleri

Daha yüksek güçler için, metalik olmayan katkı içeren metalik bağlantılı balata malzemeleri kullanılır. Metalik olanlar; bakır alaşımları, demir ve demir alaşımları, metalik olmayanlar ise ; tercihen (SiO_2, Al_2O_3 veya mullit) ve silikatlardır. İlave katkı olarak düşük sıcaklıkta ergiyen metaller, sülfür ve sülfat, karbür, grafit ve sinter metalik tozlar kullanılabilir. Metalik olmayan miktar, hacim olarak % 50 veya daha fazla olabilir. Metal seramik balata malzemelerinin sürtünme katsayısı 0,3-0,7 arasındadır. Bunlar 1000 °C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Yüksek miktarda metalik olmayan eleman içerdiklerinden dolayı kırılgandır ve çok az dayanıma sahiptirler. Bu nedenle, düz bir metal üzerine pres edilirler ve balata taşıyıcıya perçinle bağlanırlar (14). Bu konu beşinci bölümde daha detaylı verilmektedir.

4.2. Karşı Malzeme - Disk ve Kampana Malzemesi

Karşı malzemenin, sürtünme özellikleri ile verimli bir şekilde çalışabilmesi için, sistemin mekanik ve ısıl zorlamalarına karşı dayanıklı olması gerekir. Balata ve karşı malzemede (diskte) sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının, biran önce sistemden uzaklaştırılması istenir. Bunun için disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması gerekmektedir.

Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeni ile disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genleşme katsayısının küçük olması istenir. Ayrıca fren esnasında kısa zamanda meydana gelen yüksek ısı miktarları, kampana veya disk tarafından alınıp iletilerek dışarıya verileceğinden, disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletme kabiliyeti ve üst yüzeyin de yüksek radyasyon katsayısına sahip olması gerekir (33).

Genelde disk ve kampana imalinde perlitik dökme demir kullanılır. Dökme demir için % 3,40 dolaylarında karbon kullanılır ve bu dökme demirin sertliği 170 - 255 HB ($kg./mm^2$) arasında değişir (9). Diğer alaşım yüzdeleri ise; Çizelge 4.8' de görülmektedir.

Çizelge 4.8. Disk ve kampana için kullanılan dökme demir analizi (9)

% C	% Si	% Mn	% S	% P (max)
3,40	2,00-2,40	0,60-0,90	0,15	2

Ol'shevski ve Larin'in çalışmalarına göre (14), dökme demirlere eklenen fosfor, (ağırlıkça) % 0,118 ve % 2,01 arasında bir değere yükseltilirse, bu malzemenin sürtünme katsayısı yükselir. Fren sistemi üzerinde bu katsayının kararlılığı ve bunlara ilaveten aşınma dirençleri de düzelir. Sürtünen dökme demirlerin en iyi fosfor bileşeni Ol'shevskiye göre %1,5-2 arasında, Larin' e göre ise % 1,4' tür.

4.3. T/M Yöntemi ile Demir ve Bronz Esaslı Fren Balataların Üretimi

Metalik bağlantılı balata malzemeleri, toz metalurjisi yöntemi ile üretilirler. Yapı elemanları çok farklı yoğunlukta olacaklarından, bu yöntemin tarzı ve ayrıca işlem sırası büyük önem taşır (14). Metal tozlar genellikle atomizasyon yöntemi ile üretilirken, bronz esaslı tozlar elektroliz ve atomizasyon yöntemleriyle üretilirler (54).

Karıştırma işleminden önce tozların birbirine yapışmalarını önlemek için, tozlar bir fırça yardımı ile elekten geçirilir. Karıştırma olayını güçlendirmek için sık sık iç karıştırıcılar, çarpma düzeneklerinin ilavesi ile çifte-konili veya Y-konili karıştırıcılar ya da şerit tip karıştırıcılar şeklindeki geleneksel tipteki karıştırıcılarla karıştırma tamamlanır. Tozların özgül ağırlıkları birbirinden çok faklı olduklarından depolama esnasında karışımın segregasyonunu önlemek için ağırlığın % 0,5' i kadar hafif yağ ilave edilebilir. Bu yağ, karışımı oksitlenmeye karşı koruduğu gibi sinterleme safhasının hemen başlangıcında buharlaşarak karışımın özelliklerini

değiştirmez (5,11). Toz karışımları, genellikle soğuk olarak 200-600 MPa basınçta mekanik preslerle preslenirler (14).

Balatanın çap ve yüzey paralelliğinin ± 0,02 mm töleransında sağlanması gerekmektedir. Bu töleransı sağlamak için, pres piston yüzeylerinin hassas olarak ayarlanmasına, hassas takımlara ihtiyaç vardır. Sinterleme öncesinde balata malzemesi, henüz iç yapısında difüzyon yoluyla kuvvetli bir bağlama olamadığından oldukça zayıftır (4,11). Parçalar sinterlenmek üzere yapışmayı önleyici bir tutkalla kaplanarak üst üste dikey olarak dizilirler ve koruyucu gaz atmosferini muhafaza eden bir silindir içine yerleştirilerek, fırın silindirin üzerine indirilir. Sinterleme sıcaklığı bronz asıllı malzemeler için 700-850 °C, demir asıllı malzemeler için 900-1100 °C dir. Sinterleme süresi 4 ila 6 saat arasında değişir (4,5).

Bronz esaslı malzemelerin sinterlenmesi sırasında, kalay ve kurşun eriyerek sıvı bir faz meydana getirir. Kalay, bakır tarafından yavaş yavaş emilir. Metalik olmayan katkı elemanları, sinterleme sırasında değişmeyip sadece matriks içerisine gömülürler. Demir asıllı malzemeler ise, yüksek sıcaklıkta grafit demir tanelerine nüfuz ederler (11).

Balata malzemelerinde sinterleme esnasında az da olsa meydana gelmesi mümkün olan deformasyonu (büzülme, çarpılma) sinterlemeden sonra gidermek ve balata yüzeylerinin paralelliğini istenilen töleransa getirebilmek amacıyla taşlama (yassılaştırma) işlemi yapılır (5).

Taşlamadan sonraki işlem temizlemedir. Bu işlem hem görünüm güzelliğini sağlar ve hem de varsa gevşek kısımları döker. Gerektiği taktirde iç gerilmeleri azaltmak için bir ısıl işlem de yapılabilir (11).

5. SERAMİK KATKILI SİNTER BALATA MALZEMELERİ

5.1. Seramiklerin Genel Özellikleri

Seramik kelimesi, Yunanca, pişirilmiş eşya anlamına gelen "keramos" kelimesinden gelmektedir (59). Günümüzde değişik alanlarda kullanılan ve seramik olarak adlandırılan malzemeler genel olarak iki guruba ayrılabilir (60).

-Geleneksel seramikler

-Teknolojik seramikler

Geleneksel seramiklerin tarihi geçmişi oldukça eski olup geçmişten günümüze kadar önemli gelişmeler kaydetmiştir. Seramik malzemelerin ilk kullanımında olduğu gibi bugün de bu malzemelerin hammaddesi tabiattan temin edilmektedir. Yerküredeki elementlerin % ağırlık olarak miktarlarına baktığımızda Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi ilk üç sırayı oksijen,silisyum ve alüminyum almaktadır. Dolayısıyla yerkürede karşılaştığımız doğal olan her malzemenin yapısında bu elementlerden bir miktar görmek mümkündür.

Çizelge 5.1. Yerküredeki elementlerin miktarı (% ağırlık) (60)

1	% 10 üzeri	O (46.6); Si (27.7)
2	% 1-10 arası	Al (8.1), Fe (5.0), Ca (3.6), K (2.6), Na (2.8), Mg (2.1)
3	% 0.1-1 arası	C, H, Mn, P, Ti
4	% 0.01-0.1 arası	Ba, Cl, Cr, F, Rb, S, Sr, V, Zr
5	% 0.000-0.01 arası	Cu, Ce, Co, Ga, La, Li, Nb, Ni, Pb, Sn, Th, Zn, Yt
6	1-10 ppm arası	As, B, Br, Cs, Ge, Hf, Mo, Sb, Ta, U, W
7	0.1-1 ppm arası	Bi, Cd, I, In, Tı
8	0.1-0.01 ppm arası	Ag, Pd, Se
9	0.01-0.001 ppm arası	Au, Ir, Os, Pt, Re, Rh, Ru

Geleneksel seramiklerin üretiminde gerek miktar ve gerekse satış açısından önemli bir hacim tutmakla beraber son çeyrek asırda yeni seramikler geliştirilmiştir ki bu

seramiklerin önemi, bir takım süper özelliklere sahip olmalarındandır. İşte bu seramikler, günümüzde "ince seramikler veya ileri seramikler olarak adlandırılır". İleri seramikler, geleneksel seramiklerle kıyaslandığında birçok farklılıklar vardır. Buna göre ileri seramikler, geleneksel seramiklerden başlıca, hammadde, üretim yöntemleri ve mikroyapı açısından bariz farklılıklar göstermektedir. Geleneksel seramikler, doğal hammaddelerden üretilirken, ileri seramiklerin hammaddesi sentezleme yöntemiyle yapay olarak hazırlanmaktadır. Bunun nedeni, yapay hammaddelerin, istenmeyen maddelerden arındırılmış olarak çok saf halde ve istenilen fiziksel özelliklerde üretilebilmeleridir. İleri seramikleri geleneksel seramiklerden ayıran en önemli diğer bir özellik de, ileri seramiklerin çok ince tozlardan üretilmeleridir. Dolayısıyla, ileri seramiklerin mekanik özellikleri geleneksel seramiklerden çok üstündür. Bazı ileri teknolojik seramiklerin özellikleri çizelge 5.2'de görülmektedir (59).

Çizelge 5.2. Bazı ileri teknolojik seramiklerin özellikleri

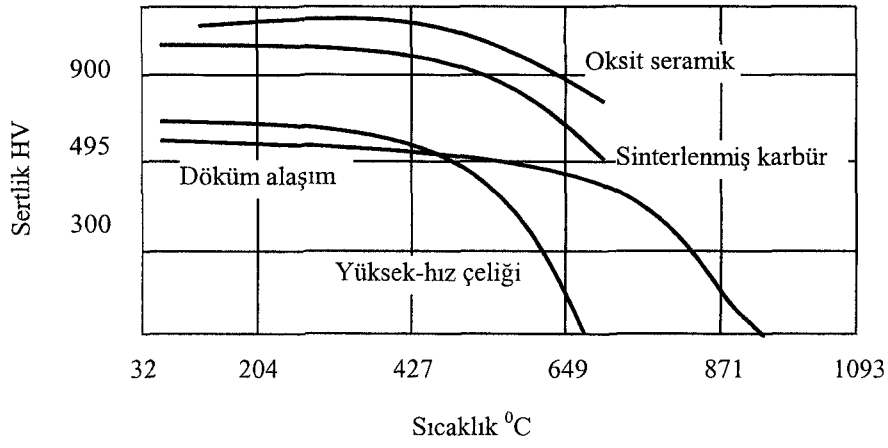
Tipi	Atomsal Bağ	Örnekler	Özellikler
Oksitler	İyonik	Al_2O_3, Cr_2O_3, Fe_2O_3, Mg_2O, Zr_2O_2, SiO2	Sert aşındırıcı Sürtünme özellikleri iyi Çok sert
Karbürler	Az iyonik Yeralan bileşik	ZrC, TiC, VC, NbC	Elastik modül yüksek
	Kovalen	B_4C, SiC, WC	Yüksek sıcaklıkta kararlı Sürünme kötü Kesici takımlarda, aşındırıcılarda ve kalıplarda kullanılır.
Nitrürler	Kovalen	Si_3N_4, AlN, TiN	Düşük yoğunluk Yüksek sıcaklıkta kararlı Sürünme direnci iyi, çok sert Kesici takımlarda, gaz türbinlerinde, nozul ve potalarda kllanılır
Borürler	Kovalen	LaB_6, ZrB_2	Çok iyi iletken Sürünme özellikleri iyi Elektron mikroskobunda flaman olarak kullanılır

5.2.Seramiklerin Uygulama Alanları

Metalik bağlı seramikler tribolojik özellikleri iyileştirmek için kullanılırlar. Yüksek üretim maliyetleri uygulanabilirliklerini sınırlar. Buna rağmen, yüksek sıcaklık, yüksek korozif ve yüksek aşınma dayanımı gibi özelliklerinden dolayı faydalıdırlar. Bu ileri teknoloji ürünleri genellikle tribolojik uygulamalarda kullanılırlar. Halbuki, ateş tuğlaları camsı matris içerisinde sarılmış olan heterojen kristal karışımlardan meydana gelir. Bu malzemelerin teorik yoğunluğu ana malzemelerin teorik yoğunluğuna çok yakındır. Yüksek teknolojik seramiklerin gözeneği % 0.5'ten daha azdır ki bunların gözenekleri geleneksel seramiklerle karşılaştırıldığında (% 5-15) daha da düşüktür. Seramikler yüksek sıcaklık ortamları ve çevrenin çok olumsuz olduğu yerlerde kullanılırlar. Seramik malzemeler bazı uygulamalarda geleneksel metal alaşımları yerine gelmişlerdir. Bunlardan bazıları (61);

- Mil yataklarında (Silisyum nitrür)
- Metalik contalarda (Alumina, Silisyum karbür)
- Yüksek hız makine takımlarında (Silisyum nitrür, Sialon, Alümina)
- Tekstil endüstrisinde tekerlekli parçalarda (Alümina, Silisyum nitrür)
- Aşınmaya dirençli malzemelerde (Alumina, Silisyum oksit)
- Isı motorlarında, medikal malzemelerde (Alümina)

Yüksek sıcaklık uygulamaları için seramik malzemelerde arzu edilen diğer özellik yüksek sıcaklıklarda sertlik özelliğidir. Seramik ve metalik takım malzemelerin sertlik sıcaklık özellikleri Şekil 5.1'de görülmektedir. Seramiklerin ve sinterlenmiş karbürlerin kullanımı, yüksek hız çeliklerine karşı daha avantajlı görülmektedir.



Şekil 5.1. Seramik ve metalik takım malzemelerin sertlik -sıcaklık ilişkisi (61)

5.3. Seramiklerin Sürtünme ve Aşınma Özellikleri

Aşınma, mühendislikte düzenli olarak karşılaşılan üç problemden biridir. Diğer ikisi ise, kırılma ve korozyon'dur. Sürtünme ve aşınma yüksek mühendislik uygulamaları için malzeme seçiminde önemli parametrelerden biridir. Yüksek mühendislik uygulamaları için parçaların dizaynında, araştırmacılar doğru uygulamalar için doğru malzemelerin seçimine çok dikkat etmek zorundadırlar. Çoğu seramikler genellikle kırılma dayanımı ve sertlikleri gibi mekanik özellikleri için optimize edilirler. Oysa ki bu mekanik özellikler tek başına aşınma için güvenilir bir tercih değildir (62).

Genellikle seramiklerin aşınması fiziksel, kimyasal ve sistem değişikliklerine neden olan karmaşık bir işlemdir. Sürtünme ve aşınma özellikleri üzerinde test sıcaklığı, kayma hızı, uygulanan kuvvet ve çevrenin önemli etkisinin olduğu bilinmektedir (63). Yüksek sıcaklıklarda seramik malzemelerin aşınma oranında önemli artışlar olduğu görülmüştür. Bu artışın sebebi ilk oksit tabakasından sonra, temiz yüzeyin yeniden oksitlenmesi ve yüzeyden oksit tabakasının yeniden kalkması sebebiyledir (64). Sıcaklık ve dönme hızının artması ile yüksek aşınmadan düşük aşınmaya ve arkasından yüksek aşınmaya gidip geldiği gözlemlenmiştir. Buna karşın sürtünme ve aşınma üzerine artan sertliğin, malzemelerin aşınma performansında önemli olmadığı açıklanmıştır (65).

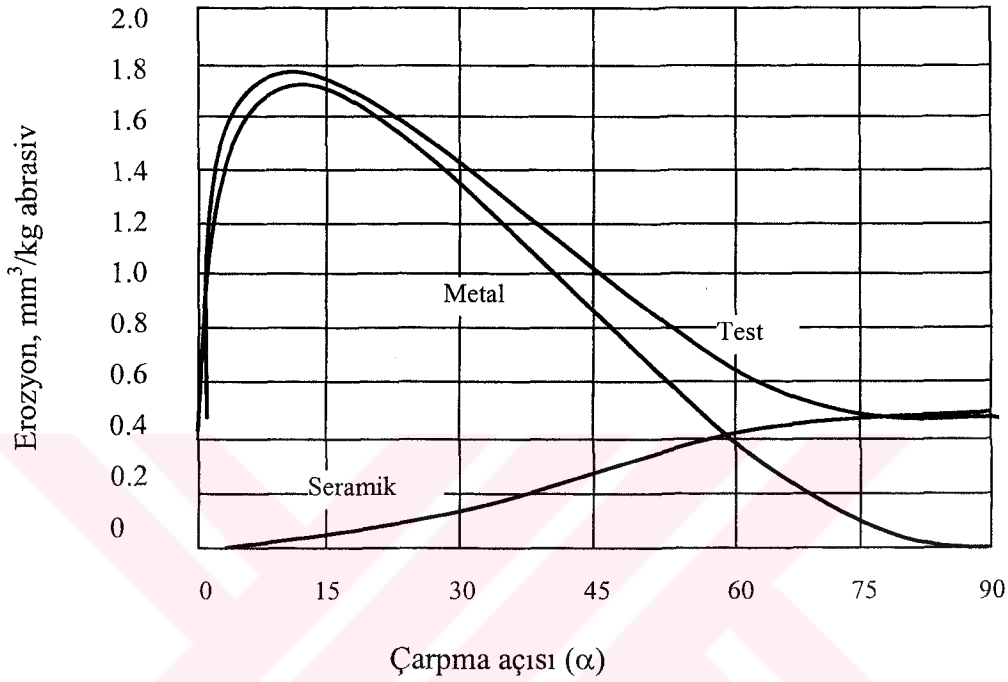
Seramikler gevrek olduklarından dolayı parçacık kopması yoluyla aşınma olur. Malzemede yüzey ve yüzey altı çatlaklar oluşur, bu çatlaklar birleşir ve malzemeden

küçük parçacıklar ayrılır. Aşınma esnasında oluşan partiküllerin sürtünmesi sonucu ince tozlar oluşur. Bunun için seramikler, yüksek temas gerilmelerine duyarlıdır. Metal ve plastikler ise kırılmadan önce yüksek temas gerilmelerini azaltmak için plastik olarak deforme olurlar. Seramikler yoğunlaşmış yoğun temas ile bağlantılı olarak hidrostatik gerilme altında plastik olarak deforme olabilirler, ancak metal ve polimerler ile karşılaştırıldığında plastik deformasyon çok küçüktür (66). Bir seramik malzemenin sıcaklığı ergime derecesinin (Tm) yaklaşık 0.6 katına çıktığında dislokasyonların hareketi ve plastik deformasyon için potansiyel artar. Sıcaklığın artması ile dayanımda azalma ve sürünme hızında artış olur. Sıcaklık artırıldığında süneklilik artmaz. Metallerde meydana gelen bu durum seramiklerde olmaz (61).

Seramikler, kayma halinde olan aşınma dirençli malzemeler için daha faydalıdır. Çoğu mühendislik uygulamaları, kaplama malzemeleri gibi yüksek aşınma dirençli seramiklere ihtiyaç duyarlar (67-69). Kayma teması durumda, gevrek malzemeler deformasyon tipi aşınma gösterebilirler. Abrasiv veya erosiv durumunda aşınma davranışı çok daha farklıdır. Abrasiv aşınma durumunda aşınma oranı elastik modül ile doğru orantılı, sertlik ve kırılma tokluğu ile ters orantılıdır. Bununla birlikte alumina ve silisyum karbürler aşınma esnasında mikroyapıya duyarlı davranış sergilerler. Tane boyutu ve taneler arası özellikler aşınmada etkilidir (61). Aluminanın sertliğine bağlı olarak, abrasiv aşınmada düşük dayanım ve yüksek sürtünme katsayısı gösterebilir. Kayma çiftlerinin tribolojik davranışı, uygulanan yüke, çevre şartlarına ve mikroyapı gibi parametrelere bağlıdır. Bu demektir ki; kayma hızı, uygulanan yük, ortamın ısısı, kayma yüzeyinin son durumu, tane boyu, tane şekli ve gözenek gibi birçok etken sürtünme ve aşınmada etkili olabilir (70-73).

Seramiklerin ısıl şok nedeni ile kırılması ciddi bir problemdir. Çünkü düşük ısıl iletkenlik nedeni ile sürtünme ısınması durumunda seramiklerde ısıl değişim artabilir. Su verildiğinde bu sıcak noktalar çekme gerilmelerini ve çatlakları artırır. Bu sonuç aşınmayı artırır. Seramikler deformasyon hızına duyarlıdır, kayma hızının ve sürtünme ısısının artması ile çatlak eğilimi artacaktır. Seramiklerin darbelere karşı bu duyarlılıkları erosiv aşınmaya karşı direncini zayıflatır. Katı partikül erozyonunun çarpma açısı aşınmayı etkiler. Metallerde maksimum erosiv aşınma 20 ila 40 ^{0}C

arasındaki açılarda meydana gelir. Diğer yandan seramiklerde kopan partiküllerin temas açısı 90 ^{0}C'ye yaklaştığı zaman Şekil 5.2'de görüldüğü gibi en yüksek erosiv aşınma meydana gelir (61).



Şekil 5.2. Metal ve seramik malzemelerin erosiv aşınmasında partikül açısının etkisi

Seramiklerin kısmi sertliği ve korozyon ortamı, erozyon mekanizması için önemlidir. Sertlikteki küçük artış erozif aşınmada büyük artışa sebep olabilir. Karşı malzeme seramiğe göre daha sert olduğunda mikro yapı ve kırılma tokluğu erozyon hızında daha da önemli olur (47). Böylece sert bir seramik daha yumuşak olan karşı malzeme kadar partikül erozyonuna direnç gösterecektir. Eğer karşı malzeme seramikten daha sert ise erozyon hızı mümkün mertebe daha yüksek tokluk, daha küçük tane boyutu ve minimum gözenek sağlanarak erozif aşınma minimize edilebilir (61).

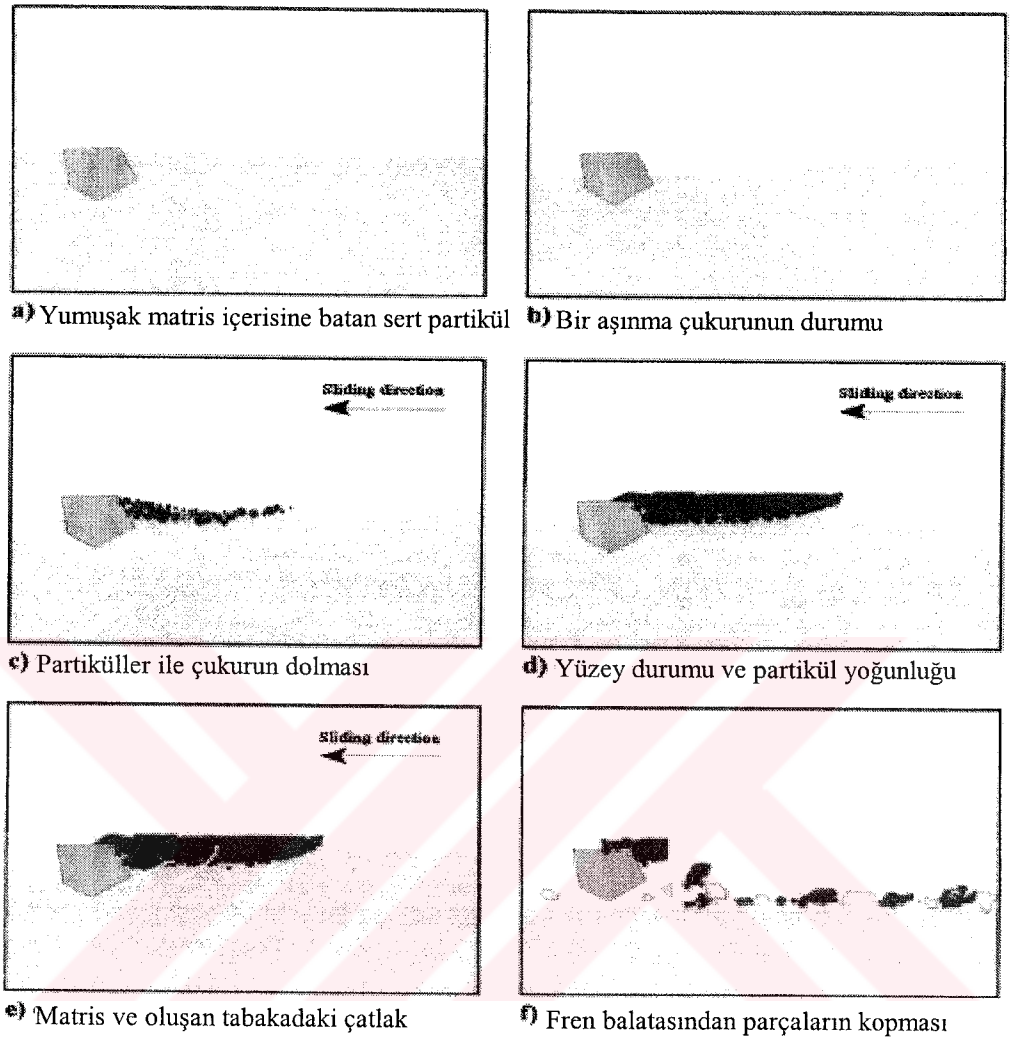
5.4. Endüstriyel Frenlerde Sürtünme Mekanizması

Fren sürtünme ve aşınma özellikleri; sıcaklık, sürtünme hızı ve basınç kadar fren dizaynı ve balata kompozisyonuna da duyarlıdır. Fren disklerinin aşınması sürtünme malzemelerinin kompozisyonundan çok, yolun durumuna ve bölgesel oksit partiküllerine daha duyarlıdır. Fren balatasının aşınma ömrü, genellikle servisteki

kilometre değerine göre ölçülür. Aşınma için fren ayarlamaları gerektiğinde, genellikle kullanma zamanına göre veya seyahat mesafesine göre yapılır. İyi bir fren balatası aşınma değeri düşük sıcaklıklarda 40 ile 100 mg/MJ arasındadır. Yüksek kullanım sıcaklıkları aşınma hızını 3 kata kadar artırabilir (55).

Bazı zamanlarda sürtünme gücünün, fren ve balata ara yüzeylerinde eşit dağılmadığı bilinmektedir. Sürtünme bölgesindeki bölgesel sürtünme gücü, sürtünme işleminin her çevriminde değişir. Barber (75) bu işlem için "Termo elastik kararsızlık"(TEK) sürecini ortaya koymuştur. Daha sonra TEK simülasyonu için bir model geliştirmişlerdir. Bu model kritik sürtünme hızının belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Kritik sürtünme hızı, TEK başladığı andaki hızdır. TEK prensip olarak sürtünme ısısı, deformasyon ve elastik temas arasında, sürtünme balatası ve sürtünme diski arasındaki etkileşim olarak tanımlanır. Uzun süreli frenlemelerde sürtünme yüzeyindeki sıcaklık ve frenleme gücü periyodik olarak değişir. Çünkü fren diskleri periyodik olarak deformasyona uğrar ve fren balatası, yüksek ısılaşırı yüklemeler de dahi görevini yapar (76).

Sürtünme özellikleri üzerinde bir diğer temel mekanizma ise, sürtünme esnasında kampana veya diskten kopan partiküllerdir. Bu partiküller sürtünme yüzeyine difüze olurlar. Bunların boyutları nanometre'den santimetreye kadar değişik boyutlarda olabilir (49). Bu işlem Şekil 5.3.'te görüldüğü gibi belli bir düzen içerisinde olur. Eğer kopan partiküller aşınan malzemeden (Balata malzemesi) daha sert ise yumuşak olan matris içerisine batacaktır. Sürtünme devam ettiğinde ise, fren balatasının üzerindeki bir partikül ile mikro teması sonucu çukurlar oluşacak ve bu çukurlar abrasiv bir etki ile büyüyecektir. Deneysel sonuçlara göre, sürtünme çiftinin ısılyükü düşük olduğunda sürtünme balatalarında bu metal partiküllerinin konsantrasyonu yüksektir. Sürtünme balatalarında metal partiküllerinin konsantrasyonu ile sürtünme katsayısı da artar (77).



Şekil 5.3. Bir fren balatasının yüzeyindeki mikro temaslar sonucu meydana gelen çukurlar ve onların büyümesi **(77).**

Fren sistemlerinin deneysel ölçümleri boyunca, sürtünme malzemelerini etkileyen bazı parametreler vardır. Bunlar; alıştırma (burnish) ve üretim sonrası yüzey etkisi (green performance), zayıflama veya yorma direnci (fade resistance), yorma toparlanması (fade recovery), gecikmiş zayıflama (delayed fade), hız duyarlılığı (speed sensitivity) ve çevresel duyarlılık (environmental sensitivity). Bunların her birini kısaca tanıyalım (55).

Üretim sonrası yüzey etkisi (Green effectiveness); Bir sürtünme malzemesinin ilk aşamasındaki alıştırma (Burnish) yapılmamış halidir. Sürtünme malzemesinin,

kampana veya disk ile teması üretim toleransına bağlıdır. Yeni bir balatanın montaj edilmesi durumunda, balatanın performansı oldukça düşüktür. Performansın iyi olması için alıştırma yapılması gerekir. Bu başlangıçtaki alıştırma işlemine "green effectiveness" denir.

Fren balatasının ilk sürtünme değerleri, fren balatasının bileşimi, temas basıncı, yüzey bileşenlerinin etkisi ile değişiklikler gösterebilir. Yeni bir balatanın performansının iyi olması için alışmamış yüzey minimize edilmelidir. Çünkü balata üzerindeki oksitlenme veya kirlenmeden dolayı ilk sürtünme artabilir.

Alıştırma etkisi (Burnished Effectiveness); Balata ile disk sürtünme yüzeyinde tam bir temas olduğunda, fren balatasının ilk temas alanı üzerinde dengeli bir yanmış tabaka şekillenir. Balatanın bu durumuna alıştırma etkisi denir. Tipik olarak fren performansı, fren balatasının disk veya kampana ile % 85 ile % 90 temas sağladığında bir dengeye sahiptir. Semimet fren balataları için bu bir kabuldür.

Zayıflama veya yorma direnci (Fade Resistance); Fren yorulması, fren etkinliğinin azalmasıdır. Genellikle frenin aşırı ısınmasından kaynaklanır. Bununla birlikte beş tür fren yorulması oluşabilir.

1. Isıl yorulma, frenin tümünün aşırı ısınmasından kaynaklanır.
2. Gecikmiş yorulma, reçinenin soğuma sırasında göçü sebebi ile
3. Kabarcık yorulması, balata yüzeyine yakın kabarcıklar sebebi ile
4. Yanma yorulması, aşırı hız ve aşırı fren yüklenmesi sonucu
5. Yüzey kirliliği, su veya yağdan kaynaklanan yüzey kirliliği

Zayıf fren yorulma davranışı, yüksek kaliteli malzemelerle önlenebilir. Sürücü gereksiz yere fren yaptığında fren balata yorulması olur. Bunu elimine etmek için balatanın iyi seçilmesi gerekir.

Yorulma toparlanması; Isıl yorulmadan sonra sürtünme malzemelerinin yeteneğinin düzelmesi için normal fren etkinliği çabucak yerine gelir. Burada fren diski veya fren kampanasının soğuması ile sürtünme normale geri döner.

Gecikmiş yorulma; Bazı kampana frenlerinde meydana gelen olağandışı bir durumdur. Yorulma toparlanması boyunca, fren etkinliği beklenilmeyen şekilde geçici bir süre için düşebilir. Fakat istenilen fren pedal gücünün arttığı söylenebilir.

Kabarcık yorulması; yeni fren balataları üretime bağlı olarak uçucu maddeler içerebilir. Eğer alıştırma işleminin sonuna kadar fark edilmez ise (ısınmaya bağlı olarak) balatanın yüzeyine yakın bölgelerde gaz basıncı sebep olabilir. Bunun sonucunda, yüzeye yakın kabarcıklar fren etkinliğinin düşmesine neden olur. Çünkü kabarcık bulunan bu bölgelerde balata ile disk temas yüzey alanı düşüktür.

Yanma zayıflaması; yanma ve alışmamış yorulma ile ilişkilendirilir. Fakat çok yüksek fren gücü seviyesinde ve genellikle çok yüksek hızlarda meydana gelir. Yüzeye yakın organik maddelerin hızlı uzaklaşması, balata yüzeyinde yağlanmış bir gaz oluşturur. Buda frenleme gücünü, yani sürtünme katsayısını düşürür.

Yüzey kirliliği; fren balatalarının veya disklerin sürtünme yüzeyinde su, yağ veya bunların kombinasyonu bir film oluşturarak frenlemeyi etkiler.

Hız duyarlılığı; hız duyarlılığı malzeme türü ve kombinasyonu ile değişir. Hız duyarlılığı, sıcaklık, basınç ve ilk kullanım özelliği ile değişir. Genellikle hızın artması ile fren etkinliği azalır.

Çevresel duyarlılık; fren etkinliğini azaltan su, yağ, toz ve oksitler gibi sebeplerdir. Mesela, kalınlığı 0.2 μm olan yağ filmi, düşük hızlarda sürtünme katsayısını %55'e kadar artırabilir. Bununla birlikte yağ film tabakasının kalınlığı 0.5 μm olursa elastohidrodinamik durumdan dolayı düşük sürtünme olabilir.

Sonuç olarak; frenleme esnasında sürtünmedeki etkin mekanizma, yerel sürtünme yüzey sıcaklığı, yerel sürtünme şiddeti, ısıl temas direncine bağlı ısı ile meydana gelen deformasyon ve sürtünme esnasında kopan partiküllerdir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, toz metalurjisi yöntemi ile bronz esaslı fren balataları üretilerek performansları incelenmiştir. Bronz esaslı balata tozlarına çeşitli seramik tozları ilave edilerek, balata numuneleri üretilmiş ve üretilen seramik takviyeli balata numuneleri ile bronz esaslı balata numunelerinin sürtünme-aşınma özellikleri açısından mukayesesi yapılmıştır.

6.1. Bronz Esaslı Toz Malzemesi

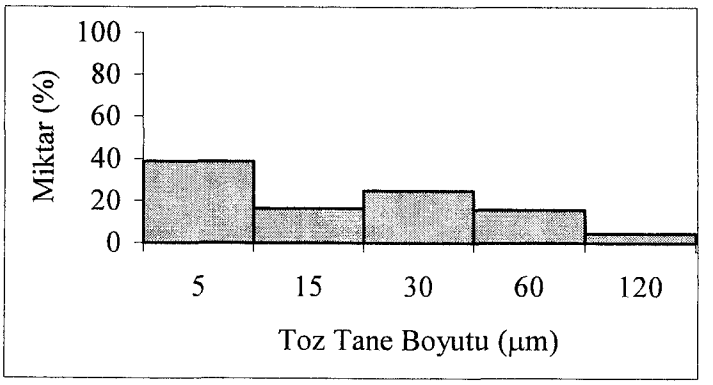
Balata malzemesi olarak Çizelge 6.1'de kimyasal kompozisyonu verilen ve 0,2-80 μm boyut aralığında bronz esaslı tozlar kullanılmıştır. Bronz esaslı balata malzemesi Gürel Makine A.Ş.'den temin edilmiştir.

Çizelge 6.1. Bronz esaslı toz metal fren balata numunelerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) (A)

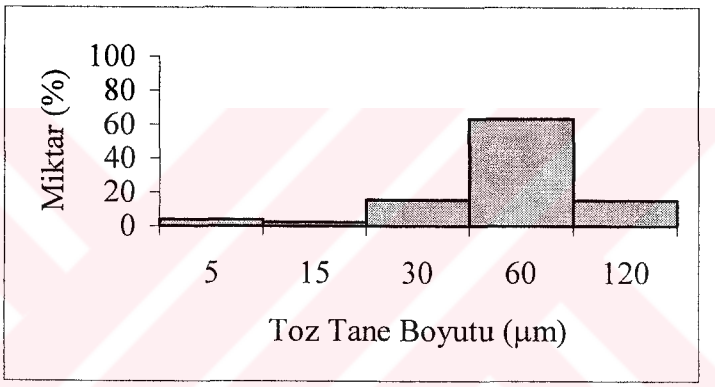
Bakır (%)	Kalay (%)	Demir (%)	Kurşun (%)	Grafit (%)
70	8	11	8,5	2,5

6.2. İlave Toz Malzemeler

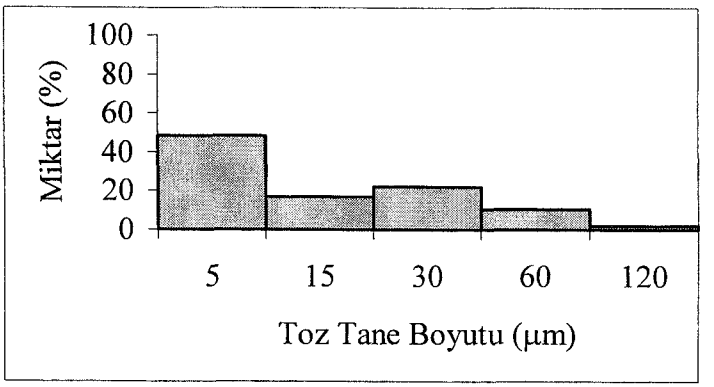
Deneylerde kullanılan SiO_2, Al_2O_3, Sb_2S_3, ve $ZrSiO_4$ seramik tozları Eren Fren ve Debriyaj Balata A.Ş'den sağlanmıştır. Sepiolit tozu ise Maden Teknik Arama'dan (MTA) temin edilmiştir. Bu tozların tane dağılımları Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuarlarında lazer partikül ölçme cihazında tespit edilmiştir. Şekil 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5' de seramik tozlarının toz boyutu dağılımları görülmektedir.



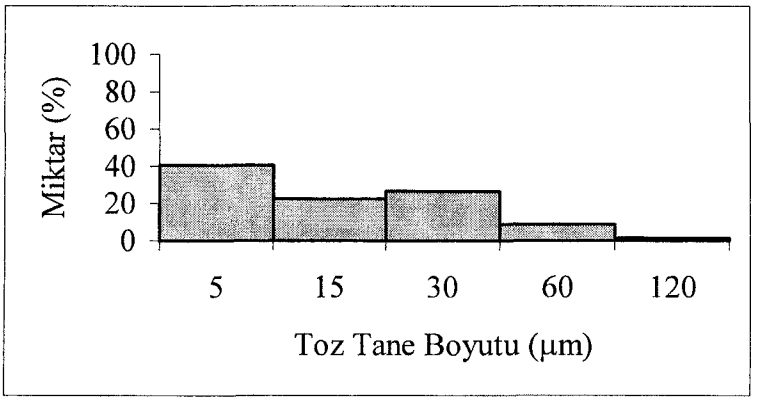
Şekil 6.1. SiO_2 toz tane boyut dağılımı



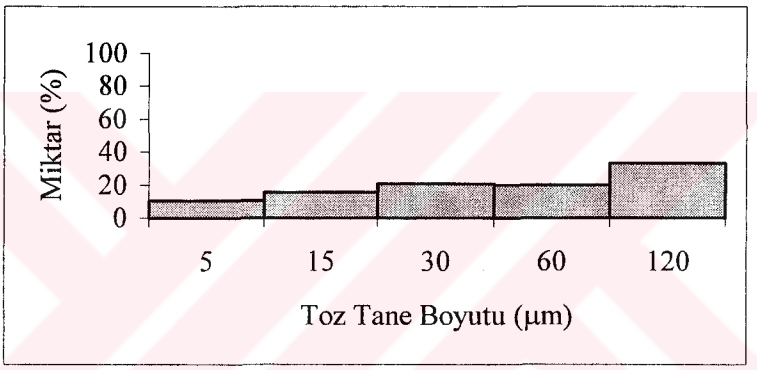
Şekil 6.2. Al_2O_3 toz tane boyut dağılımı



Şekil 6.3. Sepiolit toz tane boyut dağılımı



Şekil 6.4. Sb_2S_3 toz tane boyut dağılımı



Şekil 6.5. $ZrSiO_4$ toz tane boyut dağılımı

6.3. Tozların Karıştırılması ve Preslenmesi

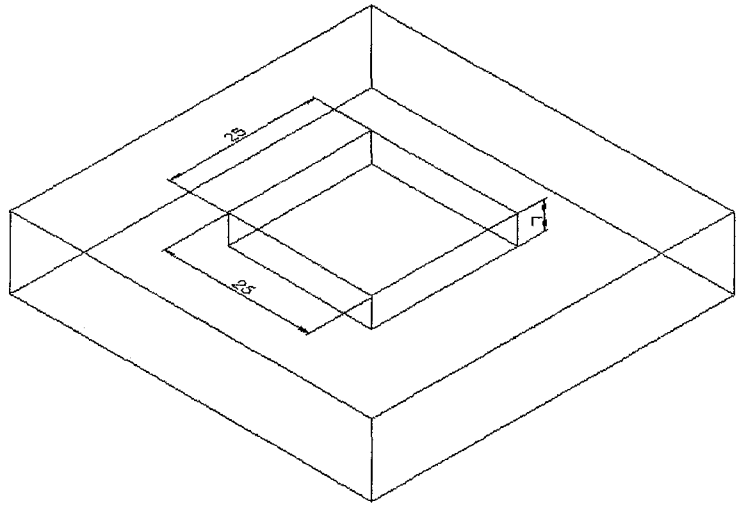
Çizelge 6.1'de bileşimi verilen bronz esaslı balata tozlarına ilave edilen seramik tozları ve oranları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Bronz esaslı toz malzemelere ilave edilen katkı maddeleri ve oranları

Ana Malzeme (A)	İlave Malzeme	Numune Kodu	İlave miktarı % Ağırlık (g)
Bronz Esaslı Fren Balata Toz Malzemesi	SiO_2	A1	0.5
		A2	1
		A3	2
		A4	4
	Al_2O_3	B1	0.5
		B2	1
		B3	2
		B4	4
	Sepiolit	C1	0.5
		C2	1
		C3	2
		C4	4
	Sb_2S_3	D1	0.5
		D2	1
		D3	2
		D4	4
	$ZrSiO_4$	E1	0.5
		E2	1
		E3	2
		E4	4
		E5	5
		E6	6

Seramik katkılı balata malzemesinin hazırlanmasında, homojen bir karışım elde edebilmek amacıyla üç boyutlu hareket edebilen "Turbula T2C" karıştırıcıda 10 dakika süre ile karıştırılmıştır.

Karışım tozları Şekil 6.6'da şematik olarak gösterilen 25x25x7 mm ebatlarındaki kalıp içerisine yerleştirilerek tek yönlü hidrolik preste preslenmiştir. Tozların preslenmesinde 350, 500 ve 600 MPa presleme basınçları kullanılmıştır. T/M balata numunelerinin yapılan sürtünme-aşınma plot deneylerinde optimum sürtünme katsayısı değeri 350 MPa presleme basıncında sağlanmıştır. Dolayısıyla deneylerde 350 MPa presleme basıncı kullanılmıştır

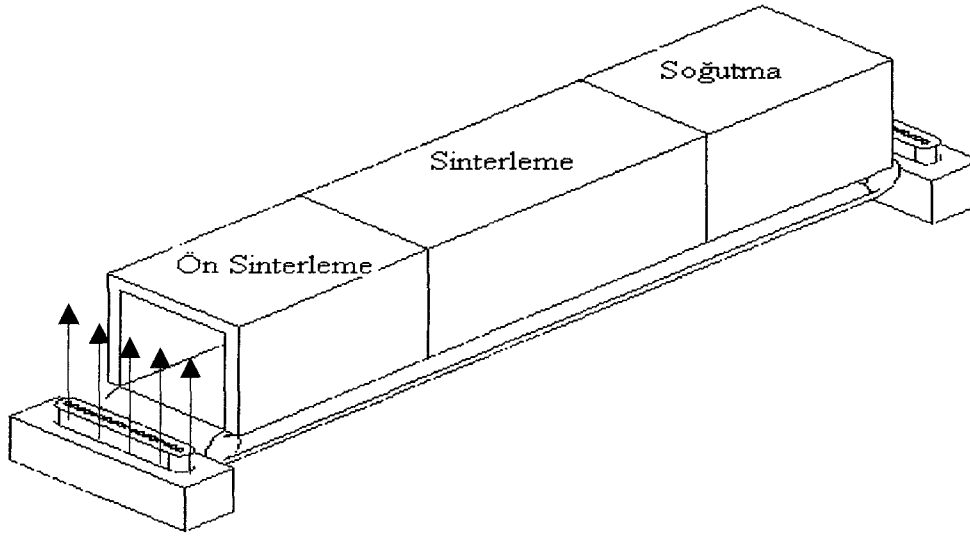


Şekil 6.6. Toz presleme kalıbın şematik gösterimi

6.4. Sinterleme

Preslenmiş numunelerde toz tanelerinin yüksek yüzey enerjilerinin minimuma indirilmesi ve tozlar arasında metalurjik bağlar oluşturulması amacı ile sinterleme işlemi uygulanmaktadır.

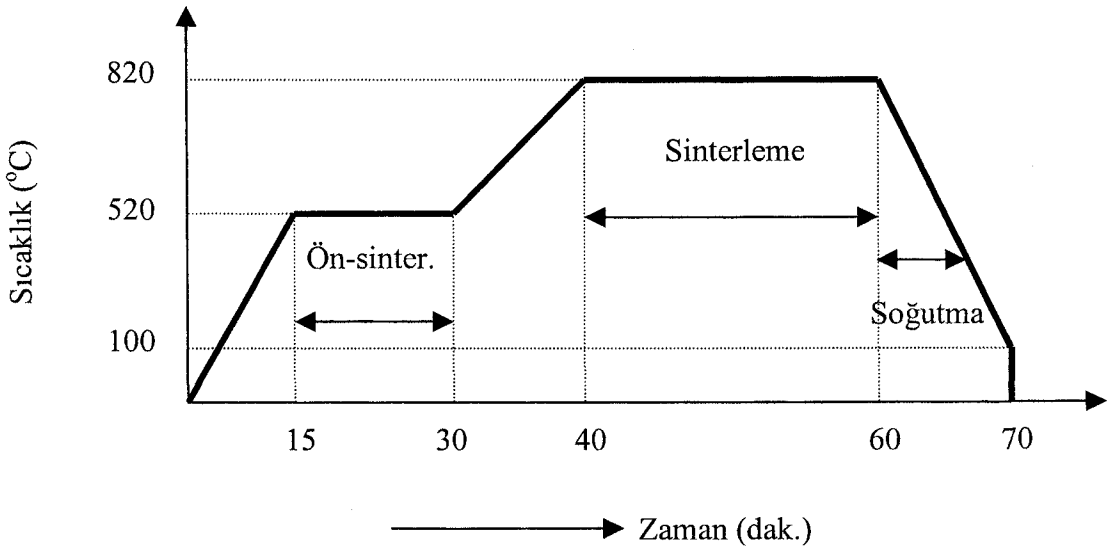
Sinterleme işlemi Metin otomotiv firmasınca kullanılan ve Şekil 6.7'de şematik olarak görülen dikdörtgen kesitli bant (konveyör) taşımalı bir sinterleme fırınında yapılmıştır. Fırın numunelerin ilerleme yönüne dik yönlerde indirgeyici olarak amonyak gazı veren, fırının giriş ve çıkış kısımları atmosfere açık olduğundan, bu noktalardan fırına oksijenin girişini engelleyebilmek için bütan gazı ile bir alev perdesi oluşturan bir sisteme sahiptir.



Şekil 6.7. Sinterleme fırını şematik gösterimi

Yapılan pilot çalışmalarda literatürden yararlanılarak (54) 780, 800, 820 ve 850 ^{0}C sinterleme sıcaklıkları seçilmiştir. 780 ve 800 ^{0}C sıcaklıklarda sinterleme işleminin olmadığı görülmüştür. 850 ^{0}C sıcaklıkta ise numunelerde kusma diye tanımlanan düşük ergime sıcaklığına sahip elementlerin buharlaşarak yapıyı terk etmesi esnasında, buharlaşamayan kısmının yüzeyde kabarcıklar halinde kaldığı görülmüştür. 820 ^{0}C'de sinterlenmiş numuneler hem mekanik dayanım hem de fiziki görünüm olarak iyi bir sonuç verdiği için bu alaşım için 820 ^{0}C sinterleme sıcaklığı seçilmiştir.

Sinterleme işlemi, Şekil 6.8'de şematik olarak görüldüğü gibi ön sinterleme, sinterleme ve soğutma bölgeleri olmak üzere üç farklı sıcaklık bölgesinden oluşmaktadır. Bu işlem toplam 70 dakikada tamamlanmaktadır. Numuneler, içerisindeki yağ vb. atıkların dışarı atılması amacı ile ön sinterleme bölgesi olan 520 ^{0}C sıcaklıkta 15 dakika bekletildikten sonra, sinterleme sıcaklığı olan 820 °C' ye 10 dakikada yükseltilmişlerdir. 820 °C' de 20 dakika sabit sıcaklıkta kalan numuneler, soğutma bölgesinde 10 dakikada 100 ^{0}C sıcaklığa soğutulmuşlardır. Sinterlenen numuneler fırından alındıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmışlardır.



Şekil 6.8. Sinterleme işleminin aşamaları

6.5. Sinterlenmiş Numunelerinin Karakterizasyonu ve Performans Deneyleri

Üretilen fren balata numunelerinin karakterizasyonu amacı ile yoğunluk, sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarları test edilmiş, numunelerden sinterleme öncesi ve sonrası mikro yapı görüntüleri ve aşınan numunelerden SEM görüntüleri alınmış ve numunelerdeki aşınma türleri tespit edilmiştir.

Her birinden ikişer adet üretilen toz metal fren balata numunelerinin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları, hacimlerinin kütlelerine oranı ile hesaplanmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri aşınma öncesi ve sonrasında Vickers yöntemi ile 1 Kg. yük kullanılarak "Instron Wolpert" marka sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümleri için aşınan yüzeyden, aşınma öncesinde ve sonrasında beş değişik yerden sertlik ölçümü yapılarak ortalamaları alınmıştır.

Deney numuneleri İzmir de bulunan "Eren Fren ve Debriyaj Balata A.Ş.' de SAE-J661'e göre test yapan "Friction Coefficient Test Rig" cihazında aşındırılmıştır. Performans testleri her bir test numunesi için Çizelge 6.2' de verilen deney şartlarında yapılmıştır. Aşındırma işleminde 250 Hv sertlikte ve 280 mm çapında gri dökme demirden üretilmiş aşındırıcı disk kullanılmıştır. Deney sonuçları aşınma test cihazına bağlı bir bilgisayardan alınmıştır.

Çizelge 6.3. Aşınma test şartları

İşlem Basamakları	Hız Dev/dak	Sıcaklık °C			Yük Kg.	Sürtünme		Bekleme		Uygulama sayısı	Seçilen ölçüm
		Min.	Max.	Periyot		Dak.	Sn.	Dak.	Sn.		
Yanma	308	82	93	0	45	20	0	0	0	1	0
Düzenleme	205	82	93	0	23	5	0	0	0	1	0
I. Alıştırma	411	93	93	0	68	0	10	0	20	20	5
I. Yorma	411	93	288	28	68	10	0	0	0	1	0
I.Toparlama	411	260	93	56	68	0	10	0	0	1	0
Aşınma	411	193	204	0	68	0	20	0	10	100	10
II. Alıştırma	411	93	343	28	68	10	0	0	0	1	0
II. Yorma	411	316	93	56	68	0	10	0	0	1	0
II.Toparlama	411	93	93	0	68	0	10	0	20	20	5

SEM görüntüleri Kırıkkale Üniversitesi Fizik Mühendisliği bölümünde Jeol SN-5600 marka cihazda numunelerin aşınmış yüzeylerinden alınmıştır. Ayrıca numunelerden sinterleme öncesi ve sonrası mikro yapı görüntüleri alınmıştır.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

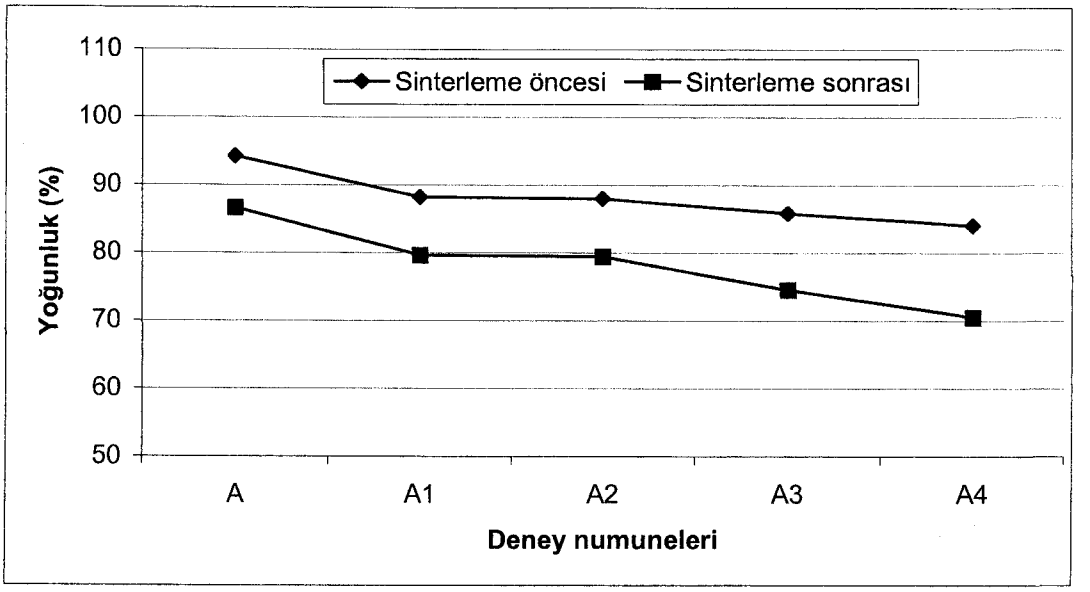
Bu bölümde, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Çizelge 6.1'de kimyasal kompozisyonu verilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye ilave edilen çeşitli seramik katkılı balata numunelerinin karakterizasyon, sürtünme-aşınma ve mikro yapı sonuçları tartışılmıştır.

7.1. Silisyum Dioksit'in Etkisi

T/M yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye değişik oranlarda SiO_2 ilavesi ile hazırlanan numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları, aşınma öncesi ve sonrası sertlikleri, sürtünme-aşınma deneyi sonucundaki aşınma miktarları ve aşınma süresinde belirlenen ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Ayrıca değişen SiO_2 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi Şekil 7.1'de, sinterlenmiş numunelerden alınan EDS analiz sonucu Şekil 7.2'de, aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi ise Şekil 7.3'de görülmektedir.

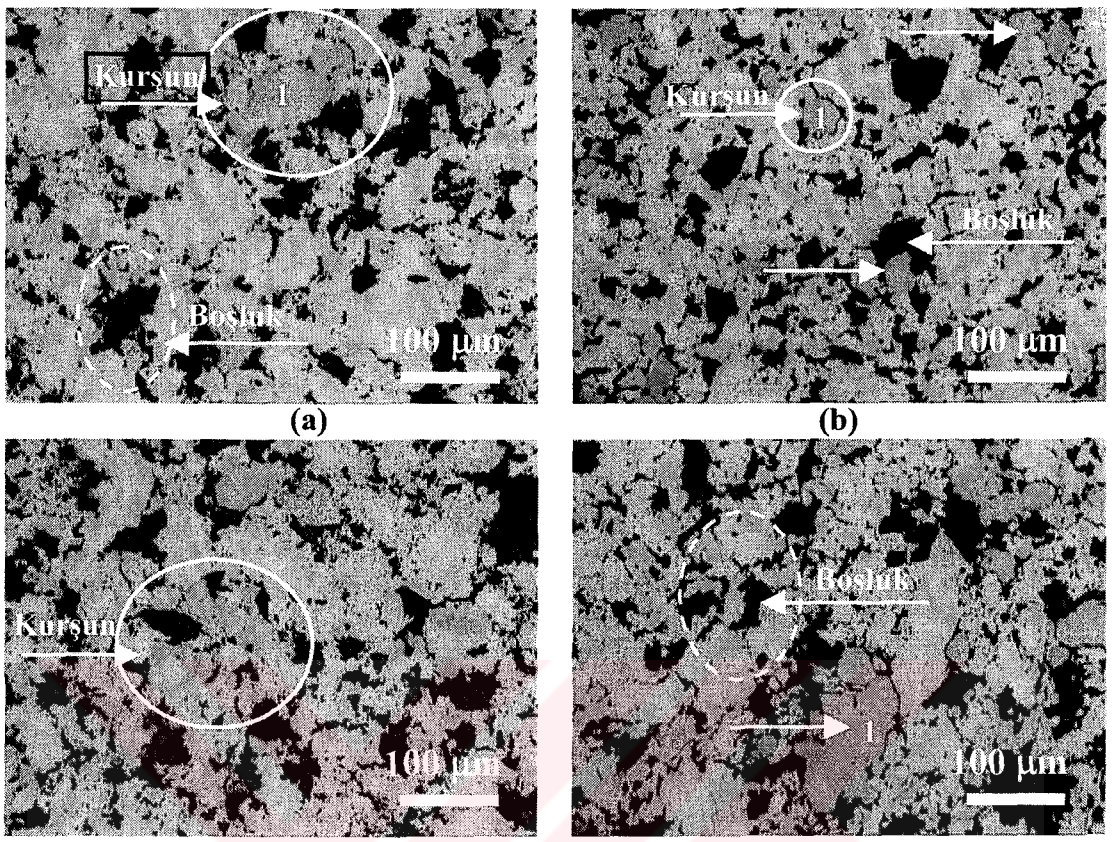
Çizelge 7.1. Ana malzeme ve Silisyum dioksit bileşiminin karakterizasyon sonuçları

Deney Numunesi	Yoğunluk (%)		Sertlik (HV_1)		Aşınma miktarı % ağırlık	Ortalama sürtünme katsayısı (μ)	
	Sinter öncesi	Sinter sonrası	Aşınma öncesi	Aşınma sonrası		Soğuk	Sıcak
Ana malzeme (A)	94,22	86,60	55,3	104	22,46	0,24	0,22
A1 = A+ % 0.5 SiO_2	88,11	79,43	32,8	67,7	7,82	0,23	0,23
A2 = A+ % 1.0 SiO_2	87,97	75,20	35,4	80,3	10,13	0,24	0,23
A3 = A+ % 2.0 SiO_2	85,79	74,51	38,5	82,8	16,18	0,29	0,28
A4 = A+ % 4.0 SiO_2	84,01	70,51	42,6	90,4	21,6	0,37	0,36



Şekil 7.1. Değişen SiO_2 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi

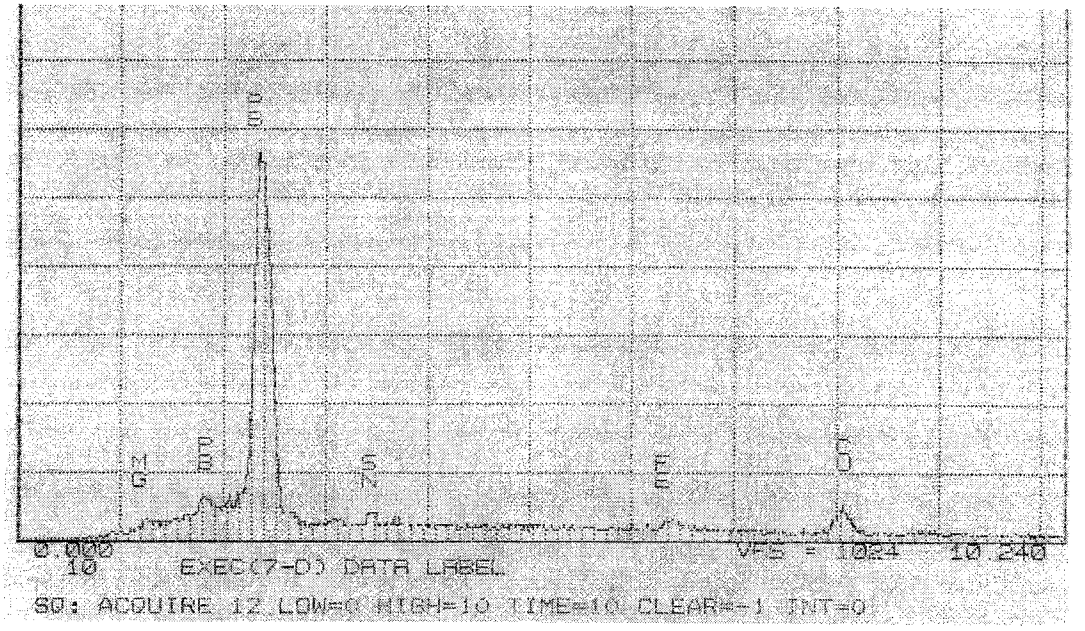
Şekil 7.1'de SiO_2 miktarının artmasına bağlı olarak sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluklarda düşme olduğu gözlenmiştir. Sinterleme öncesi yoğunlukların düşmesinin sebebi, Resim 7.1'den görüldüğü gibi SiO_2 tozunun bronz esaslı tozların sıkıştırılabilirlik özelliğini azaltmasına bağlı olarak gözenek miktarı ve boyutunun artmış olmasındandır. Bu da daha düşük yoğunlukta bir malzeme elde edilmesine sebep olmaktadır. Ayrıca yoğunluktaki bu düşüşün sebebinin, SiO_2 tozunun metal tozlarına göre oldukça düşük yoğunlukta olmasının da etkisi vardır. Sinterleme sonrası yoğunlukların düşmesi ise, sinterleme esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozlarının (Pb,Sn) bir kısmı buharlaşarak yapıyı terk etmesinden dolayıdır. Ancak hala yapı içerisinde sıvı halde bulunan elementlerin boşluklara girerek gözeneklerin kapanmasını engellediği gözlenmiştir (Resim 7.1). Boşluklara dolan kurşunun malzeme içerisinde meydana getirdiği gerilimden dolayı, malzemelerin hacimce genişlemeleri de sinterleme sonrası yoğunlukları düşürmüştür (Çizelge 7.2.).



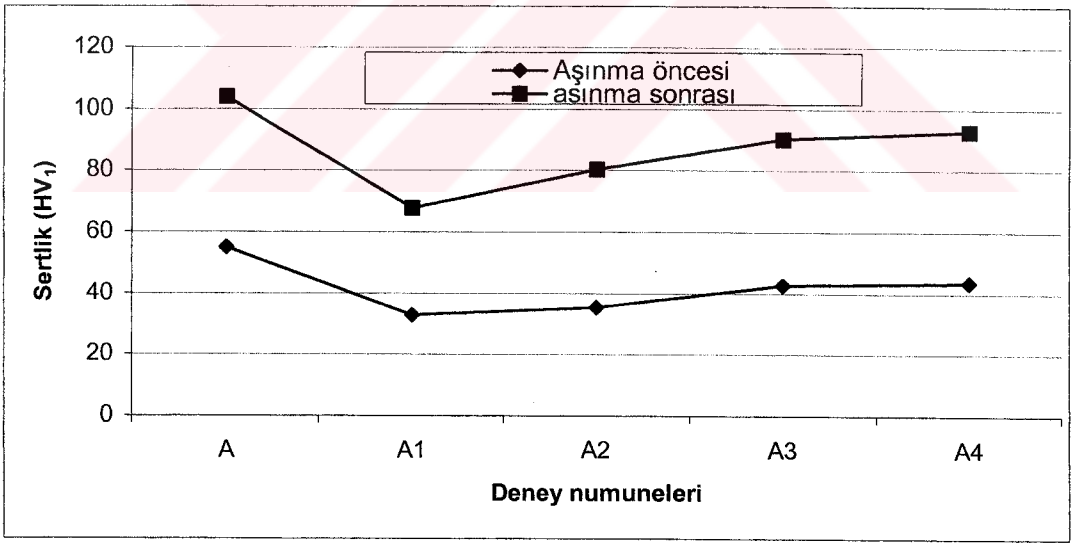
Resim 7.1. SiO_2 artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim. a) % 0.5 SiO_2 Sinterleme öncesi, b) % 0.5 SiO_2 Sinterleme sonrası, c) % 4 SiO_2 Sinterleme öncesi ve d) % 4 SiO_2 Sinterleme sonrası

Çizelge 7.2. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış

Numune	**Ağırlık Kaybı (%)**	**Hacim Artışı mm^3**
A	0,075	8,71
A1	0,035	11,58
A2	0,034	11,65
A3	0,032	11,90
A4	0,033	12,51



Şekil 7.2. Sinterleme sonrası % 4 SiO_2 numunesinde 1 rakamı ile gösterilen bölgeden alınan EDS sonucu.



Şekil 7.3. Değişen SiO_2 oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi

Şekil 7.3 incelendiğinde aşınma sonrası sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu artış en fazla A numunesinde meydana gelmiştir. Bu durum, balatalarda istenmeyen bir özelliktir. Çünkü balatalardaki fazla sertleşme frenleme esnasında gürültü ve ses olarak kendini göstermektedir (78). Ayrıca Şekil 7.3. ve Şekil 7.1. bir arada

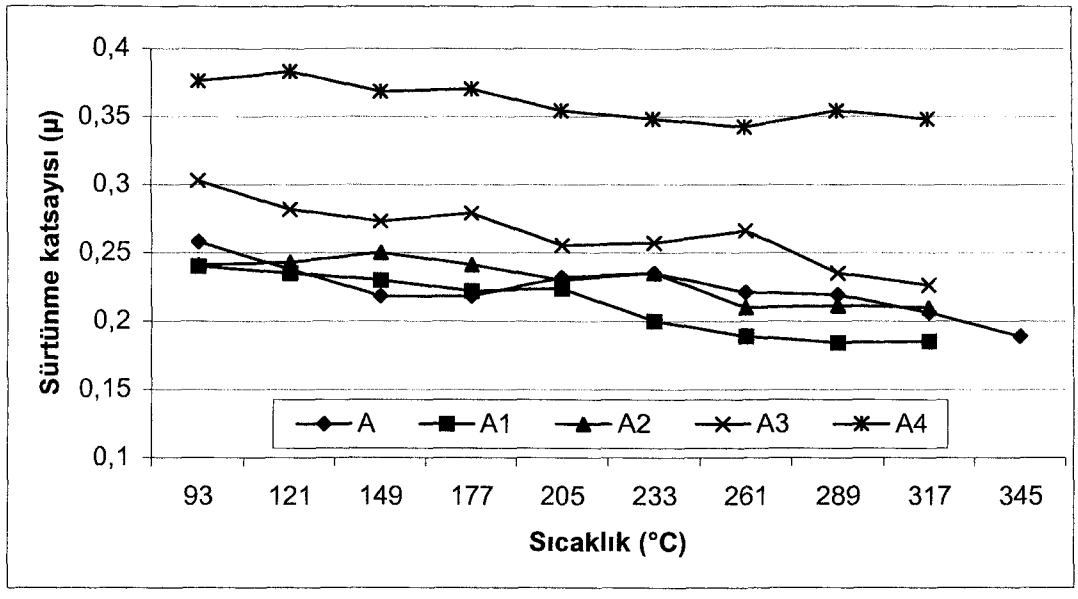
incelendiğinde düşük yoğunluklu numunelerin aşınma sonrası sertliklerinin daha fazla arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, düşük yoğunluklu numunelerde gözeneklilik fazla olduğundan ısıl iletkenlik düşmekte ve frenleme sırasında sürtünmeye bağlı olarak oluşan sıcaklığın ortamdan uzaklaştırılmasının az olmasına dayandırılmıştır. Bu durum literatürle de (53) desteklenmştir. Ayrıca frenleme kuvveti (Çizelge 6.2) 68 kg.dır ve artan sıcaklığın da etkisi ile test numunelerinde deformasyon miktarı artarak çalışma sertleşmesini artırdığı düşünülmektedir.

Şekilde A numunesine ilave edilen % 0.5'lik bir SiO_2 tozunun numunenin sertliğini düşürdüğü gözlenmektedir. Bunun sebebi Şekil 7.1 incelenirse, silisyum dioksit ilavesinin numunenin yoğunluğunu düşürmesine atfedilebileceği üzerinde düşünülebilir. % 0.5 SiO_2 ilavesinden sonra numunelerin sertliğinde az da olsa bir artış mevcuttur. Bunun sebebi ise sertlik ölçümlerinin daha çok SiO_2 üzerinden alındığı sanılmaktadır.

Yapılan deneylerde numunelerin özelliklerini belirleyen en önemli parametrenin aşınma ve 2.yorma (second fade) işlemlerinin olduğu belirlenerek Çizelge 7.3'de sayısal değer olarak, Şekil 7.4'te ise grafiksel olarak sıcaklık ve zamana bağlı sürtünme katsayısındaki değişim gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 7.5'te ise SiO_2 miktarındaki artışa bağlı olarak deney numunelerindeki aşınma miktarları görülmektedir.

Çizelge 7.3. SiO_2 balata numunelerinin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri

	Döngü	Sıcaklık (^{0}C)	Hız (dev/dak)	Yük (Kgs)	Sürtünme kuvveti (Kgs)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Zaman (Saniye)
A	1	94	420	69.6	17.9	0.258	10
	1	121	419	69.1	16.4	0.238	39
	1	149	420	68.8	15.0	0.218	80
	1	177	420	68.9	15.0	0.218	115
	1	205	420	69.0	16.0	0.232	166
	1	232	421	68.8	16.2	0.235	184
	1	260	422	69.0	15.3	0.221	234
	1	288	420	68.6	15.1	0.219	298
	1	316	419	68.9	14.2	0.206	382
	1	344	421	68.2	12.9	0.189	508
	Ortalama		420	68.9	15.4	0.224	
A1							
	1	94	416	68,0	16,3	0,240	18
	1	121	416	67,9	16,0	0,235	115
	1	149	416	68,1	15,7	0,230	166
	1	177	418	68,4	15,2	0,222	254
	1	205	417	68,0	15,3	0,224	311
	1	233	417	68,5	13,7	0,200	449
	1	260	417	68,1	12,8	0,189	491
	1	288	417	67,8	12,5	0,184	554
	Ortalama		417	68,1	14,7	0,216	
A2							
	1	93	416	68,3	16,4	0,241	24
	1	121	415	68,4	16,6	0,243	75
	1	149	417	67,9	17,0	0,250	148
	1	177	417	68,7	16,6	0,241	190
	1	205	417	68,0	15,6	0,230	290
	1	232	417	68,0	16,0	0,235	330
	1	260	417	68,0	14,3	0,210	492
	1	288	417	68,8	14,5	0,211	507
	Ortalama		417	68,2	15,9	0,233	
A3							
	1	93	418	67,7	20,5	0,303	22
	1	121	418	67,9	19,0	0,280	67
	1	149	417	68,4	19,3	0,282	132
	1	177	417	68,2	18,6	0,273	167
	1	205	418	68,6	19,1	0,279	223
	1	232	418	68,0	17,3	0,255	304
	1	260	418	68,5	17,6	0,257	370
	1	288	418	68,1	18,2	0,266	435
	1	316	417	67,9	16,0	0,235	555
	Ortalama		418	68,1	18,4	0,270	
A4							
	1	93	419	69,0	26,0	0,376	11
	1	122	419	68,0	26,1	0,383	52
	1	149	419	68,2	25,1	0,368	99
	1	177	418	68,8	25,5	0,370	129
	1	205	419	68,1	24,1	0,354	180
	1	233	419	68,3	23,8	0,349	232
	1	260	419	68,7	23,5	0,342	289
	1	288	420	68,9	24,4	0,354	378
	1	316	420	68,9	20,3	0,294	517
	Ortalama		419	68,5	24,3	0,354	



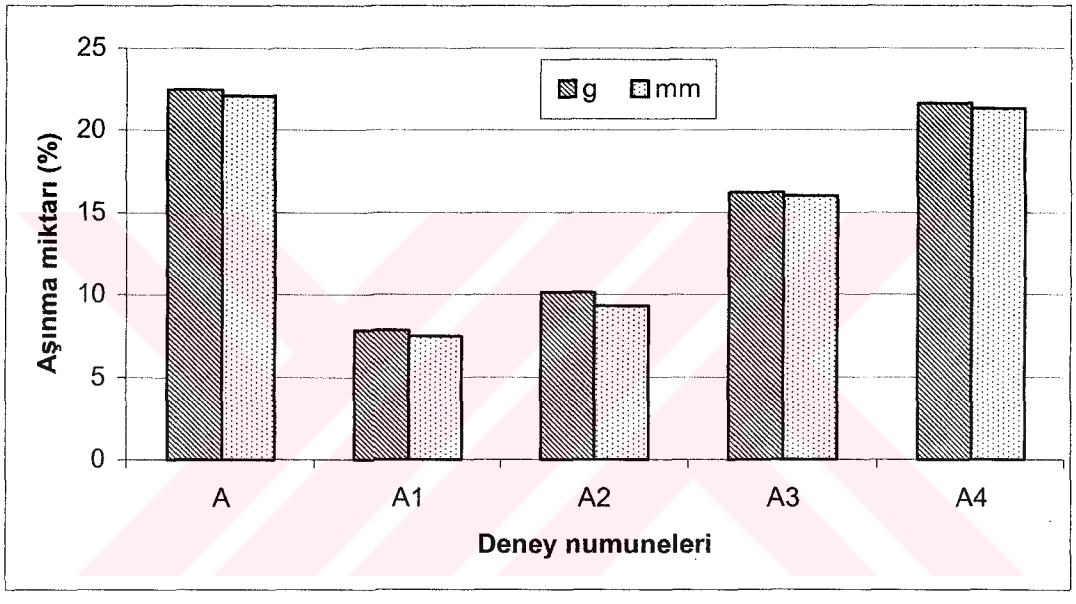
Şekil 7.4. SiO_2 deki değişime bağlı olarak, artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim

Fren balatalarından istenen en önemli özelliklerden birisi, frenleme esnasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan sıcaklık artışına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin minimum seviyede olmasıdır (80,81). Şekil 7.4 incelendiğinde sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısında bir düşüş gözlenmiştir. Ostermeyer (79) sürtünme katsayısının dinamiği üzerine yapmış olduğu çalışmada sürtünme katsayısının sıcaklıktaki artışa bağlı olarak azalacağını belirtmişlerdir, bu da bizim çalışmalarımızı doğrular niteliktedir. Ancak numuneler karşılaştırıldığında kararlı bir sürtünme katsayısı değerini % 4 SiO_2 ilave edilmiş numunede görmek mümkündür.

Genellikle sürtünme katsayısı (μ) 0.1 ila 0.7 arasında, sürtünme kuvveti ve disk-balata ara yüzey sıcaklığına bağlı olarak değiştiği literatürde vurgulanmaktadır(79). Ayrıca disk ile balata ara yüzeyindeki sıcaklığın ortalama 300 ila 350 ^{0}C civarında olduğu SAE-J661'de belirtilmektedir. Şekil incelendiğinde literatürle paralel olduğu görülmektedir.

Şekil 7.4. incelendiğinde sürtünme katsayısında az miktarda düşme şeklinde inişli çıkışlı sürekli bir değişim görülmektedir. Bunun sebebini Anderson (55) balata

temas yüzeyinde ısıl yükün homojensizliğinden olduğu şeklinde yorumlamıştır. Burada deney süresince disk yüzeyindeki temas bölgelerinin içine doğru ısıdaki değişim periyodik olarak değişir. Bu etkiden dolayı sürtünme katsayısında sürekli bir değişim meydana gelir. Ayrıca bu durumu Batchelor (48) sürtünme çiftlerinin yüzeyindeki pürüzlerde birleşme olması ve büyümesi ile açıklar. Bu durumda bir yapışma ve bir bırakma hali sürekli tekrarlanır, bu da sürtünme katsayısında sürekli artma ve azalma olmasına sebep olur.



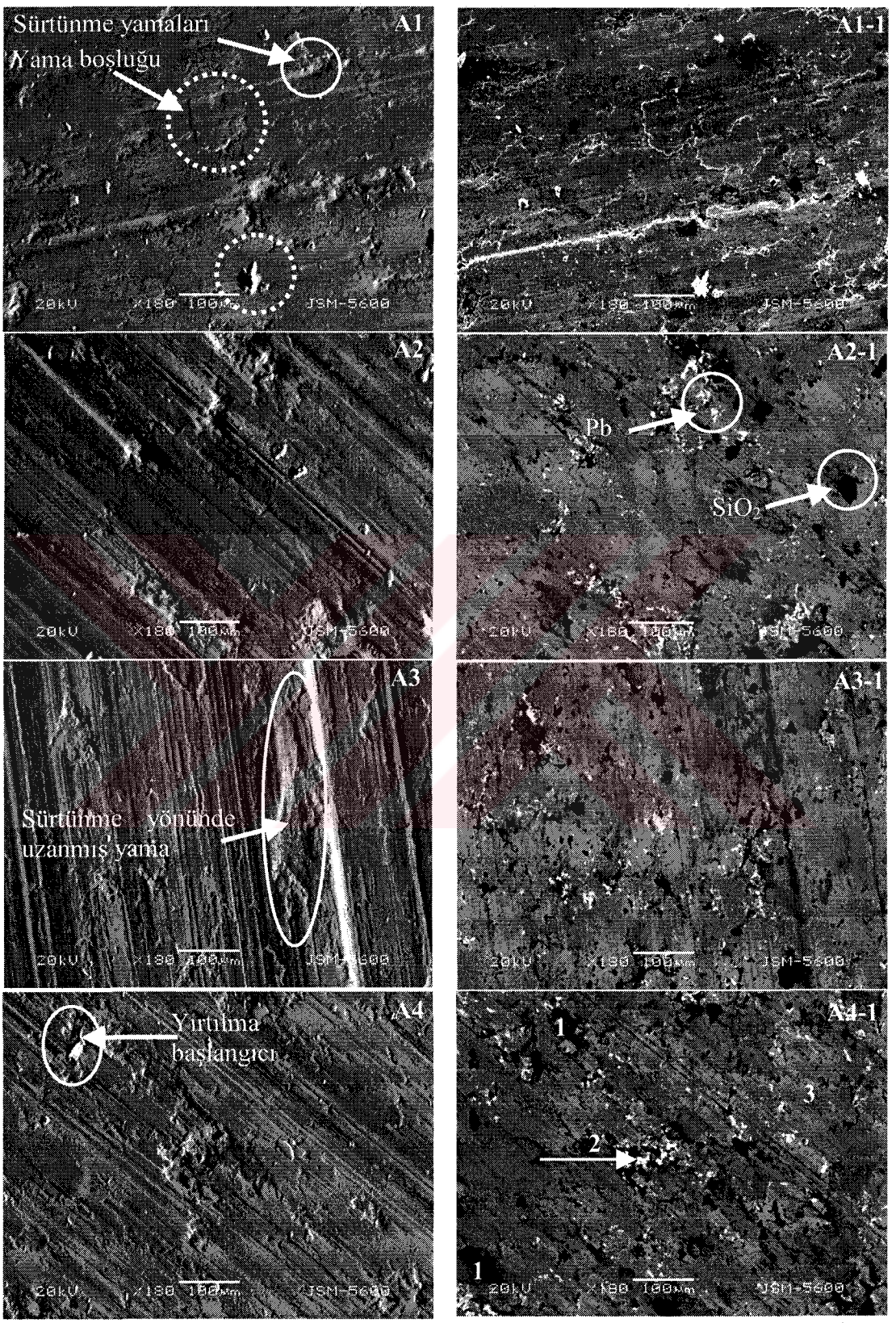
Şekil 7.5. Değişen SiO_2 oranlarına göre aşınma miktarındaki değişim

Bilindiği gibi fren balatalarından aşınmanın sıfır olması beklenemez. Çünkü aşınma direnci çok yüksek sürtünme malzemeleri karşı malzemenin aşınmasına sebep olur. Bu nedenle sürtünme malzemelerinde aşınma direncinden ziyade sürtünme katsayısının sıcaklık karşısındaki değişimi önemli görülür. Bu çalışmada sürtünme malzemesi olarak kullanılan A kodlu bronz esaslı sürtünme malzemesinin aşınma miktarı % 22,46 bulunmuştur. Bu değer balata malzemeleri için oldukça yüksektir. Bu karışıma 0.5 % SiO_2 ilave edildiğinde aşınma miktarı % 7.8'e düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuç aşınma direnci yönünden olumlu olmakla birlikte, sürtünme katsayısı incelendiğinde düşük sürtünme katsayısı değerleri vermektedir. %1 ve % 2 ilave edilmiş numunelerde aşınma miktarları sırasıyla % 13 ve % 16,18

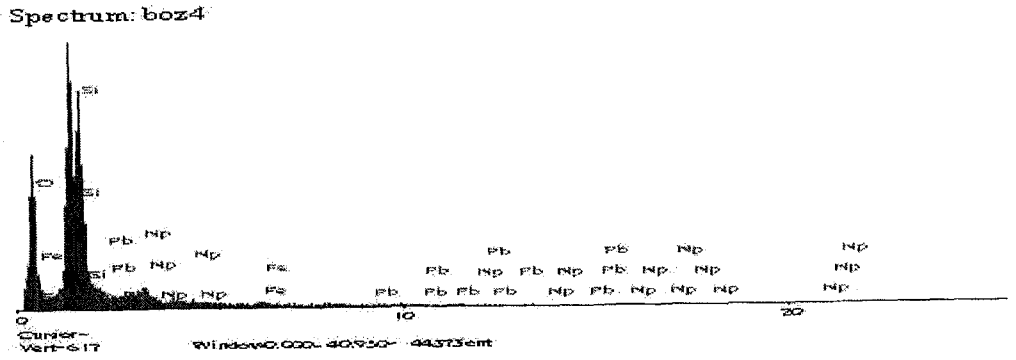
değerlerindedir. Bu numunelerin de sürtünme katsayıları düşük çıkmıştır. % 4 SiO_2 ilaveli numunenin aşınma miktarı % 21'dir, ancak sürtünme katsayısı 0.354 olarak tespit edilmiştir ki oldukça iyi bir sonuçtur.

Şekil 7.5'de görüldüğü gibi SiO_2 miktarının artmasına bağlı olarak aşınma miktarı artmıştır. Stachowiak ve Batchelor(48) çalışmalarında aşınan metalin sertliği (Hm) ile aşındırıcı diskin sertliği arasındaki oranın (Ha) aşınmada bir kriter olduğunu ortaya koymuşlardır. Hm/Ha < 0.8 ise metalde aşırı kazıma aşınmasının meydana geldiği rapor edilmiştir.

Deneylerde kullanılan aşındırıcı disk'in sertliği 280 Hv ve deney numunelerinin sertliği ise ortalama 65 Hv' olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla balata numunesinin disk sertliğine oranı yaklaşık 0.21dir. Buradan da görülebileceği gibi yüksek bir aşınmanın olması ve abrasiv türü bir aşınmanın olması doğaldır. SiO_2 miktarının artması ile aşınma miktarındaki artışın sebebi ise, SiO_2 miktarının artmasına bağlı olarak numunelerdeki gözeneklerin artması ve aşınma esnasında bu gözeneklerden daha çok partikül kopması olarak düşünülebilir. Resim 7.2'de aşınmanın türü ve aşınma miktarı daha iyi görülmektedir. Şekil 7.6 ve 7.7'de ise A4 numunesinden alınan nokta analiz sonuçları görülmektedir.



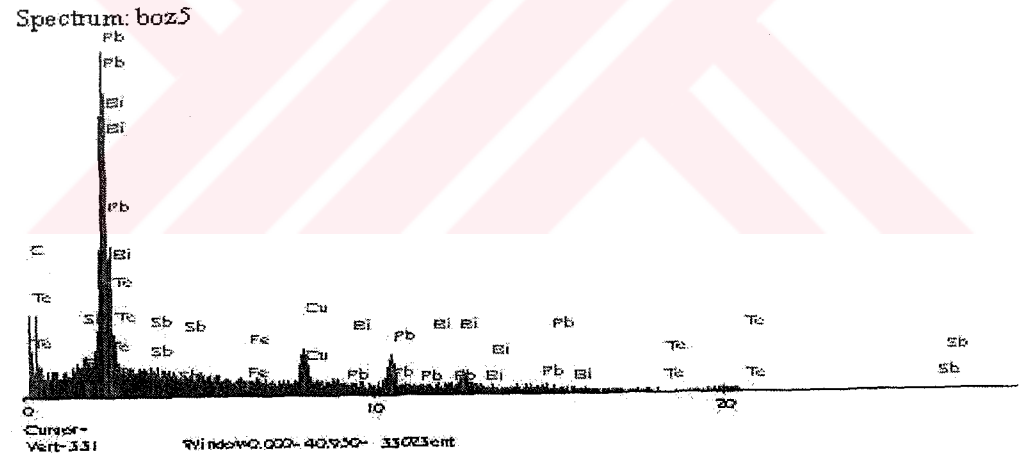
Resim 7.2. Artan SiO_2 miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri (A1, A2, A3, A4 resimleri BSE görüntüsü) ve (A1-1, A2-1, A3-1, A4-1 resimleri SE görüntüsü).



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
O	Ka	299.25	0.000	wt.%	
Si	Ka	500.73	68.295	wt.%	
Fe	Ka	7.35	3.314	wt.%	
Pb	La	3.50	28.391	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.6. A4 numunesinde 1 rakamı ile gösterilen (siyah bölgeler) bölgelerden alınan nokta analiz sonucu



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
C	Ka	70.02	0.000	wt.%	
O	Ka	15.53	0.000	wt.%	
Si	Ka	3.14	0.181	wt.%	
Fe	Ka	4.92	0.603	wt.%	
Cu	Ka	56.51	10.870	wt.%	
Pb	La	42.17	88.346	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.7. A4 numunesinde 2 rakamı ile gösterilen (beyaz bölgeler) bölgelerden alınan nokta analiz sonucu.

Resim 7.2 incelendiğinde (A1-1, A2-1, A3-1, A4-1), 3 numaralı noktadan (gri tondaki bölgeler)alınan bölgeler matris (Cu,Sn), 1 numaralı bölgeden alınan siyah noktalar (Şekil 7.6) SiO_2 ve 2 numaralı bölgeden alınan beyaz noktalar (Şekil 7.7) ise büyük bir oranda Pb olduğu görülmektedir.

Resim 7.2 deki BSE görüntülerinden, A1 numunesinde daha çok kaymaya bağlı bir aşınmanın olduğu, ancak yer yer küçük adacıklar halinde yapışma (adhesiv) aşınmalarının olduğu görülmektedir. Bu da hem sürtünme katsayısında, hem de aşınma miktarının düşük çıkmasına sebep olmuştur. Diğerlerinde ise (A2, A3 ve A4) SiO_2 miktarındaki artışa bağlı olarak daha çok yapışma aşınmalarının olduğu görülebilir. Bu yapışma noktaları sürtünme katsayısındaki artışın sebebi olarak düşünülür.

Bu yapı (Resim 7.2), çoğu çok küçük aşınma partikülleri ve yer yer yırtılmaların olduğu ve ayrıca kopan partiküllerin dışarı atılmasına fırsat kalmadan balata yüzeyine yapışan yamalardan meydana geldiği görülür. Bir fren balatasının fonksiyonel yapısı iki bileşen tarafından meydana gelir. Birisi, oldukça yumuşak bir matris (Resim 7.2. gri bölgeler, bakır, kalay, kurşun ve demir gibi), diğeri ise bu matris içerisindeki küçük ve sert partiküllerdir (Şekil 7.2 siyah noktalar SiO_2 gibi).

Frenleme başladığında (sürtünme başladığında) disk ve aşınma partikülleri üreten yumuşak matris (balata) arasında bir temas oluşur. Bu aşınma partikülleri temas yüzeyine oldukça homojen bir şekilde dağılır. Bu partiküller kısmen disk yüzeyine yapışırlar, bazen de balata temas yüzeyinin içine gömülürler. Literatürde (78,79,82,) bu durumu, sürtünme kuvveti ve sürtünme yüzeyindeki ısı artışından dolayı düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozların ergiyerek sert olan SiO_2 partikülleri ile bir mekanik alaşım meydana getirdiği şeklinde yorumlanır.

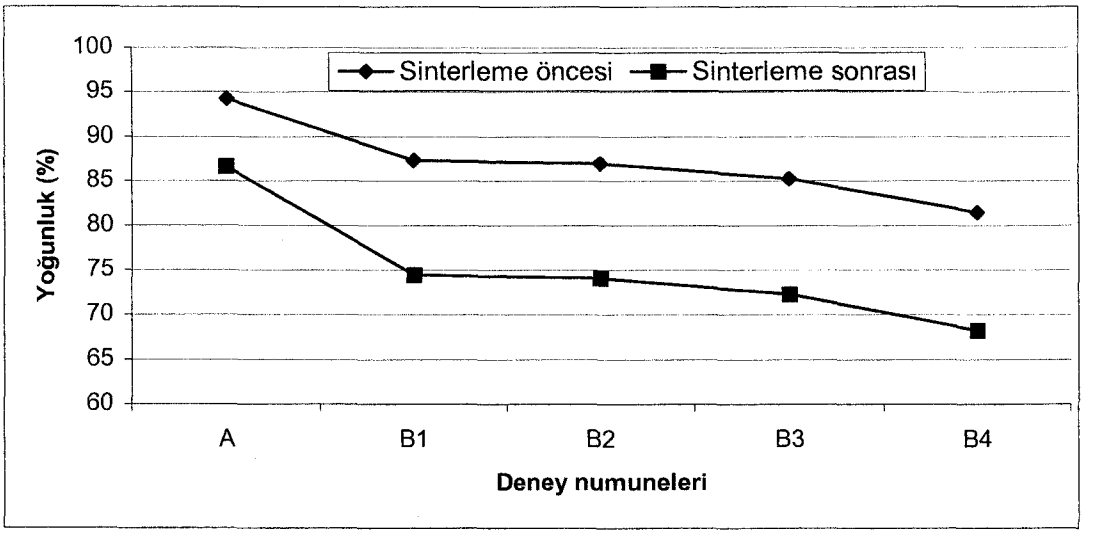
Bu yamalar ya parçalanarak sürtünme yüzeyinden dışarı atılır yada sürtünme yüzeyinde büyürler. Bu durumda temas yüzeyi artığından A4 numunesinde görüldüğü gibi sürtünme katsayısı da artar.

7.2. Alümina'nın (Al_2O_3) Etkisi

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye değişik oranlarda ilave edilen Al_2O_3 ilavesi ile hazırlanan numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları, aşınma öncesi ve sonrası sertlikleri, sürtünme-aşınma deneyi sonucundaki aşınma miktarları (% ağırlık) ve aşınma süresinde belirlenen ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 7.4 de verilmiştir. Ayrıca değişen Al_2O_3 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi Şekil 7.8.'de, sinterlenmiş numunelerden alınan EDS analiz sonucu Şekil 7.9'da, aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi ise Şekil 7.10'da görülmektedir.

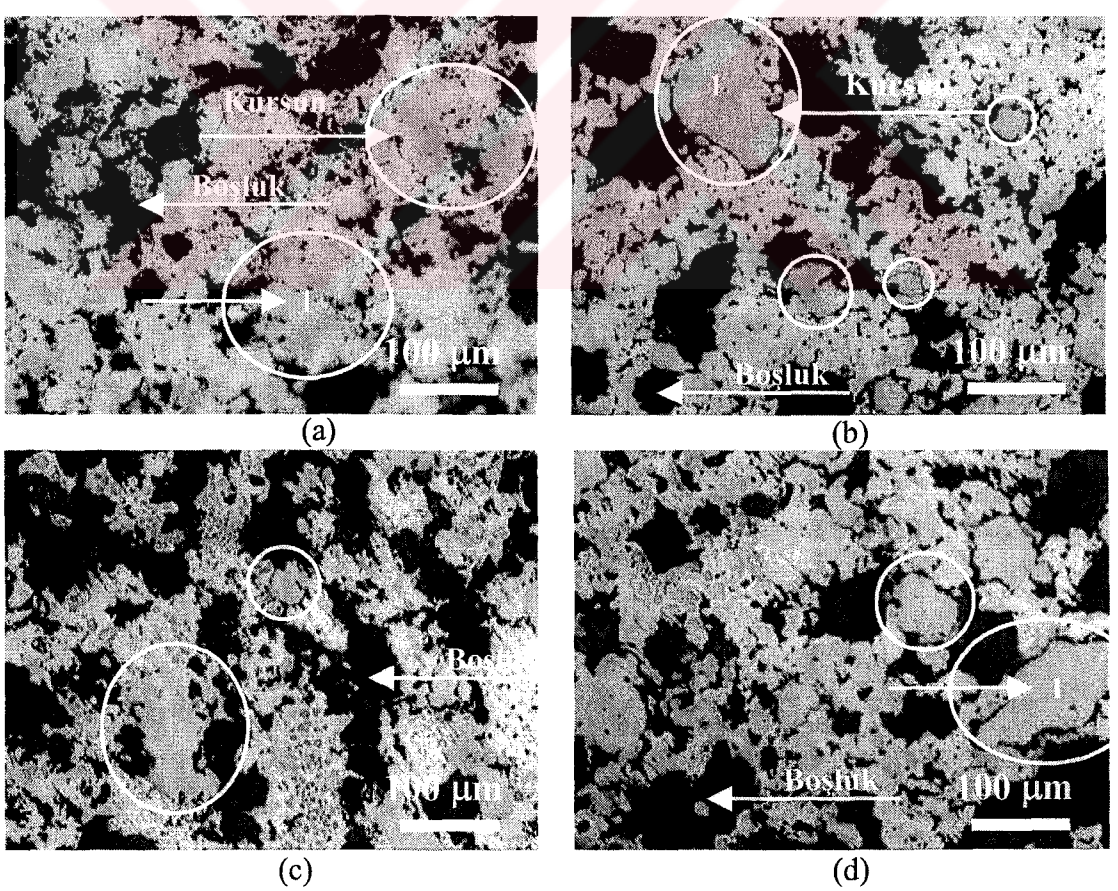
Çizelge 7.4. Ana malzeme ve Alüminyum oksit bileşiminin karakterizasyon sonuçları

Test Numunesi	Yoğunluk – (%)		Sertlik (HV1)		Aşınma miktarı % ağırlık	Ortalama Sürtünme katsayısı (μ)	
	Sinter Öncesi	Sinter sonrası	Aşınma öncesi	Aşınma sonrası		Soğuk	Sıcak
Ana malzeme (A)	94,22	86,60	55,3	104	22,46	0,24	0,22
B1=A+ % 0.5 Al_2O_3	87,35	74,02	72,3	85,1	17,26	0,19	0,21
B2= A+ % 1.0 Al_2O_3	86,95	74,45	73,0	80,2	15,77	0,21	0,23
B3= A+ % 2.0 Al_2O_3	85,19	72,24	70,4	75,3	14,60	0,27	0,27
B4= A+ % 4.0 Al_2O_3	81,42	68,19	68,3	74,6	14,15	0,39	0,36



Şekil 7.8. Değişen Al_2O_3 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi

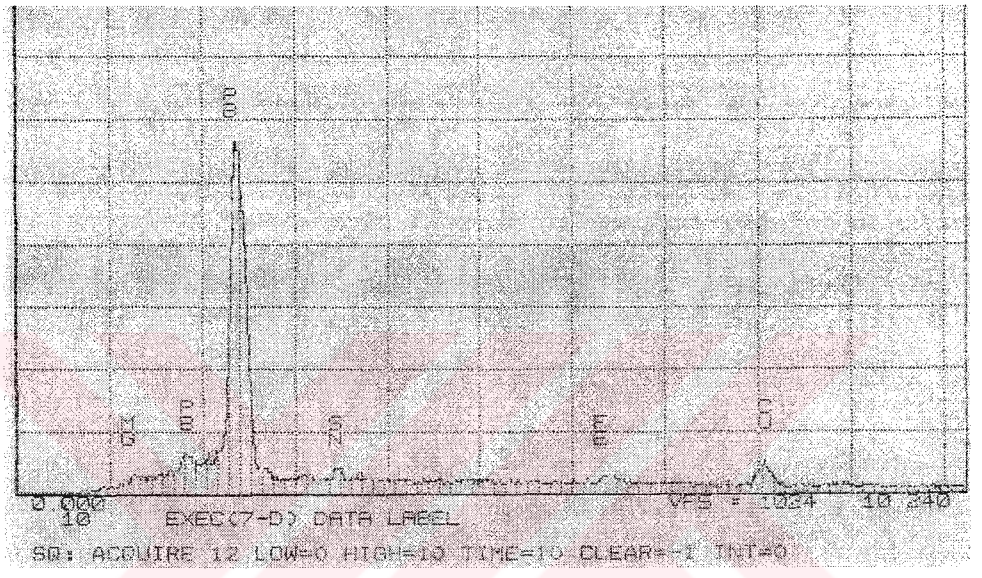
Şekil 7.8'de Al_2O_3 miktarının artmasına bağlı olarak sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluklarda düşme olduğu gözlenmiştir. Sinterleme öncesi yoğunlukların düşmesinin sebebi, Resim 7.3'den görüldüğü gibi Al_2O_3 tozunun bronz esaslı tozların sıkıştırılabilirlik özelliğini azaltmasına bağlı olarak gözenek miktarı ve boyutunun artmış olmasındandır. Bu da daha düşük yoğunlukta bir malzeme elde edilmesine sebep olmaktadır. Ayrıca yoğunluktaki bu düşüşün sebebinin, Al_2O_3 tozunun metal tozlarına göre oldukça düşük yoğunlukta olmasının da etkisi vardır. Sinterleme sonrası yoğunlukların düşmesi ise, sinterleme esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozlarının (Pb,Sn) bir kısmı buharlaşarak yapıyı terk ederken hala yapı içerisinde sıvı halde bulunan elementlerin boşluklara girerek gözeneklerin kapanmasını engellediği gözlenmiştir (Resim 7.3). Boşluklara dolan kurşunun malzeme içerisinde meydana getirdiği gerilimden dolayı, malzemelerin hacimce genişlemeleri de (Çizelge 7.5.) sinterleme sonrası yoğunlukları düşürmüştür.



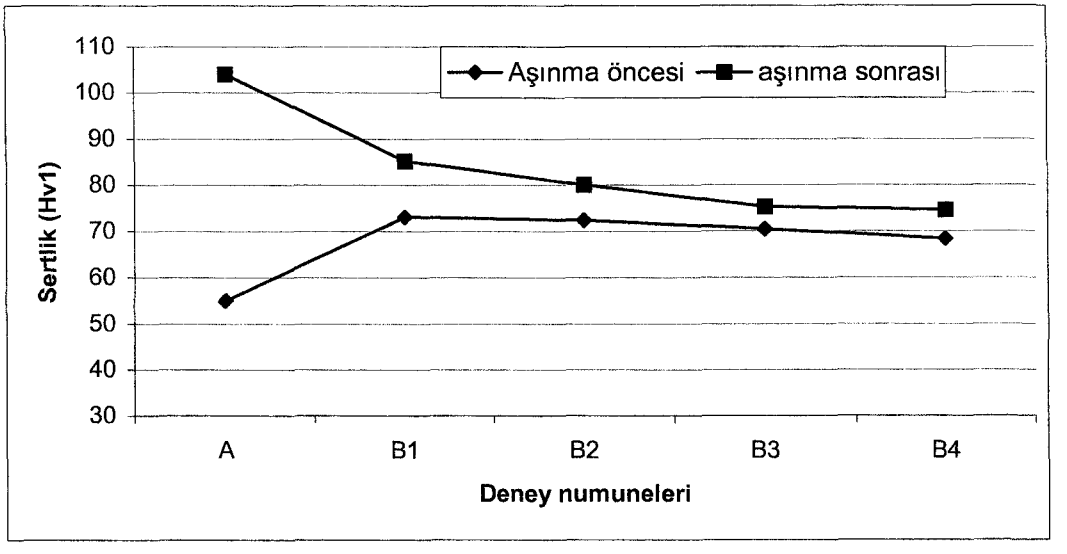
Resim 7.3. Al_2O_3 artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim. a) % 0.5 Al_2O_3 sinterleme öncesi, b) % 0.5 Al_2O_3 sinterleme sonrası, c) % 4 Al_2O_3 sinterleme öncesi ve d) % 4 Al_2O_3 sinterleme sonrası

Çizelge 7.5. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış

Numune	Ağırlık Kaybı (%)	Hacim Artışı (mm^3)
B1	0,046	10,01
B2	0,044	10,45
B3	0,043	10,50
B4	0,043	10,60



Şekil 7.9. Sinterleme sonrası % 4 Al_2O_3 numunesinde 1 rakamı ile gösterilen bölgeden alınan EDS sonucu.



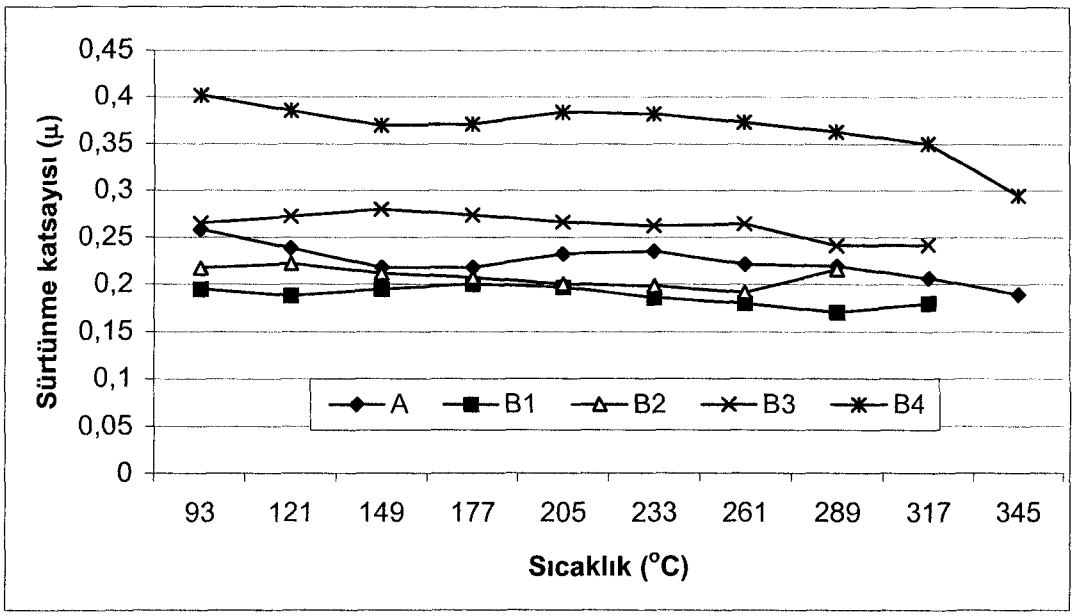
Şekil 7.10. Değişen Al_2O_3 oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi

Şekil 7.10. incelendiğinde B kodlu numunelerin sertliği A numunesinin aşınma öncesi sertliğine göre daha yüksek bulunmuştur. Seramiklerin sertliği göz önüne alındığında bu durum normal bir sonuç olarak görülüyor. Diğer taraftan, Al_2O_3'nın toz boyut analizi incelenirse ortalama toz boyutunun 60 μm olduğu görülür. B numunelerinin sertliklerinin yüksek çıkması toz boyutunun büyük olması ile açıklanabileceği düşünülebilir. Ancak aşınma sonrası sertlikler incelendiğinde A kodlu numunenin sertliğinin yaklaşık % 100 arttığı görülmektedir. Bu sonuç, sürekli ısınıp soğuyan ve zaman zaman su ile temas halinde olan malzemeler için iyi bir sonuç değildir. Bu artışın sebebi, sürtünme-aşınma esnasında metal tozlarının seramiklere göre daha kolay deforme olabilmeleri ile açıklanabilir. B numunelerinde ise aşınma sonrası sertliklerin Al_2O_3 miktarındaki artışa bağlı olarak daha az değiştiği görülür. Bunun sebebi ise, Al_2O_3 tozlarının artışına bağlı olarak sürtünme esnasında numunelerin deforme olmalarını engelleyen bir etken olarak düşünülebilir.

Yapılan deneylerde ikinci yorma (second fade) işlemi esnasında sıcaklık ve zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim Çizelge 7.6. de ve Şekil 7.11'de verilmiştir. Şekil 7.12'de ise deneyler sonucunda ölçülen aşınma miktarları verilmiştir.

Çizelge 7.6. Numunelerin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri

	Döngü	Sıcaklık (°C)	Hız (Dev/dak)	Yük (Kgs)	Sürtünme kuvveti (Kgs)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Zaman (Saniye)
A	1	94	420	69.6	17.9	0.258	10
	1	121	419	69.1	16.4	0.238	39
	1	149	420	68.8	15.0	0.218	80
	1	177	420	68.9	15.0	0.218	115
	1	205	420	69.0	16.0	0.232	166
	1	232	421	68.8	16.2	0.235	184
	1	260	422	69.0	15.3	0.221	234
	1	288	420	68.6	15.1	0.219	298
	1	316	419	68.9	14.2	0.206	382
	1	344	421	68.2	12.9	0.189	508
	Ortalama		420	68.9	15.4	0.224	
B1	1	93	419	67,5	13,2	0,195	22
	1	121	418	67,8	12,8	0,188	84
	1	149	417	68,2	13,3	0,195	144
	1	177	418	67,6	13,5	0,200	203
	1	204	419	68,3	13,4	0,197	264
	1	232	419	67,9	12,6	0,186	328
	1	260	419	68,2	12,3	0,800	410
	1	288	419	68,4	11,6	0,170	514
	Ortalama		419	68,0	12,8	0,189	
B2	1	95	416	68,6	14,9	0,217	4
	1	122	418	68,0	15,1	0,222	52
	1	149	418	68,6	14,6	0,212	120
	1	177	418	68,4	14,1	0,207	164
	1	205	418	68,4	13,7	0,200	278
	1	232	419	68,1	13,5	0,198	342
	1	260	419	68,8	13,1	0,191	418
	Ortalama		418	68,4	14,1	0,207	
B3	1	93	422	68,7	18,2	0,265	13
	1	121	422	67,9	18,5	0,272	60
	1	149	423	68,6	19,2	0,280	114
	1	177	422	68,1	18,6	0,274	167
	1	205	422	67,7	18,0	0,266	214
	1	233	423	68,6	18,0	0,262	271
	1	261	422	68,4	18,1	0,264	329
	1	288	423	67,9	16,4	0,241	413
	1	316	423	68,0	16,4	0,242	484
	Ortalama		422	68,6	17,6	0,268	
B4	1	93	410	68,0	27,3	0,402	19
	1	121	411	67,7	26,1	0,385	52
	1	149	410	67,8	25,1	0,370	86
	1	177	410	67,9	25,2	0,371	123
	1	205	411	68,1	26,1	0,384	163
	1	232	410	68,1	26,0	0,382	208
	1	260	410	68,8	25,6	0,373	260
	1	288	411	67,9	24,6	0,363	316
	1	316	411	67,9	23,8	0,350	392
	1	343	411	68,0	20,0	0,295	516
	Ortalama		411	68,0	25,0	0,367	

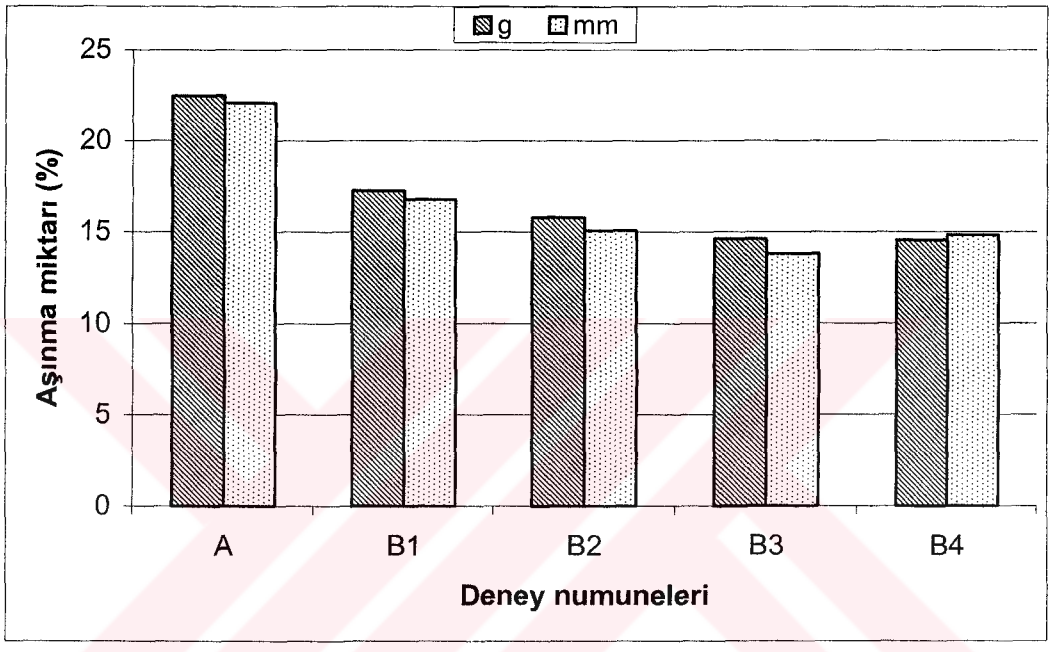


Şekil 7.11. Değişen Al_2O_3 miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim

Şekil 7.11 incelendiğinde 93-345 ^{0}C sıcaklık aralığında en düşük sürtünme katsayısı değerini (0.195-0,170) B1 numunesi verirken, en yüksek sürtünme katsayısı değerini (0,402-0,362) ise B4 numunesi vermiştir. Genelde bütün numunelerde sürtünme katsayısı, sıcaklıktaki artmaya bağlı olarak kararlı bir şekilde devam etmiştir. Ancak B4 numunesi 317 ^{0}C'ye kadar kararlı bir seyir izlerken, bu sıcaklıktan sonra ani olarak 0,350 den 0,295 e düşmüştür (Çizelge 7.6). benzer bir çalışmayı Ravikiran ve arkadaşları çalışmışlardır (83). Bu çalışmada kaymaya bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimi incelemişlerdir. Kaymanın ilk 10 metresinde sürtünme katsayısı lineer olarak artarken 40 metreden sonra kararlı bir değere ulaştığını ve bu noktadan sonra ani bir düşüşün olduğunu belirtmişlerdir. B4 numunesinde 317 ^{0}C'den sonraki ani düşüşün literatürle benzer bir davranış gösterdiği görülebilir. Bu noktadaki sürtünme katsayısındaki düşüşün sebebi, düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozlarına atfedilebilir.

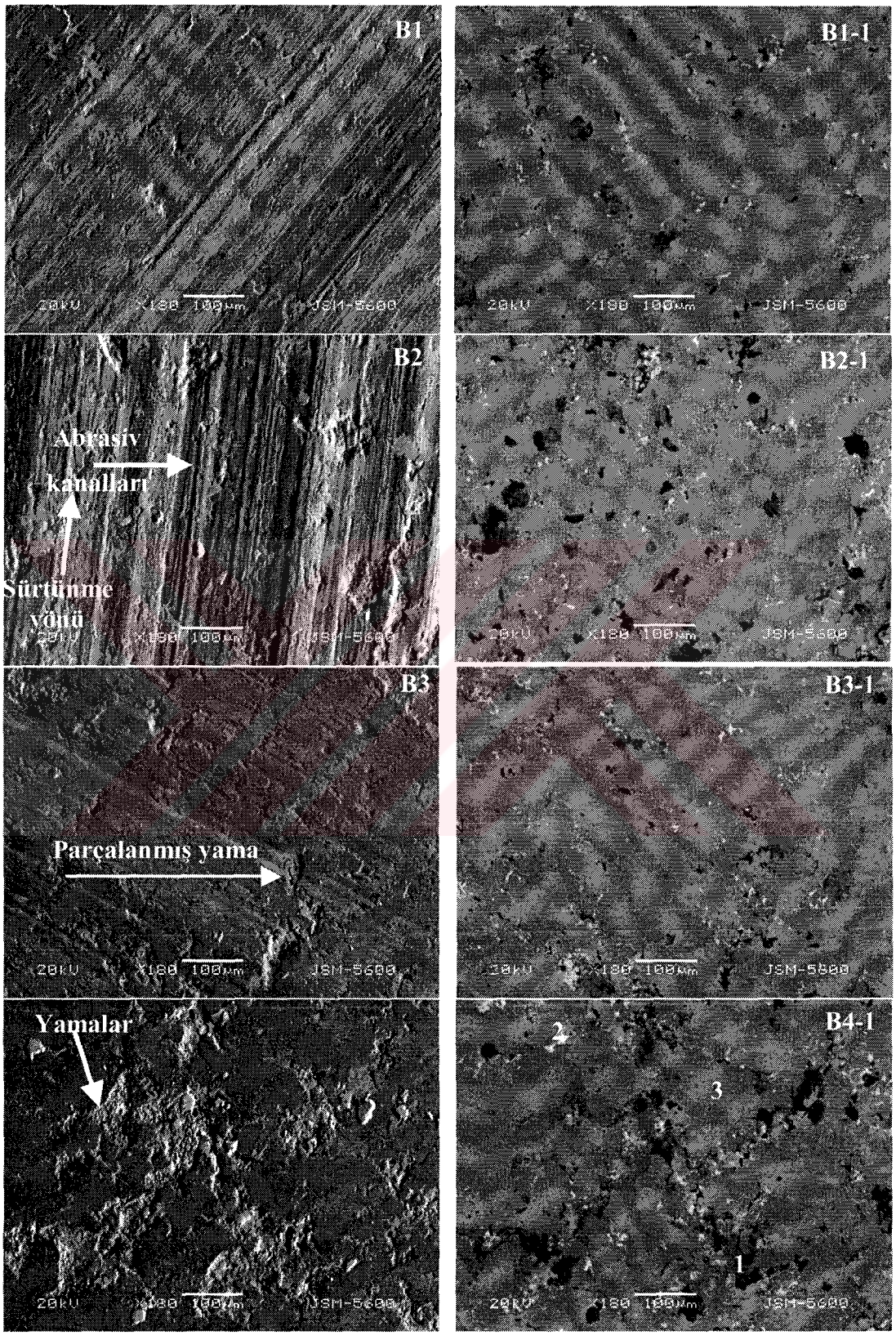
Şekilde sürtünme katsayısındaki kararlı durumu ise, Wirth (81) ve Eriksson (84) sürtünme yüzeyinde oluşan yamalarla açıklamışlardır. Üçüncü madde (temas bölgesinde meydana gelen yamalar) yüzeyi, tribolojik çiftlerin birleşmiş

parçalarından farklı görünüşte olabilirler. Yüzey tabakası hem tribo oksidasyon üretebilir, hem de sürtünme malzemelerinin tam veya benzeri kompozisyonlarını içerebilirler. Yoğun aşınma partikülleri tarafından sürtünme filimi diye adlandırılan oluşum (yama), frenleme boyunca şekilde görüldüğü gibi sürtünme katsayısının kararlı kalmasını sağladığı düşünülebilir.

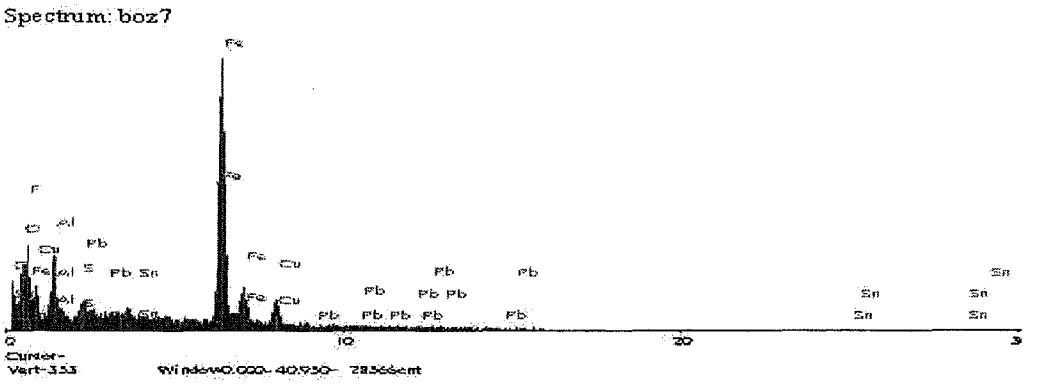


Şekil 7.12. Değişen Al_2O_3 miktarına göre aşınma miktarındaki değişim

Şekil incelendiğinde, A numunesinin deney boyunca meydana gelen aşınma miktarı % 23 iken, B numunelerinde bu değer % 15 civarlarındadır. Bu değer A numunesine göre B numunelerinin yaklaşık % 70 bir aşınma dayanımının olduğunu göstermektedir. B numunelerinin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Resim 7.4'de verilmiştir. Şekil 7.13 ve 7.14'de ise B4 numunesinden alınan analiz sonuçları görülmektedir.



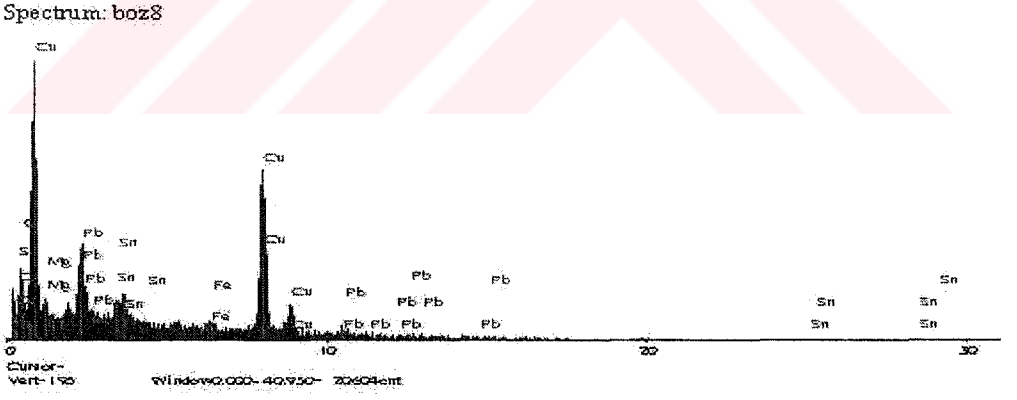
Resim 7.4. Artan Al_2O_3 miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri (B1, AB, B3, B4 resimleri BSE görüntüsü) ve (B1-1, B2-1, B3-1, B4-1 resimleri SE görüntüsü).



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
C	Ka	53.29	0.000	wt.%	
O	Ka	72.75	0.000	wt.%	
Al	Ka	85.40	8.060	wt.%	
Fe	Ka	569.93	68.799	wt.%	
Cu	Ka	47.91	11.818	wt.%	
Sn	La	5.99	1.240	wt.%	
Pb	La	4.02	10.082	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.13. B4-1 numunesinde 1 numaralı notadan (siyah renkli bölgelerden) alınan analiz sonucu



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
O	Ka	30.10	0.000	wt.%	
Al	Ka	1.42	0.233	wt.%	
Fe	Ka	6.88	1.276	wt.%	
Cu	Ka	202.82	70.886	wt.%	
Sn	La	12.98	5.463	wt.%	
Pb	La	5.86	22.141	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.14. B4-1 numunesinde 2 numaralı noktadan (beyaz renkli bölgelerden) alınan analiz sonucu

Resim 7.4 incelendiğinde (B1-1, B2-1, B3-1, B4-1), 3 numaralı nokta ile belirtilen gri tondaki bölgeler matris (Cu,Sn,Fe), 1 numaralı nokta ile belirtilen siyah bölgeler (Şekil 7.13) Al_2O_3 ile Fe'den meydana gelen bir kompozisyon ve 2 numara ile belirtilen beyaz noktalar (Şekil 7.14) ise % 70 Cu ve % 22 oranında Pb olduğu görülmektedir. Gerçekte numunelerin içerisindeki Pb oranı % 8,5 olmasına rağmen, analiz sonuçlarında bu oran % 22 olarak görülüyor. Bu sonuç, numunelerin aşınması esnasında Pb'nin yüzeyde yoğunlaşması sonucu oluşur. Fe'nin yüksek oranda çıkması ise, diskten kopan parçacıkların sürtünme yüzeyinden atılamayan ve balata numunesine yamanan parçacıklar olarak düşünülebilir.

Resim 7.4 teki SEM görüntülerinden, B1 numunesinde daha çok kaymaya bağlı bir aşınmanın olduğu, ancak yer yer küçük adacıklar halinde yapışma (adhesiv) aşınmaların olduğu görülmektedir. B2 ve B3 numunelerinde kaymadan çok abrasiv türü bir aşınmanın olduğu görülür. B4 numunesinde ise adhesiv bir aşınmanın olduğunu görmek mümkündür. B1 numunesinde temas yamalarının oluşmama sebebi alaşım yapacak yeterli sert partiküllerin (Al_2O_3) bulunmaması olarak düşünülmektedir.

Balata numunelerinin üzerindeki temas yamaların boyutları (Resim 7.4) yaklaşık olarak 10 ila 500 μm boyutlarındadır. Eriksson (84) tarafından da benzer bir çalışma yapılmış ve o da temas yamalarının ortalama boyutlarının 50 ila 430 μm boyutlarında olduğunu belirtmiştir. Genellikle, temas yamalarının ortalama boyutları sürtünme kuvvetinin artmasına bağlı olarak artmaktadır. Oysa, Holm-Archard aşınmanın yüke bağımlı olduğunu kabul eder. Çizelge 7. 6 incelenirse, Al_2O_3 miktarının artmasına bağlı olarak sürtünme kuvvetinin arttığı ve buna paralel olarak da sürtünme katsayısındaki artış açıkça görülmektedir. Resim 7.4 te B4 numunesine bakılacak olursa temas yamalarının diğer numunelere göre daha çok büyüdüğü görülecektir. Bu temas yamaları tüm balata yüzeyinin yaklaşık % 25'ini kaplamaktadır. Ravikiran'a göre (83) ise bu gerçek temas alanının sadece yüke bağlı olduğu ve temas yüklerini taşıyan temas noktalarının plastik olarak deforme olduğu bir başka varsayımdır. Gerçekte, sadece akma gerilimini aşan temastaki asperitiler plastik deformasyona,

diğerleri ise elastik deformasyona uğradığı kabul edilir. Ayrıca Kapoor (85) tarafından metallerin de temas noktalarında elastik deformasyon olduğu kadar plastik deformasyona da uğradığı kabul görmüştür.

Elastik olarak deforme olan asperitilerin sayısı, yükün büyük bir bölümünü taşırken, temas noktalarının sayısının yüke bağlı olduğu ve görünür temas alanından bağımsız olduğu düşünülür. Bu yüzden plastik temasların toplam sayısı ve aşınma oranı görünür basınçla orantılı olmalıdır. Dolayısıyla, Resim 7.4. incelenirse Al_2O_3 miktarının artmasına bağlı olarak numune yüzeyinde büyüyen asperitilerin hem sürtünme katsayısını artırdığı hem de malzemelerin aşınma direncini artırdığı düşünülebilir.

7.3. Sepiolit'in Etkisi

Sepiolit, magnezyum dihidrosilikattan ibaret bir kil minerali olup, ideal formülü, $Mg_8Si_{12}O_{30}(OH)_4(OH_2)_4$ $8H_2O$ şeklindedir. Araziden alınan kahverengi sepiolit numuneler üzerinde yapılan kimyasal analiz sonucu elde edilen değerler Çizelge 7.7'de verilmiştir (86).

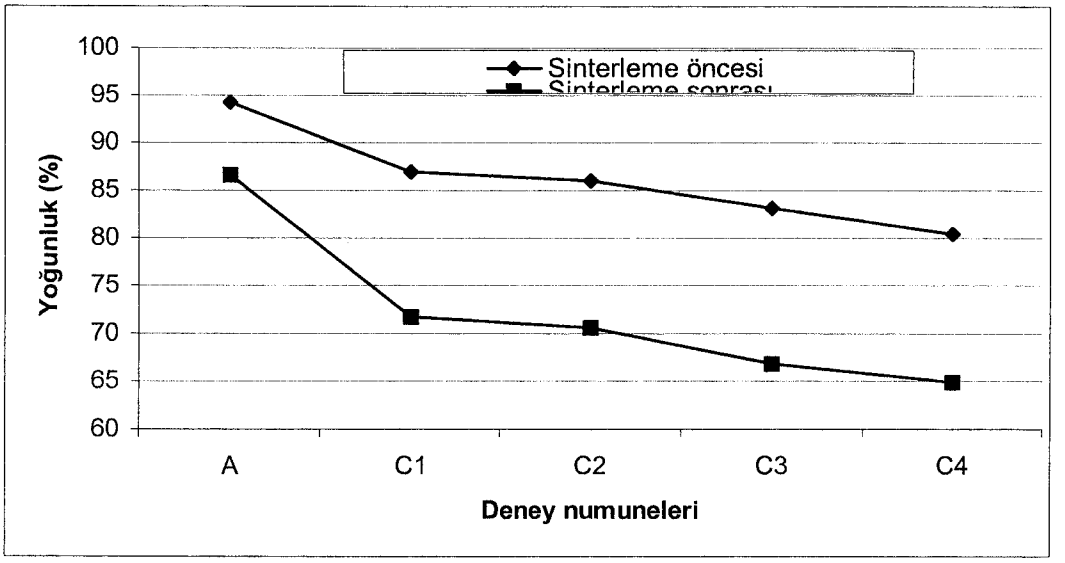
Çizelge 7.7. Kahverengi sepiolitin kimyasal analiz Değerleri (% ağırlık olarak).

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	K_2O	Ateş kaybı
50,05	1,17	6,00	25,5	0,49	0,12	0,05	0,17	16,86

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye değişik oranlarda ilave edilen sepiolit ilavesi ile hazırlanan numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları, aşınma öncesi ve sonrası sertlikleri, sürtünme-aşınma deneyi sonucundaki aşınma miktarları (% ağırlık) ve aşınma süresinde belirlenen ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 7.8'de verilmiştir. Ayrıca değişen sepiolit oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi Şekil 7.15'de, sinterlenmiş numunelerden alınan EDS analiz sonucu Şekil 7.16'da, aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi ise Şekil 7.17'de görülmektedir.

Çizelge 7.8. Ana malzeme(A) ve sepiolit bileşiminin karakterizasyon sonuçları

Test Numunesi	Yoğunluk (%)		Sertlik (HV_1)		Aşınma miktarı %	Sürtünme katsayısı (μ)	
	Sint.öncesi	Sinter sonra	Aşınma öncesi	Aşınma sonrası		Soğuk	Sıcak
Ana malzeme (A)	94,22	86,60	55,3	104	22,46	0,24	0,22
C1= A+ % 0.5 Al_2O_3	86,91	71,75	61,8	82,2	10,81	0,20	0,22
C2= A+ % 1.0 Al_2O_3	86,01	70,60	60,4	72,8	10,19	0,27	0,25
C3= A+ % 2.0 Al_2O_3	83,10	66,81	60,0	69,4	12,88	0,31	0,29
C4= A+ % 4.0 Al_2O_3	80,34	64,86	57,4	63,3	27,72	0,48	0,38

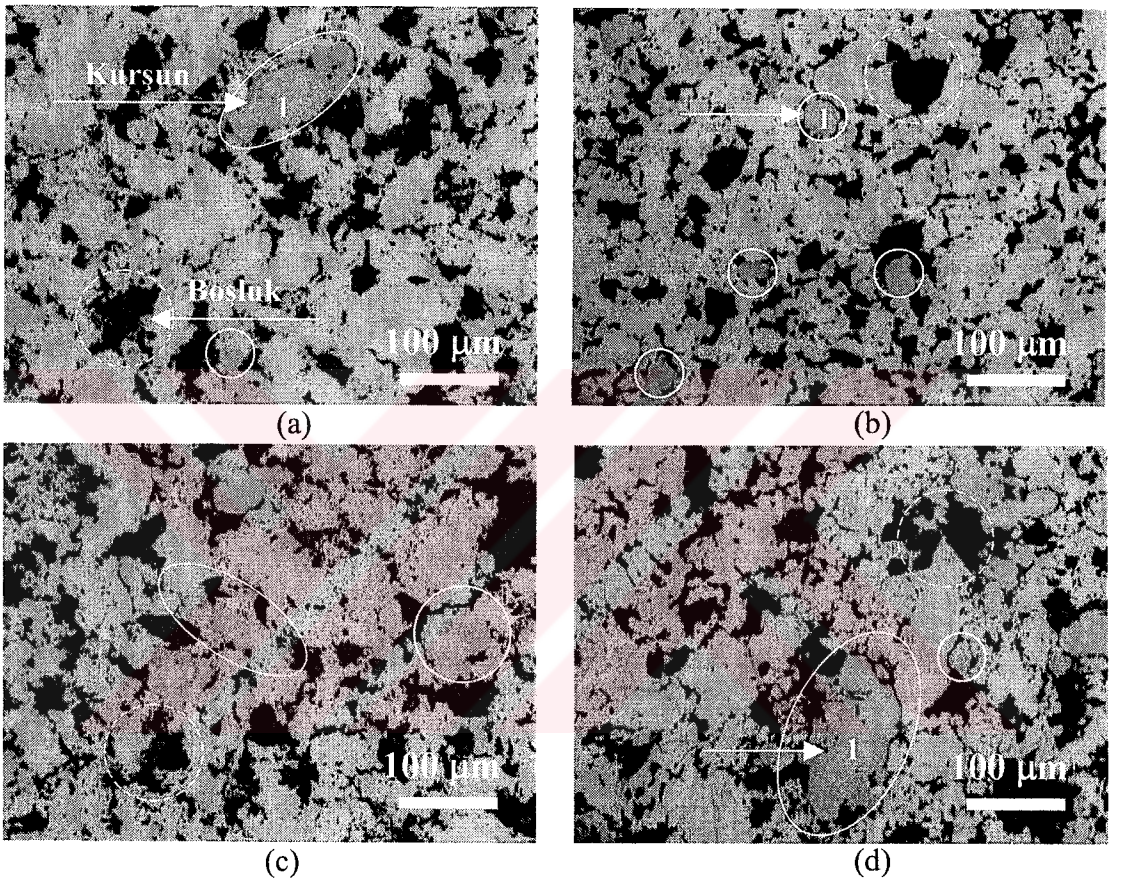


Şekil 7.15. Değişen sepiolit oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi

Şekil 7.15'de sepiolit miktarının artmasına bağlı olarak sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluklarda düşme olduğu gözlenmiştir. Sinterleme öncesi yoğunlukların düşmesinin sebebi, Resim 7.5'den görüldüğü gibi sepiolit tozunun bronz esaslı tozların sıkıştırılabilirlik özelliğini azaltmasına bağlı olarak gözenek miktarı ve boyutunun artmış olmasındandır. Bu da daha düşük yoğunlukta bir malzeme elde edilmesine sebep olmaktadır. Ayrıca yoğunluktaki bu düşüşün sebebinin, sepiolit tozunun metal tozlarına göre oldukça düşük yoğunlukta olmasının da etkisi vardır. Sinterleme sonrası yoğunlukların düşmesi ise sinterleme esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozlarının (Pb,Sn) bir kısmı buharlaşarak yapıyı terk ederken hala yapı içerisinde sıvı halde bulunan elementlerin boşluklara girerek gözeneklerin kapanmasını engellemektedir (Resim 7.5). Boşluklara dolan kurşunun malzeme içerisinde meydana getirdiği gerilimden dolayı, malzemelerin hacimce genişlemeleri de sinterleme sonrası yoğunlukları düşürmüştür (Çizelge 7.9).

Sepiolit yaklaşık olarak % 20 civarında su ihtiva ettiğinden, numunelerin sinterleme esnasında su kaybından dolayı yoğunluklarda azda olsa bir düşüş olabilir. Arık ve arkadaşları [86] kahve rengi sepiolitte sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen kayıpları ve yapısal dönüşümleri incelemişlerdir. Kahverengi sepiolitin ısıtma ile 250 ^{0}C'ye

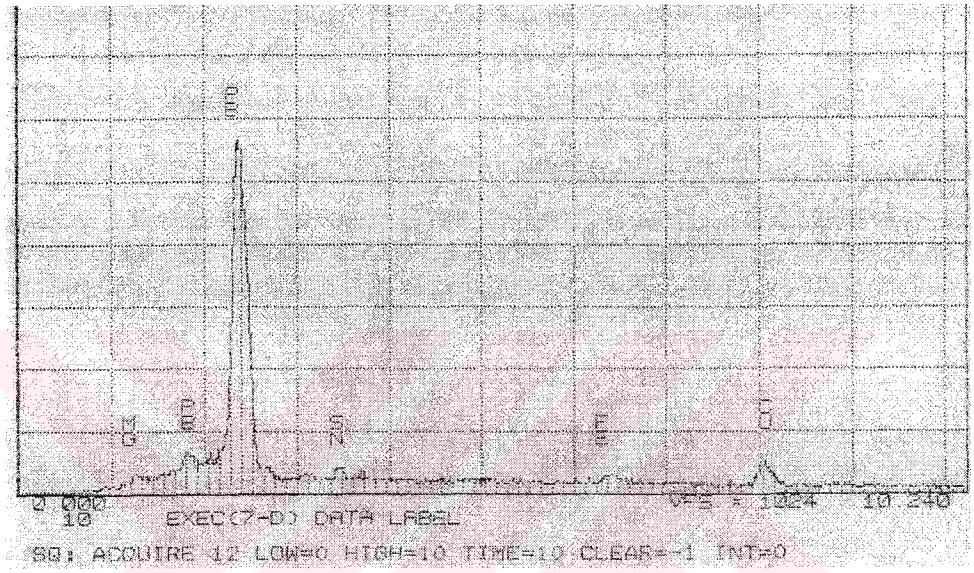
kadar zeolitik suyunu, 250-450 ^{0}C arasında kristal suyunu, ve 450-850 ^{0}C arasında ise bünye suyunu kaybettiği tespit edilmiştir. Arık'a göre (86) bu sıcaklığa kadar ısıtılan sepiolitin su kaybı yaklaşık olarak % 23'tür. Dolayısıyla yoğunluk düşmesinde bir etkisinin olabileceği düşünülebilir.



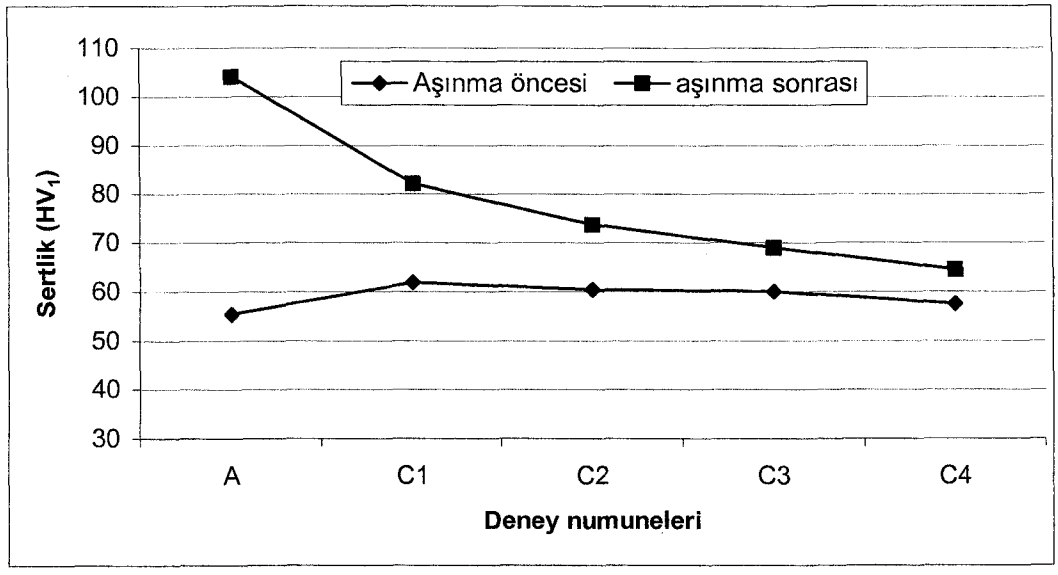
Resim 7.5. Sepiolit artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim. a) Sinterleme öncesi % 0.5 Sepiolit, b) Sinterleme sonrası % 0.5 Sepiolit, c) Sinterleme öncesi % 4 Sepiolit ve d) Sinterleme sonrası % 4 Sepiolit

Çizelge 7.9. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış

Numune	Ağırlık Kaybı g (%)	Hacim Artışı g/cm^3
C1	0,021	9,30
C2	0,023	9,45
C3	0,024	9,48
C4	0,023	9,50



Şekil 7.16. Sinterleme sonrası % 4 sepiolit numunesinde 1 rakamı ile işaretli bölgeden alınan EDS sonucu.



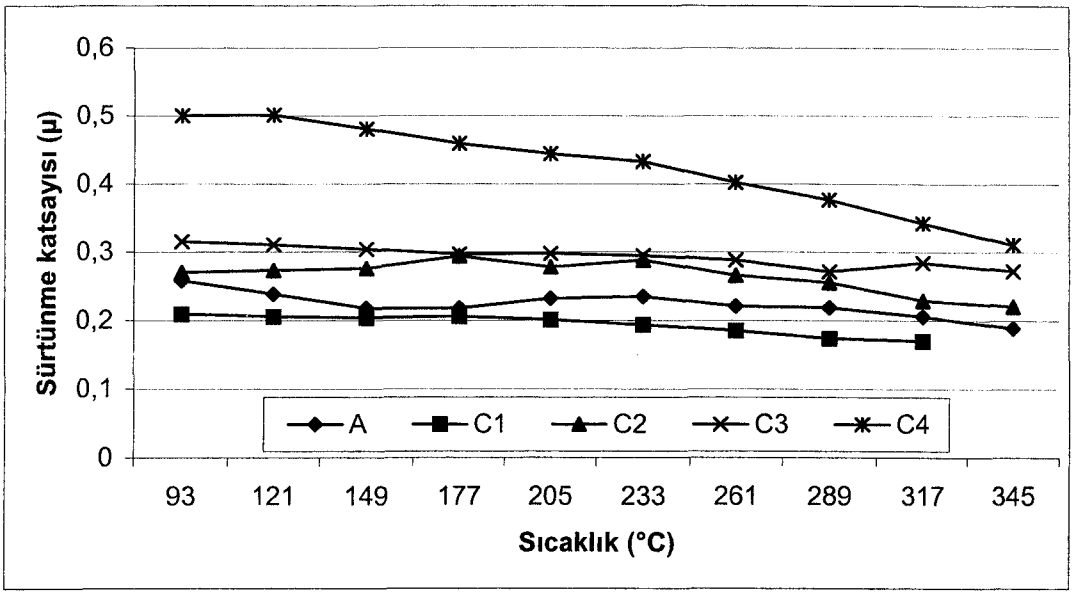
Şekil 7.17. Değişen sepiolit oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi

Şekil 7.17. incelendiğinde A kodlu numuneye % 0.5 oranında sepiolit ilavesi numunenin sertliğinde yaklaşık % 7 lik bir artış sağlamıştır. Bu orandan sonra sepiolit miktarındaki artışa bağlı olarak sertliklerde küçük bir düşüş görülmektedir. bu sonuç Şekil 7.15'teki yoğunluk düşmesine atfedilebilir. Diğer taraftan, sepiolit'in toz boyut analizi incelenirse ortalama toz boyutunun 10 μm olduğu görülür. C numunesinin toz boyutunun küçük olması A numunesinin sertliği üzerinde çok fazla etkili olmadığının bir göstergesi olarak düşünülebilir. Ancak aşınma sonrası sertlikler incelendiğinde A kodlu numunenin sertliğinin yaklaşık % 100 arttığı görülmektedir. Bu sonuç, sürekli ısınıp soğuyan ve zaman zaman su ile temas halinde olan malzemeler için iyi bir sonuç değildir. Bu artışın sebebi, sürtünme-aşınma esnasında metal tozlarının seramiklere göre daha kolay deforme olabilmeleri ile açıklanabilir. C numunelerinde aşınma öncesi ve sonrası sertlikler kıyaslandığında, sertliklerin sepiolit miktarındaki artışa bağlı olarak daha az değiştiği görülür. Bunun sebebi ise, sepiolit tozlarının artışına bağlı olarak sürtünme esnasında numunelerin plastik olarak deforme olmalarını engelleyen bir etken olarak düşünülebilir.

Yapılan deneylerde ikinci yorma (second fade) işlemi esnasında sıcaklık ve zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim Çizelge 7.10. da ve Şekil 7.18'de ise değişen sepiolit miktarına bağlı olarak artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim görülmektedir.

Çizelge 7.10. Sepiolit numunelerin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri

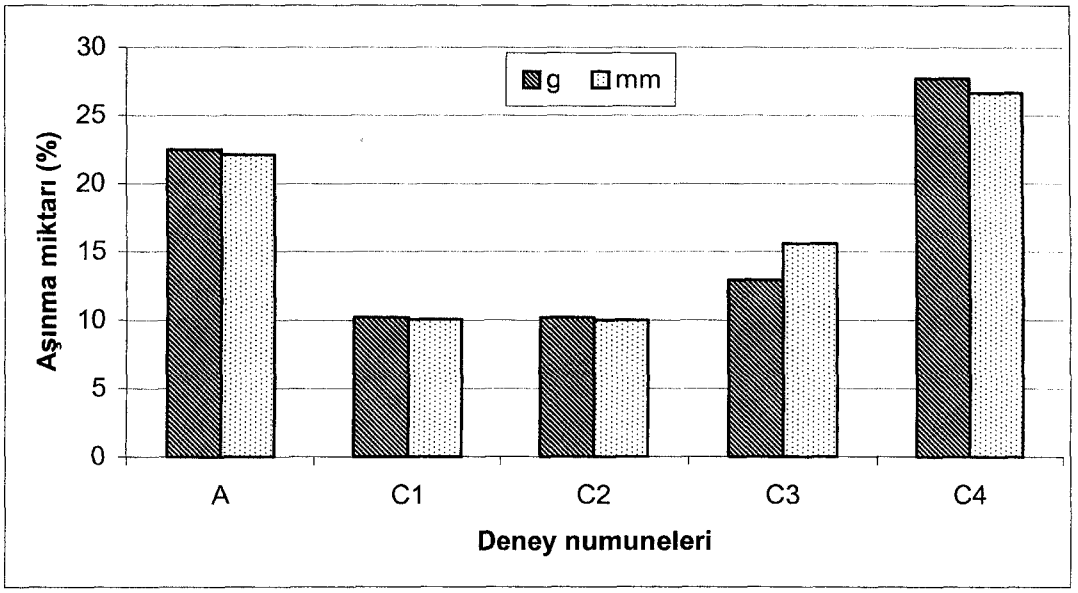
	Döngü	Sıcaklık (^{0}C)	Hız (Dev/dak.)	Yük (Kgs)	Sürtünme kuvveti (Kgs)	SürtünmeKatsayısı (μ)	Zaman (Saniye)
A	1	94	420	69.6	17.9	0.258	10
	1	121	419	69.1	16.4	0.238	39
	1	149	420	68.8	15.0	0.218	80
	1	177	420	68.9	15.0	0.218	115
	1	205	420	69.0	16.0	0.232	166
	1	232	421	68.8	16.2	0.235	184
	1	260	422	69.0	15.3	0.221	234
	1	288	420	68.6	15.1	0.219	298
	1	316	419	68.9	14.2	0.206	382
	1	344	421	68.2	12.9	0.189	508
	Ortalama		420	68.9	15.4	0.224	
C1							
	1	93	416	67,8	14,2	0,209	21
	1	121	416	68,0	14,0	0,206	81
	1	149	415	67,9	13,8	0,204	143
	1	177	415	68,2	14,1	0,206	197
	1	205	415	67,8	13,6	0,201	261
	1	233	415	68,2	13,1	0,193	321
	1	260	415	68,3	12,7	0,185	410
	1	288	416	68,0	11,8	0,174	514
	Ortalama		415	68,0	13,4	0,197	
C2							
	1	93	414	68,3	18,4	0,270	22
	1	121	414	68,1	18,6	0,273	58
	1	149	414	68,1	18,8	0,276	91
	1	177	413	68,1	20,0	0,293	124
	1	205	414	68,0	18,9	0,278	160
	1	232	413	68,3	19,7	0,288	200
	1	260	413	68,1	18,0	0,265	247
	1	288	414	68,2	17,4	0,255	308
	1	316	414	68,0	15,6	0,229	395
	1	343	414	68,3	14,5	0,212	500
	Ortalama		414	68,1	18,0	0,264	
C3							
	1	93	422	68,1	21,5	0,315	21
	1	121	422	68,0	21,1	0,310	54
	1	149	422	68,4	20,7	0,304	87
	1	177	422	68,4	20,2	0,296	120
	1	205	422	67,9	20,2	0,297	154
	1	232	422	67,9	19,9	0,294	195
	1	260	422	68,2	19,6	0,288	242
	1	288	422	68,3	18,5	0,271	299
	1	316	423	68,3	19,4	0,284	369
	1	344	423	68,4	18,6	0,272	471
	Ortalama		422	68,2	20,0	0,293	
C4							
	1	93	413	68,0	34,0	0,500	20
	1	121	413	68,1	34,1	0,501	51
	1	149	413	68,3	32,8	0,480	79
	1	177	413	68,5	31,5	0,459	105
	1	205	413	68,2	30,3	0,444	132
	1	232	413	68,4	29,6	0,433	163
	1	260	413	68,6	27,6	0,402	195
	1	288	413	68,1	25,7	0,377	230
	1	316	414	68,6	23,5	0,342	284
		343	414	68,6	21,3	0,310	349
	Ortalama		413	68,4	29,0	0,425	



Şekil 7.18. Değişen sepiolit miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim

Şekil 7.18 incelendiğinde en düşük sürtünme katsayısı değeri C1 numunesinden, en yüksek sürtünme katsayısı değeri ise C4 numunesinden alınmıştır. Ancak C4 numunesi incelendiğinde sepiolit miktarının artmasına bağlı olarak daha 120 ^{0}C'den sonra sürtünme katsayısında lineer olarak bir düşme görülür. Diğer numuneler ise oldukça kararlı bir sürtünme katsayısına sahiptir. Artan sıcaklıkla C4 numunesindeki sürtünme katsayısının düşüş eğilimi göstermesinin nedeni, yüksek sepiolit oranlarında düşük yoğunluklu malzeme üretildiği için, frenleme sırasında açığa çıkan ısının iletimi azalmakta ve ara yüzeydeki sıcaklık artışı sürtünme katsayısını düşürmektedir.

Sepiolit miktarındaki artışa bağlı olarak aşınma miktarındaki değişim incelendiğinde Şekil 7.19'da aynı durum görülmektedir.

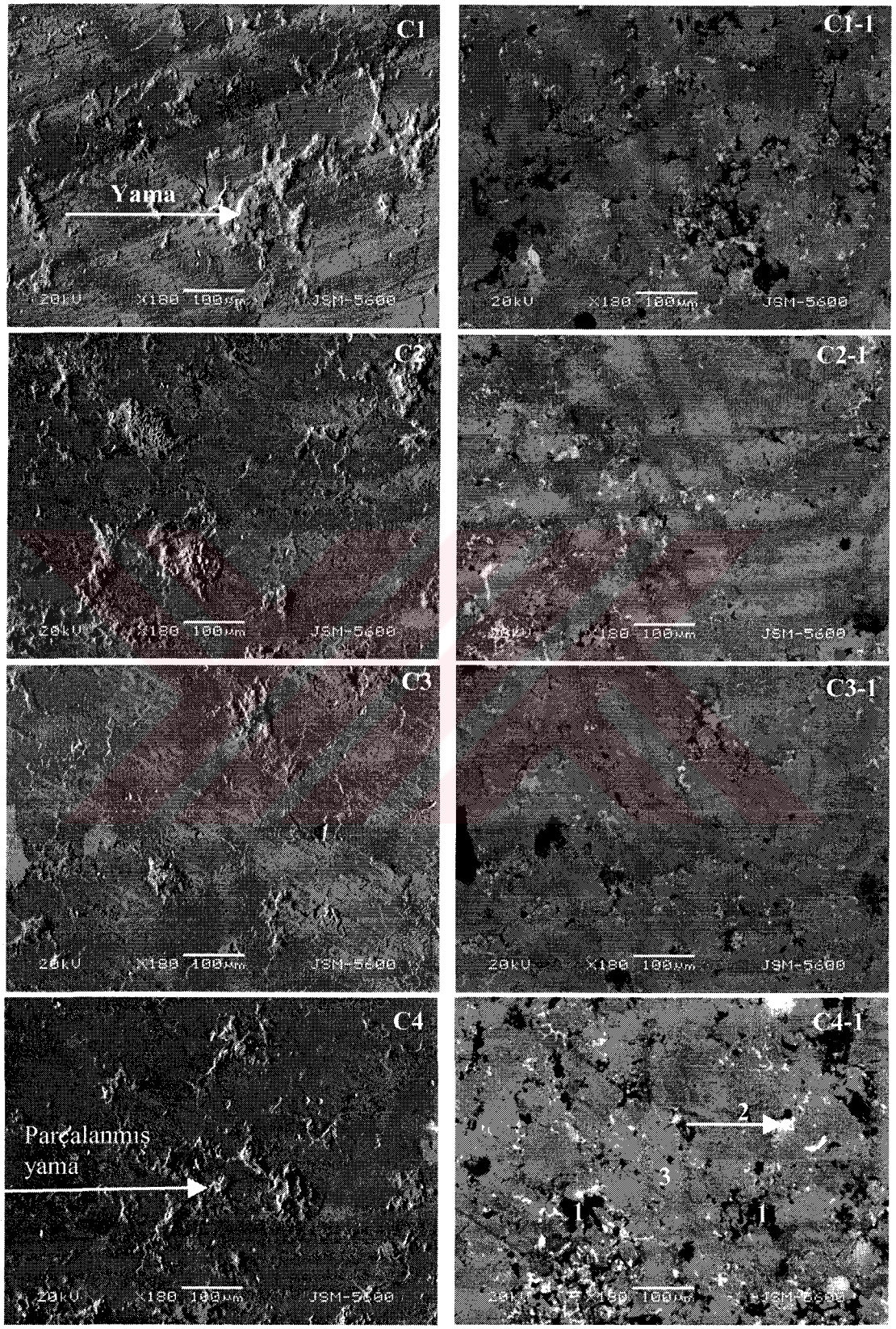


Şekil 7.19. Değişen sepiolit miktarına göre aşınma miktarındaki değişim

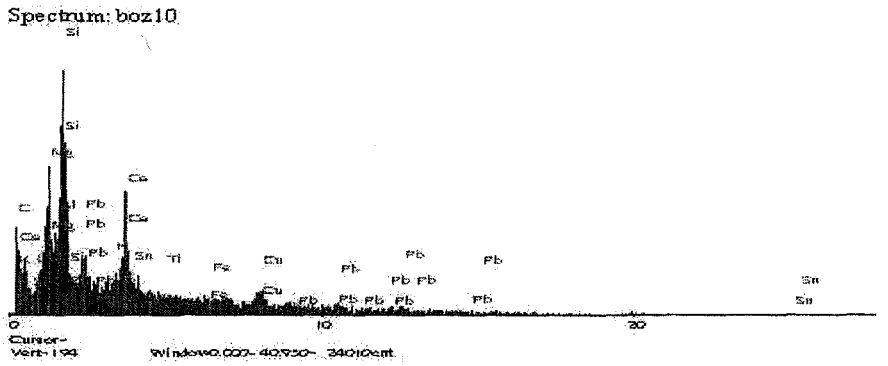
Şekil 7.19'da A numunesinin deney boyunca meydana gelen aşınma miktarı % 23 iken, C1 ve C2 numunelerinde bu değer % 10 civarlarındadır. Bu değer hemen hemen A numunesine göre % 110 bir aşınma dayanımının olduğunu göstermektedir. C3 numunesinin aşınma miktarı ise %12.88'dir. Bu değerler bir sürtünme balata malzemesi için iyi bir sonuçtur. Ancak C4 numunesinin aşınma miktarı 27.72'dir. bu değer balata malzemeleri için oldukça kötü bir sonuçtur.

Sepiolit'in artmasına bağlı olarak aşınma miktarındaki artış SiO_2'in özelliği ile benzer bir tavır sergilemiştir. Sepiolit miktarının artması ile aşınma miktarındaki artışın sebebi ise, sepiolit miktarının artmasına bağlı olarak numunelerdeki gözeneklerin artması ve aşınma esnasında bu gözeneklerden daha çok partikül kopması olarak düşünülebilir

C numunelerinin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Resim 7.6'da verilmiştir. Şekil 7.20 ve 7.21'de ise C4 numunesinden alınan EDS analiz sonuçları görülmektedir.

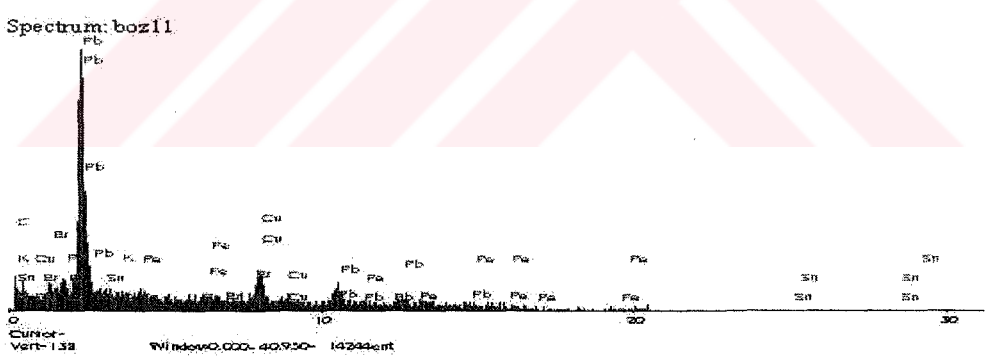


Resim 7.6. Artan sepiolit miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri (C1, C2, C3, C4 resimleri BSE görüntüsü) ve (C1-1, C2-1, C3-1, C4-1 resimleri SE görüntüsü).



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
B	Ka	0.00	0.000	wt.%	
C	Ka	44.09	0.000	wt.%	
O	Ka	20.43	0.000	wt.%	
F	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Mg	Ka	74.74	10.630	wt.%	
Al	Ka	28.67	4.012	wt.%	
Si	Ka	178.65	23.253	wt.%	
S	Ka	0.00	0.000	wt.%	
K	Ka	1.22	0.189	wt.%	
Ca	Ka	78.95	12.396	wt.%	
Ti	Ka	3.50	0.719	wt.%	
Fe	Ka	3.18	0.922	wt.%	
Cu	Ka	13.50	6.364	wt.%	
Sn	La	7.66	4.682	wt.%	
Pb	La	7.47	36.832	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

Şekil 7.20. C4-4 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen noktadan alınan analiz sonucu



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
C	Ka	0.00	0.000	wt.%	
O	Ka	3.44	0.000	wt.%	
F	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Mg	Ka	3.78	0.258	wt.%	
Al	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Si	Ka	14.11	0.761	wt.%	
S	Ka	0.00	0.000	wt.%	
K	Ka	0.88	0.058	wt.%	
Ti	Ka	3.40	0.278	wt.%	
Fe	Ka	9.06	0.982	wt.%	
Cu	Ka	87.31	15.210	wt.%	
Sn	La	6.70	1.848	wt.%	
Er	La	10.75	5.215	wt.%	
Pb	La	42.62	73.558	wt.%	
Pa	Ma	10.09	1.832	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

Şekil 7.21. C4-4 numunesinde 2 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu

Resim 7.6 incelendiğinde (C1-1, C2-1, C3-1, C4-1), 3 rakamı ile gösterilen gri renkteki bölge matris (Cu,Sn,Fe), 1 rakamı ile belirtilen siyah noktalar (Şekil 7.20) sepiolit ve 2 rakamı ile belirtilen beyaz noktalar (Şekil 7.21) ise % 73 Pb, %15 civarında Cu ve %1.5 oranında Sn görülmektedir. Bu sonuçlar, malzemelerin sinterlenmesi esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip kurşunun buharlaşamadan numunelerin içerisindeki gözeneklerde sıvı olarak hapsolduğunu ve numunelerin soğuması ile birlikte kurşunun da katılaştığının bir göstergesi olarak düşünülebilir (Resim 7.5), veya sürtünme-aşınma esnasında aşınma yüzeyine doğru hareketi ile açıklanabilir. Daha sonra aşınma ile birlikte dışarı çıktığı sanılmaktadır.

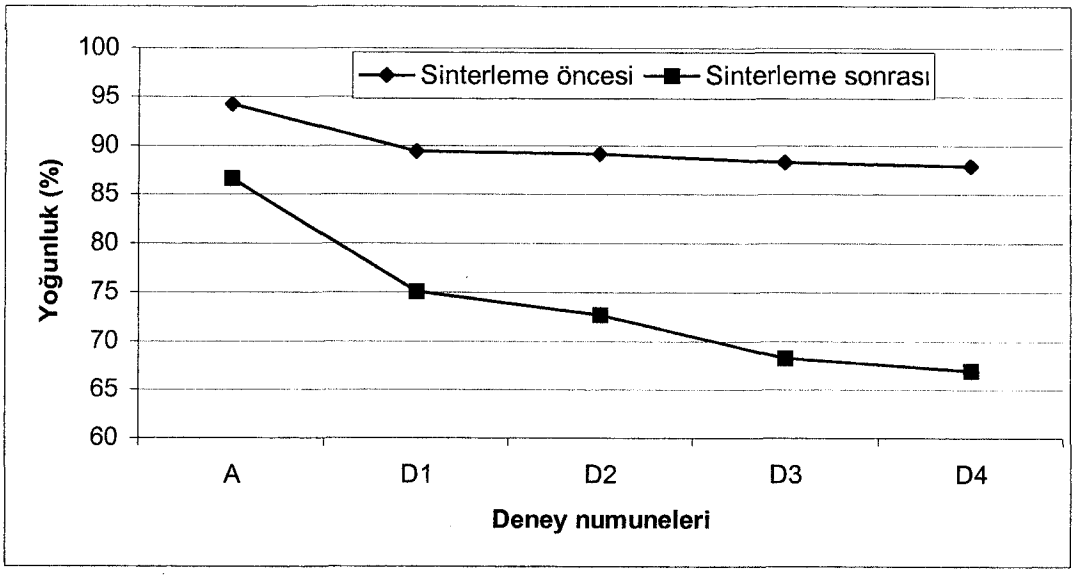
A numunesine ilave edilen sepiolitin aşınma yüzeylerine bakıldığında oldukça homojen bir dağılım yaptığı görülür. Numunelerin hepsinde aynı aşınma mekanizması göze çarpmaktadır. Çok küçük adhesiv noktaları ve gerisi ise geniş abrasiv bölgelerinden meydana gelmiştir. Ancak, resimlerde numunelerin yüzeyinde oluşan yamaların oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bu yamalar sepiolit miktarının artışına bağlı olarak daha da küçüldüğü görülmektedir. Bu küçük yamaların balata numunesinin yüzeyini koruyamadığı düşünülmektedir. Şekil 7.20 ve 7.21 incelendiğinde diğer numunelerde görülen demir'in oldukça az olduğu fark edilir. Bunun nedeni, sürtünme esnasında diskten çok az miktarda partikül kopması olarak değerlendirilebilir. Numunenin içerisinde bir ara eleman olarak bulunan sepiolit ise, sürtünme-aşınma esnasında diskin aşındırma kuvvetine karşı bir direnç gösteremediği için rahatlıkla abrasiv bir etki ile numunenin yüzeyinden ayrıldığı düşünülebilir.

7.4. Antimon Trisülfit'in (Sb_2S_3) Etkisi

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye değişik oranlarda ilave edilen Sb_2S_3 ilavesi ile hazırlanan numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları, aşınma öncesi ve sonrası sertlikleri, sürtünme-aşınma deneyi sonucundaki aşınma miktarları (% ağırlık) ve aşınma süresinde belirlenen ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 7.11'de verilmiştir. Ayrıca değişen Sb_2S_3 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi Şekil 7.22'de, sinterlenmiş numunelerden alınan EDS analiz sonucu Şekil 7.23'de, aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi ise Şekil 7.24'de görülmektedir.

Çizelge 7.11. Ana malzeme ve antimon trisülfit bileşiminin karakterizasyon sonuçları

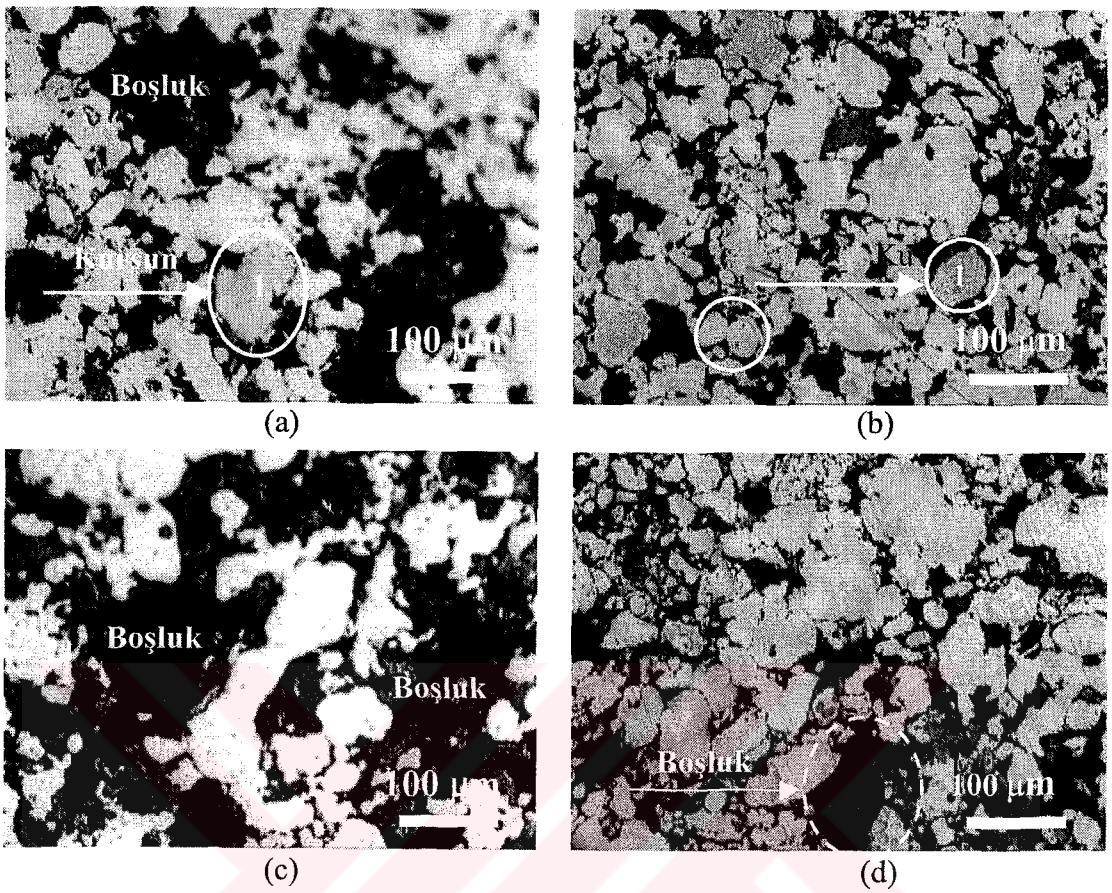
Test Numunesi	Yoğunluk – (%)		Sertlik (HV_1)		Aşınma miktarı % (g)	Sürtünme katsayısı (μ)	
	Sint.öncesi	Sinter sonra	Aşınma öncesi	Aşınma sonrası		Soğuk	Sıcak
Ana malzeme (A)	94,22	86,60	55,3	104	22,46	0,24	0,22
D1= A+ % 0.5 Al_2O_3	89,35	75,05	36,3	68,5	11,38	0,20	0,21
D2= A+ % 1.0 Al_2O_3	89,10	72,65	50,3	80,8	14,17	0,25	0,24
D3= A+ % 2.0 Al_2O_3	88,28	68,26	52,6	86,8	16,47	0,26	0,24
D4= A+ % 4.0 Al_2O_3	87,88	66,91	75,4	95,7	18,70	0,26	0,26



Şekil 7.22. Değişen Sb_2S_3 oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi

Şekil 7.22'de görüldüğü gibi A numunesinin sinterleme önsesi yoğunluğu 94.22 iken (% olarak), %0,5 Sb_2S_3 ilave edildiğinde yaklaşık olarak %10 düşüş göstermiştir. Resim 7.7'den görüldüğü gibi Sb_2S_3 tozunun bronz esaslı tozların sıkıştırılabilirlik özelliğini azaltmasına bağlı olarak gözenek miktarı ve boyutunun artmış olmasındandır. Bu da daha düşük yoğunlukta bir malzeme elde edilmesine sebep olmaktadır. B2, B3 ve B4 numunelerinin sinterleme öncesi yoğunluklarında ise fazla bir düşüş görülmemiştir. Bu durumun Sb_2S_3'in yağlayıcı özelliğinden kaynaklanabileceği düşünülebilir. Ayrıca yoğunluktaki bu düşüşün sebebinin, Sb_2S_3 tozunun metal tozlarına göre oldukça düşük yoğunlukta olmasına da bağlanabilir.

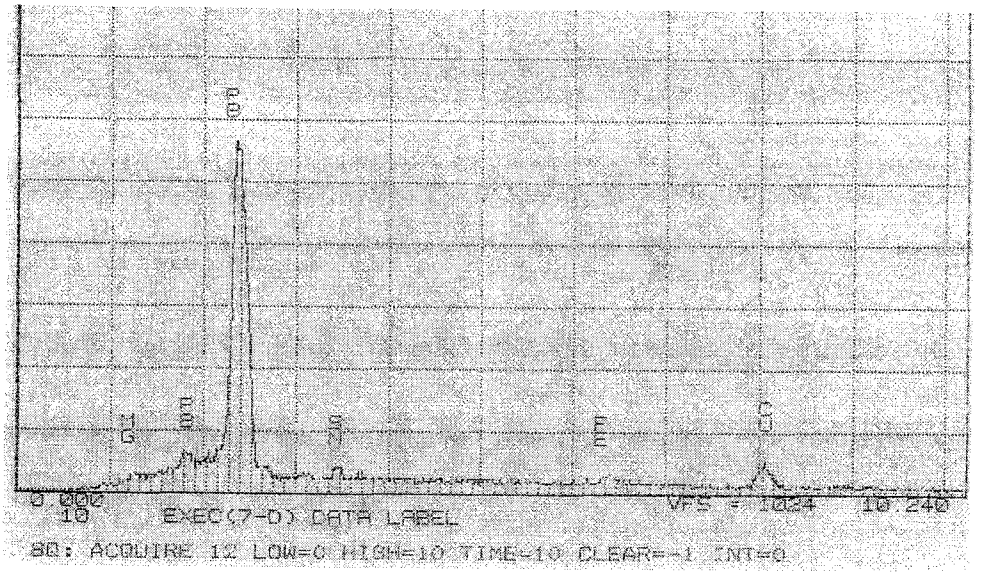
Fakat, sinterleme sonrası yoğunluklar incelendiğinde, A numunesinin yoğunluğu 86,60 iken, % 4 Sb_2S_3 ilavesi ile numunenin yoğunluğu 66,91'e düşmüştür. Bu da yaklaşık olarak %20'lik bir yoğunluk azalmasına tekabül eder. Sinterleme sonrası yoğunlukların düşmesi ise sinterleme esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozlarının (Pb,Sn) bir kısmı buharlaşarak yapıyı terk ederken (Çizelge 7.12), Resim 7.7'de görüldüğü gibi hala yapı içerisinde sıvı halde bulunan elementler boşluklara girerek gözeneklerin kapanmasını engellemektedir. Boşluklara dolan kurşunun malzeme içerisinde meydana getirdiği gerilimden dolayı, malzemelerin hacimce genişlemeleri de (Çizelge 7.12.) sinterleme sonrası yoğunlukları düşürmüştür.



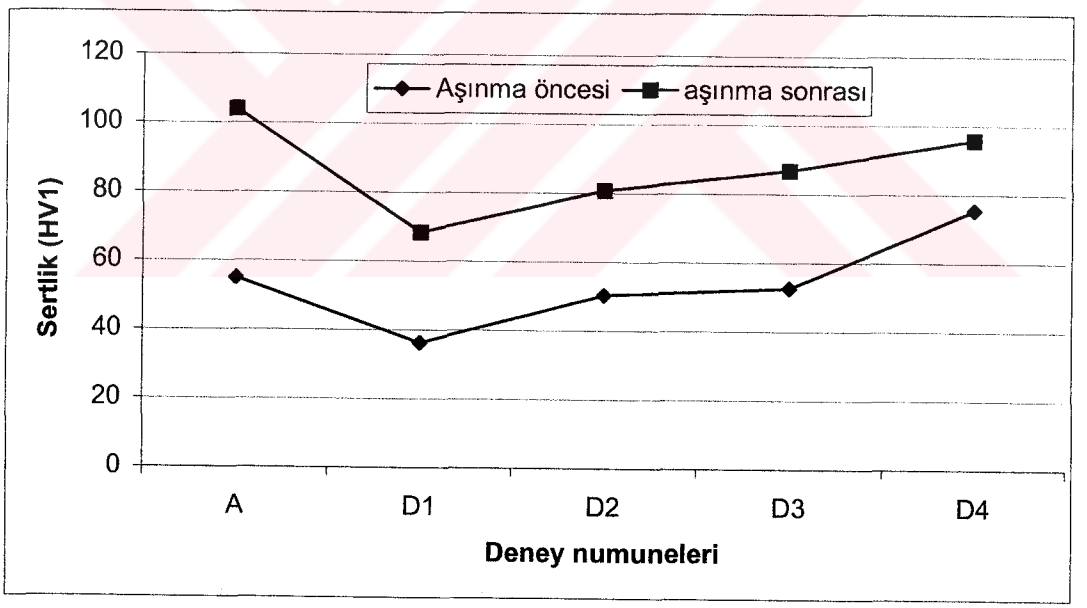
Resim 7.7. Sb_2S_3 artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim. a) Sinterleme öncesi % 0.5 Sb_2S_3, b) Sinterleme sonrası % 0.5 Sb_2S_3, c) Sinterleme öncesi % 4 Sb_2S_3 ve d) Sinterleme sonrası % 4 Sb_2S_3

Çizelge 7.12. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış

Numune	Ağırlık Kaybı (%)	Hacim Artışı (mm^3)
D1	0,038	9,02
D2	0,034	9,08
D3	0,032	9,08
D4	0,033	9,09



Şekil 7.23. Sinterleme sonrası % 4 Sb_2S_3 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgeden alınan EDS sonucu.



Şekil 7.24. Değişen Sb_2S_3 oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişim

Şekil 7.24'de A numunesine ilave edilen % 0.5'lik bir Sb_2S_3 tozunun numunenin aşınma öncesi sertliğini düşürdüğü gözlenmektedir. Bunun sebebi, Şekil 7.22'de Sb_2S_3 ilavesinin sinterleme sonrası numunelerin yoğunluğunu düşürmesinden kaynaklanabilir. % 1 Sb_2S_3 ilavesinden sonra sinterlemeye bağlı olarak numunelerin sertliği artmıştır. Bunun sebebi muhtemelen, sinterleme esnasında yapı değişiminden

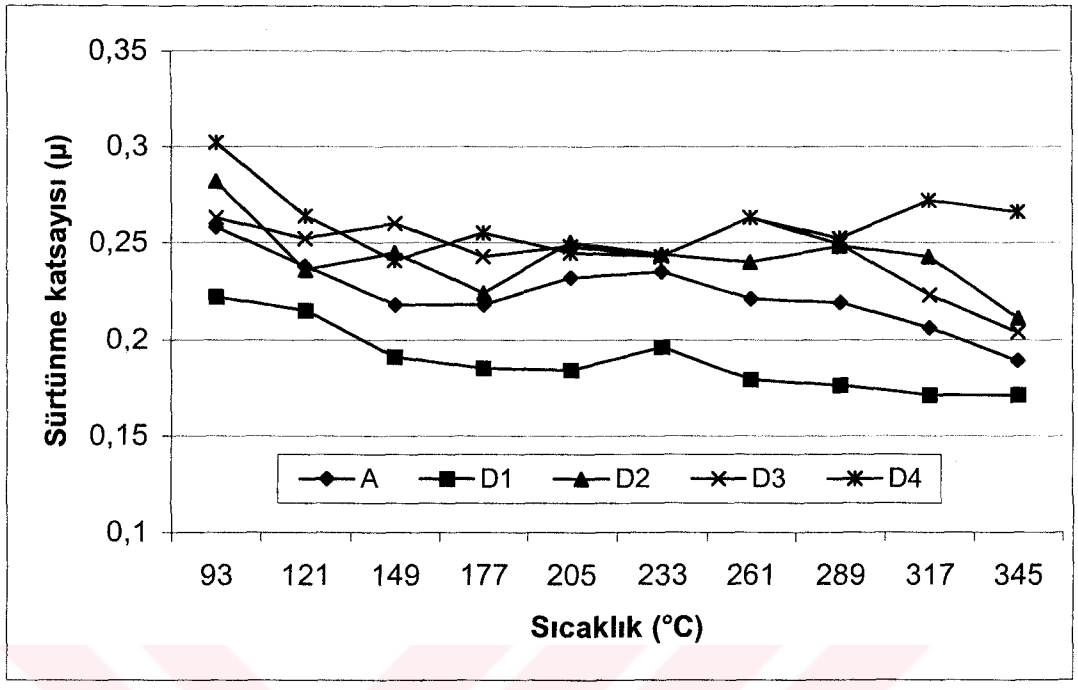
kaynaklanmaktadır. Centers(87) bir çalışmalarında, Sb_2S_3'ün sinterleme esnasında 300-450 ^0C sıcaklık aralığında Sb_2O_5 ve Sb_2O_3'e dönüştüğünü belirtmiştir. Bu malzemenin oksit oluşturmasından dolayı malzemelerin sertliğinin arttığı düşünülebilir. Aşınma sonrasındaki sertliğinin artması ise, Şekil 7.22'de görüldüğü gibi sinterleme sonrası yoğunluğun düşmesinin çok büyük olması, aşınma esnasında malzemelerin daha fazla deforme olmalarına sebep olmuştur. Bu da aşınma sonrası sertliği artırmıştır.

Aşınma öncesi ve sonrası artan Sb_2S_3 miktarına bağlı olarak sertlik aralığının daralması ise sinterleme esnasında Sb_2O_3'e dönüşen Sb_2S_3'nin oksit özelliğinden dolayı aşınma esnasında numunelerin daha az plastik deformasyona sebep olabileceğinden kaynaklanabilir.

Sıcaklık ve zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim Çizelge 7.13' de ve Şekil 7.25'de verilmiştir. Şekil 7.26'da ise A ve D numunelerinin deney sonucunda ölçülen aşınma miktarları görülmektedir.

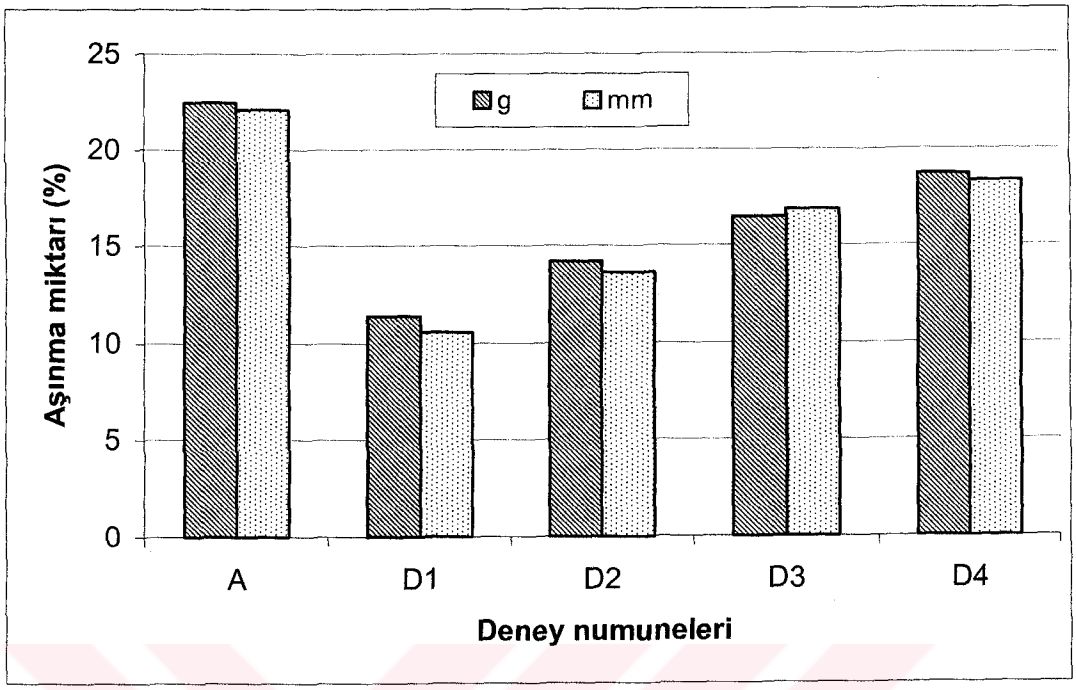
Çizelge 7.13. Sb_2S_3 numunelerinin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri

	Döngü	Sıcaklık (^{0}C)	Hız (dev/dak)	Yük (Kgs)	Sürtünme kuvveti (Kgs)	SürtünmeKatsayısı (μ)	Zaman (Saniye)
A	1	94	420	69.6	17.9	0.258	10
	1	121	419	69.1	16.4	0.238	39
	1	149	420	68.8	15.0	0.218	80
	1	177	420	68.9	15.0	0.218	115
	1	205	420	69.0	16.0	0.232	166
	1	232	421	68.8	16.2	0.235	184
	1	260	422	69.0	15.3	0.221	234
	1	288	420	68.6	15.1	0.219	298
	1	316	419	68.9	14.2	0.206	382
	1	344	421	68.2	12.9	0.189	508
	Ortalama		420	68.9	15.4	0.224	
D1							
	1	94	415	67,4	15,0	0,222	21
	1	121	415	67,7	14,6	0,215	61
	1	149	415	68,1	13,1	0,192	134
	1	177	415	67,6	12,5	0,185	200
	1	205	416	68,4	12,6	0,184	272
	1	232	415	68,1	13,3	0,196	345
	1	262	416	68,2	12,2	0,179	525
	Ortalama		415	67,9	13,3	0,196	
D2							
	1	93	414	68,9	19,4	0,282	24
	1	121	415	68,9	19,2	0,236	60
	1	149	414	69,1	17,0	0,245	92
	1	177	415	69,1	15,4	0,224	122
	1	205	415	68,8	17,2	0,250	156
	1	232	416	69,3	16,9	0,244	195
	1	260	414	68,8	16,5	0,240	241
	1	288	413	69,2	17,2	0,248	292
	1	316	415	69,3	16,9	0,243	358
	1	344	415	39,5	14,6	0,211	444
	Ortalama		415	69,1	16,7	0,242	
D3							
	1	93	412	70,7	18,6	0,263	16
	1	121	412	68,6	17,3	0,252	58
	1	149	412	69,3	18,0	0,260	92
	1	177	412	69,1	16,8	0,243	126
	1	204	412	69,1	17,2	0,248	155
	1	232	412	69,1	16,8	0,243	192
	1	260	412	68,9	18,1	0,263	239
	1	288	412	69,5	17,3	0,249	292
	1	316	413	69,1	15,4	0,223	353
	1	344	413	69,0	14,1	0,204	449
	Ortalama		412	69,2	17,0	0,245	
D4							
	1	93	411	68,0	20,5	0,302	20
	1	121	412	68,5	18,1	0,264	57
	1	149	412	68,7	16,6	0,241	92
	1	177	412	68,8	17,5	0,255	126
	1	205	412	68,9	16,9	0,245	165
	1	232	413	68,4	16,6	0,243	209
	1	260	413	68,9	18,1	0,263	262
	1	288	413	68,3	17,2	0,252	325
	1	316	413	68,3	18,6	0,272	409
		343	414	68,2	18,1	0,266	513
	Ortalama		412	68,5	17,8	0,260	



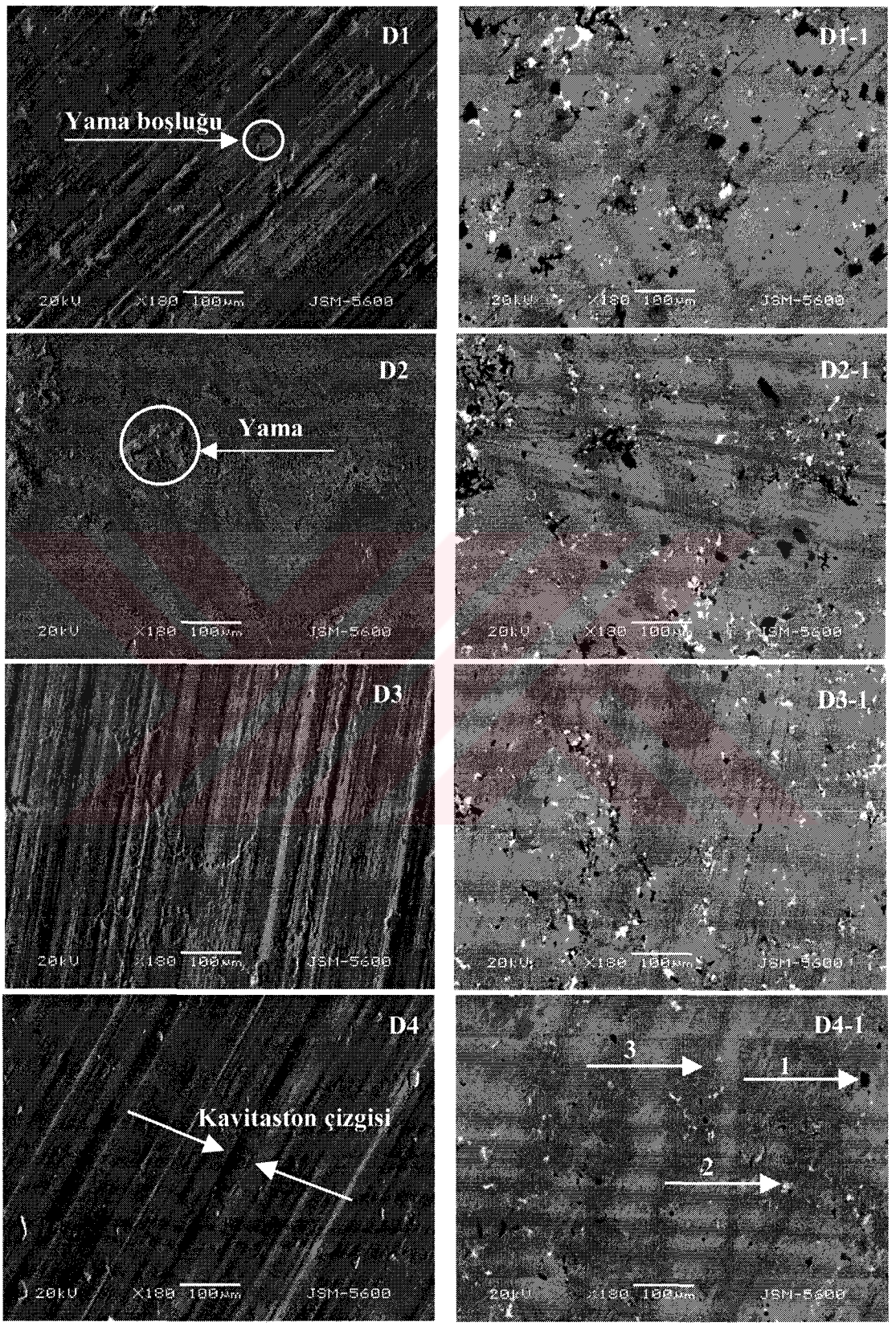
Şekil 7.25. Değişen Sb_2S_3 miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim

Şekil 7.25 incelendiğinde A numunesinin sürtünme katsayısı değeri 93 ^{0}C sıcaklığında 0,258 iken, bu değer 345 ^{0}C sıcaklığına geldiğinde 0,189'a düşmüştür. En düşük sürtünme katsayısı değerini (0.222-0,179) D1 numunesi verirken, en yüksek sürtünme katsayısı değerini (0,302-0,266) ise D4 numunesi vermiştir. Genelde bütün numunelerde sürtünme katsayısı, sıcaklıktaki artmaya bağlı olarak sürekli artan ve azalan bir tavır sergilemiştir. Ancak sürtünme katsayısı değerlerinde çok büyük bir değişiklik yoktur. En kararlı sürtünme katsayısı değerini ise D4 numunesi vermiştir. Diğer bir deyişle, yüksek miktarda Sb_2S_3 içeren sürtünme malzemesi, sürtünme katsayısında dada düşük değişim göstermiştir. Artan sıcaklıklarda sürtünme malzemesindeki Sb_2S_3 sürtünme katsayısının kararlılığını geliştirmiştir. Jang ve arkadaşları (88) Sb_2S_3'ün sürtünme malzemeleri üzerine yaptıkları araştırmalarında, disk yüzeyinde kararlı bir sürtünme filmi oluşturmak için sürtünme malzemesine katı yağlayıcılar ilave edilebileceğini belirtmişlerdir. Ancak bu çalışmada, Sb_2S_3'ün yüksek sıcaklıklarda oksit oluşturması nedeniyle sürtünme esnasında gerekli film tabakasını oluşturamadığı kanaatine varılmıştır. Sürtünme katsayısı değerlerinin bu yüzden düşük çıktığı düşünülmektedir.

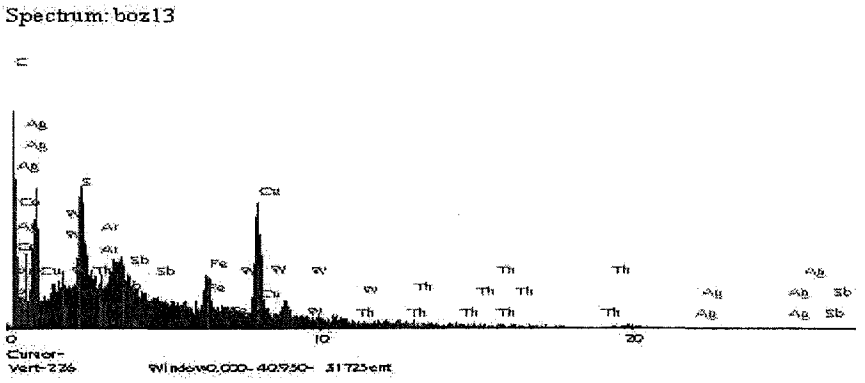


Şekil 7.26. Değişen Sb_2S_3 miktarına göre aşınma miktarındaki değişim

Şekil 7.26'da A numunesinin deney boyunca meydana gelen aşınma miktarı % 23 iken, D numunelerinde bu değer D1 numunesinde 11.38, D2 numunesinde 14.17, D3 numunesinde 16.47 ve D4 numunesinde ise 18.70 tir. A numunesine ilave edilen Sb_2S_3 miktarının artması ile aşınma miktarında bir artış gözlenmiştir. D numunelerinin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Resim 7.9'da verilmiştir. Şekil 7.27 ve 7.28'de ise D4 numunesinden alınan analiz sonuçları görülmektedir.



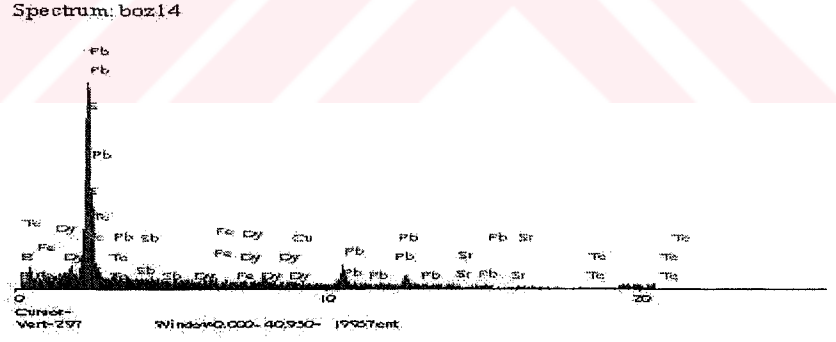
Resim 7.8. Artan Sb_2S_3 miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri (D1, D2, D3, D4 resimleri BSE görüntüsü) ve (D1-1, D2-1, D3-1, D4-1 resimleri SE görüntüsü).



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
C	Ka	187.63	0.000	wt.%	
O	Ka	8.81	0.000	wt.%	
F	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Mg	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Al	Ka	0.00	0.000	wt.%	
S	Ka	93.32	12.789	wt.%	
Fe	Ka	44.09	9.780	wt.%	
Cu	Ka	159.91	71.281	wt.%	
Sb	La	12.55	6.149	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.27. D4-4 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
O	Ka	8.41	0.000	wt.%	
F	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Mg	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Al	Ka	0.00	0.000	wt.%	
S	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Fe	Ka	6.80	1.442	wt.%	
Cu	Ka	11.13	3.700	wt.%	
Sb	La	3.54	2.180	wt.%	
Pb	La	28.72	92.677	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.28. D4-4 numunesinde 2 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu

Resim 7.8 incelendiğinde (D1-1, D2-1, D3-1, D4-1), 3 rakamı ile gösterilen gri renkli bölgeler matris (Cu,Sn,Fe), 1 rakamı ile belirtilen siyah renkli bölge (Şekil 7.27) Sb_2S_3 ve 2 rakamı ile belirtilen beyaz bölge (Şekil 7.28) ise % 92 oranında Pb olduğu görülmektedir. Bu sonuç, malzemelerin sinterlenmesi esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip kurşunun buharlaşamadan numunelerin içerisindeki gözeneklerde sıvı olarak hapsolduğunu ve numunelerin soğuması ile birlikte kurşunun da katılaştığının bir göstergesidir (Resim 7.8. ve Şekil 7.23). Daha sonra aşınma ile birlikte dışarı çıktığı düşünülmektedir.

Jang ve arkadaşları (88) disk ile balata ara yüzeyinde yağlayıcılar yetersiz olduğunda, sürtünmenin çok zor oluşabileceğini ve sürtünme malzemesi içerisindeki maddeler ile disk yüzeyi arasında direk etkileşimden sürtünme kuvvetinin oluştuğunu rapor etmişlerdir. Diğer taraftan malzeme yüksek miktarda yağlayıcılar içerdiğinde, sürtünme ara yüzeyinde ince bir film tabakası oluşur ve sürtünme kuvveti, sürtünme filminin kesme dayanımıyla oluştuğu bilinmektedir. Disk yüzeyinde ince sürtünme filmi oluştuğunda, sürtünme malzemelerindeki sert maddelerin abrasif hareketi artan sıcaklıklarda kararlı hale geçtiği düşünülür. Bundan sonra sürtünme katsayısı Şekil 7.25'de olduğu gibi kararlı bir tavır sergiler. Ayrıca yüzeyde oluşan bu film, balata malzemesinin aşınmasında da önemli rol oynar.

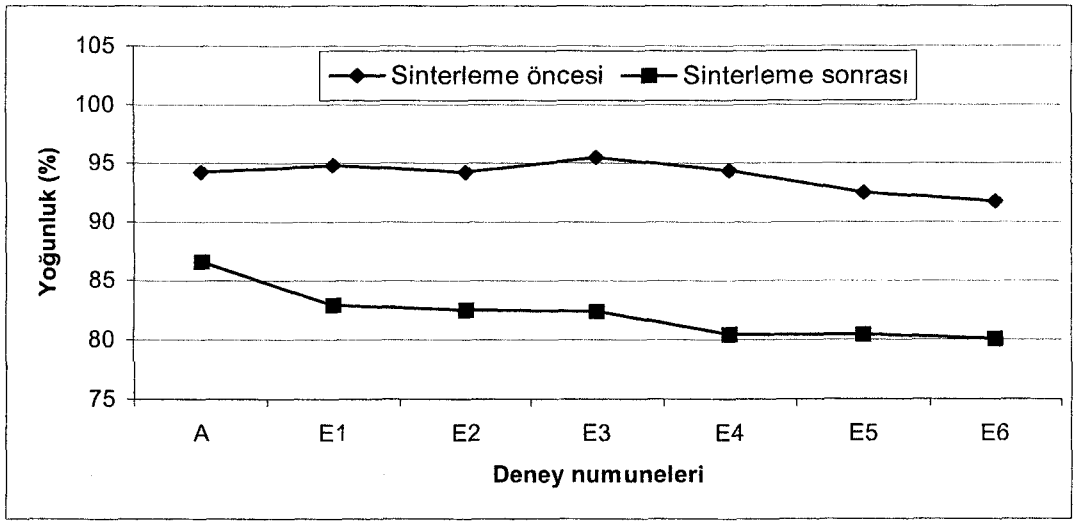
Resim 7.8. incelendiğinde numunelerin yüzeyinde istenilen film tabakasının (yamanın) çok fazla oluşmadığı görülür. Sadece bir miktar D1, D2 ve D3 numunesinde çok küçük noktalar halinde oluşmuştur. Bu yüzden bu numunelerin aşınma dirençleri A numunesine göre oldukça iyidir. Ancak D4 numunesinin yüzeyine bakılacak olursa oldukça derin ve geniş abrasif etki görülebilir. Bu durumun, disk ile balata yüzeyinin uyuşmamasından kaynaklandığı ve diskten herhangi bir şekilde parça kopmadığı için (Şekil 7.27 ve 7.28'de disk malzemesinden herhangi bir element görülmemektedir) balata malzemesinin yüzeyinde bir yamanın oluşmaması olarak düşünülebilir.

7.5. Zirkonyum silikat'ın ($ZrSiO_4$) etkisi

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen bronz esaslı balata malzemesi ve bu malzemeye değişik oranlarda ilave edilen $ZrSiO_4$ ilavesi ile hazırlanan numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası yoğunlukları, aşınma öncesi ve sonrası sertlikleri, sürtünme-aşınma deneyi sonucundaki aşınma miktarları (% ağırlık) ve aşınma süresinde belirlenen ortalama soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 7.14'de verilmiştir. Ayrıca değişen $ZrSiO_4$ oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi Şekil 7.29'da, sinterlenmiş numunelerden alınan EDS analiz sonucu Şekil 7.30'de, aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi ise Şekil 7.31'de görülmektedir.

Çizelge 7.14. Zirkonyum silikat bileşiminin karakterizasyon sonuçları

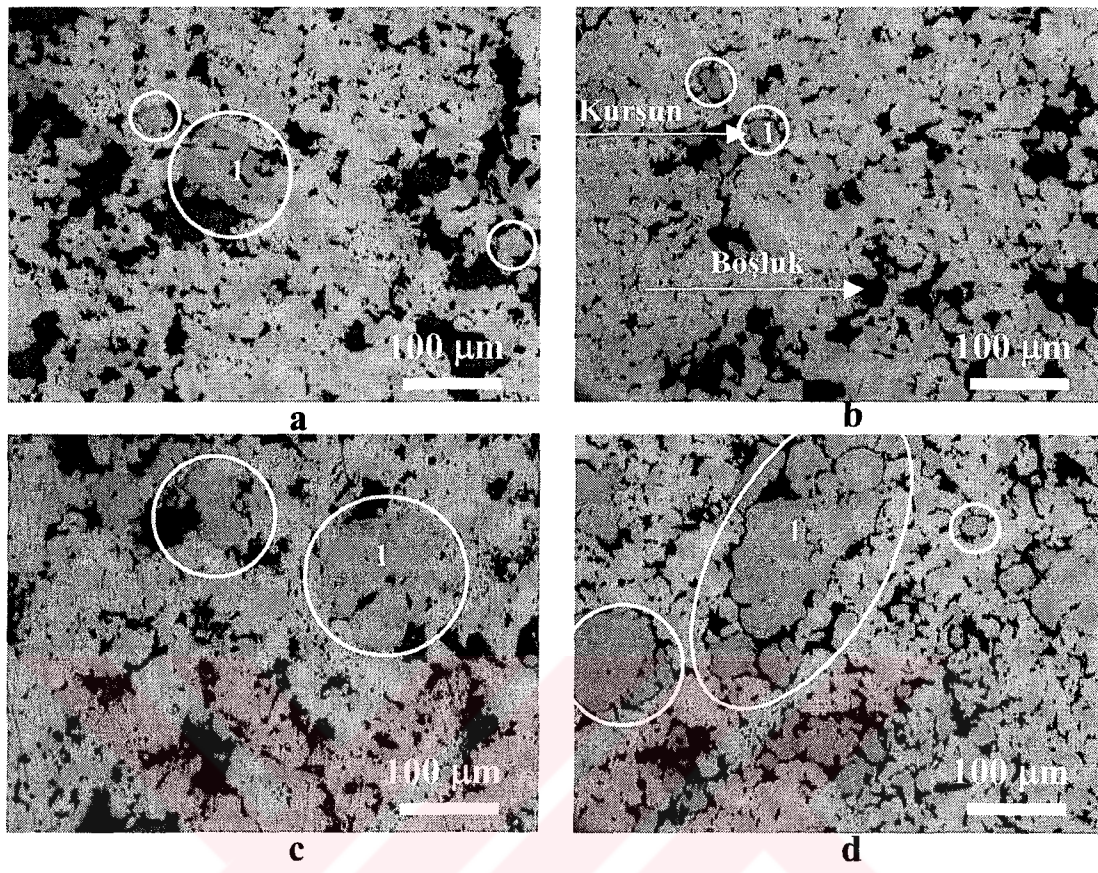
Test Numunesi	Yoğunluk (%)		Sertlik (HV_1)		Aşınma miktarı %	Sürtünme katsayısı (μ)	
	Sinter.öncesi	Sinter.sonrası	Aşınma öncesi	Aşınma sonrası		Soğuk	Sıcak
Ana malzeme (A)	94,22	86,60	55,3	104	22,46	0,24	0,22
E1 = A+ % 0.5 $ZrSiO_4$	94,81	81,70	112	113	7,44	0,28	0,27
E2 = A+ % 1.0 $ZrSiO_4$	94.23	82,00	114	115	5,22	0,34	0,33
E3 = A+ % 2.0 $ZrSiO_4$	95.55	82,26	115	119	4,97	0,35	0,35
E4 = A+ % 4.0 $ZrSiO_4$	94.36	80,44	120	119	4,22	0,39	0,38
E5 = A+ % 5.0 $ZrSiO_4$	92,50	80,04	122	122	2,68	0,50	0,46
E6 = A+ % 6.0 $ZrSiO_4$	94.36	80,05	123	123	2,71	0,468	0,46



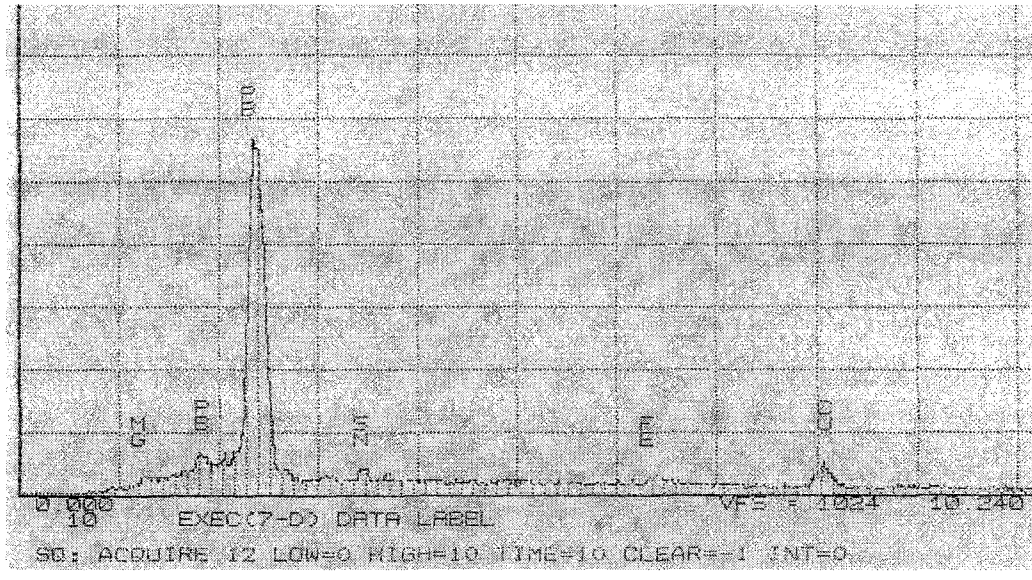
Şekil 7.29. Değişen $ZrSiO_4$ oranlarına göre sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimi

Şekil 7.29'da görüldüğü gibi A numunesi ile E numuneleri kıyaslandığında sinterleme öncesi E4 numunesine kadar yoğunluklarda bir değişim olmamıştır. E4 numunesinden sonra ise, yaklaşık %5 lik bir yoğunluk azalması görülüyor. Bu deney numunesinde sinterleme öncesi yoğunluğun azalmamasının sebebi olarak, $ZrSiO_4$'ın iyi bir katı yağlayıcı olmasından kaynaklanabilir. Yoğunluğun E3 numunesinden sonra düşmesi ise, yoğunluğu artırmak için kullanılan katı yağlayıcıların % 2 den sonra malzemelerde tabakalaşma oluşturarak yoğunluğu düşürdüğü şeklinde düşünülmektedir.

Sinterleme sonrası yoğunlukların düşmesi ise sinterleme esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozlarının (Pb,Sn) bir kısmı buharlaşarak yapıyı terk ederken (Çizelge 7.15), Resim 7.9'da görüldüğü gibi hala yapı içerisinde sıvı halde bulunan elementler boşluklara girerek gözeneklerin kapanmasını engellemektedir. Boşluklara dolan kurşunun malzeme içerisinde meydana getirdiği gerilimden dolayı, malzemelerin hacimce genişlemeleri de (Çizelge 7.15) sinterleme sonrası yoğunlukları düşürmüştür. Jang ve Kim (88), yaptıkları termal analiz sonucunda 1000 ^{0}C'ye kadar $ZrSiO_4$'ın ağırlık olarak önemsenmeyecek kadar bir ağırlık kaybına uğradığını bildirmektedirler. Bu durumda sinterleme sonrası yoğunluğun düşmesine $ZrSiO_4$'ın bir etkisinin olmadığı düşünülebilir.



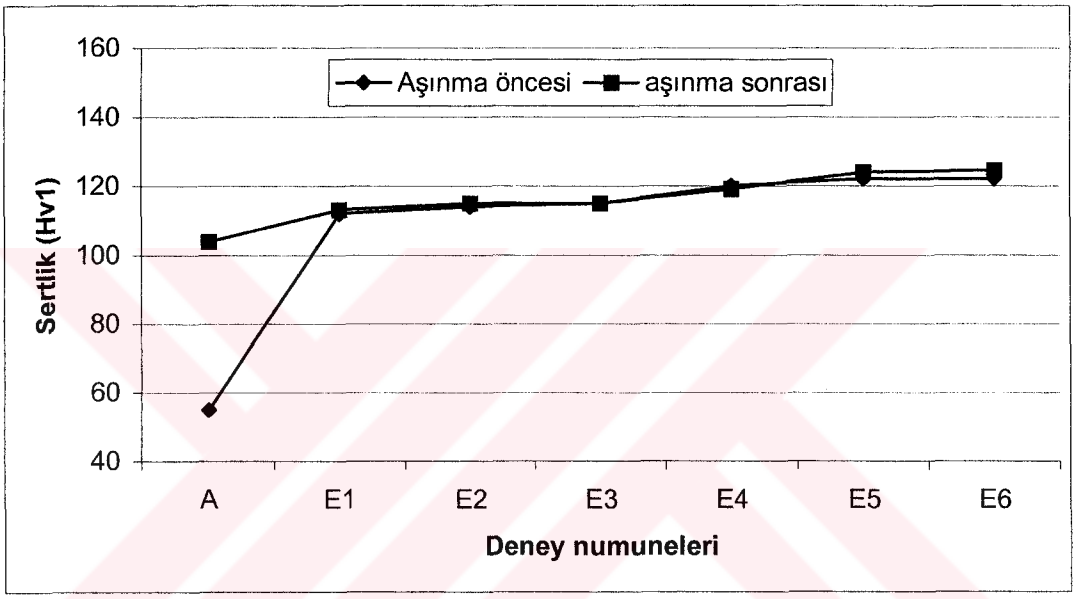
Resim 7.9. $ZrSiO_4$ artışı ile kuşun ve boşluk morfolojisindeki değişim. a) Sinterleme öncesi % 0.5 $ZrSiO_4$, b) Sinterleme sonrası % 0.5 $ZrSiO_4$, c) Sinterleme öncesi % 4 $ZrSiO_4$ ve d) Sinterleme sonrası % 4 $ZrSiO_4$



Şekil 7.30. Sinterleme sonrası % 4 $ZrSiO_4$ numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgeden alınan EDS sonucu.

Çizelge 7.15. Sinterleme ile numunelerdeki ağırlık kaybı ve hacimdeki artış

Numune	Ağırlık Kaybı (%)	Hacim Artışı mm^3
E1	0,057	9,30
E2	0,055	9,35
E3	0,054	9,50
E4	0,054	9,55
E5	0,055	9,50
E6	0,056	9,60



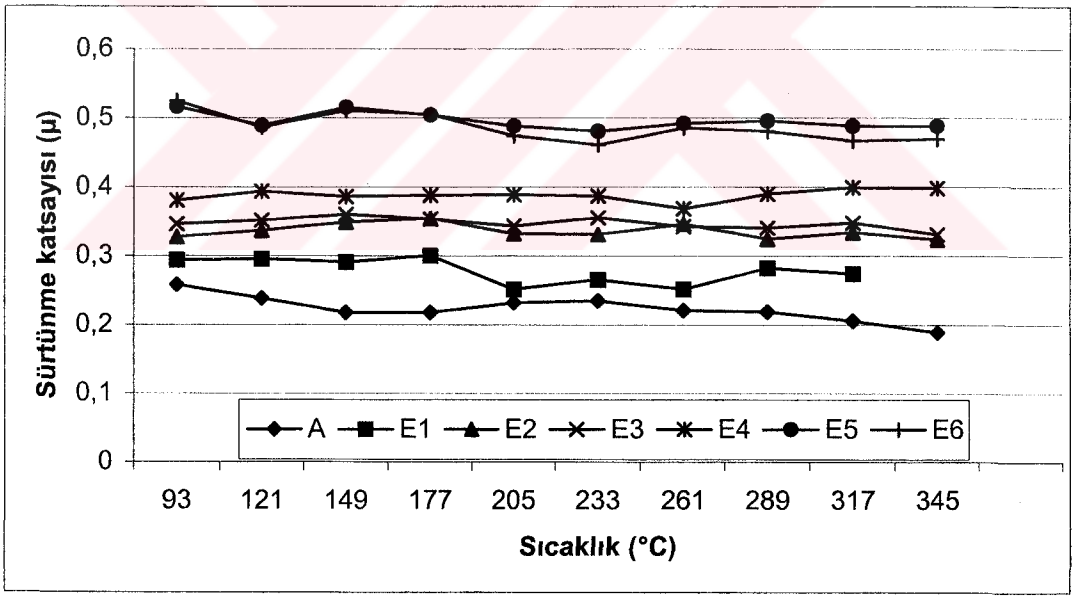
Şekil 7.31. Değişen $ZrSiO_4$ oranlarına göre aşınma öncesi ve sonrası sertlik değişimi

Şekil 7.31'de, numunelerin aşınma öncesi sertlik değerlerine bakıldığında, E numunelerinin sertlikleri A numunesine göre hemen hemen % 100'lük bir artış gösterir. $ZrSiO_4$, bronz gibi metallerle karşılaştırıldığında normalde sert bir malzemedir. Burada önemli olan malzemelerin aşınma ile birlikte sertliklerinin kararlı olmasıdır. Görüldüğü gibi, %0,5 ila %4 $ZrSiO_4$ ilavelerinde hem aşınma öncesi hem de aşınma sonrası sertlik değerlerinde bir değişim olmamıştır. Fakat, %5 ve %6 $ZrSiO_4$ ilavelerinde azda olsa bir sertlik artışı vardır. Bu da, malzemelerin yüzeyinin tamamen $ZrSiO_4$ ile kaplanmasından dolayı, ölçümlerin hemen hemen hepsinin $ZrSiO_4$ noktalarından alındığına işaret eder. Yapılan deneylerde ikinci yorma (second fade) işlemi esnasında sıcaklık ve zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişim Çizelge 7.16 de ve Şekil 7.32'de verilmiştir.

Çizelge 7.16. numunelerin 2. yorma işlemi esnasındaki özellikleri

	Döngü	Sıcaklık (^{0}C)	Hız (dev/dak)	Yük (Kgs)	Sürtünme kuvveti (Kgs)	SürtünmeKatsayısı (μ)	Zaman (Saniye)
A	1	94	420	69.6	17.9	0.258	10
	1	121	419	69.1	16.4	0.238	39
	1	149	420	68.8	15.0	0.218	80
	1	177	420	68.9	15.0	0.218	115
	1	205	420	69.0	16.0	0.232	166
	1	232	421	68.8	16.2	0.235	184
	1	260	422	69.0	15.3	0.221	234
	1	288	420	68.6	15.1	0.219	298
	1	316	419	68.9	14.2	0.206	382
	1	344	421	68.2	12.9	0.189	508
	Ortalama		420	68.9	15.4	0.224	
E1							
	1	95	415	69,4	20,3	0,293	14
	1	122	414	68,1	20,1	0,295	60
	1	150	414	68,7	20,0	0,291	122
	1	178	415	68,2	20,4	0,300	222
	1	205	416	68,0	17,1	0,251	281
	1	233	414	68,7	18,2	0,265	286
	1	261	415	68,4	17,2	0,251	397
	1	288	415	68,2	19,2	0,282	464
	Ortalama		415	68,5	19,1	0,278	
E2							
	1	93	418	77,3	25,3	0,327	15
	1	121	418	72,8	24,5	0,336	49
	1	149	418	71,1	24,8	0,349	80
	1	177	418	70,5	24,9	0,354	111
	1	205	418	70,1	23,2	0,332	143
	1	232	418	69,9	23,1	0,331	178
	1	260	418	69,6	24,1	0,346	217
	1	288	419	69,4	22,5	0,324	263
	1	317	418	68,8	23,0	0,334	321
	1	343	420	68,5	22,1	0,323	388
	Ortalama		418	70,8	23,8	0,335	
E3							
	1	93	421	76,4	25,8	0,346	13
	1	121	421	71,1	25,0	0,351	46
	1	149	421	70,6	25,4	0,360	88
	1	177	421	70,0	24,7	0,353	119
	1	205	421	69,6	23,9	0,343	155
	1	233	421	69,5	24,7	0,355	178
	1	260	422	69,1	23,6	0,342	215
	1	288	422	68,8	23,4	0,340	256
	1	317	422	68,3	23,8	0,348	311
	1	343	422	67,4	22,3	0,331	390
	Avarage		421	69,9	24,2	0,347	
E4							
	1	93	420	74,6	28,3	0,380	20
	1	121	419	71,6	28,1	0,393	47
	1	149	419	70,7	27,3	0,386	78
	1	177	419	70,5	27,4	0,388	112
	1	205	419	70,2	27,3	0,389	141
	1	232	419	70,1	27,2	0,387	169
	1	260	419	70,0	25,7	0,368	205
	1	288	420	69,1	27,0	0,390	246
	1	316	418	69,1	27,6	0,399	295
		343	419	68,6	27,3	0,398	358
	Ortalama		419	70,4	27,3	388	

	Döngü	Sıcaklık (^{0}C)	Hız (Dev/dak)	Yük (Kgs)	Sürtünme kuvveti (Kgs)	SürtünmeKatsayısı (μ)	Zaman (Saniye)
E5	1	93	416	69,7	36,0	0,516	18
	1	121	416	68,4	33,4	0,489	51
	1	149	416	68,4	35,2	0,515	78
	1	177	416	68,3	34,4	0,504	107
	1	205	416	68,6	33,5	0,488	134
	1	232	416	68,6	33,0	0,480	162
	1	260	416	68,3	33,6	0,492	195
	1	288	416	68,3	33,8	0,495	235
	1	316	417	68,9	33,6	0,488	289
	1	343	416	68,9	30,9	0,448	361
	Ortalama		416	68,6	33,7	0,492	
E6							
	1	93	419	68,2	35,7	0,524	17
	1	121	419	68,6	33,3	0,486	51
	1	149	419	68,2	34,8	0,510	103
	1	177	420	68,7	32,7	0,505	141
	1	205	418	69,1	34,7	0,474	171
	1	232	418	69,3	31,9	0,461	242
	1	260	419	68,6	33,3	0,485	288
	1	288	420	68,7	33,0	0,480	397
	1	316	420	68,7	33,0	0,466	544
	Ortalama		419	68,7	33,5	0,488	

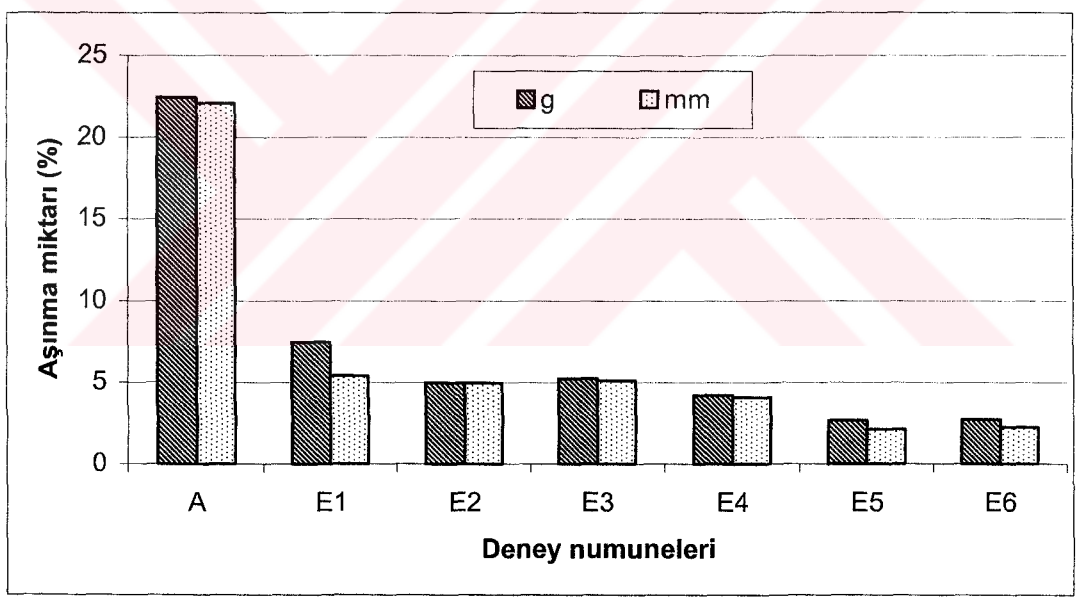


Şekil 7.32. Değişen $ZrSiO_4$ miktarına göre artan sıcaklıkla sürtünme katsayısındaki değişim

Şekil 7.32, disk ile balata arasındaki sıcaklığa bağlı olarak farklı sürtünme eğrisi sergileyen numunelerin etkisini göstermektedir. En yüksek sürtünme katsayısı değerini 93-345 ^{0}C arasında E5 ve E6 numuneleri vermiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bu sıcaklıklar arasında sürtünme katsayılarında çok küçük bir değişim

görülmektedir. Diğer bir deyişle, sürtünme katsayıları oldukça kararlı bir tavır sergilemişlerdir. Sürtünme-aşınma deneyleri sonucunda sürtünme katsayısının 345 ^{0}C sıcaklıkta 0,466 olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7.16). Jang ve arkadaşları (88), yaptıkları bir çalışmada çeşitli bağlayıcılar kullanarak % 6'lık bir $ZrSiO_4$ ilavesinde sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimi ölçmüşler ve çalışma sonucunda 345 ^{0}C sıcaklıktaki sürtünme katsayısının 0.457 olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, sonuçların literatür ile tam bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Ayrıca, artan $ZrSiO_4$ miktarının, malzemelerin aşınmasında da önemli rolünün olduğu Şekil 7.33'den daha iyi görülmektedir.

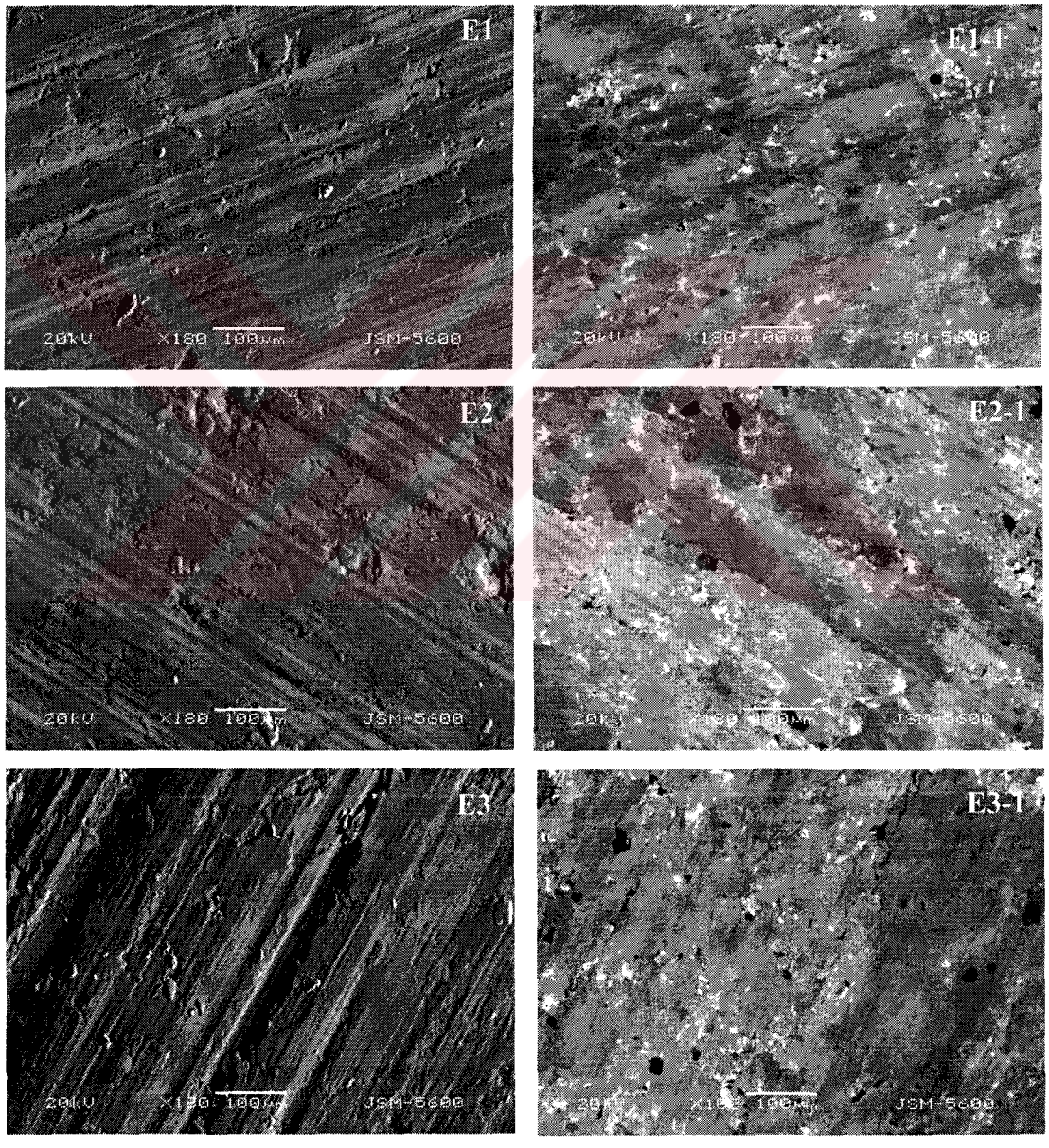


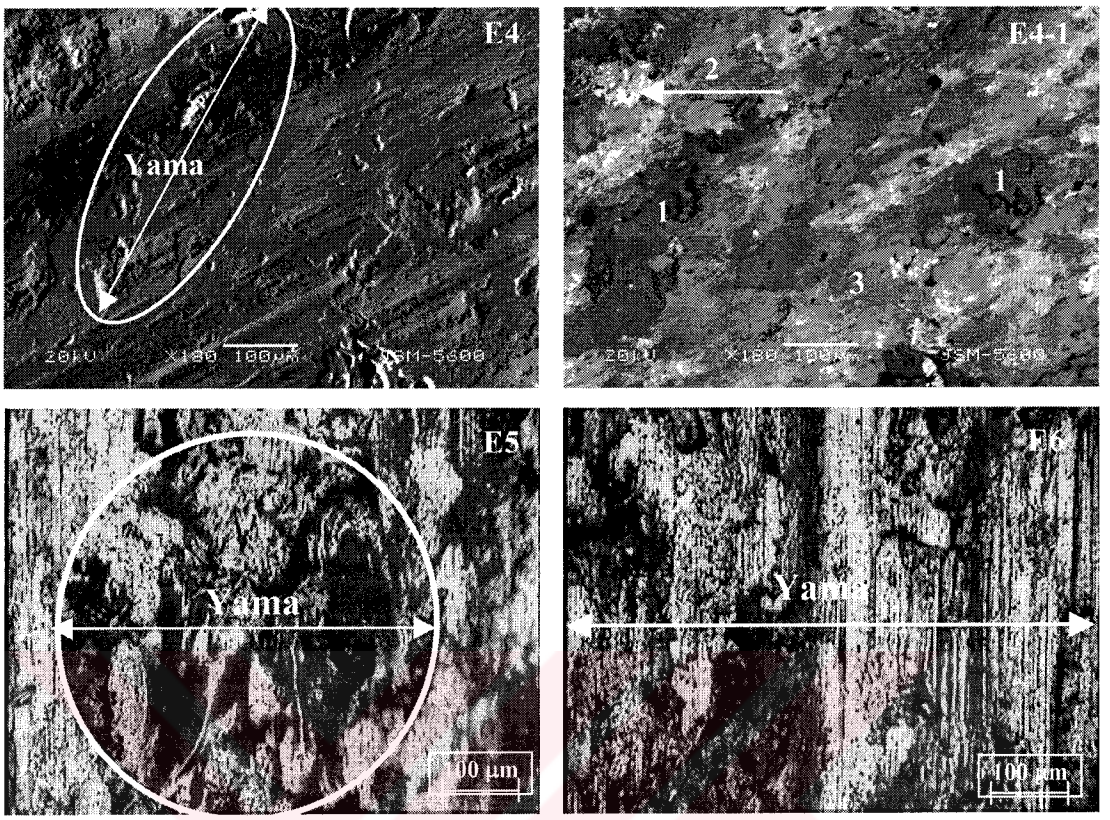
Şekil 7.33. Değişen $ZrSiO_4$ oranına göre aşınma miktarındaki değişim

Şekil 7.33. zirkonyum silikatın artan miktarlarının sürtünme malzemesinin aşınmasını kuvvetli bir şekilde etkilediğini gösterir. İlave edilen $ZrSiO_4$ oranının artmasına bağlı olarak aşınma miktarında sürekli azalan bir eğilim vardır. A numunesine ilave edilen % 0.5'lik bir $ZrSiO_4$ ilavesi bile, aşınma direnci açısından yaklaşık olarak 4,5 kat daha iyi sonuç vermiştir. % 5 ve % 6 $ZrSiO_4$ ilavesinde ise,

malzemenin yaklaşık 8 kat daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğu açıkça görülmektedir.

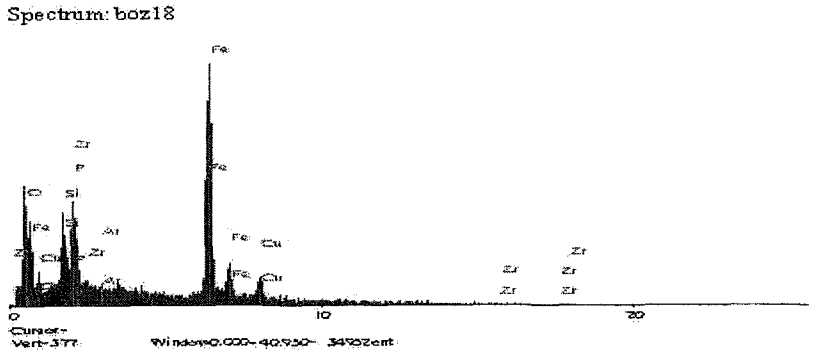
E numunelerinin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Resim 7.10'da verilmiştir. Şekil 7.34 ve 7.35'de ise E4 numunesinden alınan analiz sonuçları verilmiştir.





Resim 7.10. $ZrSiO_4$ miktarına bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri (E1, E2, E3, ve E4 resimleri BSE görüntüsü) ve (E1- 1, E2-1, E3-1 ve E4-1 resimleri SE görüntüsü).

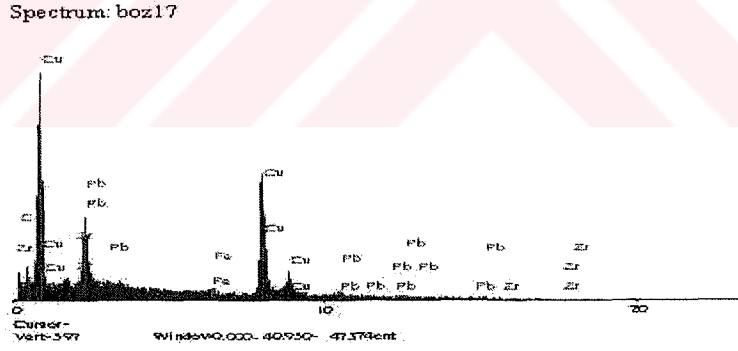
E5 ve E6 numunelerinin aşınma yüzeyinden alınan optik mikroskop görüntüleri.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
O	Ka	148.82	0.000	wt.%	
Si	Ka	111.79	6.808	wt.%	
P	Ka	36.49	2.144	wt.%	
Ar	Ka	6.55	0.412	wt.%	
Fe	Ka	581.98	63.347	wt.%	
Cu	Ka	44.20	9.064	wt.%	
Zr	La	105.38	18.225	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.34. E4-4 numunesinde 1 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc		
C	Ka	48.47	0.000	wt.%	
O	Ka	42.89	0.000	wt.%	
F	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Mg	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Al	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Si	Ka	11.38	0.739	wt.%	
S	Ka	0.00	0.000	wt.%	
Fe	Ka	17.19	1.490	wt.%	
Cu	Ka	466.62	72.822	wt.%	
Zr	La	4.58	0.795	wt.%	
Pb	La	13.13	24.155	wt.%	
			100.000	wt.%	Total

kV
20.0

Şekil 7.35. E4-4 numunesinde 2 rakamı ile belirtilen bölgelerden alınan analiz sonucu

Resim 7.10 incelendiğinde (E1-1, E2-1, E3-1, E4-1), 3 rakamı ile belirtilen gri bölgeler matris (Cu,Sn,Fe), 1 rakamı ile belirtilen siyah renkli bölge (Şekil 7.28) % 63.347 Fe, % 18.225 Zr ve % 6.808 ise Si ihtiva eder. 2 rakamı ile belirtilen beyaz bölge (Şekil 7.29) ise % 72.822 Fe ve % 24.155 Pb görülmektedir. Bu sonuçlar, malzemelerin sinterlenmesi esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip kurşunun buharlaşamadan numunelerin içerisindeki gözeneklerde sıvı olarak hapsolduğunu ve numunelerin soğuması ile birlikte kurşunun da katılaşarak aşınma ile birlikte dışarı çıktığı sanılmaktadır. Diğer taraftan demirin yüksek oranda çıkması ise aşınma esnasında diskten kopan partiküllerin balata numunesi yüzeyine difüze olmuş partiküller olarak değerlendirilebilir.

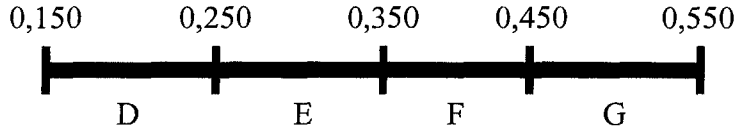
Resim 7.10' da görüldüğü gibi, artan $ZrSiO_4$ miktarına bağlı olarak malzeme yüzeylerinde gittikçe artan yüzey filmlerinin (yamaların) olduğu görülmektedir. E4, E5 ve E6 incelenirse numunelerin bütün yüzeyinin sıvanmış yamalardan meydana geldiği görülebilir. $ZrSiO_4$ ilave edilen bütün sürtünme numunelerinin 200-300 ^0C sıcaklık aralığındaki kararlı sürtünme katsayısının nedeni, $ZrSiO_4$'ın yüksek sıcaklıklardaki yağlama kabiliyetinden ve sürtünme yüzeyinde oluşturduğu sürtünme filminin tampon etkisi yapmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Deneylerde sürtünme kuvveti değerleri 98 ^0C ile 345 ^0C sıcaklık arasında, her bir sıcaklık değeri karşılığı bir sürtünme kuvveti değeri alınmıştır (Çizelge 12). Sürtünme kuvveti, farklı sürtünme malzemelerinde farklı değerler göstermiştir. Sürtünme katsayısı en yüksek malzemenin, sürtünme kuvveti değişiminin diğerlerine göre daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Ağırlıkça % 5 ve % 6 $ZrSiO_4$ içeren sürtünme numunelerinin yüksek sürtünme kuvveti değişiminin, sürtünme yüzeyinde meydana gelen sürtünme katsayısındaki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Anderson (89) sürtünme kuvveti değişiminin, disk kalınlık değişimi, diskin sıcaklığı ve sürtünme yüzeyinde meydana gelen bileşenlerden güçlü bir şekilde etkilendiğini rapor etmiştir. Jang ise (88) yüksek ara yüzey sıcaklıklarında sürtünme kuvvetinin bu derece artmasının sebebinin, dökme demirden yapılan diskin mikro yapısının homojen olmadığından kaynaklandığını belirtmiştir.

Balata malzemesinin aşınma miktarının literatürde % 8 ila % 15 arasında olduğu belirtilir. Şekil 7.27 de görüldüğü gibi, $ZrSiO_4$ ilavesi balata malzemesinin aşınmasını engellemiştir. Ağırlıkça % 6 $ZrSiO_4$ ilave edilen numunelerde aşınma oranının % 2.71 olduğu Çizelge 7.11'de görülmektedir. Sürtünme katsayısı en yüksek olan numunenin aşınmasının en düşük bulunması, $ZrSiO_4$ ilave edilen balata malzemesi ile disk arasında iyi bir etkileşimin olduğu yönünde bir kanaat oluşmuştur. Bu nedenle sürtünme malzemesi içerisine ilave edilen $ZrSiO_4$'ın hem güçlü bir aşındırıcı hem de çok iyi bir katı yağlayıcı olduğu söylenebilir.

7.6. Değerlendirme

Bu çalışmada; SAE-J661 standardına göre elde edilen sonuçlar aşağıdaki skala üzerinde gösterilmiştir. Bu skalada fren ve debriyaj balataları için sürtünme katsayısı değerleri 0,150-0,550 arasındaki değerler kabul edilmiş ve her bir sürtünme katsayısı aralığı skaladaki gibi harflerle kodlanmıştır. Deneyler sonucunda her bir numune için alınan sonuçlar Çizelge 7.17'de verilmiştir.



Çizelge 7.17. SAE-J661 standardına göre deney numunelerinden alınan sonuçlar

Numune Kodu	Skalada Okunan Değerler
A	DD
A1	DD
A2	DD
A3	EE
A4	FF
B1	DD
B2	DD
B3	EE
B4	FF
C1	DD
C2	EE
C3	EE
C4	GF
D1	DD
D2	ED
D3	ED
D4	EE
E1	EE
E2	EE
E3	FE
E4	FF
E5	GG
E6	GG

Çizelge 7.6'da verilen sonuçlara göre, bütün numunelerin sürtünme-aşınma davranışları SAE-J661 standardına uygun sonuç vermiştir. Ancak skalada DD ile kodlanan 0,150-0,250 aralığındaki sonuçlar, debriyaj balataları ve ağır iş makinelerinin fren balataları için iyi bir sonuç olmasına rağmen, balata üreticileri binek türü arabaların fren balatalarından beklenen performans açısından bu değerlerin uygun olmadığını ifade etmektedirler.

0,250-0,550 aralığındaki sürtünme katsayısına sahip diğer bütün numunelerin yol taşıtlarının fren balatalarında SAE-J661 standardına göre uygun olduğu Çizelgeden görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada değişik tür ve oranlarda seramik tozu ilave edilerek toz metalurjisi yöntemi ile bronz esaslı balata üretilmiş ve üretilen balataların sürtünme-aşınma özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

1. Fren balatası olarak üretilen numunelerin optimum sürtünme-aşınma özellikleri 350 MPa presleme basıncında ve sinterleme sıcaklığının 820 ^{0}C olduğu tespit edilmiştir.

2. Balata malzemelerine ilave edilen seramik tozların oranı arttıkça, numunelerin ham yoğunluğunu düşürdüğü görülmüştür. Ancak, yoğunluklardaki bu düşüş seramik tozlarına göre farklılık göstermiştir. En yoğun balata malzemesini abrasiv olmasının yanında iyi bir yağlayıcı eleman olmasından dolayı $ZrSiO_4$ ilave edilmiş numuneler sağlamıştır.

3. Bütün numunelerin mikro yapı fotoğraflarından malzeme içerisindeki düşük ergime dereceli tozların sıvı faz sinterleme oluşturduğu ve buna bağlı olarak gözeneklerin küçüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca düşük ergime sıcaklığına sahip metal tozların bir kısmının sinterleme esnasında buharlaştığı gözlenmiştir.

4. Sinterleme esnasında, kurşunun yapı içerisindeki boşluklara girerek numunelerin hacimce küçülmelerini engellediği görülmüştür.

5. Seramik tozlarının ilave miktarına bağlı olarak, aşınma sonrası sertliklerin arttığı gözlenmiştir. Aşınma sonrası sertlikler bütün numunelerde aşınma öncesi sertliklere göre artış gösterirken $ZrSiO_4$ ilaveli numunelerde $ZrSiO_4$'ın malzemelerde plastik deformasyonu düşürdüğü için aşınma öncesi ve sonrası sertliklerde bir değişim olmadığı görülmüştür.

6. Balata malzemelerine ilave edilen seramik toz miktarına bağlı olarak, aşınma yüzeyin de oluşan yamalardan dolayı deney numunelerinin sürtünme katsayılarının arttığı gözlenmiştir.

7. Balata malzemesine $ZrSiO_4$ ilavesi hariç diğer seramik tozu ilavelerinde, ara yüzey sıcaklığının artmasına bağlı olarak sürtünme katsayıları azalırken, ara yüzey sıcaklığının azalması ile sürtünme katsayılarının arttığı gözlenmiştir.

8. Sürtünme katsayısı açısından en iyi sonucu E5 ve E6 numuneleri verirken, bütün numuneler SAE-J661 standart aralığında bulunmuştur.

9. Aşınma partikülleri tarafından sürtünme filmi diye tanımlanan yamaların, frenleme boyunca numunelerin sürtünme katsayılarının kararlı kalmasını sağladığı tespit edilmiştir.

10. % 4 Sepiolit hariç, diğer seramik ilaveleri, deney numunelerinin aşınma dayanımlarını artırdığı belirlenmiştir. A numunesine göre, bütün numunelerin aşınma dayanımlarında ortalama iki kat iyileşme görülürken, $ZrSO_4$'da sekiz kat iyileşme görülmüştür.

11. Sürtünme esnasında aşındırıcı diskten de sürtünme ara yüzeyine partikül geçişinin olduğu görülmüş, bu partiküllerin sürtünme ara yüzeyinde yumuşak matrisle birleşerek bir mekanik alaşımlama yaparak aşınma yüzeyini koruduğu tespit edilmiştir.

12. Genelde bütün deney numunelerinde, aynı tür aşınma mekanizmaları görülmüş ve adhesiv aşınmanın hem sürtünme katsayısını artırdığı, hem de deney numunelerinin aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir.

13. Deney numunelerinin aşınma miktarını azaltmak için, katı yağlayıcı olarak kullanılan grafit oranı artırılabilir, ancak grafit miktarının sinterlenebilirliğe olumsuz etkisi dikkate alınmalıdır.

14. Yüksek sıcaklıklarda, balataların kararlı yapılarını koruyabilmeleri ve sürtünme katsayılarının sabit kalması için molibden disülfür ilave edilebilir.

15. SAE-J661 standardına göre, A1,A2, A3, B1, B2, C1 ve D1 kodlu deney numuneleri debriyaj balatası olarak, diğer numuneler ise fren balatası olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Jacko, M.G., Tsang, P.H.S. and Rhee, S.K., "Automotiv friction materials evolution during the past decade", ***Wear***, 100 (1-3): 503-515 (1984).

2. Reinsch, E. W., "Sintered metal brake linings for automotive applications, Delco-Moraine division", ***General motors corp dayton,*** Ohio, 2: 9-21(1970).

3. Mahdribin, Z. B., "Analysis of disc brake squeal using the finite element method", *Ph.D, Thesis*, ***Department of mechanical engineering***, England, 85-96 (1995).

4. Sands, R.L., "Sintered friction materials", Powder metallurgy practice and application, ***George Newnes Ltd, London***, 9:198-203 (1966).

5. Clayton, A., "Sintered metal friction materials" ***Powder metallurgy for engineerings***, 10:166-187 (1970).

6. Kato, T., Akira, M., "The wear of aramid fiber reinforced brake pads", ***Tribology Transactions***, 37: 559-565 (1994).

7. Handa, Y., Kato, T., "Effects of Cu powder, $BaSO_4$ and Cashew Dust on the wear and friction characteristics of outomotive Brake pads", ***Tribology Transactipns***, 39: 346-353 (1996).

8. Gemalmayan, N., "Hava kirliliğinde gizli tehlike asbest", ***Tubitak Bilim ve Teknik Dergisi***, 16: 32-33 (1983).

9. Gemalmayan, N., "Sürtünme malzemelerinin özelliklerinin deneysel incelenmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 30-83 (1984).

10. Tsukeman, S. A., Robert, E.H., Massey, H.S.H., "Powder metallurgy, lecturer in Metallurgy", ***Universty of Sheffield,*** England, 1-9 (1965).

11. Uygur, M. E., "Balata üretim teknolojisi", ***I. Ulusal Toz metalurjisi kongresi,Bildiriler kitapcığı***, Gazi Üniversitesi, Ankara, 6-17 (1996).

12. Libsch, T. A., Rhee, S.K., "Microstructural changes in semimetalic disc brake pads created by low tempereture dynamometer testing", ***Wear***, 46: 208-212 (1978).

13. Liu, T., Rhee, S. K., "High temperature wear of semimetallic disc brake pads", ***Wear***, 46: 213-218 (1978).

14. Topbaş, M. A., "Endüstri malzemeleri", cilt.2, ***Yıldız Üniversitesi Matbaası***, İstanbul, 219-264 (1993).

15. Uygur, M. E., "Toz metalurjisi seminer notları", ***SEGEM***, İstanbul, 3-9 (1986).

16. German, R. M., "Powder metallurgy science", ***Metal powder industries federation***, Princeton, 3: 84-125 (1994).

17. Roll, K.H., "History of powder metallurgy, Metals Handbook, 9th edition", ***ASM Metals park***, Ohio, 7: 1-110 (1984).

18. Öveçoğlu, M. L., "Toz metalurjisi tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğilimler", ***9. Uluslararası metalurji ve malzeme kongresi***, İstanbul, Türkiye, 449-475 (1997).

19. German, R.M., "The fundamental principles of powder metallurgy", ***Powder metallurgy, papers/powder metallurgy.html***, 1-7 (1997).

20. Kurt, A., "Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri", Yüksek lisans tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 20-55 (1992).

21. Ekşi, A., "Metal tozu üretim teknikleri", ***Endüstriyel Teknoloji***, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 2: 2 (1996).

22. Ersümer, A., "Toz metalurjisi sert metal sinterleme", ***İstanbul Üniversitesi matbaası***, Gümüşsuyu, İstanbul, 35-50 (1970).

23. Lawley, A., and Apelian, D., "Process Control in Powder Metallurgy", Advances in Powder Metallurgy,-1990, Compiled by E.R. Andreotti and P.J. McGeehan, ***Metal Powder Industries Federation***, Princeton, N.J., 3: 6 (1990).

24. Kara, H., Çelebi, İ. M., Aslanoğlu, Z., Öveçoğlu, M. L., "Elementel volfram ve karbon tozlarının mekanik alaşımlama, sinterleme süreçleri ve karakterizasyonu", ***8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi***, İstanbul, Türkiye, 607-613 (1995).

25. Tanberk, O., "Toz metalurjisinde Türkiye'nin yeri", ***9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi***, İstanbul, Türkiye, 11-15 (1997).

26. Powder Metallurgy industry *"http://www.mpif.org/indust.html"*, Facts, 1-3 (14.11.1997).

27. Uygur, M. E., "Toz metalurjisi ekonomik bir üretim tekniği", ***1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı***, Gazi Üniversitesi, Ankara, 477-484 (1996).

28. Uygur, E.M., "Metal tozlarının imali", ***ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi***, Ankara, 2: 5 (1979).

29. Wakelin, R.J. "Tribology: The friction, lubrication, and wear of moving parts" ***Annual Review of Materials Science***, 4: 221-53 (1974).

30. Szeri, A.Z., McGraw, Hill, "Tribology (Friction, Wear, Lubrication)", ***Hemisphere pab.***, Washington, 1: 30-75 (1980).

31. Yılmaz, F., "Sürtünme ve aşınma", ***9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi***, İstanbul, Türkiye, 229-247 (1997).

32. Ashby, M.F. and Jones, D.R.H. "Engineering materials 1, 2nd edition", ***Butterworth,*** Heineman 1: 295 (1996).

33. Gediktaş, M., "Sürtünme malzemelerinin deneysel tayini", ***İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası***, Gümüşsuyu, İstanbul, 10-80 (1968).

34. Holinski, R., "Fundamentals of dry friction and some practical examples", ***Industrial Lubrication and tribology***, 53: 61-65 (2001).

35. Persson, B.N.J., "Theory of Friction", ***The American Physical Society***, 50: 47-71 (1994).

36. Tabor, D., "Friction as a dissipated process. Friction of organic polymers in fundamentals of friction", ***Macroscopic and Microscopik Processes***, 220: 3 (1996) .

37. Moore, D.F., "Princippless and Application Tribology", ***Pergamon Press***, Oxford, 109-156 (1975).

38. Kayalı, E. S., "Aşınma ve kaplı takımların aşınması", ***Nato-TU PVD kaplamaları projesi***, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 5-18 (1996).

39. Fedorchesco, I. M., Kıryachek, V. M., "New sintered friction materials", ***Friction and Antifriction Materials***, 4: 139-142 (1970).

40. Alision, V.V., Krogelsky, I.V., "Tribology Handbook", ***Pergamon Press***, Oxford, 2: 35-56 (1981).

41. Tuç, B., "Tribology", ***Basılmamış Ders Notları***, *Gazi Üniversitesi*, Ankara. (2003).

42. Kjeldsteen, P., Trilk, N., "Wear map production on P/M materials and the defination of transition", ***The Danish for Powder Metallurgy***, Nordborg, Denmark, 50-110 (1995)

43. Trilk, N. C., Eyre, T. S., "Tribology Methodology", ***Brunel University***, Kingston Lane, Uxbridge, U.K., 114-145 (1993).

44. Halling., J., "Princippless of Tribology", ***The Macmillian Press Ltd.*** America, 83-98 (1983).

45. Thimmler, F., Oberacker, R., "Introduction to powder metallurgy" , ***Printed and Bound in Great Britain at the University Press***, Cambridge, 99-126 (1993).

46. Testing for materials selection, "Advanced materials and processes", ***International Journal of Fatigue,*** 13: 99-191 (1991).

47. Bedge, D. and Starcevic, J., Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes, ***Wear,*** 254: 195-202 (2003).

48. Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., "Engineering Tribology", ***Heineman***, Boston, 1: 36-44 (2001).

49. Rigney, D.A., "Sliding wear of metals", ***Ann. Rev. Mater. Sci.***, 18: 141-63 (1988).

50. Godet, M., "The third-body approach: A mechanical view of wear", ***Wear***, 100: 437-52 (1984).

51. Sasada, T., Oike, M., Emori, N., "The effect of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear" ***Wear***, 97: 291-302 (1984).

52. TSE- 555, "Automotive brake lining for road vehicles", ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 6-33 (1992).

53. Boz, M., "Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 60-85 (1999).

54. Klar, E., "Powder metallurgy, Metals Handbook 9th edition", ***by the American Society for Metals***, USA., 25: 1-14 (1983).

55. Arnold, E., Anderson, "Friction, Lubrication and Wear Technology" ***ASM Handbook,*** 18: 569-577 (1983).

56. Demirsoy, M., "Balatalar", ***Mühendis ve Makina***, Ankara, 17(189): 157-170, (1973)

57. Yasushi, M., Yoshiaki, K., Ryoukou, A., "A Study on the Friction Characteristics and Durability of Band Brakes", ***JSAE Reviev***, 16: 245-249 (1995).

58. Fedorchesco, I. M., Pamaioti, I.I., Derkacheva, G.M., Dzykovich, I.Y., Gordon, G.N., "Studies of friction materials", ***Friction and Antifriction Materials***, N.Y., London, 139-150 (1970).

59. Geçkinli, A. E., "İleri Teknoloji Malzemeleri", ***Teknik Üniversite Matbaası***, Gümüşsuyu, İstanbul, 20-50 (1992).

60. Gilchrıst, J.D., " The Origins of Ores", Extraction Metallurgy, 3rd Edition, ***Pergamon Pres***, Oxford, 7-24 (1989).

61. Glaeser, W.A., "Friction and Wear of Ceramics", ***ASM Handbook***, 18: 812-815 (1993).

62. Mimaroğlu, A., Çalışkan, M., Calli, I., "Evaluation of sintering temperature and tribological properties of ceramic materials with Cr_2O_3, SiO_2 and MnO_2 additive compounds", ***Industrial Lubrication and Tribology***, 53: 192-197 (2001).

63. Dalal, H.M., Chiu, Y.P. and Rabinovicz, C.Z., "Evaluation of hot pressed silicon nitride as a rolling bearing material", ***ASLE Trans.***, 18: 211-14 (1975).

64. Mimaroğlu, A. And Yılmaz, F., "Influence of carbide size, hardness and temperature on sliding friction and wear of a boundary lubricated high speed steel and Si_3N_4 ceramics", ***Stle***, 40: 173-77 (1997).

65. Childs, T.C.T. and Parker, I.K., "The friction cutting of sialon and silicon nitride ceramics", ***Proc. Japan Int. Trib. Conf.***, Nagoya, Japan, Pages 373-378 (1990).

66. Ajayi, O.O. and Ludema, K.C., "The effect of microstructure on wear modes of ceramic materials, proceedings of the ınternational conference on wear of materials", ***American Society of Mechanical Engineers***, 307-318 (1991).

67. Zawrah, M.F., Schneıder, J. and Zum Gahr, K.H., "Friction and wear of surface alloyed alumina ceramics", ***Industrial Ceramics***, 22: 107-114 (2002).

68. Zum Gahr, K.H., Modeling and microstructural modification of alumina ceramik for ımproved tribological properties, ***Wear***, 200: 215-224 (1996).

69. Zum Gahr, K.H., Bagdanow, C.H. and Schneıder, J., "Friction and wear reduction of Al_2O_3 ceramics by laser-induced surface alloying", ***Wear***, 181: 118-128 (1995).

70. Habig, K.H. and Woydt, M., "Sliding friction and wear of Al_2O_3, ZrO_2 Si_3N_4, Proc.", 5th ***Innternational Cong. On Tribology***, Finland, 3: 106-113 (1989).

71. Kato, K., "Ceramic friction and wear mechanism", ***Tribology***, 35:133-144 (1989).

72. Wang, Y.S., Hsu, S.M. and Munro, R.G., "Ceramic wear maps: Alumina", ***Lubrication Engineering***, 47: 63-69 (1991).

73. Habig, K.H., "Sliding wear of ceramic-caramic, ceramic-steel and steel-steel pairs in lubricated and unlubricated contact", ***Wear***, 133: 1-22 (1989).

74. Vaughn, R.A. and Ball, A., "The effect of hardness and toughness on the erosion of ceramic and ultrahard materials", ***American Society of Mechanical Engineers***, 71-75 (1991).

75. Severin, E. and Dörsch, S., "Friction mechanism in industrial brakes", ***Wear***, 249: 771-779 (2001).

76. Lee, K. and Barber, J.R., "An experimental investigation of frictionally excited thermoelastic instability in automotive disk brakes under a drag brake application", ***Trans. ASME J. Tribology***, 116: 409- 414 (1993).

77. Österle, W., Griepentrog, M., Gross, Th., Urban, I., "Chemical and microstructural changes induced by friction and wear of brakes", ***Wear***, 251, 1469-1476 (2001).

78. Ericsson, M., Bergman, F., Jacobson, S., "On the nature of tribolojical contact automotive brakes" ***Wear***, 252: 26-36 (2002).

79. Ostermeyer, G.P., "On the dynamics of the friction coefficient", ***Wear***, 254:852-858 (2003).

80. Kato, K., "Tribology of caramics", ***Wear***, 136: 117-133 (1990).

81. Wirth, A., Eggleston, D., Whitaker, R., "A fundamental tribochemical study of the body layer formed during automotive friction braking" ***Wear***, 179: 75-81 (1994).

82. Bettge, D., Starcevic, J., "Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes" ***Wear***, 254: 195-202 (2003).

83. Ravikiran, A., Jahanmir, S., "Effect of contact pressure and load on wear of alumina", ***Wear***, 251: 980-984 (2001).

84. Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., "Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions", ***Wear***, 232: 163-167(1999).

85. Kapoor, A., Johnson, K.L., Williams, J.A., "Amodel for the mild ratchetting wear of metals", ***Wear***, 200: 38-44 (1996).

86. Arık, A., Kadir, S., Sarıtaş, S., "Kahverengi sepiyolitin sıcaklığa bağlı plarak dönüşümlerinin ve refrakterlik özelliğinin araştırılması", ***Journal of Engineering and Environmental Sciences***, Türkiye, 20: 233-244 (1996).

87. Centers, P. W. and Price, F. D., "Tribological performance of MoS_2 compacts containing sulfur, Sb_2S_3 or Sb_2S_4", ***Wear***, 129:205-213 (1989).

88. Jang, H., Kim, S. J., "The effect of antimony trisulfide (Sb_2S_3) and zirconium silicate ($ZrSiO_4$) in the automotive brake friction material on friction characteristics", ***Wear***, 239: 229-236 (2000).

89. Anderson, A.E., "Friction, lubrication and wear technology", ***ASM Handbook***, 18: 569-577 (1992).

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Erzurum'un İspir ilçesinde doğdu. İlk Öğrenimini İspir Yatılı İlk Öğretim Bölge Okulu'nda, Lise öğrenimini İspir Yatılı Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1991 yılında başlamış olduğu Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Metal Öğretmenliği Programını 1995 yılında bitirdi. Mezuniyetine müteakip, Milli Eğitim Bakanlığı'na bağlı Bilecik Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nde 1 yıl görev yaptı. 1997 yılında Z.K.Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevine devam etmektedir. Evli ve Emirhan isminde bir erkek çocuk babasıdır.