



**ORGANİK FREN BALATALARINDA KULLANILAN METAL
TOZLARININ AŞINMA VE SÜRTÜNME PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

İrem Burcu ALGAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2015

İrem Burcu ALGAN tarafından hazırlanan “ORGANİK FREN BALATALARINDA KULLANILAN METAL TOZLARININ AŞINMA VE SÜRTÜNME PERFORMANSININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği’nde YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adem KURT

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin Serdar YÜCESU

Otomotiv Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Halil ARIK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Mustafa BOZ

İmalat Mühendisliği, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Ferhat GÜL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 16/04/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İrem Burcu ALGAN

26/04/2015

ORGANİK FREN BALATALARINDA KULLANILAN METAL TOZLARININ AŞINMA VE SÜRTÜNME PERFORMANSININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İrem Burcu ALGAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2015

ÖZET

Bu çalışmada, asbest içermeyen organik esaslı fren balatası kompozisyonu içerisine belli boraks tozu, bakır ve bronz fiberler katılarak, katkı türü ve miktarının, balatanın sürtünme ve aşınma davranışına etkileri incelenmiştir. İlk olarak, ticarî kullanımdaki organik esaslı balata kompozisyonuna, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak, ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranında boraks tozu; % 1,5; 3; 4,5; ve 6 oranında bakır ve bronz fiber ilave edilerek üç farklı numune grubu oluşturulmuş, kullanılan tozlar endüstriyel tipteki özel üretim mikserinde üç dakika karıştırıldıktan sonra, 15 MPa basınç altında preslenmiş ve ardından 185°C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Üretilen numunelerin, chase tipi sürtünme-aşınma test cihazında deneyleri yapıldıktan sonra, aşınma yüzeyleri elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiş ve ardından sertlik değerleri ölçülmüştür. Yapılan testler sonucunda, boraks tozu katkısının, sürtünme katsayısı değerlerini geliştirmediği fakat balatanın aşınma direncini yüksek oranda arttırdığı; bakır ve bronz fiber katkılarının ise yüksek termal iletkenlikleri ve içerdikleri inklüzyonlar sayesinde, metal katkısı arttırıldıkça balatanın sürtünme katsayısını, endüstrinin ihtiyacını karşılayacak oranlarda arttırdıkları, buna karşın aşınma direncini bir miktar azalttıkları görülmüştür. Boraks tozu katkılı numunelerde en yüksek aşınma direnci sonuçları ağırlıkça % 3 boraks katkılı numunede; bakır ve bronz fiber katkılı numunelerde ise en yüksek sürtünme katsayısı değeri ağırlıkça % 6 bakır ve % 6 bronz fiber katkılı numunelerde elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 915.3.019

Anahtar Kelimeler : Organik fren balatası, aşınma direnci, sürtünme katsayısı

Sayfa Adedi : 92

Danışman : Prof. Dr. Adem KURT

INVESTIGATION OF WEAR AND FRICTION PERFORMANCE OF METAL
POWDERS IN ORGANIC BRAKE PADS

(M. Sc. Thesis)

İrem Burcu ALGAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2015

ABSTRACT

In this study, borax powders, copper and bronze fibers were added in non-asbestos organic brake lining composition, for the purpose of to examine, the effects of additive type and quantity on friction and wear characteristic of brake linings. First of all, three different specimen groups were developed by powder metallurgy method that contain 1, 3 and 5 % borax powder by weight; contain 1,5; 3; 4,5 and 6 % copper and bronze fibers by weight. The mixtures were blended with industrial type mixer for three minutes than were pressed under 15 MPa pressure and eventually they were post sintered at 185°C. After the chase type friction-wear tests, specimens' friction surfaces were analized with scanning electron microscope (SEM), then, were tested their hardness values. As a result of tests, borax powder addition didn't improve the friction coefficient values of brake lining, however, it developed the wear resistance were investigated. Because of inclusions and higher thermal conductivities of copper and bronze fibers, friction coefficient values increased with increasing metallic content and that values provide for industry, however, wear resistance decreased. It was concluded that, the specimen that contains 3 % borax powder by weight has the highest wear resistance; specimens that contain 6 % copper and bronze fibers by weight have highest friction coefficient values were investigated. As a result of this study, borax powder addition is develop to wear resistance was investigated, 6 % and above metallic fibers addition in brake lining composition is improve and increase to friction coefficients is thought.

Science Code : 915.3.019

Key Words : Organic brake pads, wear resistance, friction coefficient

Page Number : 92

Supervisor : Prof. Dr. Adem KURT

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, her daim bana yol göstererek, teşvik ve desteklerini esirgemedi, engin bilgi birikimi ve tecrübelerini benimle paylaşan; hayata ve insanlığa dair değerli öğütler veren kıymetli danışmanım Prof. Dr. Adem KURT'a sevgi, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında, numunelerimi üretirken malzeme ve teçhizat desteğini esirgemeyerek bana her konuda yardımcı olan, Eren Balata Firma ortaklarından Sayın Sinan UZUN ve AR-GE Bölümü'nden Sayın Onur ÖZCAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım süresince karşılaştığım sorunların çözümünde, yardım ve destekleriyle beni yalnız bırakmayan sevgili arkadaşlarım Elif Selen ATMACA, Arş. Gör. Yasemin AKSU ve Uzman Dr. Meryem POLAT GÖNÜLLÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Geçirdiğim zorlu dönemde dostluğunu, sevgisini ve desteğini hep yanımda hissettiğim kardeşim ve değerli dostum Gamze İŞERİ'ye teşekkür ederim.

Akademik hayatımda geçirdiğim zorlu süreçlerde hep yanımda olan, anlayış ve desteğini esirgemeyen kıymetli yol arkadaşım Oğuzhan ŞİMŞEK'e teşekkür ederim.

Doğduğum günden bu yana beni karşılıksız seven, maddi ve manevî desteklerini, fedakârlıklarını esirgemeyerek yaşadığım her türlü zorlukta ve mutluluklarımda yanımda olan, yol göstererek beni aydınlatan en değerli varlıklarım, annem Meral ve babam Erkan ALGAN'a sabır ve anlayışlarından dolayı teşekkür eder, bu zamana kadar yaptığım tüm çalışmaları ve yapacaklarımı kıymetli aileme ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. FREN BALATALARI.....	3
2.1. Metalik Esaslı Fren Balataları.....	5
2.2. Karbon Esaslı Fren Balataları.....	5
2.3. Organik Balatalar.....	5
3. BALATA BİLEŞENLERİ VE FONKSİYONLARI.....	7
3.1. Bağlayıcılar.....	7
3.2. Takviye Ediciler.....	7
3.2.1.Cam Elyaf.....	7
3.2.2. Metalik fiberler.....	8
3.2.3. Seramik fiberler.....	8
3.2.4. Aramid fiberler.....	9
3.3. Sürtünme Ayarlayıcılar.....	9
3.3.1. Yağlayıcılar.....	9
3.3.2. Abrasifler.....	10

	Sayfa
3.4. Dolgu Malzemeleri.....	10
4. TRİBOLOJİ.....	13
4.1. Sürtünme.....	13
4.1.1. Sürtünmenin tanımı.....	13
4.1.2. Sürtünme teorileri ve sürtünme katsayısı.....	13
4.1.3. Sürtünme mekanizmaları.....	15
4.2. Aşınma ve Aşınma Türleri.....	15
4.2.1. Adheziv aşınma.....	15
4.2.2. Abraziv aşınma.....	16
4.2.3. Erozyon aşınması.....	17
4.2.4. Korozyon aşınması.....	17
4.2.5. Yorulma aşınması.....	18
4.3. Sürtünme-Aşınma Deneyleri ve Aşınma Ölçüm Yöntemleri.....	18
4.3.1. Sürtünme-aşınma deneyleri.....	18
4.3.2. Aşınma ölçüm yöntemleri.....	22
5. TOZ METALURJİSİNDE PARÇA ÜRETİM SÜRECİ.....	25
5.1. Harmanlama.....	25
5.2. Presleme.....	25
5.3. Sinterleme.....	27
5.4. Sinterleme Sonrası İşlemler.....	29
6. LİTERATÜR TARAMASI.....	31
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
7.1. Malzeme ve Metot.....	37
7.2. Numunelerin Üretimi.....	37

Sayfa

7.3. Chase Tipi Sürtünme-Aşınma Testi.....	40
7.4. Sertlik Testi.....	42
7.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	43
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	45
8.1. Sürtünme-Aşınma Testi Sonuçları.....	45
8.1.1. Boraks tozu katkılı numunelerin sürtünme-aşınma test sonuçları.....	46
8.1.2. Bakır fiber katkılı numunelerin sürtünme-aşınma test sonuçları.....	51
8.1.3. Bronz fiber katkılı numunelerin sürtünme-aşınma test sonuçları.....	56
8.2. Sertlik Testi Sonuçları.....	61
8.3. SEM ve EDS Analizi Sonuçları.....	64
8.3.1. Katkısız numunenin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	64
8.3.2. Boraks tozu katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	67
8.3.3. Bakır fiber katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	71
8.3.4. Bronz fiber katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizi.....	76
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Üretilen numune grupları ve katkı oranları.....	37
Çizelge 7.2. Organik fren balatası bileşimi.....	38
Çizelge 7.3. Numunelerin katkı türü ve yüzdesine göre yoğunluk değerleri.....	40
Çizelge 8.1. Katkısız numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	66
Çizelge 8.2. % 1 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	69
Çizelge 8.3. % 3 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	69
Çizelge 8.4. % 5 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.	70
Çizelge 8.5. Ağırlıkça % 1, 3 ve 5 boraks tozu katkılı numunelerin bölgesel elementel analiz sonuçları.....	70
Çizelge 8.6. % 1,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	73
Çizelge 8.7. % 3 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	74
Çizelge 8.8. % 4,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	74
Çizelge 8.9. % 6 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	75
Çizelge 8.10. Ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 bakır fiber katkılı numunelerin bölgesel elementel analiz sonuçları.....	76
Çizelge 8.11. % 1,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	78
Çizelge 8.12. % 3 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	79
Çizelge 8.13. % 4,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	79

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.14. % 6 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları.....	80
Çizelge 8.15. Ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 bronz fiber katkılı numunelerin bölgesel elementel analiz sonuçları.....	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kampana fren sistemi	4
Şekil 2.2. Disk fren sistemi	4
Şekil 4.1. Kuru kayma boyunca kafesin elastik deformasyonu	13
Şekil 4.2. Sürtünme katsayısının tanımı	14
Şekil 4.3. Adheziv aşınma modeli	16
Şekil 4.4. Abrasiv aşınma	16
Şekil 4.5. Erozyon aşınması.....	17
Şekil 4.6. Sekiz genel tipte tribometre cihazı.....	20
Şekil 4.7. Chase tipi aşınma test cihazı.....	21
Şekil 4.8. Kare piramit uç çentiği.....	23
Şekil 5.1. Sıkıştırma esnasında yoğunluktaki değişim.....	26
Şekil 5.2. Otomatik mekanik pres.....	27
Şekil 5.3. Sinterlemenin 4 evresi: a) başlangıç, b) ilk, c) ileri ve d) son evre.....	28
Şekil 6.1. Organik balata ve fren diski arasındaki sistematik temas durumu.....	36
Şekil 8.1. Boraks tozu katkılı numunelerin fade aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği.....	47
Şekil 8.2. Boraks tozu katkılı numunelerin recovery aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği.....	48
Şekil 8.3. Boraks tozu katkılı numunelerin μ -fade ve μ -recovery değerleri.....	49
Şekil 8.4. Boraks tozu katkılı numunelerin % fade ve % recovery oranları.....	49
Şekil 8.5. Boraks tozu katkılı numunelerin normal ve sıcak sürtünme katsayısı grafiği	50
Şekil 8.6. Boraks tozu katkılı numunelerin ilave oranına göre % kalınlık kaybı ve aşınma oranları.....	51
Şekil 8.7. Bakır fiber katkılı numunelerin fade aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği.....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 8.8. Bakır fiber katkılı numunelerin recovery aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği.....	53
Şekil 8.9. Bakır fiber katkılı numunelerin μ -fade ve μ -recovery değerleri.....	54
Şekil 8.10. Bakır fiber katkılı numunelerin % fade ve % recovery oranları.....	54
Şekil 8.11. Bakır fiber katkılı numunelerin normal ve sıcak sürtünme katsayısı grafiği	55
Şekil 8.12. Bakır fiber katkılı numunelerin ilave oranına göre % kalınlık kaybı ve aşınma oranları.....	56
Şekil 8.13. Bronz fiber katkılı numunelerin fade aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği.....	57
Şekil 8.14. Bronz fiber katkılı numunelerin recovery aşamasındaki sürtünme katsayısı ile sıcaklık grafiği.....	58
Şekil 8.15. Bronz fiber katkılı numunelerin μ -fade ve μ -recovery değerleri.....	59
Şekil 8.16. Bronz fiber katkılı numunelerin % fade ve % recovery oranları.....	59
Şekil 8.17. Bronz fiber katkılı numunelerin normal ve sıcak sürtünme katsayısı grafiği	60
Şekil 8.18. Bronz fiber katkılı numunelerin ilave oranına göre % kalınlık kaybı ve aşınma oranları.....	61
Şekil 8.19. Boraks tozu katkılı numunenin ilave oranına göre sertlik değerinde meydana gelen değişim.....	62
Şekil 8.20. Bakır fiber katkılı numunenin ilave oranına göre sertlik değerinde meydana gelen değişim.....	62
Şekil 8.21. Bronz fiber katkılı numunenin ilave oranına göre sertlik değerinde meydana gelen değişim.....	63
Şekil 8.22. Katkısız numunenin EDS görüntüsü.....	65
Şekil 8.23. Katkısız numunenin genel EDS görüntüsü.....	65
Şekil 8.24. Katkısız numunenin sırasıyla 1, 2, 3 ve 4. bölgelerdeki elementel analiz sonuçları.....	66
Şekil 8.25. Ağırlıkça % a) 1, b) 3 ve c) 5 boraks tozu katkılı numunelerin EDS görüntüleri.....	68
Şekil 8.26. % 1 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 8.27. % 3 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	69
Şekil 8.28. % 5 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	70
Şekil 8.29. Ağırlıkça % a) 1,5, b) 3, c) 4,5 ve e) 6 bakır fiber katkılı numunelerin EDS görüntüleri.....	72
Şekil 8.30. % 1,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	73
Şekil 8.31. % 3 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	73
Şekil 8.32. % 4,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	74
Şekil 8.33. % 6 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	75
Şekil 8.34. Ağırlıkça % a) 1,5, b) 3, c) 4,5 ve e) 6 bronz fiber katkılı numunelerin EDS görüntüleri.....	77
Şekil 8.35. %1,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	78
Şekil 8.36. % 3 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	78
Şekil 8.37. 4,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	79
Şekil 8.38. % 6 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü.....	80

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Bronz fiber (solda) ve bakır fiber (sağda).....	8
Resim 4.1. Su verilmiş ve temperlenmiş bir dişli çarkta karıncalanma aşınması.....	18
Resim 4.2. Statik sürtünme deneyi (solda) ve ticarî statik tribometre aparatı (sağda)....	19
Resim 4.3. Pin-on-disk test cihazı.....	21
Resim 7.1. Endüstriyel tip mikser (Eren Balata).....	38
Resim 7.2. Endüstriyel sıcak pres (Eren Balata).....	39
Resim 7.3. Boraks katkılı numuneler	39
Resim 7.4. Chase testi deney düzeneği.....	41
Resim 7.5. Chase testi program çıktısı.....	42
Resim 7.6. Emco test duravision 2000 sertlik ölçme cihazı.....	43
Resim 7.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
μ	Sürtünme katsayısı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
V	Özgül aşınma ($\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)
m_i	Deney öncesi kütle (g)
m_s	Deney sonrası kütle (g)
R_d	Disk çapı (m)
F_m	Ortalama sürtünme kuvveti (N)
n	Devir sayısı
ρ	Yoğunluk (g/cm^3)

Kısaltmalar	Açıklama
FAST	Friction Assesment and Screening Test
SEM	Scanning Electron Microscope
T/M	Toz Metalurjisi

1. GİRİŞ

Motorlu taşıtların fren sistemlerinde çok büyük bir öneme sahip olan endüstriyel fren balataları, birbirinden farklı bileşenler içeren ve toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerdir. Hareket halindeki bir aracın fren pedalına basıldığı anda pedala uygulanan kuvvet, fren pedalı kolunun uzunluğuna göre 3/1 oranında artırılarak basınçlandırılır ve ön ile arka fren sistemine aktarılır. Hidrolik fren yağı sayesinde doğrudan teker frenlerine iletilen bu kuvvet, aracın durması için fren balatalarına baskı yapar ve balata ile disk arasında oluşan sürtünme kuvvetinin etkisiyle araç yavaşlatılarak durdurulur [1]. Fren balatalarının sürtünme kuvveti ve aşınma davranışı; sürüş koşulları, balata formülasyonu, üretim parametreleri, sürtünme malzemesi ile rotor arasındaki ara yüzeyde oluşan sürtünme filmi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak frenleme süresince sürekli değişiklik gösterir. Bu yüzden son on yılda birbirinden farklı kompozisyonlarda yapılan deneysel çalışmalarda, kararlı sürtünme, dayanıklılık, eşit aşınma direnci, tüm frenlemelerde düşük gürültü ve titreşim gibi özellikler sağlanmaya çalışılmıştır [2,3].

Fren balataları, kullanılan takviye malzemesinin türüne göre metalik, yarı-metalik ve asbestsiz-organik esaslı olmak üzere üç şekilde sınıflandırılır. Metalik esaslı balataların kompozisyonunda çelik ve bakır fiber gibi metalik bileşenler ağırlıkça fazlayken; yarı-metalik esaslı balatalar, metalik ve organik tozların karışımı; organik esaslı balatalar ise cam fiber, grafit vb. gibi organik bileşenlerden oluşmaktadır [4]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, hammaddelerinin daha kolay bulunabilmesi, organik fiberlerin diğer fiberlerden daha hafif ve özgül ağırlıklarının daha düşük olması gibi sebeplerden dolayı organik esaslı balataların kullanım oranı artmıştır. Pek çok metal fiber katkılı organik matriksli fren balatası, organik balata olarak adlandırılır ve içerisinde 20-25 çeşit farklı katkı bulundurulur.

Çelik, pirinç ve bakır fiberler gibi metalik fiberlerin balata kompozisyonlarında kullanımı, kayda değer bir avantaj sağlar. Bunun sebebi bu tip fiberlerin, çok yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde, sürtünme yüzeyinde oluşan ısıyı hızlıca uzaklaştırabilmeleridir. Bakır ve bakır alaşımları, yüksek termal yayılım özellikleri ile yüksek sıcaklıklarda sürtünme ara yüzeyinde bakır oksitler oluşturarak sürtünme katsayısını kontrol ederler [5].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını kararlı aralıkta tutan balata kompozisyonlarının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bor ve türevleri, yüksek sıcaklıklarda çözünerek koruyucu bir tabaka oluşturmakta ve yüzeyin oksitlenmesini engellemektedirler. Bu sayede meydana gelen yüksek aşınma dirençleri ile pek çok uygulamada yüksek fiziksel ve mekanik özellikler sergilerler. Yüksek fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı elektronik, iletişim, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü gibi pek çok farklı alanda kullanılan bor ve ürünleri, fren balata bileşimlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bor esaslı bağlayıcılar ve sürtünme ayarlayıcılar kullanılarak yapılan çalışmalarda, bor ürünlerinin balatanın aşınma direncini artırarak frenleme kabiliyetini geliştirdiği, sürtünme katsayısı değerlerini ise belli bir sıcaklığa kadar yükselttiği görülmüştür [6-9].

Bu çalışmada, bor ve türevlerinin yüksek sıcaklıklarda çözünerek koruyucu tabaka oluşturma özelliğinin, sürtünme katsayısı ve aşınma davranışına etkisini incelemek amacıyla, ticarî kullanımdaki asbest içermeyen organik balata kompozisyonuna, ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında boraks tozu katılarak toz metalürjisi yöntemi ile numuneler üretilmiştir. Ayrıca, organik balata kompozisyonuna, metalik malzemelerin türü ve katkı oranlarının sürtünme ve aşınma karakteristiğine etkisini incelemek amacıyla; ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 oranlarında bakır ve bronz fiberler ayrı ayrı katılmıştır. Boraks, bakır ve bronz katılarak üretilen üç farklı numune grubuna, Chase sürtünme-aşınma testi uygulandıktan sonra aşınma yüzeylerinin sertlik ölçümü ve elektron mikroskobu analizi yapılmıştır.

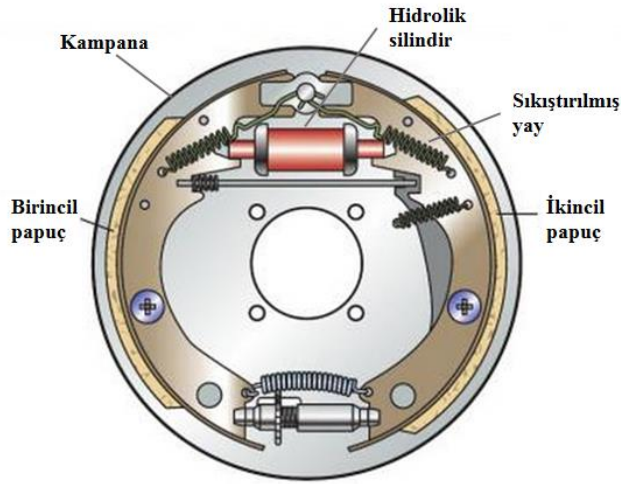
2. FREN BALATALARI

Fren balataları, motorlu taşıtların fren sistemlerinde önemli bir göreve sahiptir. Balatalar, hareketli taşıtın yavaşlama ya da durması için, sürtünme sonucu oluşan kinetik enerjiyle meydana gelen ısıнын transferine yardımcı olurlar. Bu sürtünme elemanları, 10-15 farklı bileşenin bir araya gelmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir ve kullanıldıkları motorlu taşıtın gereksinimlerini karşılamak üzere birbirinden farklı kompozisyonlara sahiptirler. Fren sisteminin en önemli elemanları olan balataların zamanla aşınması ve yıpranması, yalnızca disk ve şaft gibi diğer fren elemanlarına zarar vermekle kalmaz, bunun yanı sıra hayati tehlikelere sebep olur [10].

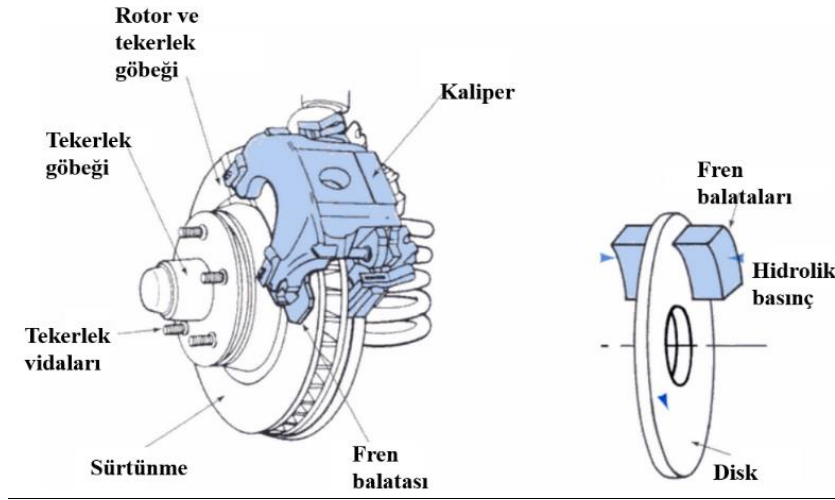
Otomotiv sektöründe kullanılan balatalar, kampana ve disk olmak üzere iki farklı tiptedir. Kampana balatalar, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, tekerleğin çevresini saracak şekilde konumlandırılmıştır ve iç yüzeyinde iki adet yarım daire şeklinde fren pabucu bulunmaktadır. Sürücü fren pedalına bastığı anda, fren silindirinde oluşturulan hidrolik basınç, kablo ekipmanı ile fren pabuçlarına iletilir ve pabuçlar kampananın iç kısmına karşı bir kuvvet uygular. Pabuçların karşı koyma hareketi sonucu oluşan sürtünme kuvveti ile tekerlek yavaşlatılarak durdurulur. Kampana frenlerin en büyük düşmanı, ısıdır. Kapalı dizaynlarından ve tekerlekle sürekli temas halinde olduklarından dolayı, yükselen ısı sistemden kolaylıkla uzaklaştırılamadığı için frenleme performansını önemli derecede düşürürler [11].

1970’lerin başından beri her tür taşıt ve kamyon fren sistemlerinde kullanılan disk balatalar, kampanalara göre daha iyi bir frenleme gücü sağlarlar. Disk fren sisteminde, fren pedalına basıldığında, içi fren sıvısıyla dolu olan silindirler, fren sıvısını kaliperlere iletir (Şekil 2.2.). Kaliperlerin tekerleğin iki tarafındaki disklere hidrolik basıncı iletmesi sonucu disk, tekerleğe basınç uygular ve oluşan sürtünme kuvveti sayesinde teker durdurulur. Disk balataların sürtünme yüzeyleri geniş tasarlandığı ve araç hareket halinde iken daima hava akımına maruz kaldıkları için, oluşan ısıyı sistemden çok daha kolay uzaklaştırırlar. Çoğu disk sisteminde ısıyı daha çabuk uzaklaştırmak amacıyla soğutma kanalları da kullanılır.

Tüm bu özelliklerinden dolayı kampanalara göre daha iyi frenleme gücü ve fade (frenleme kabiliyetinin zayıflaması) direnci sağlarlar [11,13].



Şekil 2.1. Kampana fren sistemi [12]



Şekil 2.2. Disk fren sistemi [13]

Kararlı ve nispeten yüksek sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklık direnci, yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, korozyona dayanıklılık ve hafiflik, balatalardan istenen genel özelliklerdir [14]. Geçmişten günümüze motorlu taşıtların çeşitliliğinin ve sayısının artması, balata kompozisyonlarının değişikliğe uğramasına ve ihtiyaca göre farklı kompozisyonların gelişmesine sebep olmuştur. Böylece balatalar, organik, metalik ve karbon esaslı olmak üzere 3 ana başlık altında toplanmıştır.

2.1. Metalik Esaslı Fren Balataları

Tamamı metallerden oluşmuş malzemeler, yarış araçlarında yıllardır kullanılmaktadır. Metalik balatalar, ısı ve basınçla kalıplanarak şekillendirilen metal tozlarından yapılır. Bu malzemeler, “fade” olarak bilinen frenleme zayıflamasına karşı mükemmel bir dayanım sağlamalarına karşın büyük bir pedal basıncına ihtiyaç duyar ve rotor ile tambur üzerinde çok fazla aşınma meydana getirirler. Oldukça gürültülü çalışan metalik balatalar, tamamen ısınmaya kadar zayıf bir karakteristik sergilerler fakat yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösterirler [15]. Bakır, çelik, bronz, demir, alüminyum ve pirinç gibi fiber ya da partikül şeklindeki çeşitli metaller içerirler ve metalik katkının türüne göre balatanın aşınma ve sürtünme davranışını etkilerler [5,16].

2.2. Karbon Esaslı Fren Balataları

Karbon; elmas, grafit, karbin ve flören gibi her biri birbirinden farklı öneme sahip dört farklı allotropu içeren önemli bir elementtir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek performansın istendiği, ağırlığın kritik olduğu, düşük termal genleşme katsayısına ve yüksek termal iletkenliğe ihtiyaç duyulan askeri, süpersonik, sivil uçaklar, kamyon ve yarış araçlarında tercih edilirler [17]. C/C fren balataları, geleneksel balata malzemelerinden farklı olarak düşük yoğunluk (yaklaşık 2 g/cm³), yüksek termal şok direnci ve uzun servis ömrü gibi özellikler sergiler. Çok sayıda enstitü ve sanayi kuruluşu, üstün özelliklerinden dolayı C/C esaslı kompozitlerin fren balataları ve fren diskleri olarak kullanımına yönelik araştırmalar yapmaktadır. Stuttgart Üniversitesi ve Alman Havacılık Merkezi’nden pek çok araştırmacı, 1990’ların ortalarından beri C/C-SiC kompozitlerin sürtünme uygulamalarıyla ilgili çalışmaktadırlar. Araştırmacılar, 911 Turbo of Porsche ve Audi A8 otomobillerinde kullanılan C/C - SiC fren balatası kompozisyonu geliştirmişlerdir [18].

2.3. Organik Balatalar

Organik balatalar genellikle demir dışı metaller, kevlar, cam yünü gibi organik / inorganik fiberlerden oluşan kompozit malzemelerdir. Bu balatalar iyi aşınma direnci, düşük gürültü ve toz özellikleri ile binek araçlarda kullanıma uygundur. Geçmişte organik balataların temel maddesi olarak kullanılan asbest, insan sağlığına zararlı kanserojenler içerdiği için günümüz balata formülasyonlarında yer almamaktadır. Organik balatalar, yüksek sürtünme

katsayısına, düşük aşınma oranlarına sahip, gürültüsüz çalışan, hammaddeleri kolayca elde edilebilen, ekonomik türde balatalardır. Buna karşın frenleme zayıflaması (fade), diğer türlere göre daha hızlıdır ve yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösteremezler [15,19,20]. Üç çeşit organik balatadan söz edilebilir:

- Asbestli organik balatalar,
- Asbestsiz (non asbestos) organik balatalar,
- Yarı metalik organik balatalar

Doğal bir silikat minerali olan asbest; 500°C üstünde termal kararlılığa sahiptir, kullanım sırasında sürtünme yüzeyinin yeniden oluşmasını ve termal yalıtım sağlar, güçlü ama esnek yapıdadır, maliyeti düşüktür ve oluşturduğu silikatlar daha sert ve aşındırıcı özelliktedir. Lifli yapısı 1400°C'ye kadar bozulmaz. Asbest oranı, fren balatası kompozisyonunda % 30–70 arasında değişir [21]. Solunum yoluyla vücuda giren asbest liflerinin, üst solunum yollarında sebep olduğu kanserojen etkilerin anlaşılması üzerine, kullanımı yasaklanmıştır. Avrupa Birliği'nin 1999 yılında asbest kullanımını yasaklaması ile birlikte balata kompozisyonlarında asbeste alternatif malzemeler araştırılmaya başlanmış ve cam, metal, seramik, grafit, kauçuk, mineral fiberler gibi malzemeler kullanılarak yeni balata formülasyonları oluşturulmuştur. Örneğin asbest yerine yaygın olarak kullanılan kevlar; sert, lifli ve oldukça hafif olmasının yanında mükemmel termal kararlılık sergilemektedir. Kevlar ve karbon fiberler, asbestle karşılaştırıldığında üstün anti-fade özelliği göstermektedirler [4,22].

Yarı-metalik balatalar ise organik ve sentetik fiberlerin karışımından oluşurlar ve diğer organik balatalardan daha yüksek sertlik ve fade direnci sergilerler. Yarı-metalik sürtünme malzemeleri % 20–80 oranında metal takviyesi içerirler. En çok kullanılan metaller, çelik, demir tozu, bakır tozu, bakır fiber ve pirinç fiberdir. Kullanılan bu metallerin sürtünme prosesine etkisi karmaşıktır ve balatanın bileşimi ile ilgilidir [23].

3. BALATA BİLEŞENLERİ VE FONKSİYONLARI

Balata kompozisyonunu oluşturan bileşenler, fonksiyonlarına göre bağlayıcılar, sürtünme ayarlayıcılar, takviye ediciler ve dolgu malzemeleri olarak dört ayrı grupta incelenir [24,25].

3.1. Bağlayıcılar

Bağlayıcılar, sürtünme malzemelerinin en önemli bileşenlerinden biridir. Balatayı oluşturan bileşenleri bir arada tutar ve termal olarak kararlı bir matriks oluşturur. En yaygın kullanımda olan fenolik reçine, fenol ve formaldehitin yoğunlaşma reaksiyonu sonucu oluşan bir polimerdir. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında termoplastik yapısı değişerek yoğun ve çapraz bağlı termoset matrikse dönüşür ve bu yapı nispeten yüksek ısı direnci özelliği kazandırır. Ucuz ve üretimi kolaydır. 450°C'den düşük sıcaklıklarda bozunması, gevrekliği, düşük darbe direnci ve yüksek oranda zehirli olması, fenolik reçinenin dezavantajlarıdır. Reçinenin sinterleme ve diğer aşamalarda sergilediği karakteri, son ürünün özelliklerini doğrudan etkilemektedir. COPNA, silikon, siyanat ester, epoksi ve termoplastik polimid, bağlayıcı olarak kullanılan diğer reçine türleridir [4,26,27].

3.2. Takviye Ediciler

Metal, karbon, cam fiber, kevlar, asbest, çeşitli mineral ve seramik fiberler, balata dayanımını arttırmak amacıyla takviye elemanı olarak kullanılır [28]. Takviye elemanları, balatanın sürtünme-aşınma karakteristiğine doğrudan etki ederek, balatanın performansında önemli bir rol oynarlar.

3.2.1. Cam elyaf

Cam elyafı, eritilmiş haldeki camın küçük deliklerden akıtılması ile elde edilir ve yüksek mukavemeti nedeniyle diğer malzemelerle birleştirilerek kompozit malzeme üretiminde kullanılır. Tipik bir cam malzemesinin ergime sıcaklığı 1430°C'dir ve bu özelliğiyle ergime noktası 800-850°C olan asbestten daha üstündür. Kırılgan özellikte olmasından dolayı balata bileşiminde tek başına takviye elemanı olarak kullanılamaz [4]. Diğer balata bileşenleriyle kullanıldığında frenleme esnasında balataların ısıl şişmesini önler [29].

3.2.2. Metal fiberler

Çelik, bakır, demir, pirinç ve bronz gibi metalik fiberler, sahip oldukları yüksek ısı iletkenlikten dolayı, sürtünme yüzeylerinden ısının hızla uzaklaştırılmasını sağlarlar. Metal fiberlerin ergime noktaları genellikle 1000°C üzerindedir. Çelik fiberler; iyi aşınma dayanımı sağlarlar ve yüksek sıcaklıklarda sürtünme etkinliğini sürdürürler fakat bunun yanı sıra yüksek sertlikleri ve çelik ile gri dökme demir arasındaki metalik adhezyon sebebiyle aşırı disk aşınmasına ve disk kalınlığının değişmesine sebep olurlar. Bakır ve bakır alaşımları, sürtünme ara yüzeylerinde termal difüzyonu sağlamak amacıyla eklenirler ve karşı yüzeyin agresif özelliğini önleyerek sürtünme seviyesini kontrol ederler [5]. Resim 3.1., deneysel çalışmada kullanılan bronz ve bakır fiberleri göstermektedir.



Resim 3.1. Bronz fiber (solda) ve bakır fiber (sağda)

3.2.3. Seramik fiberler

Seramik fiberler, alüminyum oksit gibi çeşitli metal oksitler ve bunun yanı sıra silikon karpit gibi karpitlerdir. Ergime noktaları 1850°C - 3000°C arasındadır ve bu yüzden termal dayanımları yüksektir. Hafif ve yüksek dayanımlı olmaları, metalik fiberlerden üstün özellikleridir. Bu yüzden sadece fren balatalarında değil, fren disklerinde de takviye amaçlı kullanılırlar [4]

3.2.4. Aramid fiberler

Phenylene-diamine ve terephthaloyl klorid monomer solüsyonunun yoğunlaşma reaksiyonuyla HCl içerisinde çözünmesi sonucu oluşan aramid, lifli ve iplikli yapıdadır. DuPont firması tarafından 1965 yılında icat edilen bu sentetik lif, hafifliği ve sergilediği mükemmel termal kararlılık özellikleriyle, asbestten daha iyi fade direnci sağlar [4]. Aramid fiberlerin doldurma özelliği yüksektir ve bileşimdeki miktarları arttıkça balatanın ısı dayanımı da artar [30].

3.3. Sürtünme Ayarlayıcılar

Sürtünme ayarlayıcı malzemeler, sürtünme ara yüzeylerindeki pirolize sürtünme tabakasını kaldırarak balata üzerindeki aşınmayı ve sürtünme katsayısını kontrol eden bileşenlerdir. Abrasifler ve yağlayıcılar olmak üzere iki alt başlığa ayrılırlar. Abrasifler sürtünme katsayısı ve aşınmayı artırırken; yağlayıcılar bu değerleri azaltır [20].

3.3.1. Yağlayıcılar

Yağlayıcıların kullanımındaki temel sebep, özellikle yüksek sıcaklıklarda frenleme boyunca sürtünme katsayısı değerini dengede tutmaktır. Yaygın kullanılan yağlayıcılar, grafit ve metal sülfidlerdir [31]. Grafit, sürtünmenin olduğu yüzeyde hızlıca yağlayıcı bir tabaka oluşturur ve bu tabaka kararlı bir μ değeri oluşturur [32].

Doğal ya da sentetik kökenli, toz ya da pul şeklinde grafit kullanılabilir. Pul şeklindeki grafit yağlayıcı özellikleri geliştirirken; toz şeklinde grafit, ısının daha etkin bir şekilde yayılmasını sağlar. Bileşimdeki grafit oranı ayarlanırken, grafitin fenolik reçine ile oluşturduğu zayıf bağın düşük kayma dayanımına sebep olduğu unutulmamalıdır [4]. PbS, MoS₂, ZnS gibi metal sülfidler ise grafitten daha düşük iletkenliklere sahiptir ve iyi yağlama özelliği sağlarlar. MoS₂, grafitten daha kolayca metal yüzeylere yapışırken; PbS, rotor aşınması ve gürültüyü azaltır [21].

3.3.2. Abrasifler

Alüminyum oksit, demir oksit, zirkonyum silikat, silika gibi abrasifler, sürtünme yüzeyini temizlerler ve sürtünme filminin oluşumunu kontrol ederek kayma ara yüzeylerinde ısı ayrışma (piroliz) sonucu oluşan sürtünme filmlerini uzaklaştırırlar [21,33]. Sürtünme katsayısını ve aşınma oranlarını arttıran abrasiflerin, en azından karşı sürtünme malzemesini (örneğin dökme demir) aşındıracak kadar sert olması gerekir. Mohs sertlikleri yaklaşık 7-8 civarındadır [4].

3.4. Dolgu Malzemeleri

Dolgu malzemeleri, örneğin takviye ediciler gibi sürtünme malzemesinin karakterinde kritik rol oynamasalar da, balata bileşiminde önemli bir yere sahiptirler. Örneğin, metalik esaslı bir balatanın çok fazla gürültü problemi olduğunda, bileşimdeki mika oranı artırılmalıdır; çünkü mika, iyi bir gürültü gidericidir. Diğer yandan, değişen bir termal genleşme katsayısı sergileyen yarı-metalik bir balatanın çatlamasını önlemek için bileşime molibden trioksit dolgu malzemesi katılır. Dolgu malzemeleri inorganik ve organik olmak üzere iki gruba ayrılır.

Organik dolgular; kaju ve kauçuk gibi malzemelerdir ve sahip oldukları üstün viskoelastik özellik sayesinde gürültüyü ve özellikle yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısındaki dalgalanmaları azaltırlar. Fakat bu partiküller, özellikle de kaju, sürtünme yüzeyinden arkalarında geniş gözenekler bırakarak kolayca dökülebilir. Bunu önlemek için kaju ve kauçuklar, yapıştırıcı bir malzemeyle kaplanır [4].

İnorganik dolgular, baryum sülfat, mika, vermikülit ve kalsiyum karbonattır. Hepsinin ortak özelliği, nispeten yüksek ergime noktalarına sahip olmalarıdır (Örneğin, baryum sülfatın ergime noktası 1350°C'dir.). Baryum sülfat, sürtünme malzemesine ısı kararlılık özelliği kazandırır ve aynı zamanda sürtünme karakteristiğine katkıda bulunur. Kalsiyum karbonat, baryum sülfatla aynı özellikleri taşır, ayrıca iki kat daha ucuzdur fakat yüksek sıcaklıklarda baryum sülfat kadar kararlı değildir.

Bir silikat minerali olan mika, tabakalı yapıya sahiptir, 500°C'ye kadar termal kararlılık gösterir, yalıtıcıdır, kimyasal olarak inerttir. Yalıtkan özelliğinden dolayı elektrik

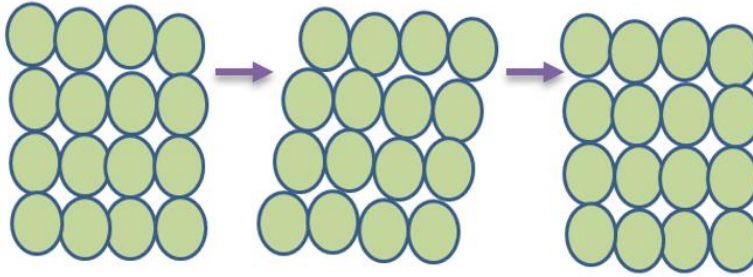
endüstrisinden kapasitörlerde kullanılır. Fren balatalarında gürültüyü azaltıcı etki gösterir [4].

4. TRİBOLOJİ

4.1. Sürtünme

4.1.1. Sürtünmenin tanımı

Sürtünme, DIN 50281'e göre: "Birbiri üzerinde kayan, yuvarlanan veya kaymalı yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan ya da engelleyen mekanik bir dirençtir". Bu mekanik direncin sebebi, birbirine temas eden hareket halindeki yüzeylerin kayması esnasındaki kafes hareketleridir. Temas halindeki ve kristal kafesleri atomik düzeyde denge halinde olan çiftlerden birine kayma gerilmesi uygulanır ise kristal kafesleri elastik deformasyona uğrar (Şekil 4.1.). Bu kaymanın şiddeti arttıkça da kararsızlaşan kafes yapısı yeni bir denge konumuna geçer [34].



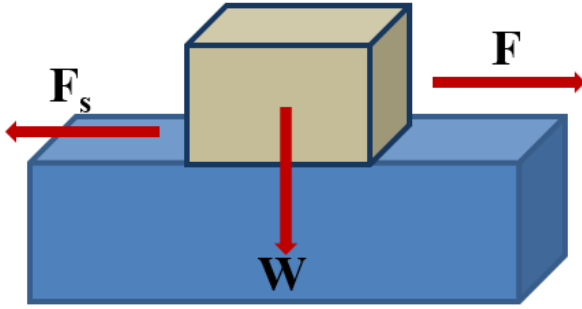
Şekil 4.1. Kuru kayma boyunca kafesin elastik deformasyonu [34]

Bağıl hareketin türü, elemanların fiziksel durumları, ortam şartları, elemanların dışında başka bir madde olup olmadığı gibi nedenler, sürtünme direncini oluşturan parametrelerdir. Hareketin cinsine göre kayma, yuvarlanma, dönme ve çarpma şeklinde sürtünmeler oluşur [35].

4.1.2. Sürtünme teorileri ve sürtünme katsayısı

Sürtünme olayını açıklamak için pek çok teori ileri sürülmüştür. Günlük hayatımızda cisimlerin hareket ettirilmesi, yavaşlatılması ya da durdurulmasında sürtünme prensiplerinden yararlanılmaktadır. Sürtünme ile ilgili ileri sürülen iki temel teoriden biri, Fransız bilimadamı Amontons tarafından ortaya atılmıştır. Amontons'a göre, cisimler

üzerindeki normal yük arttıkça sürtünme kuvveti de artar. Diğer teorinin sahibi Coulomb ise, cismi harekete geçirmek için gerekli kuvvetin, hareketi devam ettirmek için gerekli kuvvetten daha büyük olduğunu ve sürtünme kuvvetinin kayma hızına bağlı olmadığını savunmuştur [35,36].



Şekil 4.2. Sürtünme katsayısının tanımı

Şekil 4.2'deki W ağırlığındaki cisme F kuvveti uygulandığında kayma olmaz. Bunun sebebi, Newton'un etki-tepki prensibine göre, temas bölgesindeki statik sürtünmenin, uygulanan F kuvvetine eşit olmasıdır[35]. Buna göre;

$$F = F_s \quad (4.1)$$

F_s sürtünme kuvveti, bağlı hareket eden ve normal yük altındaki iki cismin sürtünen yüzeyleri arasında, normal kuvvete zıt yönde oluşur.

$$F_s = \mu \times W \quad (4.2)$$

Şekil 4.2'ye göre çıkan sonuçlar şunlardır:

- F_s , geometrik alandan ve kayma hızından bağımsızdır.
- F_s , normal yük ile doğru orantılı olarak değişir.

- Cismi harekete geçirmek için gerekli kuvvet, hareketi sürdürmek için gerekli kuvvetten daha büyüktür.

4.1.3. Sürtünme mekanizmaları

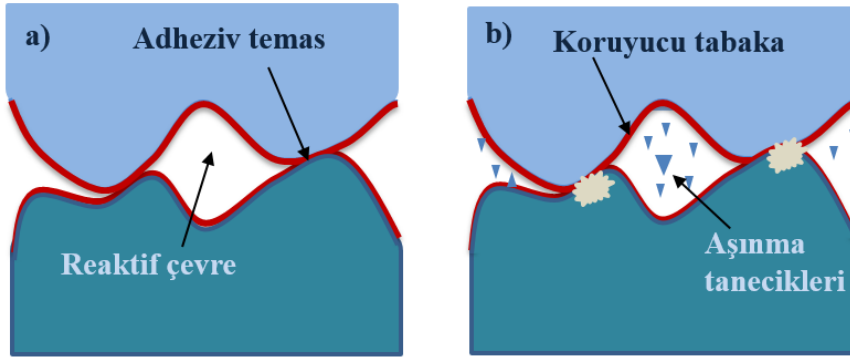
İzafi hareket yapan iki cismin yüzeyleri arasında yağlayıcı bir madde olup olmamasına göre sürtünme mekanizmaları üç çeşittir. Kuru sürtünme; birbirine temas eden hareket halindeki iki cismin yüzeyleri arasında herhangi bir yabancı madde olmadığına görülen sürtünmedir. Yüzeyler arasında yabancı bir madde veya yağlayıcı olması durumunda sıvı sürtünme; sıvı ve kuru sürtünme arasındaki durumda ise yarı sıvı sürtünme görülür [35].

4.2. Aşınma ve Aşınma Türleri

Aşınma; malzemenin yüzeyinde kayma, yuvarlanma, darbe, elektriksel boşalım, tekrarlı şok patlamalar veya düşük / yüksek sıcaklıkta korozif ortam saldırıları gibi etkenlerden birinin ya da birkaçının etkisiyle zamana bağlı olarak ortaya çıkan malzeme kaybıdır. Ortam ve çalışma şartlarına bağlı olarak gelişen beş ana aşınma mekanizması vardır [37].

4.2.1. Adheziv aşınma

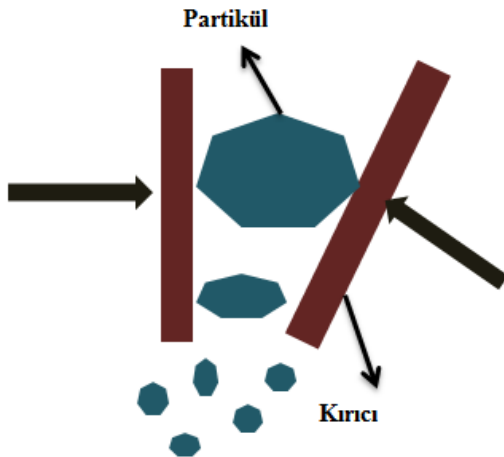
Yüzeyler arasına konulan yağlayıcı madde, yüzeye düzgün bir şekilde yapışarak doğrudan teması engeller. Uygulanan yük ile yağ tabakasının bir kısmı kopar ve küçük temas alanları oluşur. Bu alanlardaki sürtünme ile mikro-kaynak şeklindeki yapışmalar aşınmaya sebep olur (Şekil 4.3.). Temas eden yüzeyler arasında uygun yağ filminin kullanılmaması, aşırı yükleme ve kullanılan yağ filminin özelliğini yitirmesi sonucu ortaya çıkan adheziv aşınmanın, oksidasyon, kazımalı, sürünmeli ve parça kaldırmalı gibi türleri vardır [37].



Şekil 4.3. Adheziv aşınma modeli

4.2.2. Abraziv aşınma

Abraziv aşınma, pürüzlü iki yüzeyin düşük temas basınçlarında birbirini üzerinde yaptığı kayma hareketiyle ya da sert partiküllerin yüzeyden malzeme kaldırması durumunda meydana gelir (Şekil 4.4.). Oyucu, yüksek gerilmeli öğütücü, düşük gerilmeli çizici ve parlatma aşınması olarak dört farklı şekilde meydana gelir [37].

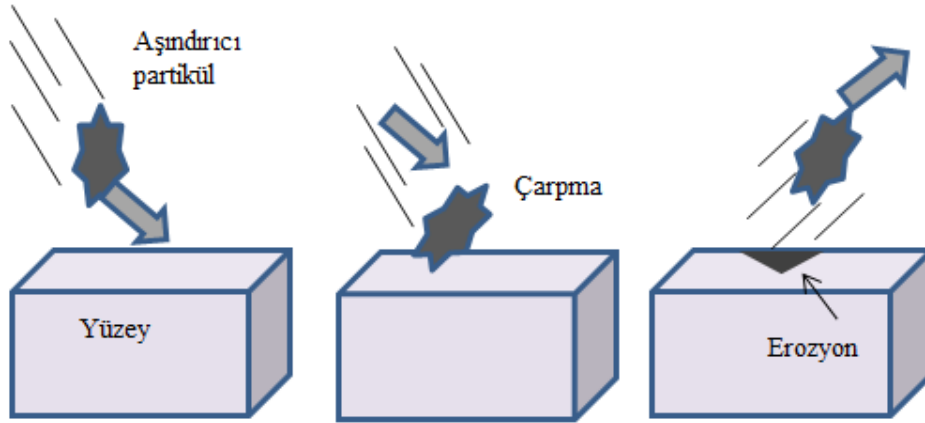


Şekil 4.4. Abraziv aşınma

4.2.3. Erozyon aşınması

Erozyon aşınması birkaç farklı şekilde meydana gelebilir:

- Akışkan ortamdaki partiküllerin, yüksek hızlarla katı yüzeye çarpması (Şekil 4.5.),
- Hareket halindeki sıvı damlaların, yüksek hızlarla katı yüzeye çarparak şok dalgasıyla tahribat etmesi,
- Yüksek hızlı hareket halindeki katının, kendinden daha yavaş su damlalarına tekrarlı çarpması
- Gaz kabarcıklarının yüksek basınçla malzeme yüzeyine çarpması [37].



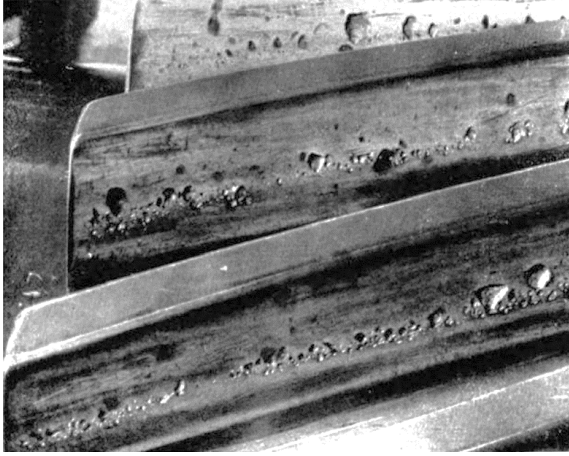
Şekil 4.5. Erozyon aşınması

4.2.4. Korozyon aşınması

Metalik malzemeler, içerdikleri alaşım elementinin cinsine ve miktarına göre bir miktar kadar doğal oksit tabakası içerir ve bu tabaka sayesinde korozif ortamlara direnç gösterirler. Fakat aşındırıcı ortam, metal yüzeyine tekrarlı darbeler uygulayarak bu oksit tabakasını kaldırır. Tekrarlı darbelerin devam etmesi durumunda koruyucu tabakayı oluşturan elementlerin zamanla tükenmesi sonucu yeni tabaka oluşturulamaz ve burada metal yüzeyinin savunmasız kalması sonucunda korozyon aşınması meydana gelir [37].

4.2.5. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması; yüksek basınç altında çalışan parçalarda tekrarlı yükün sayısının artmasıyla, yüzeyin altındaki çatlakların gelişerek yüzeye doğru büyümesi ya da yüzeydeki çatlakların gelişerek yüzey altındaki çatlaklarla birleşmesi sonucu oluşan malzeme kaybıdır. Karıncalanma, oyuklanma, yüzey ayrılması, darbe/şok yükleme ve brinelling aşınması olarak beş farklı türde görülebilir [37]. Resim 4.1’de, su verilmiş ve temperlenmiş bir dişli çarktaki karıncalanma aşınması gösterilmiştir.



Resim 4.1. Su verilmiş ve temperlenmiş bir dişli çarkta karıncalanma aşınması [38]

4.3. Sürtünme-Aşınma Deneyleri ve Aşınma Ölçüm Yöntemleri

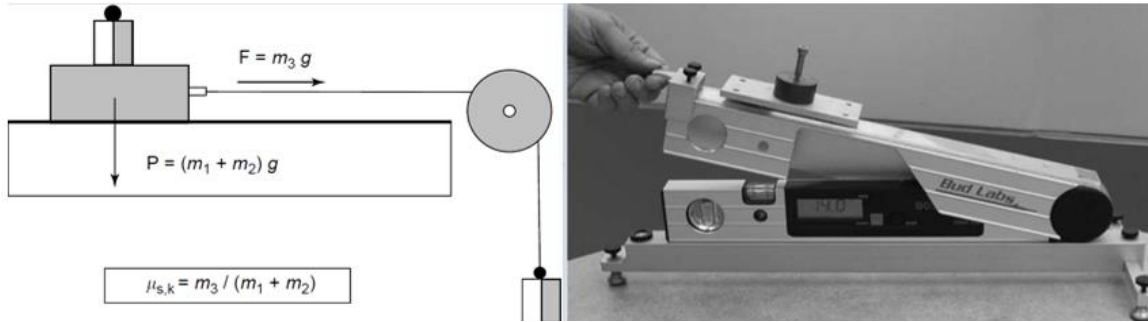
4.3.1. Sürtünme-aşınma deneyleri

Sürtünme-aşınma deneyleri, triboloji alanında birkaç farklı yöntemle yapılır. Sürtünme test metodu ve aparatlarının seçimini dört faktör etkilemektedir:

- Makro-bağlantının geometrisi, sertliği ve titreşim sönümleme davranışı
- Bağıl hareketin türü ve büyüklüğü
- Çevresel şartlar ve sıcaklık kontrolü
- Malzemenin durumu ve hazırlanması

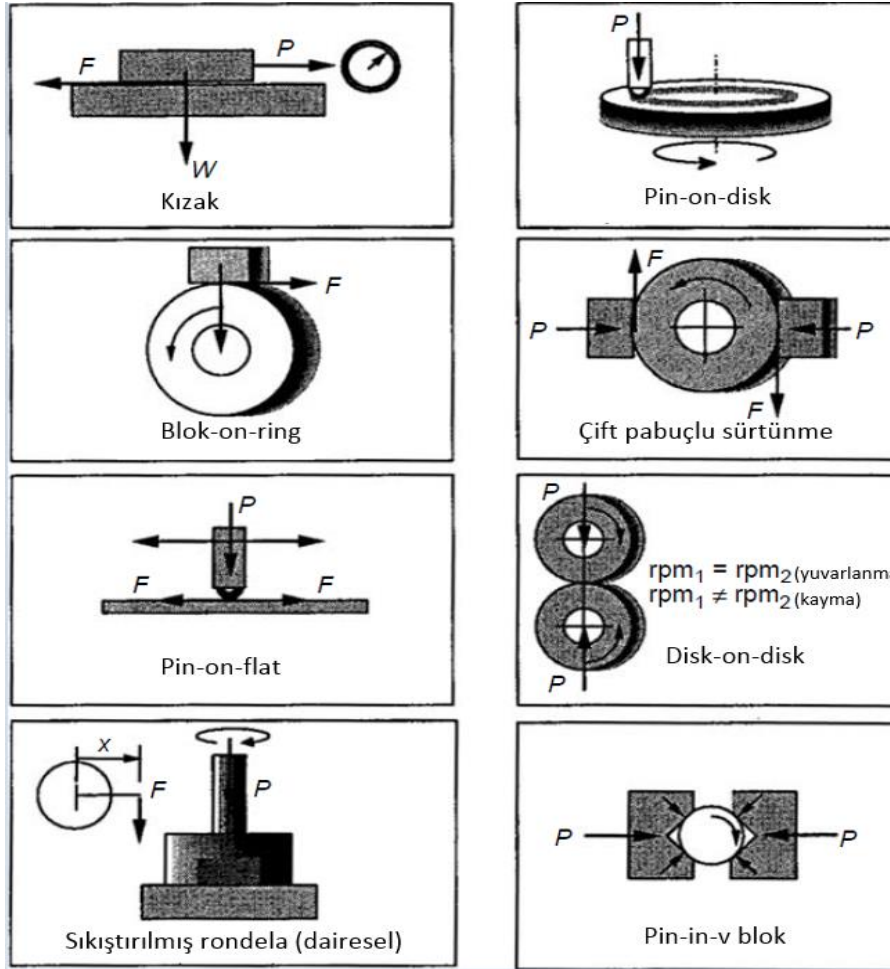
Makro-bağlantı, temas kuvvetinin büyüklüğü ve dağılımını etkilerken; sertlik, kayma hareketini; bağıl hareketin türü, yüzey yapısını ve aşınma döküntülerinin davranışını etkiler [39].

Sürtünme kuvveti, laboratuvar ortamında statik ve kinetik olmak üzere iki şekilde ölçülmektedir. Statik sürtünme deneyleri, Leonardo da Vinci tarafından 500 yıl öncesinde belirlenen esaslara göre yapılmaktadır. Buna göre, bir zemin üzerinde duran P ağırlığındaki cisme, kayma hareketinin oluşmasını sağlayan kasnak yardımıyla m_3 kütleli bir cisim bağlanarak ve meydana gelen sürtünme kuvveti ölçülür. Resim 4.2’de statik sürtünme deneyi esası ve ticarî tribometre aparatı gösterilmiştir [39].



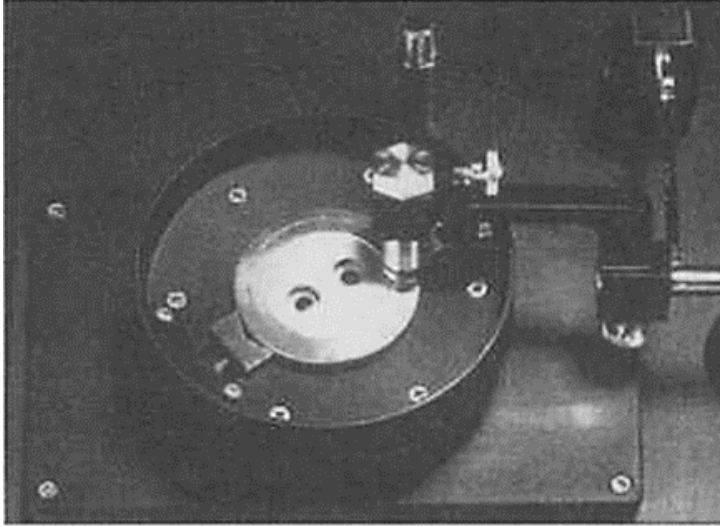
Resim 4.2. Statik sürtünme deneyi (solda) ve ticarî statik tribometre aparatı (sağda) [39]

Sabit hızlı harekete karşı gösterilen dirençle ifade edilen statik sürtünmenin aksine kinetik sürtünme deneylerinde, numuneye uygulanan yükün yönü ve hızı değişmektedir. Resim 4.3’de yaygın olarak kullanılan farklı geometrilerdeki sekiz tip tribometre gösterilmiştir.



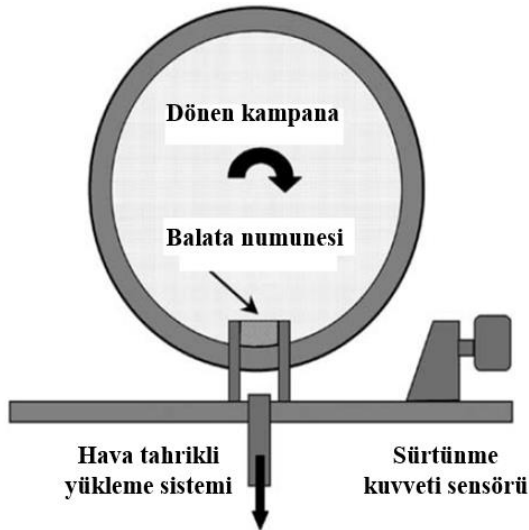
Şekil 4.6. Sekiz genel tipte tribometre cihazı [39]

Fren balatalarının sürtünme testlerinde kullanılan en yaygın yöntemler, pin-on-disk testi, chase testi ile sürtünme değerlendirme ve görüntüleme (friction assessment and screening) testidir. Pin-on-disk testi; ASTM G99-04’de belirtildiği üzere, malzemenin aşınma özelliklerini belirlemek amacıyla, belirli çap ve kalınlıktaki lamel grafitli dökme demir disk üzerine, pim şeklinde hazırlanan numunenin, normal yük, dönme hızı, basınç, sıcaklık gibi parametrelere bağlı olarak, temas ettirilmesi esasına dayanır. Deney süresince sürtünme sebebiyle oluşan sıcaklık, termokupl yardımıyla ölçülür. Test sonunda bilgisayar kontrollü sistem tarafından alınan, “yük (N)-aşınma (W), sıcaklık (T)-aşınma (W), yük (N)-sürtünme katsayısı (μ), sıcaklık (T)-sürtünme katsayısı (μ)” grafikleri ile malzemenin aşınma davranışı tayin edilir. Resim 4.3’de örnek bir pin-on-disk test cihazı gösterilmiştir.



Resim 4.3. Pin-on-disk test cihazı [40]

Chase tipi sürtünme aşınma testi; SAE-J661 standardına uygun olarak $25 \times 25 \times 7$ mm boyutlarındaki numunenin, numune tutucu kalıp yardımıyla 280 mm çaplı gri dökme demir kampanaya temas ettirilerek, değişen yük ve basınç değerlerinde, malzemedeki sürtünme katsayısı ve aşınma oranının değişiminin belirlenmesi esasına dayanan bir test yöntemidir [41]. Chase tipi aşınma test cihazı örneği, Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Chase tipi aşınma test cihazı [39]

Friction assessment and screening test; sabit bir hızla dönen dökme demir diske, test edilecek numunenin temas ettirilmesi ile sürtünme katsayısının ölçümünü sağlar. Test boyunca oluşan ısı sebebiyle malzemenin sıcaklığı yükselir ve böylece birbirinden farklı termal şartlarda sürtünme özellikleri belirlenir. Maksimum 7 N sürtünme kuvveti ve maksimum 11 bar pompa basıncı uygulanabilir [41].

4.3.2. Aşınma ölçüm yöntemleri

American Society of Lubrication Engineers tarafından belirlenmiş, çok sayıda aşınma ölçüm metodu vardır. En yaygın metotlar ise, ağırlık farkı, uzunluk ölçüm, çentik metodu ve kalınlık farkı metodudur [34].

Ağırlık farkı metodu

Bu metot, aşınma miktarının fazla olduğu durumlarda tercih edilir. Deney öncesi ve sonrasında numunenin ağırlıkları not edilerek aşağıdaki eşitlik yardımıyla numunenin aşınma kapasitesi açıklanır. Yöntemin uygulanabilmesi için yoğunluğun sabit bir değeri olması gerekir. Ölçüm oranı sınırlaması olduğundan çok küçük numunelerin aşınma hesabı için uygun değildir. Aşınmaya dayanıklı kalın olmayan kaplamalarda, aşınma miktarının az olmasından ötürü bu yöntemle etkili sonuçlar alınamayabilir [42,43]. Aşınma oranının formülasyonu, TS 555 standardına göre aşağıdaki gibidir:

$$V = \frac{m_i - m_s}{2\pi R_d n F_m \rho} \quad (4.3.2)$$

Burada;

V = Özgül aşınma ($\text{cm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)

m_i = Deney öncesi kütle (g)

m_s = Deney sonrası kütle (g)

R_d = Disk çapı (m)

F_m = Ortalama sürtünme kuvveti (N)

n = Devir sayısı

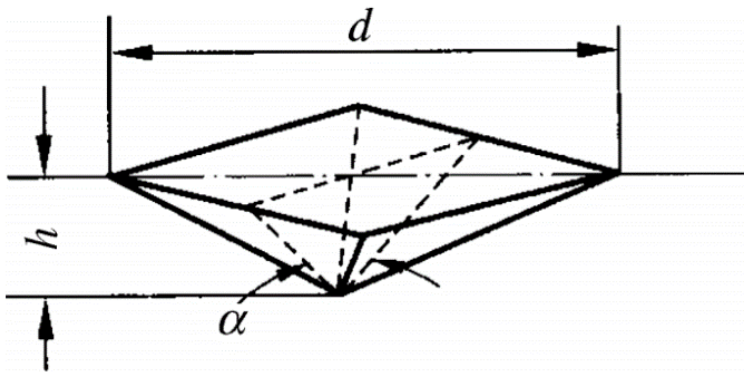
ρ = Yoğunluk (g/cm^3)

Uzunluk ölçüm metodu

Kontaksız mikro metre ya da mikroskop gibi hassas bir aparat yardımıyla, deney öncesindeki temel seviye ile deney sonundaki seviyenin boyut veya yüzeydeki mesafe değişimi ölçülerek gerçekleştirilen ölçüm yöntemidir Bu metot, önceleri aşınma dağılımını ölçmek için kullanılıyordu; ancak metodun birkaç önemli kusuru tespit edildi. Örneğin, ölçüm verileri, deformasyon sonucu meydana gelen boyut değişikliklerini içeriyordu ve temas ölçüm aparatı, temas durumu, sıcaklık gibi parametrelerden etkileniyordu. Bu sebeplerden dolayı uzunluk ölçüm metodu, günümüzde yaygın biçimde kullanılmamaktadır [43].

Çentik metodu

Plastik deformasyon yöntemiyle sürtünen yüzeyde, geometrisi belirli bir iz oluşturulduktan sonra, deney süresince bu izin boyut değişimi mikroskop yardımıyla ölçülür. İzi oluşturmak için brinnel, vickers ve knoop sertlik testlerinin başlıkları kullanılır. Deneye tabi tutulan malzemenin sertliği arttıkça sürtünen ucun oluşturduğu boyut değişimi azalacak ve dolayısıyla aşınma miktarı da azalacaktır [43]. Şekil 4.7’de çentik metodunda kullanılan kare piramit uç çentiği gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kare piramit uç çentiği [43]

Kalınlık farkı metodu

Aşınma deneyi öncesinde ve deney sonrasında numune kalınlığının ölçülerek, hacimsel kayıp ve birim hacimdeki aşınma miktarının hesaplanması esasına dayanır. Kalınlık ölçümü, mikro metre gibi hassas ölçme aparatları yardımıyla yapılır [34].

5. TOZ METALURJİSİNDE PARÇA ÜRETİM SÜRECİ

Toz metalürjisi, metal veya seramik tozlarının belli oranlarda karıştırılıp istenilen şekilde sıkıştırılması ve sonrasında kontrollü atmosferde sinterlenmesi esasına dayanan bir üretim yöntemidir. T/M geniş aralıktaki kullanımı sayesinde, malzeme üretim teknolojilerinde önemli bir role sahiptir. T/M’nde, sıkıştırma ve sinterleme ile doğrudan nihai ürün veya son şekline yakın özellikte ürün oluşturulabilir ve böylelikle ikincil işlemlere duyulan ihtiyaç ortadan kaldırılmış olur. Bu yöntemle üretilcek alaşımların kompozisyonlarının sınırlandırılmamış olması sebebiyle, diğer yöntemlerle elde edilemeyen üstün özellikler elde edilebilir. Aynı zamanda az miktarda atığı ve enerjiyi verimli kullanan gelişmiş üretim teknikleriyle oldukça ekonomik bir yöntemdir. Toz metalürjisi ile üretilen parçaların, dövme vb. yöntemlerle üretilen ticari pazardaki diğer rakiplere göre en büyük üstünlüğü, yoğunluktur. T/M ile üretilen parçalardaki yoğunluk artışı, mekanik ve fiziksel özellikleri de geliştirmektedir. Bu yoğunlaştırma işleminin uygun maliyetle yapılması piyasadaki rakiplere karşı başarılı olmada doğru bir stratejidir [44].

5. 1. Harmanlama

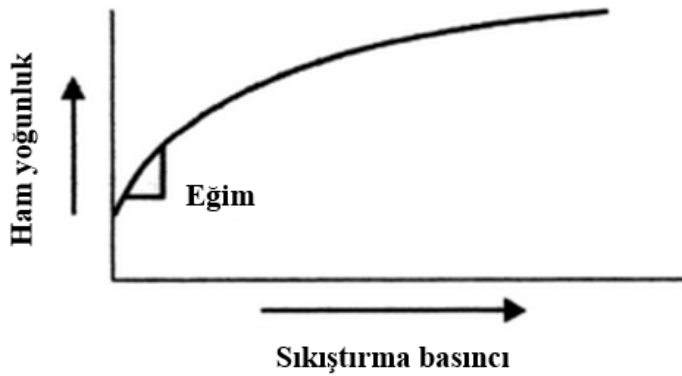
Harmanlama; istenilen boyut, şekil ve bileşimdeki tozlar, yağlayıcılarla ve alaşım elemanlarıyla, homojen bir karışım elde edilinceye kadar özel mikserlerde karıştırılması işlemidir [45]. Karıştırma ve harmanlama, toz metalürjisinin hemen hemen tüm dallarında gerekli ve önemli bir aşamadır fakat çoğu zaman basit bir işlem olarak düşünülerek ihmal edilir. Hâlbuki bu iki önemli aşama, birbirinden farklı tozların boyut, şekil ve yoğunluklarını birbirine uygun kılarak, presleme ve sinterleme boyunca kararlı ve homojen bir karışım elde edilmesini sağlarlar [46].

5.2. Presleme

Presleme çevrimi sırasıyla, harmanlanmış tozun kalıp boşluğunu doldurması, toza basınç uygulanması ve ham parçanın kalıptan çıkarılması işlemlerinden oluşur. En basit yöntemde, alt zımba ve dişi kalıp sabitken, üst zımba hareketlidir. Fakat sıkıştırma işlemlerinin büyük çoğunluğu, alt ve üst zimbaların kalıp merkezine doğru hareket ettiği, çift hareketli sıkıştırma yöntemleriyle yapılır. Kullanılan preslerin kapasitesi 1000 tona kadar çıkabilir.

Birbirinden çok farklı tasarımda parçalar üretebilmek için kranklar, motorlar, vanalar gibi parametreler değiştirilebilir.

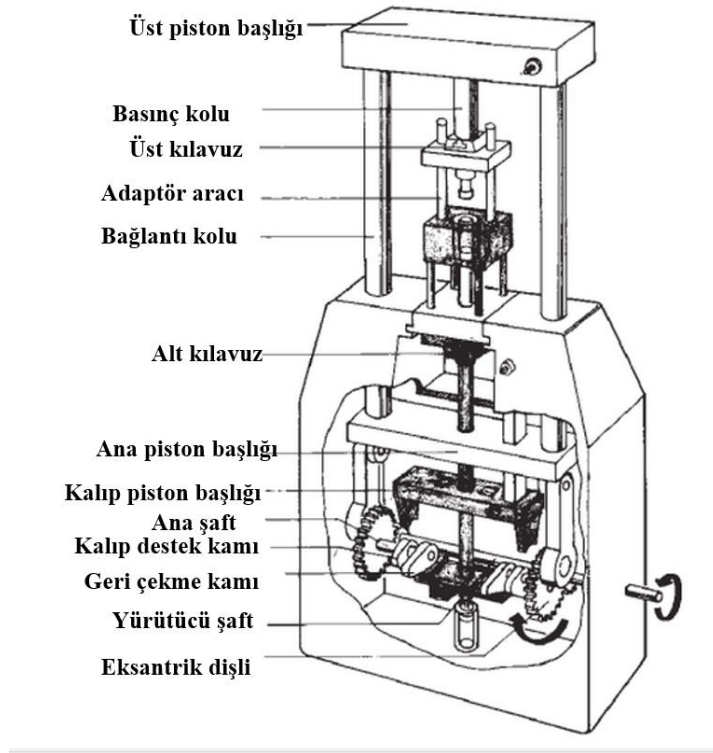
Tozların homojen sıkıştırılması durumunda, sıkıştırmada iki aşama gözlenmektedir (Şekil 5.1.). İlk aşamada basınç uygulandığında partiküllerin hareketi ve yer değiştirmeleri sonucu oluşan paketlenme ile yoğunlaşma hızlı bir şekilde artar. Uygulanan basıncın artmasıyla, toz partiküllerin elastik ve plastik deformasyonları sonucu mekanik kilitlenmeler ve soğuk kaynak miktarı artmaktadır. İkinci aşamada kritik basınç değerinin üstündeki basınçlarda yoğunlukta küçük bir artış gözlenmektedir ve tozların çalışma sertleşmesinden dolayı grafikteki eğim daha orantılıdır [47].



Şekil 5.1. Sıkıştırma esnasında yoğunluktaki değişim [47]

Presleme sonunda ortaya çıkacak ürünün ham yoğunluğunu arttırmak için iki yöntem kullanılır: Birinci yöntem, yüksek sıkıştırma basınçları kullanmaktır. Bu yöntemde, diğer yöntemlerde kullanılan basıncın çok daha üstünde yüksek basınçlar kullanılır ve eğer aynı zamanda hız da arttırılırsa çok iyi sonuçlar alınır. Basınç değerleri 1-3 GPa arasındadır ve bu basınçlara dayanabilecek özel kalıplar gerekir. İkinci yöntem, ılık sıkıştırma adı verilen, toz ve kalıbın işlemiden önce ısıtılması esasına dayanan yöntemdir. Tozu ve presi ısıtmak için mikrodalga ve yağlı ısıtıcılar kullanılır. Isıyla birlikte polimerlerin parçacıkları birbirine yapıştırılmasıyla yoğunluk kazanılır ve mukavemet artar [48].

Toz metalürjisinde kullanılan presler mekanik ya da hidrolik tiptedir. Genelde küçük-orta ölçekli ve yüksek hızda üretim gerektiren parçalar için mekanik presler tercih edilirken (Şekil 5.2.); üretim hızının çok önemli olmadığı, spesifik yüksek basınçların gerektiği büyük ölçekli parçalarda daha çok hidrolik presler tercih edilir [49].



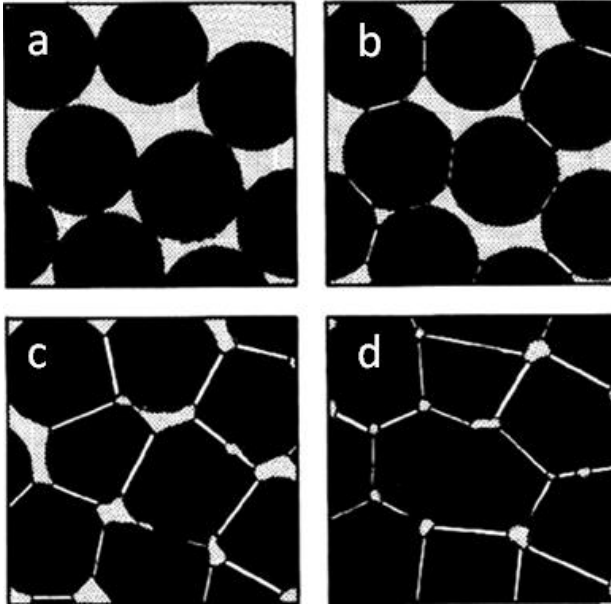
Şekil 5.2. Otomatik mekanik pres [50]

5.3. Sinterleme

Sinterleme, temas halindeki katı parçacıkların, ergime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta birbirlerine bağlanarak mukavemetin artırılması işlemidir. Karmaşık bir işlem olan sinterlemede yönetici kuvvet, yüksek miktardaki serbest yüzey enerjisidir. Sinterleme; başlangıç, ilk, ileri ve son aşama olmak üzere 4 evrede gerçekleşir (Şekil 5.3.) ve bu evrelerde sırasıyla aşağıdaki basamaklar takip edilir:

- Başlangıç nokta teması
- Boyun oluşumu

- Gözeneklerin kapanması
- Gözeneklerin yuvarlaklaşması
- Yoğunlaşma ya da gözenek büzülmesi
- Gözeneklerin küreselleşmesi



Şekil 5.3. Sinterlemenin 4 evresi: a) başlangıç, b) ilk, c) ileri ve d) son evre [51]

Toz kütlesi, yüksek olan yüzey enerjisini azaltmak eğilimindedir ve bu yüzden sinterlemenin başında partiküller temas noktalarından birleşirler. İlk aşamada her parçacık, birkaç noktada diğer parçacıklarla nokta teması yapar. Gözenekler başlangıçta düzensiz ve köşelidir. Temas noktalarından parçalar arasında boyun oluşumu gözlemlenir ve boyun büyüdükçe kavis azalarak işlem yavaşlar. Sinterlemedeki bu atomik hareketlilik, sıcaklığın bir fonksiyonudur ve bu yüzden sinterleme önemli derecede sıcaklığa bağlıdır. Ara aşamada, gözenekler yuvarlaklaşır, düzgünleşir ve boyun büyür fakat gözenekler hala dışa açık durumdadır. Son aşamada, gözenekler kapalı hale gelir ve küreselleşir, gözenek sayısı azalır ve tane büyümesi hızlanır. Sinterleme sonunda, istenilen mikro yapı özelliklerine sahip, yoğunluğu ve mukavemeti daha yüksek parçalar elde edilir [48,49]. Partiküllerin birbiriyle bağ oluşturması sonucunda malzemede görülen değişiklikler şunlardır:

- Kimyasal değişiklikler
- Boyut değişiklikleri

- İç gerilmelerin uzaklaştırılması
- Faz değişiklikleri
- Alaşımlanma

Sinterleme işleminin esas amacı, sıkıştırılmış tozları yoğunlaştırmaktır. Yoğunlaşma; sıkıştırılmış toz kütlede meydana gelen orantılı çekme ya da metaller gibi tek bileşenli sistemlerde boşlukların ortadan kaldırılması olarak tarif edilebilir. Yoğunlaşma, malzemenin yapısında şekil, boyut, tane boyut dağılımı, boşluk boyut dağılımı gibi değişikliklere sebep olur ki bu tür yapısal değişiklikler, sertlik, dayanım, kırılma tokluğu, termal iletkenlik, elektrik iletkenliği, manyetiklik gibi mekanik özellikleri değiştirir [47].

5.4. Sinterleme Sonrası İşlemler

Toz karışımı preslenip sinterlendikten sonra, ürünün nihai şeklini alması için ek işlemler gerekebilir. Bu işlemler, talaşlı imalat, damgalama, ısıl işlem, birleştirme, kaplama, parlatma gibi işlemlerdir. Isıl işlem mukavemetlenmeyi artırırken, bilyalı dövme ya da korozyon önleyici kaplama yapma yorulma ömrünü iyileştirir. Yüzey sertleştirmek için karbürleme yapılırken, montaja uygun dizayn için delik delme ve vida açma gibi işlemler yapılır. Uygun şekilde yapılan bitirme işlemleri, sinterlenmiş ürünlere değer kazandırır. T/M tekniklerinin en önemli üstünlüğü, karmaşık şekilli, yüksek performanslı ürünleri hızlı bir çevrim sonunda hassas olarak oluşturma yeteneğidir [48].

6. LİTERATÜR TARAMASI

Sürtünme, devamlılık gösteren bir süreçken aşınma; plastik deformasyonlardan, mikro yapısal ve kimyasal değişikliklerden dolayı daha karmaşık bir süreçtir. Otomotiv fren balatalarının sürtünme ve aşınma davranışı; balatanın ve karşı metalik yüzeyin mikro kimyasal yapısı, dönme hızı, basınç, temas yüzeyinin sıcaklığı gibi parametrelerden dolayı çok karmaşıktır. Balatanın kompozisyonu ve formülasyonu, sürtünme davranışında çok önemli bir rol oynar, fakat kompozisyon-özellik arasındaki ilişki yeterince anlaşılamamıştır. Formülasyonlar deneme-yanılma yöntemiyle belirlendiği için zaman kaybı ve maddi kayıplar yaşanmaktadır [2,3,10,52,53].

Son 20 yılda yapılan çalışmalarda, bileşimlerde uzun yıllardır takviye ya da sürtünme ayarlayıcı olarak yer alan asbest, pirinç, grafit, seramik tozlar yerine; aşınma dayanımı daha yüksek, daha kolay elde edilebilir, kanserojen etkileri olmayan yeni malzemeler araştırılmaktadır.

Bor ve bor ürünleri, kullanıldıkları uygulamalarda gösterdikleri güçlü fiziksel ve mekanik özellikler sayesinde dikkat çekmiştir. Yüksek aşınma dirençleri, metal oksitlerde çözünerek yüzey oksitlenmesini engellemeleri ve böylece koruyucu bir tabaka oluşturabilme yeteneklerinden dolayı oldukça dikkat çeken bor ve türevlerinin, balata kompozisyonlarında etkileri merak edilmiştir. Bu amaçla 1999 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan bir çalışmada, Al-B-C sermeti kullanılmıştır. Al-B-C sermetler, kaba taneli B_4C tozlarının, sızdırılan alüminyum ile tepkimesi sonucunda elde edilirler. Aşınma dirençleri, termal şok dirençleri, toklukları ve termal iletkenlikleri; boron karpit, silikon nitrit gibi diğer seramiklerle karşılaştırıldığında daha yüksektir. Al ve Al ara yüzeyleri, iç sönümleme kapasitelerini geliştirir ve böylece frenlemeyi kolaylaştırıcı etki yaparlar. Yapılan çalışma sonucunda, Al-B-C sermetlerin, piyasadaki diğer malzemelerden daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu ve artan sıcaklıklarda frenleme zayıflamasının görülmediği ve sürtünme katsayısının artan sıcaklıkla değişmediği rapor edilmiştir [6,7].

Mutlu ve arkadaşlarının, balatanın sürtünme-aşınma davranışına bağlayıcı etkisinin incelendiği bir çalışmada, normal novalak reçine, Si modifiyeli reçine ve B-P modifiyeli reçineler karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, normal reçinenin μ değeri en yüksek, B-P modifiyeli reçinenin μ değerinin ise en düşük olduğu görülmüştür. B-P modifiyeli reçinenin,

yüksek sıcaklıklarda viskoelastik özelliklerinin diğer reçinelerden daha fazla gelişmesi sonucunda, sürtünme katsayısının belirli bir sıcaklığa kadar yüksek seyrettiği fakat bu sıcaklıktan sonra düştüğü sonucuna varılmıştır. Aşınma davranışları incelendiğinde, B-P modifiyeli reçinenin aşınma direnci en yüksek, normal reçinenin aşınma direncinin ise en düşük olduğu gözlemlenmiştir [8].

Sugözü ve arkadaşları, asbest içermeyen organik balata kompozisyonuna, içerdiği yüksek oranda reçineden dolayı bağlayıcı olarak kızılçam kozalağı tozu; cam sektöründe termal genişmeyi azaltıp dayanıklılığı artırma özelliklerinden dolayı boraks eklemiştir. Sürtünme-aşınma deneyleri sonucunda, boraks miktarının en fazla (% 20) ve kızılçam kozalağı miktarının en az olduğu numunede, sürtünme katsayısının en yüksek olduğu; μ değerinin, boraks oranı azaldıkça düştüğü; aşınma miktarının boraks oranı arttıkça kısmi olarak arttığı gözlemlenmiştir. Boraks katkısının; kararlı sürtünme katsayısı elde edilmesinde, aşınma davranışının gelişmesinde ve “fade” oranının düşürülmesinde başarılı olduğu, böylece boraks-kızılçam kozalağı ikilisinin balata formülasyonlarında etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [9].

Metalik fiberler, sahip oldukları yüksek iletkenlikle, sürtünme yüzeylerinden ısıyı hızlıca uzaklaştırabildikleri için eskiden beri fren balatası bileşimlerinde takviye elemanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Metalik bileşenlerin türü, morfolojisi ve sertliği, balatanın sürtünme aşınma özelliklerini etkilemektedir [54]. Bakır, asbest içermeyen organik esaslı balata kompozisyonlarında kullanılan önemli bir bileşendir. Düşük ergime noktasına ve yüksek sünekliğe sahip yumuşak bir metaldir [32]. Cu ve Cu alaşımları, sürtünme ara yüzlerinde termal difüzyonu geliştirmek amacıyla tercih edilirler. Bakırın yüksek sıcaklıklarda sürtünme ara yüzlerinde bakır oksit oluşturarak sürtünme katsayısı değerini kararlı bir seviyede tuttuğu bilinmektedir. Bundan dolayı Cu ve Cu alaşımları, sürtünme esnasında karşıt yüzeyin agresifliğini önlemek ve sürtünme katsayısını kontrol etmek için balata kompozisyonlarına eklenir. Jang ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada; asbest içermeyen organik balata kompozisyonuna eklenen Cu, düşük karbonlu çelik ve Al gibi üç farklı metal fiberin, gri dökme demir ya da alüminyum metal matrisli kompozit (Al-MMC) disk karşısında gösterdikleri sürtünme ve aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, Cu fiberlerin yüksek sıcaklıklarda sürtünme ara yüzlerinde oluşturdukları oksit tabakası sayesinde sürtünme katsayısının korunduğu gözlemlenmiştir. Aşınma oranları incelendiğinde, hem gri dökme demir hem de Al-MMC

diskle yapılan deneylerde, en yüksek aşınmanın çelik fiberli numunelerde olduğu, bakır fiberli numunelerin çelik fiberlilerden daha az aşındığı görülmüştür. Bakır ve çelik fiberlerin yüksek sıcaklıklarda “fade” direncini geliştirdiği sonucuna varılmıştır [5].

Jacko ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, ağır şartlar için kullanılan organik balataların kompozisyonuna pirinç talaşı ve bakır tozu ilave etmişler ve yüzey filminin parçalanmasıyla fade performansının geliştiğini görmüşlerdir [55].

Takashi ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, bakır fiber gibi takviye fiber içeren balataların, gelişmiş aşınma davranışı sergilediğini gözlemlemiştir [56].

Jia ve arkadaşları, sürtünme malzemelerinin içeriğine ağırlıkça % 15-20 pirinç katkısının aşınma direncini iyileştirdiğini gözlemlemiştir [57].

Kurt ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, bronz esaslı ve organik asbest esaslı fren balatalarının, 350, 500 ve 600 MPa olmak üzere farklı presleme basınçlarında aşınma davranışları karşılaştırılmıştır. Buna göre, bronz esaslı balata numunelerinin yoğunluğu arttıkça aşınmanın azaldığı ve termal iletkenliğin arttığı; bronzun bileşimindeki hacimce kalay oranının azalmasıyla sürtünme katsayısının daha da arttığı gözlemlenmiştir [58].

Ho ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, bakır ve fenolik reçine esaslı yarı-metalik sürtünme malzemelerine farklı tipte fiberler eklenerek mekanik ve tribolojik özelliklerdeki değişiklikler incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, bakır fiber ilaveli numunenin; pirinç, çelik, selüloz ve seramik fiber ilaveli numunelere göre en yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı değerine ve en düşük aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür [59].

Roubicek ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Brake Pad Partnership Project’ e göre, son birkaç yıldır yeni üretim otomobillerin balatalarında bakır metali, pirinç, bakır-oksit ve bakır-sülfür gibi önemli malzemelerin kullanımının % 40 oranında arttığını ifade etmişlerdir [60].

Ertan ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, bakır yünü, kaya yünü ve aramid lifin balatanın sürtünme karakteristiğine etkileri incelenmiştir. Testler sonucunda, disk-balata ara yüzeyinde oksit miktarının artmasına ve teması engellemesine bağlı olarak, bakır oranının artmasıyla sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir [61].

Kumar ve arkadaşları, balata kompozisyonundaki dolgu malzemelerinin türü, şekli, boyutu ve miktarının, balatanın performansını önemli derecede etkilediğini, metalik dolguların bu noktada çok önemli ve fonksiyonel olduklarını ifade etmişlerdir. Yaptıkları bir çalışmada, asbest içermeyen organik esaslı balata kompozisyonuna ağırlıkça % 10 oranında pirinç, bakır ve demir tozu ilave ederek ürettikleri numuneleri, full-scale inertia dinamometre cihazında test etmiş ve bakır tozu ilavesinin, fade direnci, aşınma direnci ve sürtünme katsayısını diğer katkılara göre daha fazla arttırdığını tespit etmişlerdir. Bakırın, termal iletkenlik ve termal difüzyonunun pirinç ve demirden daha yüksek olması sebebiyle, sürtünme ara yüzeylerinden ısının uzaklaştırılmasında pirinç ve demire göre daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır [62]. Bir diğer çalışmalarında, aynı numuneleri, reduced-scale prototypes (RSP) cihazında test etmişler ve bakır katkılı balatanın en iyi sürtünme, aşınma, fade ve recovery davranışı gösterdiğini tespit etmişlerdir [63].

Kumar ve arkadaşları, balatanın sürtünme katsayısının yük ve hız duyarlılığını test ettikleri çalışmalarda, asbest içermeyen organik balata kompozisyonuna ağırlıkça % 10 ve 20 oranlarında bakır tozu, pirinç fiber ve çelik yünü ilave etmişlerdir. Reduced-scale prototypes (RSP) cihazında yaptıkları testler sonunda, % 10 bakır tozu katkılı numunenin en düşük μ hassasiyeti ve en yüksek aşınma direncine; pirinç fiber katkılı numunelerin ise en düşük aşınma direnci ve bakırdan sonra en yüksek sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Metalik dolgu katkılı tüm numunelerin, endüstride arzu edilen sürtünme katsayısı değerlerini sağladığı (0,30 - 0,45), metallerdeki inklüzyonların, μ değerinin hız ve yüke olan hassasiyetini azaltarak kararlı sürtünme davranışı sağladığı sonuçlarına varmışlardır [64,65].

Bijwe ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, balata kompozisyonunda dolgu malzemesi olarak farklı boyut (fiber ve toz halde) ve miktarlarda (ağırlıkça % 10 ve 20) bakır kullanmışlardır. Inertia dinamometre testleri sonucunda, % 10 oranında bakır tozu katkısının en iyi fade ve recovery davranışı ile en yüksek aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin; bakır tozlarının balata kompozisyonundaki boşluklara, sürtünme ara yüzeylerinden kolaylıkla uzaklaştırılan bakır fiberlere göre daha iyi yerleşerek uniform sürtünme tabakası oluşturmaları olduğunu belirtmişlerdir [66].

Bijwe ve arkadaşları; bakır, pirinç, demir, çelik gibi metalik dolguların fren balatası bileşimine, farklı oranlarda, formlarda ve ölçülerde katılması üzerine yaptıkları bir çalışmada, asbest içermeyen organik balata bileşimine toz ve fiber formlarda pirinç, bakır ve demir ilave etmişlerdir. Toz ve fiber olarak iki ayrı grup oluşturulmuş ve farklı oranlarda metalik katkıları ilave edilmiş balatalar Full Scale Brake Inertia Dynamometer testine tabi tutulmuş ve testler sonucunda bakır dolgu içeren numunelerin en iyi tribo davranış sergilediği görülmüştür. Kompozit malzemenin termal iletkenlik gibi termo-fiziksel özelliklerinin gelişmesinde özellikle bakır gibi metalik katkıların büyük rolü olduğu sonucuna varılmıştır [67].

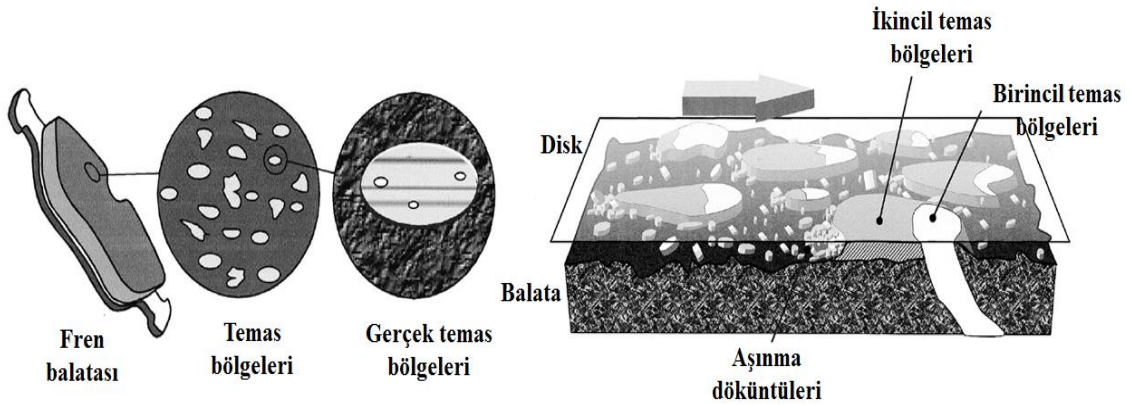
Bakır matriksli malzemeler, yüksek ısı iletkenlikleri ve diğer malzemelerden daha yüksek anti-aşınma özellikleri nedeniyle, otomobil, uçak, tren ve gemi fren balatalarında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Gyimah ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, farklı sinterleme sıcaklıklarında (850, 900 ve 950°C), yeni nesil bakır matriksli tren fren balatalarının sürtünme aşınma davranışı gözlemlenmiştir. Yapılan testler sonunda, ağırlıkça % 50-60 oranında bakır içeren numunelerden 900°C’de sinterlenen numunenin en yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu ve sinterleme sıcaklığı arttıkça μ değerinin artarak aşınma oranının kısmi olarak azaldığı gözlemlenmiştir [68].

Thiyagarajan ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada; asbest içermeyen balata kompozisyonuna farklı oranlarda pirinç, kalay ve bakır ilave edilmiştir. Dinamometre testi sonucunda, termal iletkenliği yüksek olan metalik katkıların, yüksek ısı iletimi sayesinde fade ve recovery davranışlarını geliştirdiği, aşınma miktarını azalttığı ve sürtünme katsayısının arttırdığı görülmüştür. Bakır tozu katkılı numunenin en yüksek ve kararlı μ , en düşük ağırlık kaybına sahip olduğu tespit edilmiştir [69].

Triboloji alanında yapılan araştırmalar, servis şartlarındaki fren balata malzemelerinin sürtünme yüzeyleri hakkındaki bilgilerin, aşınma mekanizmasını anlamak açısından çok önemli olduğunu göstermiştir. Aşınmış yüzeylerin karakteri, balatanın aşınma mekanizmasını belli eder ve daha da önemlisi balatanın performansını değerlendirmede yardımcı olur. Klasik fren balatalarının (organik balatalar / gri dökme demir fren diskleri) sürtünme davranışı, disk-balata yüzeyleri ve bu yüzeyler arasındaki sürtünme tabakasının karakteristiği ile açıklanır. Kayma yüzeyleri arasında oluşan sürtünme tabakası çok karmaşık ve çeşitlidir, bu yüzden tamamen anlaşılması çok zordur [68,70-72].

Balatanın aşınma yüzeylerinin yapısını açıklamada en çok kullanılan teknik, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizidir [73].

Fren balata numunelerinin hepsinde balata-disk ara yüzeyindeki temas noktasında iki farklı temas bölgesi tespit edilmiştir (Şekil 6.1.). Bu gerçek temas noktaları, balatanın aşınma yüzeyinde çok küçük bölgeler halindedir normal yükü direk olarak taşıma görevini üstlenmişlerdir. Gerçek temas noktaları, literatürde de belirtildiği gibi birincil ve ikincil bölgeler olmak üzere iki şekilde ortaya çıkar. Birincil bölgeler, mekanik kararlılığı ve aşınma direnci daha düşük balata bileşenlerinden oluşmaktadır. İkincil bölgeler ise; sürtünen disk-balata yüzeyleri arasında oluşan labirentlerde, haddelenmeler sonucu meydana gelen aşınma döküntülerinin (wear debris), birincil bölgeler üzerinde, normal basınç, kayma kuvvetleri ve sürtünme enerjisi etkisiyle sıkışıp birikmesiyle oluşurlar. Balatanın yapısal bileşenlerinin birincil bölgeleri desteklemediği durumlarda, ikincil bölge oluşumu gerçekleşmez. Mikro-kazıma ve kesme gibi etkilerin yardımıyla gelişen ikincil bölgeler, nispeten yüksek basma ve düşük çekme dayanımına sahiptir. Bunun sebebi, matriks malzemesinin altında ve birincil bölgelere gevşek şekilde bağlı olmalarındandır. En üst tabakalarında Fe elementi ihtiva ederler [73,74].



Şekil 6.1. Organik balata ve fren disk arasındaki sistematik temas durumu [73]

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Malzeme ve Metot

Bu çalışmada, ticarî kullanımda olan ve asbest içermeyen organik esaslı fren balatası kompozisyonuna ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında boraks tozu ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$); % 1,5; 3; 4,5 ve 6 oranlarında ayrı ayrı yaklaşık 1 mm uzunluğunda bakır ve bronz (% 86 Cu- % 14 Sn) fiberler eklenerek üç farklı numune grubu oluşturulmuştur. Numuneler, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. İlave edilen malzemelerin, balatanın mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelenebilmesi için sürtünme-aşınma ve sertlik testleri yapılmış, taramalı elektron mikroskobu ile aşınma yüzey görüntüleri alınmıştır.

7.2. Numunelerin Üretimi

Fren balata numuneleri, Eren Balata Firması'nın ticarî organik balata kompozisyonuna, kütle oran esas alınarak farklı oranlarda boraks tozu, bakır ve bronz fiber ilave edilerek hazırlanmıştır. 2 kg ağırlığındaki organik balata bileşimine ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında boraks ilavesiyle I. grup; % 1,5; 3; 4,5 ve 6 oranlarında bakır ve bronz fiber ilavesiyle II. ve III. grup numuneler elde edilmiştir (Çizelge 7.1.). Kompozisyonda kullanılan malzemeler Çizelge 7.2.'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Üretilen numune grupları ve katkı oranları

Numune Grubu	Katkı Malzemesi	Katkı Oranı (ağırlıkça %)
I. Grup	Boraks tozu	1
		3
		5
II. Grup	Bakır fiber	1,5
		3
		4,5
		6
III. Grup	Bronz fiber	1,5
		3
		4,5
		6

Çizelge 7.2. Organik fren balatası bileşimi

Bileşenler	Malzemeler
Bağlayıcı	fenolik reçine
Dolgu	barit, kalsiyum karbonat
Takviye	cam fiber, çelik fiber, aramid fiber, PAN
Abraziv	alüminyum oksit, demir oksit
Sürtünme Ayarlayıcı	metal oksit, metal sülfid, seramik , boraks, bronz fiber, bakır fiber
Yağlayıcı	grafit

Hassas terazi ile 0,0001 gr hassasiyetle tartılan malzemeler, Eren Balata Firması'nın endüstriyel tipteki özel üretim mikserinde 3 dakika karıştırıldıktan sonra sıcak preste 15 MPa basınç altında, 150°C sıcaklıkta, 86 × 55 mm ölçülerindeki kalıpta preslenmiş ve ardından endüstriyel tip fırında 185°C sıcaklıkta 24 saat boyunca sinterlenmiştir. Kullanılan mikser ve sıcak pres, Resim 7.1. ve 7.2'de verilmiştir.



Resim 7.1. Endüstriyel tip mikser (Eren Balata)



Resim 7.2. Endüstriyel sıcak pres (Eren Balata)

Sinterlenen balata numuneleri Gazi Üniversitesi Metalurji & Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan ATM Brillant 250 abrasif kesme cihazı ile SAE 661 test standardına uygun olarak $25 \times 25 \times 7$ mm ölçülerinde boyutlandırılmıştır.



Resim 7.3. Boraks katkılı numuneler

25×25×7 mm ölçülerinde boyutlandırılan numunelerin yoğunlukları, Arşimet prensibine göre hesaplanmış ve yoğunluk değerleri Çizelge 7.4'te verilmiştir

Çizelge 7.3. Numunelerin katkı türü ve yüzdesine göre yoğunluk değerleri

Katkı türü ve % katkı oranı	Yoğunluk (g/cm ³)
Katkısız	2,1
Boraks-1	2,1
Boraks-3	2,2
Boraks-5	2,3
Bakır-1,5	2,1
Bakır-3	2
Bakır-4,5	1,9
Bakır-6	2
Bronz-1,5	2,1
Bronz-3	2
Bronz-4,5	2
Bronz-6	2

7.3. Chase tipi sürtünme-aşınma testi

25×25×7mm ölçülerinde boyutlandırılan numuneler, Gazi Üniversitesi Metalurji & Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan Pyramid Engineering 120302 seri numaralı Chase cihazında sürtünme-aşınma testine tabi tutulmuştur. Deney düzeneği, uygun şekilde boyutlandırılan balata numunesinin, gri dökme demir kampanaya temas ettirilerek meydana gelen sürtünme kuvveti ve sıcaklığın ölçülmesi ve verilerin bilgisayar ortamına aktarılması esasına dayanır. Düzenek, Resim 7.4'de gösterildiği gibi verilerin görüntülediği bir bilgisayar sistemi, testin gerçekleştiği kampana sistemi ve balata numunesine standartlarda belirtilen değerlerde frenleme kuvveti uygulayan kompresörden oluşmaktadır.



Resim 7.4. Chase testi deney düzeneği (Gazi Üniversitesi)

SAE J-661 standardına göre, test süresince ölçülen sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri, otomatik olarak raporlandırılır. Chase testi program çıktısı Resim 7.5’te verilmiştir.

[illegible]

Resim 7.5. Chase testi program çıktısı

7.4. Sertlik testi

Fren balata numunelerinin aşınma testi öncesi ve sonrasındaki yüzey sertlik değerleri, Gazi Üniversitesi Metalurji & Malzeme Mühendisliği Bölümü Mekanik Testler Laboratuvarı'nda bulunan Emco Test Duravision 2000 marka sertlik ölçme cihazı (Resim 7.6.) ile ölçülmüştür. TS 555 standardına göre test metodu olarak Rockwell – S (½ inç çelik bilya, 10 kg ön yük, 140 kg esas yük) kullanılmıştır.



Resim 7.6. Emco test duravision 2000 sertlik ölçme cihazı (Gazi Üniversitesi)

7.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Balata numunelerinin sürtünme yüzey karakteristiklerini belirlemek amacıyla, Gazi Üniversitesi Metalurji & Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Jeol JEM 6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (Resim 7.7.) kullanılmıştır.



Resim 7.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Gazi Üniversitesi)

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. Sürtünme-Aşınma Testi Sonuçları

SAE-J661 standardına göre test edilen numunelerin test koşulları Resim 7.5.'te verilmiştir. İlk olarak, numuneler 1200 saniyelik “Burnish” aşamasına tabi tutularak yüzey alıştırma işlemi yapılmış ve tartım alındıktan sonra teste devam edilmiştir. Test sırasında, 411 devir/dakika hız ile dönen 280 mm çapındaki gri dökme demir kampanaya, ortalama 67 kg yükü numune temas ettirilmiştir. Sırasıyla burnish, baseline, fade-I, recovery-I, wear, fade-II, recovery-II, baseline-II aşamalarında farklı sıcaklık ve sürelerde balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin değişimleri ölçülmüştür. Sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimini açık şekilde görmek için referans sıcaklıklar 93, 149, 205 ve 261°C olarak belirlenmiştir.

Sürtünme katsayısı değerlerinin incelendiği fade ve recovery aşamaları birbirinden farklı karakteristiğe sahiptir. Fade aşaması, kampana sıcaklığı 82°C'yi gösterdiğinde başlar ve ısıtıcının devreye girmesiyle, sıcaklık 345°C'ye ulaşana kadar her 28°'de sert frenleme koşullarında, balatanın sürtünme kuvveti değeri okunur. Bu aşama tamamlanır tamamlanmaz ısıtıcı durdurulur ve soğutucu devreye girerek kademeli olarak sıcaklık düşürülür. Recovery aşamasında, sıcaklığın düşmesiyle birlikte sürtünme katsayısı değerleri kayıt edilir ve bu aşamada en yüksek μ değerine göre balatanın performansı yorumlanır.

Grafiklerde yer alan “normal μ ” değerleri, 93, 121, 149 ve 205°C sıcaklıklarda okunan sürtünme katsayılarının ortalaması alınarak belirlenirken; “sıcak μ ” değerleri, fade-II aşaması için 345, 317, 289, 261 ve 233°C'de, recovery-II aşaması için 261, 205 ve 149°C sıcaklıklarda okunan değerlerin ortalaması alınarak belirlenir. Numunelerin sürtünme-aşınma karakterlerinin daha net anlaşılması için her numunenin fade ve recovery aşamalarındaki sürtünme katsayısı oranları ve kalınlık kayıpları aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanarak tablolar halinde gösterilmiştir.

$$\mu\text{-fade} = \text{Fade aşamasındaki en düşük sürtünme katsayısı değeri} \quad (8.1)$$

$$\% \text{ fade oranı} = (\mu_{\min} / \mu_{\max}) \times 100 \quad (8.2)$$

$$\mu\text{-recovery} = \text{Recovery aşamasındaki en yüksek sürtünme katsayısı değeri} \quad (8.3)$$

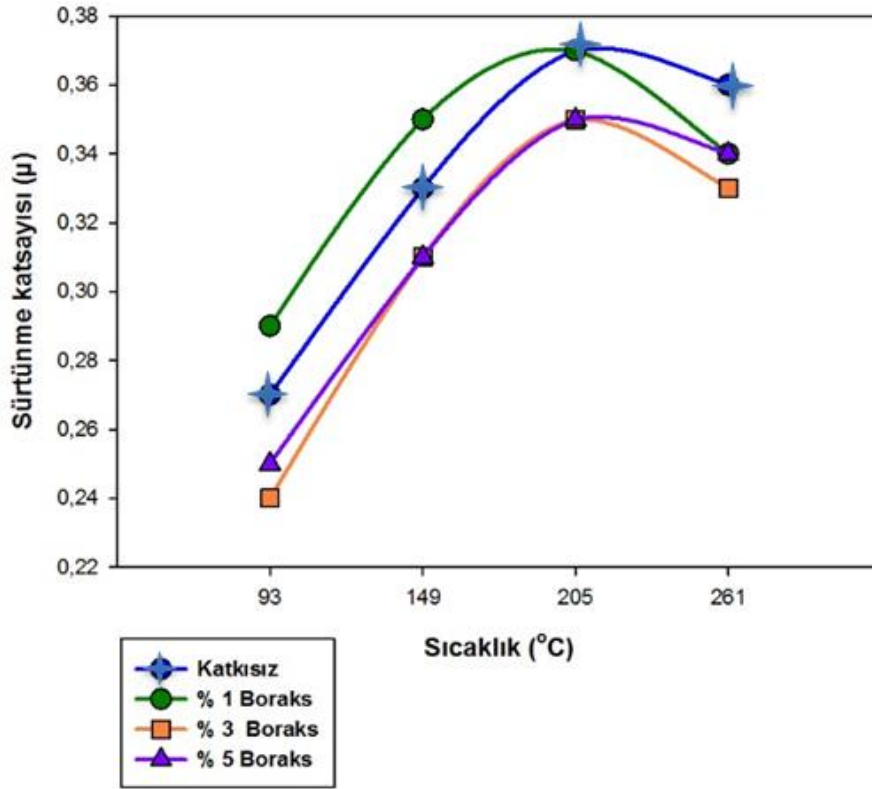
$$\% \text{ recovery oranı} = (\mu_{\min} / \mu_{\max}) \times 100 \quad (8.4)$$

$$\% \text{ kalınlık kaybı} = \left(\frac{\text{aşınma öncesi kalınlık} - \text{aşınma sonrası kalınlık}}{\text{aşınma öncesi kalınlık}} \right) \times 100 \quad (8.5)$$

Fren balatalarının aşınma sırasında meydana getirdikleri aşınma mekanizması, balata ve kampana yüzeyinde oluşan çok sayıda karşılıklı etkileşim ve malzeme kazanımı/kaybından dolayı oldukça karmaşıktır. Temas yüzeylerinin arasında oluşan üçüncül faz; yük, hız ve özellikle ara yüzey sıcaklığı parametrelerine bağlı olarak aşınma davranışını etkiler. Yüzeyde oluşan yüksek sıcaklık, balatayı oluşturan bileşenler arasındaki bağın zayıflayıp kötüleşmesine sebep olur ve bu durumda aşınma döküntülerini meydana getirir. Bu yüzden balata kompozisyonundaki bileşenlerin termal iletkenlikleri ile balatanın aşınma performansı arasında bir bağıntı olduğu söylenebilir [1,67].

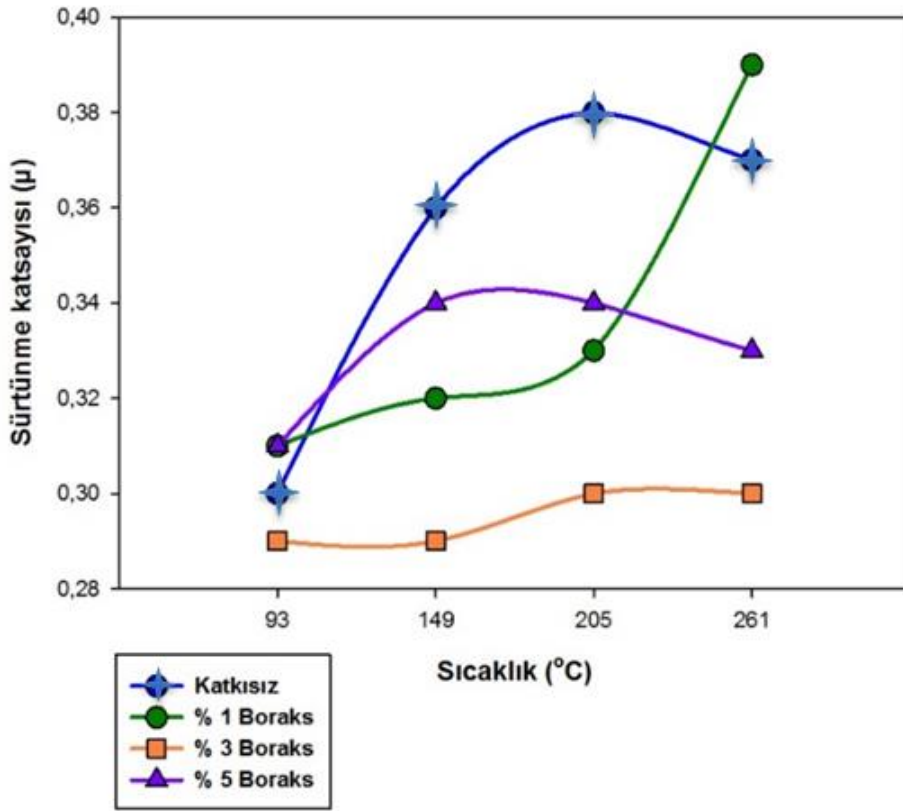
8.1.1. Boraks tozu katkılı numunelerin sürtünme-aşınma test sonuçları

Organik balata numunesine, ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında boraks tozu ilave edilerek, boraks oranının sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Şekil 8.1’de, fade aşamasında % 1 boraks katkılı numunenin referans sıcaklıklarda en yüksek μ değerine sahip olduğu; % 3 ile 5 boraks katkılıların hemen hemen aynı sürtünme davranışı sergilediği görülmektedir.



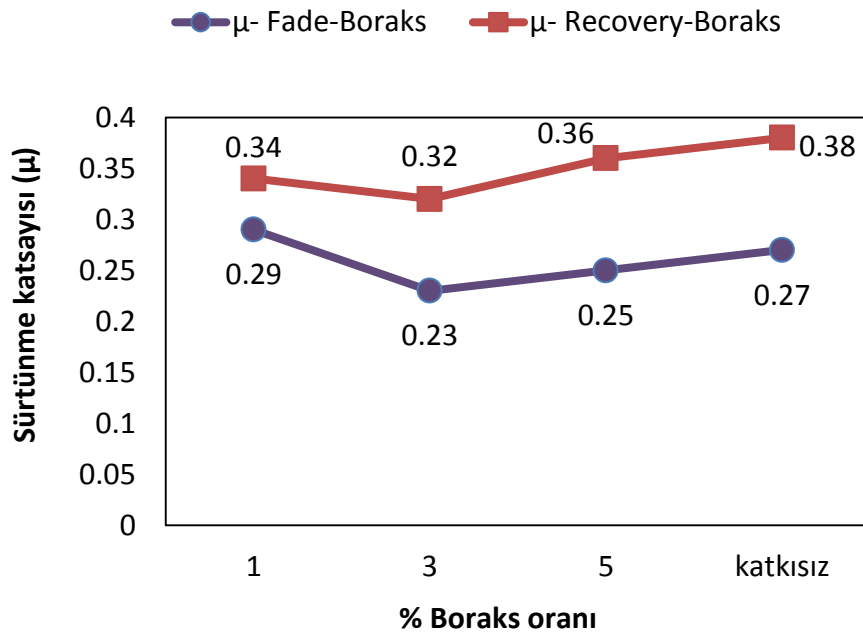
Şekil 8.1. Boraks tozu katkılı numunelerin fade aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği

Şekil 8.2’de recovery aşaması incelendiğinde, katkısız numunenin en yüksek, % 3 boraks katkılı numunenin ise en düşük μ değerlerine sahip olduğu; % 1 boraks katkılı numunede sıcaklık arttıkça μ değerinin arttığı görülmektedir. Recovery aşamasında, özellikle % 1 ve 3 boraks katkılı numunelerde sürtünme katsayısının dalgalı bir seyir göstermesinin sebebinin, balatanın temas yüzeyindeki homojen olmayan ısı yükleri olduğu düşünülmektedir [9]. Şekil 8.1 ve 8.2’deki fade ve recovery eğrileri incelendiğinde, tüm numunelerde sıcaklık arttıkça, 205°C’ye kadar sürtünme katsayısının arttığı, bu değerden sonra ise azaldığı görülmektedir. Boraks katkısı, sıcaklık arttıkça μ değerini 205°C’ye kadar arttırmıştır. Bu durum literatürde de izah edildiği üzere, reçinenin yüksek sıcaklıklardaki viskoelastik davranışı ve balata bileşenleri arasındaki bağların dayanımları ile ilgilidir [7,75]. Buna göre, 205°C’ye kadar boraks ile balatayı meydana getiren diğer bileşenler arasındaki bağların dayanımlarının yüksek olması sebebiyle sıcaklık artmasına rağmen μ değerleri arttı; 205°C’den sonra, fenolik reçinedeki termal ayrışma sonucunda, bağ dayanımlarının zayıflamasına bağlı olarak da sürtünme katsayısı değerlerinin bir miktar azaldığı düşünülmektedir.

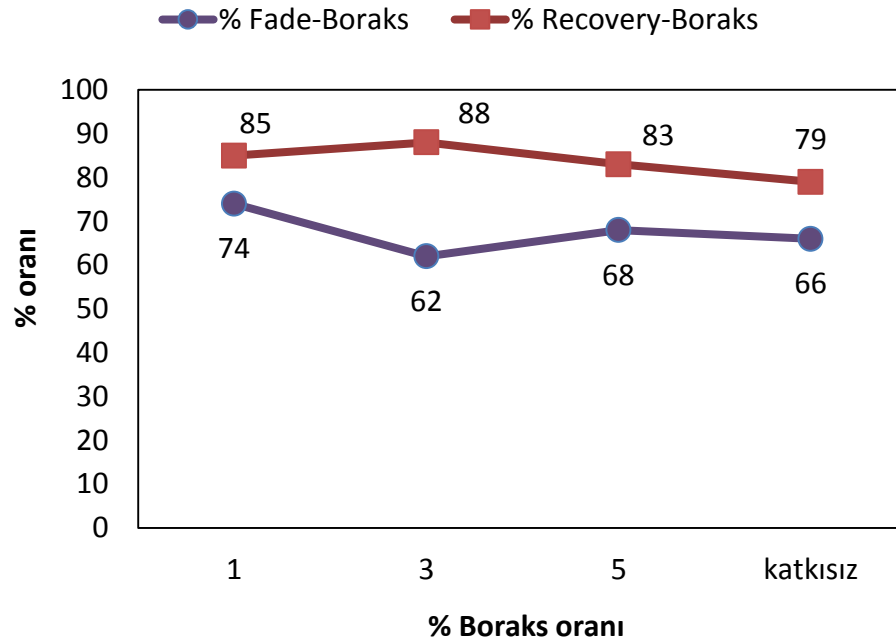


Şekil 8.2. Boraks tozu katkılı numunelerin recovery aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği

Sürtünme-aşınma testlerinde fade aşaması, yük, hız ve sıcaklık olmak üzere üç temel parametre tarafından yönetilir ve endüstriyel fren balatalarında arzu edilen ideal μ değerleri 0,3-0,4 arasındadır. Bunun yanı sıra kabul edilebilir % fade oranı 80-100 arasındadır. Recovery durumunda ise kabul edilebilir % recovery oranı 75-100 arasındadır [66,70]. Bu çalışmada, sıcaklığın μ üzerindeki etkisi ile belirlenen fade ve recovery karakteristikleri, Şekil 8.3. ve 8.4'te gösterilmiştir. Buna göre, katkısız numunenin μ -fade ve μ -recovery oranları, diğer numunelerden yüksektir. μ -fade değerleri ve % fade oranları, endüstrinin beklentisi olan 0,3-0,4 aralığındaki değerlerden daha düşük değerlerdedir. Boraks katkısı, sıcaklık arttıkça μ değerinin artmasını sağlamış fakat minimum sürtünme katsayısı değerlerini düşürmüştür. Bu durum, balatadaki metalik katkılara göre boraksın termal kararlılığının zayıf olduğunu göstermektedir. Recovery aşamasında, boraks katkılı numunelerden her birinin % recovery oranı, katkısız numuneden yüksektir ve μ -recovery değerleri, endüstride arzu edilen 0,3-0,4 aralığında seyretmiştir.

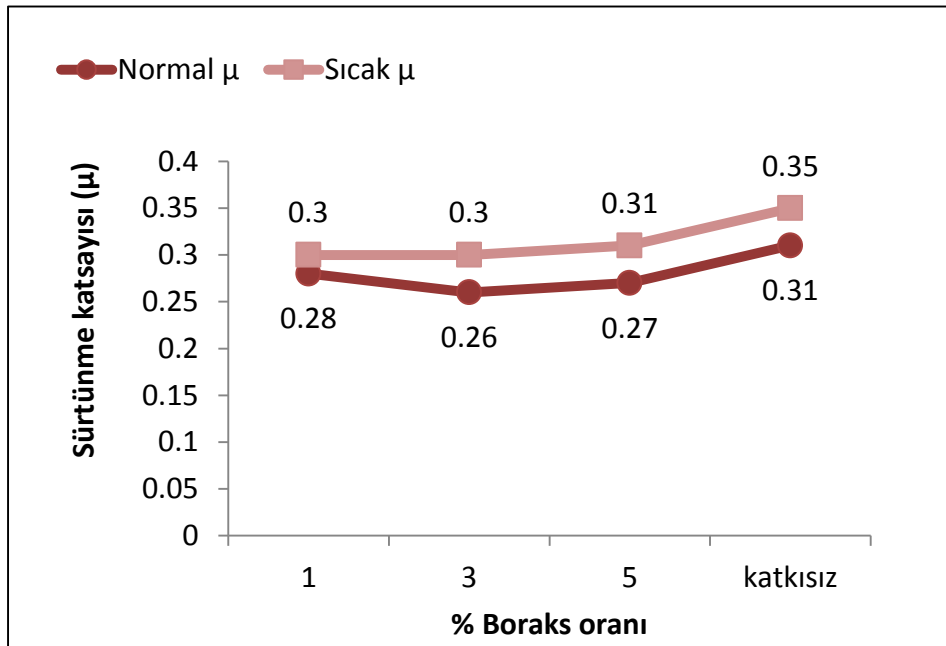


Şekil 8.3. Boraks tozu katkılı numunelerin μ -fade ve μ -recovery değerleri



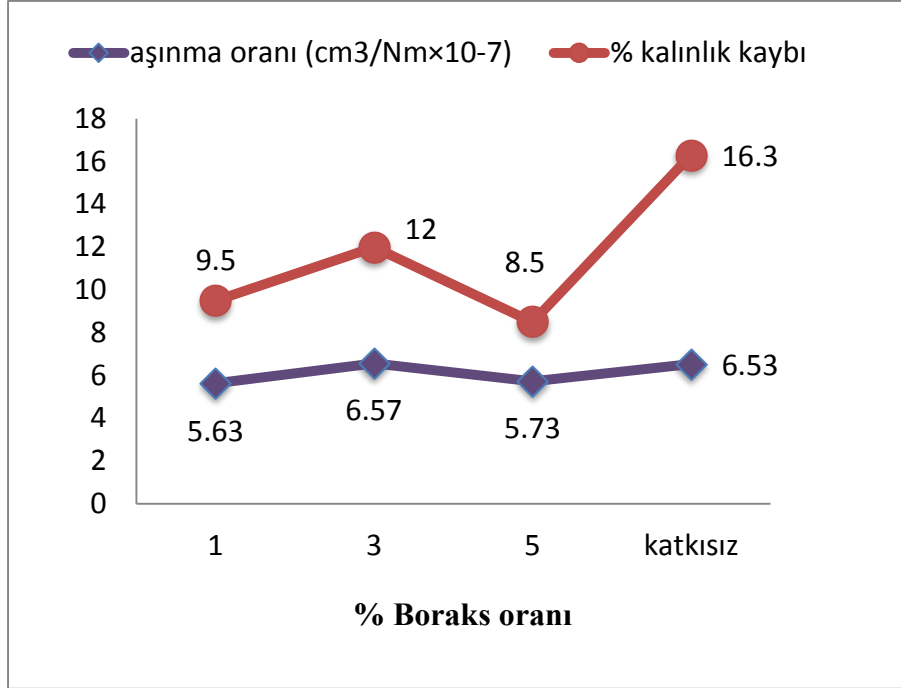
Şekil 8.4. Boraks tozu katkılı numunelerin % fade ve % recovery oranları

Sürtünme sonucu kampana sıcaklığı da artar ve sıcaklık arttıkça μ değeri azalır. Bu durum literatürde “tipik sürtünme davranışı” ya da “termal fade” olarak tanımlanır. Frenlemedeki bu zayıflamanın sebebi, balata ara yüzeyinde piroliz (oksijenin bulunmadığı ortamda sıcaklık etkisiyle meydana gelen yanma olayı) sonucu oluşan gaz indirgenmesidir. Yüksek sıcaklıklarda, balata malzemesinde meydana gelen indirgenme sonucunda, uygulanan kuvvet azalır, bu durum μ değerinin azalmasına sebep olur [70,76]. Şekil 8.5’teki grafikte, boraks katkı oranı arttıkça normal ve sıcak μ değerleri artmıştır, fakat katkısız numunenin sıcak ve normal μ değerleri en yüksektir. Boraks katkılı numunelerin sıcak sürtünme katsayısı değerleri, normal sürtünme katsayısı değerlerine göre yüksektir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda balatanın sürtünme karakteristiğinin daha iyi olduğunu fakat boraks katkısının sürtünme katsayısı değerlerini arttırmada olumlu etkisinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 8.5. Boraks tozu katkılı numunelerin normal ve sıcak sürtünme katsayısı grafiği

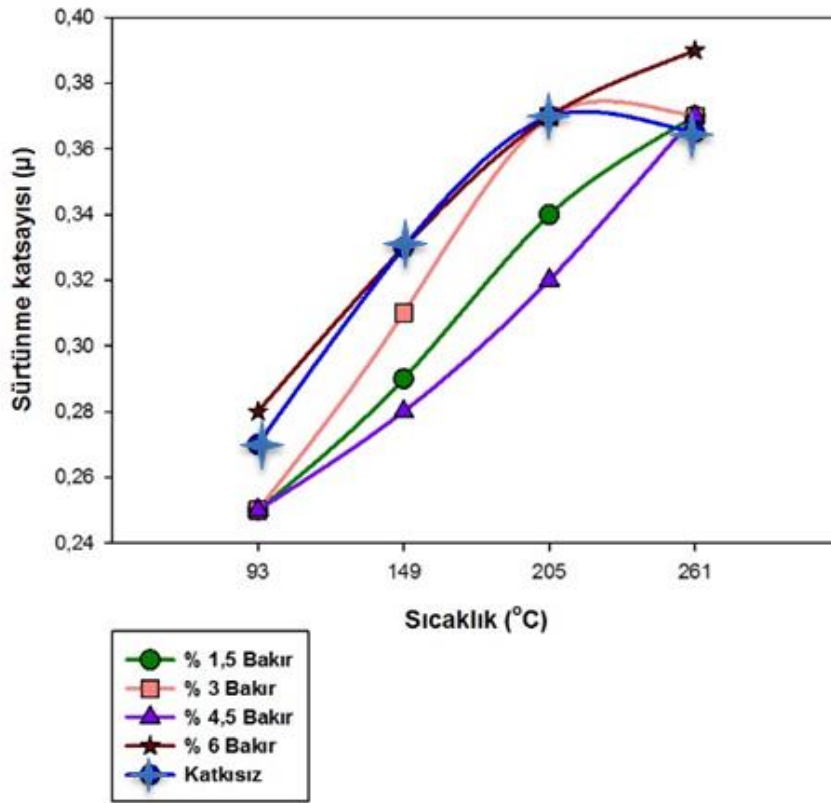
Şekil 8.6’ya göre, en fazla kalınlık kaybı ve en yüksek aşınma oranı, katkısız numuneye aittir ve boraks oranı arttıkça, aşınma miktarı ile kalınlık kaybının kısmen azaldığı görülmektedir. Çizelge 7.3’teki yoğunluk değerleri de dikkate alındığında, boraks oranı arttıkça yoğunluğun artması sebebiyle % 1 ve 5 boraks katkılı numunelerde aşınma direncinin arttığı; % 3 boraks katkılı numunede ise yoğunluğun yükselmesine rağmen sertlikteki artışın daha fazla aşınmaya ve dolayısıyla kalınlık kaybına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.6. Boraks tozu katkılı numunelerin ilave oranına göre % kalınlık kaybı ve aşınma oranları

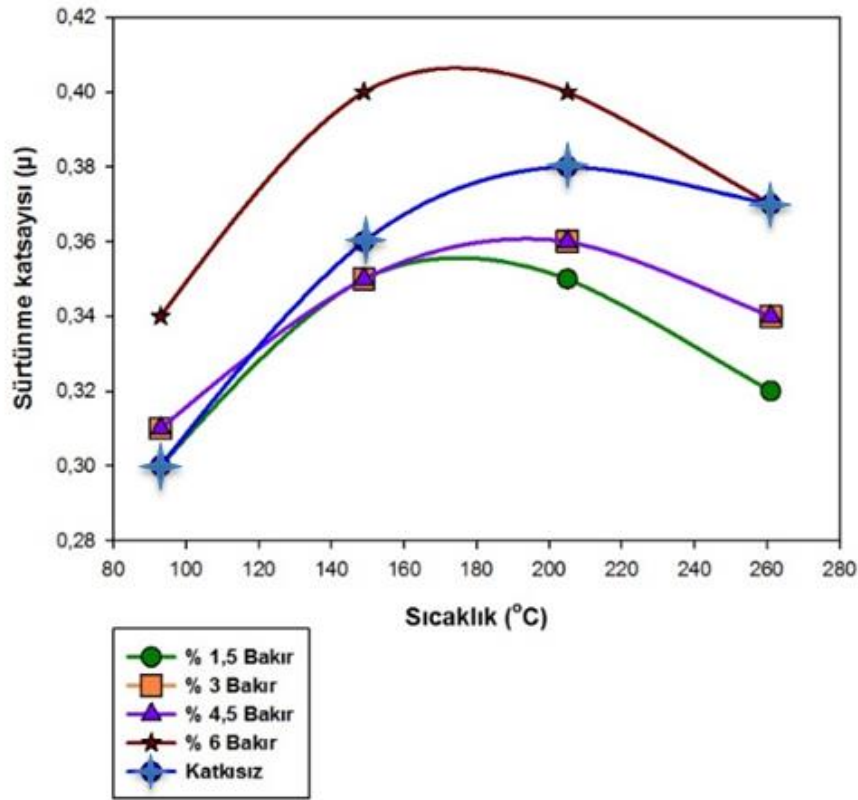
8.1.2. Bakır fiber katkılı numunelerin sürtünme-aşınma test sonuçları

Organik balata numunesine ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 oranında bakır fiber ilave edilerek, bakır oranının sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Şekil 8.7’de, katkısız numune ile % 6 bakır fiber katkılı numunenin fade davranışının hemen hemen aynı olduğu, diğer numunelerin ise daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre, ağırlıkça % 6’dan az bakır fiber katkısının, fade davranışına olumlu etki etmediği görülmektedir. Bu durumun, % 6’nın altındaki metalik katkı oranının, sürtünme ısı ve sürtünme sonucu kampanada oluşan ısıyı sistemden uzaklaştırılmada yetersiz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



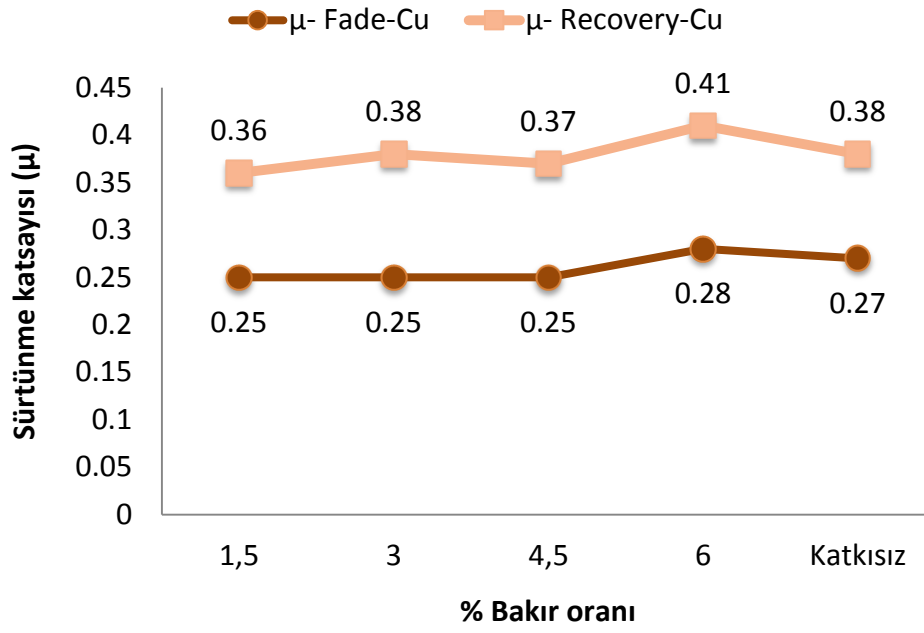
Şekil 8.7. Bakır fiber katkılı numunelerin fade aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği

Şekil 8.8’de referans sıcaklıklar için recovery grafiği incelendiğinde, % 6 bakır fiber katkılı numunenin en yüksek, % 1,5 katkılı numunenin ise en düşük recovery değerlerine sahip olduğu görülür. Bakırın ısı iletkenlik değerinin $401 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ olması, bakır partiküllerin ara yüzeydeki ısıyı atmosfere transfer etmek suretiyle sıcaklığın artmasına engel olarak sürtünme katsayısındaki düşüşü engellemesini sağlamıştır ve böylece % 6 bakır fiber katkılı numunede sürtünme katsayısı değerlerinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

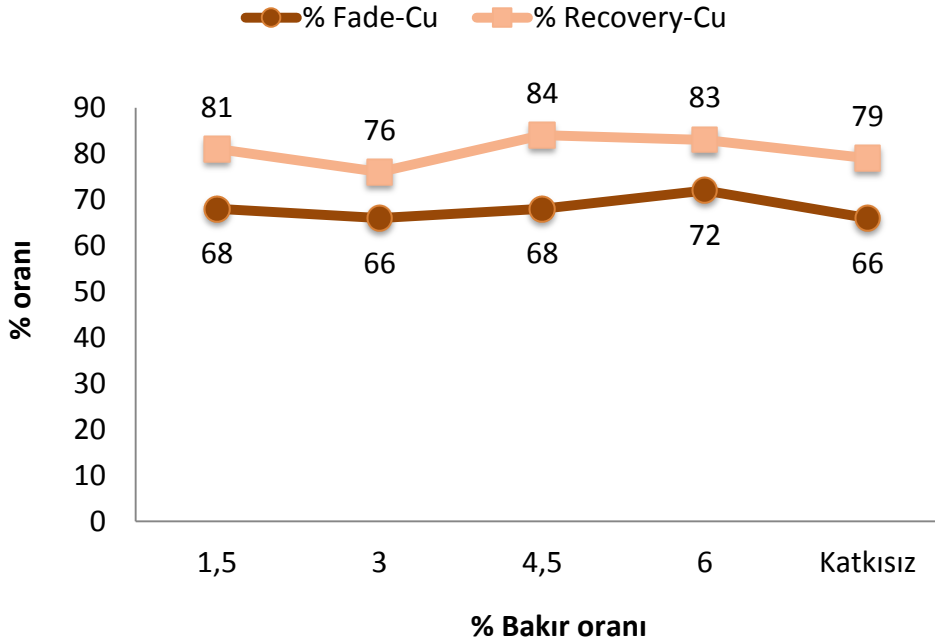


Şekil 8.8. Bakır fiber katkılı numunelerin recovery aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği

Bakır fiber katkılı numunelerin μ -fade oranlarının, katkısız numune ile hemen hemen aynı değerlerde olduğu Şekil 8.9'da görülmektedir. 0,28 μ değeri ile % 6 bakır fiber katkılı numunenin, diğer numunelere göre en yüksek μ -fade değerine sahip olduğu, 0,25-0,28 arasında değişen bu minimum sürtünme katsayısı değerlerinin, endüstride arzu edilen değerlerin altında olduğu bilinmektedir. Buna karşın, ağırlıkça bakır fiber oranı arttıkça 0,36 ile 0,41 arasında artış gösteren μ -recovery değerlerinin, endüstride arzu edilen değerlerde olduğu literatürde yer almaktadır. Şekil 8.10'daki % 68-72 arasında değişen % fade oranları, bakır fiber katkılı numunelerin fade karakteristiğinin beklenilenin altında olduğunu göstermektedir.



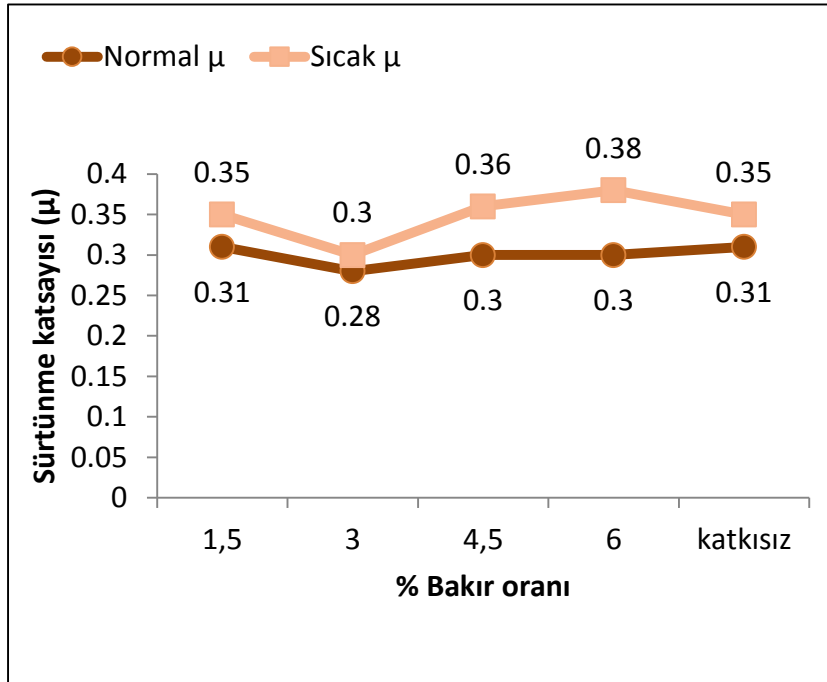
Şekil 8.9. Bakır fiber katkılı numunelerin μ -fade ve μ -recovery değerleri



Şekil 8.10. Bakır fiber katkılı numunelerin % fade ve % recovery oranları

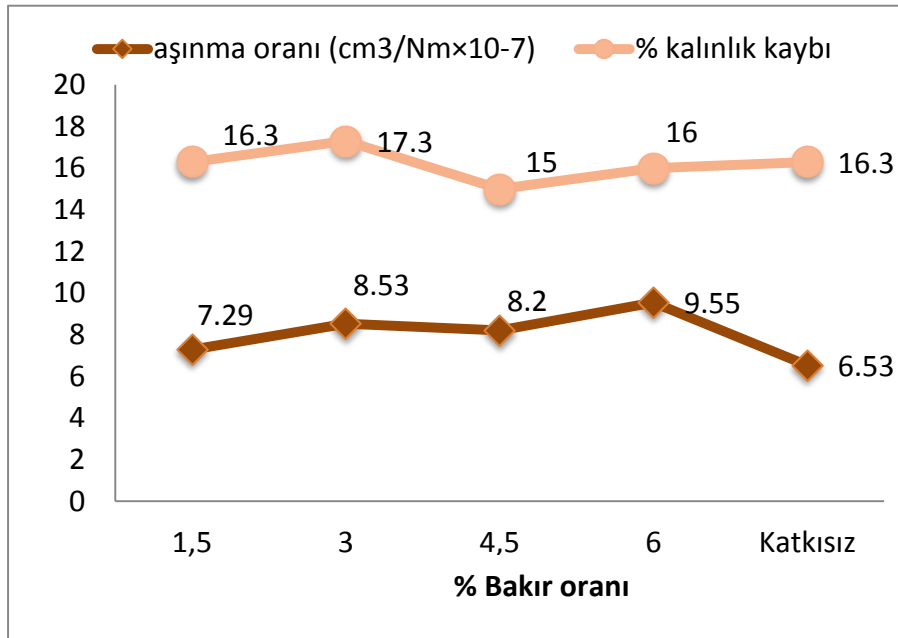
Literatürde, balata kompozisyonundaki metalik malzemelerin içerdiği inklüzyonların, termal iletkenliği arttırarak ara yüzeylerden sürtünme ısını etkili şekilde uzaklaştırdığı ve yüzeyde düşük miktarlarda bir tabaka oluşturduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra metalik malzemeler, abrasif davranış sergileyerek ara yüzeydeki tabakayı aşındırıp yenilemektedirler. Bu durum, balatanın yüzey topoğrafyasını ve aşınma davranışını değiştirir. Bu yüzden metalik malzemeler yalnızca termo-fiziksel özellikleri geliştirmez bunun yanı sıra sürtünme ara yüzeylerinde tribo-film kalitesini etkileyerek fade direncini geliştirirler [67]. Bakır fiber katkılı numuneler, % 71-84 arasında değişen, katkısız numuneninkinden daha yüksek % recovery oranlarına sahiptir (Şekil 8.10.). Bakır fiber katkılı numunelerin, arzu edilen aralıkta recovery oranları sergilemesinin sebebinin, literatürde izah edilen metalik malzemelerdeki inklüzyonlar olduğu düşünülmektedir.

Şekil 8.11'e göre, % 3 bakır fiber katkılı numune hariç tüm numunelerin normal ve sıcak sürtünme katsayıları, 0,3-0,38 değerleri arasındadır. Bu sonuçlar, % bakır fiber oranı arttıkça normal ve sıcak sürtünme katsayılarının kısmen arttığını ve bakır fiberin literatürde de belirtildiği gibi ısı transferini arttırarak sürtünme katsayısını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir [77].



Şekil 8.11. Bakır fiber katkılı numunelerin normal ve sıcak sürtünme katsayısı grafiği

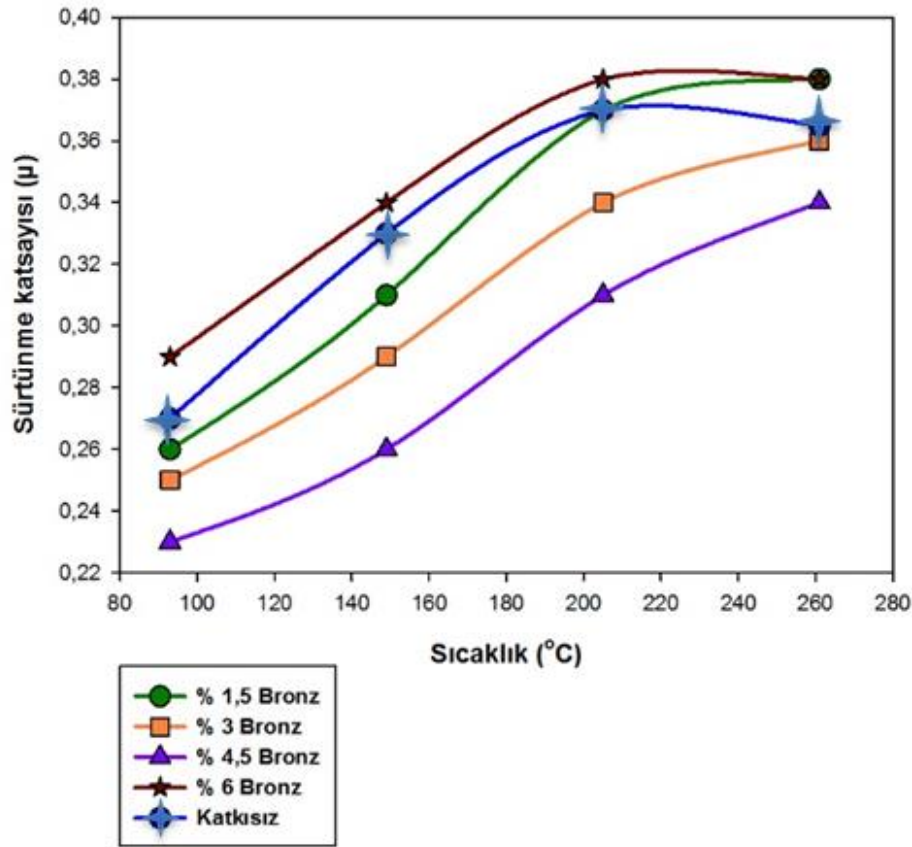
Şekil 8.12’de, aşınma oranları ve % kalınlık kayıpları görülmektedir. Buna göre % 3 bakır fiber katkılı numune dışındaki tüm numunelerde, kalınlık kayıpları hemen hemen aynıdır. Aşınma oranları ise bakır fiber oranı arttıkça artmaktadır. % 6 bakır fiber katkılı numune, tüm numune grupları içerisinde en yüksek aşınma göstermiştir. Bunun sebebinin, fiber halindeki bakırın, balata kompozisyonundaki boşluklara toz halindeki bileşenler gibi uniform şekilde yerleşememesi sonucunda, aşınma yüzeyinde partikül kopması şeklinde aşınma oluşturması ve literatürde “wear debris” olarak ifade edilen aşınma döküntüsü miktarının artması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.12. Bakır fiber katkılı numunelerin ilave oranına göre % kalınlık kaybı ve aşınma oranları

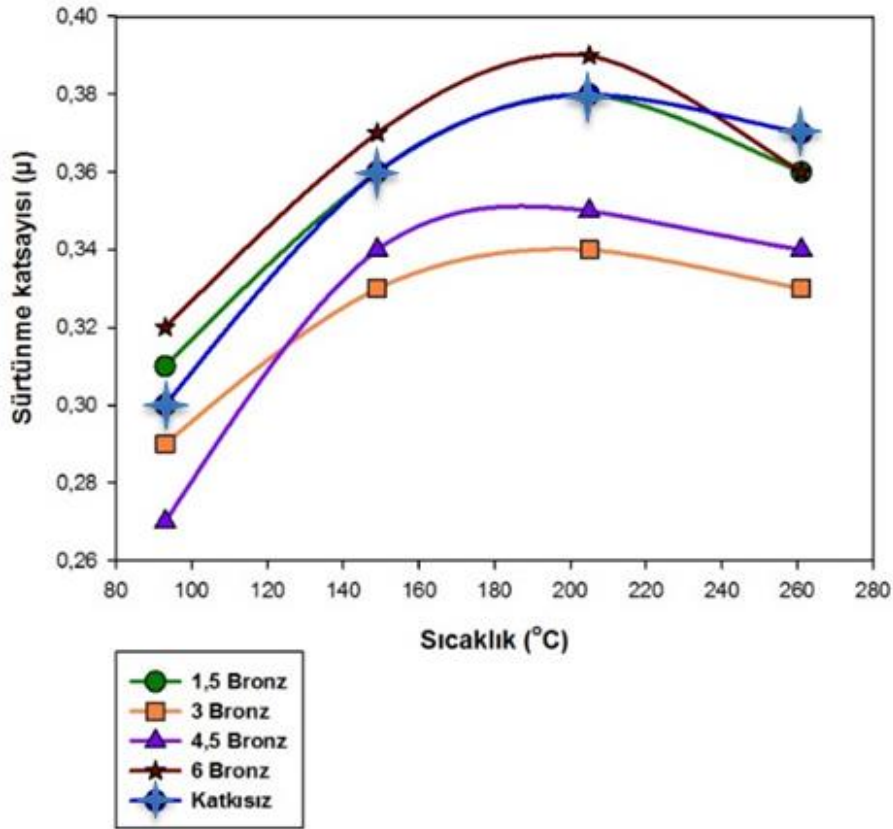
8.1.3. Bronz fiber katkılı numunelerin sürtünme-aşınma test sonuçları

Organik balata numunesine ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 oranında bronz fiber ilave edilerek, bronz oranının sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Şekil 8.13’te, referans sıcaklıklarda, % 6 bronz fiber katkılı numunenin en yüksek sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu ve onu katkısız numunenin izlediği; % 6’dan az bronz fiber katkılarının, fade aşamasındaki sürtünme katsayısında azalmaya sebep olduğu görülmektedir.



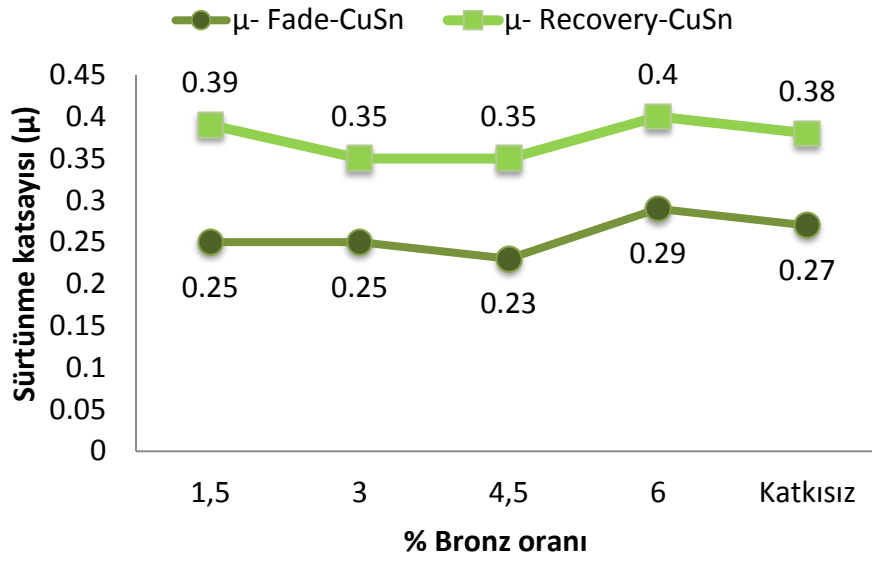
Şekil 8.13. Bronz fiber katkılı numunelerin fade aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği

Şekil 8.14’de gösterilen recovery aşamasında, fade aşamasındaki gibi en yüksek sürtünme katsayısı değerleri, % 6 bronz fiber katkılı numuneye aittir. Bronz fiber katkısı, boraks katkılı numunelerdeki gibi sıcaklık arttıkça μ değerini 205°C’ye kadar arttırmıştır. Bu numune grubunda da boraks katkılı numunelerle aynı şekilde 205°C’ye kadar matriksi oluşturan bronz fiberler ile diğer bileşenler arasındaki güçlü bağlar, sürtünme performansını arttırmıştır; bu sıcaklıktan sonra ise reçinenin termal ayrışması sebebiyle bağların dayanımı bir miktar azalmış ve sürtünme katsayısında düşüş görülmüştür.

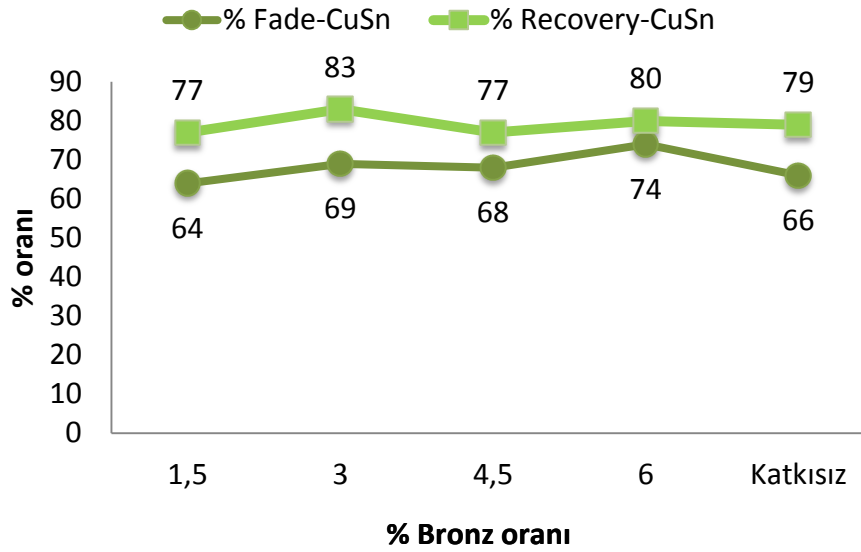


Şekil 8.14. Bronz fiber katkılı numunelerin recovery aşamasındaki sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiği

Şekil 8.15. incelendiğinde, bronz fiber katkılı numunelerinin μ -fade değerlerinin (0,25-0,29), endüstride arzu edilen değerlerin altında olduğu görülmektedir. % 6'dan düşük bronz fiber katkısının, fade aşamasındaki sürtünme davranışının gelişimi için yeterli olmadığı düşünülmektedir. Buna karşın, bronz fiber katkısının % 1,5 ve 6 olduğu numunelerde μ -recovery değerleri 0,39 ve 0,40 bulunmuştur. Bu durumun, bronz fiberin recovery aşamasında, ara yüzeyde oluşan sürtünme ısını, yüksek ısıl iletkenliği sayesinde ($354,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) atmosfere transfer etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat bakırın ısıl iletkenliğinin ($k_{\text{bakır}} = 401 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), bronzun ısıl iletkenliğinden ($k_{\text{bronz}} = 354,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) daha yüksek olması sebebiyle, bakır katkılı numunelerin recovery oranlarının bronz katkılılardan daha yüksek olduğu düşünülmektedir.



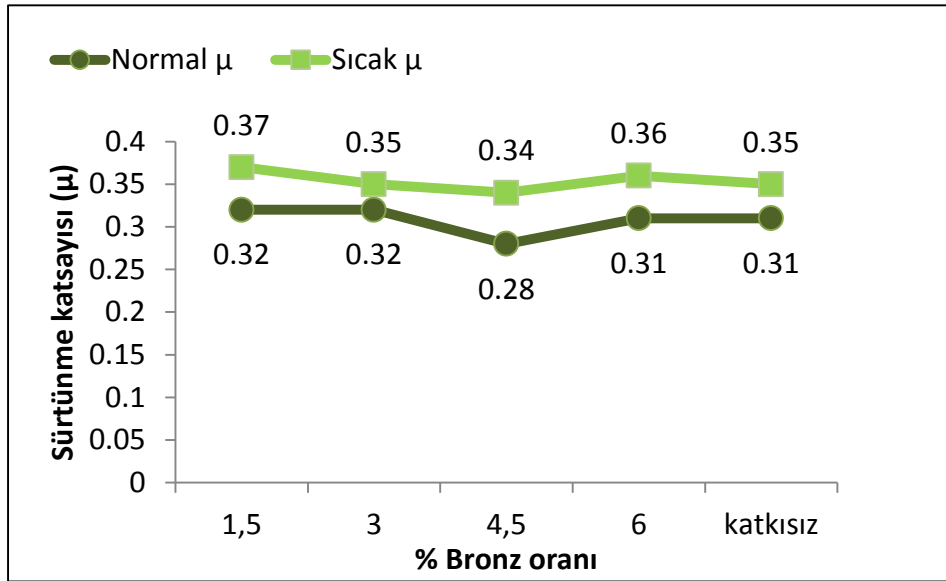
Şekil 8.15. Bronz fiber katkılı numunelerin μ -fade ve μ -recovery değerleri



Şekil 8.16. Bronz fiber katkılı numunelerin % fade ve % recovery oranları

Şekil 8.16., bronz fiber katkılı numunelerin % fade ve % recovery oranlarını göstermektedir. Buna göre fade oranları, ağırlıkça bronz fiber katkısı arttıkça % 64 ile 74 oranları arasında artış göstermektedir. Burada arzu edilen değerlerde olan tek numune, % 6 katkılı numunedir. Buna karşın, recovery oranları % 77 ile 83 oranları arasında artış göstermektedir ve tüm numuneler, arzu edilen recovery oranlarına sahiptir.

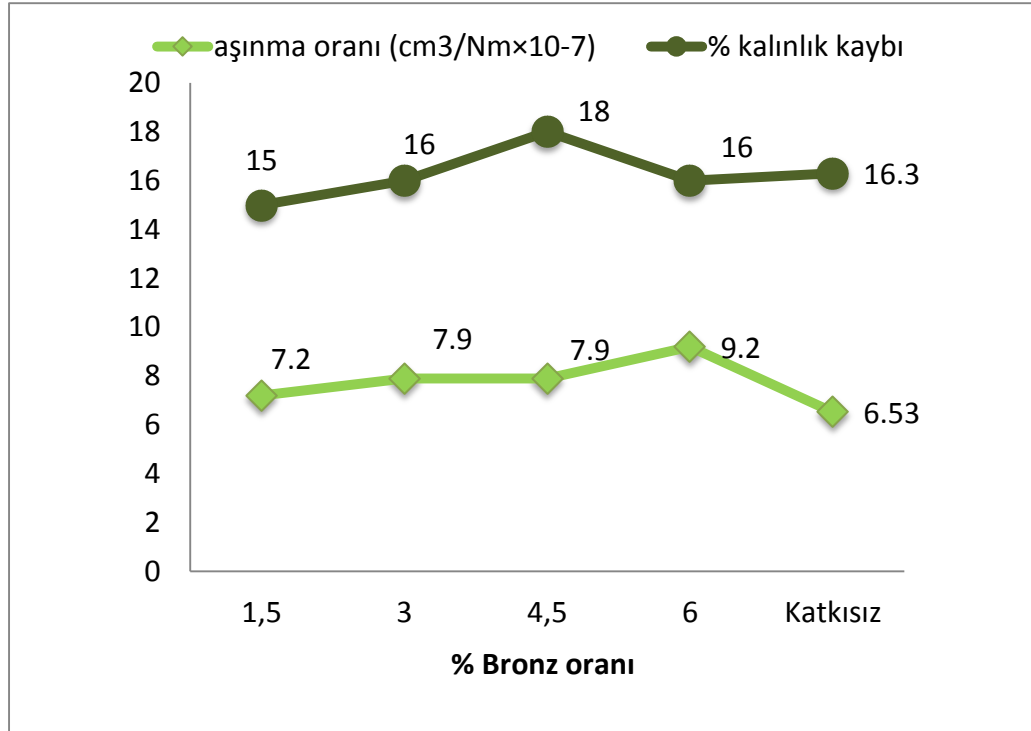
Şekil 8.17'deki grafik de incelendiğinde, sıcak ve normal sürtünme katsayısı değerleri, recovery aşamasındaki değerlerle tutarlılık göstermektedir. Isıl iletkenlikleri birbirine yakın olan bakır ve bronz fiber katkılı numunelerin sürtünme katsayısı değerleri hemen hemen aynı aralıktadır. Metalik malzemelerin yüksek ısı iletkenlikleri, bakır ve bronz fiber katkılı numunelerin normal ve sıcak μ değerleri ile fade ve recovery aşamasındaki μ değerlerinin, boraks katkılı numunelere göre daha yüksek ve kararlı olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada metalik fiberlerin en net etkisi, % 6 katkılı numunelerde tespit edilmiştir.



Şekil 8.17. Bronz fiber katkılı numunelerin normal ve sıcak sürtünme katsayısı grafiği

% kalınlık kaybı ve aşınma oranları incelendiğinde (Şekil 8.18.), bakır fiber katkılı numunelere benzer şekilde, aşınma miktarının tüm numunelerde hemen hemen aynı oranlarda olduğu; bronz katkısı arttıkça kalınlık kaybının arttığı görülmektedir. Bunun sebebinin, bakır fiber katkılı numunelerdeki gibi, bronz fiberlerin de aşınma yüzeyinde partikül şeklinde koparak aşınması ve bunun sonucunda boraks tozu katkılı numunelere göre daha fazla aşınma döküntüsü meydana getirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. % 1,5

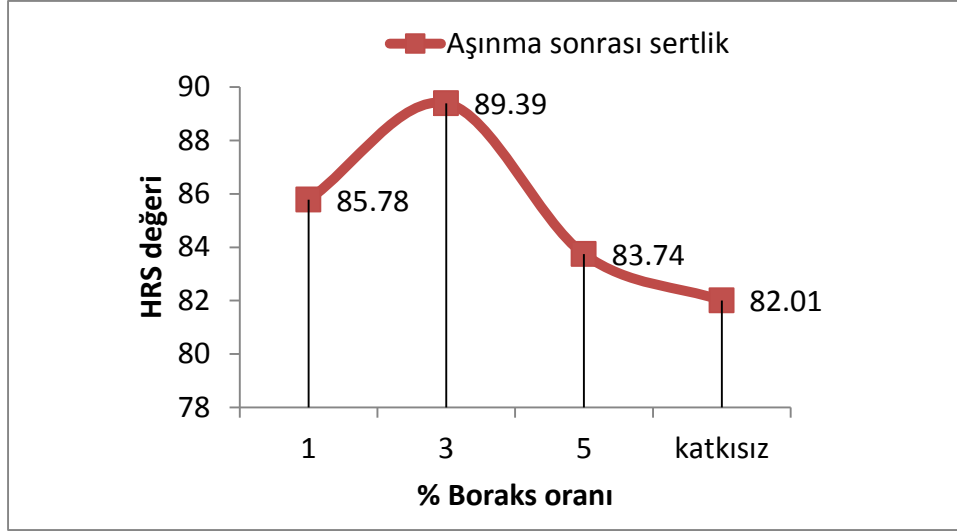
bronz katkılı numune hariç diğer bronz katkılı numunelerin yoğunluk değerleri birbirine eşittir ve bu yüzden bronz katkılı numunelerde yoğunluğun aşınma davranışına herhangi bir etkisi görülmemektedir.



Şekil 8.18. Bronz fiber katkılı numunelerin ilave oranına göre % kalınlık kaybı ve aşınma oranları

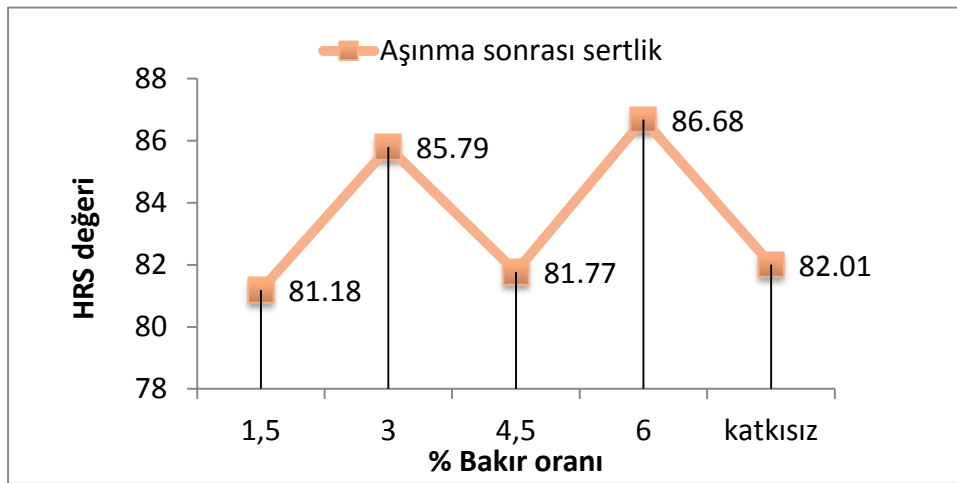
8.2. Sertlik Testi Sonuçları

Balata numunelerinin sertlik testleri, TS 555 standardına göre yapılmıştır. Şekil 8.19. incelendiğinde, % boraks tozu oranı ile sertlik arasında doğru bir orantı olmadığı fakat tüm numunelerin sertliklerinin katkısız numuneden yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 8.6'daki aşınma oranları da göz önüne alındığında, en yüksek sertlik değerine sahip olan % 3 boraks katkılı numune aynı zamanda en fazla aşınma oranına sahiptir. Bu durum % 3 boraks katkılı numunede, sürtünme esnasında artan sıcaklıkla deformasyon miktarının artarak diğer boraks katkılı numunelere göre daha fazla çalışma sertleşmesine sebep olduğunu ve sertliğin de artmasıyla aşınmanın arttığı düşünülmektedir.



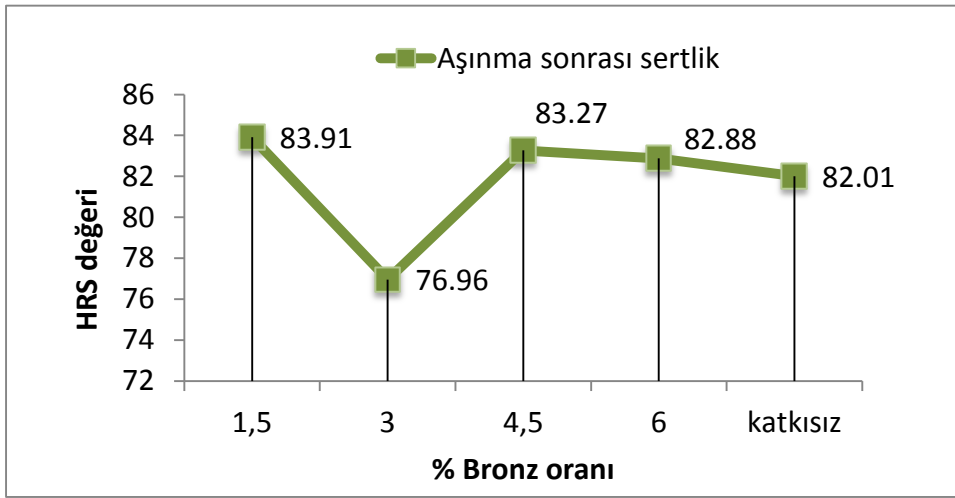
Şekil 8.19. Boraks tozu katkılı numunenin ilave oranına göre sertlik değerinde meydana gelen değişim

Şekil 8.20. incelendiğinde, bileşimdeki % bakır fiber oranı arttıkça, % 1,5 bakır fiber katkılı numune dışındaki tüm numunelerde sertliğin arttığı görülmüştür. % 3 ve 6 bakır fiber katkılı numunelerde sertlik, diğer numunelere göre daha yüksektir ve bu durum aşınmayı arttırmıştır. Şekil 8.12'deki aşınma ve Çizelge 7.3'teki yoğunluk değerleri birlikte incelendiğinde, sertlik arttıkça aşınma oranının arttığı görülmüştür fakat balatanın aşınma davranışında ve sertliğinde, katkı oranlarının mı yoksa yoğunluk değişiminin mi daha etkili olduğu net olarak ifade edilememektedir.



Şekil 8.20. Bakır fiber katkılı numunenin ilave oranına göre sertlik değerinde meydana gelen değişim

Şekil 8.21. incelendiğinde, % 3 bronz katkılı dışındaki numunelerin sertliğinin, katkısız numuneden yüksek olduğu görülmektedir. % 3 bronz katkılı numunede sertliğin düşük olma sebebinin, sürtünme ara yüzeyindeki deformasyonların düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bronz fiber katkılı numunelerin sertlik değerleri ortalamaları, bakır fiber katkılı numunelere göre daha düşüktür. Sertliğin artışı, balatalarda gürültüyü arttırdığı için istenilen bir durum değildir ve bu bağlamda, bronz katkılı numuneler, bakır katkılı numunelere göre daha az miktarda gürültüye sebep olmaktadır denilebilir.



Şekil 8.21. Bronz fiber katkılı numunenin ilave oranına göre sertlik değerinde meydana gelen değişim

Tüm numune gruplarının sertlikleri incelendiğinde, katkısız numune ile yakın değerlere sahip oldukları ve yapılan katkıların büyük bir sertlik artışına neden olmadığı görülmüştür. Balata malzemelerinde genel olarak sertliğin artması, sürtünme davranışına olumlu etki etmesine rağmen, hem disk hem de balata aşınma miktarını arttırmaktadır. Aşınmanın artması, balata ve disk ömrünü azaltacağından, endüstriyel kullanımda arzu edilen bir durum değildir.

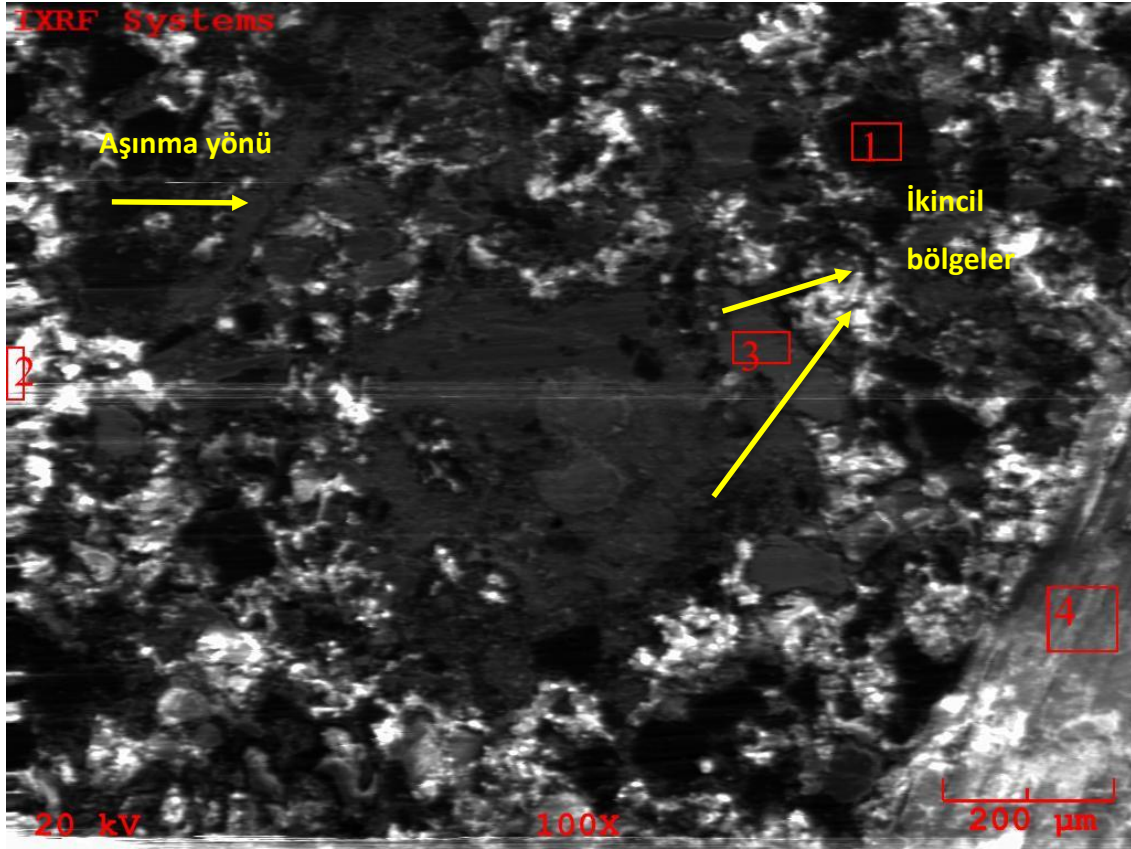
8.3. SEM ve EDS Analizi Sonuçları

Çizelge 7.1’de verilen, boraks tozu, bakır ve bronz fiber ilavesiyle üretilen numune gruplarının SEM ve EDS analizleri incelendiğinde, her numunede 4 farklı yapıda ve renkte bölge tespit edilmiştir. Katkısız ve boraks tozu katkılı numunelerden alınan SEM görüntülerinde; siyah bölge-1, beyaz bölge-2, sıvanmış bölge-3 ve gri bölge-4 olarak numaralandırılmış ve tüm bölgelerin EDS analizi yapılmıştır. Bakır ve bronz fiber katkılı numunelerde ise sıvanmış bölge-1, beyaz bölge-2, siyah bölge-3 ve gri bölge-4 olarak numaralandırılmıştır. Tüm numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde;

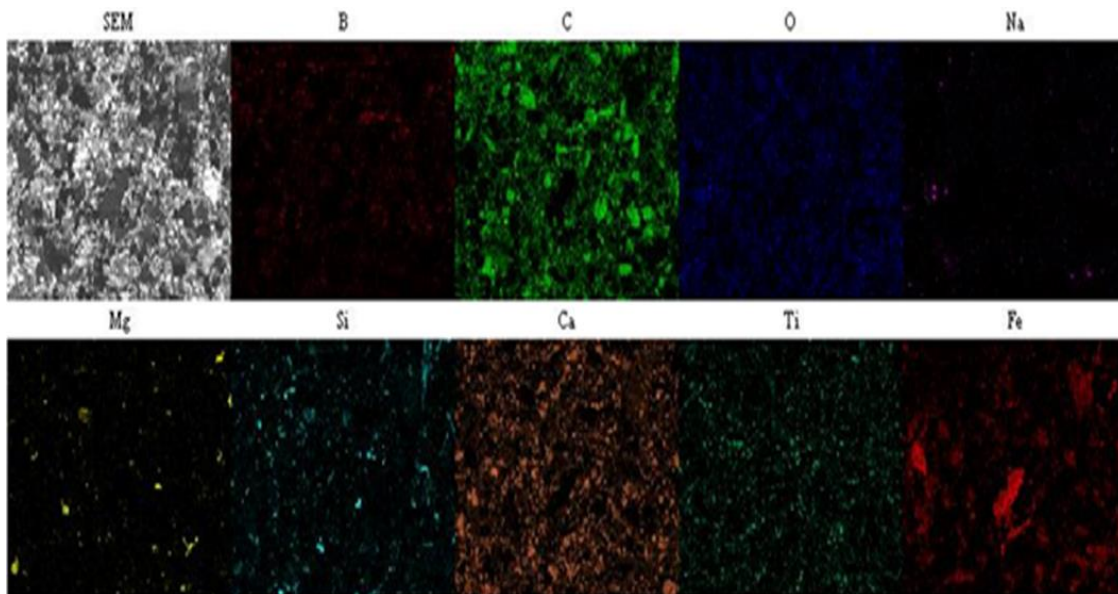
- Sıvanmış bölgede, Al, Si, Ca gibi elementlerin eser miktarda bulunduğu ve Fe ve O yüzdesinin yüksek olduğu,
- Siyah bölgede, C, O ve S yüzdesinin yüksek olduğu, katkı türüne göre B ve Cu gibi elementlerin de olduğu,
- Beyaz bölgede, C, O ve Ca yüzdesinin yüksek olduğu ve katkı türüne göre eser miktarlarda B, Cu, Sn elementlerinin tespit edildiği,
- Gri bölgede, C, Ca, O ve Fe elementlerinin yüzdelерinin fazla olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

8.3.1. Katkısız numunenin SEM görüntüleri ve EDS analizi

Katkısız numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde, kompozisyonu oluşturan bileşenlerin matriks içerisine homojen bir şekilde dağıldığı Şekil 8.23’teki EDS haritasında görülebilmektedir. Beyaz bölgelerin yoğunluğunun yüksek olma sebebi, yüzeyde karbon ve oksijenden meydana gelen bileşiklerin varlığının bir göstergesidir.



Şekil 8.22. Katkısız numunenin EDS görüntüsü

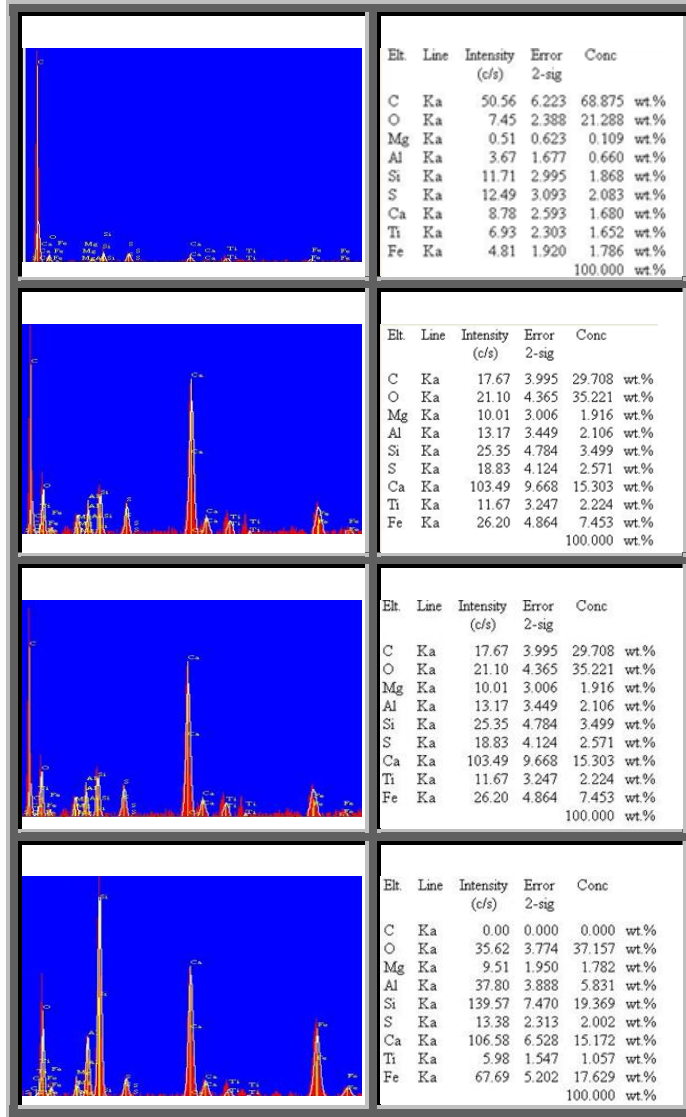


Şekil 8.23. Katkısız numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.1. Katkısız numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe
wt %	46,53	18,98	1,25	1,60	4,01	1,69	10,80	1,47	13,68

Şekil 8.25'teki bölgesel EDS sonuçlarında, 1 numaralı siyah bölgede C, O ve S miktarı yüksektir. Buradaki C elementinin, grafit ve aramid fiberden geldiği düşünülmektedir. Beyaza yakın gri bölgelerin O, Fe, Si, Ca ve Al elementlerini içerdiği görülmüş, bu elementlerin abrasif olarak kullanılan Al_2O_3 bileşeninden geldiği tahmin edilmektedir.



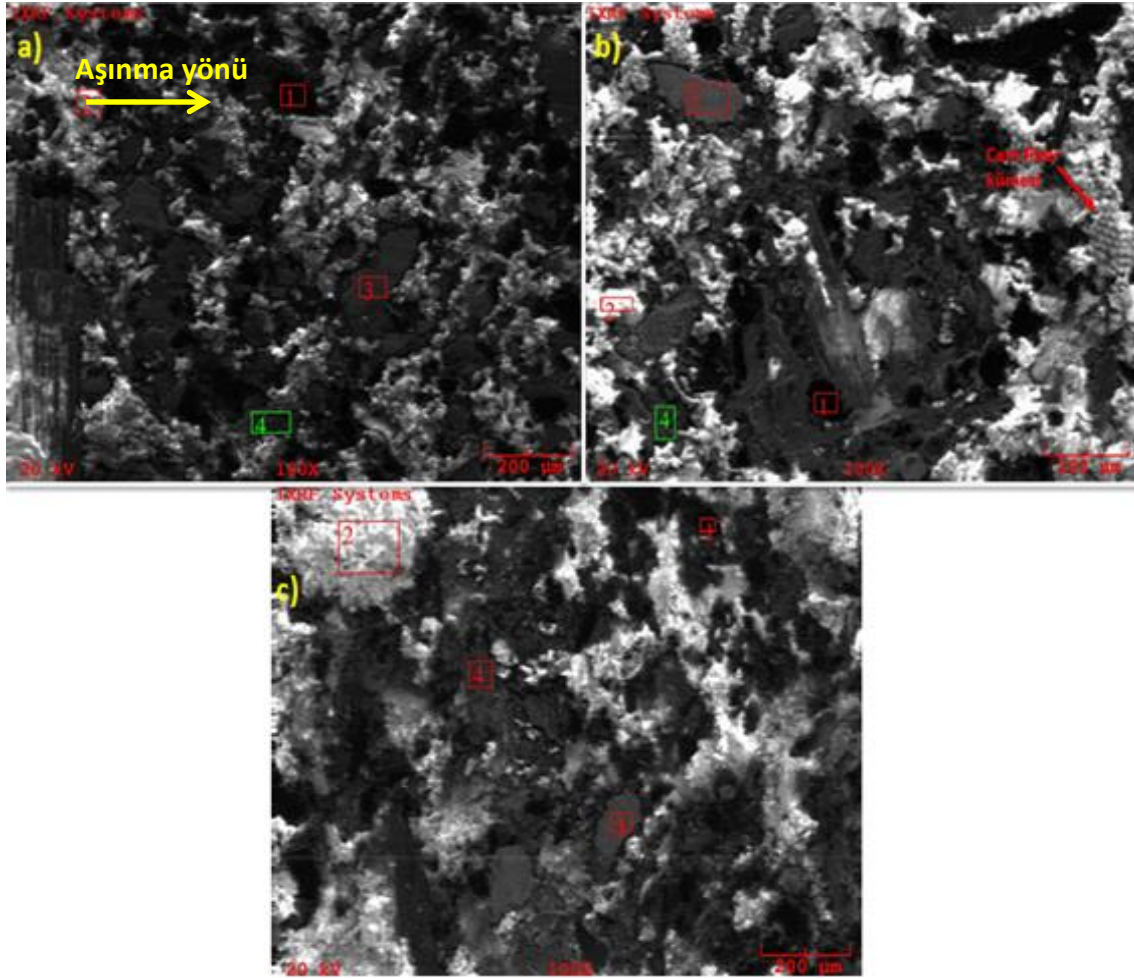
Şekil 8.24. Katkısız numunenin sırasıyla 1, 2, 3 ve 4. bölgelerdeki elementel analiz sonuçları

3 numaralı sıvanmış bölgede, Fe, O ve Ca oranının yüksek olduğu ve bu bölgelerin literatürde izah edilen ve sürtünme-aşınma davranışını kontrol eden ikincil bölge tanımına uyduğu tespit edilmiştir [73,77,78,79]. İkincil bölgelerde Fe oranının yüksek çıkmasının bir diğer sebebi de, gri dökme demir diskten aşınma sonucu kopan parçaların, balatanın aşınma yüzeyinde birikmesidir [80]. Katkısız numunenin genelinde sıvanmış bölgelerin sayısı fazladır ve bu durumun, sürtünme katsayısını azaltarak ve aşınmayı arttırdığı düşünülmektedir. Elde edilen bu düşünce, literatür ile örtüşmektedir [69].

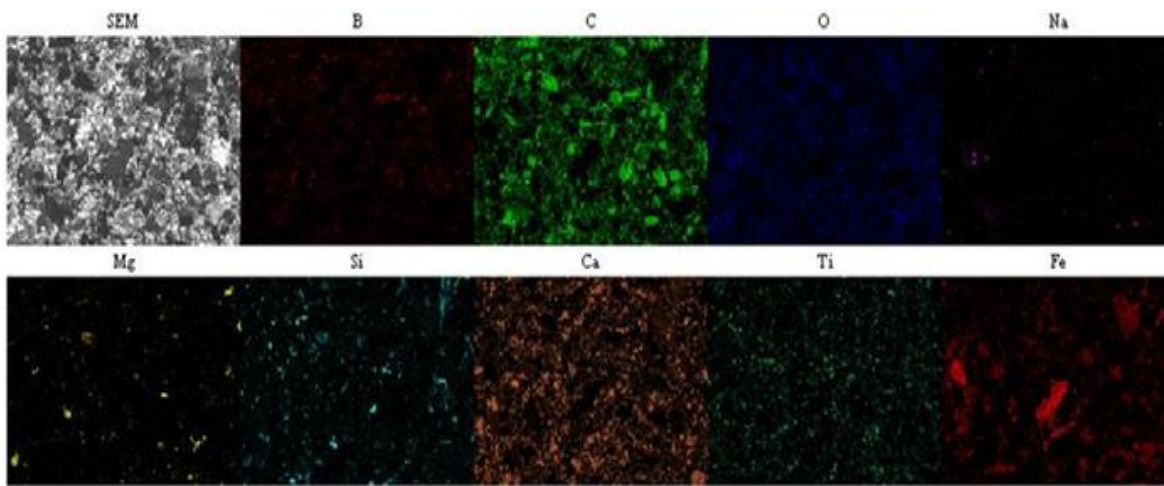
8.3.2. Boraks tozu katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri

% 1, 3 ve 5 boraks tozu katkılı numunelerin EDS analizleri incelendiğinde, her birinin 1 numaralı siyah bölgelerinde, C ve O elementinin yanı sıra, katkı yüzdesi ile doğru orantılı olarak B elementi ihtiva ettiği görülmüştür. B elementinin O ile yaptığı bileşiklerin (siyah ve beyaz bölgeler) yüzdesinin yüksek olması ile birlikte, balatanın aşınma direncinin geliştiği ve tüm boraks tozu katkılı numunelerin aşınma direncinin, diğer numunelerden oldukça yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 8.6., Şekil 8.12. ve Şekil 8.18'e göre).

% 3 boraks tozu katkılı numunede, kayma yönüne dik olarak yönelen, kümeleşmiş cam fiberlere rastlanmıştır (Şekil 8.26.). Bu kümeleşmenin sebebinin, sıcaklığın artması ile visko-elastik davranış göstermeye başlayan cam fiberlerin adheziv yapışması olduğu söylenebilir.



Şekil 8.25. Ağırlıkça % a) 1, b) 3 ve c) 5 boraks tozu katkılı numunelerin EDS görüntüleri

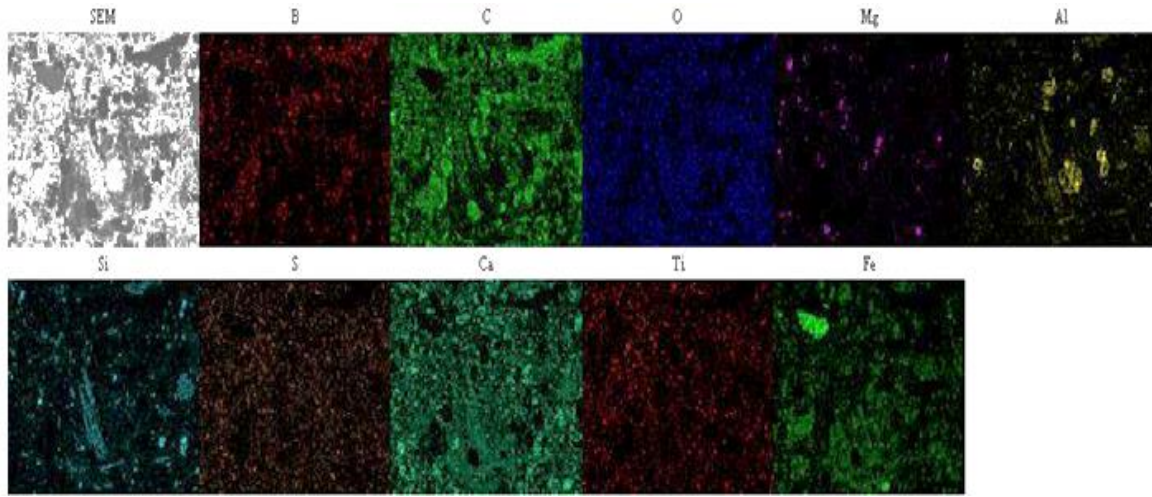


Şekil 8.26. % 1 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.2. % 1 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	B	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Fe
wt %	22,69	51,542	13,90	0,15	0,46	0,94	2,64	0,01	1,03	4,27	0,56	1,85

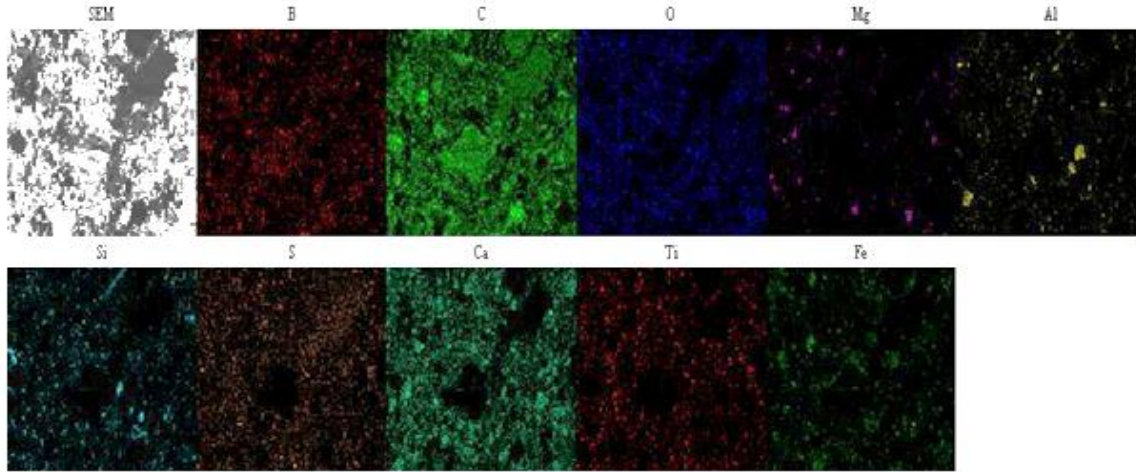
Ağırlıkça % 1, 3 ve 5 boraks tozu katkılı numunelerin genel harita görüntüleri incelendiğinde, elementlerin matriks içerisindeki dağılımlarının homojen olduğu görülmekte ve bu durumun, balatanın sertlik ve aşınma gibi özelliklerinin her bölgede aynı karakteristikte olmasını sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 8.27. % 3 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.3. % 3 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	B	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe
wt %	23,25	49,70	15,03	0,42	0,85	1,82	0,93	4,29	0,60	3,10



Şekil 8.28. % 5 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.4. % 5 boraks tozu katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	B	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe
wt %	25,24	60,78	8,32	0,26	0,29	0,64	0,61	2,66	0,31	0,91

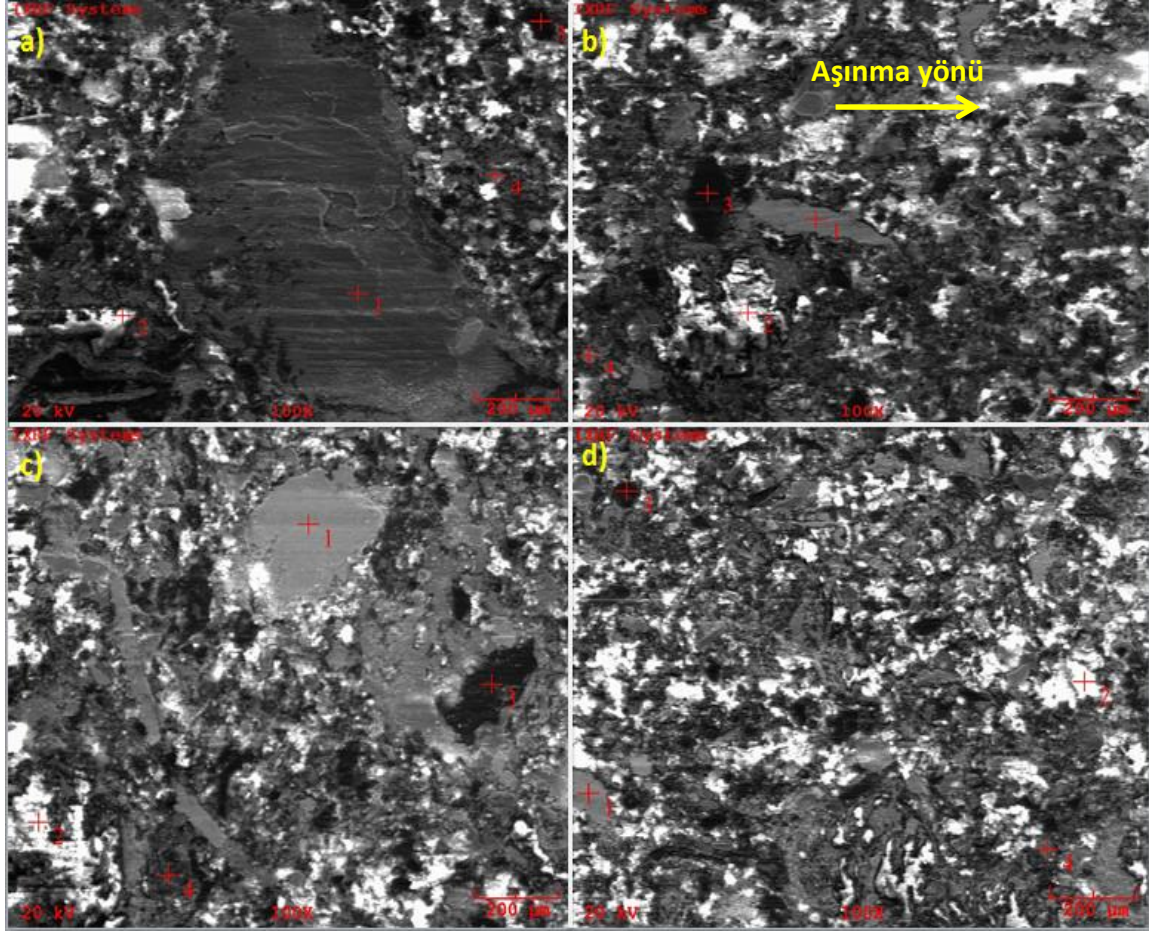
Çizelge 8.5'teki EDS sonuçlarında, 3 numaralı sıvanmış bölgelerde literatürdeki gibi Fe ve O elementlerinin miktarının fazla olduğu ve eser miktarlarda da Ca, Si, Al içerdiği görülmektedir. 3 numaralı sıvanma bölgelerinin oranı, % 1 boraks katkılı numunede diğerlerine göre daha fazladır. Sıvanmış (ikincil) bölgelerin sayısının artması, sürtünme esnasında gerçek temas noktalarının daha fazla olduğunu gösterir [73,74]. % 1 boraks katkılı numunenin diğerlerine göre en yüksek μ -sıcak, μ -soğuk ve μ -fade değerlerine sahip olmasının nedeninin, literatürde izah edilen gerçek temas noktaları olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 8.5. Ağırlıkça % 1, 3 ve 5 boraks tozu katkılı numunelerin bölgesel elementel analiz sonuçları

% element miktarı	% 1 Boraks katkılı	% 3 Boraks katkılı	% 5 Boraks katkılı
1. Bölge	B:21,5 C:72,1 O:5,5	B:15,7 C:76,8 O:5,8	B:92,5 O:5,1
2. Bölge	B:23,5 C:49,4 O:14,5 Ca:4,9	B:16 C:74,1 O:5,8	Si:43 Ca:28,2 Fe:14 Al:10,4
3. Bölge	B:44 C:10,7 O:6,8 Fe:35,1	Fe:84,6 O:7,7 Si:3	Fe:91,3 Si:3,1 Ca:2,7
4. Bölge	B:17,3 C:37,3 O:20 Fe:10,3	C:30,5 O:31,4 Fe:14	Fe:41,9 Ca:27 Si:15 Al:6,1

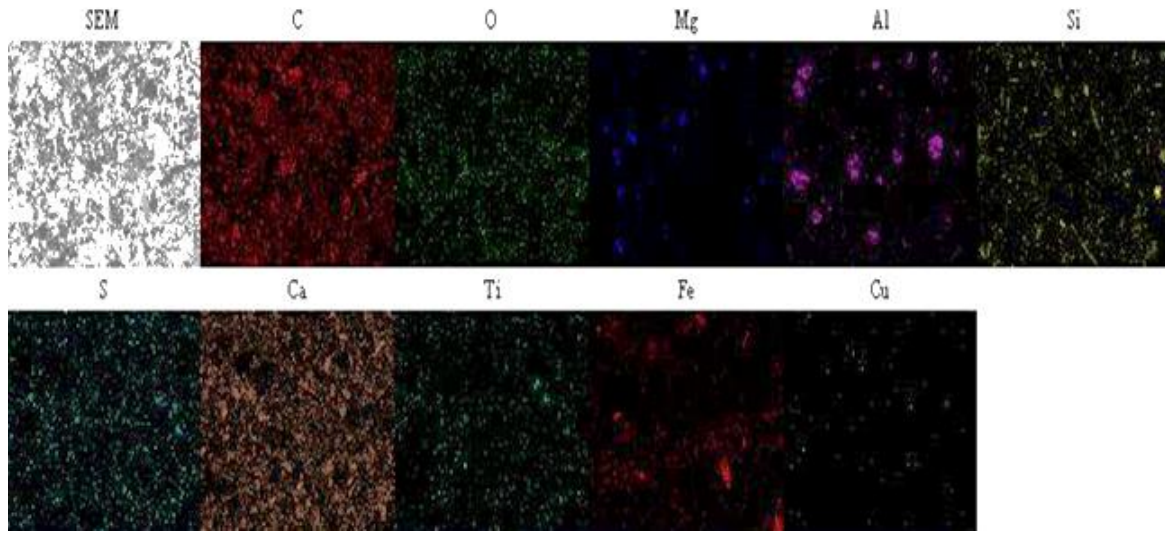
8.3.3. Bakır fiber katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Bakır fiber katkılı numunelerin genel EDS haritaları incelendiğinde, C, O, Ca ve Fe yüzdelerinin, diğer elementlere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. 1 numaralı sıvanmış bölgelerde Fe ve O'nun yanında, % bakır fiber katkısıyla doğru orantılı olarak Cu elementinin yüzdesinin arttığı görülmüştür. % 1,5 bakır fiber içeren numunede, 1 numaralı sıvanmış “ikincil bölgelerin” boyutlarının uzun ve geniş olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8.30.). Literatürdeki çalışmalar da referans alınarak, aramid fiber ve grafitten oluşan bu ikincil bölgelerin boyutlarının daha büyük olması sebebiyle sürtünme katsayısı değerinin azaldığı düşünülmektedir [69].



Şekil 8.29. Ağırlıkça % a) 1,5, b) 3, c) 4,5 ve e) 6 bakır fiber katkılı numunelerin EDS görüntüleri

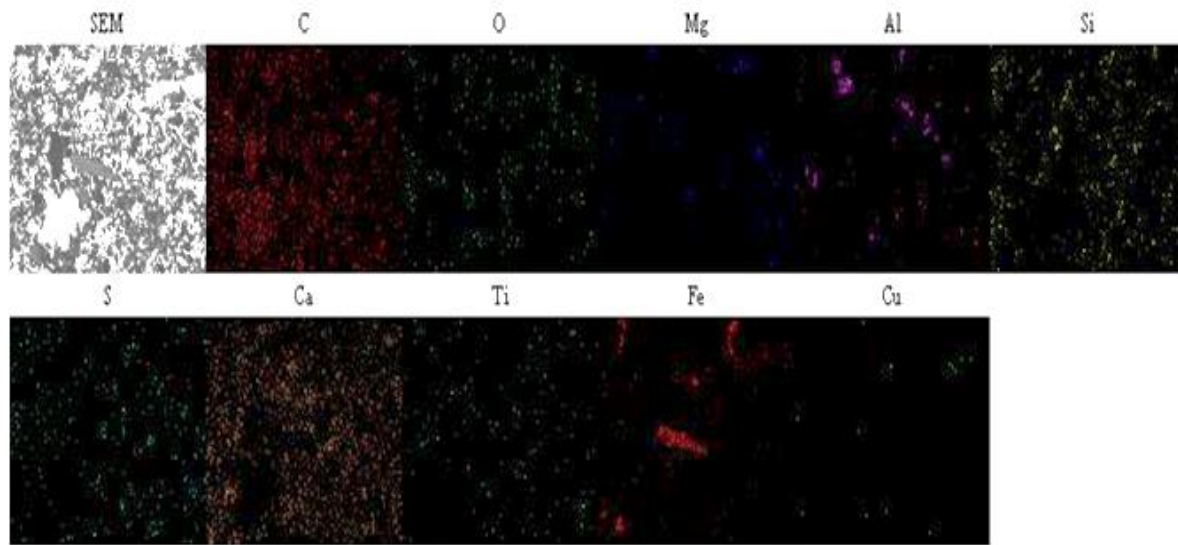
Genel EDS görüntüleri incelendiğinde, bakır fiber katkılı tüm numunelerde, balata bileşenlerinin kompozisyona homojen şekilde dağılarak uyumlu bir matriks oluşturdukları görülmektedir. EDS sonuçlarına göre, tüm numunelerde C, O, Ca, Fe, Si ve Cu oranının diğer elementlere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ağırlıkça % 1,5 ve 3 bakır fiber katkılı numunelerin genel EDS sonuçlarında, bakır oranı düşük çıkmıştır. Balatanın görüntülenen bölgesindeki oranlar ile balatanın içerdiği bakır miktarı arasında, balatanın sürtünme-aşınma karakterini etkileyen bir ilişkinin olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 8.30. % 1,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.6. % 1,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu
wt %	44,47	24,56	1,62	2,92	3,56	1,69	11,10	1,73	7,42	0,94

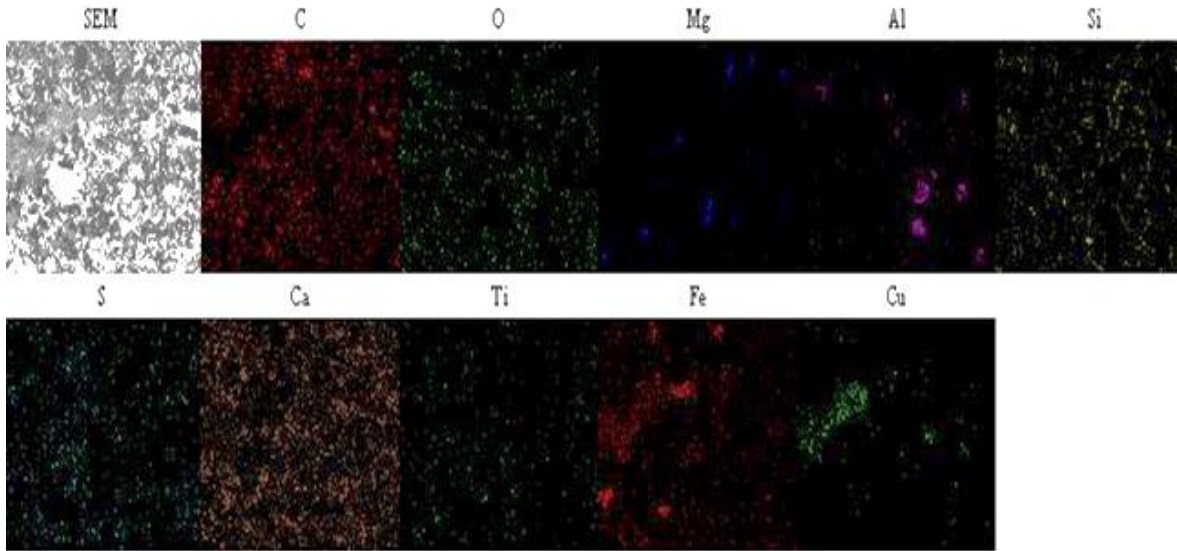


Şekil 8.31. % 3 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.7. % 3 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu
wt %	47,97	22,83	0,87	1,47	2,11	1,38	11,88	2,11	8,51	0,86

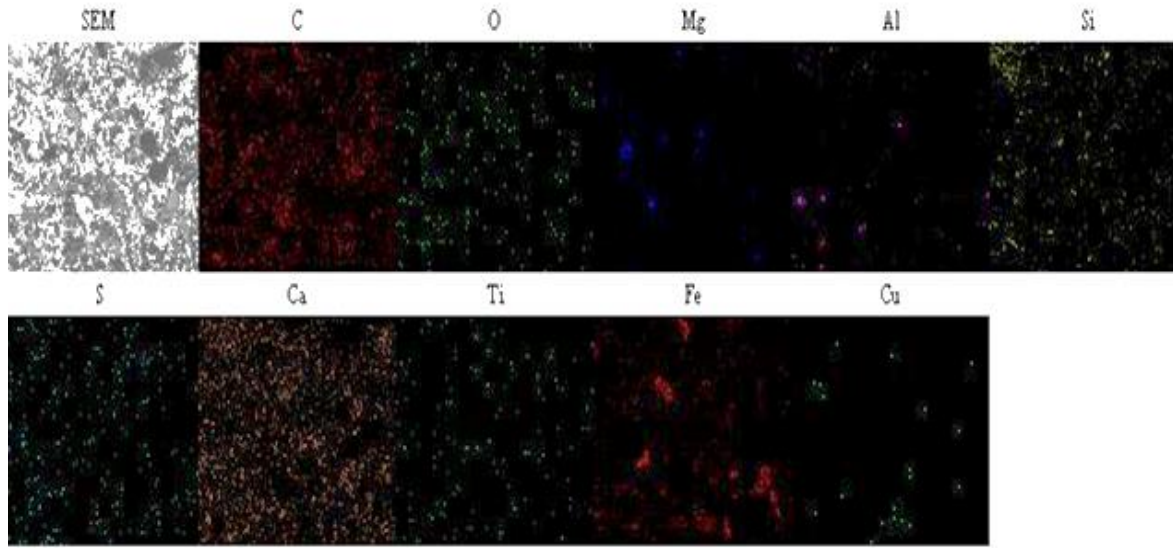
Ağırlıkça % 4,5 ve 6 bakır fiber katkılı numunelerde, görüntü alınan bölgelerde diğer numunelere göre bakır oranları daha yüksektir. Bu durumda, numunelerde ağırlıkça bakır fiber katkısı arttıkça, görüntü alınan bölgelerde bakır elementinin arttığı görülmektedir.



Şekil 8.32. % 4,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.8. % 4,5 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu
wt %	41,42	23,14	2,55	2,22	3,54	1,90	9,76	1,07	10,36	4,05



Şekil 8.33. % 6 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.9. % 6 bakır fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu
wt %	42,85	24,05	0,70	2,32	3,26	1,13	9,00	2,64	11,38	2,68

Çizelge 8.10’da, % 4,5 ve 6 bakır fiber katkılı numunelerin 1 numaralı sıvanmış bölgelerinin EDS analizleri sonucunda, Fe ve Cu oranlarının yüksek olduğu görülmüştür. Buna göre, Fe ve Cu arasındaki bağlantının güçlü olmasının, özellikle recovery aşamasında sürtünme katsayısı değerlerini (0,36-0,41) arttırdığı ve böylece bakır katkılı numunelerin recovery oranlarının diğer numune gruplarına göre daha yüksek olmasını sağladığı düşünülmektedir.

% 4,5 bakır fiber katkılı numunede, ikincil bölge olarak tanımlanan sıvanmış bölgelerin, kayma hızı ve yük etkisiyle parçalanıp dağılarak matriks içerisinde sıkıştığı ve toz kümelerine gömüldüğü gözlemlenmiştir. İkincil bölgelerin yüzdesinin çok olması ve toz kümelerine gömülmesi sonucunda sürtünme katsayısı değerinin artmasını sağladığı düşünülmektedir.

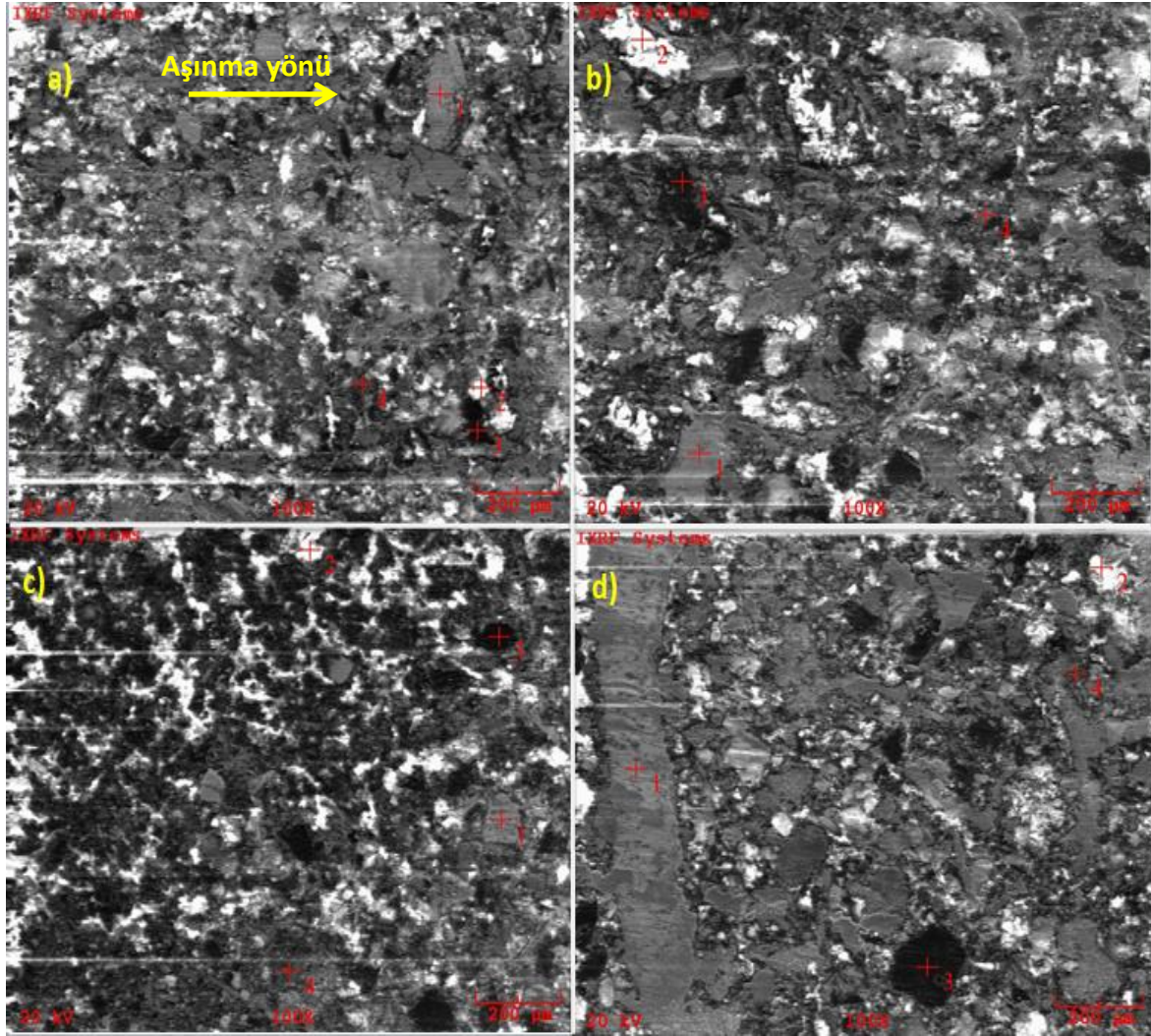
EDS sonuçlarında, % 6 bakır fiber katkılı numunede fazla miktarda 2 numaralı beyaz bölgelere rastlanmıştır. Karbon ve oksit miktarının yüksek olduğu bu bölgelerin çokluğunun, tüm numuneler arasında en yüksek aşınma oranına sahip olan % 6 bakır fiber katkılı numunenin aşınma miktarını arttırmada, etkili olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 8.10. Ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 bakır fiber katkılı numunelerin bölgesel elementel analiz sonuçları

% element miktarı	% 1,5 Bakır katkılı	% 3 Bakır katkılı	% 4,5 Bakır katkılı	% 6 Bakır katkılı
1. Bölge	C:25,3 Fe:27,7 O:19,1 Ca:12,1	Fe:86,8 Cu:4,1 Mg:2,1	Fe:88,4 Cu:5,4	Fe:85,7 O:5,1 Cu:4,1
2. Bölge	C:66,4 O:23,1 Fe:5,4 Cu:2	C:69,4 O:27,2	C:73,7 O:20,2	Ca:40,4 O:28 C:11,5 Ti:5
3. Bölge	C:90,8 O:6	C:85,8 O:6,6	C:84 O:11,2 S:3	C:94 O:3
4. Bölge	C:65,9 O:19 Ca:5,1	Fe:92,7 Cu:3,2	C:43,2 O:33,4 Ca:9,3 Fe:8,7	C:65,4 O:21,1 Mg:5,7

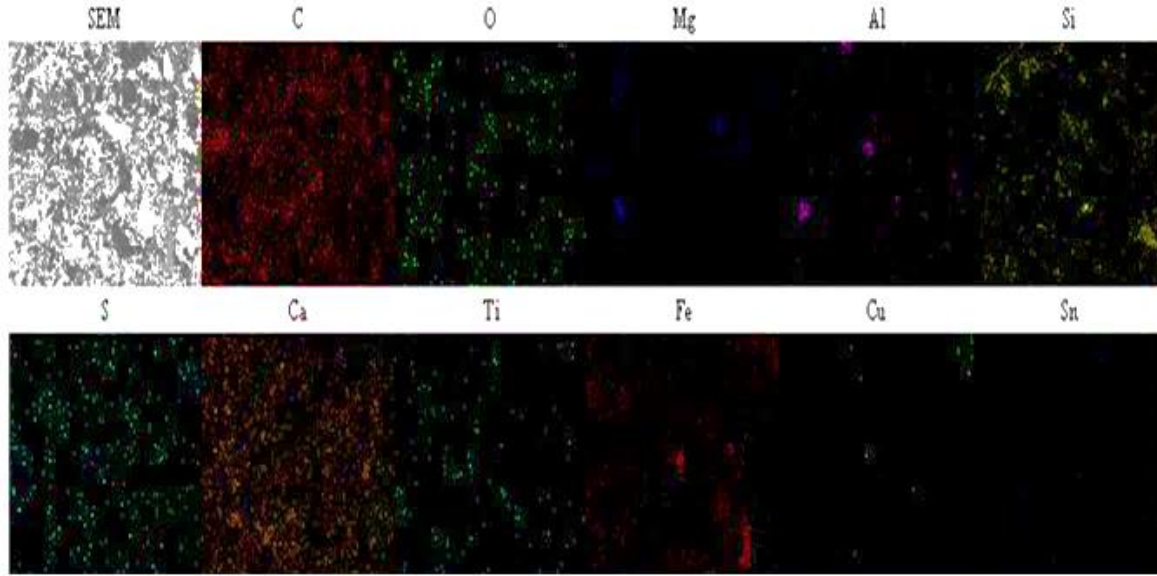
8.3.4. Bronz fiber katkılı numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Bronz fiber katkılı numunelerin bölgesel EDS analizleri incelendiğinde, 1 numaralı sıvanmış bölgelerde Fe ve O'nun yanı sıra, bakır fiber içeren numunelerdeki gibi Cu ve buna ek olarak Si ile Sn elementlerine rastlanmıştır. 3 numaralı siyah bölgeler incelendiğinde, tüm numune gruplarında tespit edilen C ve O elementine ek olarak, Sn elementinin de olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin, Sn elementinin yüksek sıcaklıklarda difüzyonunun artması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.34. Ağırlıkça % a) 1,5, b) 3, c) 4,5 ve e) 6 bronz fiber katkılı numunelerin EDS görüntüleri

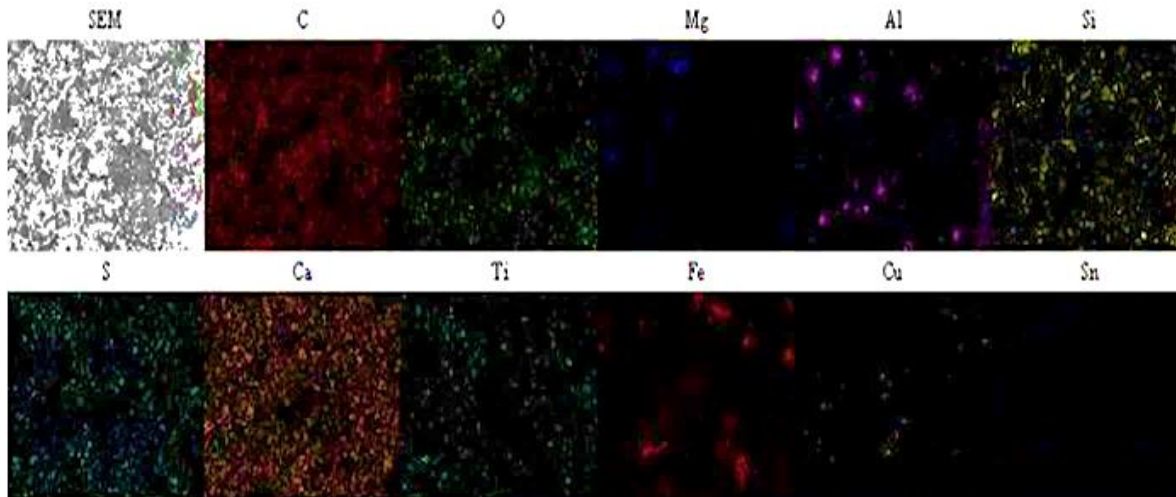
Bronz fiber katkılı numunelerin, genel EDS görüntüleri incelendiğinde, üretilen tüm numune grupları gibi bronz fiber katkılı tüm numunelerin de kompozisyonunun homojen olduğu görülmüştür. EDS oranları incelendiğinde, ağırlıkça % 1,5 ve 3 bronz fiber katkılı numunelerdeki oksijen miktarının, % 4,5 ve 6 katkılı numunelerdeki oksijen miktarlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. EDS analizlerindeki oksijenin varlığı, bileşenlerdeki oksijen elementinin yanı sıra oksit miktarı ile de bağlantılı olduğundan, elde edilen verilere dayanarak bronz katkı oranı arttıkça oksitlenmenin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 8.35. %1,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.11. % 1,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu	Sn
wt %	44,41	17,36	1,13	1,52	3,93	1,40	10,35	1,71	10,78	4,18	3,23

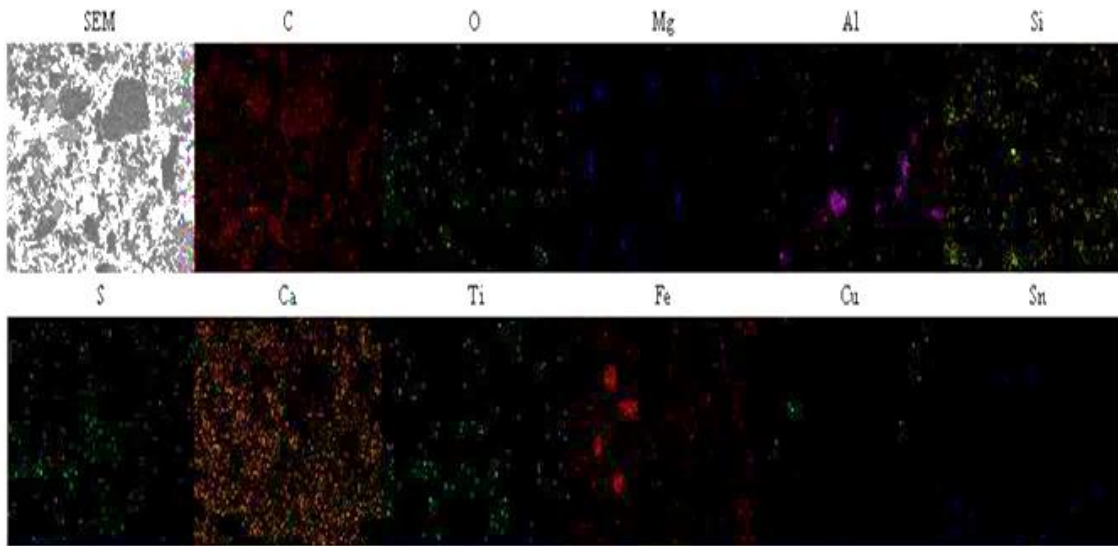


Şekil 8.36. % 3 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.12. % 3 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu	Sn
wt %	44,8	21,6	1,7	3,1	5,1	2,5	10	1,5	7,2	2,1	0,44

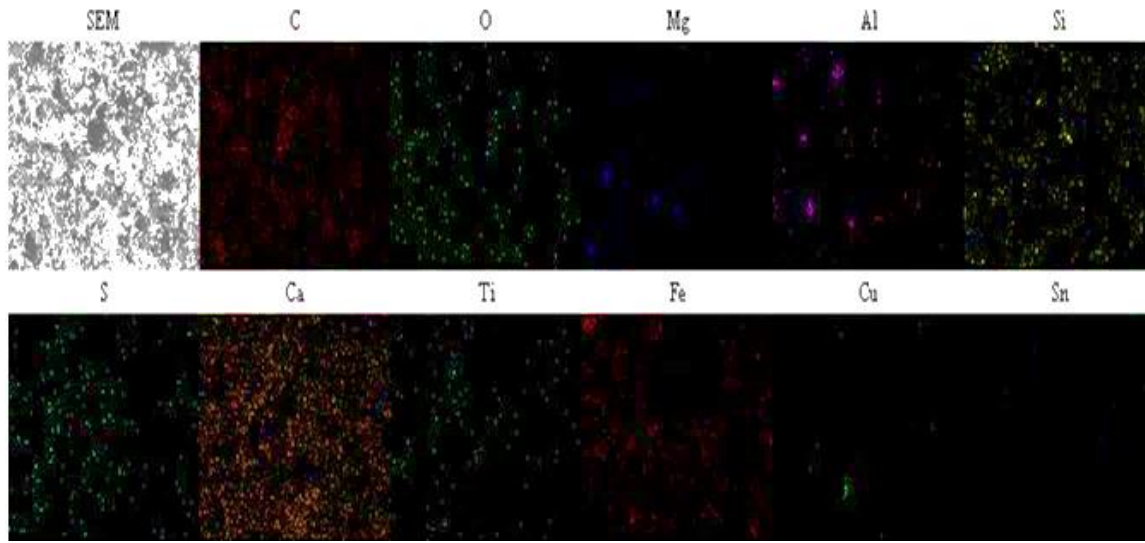
Ağırlıkça % 4,5 ve 6 bronz katkılı numunelerin bölgesel EDS görüntüleri incelendiğinde, ikincil bölge olarak tarif edilen sıvanma bölgelerinin ve siyah bölgelerin oranı, % 1,5 ve 3 bronz fiber katkılı numunelerdekilerin tersine daha fazladır. Bu durumun, temas noktalarının artmasına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerini arttırdığı tahmin edilmektedir.



Şekil 8.37. 4,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.13. % 4,5 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu	Sn
wt %	42	23,1	1,85	2,34	2,14	1,3	10,02	1,6	11,1	0,8	3,8



Şekil 8.38. % 6 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS analizi görüntüsü

Çizelge 8.14. % 6 bronz fiber katkılı numunenin genel EDS görüntüsü elementel analiz sonuçları

Element	C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Cu	Sn
wt %	38,8	24,9	2	1,4	3	2,2	7,4	2,5	12,4	5,3	2,5

Çizelge 8.15’deki bölgesel EDS sonuçlarına göre, literatürdeki ile benzer şekilde, Fe ve O bakımından zengin, gerçek temas noktaları olarak tarif edilen 1 numaralı bölgelerin yoğunluğu, % 4,5 ve 6 bronz fiber katkılı numunelerde daha fazladır. Bronz fiber miktarı arttıkça, sıcak- μ ve recovery- μ değerlerinin artmasının sebebinin, gerçek temas noktalarının miktarının artması olduğu düşünülmektedir. % 6 bakır fiber katkılı numunenin temas noktalarının boyutları, diğer numunelere göre daha fazladır. Bu durum, en yüksek sürtünme katsayısı değerlerinin, % 6 bakır fiber katkılı numunede olmasına sebep olmuştur. Aynı sebebe bağlı olarak, ağırlıkça % bronz fiber miktarı arttıkça, sürtünme katsayısının artmasıyla birlikte aşınma miktarları artmıştır. Aşınma miktarındaki bu artışın, bakır ve bronz partiküllerin, organik balatayı meydana getiren diğer bileşenler ile arasındaki zayıf bağlar sebebiyle, metalik partiküllerin sürtünme esnasında yüzeyden kolaylıkla koparak ara yüzeyde oluşturdukları kütsel kayıplardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 8.15. Ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 bronz fiber katkılı numunelerin bölgesel elementel analiz sonuçları

% element miktarı	% 1,5 Bronz katkılı	% 3 Bronz katkılı	% 4,5 Bronz katkılı	% 6 Bronz katkılı
1. Bölge	C:9,7 O:13 Si:8,5 Fe:53,3	Fe:79 O:7 Cu:3,5	Fe:85 Cu:6	Cu:53,5 O:17 Fe:10,5
2. Bölge	C:54,6 O:32,6 Ca:4,4 Sn:3,1	C:80 O:15	C:41 O:19 Ca:17 Fe:12,4	O:29,3 Si:27 Ca:23 Sn:8
3. Bölge	C:72,1 O:14,6 Sn:3,3	C:94 Sn:2,4	C:38 O:20,4 Fe:24,8 Sn:4,2	C:90 O:4 Cu:2
4. Bölge	O:31 Fe:17 Si:14,1 Ca:17,7	C:50,1 O:20 Fe:12,3	C:37 O:23,3 Fe:21 Ca:5	C:27 O:32 Ca:27,3 Sn:6

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Balata bileşenlerinden sürtünme ayarlayıcıların türü ve ağırlıkça yüzdesinin, balatanın sürtünme ve aşınma davranışına etkisinin incelendiği bu çalışmada, ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranında boraks tozu katkılı; ağırlıkça % 1,5; 3; 4,5 ve 6 oranında bakır fiber ve bronz fiber katkılı üç farklı numune grubu, toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş ve ardından numunelere sürtünme-aşınma, sertlik testleri ile elektron mikroskobu analizi yapılmıştır. Üç farklı numune grubundan alınan sonuçlar birbiriyle mukayese edilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Asbest içermeyen organik balata kompozisyonuna, farklı oranlarda boraks tozu katkısının, balatanın aşınma oranlarını azaltarak aşınma direncini geliştirdiği görülmüştür. Ağırlıkça % 1 ve 5 boraks tozu katkılı numunelerin, tüm numune grupları arasında en yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuç doğrultusunda, boraks tozu katkısının disk-balata aşınmasını azaltması sebebiyle, balata kompozisyonlarında % 5 oranı ve altında kullanımı halinde, aşınma direncini olumlu etkileyeceği düşünülmektedir.
2. Sürtünme-aşınma testi sonunda, boraks tozu oranı arttıkça, fade ve normal sürtünme katsayısı değerlerinin endüstrinin beklentisini karşılayacak durumda olmadığı fakat buna karşın, recovery ve sıcak sürtünme katsayılarının istenilen aralıkta seyrettiği görülmüştür. Bu sonuçların, boraksın diğer balata bileşenleri ile uyumlu şekilde eşleştirilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
3. Ağırlıkça % bakır ve bronz fiber katkılarının, balatanın recovery, normal ve sıcak sürtünme katsayısı değerlerini, katkı oranı arttıkça arttırdığı görülmüştür. Fakat en yüksek μ değerleri % 6 bakır ve bronz fiber katkılı numunede elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve literatürdeki benzer çalışmalar da dikkate alındığında, % 6 ve üzerinde metalik fiber katkısının, balatanın sürtünme katsayısı değerleri ile fade ve recovery oranlarını daha etkili şekilde arttıracığı düşünülmektedir.
4. Bakır ve bronz fiber katkılı numunelerin aşınma oranları incelendiğinde, katkı oranı arttıkça aşınma miktarının arttığı görülmüş, tüm numune grupları içerisinde en yüksek aşınma oranlarının, % 6 bakır ve bronz fiberde olduğu görülmüştür. Bu durumun; bakır ve bronz partiküllerin, organik balatayı meydana getiren diğer bileşenler ile arasındaki zayıf bağlar sebebiyle, metalik partiküllerin sürtünme esnasında yüzeyden kolaylıkla

koparak ara yüzeyde oluşturdıkları kütleli kayıplardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Yin, Y., Bao, J., Yang, L. (2014). Wear performance and its online monitoring of the semimetal brake lining for automobiles. *Industrial Lubrication and Tribology*, 100-105.
2. Ertan, R., Yavuz, N. (2010). An experimental study on the effects of manufacturing parameters on the tribological properties of brake lining materials. *Wear*, 1524-1532.
3. Kim, S.J., Kim, K.S., Jang, H. (2003). Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 202-208.
4. Chan, D., Stachowiak, G.W. (2004). Review of automotive brake friction materials. *Journal of Automobile Engineering*, 953-958.
5. Jang, H., Ko, K., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W. (2003). The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, 406-414.
6. Chapman, T.R., Niesz, D.E., Foz, R.T., Fawcett, T. (1999). Wear resistance aluminum-boron-carbid cermets for automotive brake applications. *Wear*, 81-87.
7. Hong, U.S., Jung, S.L., Cho, K.H., Cho, M.H., Kim, S.J., Jang, H. (2009). Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resins matrices. *Wear*, 739-744.
8. Mutlu, İ., Öner, C., Findik, F. (2007). Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings. *Materials and Design*, 480-487.
9. Sugözü, İ., Can, İ., Öner, C. (2014). Investigation of using calabrian pine cone dust and borax in brake pads. *Industrial Lubrication and Tribology*, 678-684.
10. Amarnath, M., Rizal, M.S., Kamely, A. (2006). An investigation toward development of economical brake lining wear alert system. *International Journal of Engineering & Technology*, 251-256.
11. Siegal, M. (1995). Brake tech. *American Motorcyclist*, 49 (8), 16-18.
12. Cdx Automotive. (2012). *Brakes: fundamentals of automotive technology*. United States of America: Jones & Bartlett Publishers, 134-136.
13. Owen, C.E. (2004). *Classroom Manual for Automotive Brake Systems* (Third Edition). United States of America: Cengage Learning, 145-147.
14. Singh, T., Patnaik, A., Gangil, B., Chauhan, R. (2015). Optimization of tribo-performance of brake friction materials: effect of nano filler. *Wear*, 10-16.

15. Erjavek, J. (2003). *Automotive Brakes TechOne Series* (First Edition). United States of America: Cengage Learning, 249-250.
16. Verma, P.C., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S., Straffelini, G. (2015). Braking pad-disc system: wear mechanisms and formation of wear fragments. *Wear*, 251-258.
17. Manocha, L.M. (2003). High performance carbon-carbon composites. *Sādhānā*, 349-358.
18. Li, Z., Xiao, P., Xiong, X., Huang, B. (2013). Preparation and tribological properties of C fibre reinforced C/SiC dual matrix composites fabrication by liquid silicon infiltration. *Solid State Sciences*, 6-12.
19. Hassain, S., Abdul Hamid, M.K., Mat Lazim, A.R., Abu Bakar, A.R. (2014). Brake wear particle size and shape analysis of non-asbestos organic (NAO) and semi metallic brake pad. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 129-134.
20. Sundarkrishnaa, K.L. (2012). *Friction Materials Composites: Materials Perspective* (First edition). New York: Springer Science & Business Media, 133-168.
21. Blau, P. J. (2001). Compositions, functions and testing of friction brake materials and their additives; Oak ridge national laboratory, ORNLITM-2001/64, *Springfield*, 5–6.
22. Maleque, M.A., Atiqah, A., Talib, R.J., Zahurin, H. (2012). New natural fibre reinforced aluminium composite for automotive brake pad. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 166-170.
23. Kukutschova, J., Roubicek, V., Maslan, M., Jancik, D., Slovak, V., Malachova, K., Pavlickova, Z., Filip, P. (2009). Wear performance and wear debris of semimetallic automotive brake materials. *Wear*, 268, 86–93.
24. Mohanty, S., Chugh, Y.P. (2007). Development of fly ash-based automotive brake lining. *Tribology International*, 1217-1224.
25. Cho, M.H., Kim, S.J., Kim, D., Jang, H. (2005). Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study. *Wear*, 1682-1687.
26. Liu, Y., Fan, Z., Ma, H., Tan, Y., Qiao, J. (2006). Application of nano powdered rubber in friction materials. *Wear*, 225-229.
27. Bijwe, J., Majumdar, N., Sapathy, B.K. (2005). Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials. *Wear*, 1068-1078.
28. Luo, J., Meng, Y., Shao, T., Zhao, Q. (Editors). (2010). *Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTToMM2008*, Beijing: Springer Science & Business Media, 720-721.

29. Satapathy, B.K., Bijwe, J. (2005). Influence of operating parameters on the performance of friction composites based on combinations of rock fibers and organic fibers. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 579-595.
30. Jang, H., Kim, S. J. (2000). The effects of antimony trisulfide Sb_2S_3 and zirconium silicate $ZrSiO_4$ in the automotive brake friction material on friction characteristics. *Wear*, 229-236
31. Kim, S.J., Cho, M.H., Cho, K.H., Jang, H. (2007). Complementary effects of solid lubricants in the automotive brake lining. *Tribology International*, 15-20.
32. Aranganathan, N., Bijwe, J. (In press). Special grade of graphite in nao friction materials for possible replacement of copper. *Wear*.
33. Cho, K.H., Jang, H., Hong, Y.S., Kim, S.J., Basch, R.H., Fash, J.W. (2008). The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials. *Wear*, 291-297.
34. Sugözü, İ. (2009). *Bor Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 58-59.
35. Karaoğlu, Y. (2006). *Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 3-6.
36. Bortoleto, E.M., Rovani, A.C., Seracopi, V., Profito, F.J., Zachariadis, D.C., Machado, I.F., Sinatora, A., Souza, R.M. (2012). Experimental and numerical analysis of dry contact in pin on disc test. *Wear*, 19-26.
37. Sarıkaya, Ö. (2007). *Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri*. (Birinci baskı). Sakarya, 1-90
38. Mang, T., Dresel, W. (Editors). (2007). *Lubricants and Lubrication*, Germany: John Wiley & Sons, 242-245.
39. Blau, P.J. (Editor). (2009). *Friction science and technology from concepts to applications*, United States of America: CRC Press Taylor & Francis Group, 53-90.
40. Totten, G.E. (Editor). (2003). *Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance and testing*, United States of America: Glen Burnie, 1025-1026.
41. Alnagi, A.A., Barton, D.C., Brooks, P.C. (2015). Reduced scale thermal characterization of automotive disc brake. *Applied Thermal Engineering*, 658-668.
42. Phakatkar, H. G., Ghorpade, R.R. (2009). *Tribology*. (Second Edition). Shivaji Nagar: Nirali Prakashan, 2.43-2.47.
43. Wen, S., Huang, P. (2012). *Principles of Tribology*. (First Edition) Singapore: John Wiley & Sons, 352-360.

44. Asif, M., Chandra, K., Misra, P.S. (2012). Mechanical properties of powder based steel used as backing plate in heavy duty brake pad manufacturing. *Journal of Minerals&Materials Characterization&Engineering*, 509-518.
45. Boz, M. (2009). *Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Bronz esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 18-23.
46. Dixon, R.H.T., Clayton, A. (1971). *Powder Metallurgy for Engineers*. (First Edition). United States of America: Machinery Publishing, 9-12.
47. Angelo, P.C., Subramanian, R. (Editors). (2008). *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*, New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 95-98.
48. German, R. M. *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri* (çev. S. Sarıtaş, M. Türker ve N. Durlu). Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05 (Eserin orijinali 2007’de yayımlandı), 52-228.
49. Sands, R.L., Shakespeare, C.R. (1966). *Powder Metallurgy Practice and Applications*. (First Edition). London: Great Britain By William Clowes and Sons, 52-60.
50. Upadhyaya, G.S. (Editor). (1997). *Powder Metallurgy Technology*, India: Cambridge Int Science Publishing, 45-47.
51. Skolidis, C. (Editor) (2011). *Advance in Ceramics - Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications*, United States of America: InTech, 51-51.
52. Kondoh, K. (2012). *Powder Metallurgy*. (First Edition). China: InTech, ISBN: 978-953-51-0071-3.
53. Hee, K.W., Filip, P. (2005). Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings. *Wear*, 1088-1096.
54. Gyimah, G.K., Chen, D., Huang, P., Barber, G.C. (2013). Dry sliding friction and wear study of the worn surface of Cu-based powder metallurgy train brake materials. *International Journal of Scientific&Engineering Research*, 826-832.
55. Grayson, M. (Editor). (1983). *Encyclopedia of Composite Materials and Components*, United States of America: J. Wiley. 144-154.
56. Takashi, K., Osamu, N. (1996). Friction material, United States of America, US Patent, 5576369.
57. Jia, X., Zhou, B., Chen, Y., Jiang, M., ling, X. (1995). Study on worn surface layers of friction materials and grey cast iron. *Tribology*, 171-176.
58. Kurt, A., Boz, M. (2004). Wear behaviour of organic asbestos based and bronze based powder metal brake linings. *Materials and Design*, 717-721.

59. Ho, S.C., Lin, J.H.C., Ju, C.P. (2004). Effect of fiber addition on mechanical and tribological properties of a copper/phenolic-based friction materials. *Wear*, 861-869.
60. Roubicek, V., Raclavska, H., Juchelkova, D., Filip, P. (2008). Wear and environmental aspects of composite materials for automotive braking industry. *Wear*, 167-175.
61. Ertan, R., Yavuz, N. (2010). Balata malzemelerinde kullanılan yapısalara balatanın tribolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15 (1), 169-177.
62. Kumar, M., Bijwe, J. (2010). NAO friction materials with various metal powders: tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer. *Wear*, 826-837.
63. Kumar, M., Bijwe, J. (2010). Studies on reduced scale tribometer to investigate the effects of metal additives on friction coefficient-temperature sensitivity in brake materials. *Wear*, 838-846.
64. Kumar, M., Bijwe, J. (2010). Role of different metallic fillers in non-asbestos organic (NAO) friction composites for controlling sensitivity of coefficient of friction to load and speed. *Tribology International*, 965-974.
65. Kumar, M., Bijwe, J. (2011). Composite friction materials based on metallic fillers: sensitivity of μ to operating variables. *Tribology International*, 106-113.
66. Kumar, M., Bijwe, J. (2011). Non-asbestos organic (NAO) friction composites: role of copper; its shape and amount. *Wear*, 269-280.
67. Kumar, M., Bijwe, J. (2013). Optimized selection of metallic fillers for best combination of performance properties of friction materials: A comprehensive study. *Wear*, 569-583.
68. Gyimah, G. K., Huang, P., Chen, D. (2014). Dry sliding wear studies of copper-based powder metallurgy brake materials. *Journal of Tribology*, 0416011- 0416011.
69. Thiagarajan, V., Kalaichelvan, K., Naik, V.G., Venkatramani, T.N., Vijay, R. (2014). Influence of thermal dissipators on thermo-tribological characterization of non asbestos disc brake pad. *Journal of Engineering Tribology*, Part J.
70. Filip, P., Weiss, Z., Rafaja, D. (2002). On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*, 189-198.
71. Kukutschova, J., Moravec, P., Tomasek, V., Matejka, M., Smolik, J., Schwarz, J., Seidlerova, J., Safarova, K., Filip, P. (2011). On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes. *Environmental Pollution*, 998-1006.
72. Biswas, S.K. (1999). Some mechanisms of tribofilm formation in metal/metal and ceramic/metal sliding interactions. *Wear*, 178-189.

73. Eriksson, M., Jacobson, S. (2000). Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology International*, 817-827.
74. Singh, T., Patnaik, A. (2015). Performance assessment of lapinus-aramid based brake pad hybrid phenolic composites in friction braking. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 151-161.
75. Ertan, R., Yavuz, N. “Polimer matriksli fren balata malzemelerinin kompozisyon ve üretim parametreleri açısından değerlendirilmesi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, 47(553), 24-30.
76. Satapathy, B.K., Bijwe, J. (2005). Fade and recovery behavior of non-asbestos organic (NAO) composite friction materials based on combinations of rock fibers and organic fibers. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 563-577.
77. Sallami, A., Kchaou, M., Elleuch, R., Cristol, A.L., Desplanques, Y. (2014). Study of the interaction between microstructure, mechanical and tribo-performance of a commercial brake lining material. *Materials and Design*, 84-93.
78. Kchaou, M., Sellami, A., Elluch, R., Singh, H. (2013). Friction characteristics of a brake friction material under different braking conditions. *Materials and Design*, 533-540.
79. Öztürk, B., Öztürk, S. (2011). Effects of resin type and fiber length on the mechanical and tribological properties of brake friction materials. *Tribology Letters*, 339-350.
80. Öztürk, B., Öztürk, S., Adigüzel, A.A. (2013). Effect of type and relative amount of solid lubricants and abrasives on the tribological properties of brake friction materials. *Tribology Transactions*, 428-441.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALGAN, İrem Burcu
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 23/06/1989, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (541) 3126677
 Faks : -
 e-mail : irembalgan@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2012
Lise	Ankara Kocatepe Mimar Kemal Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2013-Halen	Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Algan, İ.B., Kurt, A. (2014). Effects of borax on the wear behavior of organic brake lining materials. M. Özenbaş ve H. Savaş (Eds.). 17. *International Metallurgy and Materials Congress*. İstanbul., pp.738-744.

2. Kurt, A., Atmaca, E.S., Algan, İ.B. (2014). Weldability of powder metal iron materials by stud welding. A. Kurt ve S. Şahin (Editörler). *International Conference on Welding Technologies and Exhibition*, Celal Bayar University Manisa, pp. 41-48.
3. Kurt, A., Atmaca, E.S., Algan, İ.B. (2014). Saplama kaynak yöntemi ile inconel 718 süperalaşım malzemenin kaynaklanabilirliği. A. Kurt ve S. Şahin (Editörler). *Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, Celal Bayar Üniversitesi Manisa, s. 588-594.
4. Kurt, A., Atmaca, E.S., Algan, İ.B. (2014). Inconel 718 süperalaşım malzemenin TIG kaynağı ile kaynaklanabilirliği. A. Kurt ve S. Şahin (Editörler). *Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi*, Celal Bayar Üniversitesi Manisa, s. 893-900.

Hobiler

Tiyatro, Tenis, Kitap okumak, Seyahat etmek



GAZİ GELECEKTİR...