

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOR KATKILI ASBESTSİZ OTOMOTİV FREN BALATASI
ÜRETİMİ VE FRENLEME KARAKTERİSTİĞİNİN
İNCELENMESİ**

İlker SUGÖZÜ

Tez Yöneticisi

Yrd. Doç. Dr. Cengiz ÖNER

Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU

DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZİĞ, 2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOR KATKILI ASBESTSİZ OTOMOTİV FREN BALATASI
ÜRETİMİ VE FRENLEME KARAKTERİSTİĞİNİN
İNCELENMESİ**

İlker SUGÖZÜ

Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Cengiz ÖNER

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Beni bu konuya yönlendiren, çalışmalarım süresince her konuda yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Cengiz ÖNER'e, değerli bilgilerinden yararlandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim MUTLU, maddi manevi desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN, Doç.Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN ve Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi asistanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Bu doktora tezi, 106M006 numaralı proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLOLAR LİSTESİ.....	XIII
SİMGELER LİSTESİ.....	XV
ÖZET	XVII
ABSTRACT	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. BOR ELEMENTİ ve BİLEŞİKLERİ.....	22
3.1. Ham Bor Ürünleri.....	24
3.1.1. Tinkal (Boraks)	25
3.1.2. Üleksit.....	26
3.1.3. Kolemanit.....	26
3.2. Rafine Bor Ürünleri	27
3.2.1. Boraks Dekahidrat.....	28
3.2.2. Boraks Penhidrat	28
3.2.3. Susuz Boraks	29
3.2.4 Borik Asit.....	29
3.2.5. Susuz Borik Asit (Bor Oksit).....	29
3.2.6. Sodyum Perborat	29
3.2.7. Sodyum Metaborat	30
3.3. Uç Ürünler	30
3.4. Bor Bileşikleri.....	31
3.4.1. Bor karbür	31
3.4.2. Amorf Bor	33
3.4.3. Kristalin Bor	34
3.4.4. Bornitrür	34
3.4.5. Bor Alaşımları	35
3.5. Bor Kullanım Alanları.....	36
3.5.1. Cam ve Cam Elyafı Sanayi.....	37
3.5.2. Temizleme Beyazlatma Sanayi.....	38
3.5.3. Seramik ve Emaye Sanayi	38

3.5.4. Tekstil Sanayi	39
3.5.5. Metalürji Sanayi.....	39
3.5.6. Tarım Sanayi	40
3.5.7. Nükleer Sanayi	40
3.5.8. Otomotiv Sanayi.....	41
3.5.9. Borun Diğer Kullanım Alanları	41
4. TOZ METALURJİSİ	42
4.1. Giriş.....	42
4.2. Toz Özellikleri	42
4.2.1. Kimyasal Özellikler.....	43
4.2.2. Fiziksel Özellikler.....	44
4.2.2.1. Parçacık Boyutu	44
4.2.2.2. Parçacık Şekli	44
4.3. Toz Üretim Yöntemleri.....	45
4.3.1. Kimyasal Tepkimelerle Toz Üretimi	45
4.3.1.1. Gaz Altında Ayrışma ile Toz Üretim.....	45
4.3.1.2. Termal Ayrışma ile Toz Üretim.....	45
4.3.1.3. Sıvı Fazdan Çöktürme ile Toz Üretim.....	46
4.3.1.4. Gazdan Çöktürme ile Toz Üretim	46
4.3.2. Elektroliz Yöntemi ile Toz Üretim.....	46
4.3.3. Atomizasyon Yöntemi ile Toz Üretim	47
4.3.4. Mekanik Öğütme ile Toz Üretim	50
4.4. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Parça Üretim Süreci.....	51
4.4.1. Harmanlama	51
4.4.2. Şekillendirme ve Pekiştirme.....	52
4.4.3. Presleme	52
4.4.4. Sinterleme	54
4.4.5. Sinterleme sonrası işlemler.....	55
4.5. Toz Metalürjisi Uygulama Alanları	55
4.6. Toz Metalürjisi'nin Avantaj ve Dezavantajları.....	56
5. TRİBOLOJİ	58
5.1. Giriş.....	58
5.2. Sürtünme.....	58
5.2.1. Sürtünme Kanunları.....	59
5.2.2. Sürtünme Teorileri.....	60
5.2.2.1. Mekanik Kilitlenme Teorisi	60

5.2.2.2. Moleküler Çekim Teorisi.....	60
5.2.2.3. Elektrostatik Kuvvetler	60
5.2.2.4. Kaynaklaşma, Kesme-Kazıma	61
5.2.3. Sürtünme katsayısı.....	61
5.3. Aşınma.....	64
5.3.1. Aşınmanın Temel Unsurları.....	66
5.3.2. Aşınma Türleri	66
5.3.2.1. Adhezif Aşınma	67
5.3.2.2. Abrasif Aşınma	68
5.3.2.3. Yorulma aşınması	69
5.3.2.4. Korozyif Aşınması.....	70
5.3.3. Aşınma Hasarları	71
5.4. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri.....	71
5.4.1. Ağırlık Farkı Metodu.....	72
5.4.2. Kalınlık Farkı Metodu	73
5.4.3. İz Değişimi Metodu	73
5.4.4. Radyoizotop Metodu.....	73
6. SÜRTÜNME MALZEMELERİ VE BALATALAR	74
6.1. Sürtünme Malzemeleri	74
6.2. Balatalar.....	74
6.3. Balata Oluşumunda Kullanılan Malzemeler ve Fonksiyonları.....	75
6.3.1. Takviye Malzemeleri (Fiberler)	76
6.3.1.1. Asbest	76
6.3.1.2. Cam elyafı	78
6.3.1.3. Kevlar (aramid).....	80
6.3.1.4. Taş yünü.....	81
6.3.1.5. Basarit	82
6.3.1.6. Çelik elyaf (Çelik yünü).....	82
6.3.1.7. Mika Grubu	83
6.3.2. Dolgu maddeleri	84
6.3.2.1. Alçı.....	84
6.3.2.2. Talk.....	85
6.3.2.3. Barit.....	85
6.3.2.4. Kizelgur (Diatomit)	85
6.3.2.5. Kil	85
6.3.3. Bağlayıcı maddeler.....	86

6.3.4. Sürtünme ayarlayıcı maddeler	87
6.3.4.1. Grafit tozu	87
6.3.4.2. Bronz tozu	88
6.3.5. Temizleyiciler	88
6.3.6. Renklendiriciler	88
6.3.7. Madeni dolgu malzemeleri	89
6.4. Balata Çeşitleri	89
6.4.1. Organik balatalar	89
6.4.1.1. Asbest Esaslı balatalar	89
6.4.1.2. Asbestsiz Balatalar	90
6.4.1.3. Yarı Metalik Balatalar	90
6.4.2. Anorganik Balata	90
6.4.2.1. Bakır Esaslı Balata Malzemeleri	92
6.4.2.2. Demir Esaslı Balata Malzemeleri	94
6.4.2.3. Seramik Katkılı Balata Malzemeleri	96
6.4.3. Bileşik Balata	96
6.4.4. Karbon Esaslı Balata	96
6.5. Balatalardan İstenilen Özellikler	98
6.6. Disk ve Kampana Malzemesi	99
7. MATERYAL VE METOT	100
7.1. Deney Düzenəğinin Tanıtılması	100
7.1.1. Bilgisayar Programı	102
7.1.2. Yük Hücresi	104
7.1.3. İnvörtör	104
7.1.4. Hidrolik Ünite	105
7.1.5. Sıcaklık Ölçme Cihazı	105
7.1.6. Elektrikli Isıtıcı	105
7.1.7. Hassas terazi	106
7.1.8. Fren Diski ve Balata Tutucu Pabuç	106
7.1.9. Sertlik Ölçüm Cihazı	108
7.1.10. Numune Parlatma Cihazı	108
7.1.11. Yüzey Pürüzlülük Cihazı	109
7.1.12. Numune Kaplama Cihazı	110
7.1.13. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	110
7.1.14. Toz Karıştırma Cihazı	111
7.1.15. Yoğunluk Ölçüm Cihazı	111

7.2. Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi	112
7.2.1. Toz Karıştırma Süresinin Belirlenmesi	112
7.2.2. Üretim Basıncının Belirlenmesi	112
7.3. Deney Numunelerinin Üretilmesi	113
7.3.1. Komprime (Soğuk presleme)	114
7.3.2. Pişirme (Sıcak Presleme)	115
7.3.3. Sinterleme (Fırınlama-Isıl İşlem)	116
7.4. Deney Numunelerinin Test İçin Hazırlanması	117
7.5. Deney Numuneleri	119
7.5.1. Bor Mineralleri ile Birlikte Cashew Kullanılan Numuneler	119
7.5.2. Bor Mineralleri ile Birlikte Sedir Çamı Kozalak Tozu Kullanılan Numuneler	124
7.6. Fren Balataları için Türk Standartlarında Belirlenen Deney Şartları	126
7.7. Üretilen Balataların Deney Aşamaları	128
7.7.1. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri	128
7.7.2. Mikro yapı çalışmaları	129
7.7.3. Sertlik, Yoğunluk ve Dayanım Testleri	129
8. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	131
8.1. Bor Mineralleri ile Cashew Kullanılan Fren Balataları	131
8.1.1. Üleksit ve Cashew Katkılı Fren Balataları	132
8.1.1.1. Sürtünme Performansı	132
8.1.1.2. Mikro Yapı Karakteristiği	135
8.1.1.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Muhtelif Sıvılara Dayanım Testleri	141
8.1.2. Kolemanit ve Cashew Katkılı Fren Balataları	143
8.1.2.1. Sürtünme Performansı	143
8.1.2.2. Mikro Yapı Karakteristiği	147
8.1.2.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri	153
8.1.3. Borik asit ve Cashew Katkılı Fren Balataları	156
8.1.3.1. Sürtünme Performansı	156
8.1.3.2. Mikro Yapı Karakteristiği	159
8.1.3.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri	165
8.1.4. Borax ve Cashew Katkılı Fren Balataları	167
8.1.4.1. Sürtünme Performansı	167
8.1.4.2. Mikro Yapı Karakteristiği	171
8.1.4.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri	177
8.2. Bor Mineralleri ile Sedir Kullanılan Fren Balataları	179
8.2.1. Üleksit ve Sedir Katkılı Fren Balataları	180

8.2.1.1. Sürtünme Performansı	180
8.2.1.2. Mikro Yapı Karakteristiği	184
8.2.1.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Muhtelif Sıvılara Dayanım Testleri	190
8.2.2. Kolemanit ve Sedir Katkılı Fren Balataları.....	192
8.2.2.1. Sürtünme Performansı	192
8.2.2.2. Mikro Yapı Karakteristiği	196
8.2.2.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri	202
8.2.3. Borik asit ve Sedir Katkılı Fren Balataları.....	204
8.2.3.1. Sürtünme Performansı	204
8.2.3.2. Mikro Yapı Karakteristiği	208
8.2.3.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri	213
8.2.4. Borax ve Sedir Katkılı Fren Balataları	216
8.2.4.1. Sürtünme Performansı	216
8.2.4.2. Mikro Yapı Karakteristiği	220
8.2.4.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri.....	225
8.3. Değerlendirme	228
8.3.1. Balataların Performans Değerlendirmesi	228
8.3.1.1. Balata Performans Türleri.....	228
8.3.1.2. Cashew Katkılı Bor Türevlerinin Performans Karşılaştırması.....	229
8.3.1.3. Sedir Katkılı Bor Türevlerinin Performans Karşılaştırması	232
8.3.3. Maliyet Analizi	234
9. SONUÇLAR VE ONERİLER	237
KAYNAKLAR	244
ÖZGEÇMİŞ	255

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil.3.1 Bor karbür üretim şeması.....	33
Şekil 3.2. Turbostatik bor nitrür üretim şeması	35
Şekil 3.3. H_3BO_3 ve Fe_2O_3 , NiO , CoO alaşımı üretim şeması	36
Şekil 4.1. Toz biriktirmede kullanılan örnek elektroliz şeması	47
Şekil 4.2 Geleneksel su ve gaz ile atomizasyon yöntemlerinin şematik gösterimi.....	48
Şekil 4.3 Dönen elektrot süreçleriyle savurma atomizasyonu	49
Şekil 4.4 Döner disk atomizasyon yönteminin şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.5 Vakum atomizasyon yönteminin şematik gösterimi.....	50
Şekil 4.6 Mekanik alaşımlama işlemi sırasında: a) bilya/toz etkileşiminin şematik görünümü, b) Kullanılan öğütme ortamlarından biri olan atritörün şematik görünümü	51
Şekil 4.7 Tek yönlü preslemede numune kesitinde görülen yoğunluk dağılımı	52
Şekil 4.8 Soğuk izostatik presleme	53
Şekil 4.9 Sinterleme sırasında metalürjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması	55
Şekil 5.1 Sürtünmede temas alanları.....	59
Şekil 5.2 Kuru kayma boyunca kristal kafesin elastik deformasyonu	59
Şekil 5.3 Amontons Coulomb'un sürtünme modeli	60
Şekil 5.4 Sürtünmenin malzeme yapısı üzerine etkisi	61
Şekil 5.5 Statik ve dinamik sürtünme katsayıları.....	63
Şekil 5.6 a) Statik sürtünme katsayısının zamana göre değişimini b) Kinetik sürtünme katsayısının hıza göre değişimi	63
Şekil 5.7 Kuru balatada basınç ve hızın sürtünme katsayısına etkisi.....	64
Şekil 5.8 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi.....	65
Şekil 5.9 Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.....	66
Şekil 5.10 Adhezif aşınma	67
Şekil 5.11 Adhezif aşınmada aşınma bölgeleri.....	68
Şekil 5.12 Abrasif aşınma.....	69
Şekil 5.13 Yorulma aşınması	70
Şekil 5.14 Tribo oksidasyon aşınması	70
Şekil 5.15 Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi	71
Şekil 6.1 Çeşitli asbestler.....	77
Şekil 6.2 Wollastonit'in görünüşü	83
Şekil 6.3 Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma karakteristiği ...	93
Şekil 7.1 Fren Balatası Test Cihazı.....	100

Şekil 7.2 Fren balatası test cihazının şematik görünüşü	101
Şekil 7.3 Fren balatası test cihazı otomatik kontrol paneli	102
Şekil 7.4 Bilgisayar kontrol paneli grafik göstergesi.....	103
Şekil 7.5 Fren balatası test cihazı manüel kontrol paneli.....	103
Şekil 7.6 Yük Hücresi	104
Şekil 7.7 Devir ayarlayıcı İnvertör	104
Şekil 7.8 Sıcaklık ölçme cihazı	105
Şekil 7.9 Elektrikli ısıtıcı	106
Şekil 7.10 Hassas terazi	106
Şekil 7.11 Fren diski görünüşü	107
Şekil 7.12 Fren balatası test cihazında kullanılan fren pabuçları.....	107
Şekil 7.13 Mettest Sertlik Ölçme Cihazı.....	108
Şekil 7.14 Numune parlatma cihazı	109
Şekil 7.15 Mahr Perthometer Yüzey Pürüzlülük Cihazı.....	109
Şekil 7.16 Numune kaplama cihazı	110
Şekil 7.17 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	110
Şekil 7.18 Toz Karıştırma Mikseri (a) Karıştırıcı (b) I tipi toz haznesi (c) V tipi toz haznesi	111
Şekil 7.19 Arşimet terazisi.....	112
Şekil 7.20 Deney numunelerinin üretildiği soğuk presleme kalıbının görünüşü.....	115
Şekil 7.21 Soğuk pres ile imal edilen balata resimleri.....	115
Şekil 7.22 Deney numunelerinin üretildiği sıcak presleme kalıbı	116
Şekil 7.23 Sıcak pres ile imal edilen balatalar	116
Şekil 7.24 Deney numunelerinin üretim şeması	117
Şekil 7.25 1" lik Balata Tutucu.....	118
Şekil 7.26 ½" lik Balata Tutucu.....	118
Şekil 7.27 Balatanın Takılma İşlemi.....	118
Şekil 7.28 Cashew Meyvesi.....	120
Şekil 7.29 Açık havada kavurma metodu	121
Şekil 8.1 UC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	133
Şekil 8.2 UC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	133
Şekil 8.3 UCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	135
Şekil 8.4 UCH kodlu fırınlanmış numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman	135
Şekil 8.5 UC-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	136
Şekil 8.6 UC-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	136
Şekil 8.7 UC-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	137
Şekil 8.8 UC-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	137

Şekil 8.9 UC-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	138
Şekil 8.10 UCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	138
Şekil 8.11 UCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	139
Şekil 8.12 UCH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	139
Şekil 8.13 UCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	140
Şekil 8.14 UCH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	140
Şekil 8.15 KC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	144
Şekil 8.16 KC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	145
Şekil 8.17 KCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	145
Şekil 8.18 KCH kodlu fırınlanmış numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	147
Şekil 8.19 KC4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	147
Şekil 8.20 KC8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM	148
Şekil 8.21 KC12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	149
Şekil 8.22 KC16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM	149
Şekil 8.23 KC20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	150
Şekil 8.24 KCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	151
Şekil 8.25 KCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	151
Şekil 8.26 KCH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	152
Şekil 8.27 KCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	152
Şekil 8.28 KCH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	153
Şekil 8.29 BC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	156
Şekil 8.30 BC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	157
Şekil 8.31 BCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	158
Şekil 8.32 BCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	158
Şekil 8.33 BC-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	159
Şekil 8.34 BC-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM	160
Şekil 8.35 BC-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM	160
Şekil 8.36 BC-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	161
Şekil 8.37 BC-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	161
Şekil 8.38 BCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	162
Şekil 8.39 BCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	162
Şekil 8.40 BCH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	163
Şekil 8.41 BCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	164
Şekil 8.42 BCH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	164
Şekil 8.43 XC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	168
Şekil 8.44 XC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	169

Şekil 8.45 XCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	170
Şekil 8.46 XCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi.....	171
Şekil 8.47 XC-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	172
Şekil 8.48 XC-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	172
Şekil 8.49 XC-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	173
Şekil 8.50 XC-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	173
Şekil 8.51 XC-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	174
Şekil 8.52 XCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	175
Şekil 8.53 XCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	175
Şekil 8.54 XCH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	176
Şekil 8.55 XCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	176
Şekil 8.56 XCH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	177
Şekil 8.57 US kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi.....	181
Şekil 8.58 US kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	182
Şekil 8.59 USH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi.....	182
Şekil 8.60 USH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	183
Şekil 8.61 US-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	185
Şekil 8.62 US-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	185
Şekil 8.63 US-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	186
Şekil 8.64 US-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	186
Şekil 8.65 US-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	187
Şekil 8.66 USH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	187
Şekil 8.67 USH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	188
Şekil 8.68 USH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	189
Şekil 8.69 USH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	189
Şekil 8.70 USH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	190
Şekil 8.71 KS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi.....	193
Şekil 8.72 KS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	194
Şekil 8.73 KSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi.....	195
Şekil 8.74 KSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	195
Şekil 8.75 KS-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	196
Şekil 8.76 KS-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	197
Şekil 8.77 KS-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	197
Şekil 8.78 KS-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	198
Şekil 8.79 KS-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	198
Şekil 8.80 KSH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	199

Şekil 8.81 KSH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	200
Şekil 8.82 KSH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	200
Şekil 8.83 KSH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	201
Şekil 8.84 KSH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	201
Şekil 8.85 BS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	204
Şekil 8.86 BS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	206
Şekil 8.87 BSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi	207
Şekil 8.88 BSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	208
Şekil 8.89 BS-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	208
Şekil 8.90 BS-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	209
Şekil 8.91 BS-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	209
Şekil 8.92 BS-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	210
Şekil 8.93 BS-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	210
Şekil 8.94 BSH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	211
Şekil 8.95 BSH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	211
Şekil 8.96 BSH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	212
Şekil 8.97 BSH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	212
Şekil 8.98 BSH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	213
Şekil 8.99 XS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi.....	217
Şekil 8.100 XS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	218
Şekil 8.101 XSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi.....	219
Şekil 8.102 XSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	220
Şekil 8.103 XS-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	220
Şekil 8.104 XS-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	221
Şekil 8.105 XS-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	221
Şekil 8.106 XS-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	222
Şekil 8.107 XS-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	222
Şekil 8.108 XSH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	223
Şekil 8.109 XSH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	223
Şekil 8.110 XSH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	224
Şekil 8.111 XSH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	224
Şekil 8.112 XSH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	225
Şekil 8.113 TS 555 standardına göre balata sürtünme katsayısı performans türleri	228
Şekil 8.114 C kodlu numunelerin 1050 kPa’da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi	230
Şekil 8.115 C kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	230
Şekil 8.116 CH kodlu numunelerin 1050 kPa’da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi .	231

Şekil 8.117 CH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi.....	231
Şekil 8.118 S kodlu numunelerin 1050 kPa’da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi.....	233
Şekil 8.119 S kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi.....	233
Şekil 8.120 SH kodlu numunelerin 1050 kPa’da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi..	234
Şekil 8.121 SH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi	234
Şekil 9.1 Bor ve cashew katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış..... ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı değişimi	237
Şekil 9.2 Bor ve sedir katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış..... ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı değişimi	237
Şekil 9.3 Bor ve cashew katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış..... ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa’da özgül aşınma değişimi	240
Şekil 9.4 Bor ve sedir katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış..... ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa’da özgül aşınma değişimi	240
Şekil 9.3 Bor ve cashew katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış..... ve fırınlanmamış numunelerin sertlik değişimi	241
Şekil 9.3 Bor ve sedir katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış..... ve fırınlanmamış numunelerin sertlik değişimi	241

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Bor Elementinin fiziksel özellikleri	22
Tablo 3.2 Dünya bor rezervi.....	24
Tablo 3.3 Ham bor ürünleri	25
Tablo 3.4 Ticari boyutta dünyada üretilen rafine bor ürünleri	27
Tablo 3.5 Türkiye'nin rafine bor ürünleri kurulu kapasiteleri.....	28
Tablo 3.6 Türkiye'deki bor madeni ocakları ve yöreleri.....	28
Tablo 3.7. Bor cevheri ve kullanım alanları	37
Tablo 4.1 T/M' nin otomotiv sektöründe uygulama alanları	56
Tablo 6.1. Tipik ıslak ve kuru balata bileşimleri	75
Tablo 6.2. İki ayrı yapıdaki cam yünü ve cam elyafın kimyasal analizi	78
Tablo 6.3 Cam elyafın fiziksel, mekanik ve termal özellikleri.....	79
Tablo 6.4 Kevlar fiberlerin özellikleri.....	81
Tablo 6.5 Taş yününün özellikleri.....	81
Tablo 6.6 Basarit'in özellikleri.....	82
Tablo 6.7 Bazı ülkelerde kullanılan kuru için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri.....	92
Tablo 6.8 Bronz esaslı sinter balata malzemelerin kullanım karakteristikleri ve özellikleri.....	93
Tablo 6.9 Yeni sürtünme malzemesi ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik özellikleri .	94
Tablo 6.10 Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler	95
Tablo 6.11 Demir asıllı balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri	95
Tablo 6.12 Sinterlenmiş demirin mekanik özelliklerine fosfor'un etkisi	96
Tablo 6.13 Disk ve kampana için kullanılan dökme demir analizi	99
Tablo 7.1 Disk malzemesinin içeriği.....	107
Tablo 7.2 Fren Diski Sertlik Değerleri	108
Tablo 7.3 Fren Diski Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Ra- μ m).....	109
Tablo 7.4 Ortak içerik olarak belirlenen katkı maddelerinin kütle oranları.....	113
Tablo 7.5 Karışımda kullanılan maddelerinin kütle oranları	114
Tablo 7.6 Üleksit ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri	123
Tablo 7.7 Kolemanit ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri	123
Tablo 7.8 Borik asit ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri	123
Tablo 7.9 Borax ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri	124
Tablo 7.10 Üleksit ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri	125
Tablo 7.11 Kolemanit ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri	125
Tablo 7.12 Borik asit ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri	125

Tablo 7.13 Borax ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri	125
Tablo 8.1 UC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri	141
Tablo 8.2 UCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri	142
Tablo 8.3 Üleksit ve cashew katkılı fırınlanmamış (UC) ve fırınlanmış (UCH) numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)	143
Tablo 8.4 KC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri	154
Tablo 8.5 KCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri	155
Tablo 8.6 Kolemanit ve cashew katkılı fırınlanmamış (KC) ve fırınlanmış (KCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)	155
Tablo 8.7 BC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri.....	165
Tablo 8.8 BCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri.....	166
Tablo 8.9 Borik asit ve cashew katkılı fırınlanmamış (BC) ve fırınlanmış (BCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)....	166
Tablo 8.10 XC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri	178
Tablo 8.11 XCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri	178
Tablo 8.12 Borax ve cashew katkılı fırınlanmamış (XC) ve fırınlanmış (XCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%).....	178
Tablo 8.13 US kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri.....	191
Tablo 8.14 USH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri.....	191
Tablo 8.15 Üleksit ve sedir katkılı fırınlanmamış (US) ve fırınlanmış (USH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%).....	192
Tablo 8.16 KS kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri.....	202
Tablo 8.17 KSH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri	203
Tablo 8.18 Kolemanit ve sedir katkılı fırınlanmamış (BC) ve fırınlanmış (BCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)	204
Tablo 8.19 BS kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri	214
Tablo 8.20 BSH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri	215
Tablo 8.21 Borik asit ve sedir katkılı fırınlanmamış (BS) ve fırınlanmış (BSH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%).....	215
Tablo 8.22 XS kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri.....	226
Tablo 8.23 XSH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri.....	227
Tablo 8.24 Borax ve sedir katkılı fırınlanmamış (XS) ve fırınlanmış (XSH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%).....	228
Tablo 8.25 TS 555 standardına göre deney numunelerinden alınan sonuçlar	229
Tablo 8.26 Bor mineralleri, cashew ve sedir ürünlerinin birim fiyatları	235
Tablo 8.27 Bor mineralleri, cashew ve sedir katkılı balataların birim fiyatları.....	235

SİMGELER LİSTESİ

B	: Bor
W_i	: İlk ağırlık
W_s	: Son ağırlık
F_s	: Sürtünme kuvveti
F_n	: Normal kuvvet
Q	: Pürüz kısmın taban açısı
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_k	: kinetik sürtünme katsayısı
μ_s	: statik sürtünme katsayısı
W	: Loadcell'e uygulanan kuvvet
W_a	: Aşınma oranı ($\text{mm} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
ΔG	: Ağırlık kaybı (mg)
S	: Kayma mesafesi (m)
M	: Yükleme ağırlığı (N)
d	: Aşınan malzemenin yoğunluğu (gr / cm^3)
W_f	: Aşınma direnci
P	: Basınç (kg/mm^2)
A	: Balata alanı (mm^2)
F_s	: Yük hücresinden okunan kol kuvveti (kg)
L	: Kuvvet kolu mesafesi
G_k	: Numune kuru ağırlığı
G_{dh}	: 48 saat su içerisinde bekletildikten sonra numune ağırlığı
G_{ds}	: 48 saat su içerisinde bekletildikten sonra numunenin saf su doldurulmuş kaptaki ağırlığı
D_h	: Numune yoğunluğu
SAM	: Sürtünme Ayarlayıcı Maddeler
BM	: Bor Mineralleri
F	: Deney yükü (N)
D	: Batıcı bilye çapı (mm)
d	: Bilye izi ortalama çapı (mm)
BS	: Brinell sertlik
V	: Özgül aşınma

m_1	: Deneyden önce ölçülen balata kütlesi (gr)
m_2	: Deneyden sonra ölçülen balata kütlesi (gr)
ρ	: Balata yoğunluğu (gr/cm^3)
R_d	: Disk yarıçapı (m)
f_m	: Deneydeki ortalama sürtünme kuvveti (N)
n	: Toplam devir sayısı (devir)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
W_a	: Aşınma oranı ($\text{mm} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
ΔG	: Ağırlık kaybı (mg)
S	: Kayma mesafesi (m)
M	: Yükleme ağırlığı (N)
d	: Aşınan malzemenin yoğunluğu (gr / cm^3)
W_r	: Aşınma direnci
P	: Basınç (kg/mm^2)
A	: Balata alanı (mm^2)
U	: Üleksit katkılı numuneler
K	: Kolemanit katkılı numuneler
B	: Borik asit katkılı numuneler
X	: Boraks katkılı numuneler
C	: Cashew katkılı numuneler
S	: Sedir katkılı numuneler
H	: Fırınlama işlemine tabi tutulmuş numune

ÖZET

Doktora Tezi

BOR KATKILI ASBESTSİZ OTOMOTİV FREN BALATASI ÜRETİMİ VE FRENLEME KARAKTERİSTİĞİNİN İNCELENMESİ

İlker SUGÖZÜ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

2009, Sayfa:254

Otomotiv fren balatalarında, insan sağlığına olumsuz etkileri nedeniyle yasaklanan asbestin yerine asbestsiz organik fren balatası (non-asbestos organic-NAO) araştırma ve geliştirme çalışmaları hızlanmıştır. Son yirmi yılda otomotiv teknolojisindeki hızlı gelişmelerin sonucu olarak çok daha yüksek hız ve ivme kabiliyetine sahip taşıtlar üretilmiştir. Bu nedenle otomotiv frenlerinde kullanılan sürtünme kompozitleri de malzeme teknolojisinde popülerlik kazanmıştır.

Bu çalışmada asbest ve elyaf katkı malzemesi bulunmayan disk fren balatası üretiminde bor mineralleri, bor türevleri (borik asit, boraks, üleksit, kolemanit) ve sedir çamı kozalak tozu kullanılmıştır. Balata performansının etkisini belirlemek için farklı üretim parametreleri uygulanmıştır. Böylece balata performansı üzerinde etkili olan parametreler araştırılmıştır. Bor minerallerinin komponent içerisindeki optimum oranını belirlemek için farklı balata kompozisyonu oluşturulmuştur. Üretilen balataların sürtünme katsayısı-zaman-sürtünme yüzey sıcaklığı değişimlerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen değerlerle grafikler oluşturulmuştur. Numunelerin aşınma, sertlik, yoğunluk değerleri ve farklı sıvılara dayanımı ölçülmüş ve SEM resimleri çekilmiştir. Elde edilen bilimsel veri ve bulgular, fren balatasından istenen fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri karşılayan sürtünme malzemeleri için yeni bir yaklaşım getirmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor Mineralleri, Fren Balatası, Sürtünme, Aşınma

ABSTRACT

PhD Thesis

PRODUCTION OF NON-ASBESTOS AUTOMOTIVE BRAKE LINING ADDITIONAL BORON AND INVESTIGATION OF ITS BRAKING CHARACTERISTIC

İlker SUGÖZÜ

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

2009, Page:254

In automotive brake lining, instead of asbestos that was prohibited because of negative effects on human health, non-asbestos organic brake lining research and development works were accelerated. In recent twenty years in consequence of fast development in automotive technology, vehicles that have more speed and acceleration capability were produced. Therefore, friction composites used in automotive brake gained popularity in material technology.

In this study, in production of disc brake lining without asbestos and fiber addition material, boron minerals, boron derivatives (boric acid, borax, ulexite, kolemanit) and powder of cedar pine cone were used. In order to determine effects of brake lining performance carried out different manufacture parameter. Thus, the crucial parameters in brake lining performance were searched. In order to determine optima ratio of boron minerals in component, different brake lining composition was created. In order to define friction coefficient-time friction surface temperature changing of produced brake lining, experimental studies were carried out and graphics were carried out with obtained values. The wear, hardness, density values and resistance in different liquids of samples were measured and were taken SEM (Scanning Electron Microscopy) photos. The obtained scientific data and indication brought a new approach that supplied physical, chemical and mechanic feature wanted from brake lining, for friction materials.

Keywords: Boron Minerals, Brake Lining, Friction, Wear

1. GİRİŞ

Hareket halindeki bir taşıt kinetik enerjiye sahiptir. Taşıt hızının azaltılabilmesi veya taşıtın durdurulması için sahip olduğu enerjinin başka bir şekle dönüşümü gereklidir. Fren sistemlerinde, taşıtın kinetik enerjisi sürtünme yoluyla ısı enerjisine çevrilir.

Bir otomobilin en önemli emniyet özelliği fren sistemidir. Hareket enerjisini sürtünme yoluyla ısıya dönüştürerek hareketin durdurulması ya da kontrol altına alınmasını sağlayan sistemlere fren sistemi denir [1]. Fren sisteminden, aracı değişik şartlar altında emniyetli bir şekilde durdurması istenir. Fren performansının en önemli göstergesi, frenlemeden sonra sağlanan kısa durma mesafesidir. Bu maksimum yavaşlama ivmesi ile mümkündür.

Fren sistemi; sürtünme malzemesi olarak balata, otomobillerde genellikle dökme demirden yapılan disk/kampana ve balatayı hidrolik/pnömatik olarak hareket ettirerek rotor yüzeyine bastıran sistemden oluşur [1]. Otomobil ve hafif yük araçlarında kampanalı ve/veya disk frenler, ağır tonajlı ve otobüslerde kampanalı frenler kullanılır.

Taşıtın sürüş esnasında emniyetini sağlamada frenleme performansına etki eden önemli parçalarından birisi balatadır. Yüksek frenleme kuvveti, sürtünen yüzeylerin önemli bir kısmını oluşturan balata kalitesi ile ilgilidir. Balata kendisi ve karşı yüzey arasındaki temas yüzeyinin kaymasına kontrollü olarak karşı koymak amacıyla kullanılan malzeme olarak tanımlanır. Balatalar gerek otomotiv sektöründe gerekse diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hareket halindeki taşıtlar, bir tehlike anında sürtünmeli veya kaymalı zorlamaya maruz bırakılıp kinetik enerjileri alınır ve yavaşlatılıp durdurulurlar. Bunun yapılabilmesi için sürtünen yüzeylerin oluşturduğu malzeme çiftinin sürtünme katsayısı frenlemede önemli rol almaktadır. Sürtünen yüzeylerdeki durdurma tesiri, iyi sürtünme kuvveti temin eden malzeme çiftini seçmek veya yapmakla mümkün olur. Bu malzeme çiftini seçmek veya mevcutlarından daha iyisini yapmak piyasada kullanılan mevcut malzeme çiftlerinin frenlemeye etkisinin bilinmesi ile mümkündür. Mevcut malzeme çiftlerinin frenlemeye etkisinin bulunabilmesi, her malzemenin tesirinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ile sağlanabilir. Mevcut malzeme çiftinin birisi balata olup, frenleme kuvvetine tesiri sürtünme katsayısı ve pedal kuvvetinin fonksiyonu olarak tanımlanabilir [2].

Fren balatalarından; zor çevre şartları altında güvenli kullanım ve rahatlık, yüksek mukavemet, sabit sürtünme katsayısı, düşük aşınma oranı, düşük ses ve anti-titreşim karakteristikleri gibi özellikler istenmektedir [3, 4, 5,].

Balataların hava ve yol şartlarında su, nem, yağ gibi yolların olumsuz etkileri ile karşı karşıya kalmaları, sürtünme özelliklerinin kısmen bozulmasına sebep olur. Uzun süreli çalışmalarda balata sürtünme yüzeyi ısının etkisi ile sertleşmekte ve parlaklaşmaktadır. Sert ve

parlak yüzey (pürüzlülüğün azalması) sürtünen yüzeylerin birbiri üzerinde daha kolay kaymalarına sebep olmaktadır. Bu nedenle yeni balatalar yapım aşamasında ezilme, kesme, aşınma, ısı ve suya dayanıklılık gibi testlerden geçirilmekte ve kullanım esnasında, balataların yukarıda açıklanan olumsuzluklar nedeni ile sürüş esnasında meydana getireceği olumsuz etkilerin minimuma düşürülmesi amaçlanmaktadır.

Otomobil icat edilene kadar sürtünme malzemeleri ve sürtünme mekanizmaları konusunda çok az gelişme olmuştur. İlk otomobillerde deri sürtünme malzemeleri (balatalar) kullanılmış, 1902'de deriden daha iyi özelliklere sahip sürtünme malzemeleri üretilmeye başlanmıştır. Bu balatalar zift ve/veya zift/kauçuk emdirilmiş pamuk dokumalardan oluşmakta ve ağır kullanım şartlarında alev almaktaydılar. 1905'te F. C. Stanley ilk defa dokunmuş asbest fren balatasını geliştirmiş, 1906 yılında zift uygun bağlayıcılarla değiştirilmiş ve balatalar uçucu maddelerin uzaklaştırılması için ısıtılma tabi tutulmuştur [6]. Fakat İngiliz Doktor Montague MURRAY tarafından bir asbest işçisinin üzerinde yaptığı otopsi sonucu solunum yoluyla akciğerlere giren 0.1-1 µm çapında, 5 µm uzunluğundaki asbest liflerinin fiziksel etki ile temas yerinde yaralama ve parçalama gibi etkiler yaptığı, bunun sonucunda ise solunum yollarındaki bronşlarda kasılmaların meydana geldiği, ayrıca akciğer zarında kireçlenmeler ile sertleşmelere neden olduğu ve akciğer kanserine yol açtığını sonuçta asbestin insan sağlığı için zararlı olduğu, hastalık ve ölümlere neden olduğunu açıklamıştır [7, 8].

Asbest esaslı sürtünme malzemelerinin bu zararlı etkileri ve yüksek sıcaklıklara çok duyarlı olmaları; bilim adamlarını yüksek sıcaklıklarda daha dayanıklı ve insan sağlığını tehdit etmeyen malzemelere yöneltmiştir.

Bu yönde yapılan çalışmalar sonucu son yıllarda otomotiv fren balata formülasyonlarında büyük değişiklikler olmuş, bunun sonucu olarak balataların ısıya dayanımı, sürtünme, aşınma özellikleri de iyileşmiştir. Geçmişte organik sürtünme malzemelerinin en önemli bileşeni olan asbestin yerini yeni bileşenler almaya başlamıştır.

Bazı ülkeler asbesti kaldırarak yerine kullanılabilecek başka mineral arama çabasına girmişlerdir. Yine bu ülkeler, non-asbestos adı altında yeni balata malzemeleri üreterek, yeni ürünlerini piyasaya sunmuşlardır. Fakat bu ürünlerin maliyeti, normal asbestli balatalara göre üç dört kat fazla olmaktadır. Yeni geliştirilen bu ürünler konusunda bu firmalar çok hassas davranarak bilgi vermekten kaçınmaktadırlar.

Son yıllarda otomobil sektöründe meydana gelen değişimler gün geçtikçe çok daha iyi sonuçlar meydana getirmektedir. Otomobil firmaları kendi ürettikleri araçların sürtünme malzeme verimliliğinin çok iyi performans göstermesi için çok farklı çalışmalar içerisine girmişlerdir.

Tüketimi oldukça yüksek olan balataların piyasası da hareketlidir. Balata üreticileri kalite ve pazar açısından sürekli rekabet halindedir. Ülkemizde fren balata üreticisi olarak sadece birkaç firma mevcuttur. Bu firmalar kaliteli balata üretiminin gerçekleştirilmesinde gerekli mevcut bilgileri ve araştırma-geliştirme çalışmalarını son derece gizli tutmaktadırlar. Bu nedenle ülkemizde balatalarla ilgili araştırmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu firmalar ya kendi geliştirdikleri formülasyonu ya da yabancı marka tescili altındaki formülasyonu üretimlerinde kullanmaktadırlar.

Konunun ekonomik boyutu dikkate alındığında, asbestsiz üretilen balataların maliyetlerinin asbestli ürünlere göre bir kaç kat fazla olduğu yapılan çalışmalarla ortaya çıkmıştır [9]. Asbeste alternatif olan pahalı takviye elyafları ve diğer bileşenlerin en iyi sonucu verecek miktarda kullanılması ile maliyet azaltılabilir. Ancak asbeste alternatif olan endüstriyel elyaf malzemeleri de yurtdışından ithal edilmektedir. Buna rağmen toplam maliyette önemli artışlar meydana gelmektedir. Bu maliyet artışı direk satış fiyatlarına yansıtılmayıp üretim yönteminin iyileştirilmesi, malzemelerin ve iş gücünün daha iyi kullanılması yoluyla düşürülmelidir.

Bu çalışmada otomotiv fren balatalarında bor minerallerinin kullanımının frenleme karakteristiğine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. 2000’li yıllara kadar tüm dünyada kullanılan asbestin insan sağlığına olumsuz etkilerinden dolayı kullanımının yasaklanmasıyla, asbeste alternatif sürtünme malzemeleri geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Günümüzde asbeste alternatif olarak endüstriyel elyaflar kullanılmakta fakat bu ürünlerin patentli olmasından dolayı ülkemiz için yüksek maliyetler ve yurt dışına bağımlılık getirmektedir. Bu durum, ülkemizdeki minerallerin sürtünme malzemesi olarak kullanılabilmesinin araştırılmasını zorunlu kılmıştır. Bu çerçevede dünya bor rezervinin % 70’inin ülkemizde bulunması ve malzeme yüzey sertliği ve yanmaya karşı mukavemet kazandıran cam, seramik ve birçok sanayi dalında kullanılan bor minerallerinin sürtünme malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, yeni formülasyonlu asbest içermeyen, cashew içerikli bor katkı ve cashew’e alternatif sedir içerikli bor katkı fren balatası üretilmiştir. Cashew yerine sedir kullanılarak komponenti oluşturan malzemelerin yurtiçinden temin edilebilen malzemelerden seçilip yurtdışına bağımlılığın azaltılması yolu seçilmiştir. Yeni geliştirilen bu balatada tamamen yerli malzemelere yer verilmiş, maliyetin önemli derecede düşürülmesine çalışılmıştır. Bu balatalarda, bir balatadan beklenen asgari sürtünme ve aşınma değerlerini sağlaması, insan sağlığı ve çevre için zararlı olmaması, aynı zamanda ekonomik olması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sürtünme malzemeleri son derece önemli malzemelerdir. Literatürde sürtünmeye dayanıklı malzemeler hakkında geniş bilgiye yer verilmektedir. Fakat sürtünme malzemelerinin içeriği konusunda çok az kaynak vardır. Bu durum çok bileşenli malzemelerin tribolojik mekanizmalarının karmaşık olmasına bağlanabilir. Konu ile ilgili yapılan araştırmalar da, kompozit formülasyonu ve değerlendirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır.

Balata üretimi ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda genellikle balata bir kompozit malzeme olarak ele alınmış ve bütün katkıları içeren balata bileşimi yerine çok çeşitli elyaf matris bileşimleri incelenmiştir. Bir balatanın bileşiminde bulunması gereken bütün katkılarla yapılan çalışmaların sonuçları ticari önem taşıdığından genellikle yayınlanmayıp patent alma yolu seçilmiştir. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Leroy ve arkadaşlarının, yaptığı araştırmada asbest oluşumuna bağlı olarak sağlık sorunları olduğu (EPA) Çevre Koruma Ajansı tarafından bildirilmektedir. TSCA, asbest meydana getiren veya içeren ürünlerin üretimine yasak konmasını önermiştir. Bu gerekçelerle fren sisteminde yapılan araştırmalarda bazı sorunlar ortaya çıkmıştır. Asbest içermeyen fren sistemine sahip araçların fren sistemi standartlarına uygun asbest olmayan malzemelerle değiştirmenin uygun olup olmayacağının araştırması yapılmıştır. Asbest içermeyen malzemeler fren sistemi gelişimine ve dizaynına değişik yapılar ve karışıklıklar getirmiştir. Çünkü bu maddeler farklı ve beklenmedik sürtünme özelliklerine sahiptir. Asbest içermeyen malzemelerin güvenli olarak kullanımının sağlanması için araçların fren sisteminde aktivasyon silindiri, depo, dağıtım valfleri gibi frenleme sistemi elemanlarının yeniden düzenlenmesi gerekebilir. Fren sisteminde sürtünme malzemelerini, farklı sürtünme karakteristiklerine sahip sürtünme malzemeleri ile değiştirilmesi aktivasyon enerjisinin yetersiz kalacağından dolayı frenleme mesafesinin uzayacağı görüşünü belirterek asbest içermeyen sürtünme malzemelerinin en azından aynı frenleme karakteristiğine sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir [10].

Handa ve Kato, Cu, BaSO₄ ve maun ağacı tozunun fren balatalarının sürtünme ve aşınma özelliklerine etkilerini araştırmak için beş türlü katkı maddesi içeren üç grup kompozit incelemiştir. Bir bileşenin oranı sabit tutularak diğer ikisi % 0-40 arasında değiştirilmiştir. Kompozitlerin tribolojik değerlendirilmesi pim-disk tipi deney düzeneği kullanılarak iki farklı şartta yapılmıştır. Birinci grup deneyler düz yolda hafif frenleme şartlarında, ikinci grup ise uzun bayır aşağı iniş şartlarında (ağır frenleme) şartlarında yapılmıştır. Her bileşenin etkisini incelemek için birinin oranını artırıp diğerini azaltarak yapılan deneylerde aşınma oranı ve fren zayıflama karakteristiği incelenmiştir. Tarama elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve elde edilen diğer bulguların analizinden şu sonuçlar elde edilmiştir [11].

Bakır tozu katılması fren zayıflama karakterini artırırken aşınma dayanımını azaltmıştır. BaSO₄ ilavesi tam tersine etki yapmıştır yani fren zayıflama karakterini azaltırken aşınma dayanımı ve mukavemet artmıştır. Tarama elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri tekrarlı kaymaların sonucu aşınan yüzeylerden bir tabaka koparak ayrılmış, bu olay yüzey pürüzlülüğünü ve aşınmayı artırmıştır. Bu olay BaSO₄ katılmayan numunelerde görülmüştür. Bakır tozu maun ağacı tozu karışımı katılması durumunda özgül aşınma miktarı artan bakır oranıyla yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. En üstün fren zayıflama karakteristiği ve en iyi sürtünme özellikleri her iki madde %20 oranında katıldıkları zaman elde edilmiştir.

BaSO₄ veya maun ağacı tozu içeren kompozitlerde en iyi sürtünme performansı ve fren zayıflama dayanımı %0 BaSO₄ içeren numunelerde, en az özgül aşınma değeri ise %10 BaSO₄ ve %30 maun ağacı tozu içeren numunelerde görülmüştür. Bakır tozu ile maun ağacı tozunun sürtünme katsayısı üzerine önemli etkisinin olduğu BaSO₄ tozunun ise önemli etki yapmadığı belirlenmiştir [11].

Mutlu ve arkadaşları, borik asidin fren balata özelliklerine etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmada disk balataları üzerinde 50 °C den 400 °C ye kadar sıcaklık, 1050–3000 kPa basınç altında aşınma ve sürtünme katsayısı testleri yapmışlar ve disk malzemesi olarak dökme demir kullanmışlardır. SEM çalışmasına ilave olarak balatanın saf su, tuzlu su, fren sıvısı ve motor yağına olan tepkilerini belirlemek için bir dizi deneyler yapmışlardır. Balata numuneleri imalat sırasında ısıtılma işleminden geçirilmiştir. Bu nedenle balataların sertlikleri artmış, yoğunlukları azalmış, aşınmaya karşı dayanımları artmıştır. Borik asit içeren balatalar çevre ortamlarından daha az etkilenmiştir. Borik asit içermeyen numunelerde ise ısıtılma işlemi sonucunda aşınma direncine negatif yönde etki yapmış borik asit içeren numunelerde ise aşınma direnci artmıştır [12].

Jang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, çeşitli fren sürtünme çiftlerinin sürtünme ve aşınma performansı üzerinde, değişik metalik fiberlerin etkileri araştırılmıştır. Farklı metal fiberleri içeren (Cu, çelik veya Al) basit bir deneysel formülasyonla, sürtünme malzemelerini üretmişler ve bir sürtünme test cihazı üzerinde denemişlerdir. Sürtünme testleri için iki farklı disk (Gri dökme demir ve alüminyum metal matris kompozit, Al-MMC), kullanmışlardır. Sürtünme testlerini, çevre sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklar gibi iki farklı sıcaklık dizisini göz önünde bulundurarak yapmışlardır. Çevre sıcaklığı testlerinden gelen sonuçlara dayanarak: gri dökme demir disklerine karşı sürtünen Cu fiberiyle sürtünme malzemelerinin, bariz negatif bir μ - γ (Kayma hızına karşı sürtünme katsayısı) bağıntısı gösterdiği hususunda birleşmişlerdir. Diğer yandan, yüksek sıcaklık testleri sonucunda, Cu fiberleriyle sürtünme malzemesinin fren gücü azaltma direncinin diğerlerinden daha iyi olduğu kanısına varmışlardır. Aynı zamanda, çelik fiberli sürtünme malzemesi Al-MMC diskinin, yüksek sıcaklıklarda kayma

esnasında kararsız sürtünme davranışı göstermesi ve sert metal transferine neden olmasından dolayı uyumlu olmadığını belirlemişlerdir [13].

Hee ve arkadaşları otomotiv fren balatalarındaki sürtünme mekanizması üzerine yapılan araştırma çalışmalara rağmen, konunun tamamen anlaşılamamakta olduğunu ileri sürmektedirler. Onlara göre; kompozit bir sürtünme malzemenin sürtünme ara yüzeyinde meydana gelen kompleks mekanik kimyasal süreçler, sürtünme performans ile fren balata formülasyonu arasındaki korelasyonu anlamayı zorlaştırmaktadır. Yaptıkları çalışmada, yeni formüle edilen bir fren balata malzemesinin sürtünme ve aşınma karakteristikleri ile potasyum-titanın bunlar üzerindeki etkisi üzerine yoğunlaşmışlardır. İki farklı malzeme örneği formüle ederek, bunları test ve analiz etmişlerdir. Bir yarı ölçekli tek sonlu ataletsel tip fren disk dinamometre testi (FAST) kullanarak sürtünme ve aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Her iki sürtünme malzemesinin performansını yorumlamak için, sürtünme katsayısını, aşınma oranını ve sürtünme yüzeylerini incelemişlerdir. Işık mikroskopunu, tarama ve transmisyon elektron mikroskopunu, enerji ayırıcı X-ray analizlerini ve X-ray difraksiyon analizlerini kullanarak örneklerin sürtünme yüzeylerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçların analizine dayanarak, potasyum-titan içeren fren balata malzemesinin önemli ölçüde sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve aşınma direncinin stabilitesini arttırdığını ifade etmişlerdir [14].

Kurt ve Boz, bronz içerikli fren balatalarını toz metalürjisi tekniği ile üretmişler ve bunların aşınma davranışlarını araştırarak asbest içerikli fren balataları ile karşılaştırmışlardır. Bronz tozlarını, 350, 500 ve 600 Mpa basınçlar altında sıkıştırmışlardır ve 810 °C'de amonyaklı ortamda 75 dakika süresince sinterlemişlerdir. Aynı sürtünme aralığı için, bronz içerikli fren balatalarının asbest içerikli fren balatalarından sürtünme katsayısı düşük olduğunda sıcaklığın arttığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, bronz içerikli fren balatalarında daha yüksek aşınma oranı gözlemlenmiştir. Ayrıca, düşük yoğunluk, yüksek gözeneklilik ile ısı iletkenliğinin düştüğünü görmüşlerdir. Balatadan parçacıkların kopması esnasında sürtünme katsayısının aynı kalmasına rağmen, aşınma direncinde bir artış gözlemlenmiştir [15].

Liu ve arkadaşları, Stiren bütadiyen ve nitril bütadiyen asbestsiz kauçuk tozunu disk fren balatası üretiminde kullanmışlardır. Sabit hız ve dinamometre testinin sonuçlarına göre asbestsiz kauçuk tozunun, sürtünme malzemelerinin özelliklerini önemli bir şekilde geliştirebileceğini göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmaya göre sıcaklığın değişmesiyle asbestsiz kauçuk tozuyla değiştirilen sürtünme malzemelerinin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı, asbestsiz kauçuk tozunun kullanım oranı ile bağlantılı olarak düşüktür [16].

Choa ve arkadaşları, fren sürtünme malzemelerinde üç farklı katı yağın (Grafit, Sb_2S_3 , MoS_2) sürtünme karakteristiklerinin, değişik yönlerine etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Deneysel formüllelemeye dayalı, birleşimi sırasıyla belirlenen % 10 grafit, % 7 grafit + % 3 Sb_2S_3

ve % 7 grafit + % 3 MoS₂ üç sürtünme malzeme numunesini üretmişlerdir. Bir fren dinamometresi kullanarak sürtünme malzemelerinin tribolojik özelliklerini elde etmişlerdir. Sb₂S₃ ve grafit içeren sürtünme malzemelerinin sürtünme kararlılığını ve fren gücü direncini düzelttiğini göstermiştir. Sb₂S₃ ve MoS₂ içeren sürtünme malzemelerinin, aşınma direnci yönünden dezavantaj sergilediğini ortaya koymuşlardır [17].

Lu, komponentin aşınma özelliklerini geliştirmek için, otomotiv balatası sürtünme formüllemelerinde kullanılan ham malzemeleri kombinasyonel bir yaklaşım kullanarak iki grupta sınıflandırmıştır. Ona göre; aşınma direnci geliştirilen birinci grubun bileşenleri; yumuşak katkı maddeleri (grafit, MoS₂, Twaron), sert katkı maddeleri (Al₂O₃ ve çelik yünü) ve organik yapıştırıcı (benzoxozine) içerir. Yumuşak katkı maddesi içeren balataların düşük sürtünme katsayısına (μ), düşük aşınmaya ve diskin yüzeyine kolayca yapışan kırıntıya sahip olduğunu gözlemlemiştir. Sert katkı malzemesi içeren balataların orta derece aşınma, orta sürtünme katsayısı (μ) ve dökme demir disk malzemesinin balata yüzeyinde katmana sebep olduğunu görmüştür. Benzoxozine katkılı balatanın yüksek aşınma ve yüksek μ 'ye sahip olduğunu ve benzoxozine'nin balata içeriği olarak kullanılmasından dolayı ne diskte ne de balata da katman olmadığını belirtmiştir.

Sürtünme malzemelerinin aşınmasıyla benzoxozine için Al₂O₃, grafit, MoS₂, çelik yünü ve Twaron eklenerek geliştirilebilir olduğunu görmüş ve yağlama mekanizması için grafit ve MoS₂, aşındırıcı mekanizma için Al₂O₃, sürtünme katmanı mekanizması için çelik yünü, güçlendirme mekanizması için Twaron gibi dört aşınma gelişim mekanizması önermiştir [18].

Ma ve arkadaşları, metalik olmayan fren sürtünme malzemelerinin sürtünme katmanları ve fren sürtünme performansında bir aşındırıcı olan ZrSiO₄ (Zirkonyum silikat veya zirkon)'un etkilerini araştırmışlar. Deneysel sonuçlarla, ZrSiO₄'ün sürtünme katsayısını arttırdığını, aşınma oranını azalttığını belirlemişlerdir. Bununla beraber ZrSiO₄ katkısının sürtünme malzemelerinin negatif aşınma oranını düzeltebileceğini ileri sürmektedirler [19].

Mohanty ve Chugh, otomotiv fren balatası sürtünme kompozitlerinde, uçucu kül partiküllerinin %50 ağırlığından daha fazla birleştirmek için, bir araştırma yapmışlardır. Sürtünme kompozitlerinin gelişimi için Illionis Eyaleti'nde spesifik bir elektrik santralinden elde edilen uçucu kül kullanmışlardır. Uçucu küle ek olarak kompozit gelişim aşamasında, fenolik reçine, aramid pulp, cam yünü, potasyum titanat, grafit, alümina ve bakır tozu gibi bileşim maddeleri kullanmışlardır. Geliştirmiş oldukları fren balata kompozitleri, 0,35-0,4 aralığında kararlı sürtünme katsayısı ve % 12'den daha düşük aşınma oranları göstermiştir [20].

Kim ve arkadaşları, farklı hacimde grafit oranları ve antimontrisülfat (Sb₂S₃) içeren NAO (non-abestos organic) fren balatası çeşidinin tribolojik davranışını incelemek için, deneysel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Sürtünme testleri için bir skala dinamometre

kullanmışlar ve iki katı yağlayıcının bağıl miktarlarına göre sürtünme katsayısında sıcaklık, kayma hızı ve uygulanan basıncın etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, her iki katı yağlayıcı fren balatalarının, bir tek katı yağlayıcı içeren sürtünme malzemelerine göre daha az hız hassasiyeti ve daha iyi sürtünme kararlılığı olduğunu görmüşlerdir. Özellikle daha yüksek grafit yoğunluğu içeren fren balatasının yüksek sıcaklık sürtünme testi boyunca, diğerlerinden daha iyi frenleme direnci olduğunu görmüşlerdir [21].

Hong ve arkadaşları, düz fenolik reçine, silikonlu fenolik reçine veya boron fosforlu (B-P) fenolik reçineli fren sürtünme malzemelerinin aşınmasını araştırmışlardır. Sürtünme malzemesi numuneleri üretmek için basit bir formülasyon kullanmışlar ve Krauss tipi sürtünme testi kullanarak aşınma testleri yapmışlardır. Üç sürtünme malzemesindeki sürtünme stabilitesini ve aşınma oranını, 400 °C'nin üstündeki sıcaklık fonksiyonları olarak karşılaştırmışlar ve mekanizmaları farklı sıcaklık değerlerinde aşınma yöntemleri ile birleştirilerek analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, reçinedeki termal çürüme sonucu oluşan ayrılmış alt yüzeyler ile yükseltilmiş sıcaklıklardaki aşınma oranını tespit etmişler, en iyi çalışma direncini ve sürtünme stabilitesini, B-P uygulanmış reçine içeren sürtünme malzemesinin verdiğini görmüşlerdir [22].

Matejka ve arkadaşları, yarı metalik sürtünme kompozitlerinin (SMFC) sürtünme-aşınma özelliklerine silisyum karbürün (SiC) etkisini araştırmışlardır. Silisyum karbür hacimli yarı metalik numune hazırlamışlar, dökme demir diskine karşı kaydırmışlar ve bunların sürtünme-aşınma özelliklerini değerlendirmişlerdir. Sürtünme katsayısının (μ) SiC hacmiyle artırılmasını incelemişler, yüksek hacme rağmen sürtünme katsayısının değerinde önemli bir değişiklik olmadığını gözlemlemişlerdir. Test ettikleri sürtünme kompozitlerinin aşınma oranının, SiC hacminin artması ve sıcaklık ile biraz arttığını görmüşlerdir [23].

Azaklı ve Savaşkan, Zn-40Al-2Cu-2Si alaşımlı balata ısıtılma işlemi ile üretmişlerdir. Isıl işlemin, balata numunesinin direncini ve sertliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bununla beraber, sürtünme katsayısının, küçük bir azalma gösterdikten sonra kayma hızının artmasıyla arttığını ve aşınma numunesinin sıcaklığının basınç ve kayma hızının her ikisiyle birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. Aşınma kaybını, basınçla birlikte üssel olarak ve kayma hızıyla lineer bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir [24].

El-Tayeb ve Liew, yeni geliştirdikleri dört farklı ticari olmayan sürtünmeli fren balatası malzemelerinin kuru ve ıslak olarak sürekli kayma performanslarını değerlendirmişler ve seçilen diğer iki ticari fren balata malzemesi ile küçük ölçekli bir disk-balata sürtünme test cihazı kullanarak karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, sürekli kuru frenleme altında, CMB içeren tüm ticari olmayan fren yastık malzemeleri için sürtünme katsayılarının fren yastık malzemelerinden etkilenmediğini görmüşlerdir. Ayrıca, bütün fren yastık malzemelerinin,

basınç veya hız artışı ile sürtünme katsayılarında hafif bir artış gösterdiğini ifade etmektedirler. Bu arada, aşınma oranlarının esasen fren yastık malzemesi ve basıncın tipi veya bileşenine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir [25].

Washabaugh, Engelhard firmasının ürettiği Emcor 66 (tescilli ticari marka ismi) çok kısa elyafları diğer uzun elyaflarla birlikte kullanarak sürtünme malzemelerinin üretim ve sürtünme-aşınma özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Emcor 66'nın en önemli kısmını magnezyum silikat olan ($Mg_5Si_8O_{26}H_{10}.4H_2O$) attapulgit oluşturmaktadır. Bunun sağlığa zararlı olduğu tespit edilmemiştir. Elyaf uzunluğu 0,5 μm ve uzunluk/çap oranı 20:1 civarındadır. Fenolik reçine ile birlikte cam elyaf, aramid elyaf, Emcor 66 karışımı kompozitler üretilmiştir. Aramid karışımlar daha iyi sonuç vermiştir. Çelik elyaf kullanılarak Emcor 66 ile birlikte yarı metalik kompozitler de üretilerek incelenmiştir. Bütün bu kompozitlerin tribolojik değerlendirilmesi soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının 0,35-0,45 arasında olduğu otomotiv balatası için uygun olduğunu göstermiştir. Bu karışımlardan kompozit üretiminin kolay olduğu ve yüksek sıcaklıklarda kararlı olduğu görülmüştür. Emcor elyafları sürtünme katsayısının kararlı olmasını da sağlamıştır. Denenen bu elyafların üretim kolaylığı ve yüksek sıcaklıklarda sürtünme kararlılığı sağladığı görülmüştür. Ağırlıkça %10 çok kısa elyaf katılması ön şekillendirmeyi büyük ölçüde iyileştirmiştir. Katılan elyaflar kompozitin eğilme dayanımını da artırmıştır [26].

Kondoh ve arkadaşlarının, sinterlenmiş yeni bir sürtünme malzemesi üzerine yaptığı çalışmada bakır esaslı kompozit tozlarının mekanik olarak alaşımlandırılarak geliştirildiği yüksek sürtünme kuvveti sağlamak için malzeme temasında uygun partikül sıklığı sağlanmıştır. Bu yeni sürtünme malzemesi kalın ve sert partikül içeren geleneksel sürtünme malzemelerinden daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha az aşınma özelliği göstermiştir. Bakır esaslı alaşıma mekanik ve aşınma özelliklerini iyileştirmek için Ni, Fe, Zn yağlayıcı olarak grafit ve MoS_2 , aşınma direncini iyileştirmek için sert partikül olarak SiO_2 , Al_2O_3 katılmıştır. Ring-on-disk kayma aşınma test cihazı kullanılmıştır [27].

Mutlu ve arkadaşları, bakır tozu içerikli borik asit katkılı ve katkısız fren balatası komponenti oluşturarak bir kısım deneyler yapmışlardır. Borik asit katkılı ve katkısız üretilen numunelerin sürtünme katsayısı (μ), aşınma direnci ve belirli yük ve zamanlarda ısınma özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar, asbestsiz otomotiv fren balatası gelişiminde aşınmaya karşı direnç oluşturmada, sürtünme katsayısının düzgünleşmesinde bakır tozu ile birlikte borik asitin kullanılabilirliğini göstermiştir [28].

Crosa ve Baumvol, sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleriyle ilgili araştırmalar yapmıştır. Çalışmalarında, cam, seramik, çelik ve mineral elyafları (ağırlıkça % 10-% 20 oranında) ve Aramid, karbon, akrilik (ağırlıkça % 4-8 oranında) olarak iki karakteristik grup

elyaf kullanmışlardır. İnce öğütülmüş alümina, yeşil krom oksit, zirkonit ve kuartz gibi abrasif refrakter tozlar dolgu maddesi olarak kullanılmış, elyaf takviyeli fenolik kompozitlerin ve saf fenolik numunenin tribolojik özellikleri de araştırılmıştır. Bu çalışmada dökme demir disk ve dinamometre tipi düzenek kullanılmıştır. Deneylerde farklı basınç [P (MPa)], hız [V (m/s)] düzeyinde 230 °C'deki disk aşınması da incelenmiştir. Bu çalışmalarda çok bileşenli fren balata formülasyonlarının incelenmesi amaçlanmamıştır. İki bileşenli sistemlerin tribolojik özelliklerine, elyaf tiplerinin ve abrasiflerin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen bulgular göre [29], hiç katkısız saf reçine (karbon elyafli kompozit hariç) diğerlerinden daha düşük μ değeri göstermiştir. Bu durum disk yüzeyine transfer olan karbon parçacıklarla kanıtlanmıştır. Elyaf katılması sürtünme katsayısının artmasına sebep olmuştur. En önemli bileşen olan elyaf aynı zamanda kazımayı (ploughing) da artırmıştır. Mineral elyafli kompozitler en yüksek sürtünme katsayısına sahip kompozitlerdir. Bunları sırasıyla seramik elyaf, çelik elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf izlemiştir. Yüksek P-V düzeylerinde saf fenolik reçineye göre çelik, cam, seramik elyaf katılmış kompozitler daha yüksek aşınma göstermişlerdir. Düşük pv düzeyinde ise sadece çelik elyaf takviyeli kompozitte aşınmada az miktarda artma gözlenmiştir. Kompozit aşınması sırasıyla, çelik elyaf, cam elyaf, mineral elyaf, seramik elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf, akrilik elyaf şeklindedir. Mineral elyaf, akrilik elyaf, karbon elyaf ve saf reçine hariç metalik diskte aşınmaya yol açmışlardır. En fazla disk aşınması çelik elyafli kompozitte görülmüş ve bunu akrilik elyaf ve seramik elyaf izlemiştir. SEM çalışmaları cam elyafların kırılarak toz halinde parçacıklara dönüşerek μ değerini ve aşınmayı artırdığını göstermiştir. Çelik elyaflar kırılmamış fakat yüzeye çıkarak kazımayı artırmıştır. Üç organik elyafta (aramid, karbon ve akrilik) aşınma daha az olmuştur. Aramid elyafli kompozitlerde diske kompozit malzeme transferi olmamakla birlikte elyafın mekanik özelliklerinin aşınma dayanımını artırdığı düşünülmektedir. Akrilik ve karbon elyafli kompozitlerde diske transfer olan karbon filminin yağlama etkisi yaparak aşınmayı azalttığı sonucuna varılmıştır [29].

Yamaguchi, asbest elyaf takviyeli numuneler kullanarak bir dizi deneyler yapılmıştır. Numunelerde bağlayıcı reçine, demir tozu, asbest, grafit, bakır, alüminyum silika vd. kullanılmıştır. Deneyler dinamometre ve sürekli aşınma deneyleri şeklinde yapılmıştır. Bütün numunelerde artan ilk hızla ortalama sürtünme katsayısının azaldığı, frenleme süresinin arttığı görülmüştür. Yüzey basıncı arttıkça frenleme süresi kısalmaktadır. Deneme aralığı (0,1-0,4 MPa basınç aralığı) sürekli aşınma deneylerinde artan yüzey basıncıyla sürtünme katsayısında önce biraz artma daha sonra düşme olduğu görülmüştür. Artan kayma hızıyla sürtünme katsayısında bir düşme olmaktadır. Yüzey basıncıyla frenleme momenti ve kayma hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu ve artan yüzey basıncı ve kayma hızıyla frenleme momentinin arttığı görülmüştür.

Frenleme deneylerinde de artan yüzey basıncıyla ortalama anlık sürtünme katsayısı önce artmış sonra düşmüştür (0,2-4 MPa basınç aralığı, 0,5 MPa basınca kadar artma sonra düşme olmuştur). Sürekli aşınma deneyinden farklı olarak artan kayma hızıyla ortalama anlık sürtünme katsayısı önce artmış daha sonra düşme göstermiştir. Frenleme momenti artan yüzey basıncıyla artmış, frenleme momenti kayma hızıyla ortalama anlık sürtünme katsayısı değişimine paralel bir değişim göstermiştir. 0,56 m/s hızda yapılan deneylerde aşınma miktarının, katedilen yolla doğrusal arttığı, artan yüzey basıncıyla da arttığı görülmüştür. Numunelerin mukavemetleriyle aşınma dayanımları arasında doğrusal bir ilişki olmadığı da tespit edilmiştir. Yapılan ölçümlerde numunelerin sertlik ve basma dayanımları arasında doğrusal bir ilişki olmadığı da görülmüştür [30].

Streib, dinamometre tipi deney düzeneği kullanarak dokuz asbestsiz ve dört de asbestli malzeme hazırlayarak denemiştir. Yeni, kullanılmış, soğuk, sıcak fren zayıflama karakteristiği ve toparlanma özelliği incelenmiştir. Her ne kadar her iki grup malzemenin özellikleri birbirine yakın olarak bulunmuşsa da asbestsiz malzemelerin daha gevrek olduğu ve daha yüksek aşınma dayanımı gösterdiği gözlenmiştir. Ashland Oil USA tarafından asbest yerine kullanılabilecek karbon elyaftan ucuz ve daha iyi bir elyaf geliştirildiği ifade edilmiştir. Bu elyaf petrol katranından üretilen ve Carboflex olarak adlandırılan kısa karbon elyafıdır. Bu elyaflar çeliğe eşit mukavemette, düşük yoğunlukta, yüksek rijitlik, yüksek ısı iletkenliği ve 3050 °C'a kadar sıcaklığa dayanma özelliklerine sahiptir. Ayrıca 540 °C'a kadar oksidasyona dayanıklı, yağlama özelliğine sahip, düşük termal genleşme katsayısı, iyi aşınma dayanımına sahiptirler. Yapılan çalışmalar bu elyafların asbestten üstün olduğunu göstermiştir [31].

Potasyum titanat elyafı içeren, potasyum titanat ve asbest içeren hibrit kompozit ve sadece asbest içeren üç ayrı kompozitin dinamometre tipi düzenekte yapılan incelemelerinde birinci kompozitin yüksek μ ve aşınma miktarı gösterdiği çekme dayanımının ise düşük olduğu görülmüştür. Bu durum yüzeyde çatlak oluşumu ile açıklanmıştır. Üç tip kompozitin de istenen özelliklere sahip olmadığı görülmüştür. Buna göre yalnız potasyum titanat elyafın asbestin yerini alamayacağı anlaşılmıştır. Asbest içermeyen üç ayrı fenolik matrisli sürtünme malzemesinin yüksek aşınma oranı, aşırı toz oluşumu ve karşı metalik yüzeyde termal çatlamlar oluştuğu bildirilmiştir. Bileşimlerinde farklı elyaf, dolgu maddesi ve sürtünme düzenleyiciler kullanılmıştır. Takviye elyafları kevlar+cam+wollastonit+granüle yün, Kevlar ve kırpılmış cam elyaf idi. Bu kompozitlerin araştırılmasında hiçbir elyaf kombinasyonunun asbestin yerini alamadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca Kevlar'ın bütün şartlarda asbestin yerini tutamayacağı görülmüştür. Fenol formaldehit dışında diğer reçineler de bazı araştırmacılar tarafından denenmiştir. Örneğin melamin ve nitril kauçuk, termoset polimid ve epoksi. Bütadien

nitrit kauçuk ve aromatik nitro bileşikleri ve ziftten elde edilen polisilik aromatik hidrokarbonlar da araştırılmıştır [31].

Fazan ve arkadaşları, kevlar'ın sürtünme malzemelerinde kullanımıyla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Kevlar pulp ağırlık oranı % 0~10 arasında değiştirilerek balata özelliklerine etkisi kamyonet balatasına uygun numuneler üretilerek denenmiştir. Bileşimde ağırlıkça toplam %24 elyaf, %18 bağlayıcı, % 54 dolgu maddesi ve % 4 sürtünme ayarlayıcı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda kevlar'ın dayanım özelliklerini artırdığı ve artan elyaf oranıyla titreşim sönümleme etkisinin arttığı görülmüştür. 0,78 MPa basınç ile Kraus deney düzeneği kullanılarak yapılan deneylerde kullanılan bileşim için sürtünme katsayısının denenen elyaf oranı aralığında kevlar oranından bağımsız olduğu görülmüştür. Bu özelliği ile kevlar pulp balatalarda kenar kırılmasını önlemek, perçin tutma ve diğer anılan yararlarıyla sürtünme malzemesi reçetelerinin optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Kraus deney makinesinde 0,59 MPa basınçla 200 ve 0,78 MPa basınçla 200 duruş sonunda yapılan ölçümlerde kevlar pulp'un diğer katkı maddeleriyle birlikte balata aşınmasını azalttığı görülmüştür [32].

Kato ve Magario, aramid elyafın (Kevlar 29) etkilerini araştırmışlardır. Bunu için 0,28-5,6 MPa basınç kullanarak, dökme demir disk karşı malzemeyle pim-disk sisteminde dokuz ayrı bileşimi incelemişlerdir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar şunlardır; artan elyaf oranı ile sertlik ve termal iletkenlik doğrusal olarak azalmaktadır. Artan sürtünme süresiyle sürtünme katsayısı (μ) elyaf oranına bağlı olarak 0,22-0,28 arasında kararlı bir değere ulaşmaktadır. Elyaf oranının artmasıyla μ değeri 0,5'den 0,25'e düşmektedir. Elyaf oranının %15'in üzerine çıkmasının sürtünme katsayısında düşmeye yol açmadığı da görülmüştür. Elyaf hacim oranının artmasıyla fenolik reçinenin özgül aşınma miktarı kırk kat azalmıştır. Elyaf hacim oranı %25-%35 arasında olduğunda minimum özgül aşınma elde edilmiştir. % 35'in üzerinde özgül aşınmada önemli bir azalma görülmemiştir. Minimum μ için ise elyaf hacim oranı %15'dir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde yapılan araştırmalar %40 elyaf hacim oranında en az, saf reçine de ise en yüksek değer bulunmuştur. SEM incelemeleri sürtünme ve aşınma özelliklerindeki iyileşmelerin elyaf artışı ile karşı yüzeyde oluşan daha mukavemetli ve daha sıkı yapışmış transfer filmi ile oluştuğunu göstermiştir. Düşük termal iletkenlik, yüksek mukavemet, aşınma parçacıklarının küçülmesi transfer filminin daha sıkı yapışmasının nedenleri olarak kabul edilmiştir. Metal karşı yüzeyinin film tarafından kaplanınca metal pürüzlerinin abrasif etkisi de azalmış olmaktadır. Disk yüzeyinde oluşan polimer filminin düşük yüzey enerjisine sahip olması nedeniyle film ile kompozit arasındaki etkileşim minimumdur. Bu çalışmalar sürtünme malzemeleri için gerekli olan sürtünme ve aşınma özelliklerinin bağımsız olarak kontrol edilemeyeceği fikrinin oluşmasına sebep olmuştur. Optimum sürtünme katsayısı için ($\mu=0,35$) elyaf oranının %10'nun üzerinde olmaması önerilmiştir [33].

Sinha ve Biswas, kevlar (aramid) elyafın kompozitin özelliklerine etkilerini araştırmak amacıyla basınçla kalıplanmış Kevlar 49 (ağırlıkça % 30, yoğunluk 1,3 gr/cm³) ve fenolik reçineden oluşan kompozitin özelliklerini araştırmışlardır. Ortam sıcaklığında sürtünme ve aşınma özellikleri pim-disk tipi düzenekte çelik disk malzemesi kullanılarak değişik basınç-hız değerlerinde incelenmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen önemli bulgular şunlardır; saf fenolik reçine yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı (μ) değeri göstermiştir. Fakat aşınma dayanımı düşüktür. Kevlar elyafının katılması sürtünen yüzeyler arasındaki adhesif kuvvetleri ve μ değerini azaltmıştır (elyafsız 1,5-1,2, elyafla 0,8-0,3). μ değeri saf reçineye göre daha uzun sürede kararlı hale gelmiştir. Aşınma dayanımı artmıştır (30-40 kat). Su ile ıslandığında μ değerindeki düşme saf reçineye göre daha az olduğu görülmüştür. Su ile ıslandığında aşınma hızı artmıştır. Bu şartlarda bile sürtünme yüzeyinde film oluştuğu görülmüştür [34].

Jang ve Kim, yaptığı araştırmada fren dinamometresi kullanılarak antimontrisülfat (Sb_2S_3) ve zirkonyumsilikat ($ZrSiO_4$)'ın farklı miktarlar içerdiği dokuz çeşit otomotiv fren balatasının sürtünme karakteristiğini araştırmışlardır. Bu çalışmada durdurma modu ve sürüklenme modu olmak üzere iki farklı fren uygulama modunda tork çeşitliliği (sürtünme kuvvet osilasyonu) ve sürtünme katsayısının değişimi üzerine çalışılmıştır. Sb_2S_3 ve $ZrSiO_4$ miktarının sürtünme karakteristiğinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Sürtünme malzemelerindeki Sb_2S_3 'ün sürtünme stabilitesini geliştirdiği ve $ZrSiO_4$ 'in frenleme sırasında tork varyasyonunu kötüleştirdiği belirtilmiştir [35].

Bahadır ve Gong, dolgu maddelerinin polimerik kompozitlerin tribolojik özelliklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Katı yağlayıcılar (grafit, MoS_2), saf metaller (gümüş, kurşun, kalay, çinko, alüminyum, bakır, demir, molibden, nikel, selenyum ve volfram) ve inorganik bileşenler (CuS , CuO , CuF_2 , PbS) dolgu malzemesi olarak denemişlerdir. Katı yağlayıcıların kompozitin sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarını azalttığı, metal katkı maddelerinin aşınmaya olan etkisinin metalin cinsi ve özellikleriyle polimerin cinsi ve özelliklerine göre farklı etki ettiği belirlenmiştir. Metal ve metal bileşiklerinin sürtünme katsayısını artırdığı görülmüştür. Ayrıca parçacık büyüklük dağılımı, şekli ve yüzey özellikleri de sürtünme-aşınma özelliklerini etkilemektedir [36].

Mutlu ve arkadaşları, borik asit ve boraks katkılı fren balatası komponenti oluşturarak denemişler. Borakslı borik asitli, ve borik asitsiz, üretilen deney numunelerinin teste tabi tutulması sonucu alınan değerler irdelenerek sürtünme katsayısı (μ), aşınma direnci ve belirli yük değerleri altında ısınma özellikleri incelenerek kıyaslama yapılmıştır. Borik asit ve boraksın fren balatası komponenti içerisine katılması durumunda asbestin özelliklerini karşılayan alternatif malzeme olabileceği belirtmişlerdir [37].

Subramaniam ve arkadaşları, asbestsiz fren balatalarının formülasyonunu araştırmışlardır. Dinamometre tipi deney cihazında, sürtünme aşınma, zayıflama dayanımını ve yeniden düzelme karakteristiklerini değişik hız, basınç ve sıcaklıkta incelemişlerdir. Reçine olarak fenol formaldehit ve dolgu malzemesi olarak da barit (BaSO_4) kullanılmıştır. Kompozitlerde sadece takviye elyafının tipi ve yapısı değişken olarak alınmıştır. Bileşimi ağırlıkça % 35, % 30, % 25, % 20 oranında cam elyaf/reçine/dolgu ve sürtünme ayarlayıcılardan oluşan altı ayrı kompozit alınmıştır. Her kompozitte öğütülmüş cam elyafın uzunluğu, çapı ve yüzey şartları farklıdır. Elyafın yüzey şartlarını sadece çekme dayanımını artırdığı eğilme dayanımının ise artan elyaf boyu ile arttığı, azalan elyaf çapı ile azaldığı tespit edilmiştir. Eğilme modülünün artan elyaf çapı ile arttığı elastiklik modülünün ise elyaf boyu, çapı ve yüzey şartlarına bağlı olmadığı görülmüştür. Kompozitlerin sürtünme katsayılarını 0,21 ile 0,33 arasında olduğu ve bu miktarın fren balataları için uygun olmadığı belirlenmiştir. Mekanik özelliklerin sürtünme özellikleriyle doğrudan ilişkili olmadığı tespit edilmiştir. Bu çalışmalar cam elyafın sürtünme performansı üzerindeki etkisinin anlaşılmasına yardımcı olmuştur [38].

Cam elyaf takviyeli fenolik kompozitlerde, artan yük, kayma hızı ve sıcaklıkla, sürtünme katsayısı μ ve özgül aşınma miktarı azalmıştır. Özgül aşınma miktarı ise sıcaklıkla artmıştır. Mikroskopik incelemeler reçinelerin yüksek sıcaklıkta ayrıştığını elyaf-matris bağının zayıfladığını göstermiştir. Bu suretle matristen elyaf çekilmesi özgül aşınmayı artırmıştır. Yüksek ve kararsız μ değeri ve kötü fren zayıflama karakteristiği bu kompozitin sürtünme malzemesi olarak kullanılmasını engeller.

Karbon elyaf takviyeli fenolik kompozitlerde, sürtünme özellikleri deney parametrelerinden nispeten daha az etkilenmektedir. Özgül aşınma oranı artan sıcaklık ve kayma hızı ile artmakta iken artan yük ile azalmaktadır. Deney parametreleriyle sürtünme özelliklerinin hızla değişmesi (Özellikleri cam elyaf takviyeli kompozitten iyi olmasına rağmen) bu kompozitin fren balatası olarak kullanılmasını sınırlamıştır.

Hibrit kompozitler, kontrol kompozitlerine kevlar katılmasının etkilerini incelemek için imal edilmiştir. Cam elyaf+çelik elyaf içeren kontrol kompozitleri ile cam elyaf+kevlar ve çelik elyaf+kevlar içeren hibrit kompozitler'de, aşınma miktarında önemli miktarda azalma olmuştur. frenlemede gürültü önlenmiştir, geniş çalışma (basınç ve hız ve sıcaklık gibi) aralığında kararlı sürtünme özellikleri elde edilmiştir, sürtünme katsayısında azalma olmuştur.

Kompozitlerin tribolojik özelliklerindeki iyileşme kompozit formülasyonu ve çalışma parametrelerine bağlıdır. Çelik-kevlar kompozitleri en iyi özellikleri göstermiş ve deney parametrelerinden en az ölçüde etkilemiştir. Bu araştırmacılar bu kompoziti otomobil balatası olarak önermişlerdir [38].

Jang ve arkadaşlarının, yaptığı bir başka çalışmada aramid pulp ve potasyum titan whiskersin tepkisi araştırılmıştır. Otomotiv fren sürtünme malzemelerinin potasyum titan whiskers (iyi whiskers seramik) ve aramid pulp (lifciklendirilmiş organik elyaflar)'un birlikte çalışma etkisi araştırılmıştır. Üretilen sürtünme malzemeleri basit formülasyonlu ve beş bileşenden oluşmaktadır. Fenolik reçine, aramid pulp, potasyum titan whiskers, molibdendisülfid ve baritten oluşan sürtünme malzemelerinin sürtünme stabilitesi, aşınma oranı ve sürtünme yüzeyinin morfolojisi sürtünme malzemelerinde iki farklı elyaf içeriğinin etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar hem aramid pulpun hem de potasyum titanın yüzey sürtünmesindeki sürtünme filminin korunmasıyla sürtünme karakteristiği için önemli rol oynadığını göstermiştir. Sürtünme filmi aşınma direnci ve sürtünme stabilitesini geliştirmeyi sağlamıştır. Sürtünme malzemesinin mikroskobik gözlemleri lifli aramid elyaflar için iyi whiskers seramiklere bağlı olarak sürtünme arayüzeyinde filmi güçlendirdiği, ısıl direnç sağladığı gözlemlenmiştir. İki elyaf içeriklilerden birlikte çalışma etkisinin faydası onlardan yalnızca birinin anlamlı olarak azaltılarak kullanılabilirliği belirtilmiştir [39].

Kim ve arkadaşları, disk üzerinde yastık tipi sürtünme testi kullanarak, fenolik reçine, potasyum titan ve aldehit ile iyileştirilmiş CNSL'nin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Geleneksel fren balatalarında kullanılan tipik bileşenler ve bu çalışmada onların sürtünme özelliklerini asbestsiz organik bir formülasyon kullanarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, kayma esnasında yüksek gürültü meyli oluşurken fenolik reçinenin sürtünme katsayısını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, gürültü oluşumunun, sürtünme malzemesi içindeki CNSL'nin artırılmasıyla azaldığını belirlemişlerdir. Sürtünme malzemesinin aşınma direncini, ilave fenolik reçine ile arttırmışlardır. Potasyum titanın ve CNSL'nin, aşınma direncini kötüleştirdiğini görmüşlerdir. Gürültü oluşumunu azaltmak için fren balatalarının düşük sertlik, yüksek gözeneklilik de olmasını önermişlerdir [40].

Tanaka ve arkadaşları, tarafından yapılan bir çalışmada reçine, reçine-asbest ve reçine asbest bir dolgu malzemesi kullanılarak üretilen kompozitlerin sürtünme aşınma özellikleri dinamometre deneyleri kullanılarak belirlenmiş, başlangıç hızı, yüzey basıncı ve disk sıcaklığının etkileri araştırılmıştır. Karşı yüzey malzemesi olarak dökme demir disk kullanılmış, ayrıca numunelerin bazı dayanım özellikleri ölçülerek sürtünme-aşınma özelliklerine etkileri tespit edilmiştir. 15 m/s başlangıç hızıyla yapılan deneylerde 200 °C hariç ortalama sürtünme katsayısının artan yüzey basıncıyla biraz düştüğü, 200 °C'da ise daha belirgin bir düşme olduğu bulunmuştur. 15 m/s başlangıç hızı ve 2 MPa yüzey basıncında ortalama sürtünme katsayısının çeşitli sıcaklıklarda deney süresiyle değişiminde sürtünme katsayısının düşük sıcaklıklarda deney süresiyle artarken yüksek başlangıç sıcaklıklarında sürtünme katsayısının önce düştüğü deney sonuna doğru ise arttığı bulunmuştur [41]. Başlangıç hızının sürtünme katsayısına etkileri

2 MPa yüzey basıncı ile denenmiştir. Düşük sıcaklıklarda başlangıç hızıyla ortalama sürtünme katsayısında biraz düşme 300 °C’de ise bir artma olduğu görülmüştür. Farklı başlangıç hızları kullanılarak elde edilen kayma hızının sürtünme katsayısına olan etkisi, 300 °C’de hızın azalmasıyla sürtünme katsayısında biraz artma 300 °C’de ise hızın azalmasıyla önce biraz artma 5 m/s altında ise oldukça fazla bir düşme gözlenmiştir. Buradan sürtünme katsayısının büyük ölçüde kayma hızı tarafından kontrol edildiği sonucu çıkarılmıştır. 15 m/s başlangıç hızında frenleme başına aşınma miktarı ve yüzey basıncı arasındaki ilişki 300 °C hariç yüzey basıncından bağımsız, 300 °C’de ise artan yüzey basıncıyla aşınma miktarında önemli bir artış olduğu belirlenmiştir. 2 MPa yüzey basıncı altında başlangıç hızının aşınma miktarına olan etkisinin düşük sıcaklıklarda az yüksek sıcaklıklarda (300 °C’de) ise çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Asbest miktarının sürtünme özelliklerine etkisi 15 m/s başlangıç hızı, 2 MPa yüzey basıncı kullanılarak belirlenmiştir. Sade (dolgusuz) reçine sürtünme katsayısında çok az bir değişme gözlenmiştir. Asbest oranına bağlı olarak tüm sıcaklıklarda ortalama sürtünme katsayısında bir değişme olmuştur. Buradan takviye malzemesinin sürtünme katsayısının değişmesinde etkili olduğu sonucu çıkarılmıştır. Aynı başlangıç hızı ve yüzey basıncı için sürtünme katsayısı artan sıcaklıkla düşmekte, frenleme süresi ise artmaktadır. Sürtünme-aşınma özellikleriyle dayanım özellikleri arasında direk bir ilişki olmadığı, sürtünmenin, sürtünme sıcaklığı ile reçine ve dolgu maddelerinde meydana gelen yerel değişmelerle kontrol edildiği sonucu çıkarılmıştır [41].

Rhee, demir tozu ve grafit dolgulu fenolik reçinenin sürtünme özelliklerinin yük, hız ve sıcaklığa bağımlılığını araştırmıştır. Fren zayıflamasında yük zayıflaması, hız zayıflaması ve sıcaklık zayıflaması olarak üç mekanizmanın etkili olduğunu görmüştür. Sabit kayma hızında balata basıncını artırmakla sürtünme kuvvetinin doğrusal olarak artmadığını, sabit basınçta kayma hızını artırmakla sürtünme kuvvetinin azaldığını tespit etmiştir. Bu nedenle sürtünme katsayısının sabit değil normal kuvvet, kayma hızı ve ara yüzey sıcaklığına bağlı olabileceği sonucuna varılmıştır. Sürtünme katsayısının sabit olmadığını, sabit sıcaklık ve sabit kayma hızında artan basınçla azaldığı, sabit basınçta ise artan hızla azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısının sıcaklığa bağlı olduğu sonucuna varmıştır [42].

Vishwanath ve arkadaşları, cam elyaf, karbon elyaf ve kevlar elyaf dokumaları, polivinilbütiral (PVB) ile modifiye edilerek üretilmiş fenolik reçine bağlı, kompozit numuneleriyle yapılan deneylerde ağırlıkça %80 elyaf, %20 reçine kullanmışlardır. Aşınma deneyleri sonunda en az özgül aşınmanın kevlar dokuma takviyeli, en fazla özgül aşınmanın ise cam elyaf dokuma takviyeli kompozitlerde olduğu bulunmuştur. Deney öncesi 0,13 µm (CLA) olarak ölçülen karşı yüzey pürüzlülüğü deneyden sonra cam elyaf dokuma kullanıldığında 0,26 µm (CLA), karbon elyaf dokuma kullanıldığında 0,17 µm (CLA) ve kevlar elyaf dokuma

kullanıldığında 0,11 μm (CLA)'ye değişmiştir. Kevlar elyaf kullanıldığında karşı yzeye pürüzlülüğünün azalmasının aşınma parçacıklarının abrasif etkisinin az olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bu durum aynı zamanda kevlar'ın karşı yzeye aşındırıcılığının cam elyaf ve karbon elyaftan daha düşük olduğunu da göstermektedir [43].

Stadler ve arkadaşları, C/C-SiC kompozit fren diski üzerinde sinterlenmiş metalik fren balatalarının sürtünmesi ve aşınması üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, C/C-SiC fren diski ile iyi birleştirilmiş gibi görünen sinterlenmiş metalik fren balatalarının aşınma ve sürtünme özelliklerini açıklamaktadırlar. Fren kaliperleri ve disk ölçüleri farklı olan iki farklı ticari motosikletin fren sistemindeki dinamometreleri ile sürtünme karakteristiklerini incelemişlerdir. EDX analizi donanımlı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak sürtünme tabakasının oluşumunda metalik matris içindeki abrasivler ve grafit gibi bileşenlerin etkisini araştırmışlardır. Sürtünme tabakasının, diskin kayma yzeyei üzerinde daha çok demir ve bakır oksitlerden oluşan oksidasyon aşınması olduğunu doğrulamışlardır. Sinterlenmiş metalik disklerin sürtünme özelliklerini incelemişler ve fren balatalarının yapısı ve kompozisyonuyla bağlantılı olduğunu gözlemlemişlerdir [44].

Hızlı direk difüzyon teknolojisi kullanarak kimyasal buhar emdirme işlemi ile üretilen C/C kompozitlerin, sürtünme performansı konusunda Ruiying Luo'nun yaptığı araştırmada optimal değerler belirlenmiş ve bu malzemelerin sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada optimum işlem şartları olarak, 950 °C fırın sıcaklığı ve 6.7 kPa fırın basınç şartları kullanılmıştır. Üretilen C/C kompozitlerde iyi sürtünme performansı gözlenmiştir. Bu balataların kuru ve yaş şartlar altındaki fren moment eğrilerinin düzelerek stabilite kazandığı ve ortalama aşınma kalınlığının 9,5.10⁻⁴ mm'den aşağıya düştüğü belirtilmektedir [45].

Ruiying Luo'nun yaptığı bir başka araştırmada CVI (Chemical Vapour Infiltration) metodu elektrikli bir ön şekillendirme ısıtmasıyla C/C kompozitlerin ön şekillendirmede yüksek infiltrasyon oranı kazanıldığı, doğal gaz kullanılarak 80 saat süre ile yapılan infiltrasyon işleminde ortalama en yüksek yoğunluğun 1.71 gr/cm³ olduğu belirtilmiştir. Zamanla düzgün fren momenti ve ortalama sürtünme katsayısı elde edilmiştir [46].

Polimer matrisli kompozitlerde sürtünme olayının kompleksliği yzünden sürtünme mekanizmaları tam olarak anlaşılamamıştır. Bu sebeple son zamanlarda polimer matrisli kompozit ailesinin sürtünme tabakasının özellikleri ve karakterizasyonunda gelişmeler olmuştur. Kompozit malzemelerin sürtünme performanslarını araştırmada sürtünme yzeyei, sürtünme karakterini belirler. Sürtünme malzemesinin geri kalan kısmından farklı olarak sürtünme yzeyeinin oluşumu kimyasal kompozisyon ve yapıya bağlıdır. Sürtünme işleminde oluşan mekanik ve kimyasal etkileşim olduğu, eş yük ve sıcaklıkların uygulandığı sürtünmeye maruz kalmamış bir başka kısım ile karşılaştırıldığında, sürtünme yzeyeinin geri kalan kısmının

formülasyonu arasındaki ilişkinin aynı olmadığı belirtilmiştir. Sürtünen ve sürtünmemiş kısımların kinetik ve faz dengesinin önemli miktarda farklılık gösterdiği belirtilmiştir [47].

Boz ve Kurt tarafından yapılan çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada bronz kaplı fren balataları üretmişler ve onların sürtünme-aşınma özelliklerini araştırmışlardır. İkinci aşamada % 0,5, % 1, % 2 ve % 4 alümina (Al_2O_3) tozlarını bronz kaplı tozlara eklemişler ve bronz kaplı fren balatalarını güçlendiren Al_2O_3 üretmişlerdir. Aynı zamanda numuneleri güçlendiren alüminanın sürtünme-aşınma özellikleri araştırmışlar ve sade bronz kaplı ile karşılaştırmışlardır. Bu amaç için, sürtünme katsayısını ve numunelerin aşınma davranışını, gri dökme demir diskinde test etmişlerdir. Aynı zamanda numunelerin sertliğini ve yoğunluğunu belirlemişlerdir. Sinterlenmeden önce ve sonra numunelerin mikro yapıları ve aşınma örneklerinin aşınmış yüzeylerini, bir taramalı elektron mikroskop (SEM) kullanarak incelemişlerdir. 350 MPa'da sıkıştırılmış ve 820°C'de sinterlenen numunenin, optimum sürtünme-aşınma davranışını gösterdiğini bulmuşlardır. Sürtünme yüzey sıcaklıklarındaki artışla birlikte numunelerin sürtünme katsayılarında bir azalma gözlemişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısındaki en az düşme % 2 ve % 4 alümina da olduğunu belirtmişlerdir. Alümina içeriğindeki artışla birlikte, numunelerin kütle kaybında bir azalma da gözlemişlerdir. Sonuç olarak, % 2 ve % 4 alümina ile güçlendirilen numunelerin en iyi sonuçları sergilediğini bulmuşlardır [48].

Yamashita ve arkadaşları, disk fren balataları için yüksek performanslı asbestsiz sürtünme malzemesinde tane yapı kontrolü üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda yeni geliştirilen sürtünme malzemelerinin temelde yeni bir kavramla üretildiği belirtilmiştir. Bu üretilen malzemelerde balata ile disk sürtünme ara yüzeyinde balata gözeneklerinden gazlar geçirilerek deneyler yapılmıştır. Frenleme zayıflamasını azaltmak için taneler arasındaki gözenek büyüklüğü kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Fren sesini azaltmak ve yüksek titreşim damperi sağlamak bağlayıcı reçine tabakası içeren yapı ile sağlanmıştır. Bu yeni balatanın asbest gibi güçlendirici elyaf içermediği, frenleme sırasında termal stabilite sağlandığı hem aşınma direncinde hem de fren ses seviyesi ve fren zayıflama direncinde yüksek performans gösterdiği belirtilmektedir [49].

Yüksek performanslı sürtünme malzemesini güçlendirme işlemleri olarak Youssef ve arkadaşının yaptığı çalışmada, sürtünme malzemelerinin en önemli şartların başında teorik yoğunluğun olduğu ve poroziteyi yok etmek için, tek eksenli sıcak sıkıştırma, yalancı sıcak izostatik basınç, sıcak dövme ve sıcak izostatik basınç gibi çeşitli sıcak yoğunlaştırma (densifikasyon) işlemlerinden bahsedilmektedir. Bu işlemler malzemede komple densifikasyon sağlama özelliğindedir. Yüksek enerji uygulanan uçak frenleri ve yüksek hızlı tren frenlerinde kompozisyonun kompleksliği ve yapının sertliğinden dolayı kesme kuvvetlerine maruz

kaldıkları belirtilmiştir. Bu yüzden sıcak densifikasyon işlemlerindeki alternatifler kıyaslandığında sıcak dövme işleminin basit, ekonomik ve teknik olduğu görülmüştür [50].

Stocks ve arkadaşları, kevlar'la takviye edilmiş asbestsiz balata ve kavramalar konusunda bazı çalışmalar yapmışlardır. Kevlar pulpla takviye edilmiş balatalar çelik elyafla takviye edilmiş benzer balatalarla karşılaştırıldığında, soğuk sürtünmenin iyileştiği, gürültü ve titreşimin azaldığı ve hidrolik sıvısına daha az ısı geçişi olduğu görülmüştür [51].

Cho ve arkadaşları, gri dökme demir disk ve otomotiv fren balataları kullanarak sürtünme karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Soğutma hızı ve karbon değerinin değişmesiyle, farklı mikro yapılar elde etmek için üretilen gri dökme demir numunelerini ve ticari olmayan fren balatalarının iki farklı tipini (çelik içermeyen ve çelik içeren) bir karşıt yüzey malzemesi olarak denemişlerdir. Sürtünme testlerini, tribotester tipi bir sürtünme test cihazı üzerinde denemişlerdir. Gri dökme demir disklerde sürtünme katsayısının sınırının belirlenmesinde, ferrit ve grafit parçacıklarının etkisi üzerinde durmuşlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucuna göre; gri dökme demirdeki grafit parçacıklarının artan miktarıyla sürtünme katsayısı ve etkisinin, demir içerikli balata kullanımında olduğu gibi daha belirgin olduğu kanısına varmışlardır. Disk yüzeyindeki ferrit fazı miktarının, sürtünme katsayısında az etki gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır [52].

Cho ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada, zirkon partiküllerinin boyutunun fren balata malzemesinin sürtünme karakteristiklerine etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Sertleştirilmemiş türde balata malzemesi üretmek için 4 farklı boyutta zirkon partikülleri kullanmışlardır (1, 6, 75 ve 150 μ m). Sürtünme katsayısını, sürtünme kuvveti salınımını, balataların aşınma direnci ve gri dökme demir disk sürtünme testi ile zirkon boyutu bakımından araştırmışlardır. Sonuç olarak, sürtünme performansı ile ilişkili olan sürtünme filminin formülasyonunda zirkon partiküllerinin önemli rol oynadığını keşfetmişlerdir. Kaba zirkon partiküllü balata malzemelerinin, balata yüzeyinde, az miktarda balata aşınması ile mükemmel sürtünme stabilitesi sağlayan, sabit sürtünme filmi meydana getirdiğini görmüşlerdir. Aynı zamanda, zirkon partikülleri ile aşırı balata aşınması ve az sürtünme stabilitesine neden olan geçici sürtünme filmlerini üretmişlerdir [53].

Natarajan ve arkadaşları, otomobil sürtünme malzemesine karşı kullanılan alüminyum metal matris kompozit ile gri dökme demirin aşınma davranışı karşılaştırmışlardır. Fren pabuç balata malzemesi A356/25SiCp Al-MMC gibi diskler ve gri dökme demir malzemeleri kullanarak aşınma testleri uygulamışlardır. Al-MMC diski karıştırılmış döküm tekniği ile A356 alüminyum çeliği ve % 25 silikon karbür partikülleri kullanılarak imal etmişler ve istenen boyuta ayarlamışlardır. Yük ve kayma mesafesinde, Al-MMC'nin sürtünme ve aşınma davranışını, gri dökme demir ve yarı metalik fren pabuç balatasının farklı kayma hızlarını

araştırmışlardır. Optik mikroskop kullanarak MMC'nin aşınmış yüzeylerini ve alt yüzey bölgelerini, dökme demir ve balatayı analiz etmişlerdir. Yapılan araştırma sonucunda, aynı şartlar altında otomobil sürtünme malzemesine karşı koyma olurken, MMC'lerin gri dökme demirlere göre önemli derecede yüksek aşınma direncine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısında hem dökme demir, hem de Al-MMC malzemeleri için aşamalı redüksiyon gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda, bütün testlerde aynı şartlardaki kaymada Al-MMC'nin sürtünme katsayısının gri dökme demirinkinden % 25 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Silikon karbür partiküllü balatadaki pullanma nedeniyle MMC diskteki kayma esnasında, balata malzeme aşınmasının daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. MMC'de kayma olurken balata malzemesinde aşınma olukları oluştuğunu görmüşlerdir [54].

Mackin ve arkadaşlarının, fren disklerinde oluşan termal çatlaklar üzerine yaptığı çalışmada diskli frenlerde rutin frenlemenin, diski fazla miktarda termal gerilmeye maruz bıraktığı bu gerginlik sırasında frenlemenin sertleştiği belirtilmiştir. Yolcu araçlarının yavaşlatılmasında bir dakikalık zaman dilimi içerisinde 900 °C gibi yüksek sıcaklık oluştuğu bilinmektedir. Bu geniş sıcaklık seyrinde iki sonuç mümkündür. Bunlar ise yüzeyde çatlaklar oluşturan termal şok ve/veya fazla miktarda fren diskinde plastik deformasyon olarak görülmüştür. Termal şokun olmaması yüksek frenleme çevriminin az sayıda olmasına bağlı olduğu, disk frenlerde yarı çap boyunca ve disk kalınlığı boyunca makroskopik çatlak oluşması ile bulunmuştur. Diskteki başarısızlık, analiz içerisinde düşük frenleme çevrimlerindeki termomekanik zayıflama olarak görülmüştür. Yüksek frenlemenin yardımıyla fazla termal gerilmenin plastik deformasyon oluşturduğu analiz sonuçlarında belirtilmiştir [55].

Nakanishi ve arkadaşları, yakıt tüketiminin iyileştirilmesi için araç ağırlığının azaltılması yolunu seçmişlerdir. Alüminyum matrisli metal kompozit malzemelerden disk ve balata yaptıkları çalışmada geleneksel dökme demir yerine alüminyum kompozit kullanarak dökme demirin verdiği fren verimi ve aşınma direncine denk değerler veren disk ve balata geliştirilmiştir. Balata ve disk için kullanılan sert parçacıkların çap ve oranları ile özelliklerinin optimizasyonuna gidilmiştir [56].

Sallit ve arkadaşlarının, yaptığı çalışmada ise metal matrisli kompozit disk ile fren balatası sürtünme çifti olarak ele alınmıştır. Metal matrisler içerisine katılan sert parçacıklar sayesinde mekanik direnç ve yüksek derecede sertlik sağlanmıştır. Bu çalışmada fren diski yapımında iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlardan alüminyum matrisli kompozitte AS10G % 20 SiC ile güçlendirilmiştir. Bu kompozit özel işlemle saflaştırıldıktan sonra eritilen alüminyumun içerisine seramik tozunun karıştırılmasıyla üretilmiştir. Hiperetektik alaşım olan diskin yapımında ise AS18UNG içerisine elektroliz yoluyla yüksek oranda silikon katılmıştır.

Bu malzeme ikinci kez eritilerek fosfor ilavesi ile artırılmış ve bu işlemle silikon kristallerinin daha düzgün dağılımı sağlanmıştır.

Her bir fren diskinin özel fren balatasına ihtiyacı vardır. Kinetik enerjinin ısıya geçişi, tamamıyla bir balatanın rolü ile gerçekleşir. İyi bir balatanın özellikleri düşük sıkıştırılabilirlik, yüksek sıcaklığa karşı iyi direnç ve iyi aşınma direnci olmalıdır. Bu özellikleri sağlayacak balatanın bileşimine bağlayıcı, güçlendirme elemanı elyaflar, aşındırıcı elemanlar, dolgu maddeleri, yağlayıcılar ve yanma önleyicilerden oluşan maddeler katılmıştır. Pin-on-disk sistemindeki test cihazında yapılan deneylerde farklı analiz metotları kullanılmıştır. Transfer tabakasında çeşitli elemanların farklı büyüklüklerinin bir vucut oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu elemanların özellik ve dağılımları EDS analizi ve X ışınlarının yardımıyla yeni üretilen fren diski ile fren balatasının uyumu, aşınma seviyelerinin ölçülmesiyle belirlenmiştir. Bununla birlikte bu analizler sınırlı kalmıştır çünkü fren balatası kompozisyonundaki ana elementlerden olan organik bileşiklerin evrim geçirip geçirmediği, bir elastomere mi yoksa bir aramide mi dönüştüğü belirlenememiştir. Bunun için fren balatasındaki stabiliteyi kontrol ve organik bileşiklerin evrimleşmesini tanımlamak için IR analiz kontrolü yapılmıştır. Mekanik sürtünme testinin birçok parametresi düzenlenerek transfer tabakasının şekillenmesi için ideal şartlar belirlenmiştir. Analiz sonuçlarında Al_2SiO_5 , $BaSO_4$, $CaSO_4$, $CuCO_3$, Fe_2O_3 gibi kompleks oksitler transfer tabakasında bulunmuştur. Diskteki aşınma karşılaştırıldığında ise ısıtılma işlemin etkisiyle hiperetektik diskin daha düzgün ve daha az aşındığı belirtilmiştir [57].

3. BOR ELEMENTİ ve BİLEŞİKLERİ

Bor, kelime kökeni olarak Arapça buraq/baurach ve Farsça'da burah kelimelerinden geçen bir elementtir. Periyodik sistemin üçüncü grubun başında bulunan ve atom numarası 5 olan bor element, kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur. Sembolü (B) olup, atom ağırlığı 10,81, yoğunluğu 2,84 gr/cm³, ergime noktası 2300 °C ve kaynama noktası 2550 °C olan, metalle ametal arası yarı iletken özelliklere sahip bir elementtir. Genellikle doğada tek başına değil, başka elementlerle bileşikler halinde bulunur. Tabiatta yaklaşık 230 çeşit bor minerali vardır. Oksijenle bağ yapmaya yatkın olması sebebiyle pek çok değişik bor-oksijen bileşimi bulunmaktadır. Bor-oksijen bileşimlerinin genel adı borattır. Bor elementinin amorf bir toz halindeki rengi koyu kahverengidir. Ancak çok gevrek ve sert yapıli monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı kahverengidir. Elmaştan sonra en sert elementtir [58].

Tablo 3.1 Bor Elementinin fiziksel özellikleri [59]

Özellikler	
Atom ağırlığı	10,811
Ergime noktası	2290+20°C
Kaynama noktası	2550°C
Isıl genleşme katsayısı (25-1050°C arası)	5x10 ⁻⁷
Knop sertliği	2100-2580 HK
Mohs sertliği	11
Vickers sertliği	5000 HV

Yeryüzünün 51. yaygın elementi olan bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği genelde ortalama 10-20 ppm, deniz suyunda 0,5-9,6 ppm, tatlı sularda ise 0,001-1,5 ppm aralığındadır. Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijenle bağlanmış bileşikleri olarak daha çok Türkiye ve Amerika'nın kurak volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Tablo 3.1'de bor elementinin fiziksel özellikleri verilmiştir. Borun, karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla olan bir elementtir. Bor suda çözülen, renksiz ve billursuz bir elementtir [59].

Bor elmaştan sonra ametaller arasında elektropozitifliği en yüksek olan elementtir. Oda sıcaklığında elektrik iletkenliği zayıftır fakat yüksek sıcaklıklarda çok yüksektir. Bor'un nükleon başına bağlama enerjisi mega elektron volt cinsinden 6,9'dur. Bor atomlarının yer kabuğunda

çok fazla bulunmamasının yararı özellikle canlı hayat için çok önemli elementler olan karbon, azot ve oksijenin bolluk oranlarından daha az olması çok faydalı olmaktadır şöyle ki nükleon başına bağlama enerjisi düşük olan atomlar hidrojen ve helyumla daha kolay birleşme reaksiyonlarına girerler. Bor atom çekirdekleri yıldız kütleleri içinde bu tür reaksiyonlarla C, N ve O sentezlerine yol açarlar. Bor 2.33 gr/cm³ yoğunluklu kristal ve 2.3 gr/cm³ yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur [59].

Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği değişik özellikler, endüstride pek çok çeşit bor bileşiğinin kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır, ancak, farklı olarak saf bor, karbon gibi elektrik iletkenidir. Bor hidratlar silikon ve karbon bileşiklerine benzer özellikler gösterir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzemektedir ve neredeyse elmas kadar serttir. Endüstriyel açıdan önemli bor bileşikleri arasında boraks (tinkal, sodyum kökenli bor bileşikleri), kolemanit (kalsiyum kökenli bor bileşikleri), üleksit (sodyum-kalsiyum kökenli bor bileşikleri) ana gruplaması altında kernit, probertit, szyabelit, datolit, sasolit, boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, susuz boraks, borik asit, sodyum per borat, susuz borik asit, hidroborasit sayılabilir. Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki B₂O₃ (bor oksit) ile ölçülmekte, yüksek oranda B₂O₃ bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir [59].

Bor madenleri, topraktan çıkarıldıktan sonra kırma, eleme, yıkama ve öğütme işlemlerine müteakip, ilgili sanayilerin kullanımına hazır hale getirilmektedir. Bu mineraller arasında en önemlileri tinkal ve kolemanittir. Üleksit, kernit, probertit ve szyabelit de ticari açıdan önemlidir. Madencilik faaliyetleri sonucunda genellikle zenginleştirilmiş üleksit, tinkal, kolemanit, boraks veya borik asit gibi mineraller elde edilir.

Bor, yanıcı fakat tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı, yanma sonucunda kolaylıkla aktarılacak katı ürün vermesi ve çevreyi kirletecek emisyon açığa çıkarmaması gibi bir özelliğe sahip olduğundan katı yakıt hücresi olarak ta kullanılmaktadır. Bor mineralleri yapılarında bulunan Ca, Na ve Mg elementlerine göre sınıflandırılırlar. Na kökenli olanlara tinkal (boraks), Ca kökenli olanlara kolemanit ve Na-Ca kökenli olanlara üleksit denir [59].

Kimyasal olarak ametal olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranışlar göstermekte, sadece yüksek konsantrasyonlu nitrik asit ile sıcak ortamda borik asite dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek bor oksit (B₂O₃), aynı koşullarda nitrojen ile bor nitrat (BN) ve titanyum diyorit (TiB₂) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir.

Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken, kristalin bor kolay reaksiyona girmez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer

ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlama şeklinde olabilir ve ana ürün olarak borik asit oluşur. Bor cevherinin yapısındaki kil bileşiklerinden arındırılması için uygulanan zenginleştirme işlemi ile elde edilen ürün, ham olarak tanımlanmaktadır. Bor mineralleri piyasaya ham bor ve/veya öğütülmüş ham bor olarak da sunulmakta, fakat genel olarak rafine bor bileşiklerine dönüştürülerek kullanılabilir. Bor bileşikleri binlerce yıldır bilinmesine rağmen elementer borun keşfi 1808 yılında Sir Humphry ve Gay-Lussac tarafından keşfedilmiştir [59].

Dünyadaki yıllık Bor Oksit (B_2O_3) tüketiminin 1,5 milyon ton olduğu dikkate alındığında, Türkiye bor rezervleri, dünya tüketimini 567 yıl boyunca karşılayabilecek düzeydedir. Aşağıdaki Tablo 3.2’de dünya bor rezervinin ülkelere göre dağılımı verilmektedir.

Tablo 3.2 Dünya bor rezervi [59]

Ülke	Görünür Rezerv (Ton)	Muhtemel Rezerv (Ton)	TOPLAM	Toplam Rezerv İçindeki Payı (%)
Türkiye	227. 000	624. 000	851. 000	72,2
A. B. D	40. 000	40. 000	80. 000	6,8
Rusya	40. 000	60. 000	100. 000	8,5
Çin	27. 000	9. 000	36. 000	3,1
Arjantin	2. 000	7. 000	9. 000	0,8
Bolivya	4. 000	15. 000	19. 000	1,6
Şili	8. 000	33. 000	41. 000	3,5
Peru	4. 000	18. 000	22. 000	1,9
Kazakistan	14. 000	1. 000	15. 000	1,3
Sırbistan	3. 000	0	3. 000	0,3
TOPLAM	369. 000	807. 000	1. 176. 000	100

3.1. Ham Bor Ürünleri

Dünyada üretilen bor cevherlerinin hemen hemen tamamı bir zenginleştirme işleminden sonra, ya parça yada öğütülmüş konsantre halinde pazarlanır ve kullanılır. Bu tür ürünler ham bor olarak tanımlanabilmektedir. Ham bor ürünlerinin (konsantreler) mineral yapısı ve üretildikleri yerler Tablo 3.3’de verilmiştir.

Ham bor ürünleri % 90 dolayında borik asit, boraks penta ve dekahidrat gibi rafine bor ürünleri üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, çeşitli amaçlara yönelik cam elyafı (fiberglas), borosilikat cam, nükleer uygulamalar ve metalürjide kullanılmaktadır. Özellikle,

borlu çelik yapımında kolemanit, çelik üretiminde fluorit yerine üleksit ve kolemanit tercih edilmeye başlanmıştır.

Tablo 3.3 Ham bor ürünleri [59]

Ürün adı	Formülü	Bulunduğu yer
Tinkal konsantre	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Türkiye, ABD, Arjantin
Üleksit konsantre	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Türkiye, ABD, Arjantin
Kolemanit konsantre Öğütülmüş kolemanit	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Türkiye, ABD, Arjantin, Şili
Hidroborasit konsantre	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Türkiye, Arjantin
Szaybelit konsantre	$\text{MgBO}_2(\text{OH})$	Kazakistan, Çin

Türkiye tinkal, üleksit ve kolemanit konsantreleri üretilip, dünyaya satmaktadır. Türkiye bu satışlar ile dünya konsantre satışlarının yaklaşık % 80'ini karşılamaktadır. Diğer bir ifadeyle, dünya üleksit ve kolemanit konsantresi talebinin hemen hemen tamamını Türkiye karşılamaktadır [59].

3.1.1 Tinkal (Boraks)

Kimyasal bileşimi $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ olan boraks monoklinal sistemde kristallenir. Sertliği 2-2,5 arasında değişir. Özgül ağırlığı 1,7'dir. bor içeriği % 11,3, B_2O_3 içeriği % 36,5'tir. Öz biçimli tek kristaller veya kristal kümeleri şeklinde çamur içinde bulunabilir fakat, yüksek tenörlü cevher kütlelerinde, özgün kristal yüzeylerini görme olasılığı çok azdır. Boraks taze kırılmış yüzeylerde saydamdır. Fakat kısa zamanda 5 molekül suyunu kaybederek çok ince taneli, beyaz görünümlü tinkalkonite dönüşür. Suda kolaylıkla çözülür ve çözünürlüğü çözeltinin sıcaklığının artmasıyla artar [59].

Boraks, Kırka yatağında en bol bulunan borat mineralidir ve bu nedenle Kırka genellikle boraks yatağı olarak adlandırılmaktadır. Boraks, Türkiye'de yalnızca Kırka yatağında gözlenmiştir. Taze, saf boraks renksiz ve saydamdır. Ancak ince taneli ve kil ile ara katmanlanmış olduğu bazı yerlerde, yabancı materyallerin ince bir şekilde birleşmesi nedeniyle, boraks açık pembe, sarımsı turuncu ve gri renklerde dir. Boraks, genellikle, 1 mm-10mm boyutlarındaki yarı öz biçimli ve biçimsiz kristaller halinde bulunmaktadır [59].

Yarı öz biçimli boraks kristallerinin büyük kütleleri genellikle, gömülmeden sonra meydana gelen oyuklar içinde bulunmaktadır. Bazen, boraks kil matrisinde saçılmış olan bireysel kristaller ve boraks-kil bileşimi halinde gözlenmektedir.

Boraks, başlıca kil ile ara katmanlanmış, tinkankonit ve lifli ya da “pamuk yumağı” şekilli üleksit ile bulunur ve hemen hemen tek mineralli olarak gözlenmektedir. Birçok yerlerde boraks kristallerinin yüzlek verdiği kısımların üzerinde tinkalkonit ince bir film tabaka oluşturmaktadır ve boraks, boraks–kil ara yüzeylerinde üleksit’e dönüşüm göstermektedir.

3.1.2 Üleksit

Kimyasal bileşimi $\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ olan üleksit monoklinal sistemde kristallenir. Sertliği 1, özgül ağırlığı 1.65’tir. Bor içeriği % 13.8, B_2O_3 içeriği % 42.9’dur. Tek ve büyük kristaller şeklinde bulunmaz. Daha çok ipek gibi ince kılcal iğnecik kümelerinden oluşmuş beyaz yumrular şeklinde bulunur. Bu görünümünden dolayı “pamuk yumağı” veya “pamuk gülü” olarak adlandırılır [59].

Üleksit, yataklarda bulunan Na-Ca serisinin en önemli mineralidir. Üleksit, Emet yataklarında üç düzeyde ve her zaman masif ve karnabahar gibi nodüller halinde bulunmaktadır. Kırka yatağında lifli, konik, gül şeklinde (rosette), “pamuk kozası” (cottonball) ve sütun şeklinde gözlenmektedir. Bazen, masif ve karnabahar şeklindeki nodüllerinin tepesinde çok ince lifli üleksit kristallerinin büyümesi gözlenmektedir. Başlıca, 1-5 cm uzunluğunda bağımsız yönelmiş kristallerden oluşan karnabahar şeklindeki nodüller birkaç metre kalınlığa kadar erişen bağımsız düzeyler oluşturmaktadır [59].

Üleksit, Emet yataklarında genellikle kolemanit ve hidroborasit ile birlikte bulunmaktadır; ancak kolemanit veya diğer minerallerden herhangi birisine dönüştüğü gözlenmiştir. Genellikle çok yumuşak görünümlüdür. Üleksitin en saf formu beyazdır, fakat kil içinde büyüyen düğümçük nedeniyle büyük bir kısmı gri tondadır. Böylece, Emet yataklarında kolemanit ve meyerhofferit gibi, üleksit nodüllere de tortul dışında değil tortul içinde gelişiyor görünmektedir [60,61]

3.1.3 Kolemanit

Kimyasal bileşimi $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ olan kolemanit monoklinal sistemde kristallenir. Sertliği 4-4.5, özgül ağırlığı 2,42’dir. Bor içeriği % 15.7, B_2O_3 içeriği % 50.8’dir. Başka bor minerallerinin egemen olduğu yataklarda olduğu kadar, kolemanit yataklarında da killi içinde ve cevher boşluklarında iri, parlak ve saydam kristal kümeleri şeklinde bulunur. Yumrular şeklinde cevher oluşturduğunda, yumrular, çekirdekten dışa doğru yayılan ışınal kristallerden oluşabilir veya düzensiz mineral kümeleri şeklinde görülebilir. Suda çok yavaş, fakat sıcak HCl içinde oldukça hızlı çözülür, soğuyan çözeltide bor, borik asit olarak ayrılır. Kolemanit ısıtıldığında suyunu kaybederek toz şekline dönüşür. Bu da kolemanitin, ısıtılıp elenmesi ile içindeki ısıdan etkilenmeyen yabancı maddelerden (özellikle killerden) temizlenmesine

yardımcı olur. Klinopinakoit yüzeyine göre dilinimli, renksiz, cam parıltılıdır. Ekonomi bakımından kısmen önemli olan yatağı California'da Death Valley, Iryoeo idi, bugün ise Anadolu'da Balıkesir, Kütahya, Eskişehir ve Bursa illerinde birçok yerde bulunmaktadır. Burada neojen yaşlı kalker, marn, kil ve tuf tabakaları içerisinde çoğunlukla 2-3 m kalınlığındaki damarlar şeklinde killerle karışık olarak bulunur [59].

3.2. Rafine Bor Ürünleri

Rafine bor ürünlerinin temel kullanım alanları olarak, cam ve cam elyafı, sabun ve deterjan, seramik, yangın geciktirici gereçler, tarım, nükleer uygulamalar, metalürji, ilaç ve kozmetik, elektronik, bilgisayar sanayi dalları sayılabilir.

Tablo 3.4 Ticari boyutta dünyada üretilen rafine bor ürünleri [59]

Ürün adı	Formülü	B ₂ O ₃ (%)
Boraks dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,5
Boraks penhidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	47,8
Susuz boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,3
Borik asit	H ₃ BO ₃	56,5
Susuz borik asit	B ₂ O ₃	100,0
Sodyum perborat	NaBO ₃ .4H ₂ O	22,0
Sodyum metaborat	Na ₂ B ₂ O ₄ .4H ₂ O	64,2
Sodyum oksiborat	Na ₂ B ₈ O ₁₃	81,8

Rafine bor ürünleri borun en çok tüketilen türevlerini oluşturmaktadır. Rafine boraks ürünleri (Boraks penta ve dekahidrat, susuz boraks) üretim tesislerinin toplam dünya kurulu kapasitesi 1.600.000 ton dolayında olup, bunun 452.000 tonu Türkiye'de bulunmaktadır. Türkiye'nin boraks penta ve dekahidrat üretimi ise yıllık 135.000 ton B₂O₃düzeyindedir; bu üretim düzeyi dünya üretiminin %23'ünü oluşturmaktadır. Dünya borik asit üretim kapasitesi ise 800.000 ton dolayındadır. Türkiye'nin borik asit üretimi 30.000 ton B₂O₃ dolayında olup, dünya üretiminin, ancak, %11'ini oluşturmaktadır [59].

Tablo 3.5 Türkiye'nin rafine bor ürünleri kurulu kapasiteleri [59-62]

İşletme	Ürün	Ton/yıl
Kırka bor işl. Müd.	Boraks penhidrat	320.000
	Boraks dekahidrat	17.000
	Susuz boraks	60.000
Bandırma Bor ve Asit Fab. İşl. Müd.	Boraks deka+penhidrat	5.000
	Borik asit	85.000
	Sodyum perborat	20.000

Tablo 3.6 Türkiye'deki bor madeni ocakları ve yöreleri [59-62]

Şehir	İlçe-Yöre	Maden cinsi
Balıkesir	Susurluk Bigadiç Sındırgı Küçükler	Kolemanit
		Kolemanit- Üleksit
		Üleksit
		Kolemanit- Üleksit
Kütahya	Emet	Kolemanit
Bursa	Kestelek	Kolemanit
Eskişehir	Kırka	Tinkal-Borax-Borikasıit

3.2.1. Boraks Dekahidrat

Teknolojik olarak alkali metal boratların en önemlilerinden biri, disodyum tetraborat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) olarak da adlandırılan boraks dekahidrattır ve tabiatta tinkal minerali olarak bulunur. Molekül ağırlığı 381,4 gr/mol, özgül ağırlığı 1,71 (20 °C), oluşum ısı 1497,2 kcal/mol'dür. Renksiz, monoklinik kristal yapısında bir tuzdur. Sulu çözeltileri konsantrasyondan bağımsız olarak hafif alkali reaksiyon gösterir (pH=9.2) doygun boraks çözeltisi 105 °C'de kaynar [59].

3.2.2. Boraks Penhidrat

Disodyum tetraborat penhidratın ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) molekül ağırlığı 291,35gr/mol, özgül ağırlığı 1,88, oluşum ısı 1143,5 kcal/mol'dür. Mineral adı tinkalkonit olan pentahidrat

boraksın dehidrasyonundan oluşan birikintiler halinde bulunur. Doymuş boraks çözeltisinin 60°C'nin üzerinde kristallenmesi ile oluşur [59].

3.2.3. Susuz Boraks

Disodyum tetraborat ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) molekül ağırlığı 201,27 gr/mol, özgül ağırlığı 2,3, oluşum ısısı 783,2 kcal/mol olan renksiz ve çok sert bir kristaldir. Kolay öğütülebilir kristalin bir kütle olarak bulunur. Ergime derecesi 741°C'dir. Boraks hidratin 600-700 °C'de dehidrasyonu ile stabil yapıda susuz boraks üretimi sağlanabilmektedir [59].

3.2.4. Borik Asit

Borik asit (H_3BO_3), molekül ağırlığı 61,83 gr/mol, B_2O_3 içeriği %56,3, ergime noktası 169°C, özgül ağırlığı 1,44, oluşum ısısı 1089 kJ/mol, çözünme ısısı 22,2 kJ/mol olan kristal yapıli bir maddedir. Oda sıcaklığında sudaki çözünürlüğü az olmasına rağmen, sıcaklık yükseldikçe çözünürlüğü de önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle sanayide borik asidi kristallendirmek için genellikle doymuş çözeltiyi 80°C'den 40°C'ye soğutmak yeterli olmaktadır. Bor minerallerinden geniş ölçüde üretilen borik asit başlıca; cam, seramik ve cam yünü sanayinde kullanılmakta olup, kullanım alanları çok çeşitlidir. Borik asit, bor minerallerinin genel olarak sülfürik asit ile asitlendirilmesi ile elde edilmektedir. Türkiye'de borik asit üretimi başlıca; Bandırma'daki Etibor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları İşletmeleri tarafından yapılmaktadır [62].

3.2.5. Susuz Borik Asit (Bor Oksit)

Ticari bor oksit, B_2O_3 'tür ve genellikle %1 su içerir. Genellikle borik asitten uygun sıcaklıkta su kaybettirilerek elde edilir. Renksiz cam görünüşlüdür. Oda sıcaklığında higroskopiktir. Bor oksit ve susuz boraks cam sanayisinde çok kullanılır. Yüksek sıcaklıkta borik asitten su buharlaşırken B_2O_3 kaybı artmaktadır. Cam üretim projesinde, borik asit yerine, bor oksit kullanılması enerji ve hammadde avantajı sağlamaktadır. Bor oksit porselen sırlarının hazırlanmasında, çeşitli camlarda, ergitme işlemlerinde, seramik kaplamalarda kullanılır. Ayrıca pek çok organik reaksiyonun katalizörüdür [62].

3.2.6. Sodyum Perborat

Sodyum perborat ($\text{NaBO}_2\text{H}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$) genellikle tetrahidrat yapısındadır. Perborat üretiminde %33 B_2O_3 içeren boraks minerali kullanılmaktadır. Sodyum perborat, Bandırma'daki Etibor A.Ş. Boraks ve Asit Fabrikaları işletmeleri tarafından üretilmektedir.

Sodyum perborat, ağartıcı etkisi dolayısıyla yaygın olarak sabun ve deterjan sanayisinde kullanılmaktadır. Ayrıca kozmetik maddelerin yapımında, tekstil endüstrisinde, mum, reçine, tutkal ve sünger sanayisinde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [62].

3.2.7. Sodyum Metaborat

Tinkal çözeltisinin sodyum hidroksit ile belirli bir stokiyometrik oranlarda reaksiyonu sonucu oluşan bor bileşiğine Sodyum Metaborat ($\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$) adı verilir. Yapıştırıcı, deterjan, zirai ilaçlama, fotoğrafçılık, tekstil alanlarında kullanılır.

Sodyum metaborat, 100 atm hidrojen basıncında alüminyum veya silis kullanılarak sodyum borhidrüre indirgenebilmektedir [62].

3.3. Uç Ürünler

Uç ürünler daha önce belirtilen ham rafine ürünlerden üretilirler. En önemli özelliklerini, ileri teknoloji gerektiren yöntemler ile üretilmeleri oluşturmaktadır. Ham rafine bor ürünlerine göre üretilen uç ürün sayısı daha fazladır. Burada, nispeten, daha büyük oranda üretilip, tüketilen uç ürünlere yer verilmiştir. Belli başlı uç ürünler arasında elementer bor, bor karbür, bor nitrür ve bor alaşımları sayılabilir.

Elementer bor, günümüzde askeri faaliyetler sırasında, aydınlatma amacıyla kullanılmaktadır. Bor karbür, uç ürünler içinde en çok kullanılanlardan biridir. Bu malzemenin en önemli özelliklerinden biri, elmastan sonra ikinci en yüksek sertliğe sahip olmasıdır. Yüksek sıcaklığa dayanıklıdır ve nötron absorpsiyon yeteneği vardır. Bu özellikleri sayesinde askeri araçların zırhlanmasında ve nükleer reaktörlerde kullanılır.

Bor nitrür, hegzagonal ve kübik sistemde kristalleşen bir bileşiktir. Hegzagonal bor nitrür, beyaz grafit olarak da tanımlanır. Oksidasyon direnci olan ve yüksek ısıya dayanan bir bor türüdür. Toz halindeki hegzagonal bor nitrür yüksek sıcaklıklarda yağlama malzemesi olarak geniş bir alanda kullanılmaktadır. Kübik bor nitrür ise elmas sertliğinde bir üründür. Suni elmas diye tanımlanabilmektedir. 1320 °C'ye kadar özelliklerini korur. Çeşitli tür aşındırıcılarda elmasın yerini almaya başlamıştır [62].

Ferrobör çeliği bor ile alaşımlandırma ve trafo çekirdeklerinde amorf malzeme olarak kullanılması en önemli kullanım alanını oluşturmaktadır. Nikelli ve kobaltlı bor alaşımları da yüksek frekanslı trafo çekirdeklerinde kullanılmaktadır. Bu alaşımlardan üretilen teller EKG gibi cihazların sensörlerinin üretiminde tercih edilmektedir. Sıcak preste üretilen TiB_2 , BN, B_4C kompozitleri başka malzemelerin TiBCN kompozitiyle kaplanmasında kullanılmaktadır [62].

3.4. Bor Bileşikleri

Bor bileşikleri günümüzde yaygın olarak yeni kullanım alanları bulmaktadır. Bu bileşikler yüzyıla damgasını vuracak değerdedir ve en büyük hammadde kaynağına sahip olan Türkiye için çok büyük önem arz etmektedir. Türkiye'nin refahı için bu kaynakların rasyonel olarak değerlendirilmesi geleceğimiz için çok önemlidir.

Yüksek Teknoloji Seramik ve Kompozitleri Araştırma Merkezi'nde (YTSKAM) üretim teknolojileri geliştiren başlıca bor bileşikleri ve alaşımları:

- Amorf bor
- Kristalin bor
- Bor karbür
- Hekzagonal ve kübik bor nitrür
- Bor alaşımları (ferro bor, nikel bor, kobalt bor)

3.4.1. Bor karbür

Geçtiğimiz on yıl içerisinde BHABHA atom araştırma merkezi Hindistan malzeme gurup başkanı C.K.Gupta'nın önderliğinde bor karbür üretimi teknolojilerinin geliştirilmesi ve pilot tesisin kurulması amacı ile yoğun çalışmalar yapılmıştır. Borun en stratejik ve ara hammaddesi niteliğinde olan bu malzemenin en önemli özellikleri, elmaştan sonra ikinci sertliğe sahip olması, nötron absorpsiyon kabiliyetidir. Yüksek sıcaklığa dayanımı diğer bor bileşiklerinin sentezlenmesinde ara hammadde özelliğine sahip olmasıdır. Örneğin TiB_2 üretebilmek için çok yüksek sıcaklıkta TiO_2 'in B_4C ile reaksiyona sokulması gerekmektedir.

Bor karbürün fiziksel özellikleri;

- Yoğunluğu: 2.51 g/cm^3
- Kristal yapısı: Rombohedral
- Ergime noktası: yaklaşık 2450°C
- Çok yüksek sertliği: Elmas ve cBN'den sonra üçüncü sıradadır.
- Temel genleşme katsayısı: $5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Kimyasal ataklara karşı dirençlidir.
- Bor karbür çok yüksek nötron absorpsiyon kabiliyetine sahiptir.
- Elektrik iletkenliği: 25°C , $0.1\text{-}10 \text{ ohm cm}$
- Maksimum kullanma sıcaklığı (oksitleyici şartlarda): 600°C
- Isı iletim katsayısı: $33.5 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ 25°C

Kullanım alanları;

- Refrakter endüstrisinde antioksidan olarak

- Nükleer reaktörlerde kontrol çubuklarında, radyasyondan koruyucu duvarlarında
- Lepleme sanayiinde aşındırıcı olarak
- Tel haddelerinde kılavuz olarak
- Ekstrüzyon kalıplarında
- Metal matrisli kompozitlerde, düşük yoğunluklu sermetlerde, alüminyum matrisli kompozitlerde
- Katı füze yakıtlarında
- Yüzey borlama reaktiflerinde
- Diğer borürlerin (TiB₂, SiB₂, MoB₂ v.b.)

ESK-Almanya ve Mudanjiang-Çin başlıca üreticileridir. Yaygın olarak kullanım alanı ve ticareti her yıl artan bu kadar önemli ve stratejik bir malzemeyi ne yazık ki Türkiye üretmemektedir. YTSKAM, İ.T.Ü. KOSGEM teknoloji geliştirme merkezi ile beraber bor karbürün Türkiye’de üretimi ve ticarileştirilmesi üzerinde çalışmaktadır [59].

Ark ocağında veya rezistanslı fırınlarda borik asidin veya B₂O₃’ün karbonla birlikte reaksiyona sokularak elde edilmektedir. Teorik olarak enerji gereksinimi,

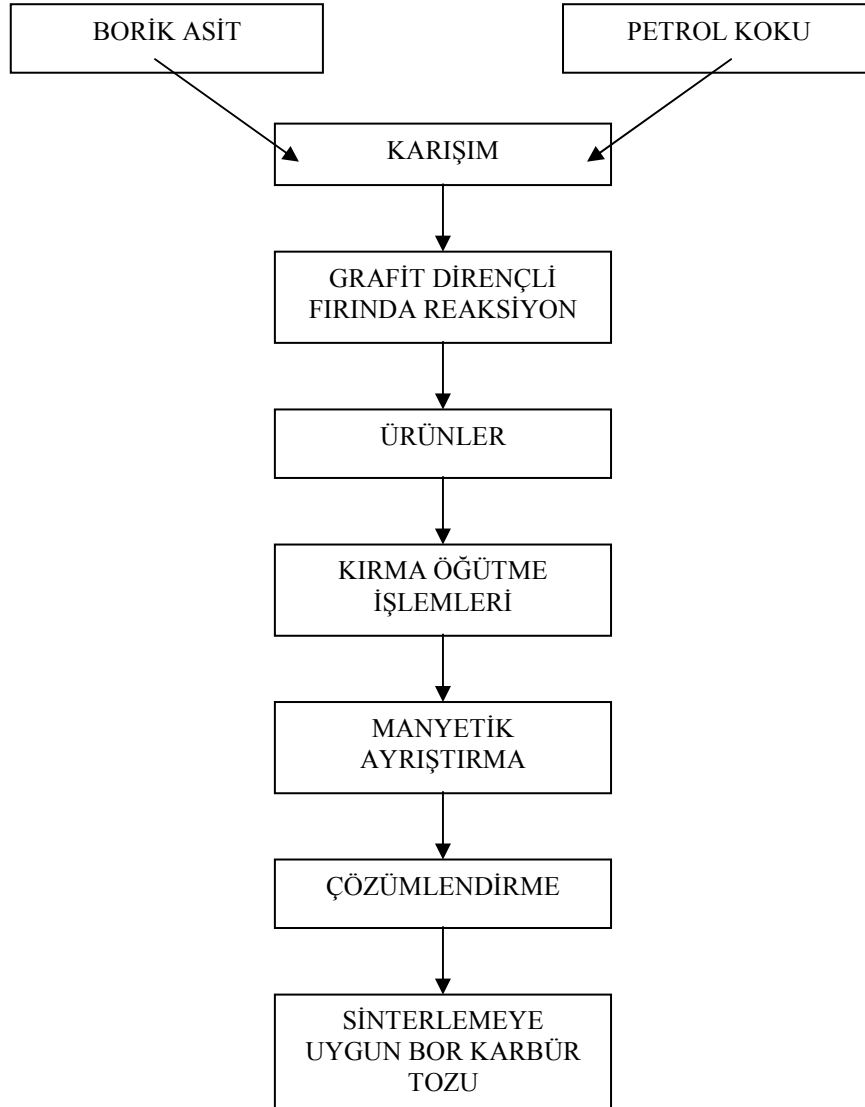
$$\Delta H_{25^{\circ}\text{C}} = 1812 \text{ KJ/mol veya } 9,1 \text{ kWh/kg B}_4\text{C}$$

Borik asitten üretim için, borik asidin parçalanma enerjisi bu değere ilave edilmelidir. Görüleceği gibi bor karbür üretiminde enerji önemli bir parametredir. Alüminyum üretiminde teorik olarak 6,53 kWh/kg Al enerji kullanıldığı göz önüne alınırsa bor karbürde enerji tüketimi alüminyuma göre 1,4 katı daha fazladır. Bor karbür; ark ocağı veya grafit dirençli fırınlarda üretilmektedir. Borik asitten üretim sırasında CO ile birlikte H₂O gaz çıkışı sebebi ile patlayıcı özellikte su gazı oluşumu söz konusu olduğu için üretimde direnç tipi fırınlar tercih edilmektedir. Borik asit bir karıştırıcıda petrol koku ile beraber iyice karıştırılarak grafit direnç fırınına beslenir [59].

Kontrollü elektriksel parametrelerle ısıtma hızı denetim altında tutulur. Başlangıçta borik asidin kristal suyunun uçması sağlanır. Bu aşamada minimum bor kaybının olmasına dikkat edilir. Kristal suyunun uçmasını takiben hızlıca fırın ısıtılır. Reaksiyon sıcaklığına çıkılarak bor karbür oluşturulur. Verilen reaksiyon süresi sonunda fırın soğumaya terk edilir. Fırın soğuduktan sonra şarj havalı kırıclarla kırılarak dışarı alınır. Sert fırın çekirdeği elle yumuşak olan üst katmanlardan dikkatlice ayrılır. Sert bor karbür bölgeleri parlak parça özelliğiyle şarjın diğer kısımlarından gözle ayırt edilebilir.

Bor karbür fırın direncinin etrafındaki 2300 °C sıcaklığındaki fırın grafit direncinin etrafında bir çekirdek ergimiş faz olarak teşekkül etmektedir. Çekirdek etrafında kısmen reaksiyona girmiş karbonla karışık kalitesi düşük ikinci fazlarda mevcuttur. Bu kısım ikinci şarja ilave edilerek kullanılmaktadır. Ergimiş parça bor karbür çok sert bir malzeme olduğu için

öğütme ortamından kirliliğin bulaşmaması için otojen öğütme tercih edilir. Bununla beraber demir bilyalı ortamlarda da öğütme yapılabilir. Bu durumda öğütülmüş tozun manyetik ayırma ve kimyasal arındırma işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Üretilen toz malzeme tane boyutuna göre sınıflandırılır [59].



Şekil.3.1 Bor karbür üretim şeması

3.4.2. Amorf Bor

Günümüzde askeri amaçlı olarak karakteristik yeşil renkli hedef aydınlatma malzemesi ve roketlerde ateşleyici olarak kullanılmaktadır. Amorf bor, bor karbürün KBF_4 ile beraber ergimiş tuz rafinasyon elektrolizi ile elde edilmektedir [59].

3.4.3. Kristalin Bor

Wolfram filament üzerinde bor triklorürün hidrojen gazı altında ayrışması ile üretilmektedir. Oda sıcaklığında yarı iletken bir malzemedir. Yüksek sıcaklıkta metaller gibi elektriği iyi iletir. 2180 °C’de ergir, 3650 °C’de kaynar. Metal borürlerin hazırlanmasında kullanılır. Yarı iletkenlerde dopant element olarak ve lazer teknolojisinde kullanılmaktadır [62].

3.4.4. Bornitrür

Hekzagonal ve kübik polimorfu olan bir bor bileşiğidir. Hekzagonal bor nitrür YTSKAM laboratuvarlarında pilot çapta borik asitten ve/veya bor karbürden yüksek sıcaklıkta sentezlenmesi ile üretilmektedir.

Bornitrür’ün fiziksel özellikleri;

- Yoğunluğu: 0,4 g/cm³
- Kristal yapısı: Hekzagonal
- Ergime noktası: Yaklaşık 2450 °C
- Sertliği: Yumuşak, beyaz granit olarak anılır
- Termal genleşme katsayısı: $5 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$
- Kimyasal ataklara karşı dirençli

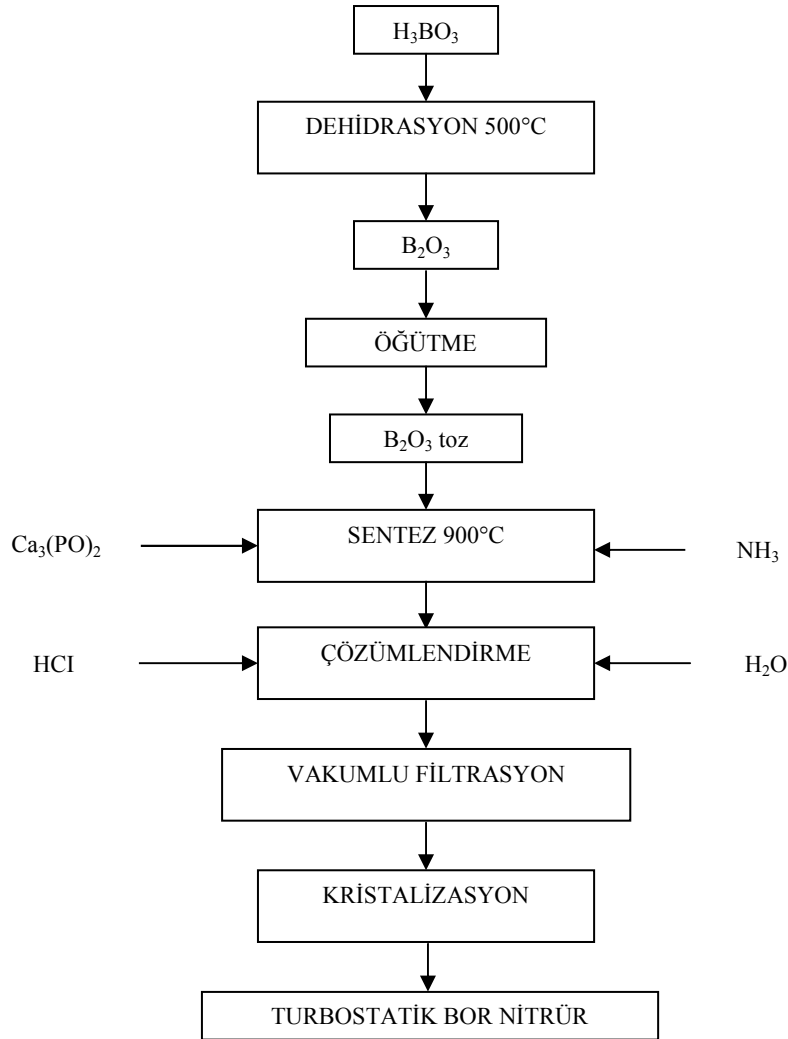
Kullanım alanları;

Hekzagonal bor nitrür; günümüzde beyaz grafit adı ile anılmaktadır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı oksidasyon direnci yüksek bir malzemedir. Toz olarak üretilen hekzagonal bor nitrür yüksek sıcaklıkta yağlama malzemesi olarak çok geniş kullanım alanı bulabilmektedir. Diğer bazı silikat tozları ve ilavelerle süspansiyon halinde sprey olarak satılmaktadır. Kullanılacak malzeme yüzeyine sıkılarak uygulanmaktadır. Örneğin kalıpların yağlanmasında çok yaygın olarak kullanılır. Yüksek sıcaklık ve basınçta presleme ile üretilen takozlar kolayca işlenebilir. Cam, metalürji sektöründe nozul olarak kullanılmaktadır [59].

Kübikbornitrür; Elmas sertliğinde mükemmel bir malzemedir. Suni elmas olarak tanınmaktadır. Hekzagonal bornitrürün yüksek basınç ve sıcaklıkta preslenmesi ile üretilmektedir. 1320 °C’ye kadar özelliklerini korur. Bütün aşındırıcılarda elmasın yerini almaktadır. İlerde bu malzemenin hidrojen v.b. gazları taşıyıcı ortam olarak kullanılması gündemdedir [59].

Zımparalama ve cilalama işlemlerinde, sondaj başlıklarının dişlilerinde, ve mermer sanayisinde, metallerin işlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yüzyıl içersinde kesici takım ucu olarak kullanılan WC-Co sert metallerin yerini bornitrür kompozitleri alacaktır.

Hegzagonal bor nitrür üretim şeması aşağıda çizilmiştir. H_3BO_3 girişiyle Turbostatik Bor Nitrür çıkışı arasındaki işlemler Şekil 3.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.2. Turbostatik bor nitrür üretim şeması

3.4.5 Bor Alaşımları

Borun geçiş elementleri olan demir, nikel ve kobalt ile yapmış olduğu alaşımlardır. Bu alaşımlar (Ferrobor, nikel-bor, kobalt-bor) çeliğin borlanması, bor esaslı amorf malzeme üretiminde ana malzeme niteliğindedir.

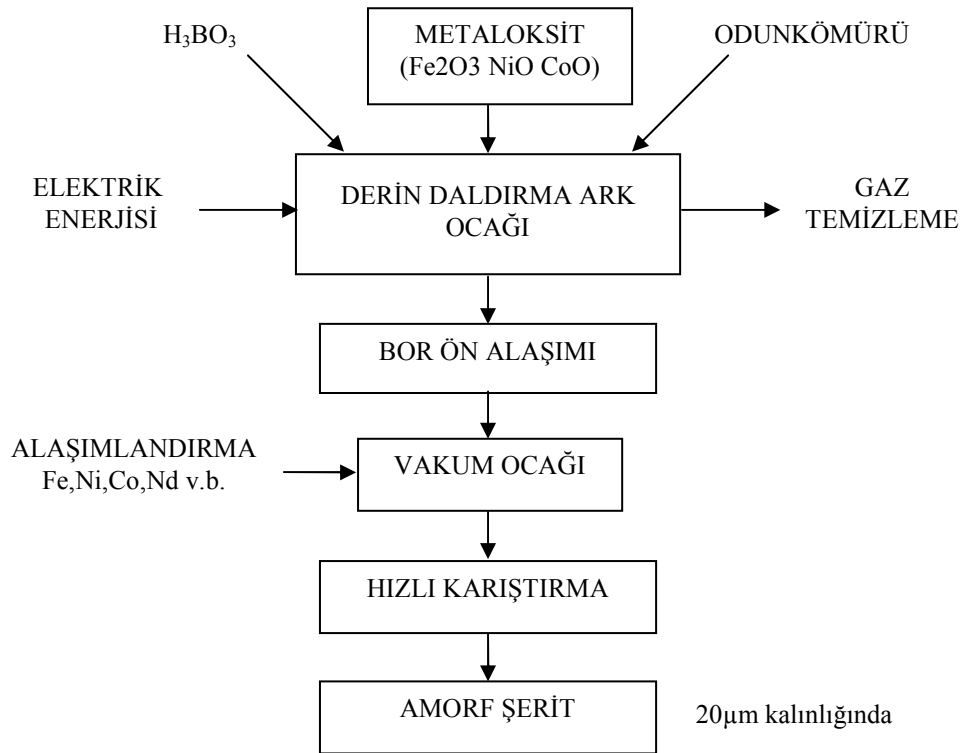
Ferrobor çeliğe bor alaşımlandırma amacı ile verilmektedir. En önemli kullanım alanı, trafo çekirdeklerinde amorf malzeme olarak kullanılmasıdır. Borlu amorf çekirdekler, olağanüstü düşük çekirdek kaybına sahip malzemelerdir. Bu malzemelerin kobaltlı, nikelli (bor alaşımı olarak üretilebilir) cinsleri özellikle yüksek frekanslı trafo çekirdeklerinde vazgeçilmez

bir malzemedir. Daha üstün manyetik özellikte olanları nano boyutlarında kristalli cinsleri neodimyum, kullanılmaya başlamıştır.

Bu malzemedan ayrıca saç kılı inceliğindeki amorf tellerden EKG v.b. cihazlarının sensörleri imal edilmektedir.

Nikel-bor alaşımlarından üretilen toz malzeme cam kalıpların yüzeyinin sertleştirilmesinde kullanılmaktadır.

H_3BO_3 ve Fe_2O_3 , NiO , CoO ile elde edilen ürün için gerekli olan üretim sistemi Şekil 3.3'te şema halinde verilmektedir. Üretim sonucunda $20\mu m$ kalınlığında, şekilsiz şerit halinde ürün elde edilmektedir.



Şekil 3.3 H_3BO_3 ve Fe_2O_3 , NiO , CoO alaşımı üretim şeması

3.5. Bor Kullanım Alanları

Endüstride çok yaygın ve çeşitli kullanım alanlarına sahip bor bileşiklerinin, önemli ve kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Ticari anlamda borlar, genelde içerdikleri B_2O_3 içeriğine göre tanımlanmakta ve satılmaktadır. Diğerleri içinde en fazla ticareti yapılan bor ürünleri “boraks penhidrat” ve “borik asit” olmaktadır. Kullanım alanları bölgelere göre değişiklikler göstermektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletlerinde, bor ürünlerinin en önemli kullanım alanı izolasyon fiberleri olup, bunu tekstil fiberleri, borosilikat cam üretimi,

deterjan ve seramik sanayi takip etmektedir. Avrupa’da deterjan sanayi en önemli kullanım alanı olmaya devam etmekte, Japonya’da ise tekstil fiberleri ilk sırada yer almaktadır.

Tablo 3.7. Bor cevheri ve kullanım alanları [59]

Kalsiyum Borat cevheri	Kalsiyum Sodyum Borat Cevherleri	Sodyum Borat Cevherleri	Borlu Göl Suları	
• Cam • Metalürji • Nükleer • Tekstil türü • Fiberglas	• Selülozik • İzolasyon • Fiberglas • Metalürji • Nükleer • Cam	• Rafine boraks pentahidrad • Boraks dekahidrad, • Susuz boraks • Sodyum Perborat		
Boraks penta ve Dekahidrat, Susuz Boraks	Susuz Borik Asit	Sodyum Perborat	Borik Asit	
• Gübre • Fiberglas • İzolasyon • Metalürji • Cam ağartıcı • Cam • Yapıştırıcılar • Kozmetik • İlaç • Tarım • Fotoğraf • Tekstil boyaları • Dericilik • Yün koruyucu • Emaye, frit, sır	• Antiseptik • Kozmetik • Yangın söndürücü • Deri • Tekstil boyaları • Metalürji • Naylon • Tekstil sanayi • Sabun ve deterjan • Sır kaplama • Fotoğraf	• Deterjan ve ağartıcılar • Dezenfektan • Tekstil oyları • Cam boyaları	• Cam • Zirai mücadele • Tekstil boyaları • Fotoğraf • Sabun ve deterjanlar • Naylon • Balmumu yumuşatıcı • Ağaç koruyucu • Sır kaplama	• Antiseptik • Kozmetik • Yangın söndürücü • Sır kaplama • Metalürji • Nükleer • Sabun ve deterjan • Tekstil • Tekstil-fiberglas

3.5.1. Cam ve Cam Elyafı Sanayi

Günümüzde üretilen borun %40’ı cam ve fiberglas sanayisinde tüketilmektedir. Cam sanayisinde yararlanılan belli başlı bor özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Hammaddenin ergime noktasını düşürür.
- Ergimiş ortamın viskozitesini düşürür.
- Camın termal genleşme katsayısını düşürür.
- Camın kırılma indisini büyütür.
- Camın saydamlığını ve parlaklığını artırır.

Her türlü yalıtımdan bilişim sektörüne kadar çok çeşitli alanlarda, farklı amaçlar için kullanılan cam elyafın (fiberglas) temel hammaddelerinden birini bor oluşturur. Cam elyafına bor katıldığında yukarıda belirtilen özelliklere ilaveten;

- Kristalleşme eğilimini düşürür.
- Liflerin dayanıklılığını ve neme karşı direncini artırır.

Çeşitli metaller ile giydirilmiş fiberglas türleri; mikroçiplerde, fiber optik kablolarda, yarı iletken elemanların üretiminde ve buna benzer birçok elektronik parçanın üretiminde kullanıldığı gibi, diğer bor türevleri de elektronik sanayisinde kullanılmaktadır [59].

3.5.2. Temizleme Beyazlatma Sanayi

Dünya bor tüketiminin yaklaşık %20'si sabun, deterjan gibi temizlik ürünlerinin üretimine yöneliktir. Bu sanayide yararlanılan başlıca bor özellikleri:

- Güçlü bir beyazlatıcıdır.
- Lekeleri çözer.
- PH'ı dengeler, suyu yumuşatır, yağları parçalar.
- Aktif oksijeni dengeler.
- Anti bakteriyeldir.

Bu özellikler sayesinde çok az yıpratır; renklerini soldurmaz, düşük sıcaklıkta bile etkin sonuç verir. Çamaşırın yıkanma süresini düşürür. Su tüketimini azaltır. Makinelerdeki çeliğin aşınmasını ve matlaşmasını azaltır. Deterjanların %20-25'ini sodyum perborat oluşturur

Sabun ve deterjanlara mikrop öldürücü ve su yumuşatıcı etkisi nedeniyle % 10 boraks dekahidrat ve beyazlatıcı etkisini artırmak için toz deterjanlara % 10-20 oranında sodyum perborat katılmaktadır. Çamaşır yıkamada kullanılan deterjanlara katılan sodyum perborat ($\text{NaBO}_2\text{H}_2\text{O}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) aktif bir oksijen kaynağı olduğundan etkili bir ağartıcıdır. Perboratların çamaşır yıkamada klorlu temizleyicilerin yerini alması sıcak veya soğuk su kullanımına bağlıdır. Çünkü perboratlar ancak 55 °C' nin üstünde aktif hale geçerler [59].

3.5.3. Seramik ve Emaye Sanayi

Bor, özellikle seramiklerin sırlanmasında ve emaye sanayisinde kullanılır. Bu sektör Türkiye'nin en çok bor tükettiği alanlardan birini oluşturmaktadır. Yararlanılan başlıca bor özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Sırın kıvamlılığını düşürür.
- Sırın yüzey gerilimini düşürür.
- Parlaklığı ve saydamlığı artırır.

Emayelerin viskozitesini ve doymunlaşma ısısını azaltan borik oksit % 20' ye kadar kullanılabilir. Özellikle emayeye katılan hammaddelerin % 17-32' si borik oksit olup, sulu boraks tercih edilir. Bazı hallerde borik oksit veya susuz boraks da kullanılır.

Metale kaplanan emaye, onun paslanmasını önler ve görünüşüne güzellik katar. Çelik, alüminyum, bakır, altın ve gümüş emaye ile kaplanabilir. Emaye aside karşı dayanıklılığı artırır. Mutfak aletlerinin çoğu emaye kaplamalıdır. Banyolar, kimya sanayi teçhizatı, su tankları, silahlar v.b. de kaplanır. Seramiği çizilmeye karşı dayanıklı kılan bor, % 3-24 miktarında kolemanit halinde sırlara katılır [59].

3.5.4. Tekstil Sanayi

Yanmayı geciktirici özelliğinden dolayı, cam elyafı halinde, tekstil üretiminde kullanılır. Bunun yanı sıra, kumaş boyalarını koruduğu için kumaş boyalarında ve aprelemede kullanılmaktadır.

Tekstil sanayisinde, nişastalı yapıştırıcıların viskozitelerinin ayarlanmasında, kazeinli yapıştırıcıların çözücülerinde, proteinlerin ayrıştırılmasında yardımcı madde boru ve tel çekmede akıcılığı sağlayıcı madde, dericilikte kireç çöktürücü madde olarak boraks kullanılmaktadır.

3.5.5. Metalürji Sanayi

Metalürjide yararlanılan özellikler:

- Ergime sıcaklığını düşürür.
- Cürufun akışkanlığını azaltır.
- Çeliği sertleştirir.
- Fırın tuğlalarının aşınmasını azaltır.

Demir-çelik hammaddelerinin ergime sıcaklığını düşürmek suretiyle tüketilen enerjide tasarruf sağlar.

Bor türevlerinin kendisinin ya da çelik ile alaşımlarının yüksek sertliği nedeniyle aşındırıcı ve kesici aletlerde kullanılır. Son dönemlerde manyetik ayırıcılarda kullanılmasıyla devrim yaratan, sürekli yüksek manyetik alan şiddeti oluşturan magnetlerin içinde nadir metallerin yanı sıra bor da bulunmaktadır.

Boratlar yüksek sıcaklıklarda düzgün, yapışkan, koruyucu ve temiz, çapaksız bir sıvı oluşturma özelliği nedeniyle demir dışı metal sanayisinde koruyucu bir cüruf oluşturun ve ergitmeyi hızlandırıcı madde olarak kullanılmaktadır. Bor bileşikleri, elektrolit kaplama sanayisinde, elektrolit elde edilmesinde sarf edilmektedir. Borik asit nikel kaplamada,

fluoboratlarda ve fluoborik asitler ise; kalay kurşun, bakır, nikel gibi demir dışı metaller için elektrolit olarak kullanılmaktadır. Alaşımlarda, özellikle çeliğin sertliğini artırıcı olarak kullanılmaktadır. Bu konuda ferrobora oldukça önem kazanmıştır. Çelik üretiminde 50 ppm bor ilavesi çeliğin sertleşme niteliğini geliştirmektedir [59].

3.5.6. Tarım Sanayi

Borun tarım ürünleri üzerinde zıt yönlü etkisi vardır. Çok az miktarda bor bitkilerin gelişmesine yardım eder. Bu nedenle gübrelere katılır. Fakat borun fazlası bitkiler üzerine öldürücü etki yapar. Bu özellikten yararlanılarak, yabancı otlar ile mücadelede kullanılmaktadır.

Bor mineralleri bitki örtüsünün gelişmesini artırmak veya önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bor, değişken ölçülerde, birçok bitkinin temel besin maddesidir. Bor eksikliği görülen bitkiler arasında yumru köklü bitkiler (özellikle şeker pancarı), kaba yoncalar, meyva ağaçları, üzüm, zeytin, kahve, tütün ve pamuk sayılmaktadır. Bu gibi hallerde susuz boraks ve boraks pentahidrat içeren karışık bir gübre kullanılmaktadır. Bu ise, suda çok eriyebilen sodyum pentaborat ($\text{NaB}_5\text{O}_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) veya disodyum oktaboratin ($\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}$) mahsulün üzerine püskürtülmesi suretiyle uygulanmaktadır [59].

Bor, sodyum klorat ve bromosol gibi bileşiklerle birlikte otların temizlenmesi veya toprağın sterilleştirilmesi gereken durumlarda da kullanılmaktadır.

3.5.7. Nükleer Sanayi

Bor izotopları nükleer reaksiyonların denetlenmesine yardımcı olur. Çünkü B^{10} ve B^{11} izotopların nötron absorblama tesiri kesidi yükselir. Bazı tip güç reaktörlerinde fazla reaktiviteyi önlemek için soğutma suyuna borik asit ilave edilir.

Nükleer reaktörlerde kullanılan kontrol çubukları %2 bor içeren çelik ve alüminyum alaşımından yapılmaktadır. Atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır.

Yukarıda belirtilen kullanım alanlarının yanı sıra bor, tıpta, anti bakteriyel ve dezenfektan olarak, antiseptiklerde, diş macunlarında, parfümlerde, şampuan ve lens solüsyonlarında kullanılmaktadır.

Kimya sanayisinde, çeşitli tür boyalarda, elektrolitik işlemlerde, korozyon önleyicilerin üretiminde boran yararlanılmaktadır.

Atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında B^{10} kullanılır. Ayrıca, nükleer atıkların depolanması için kolemanit kullanılmaktadır [59].

3.5.8 Otomotiv Sanayi

Bor, hava yastıklarının hemen şişmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çarpma anında, elementel bor ile potasyum nitrat toz karışımı elektronik sensör ile harekete geçirilir. Sistemin harekete geçirilmesi ve hava yastıklarının harekete geçirilmesi için geçen toplam zaman 40 milisaniyedir. Ayrıca otomobillerde antifriz olarak ve hidrolik sistemlerde, plastik aksamda, yağlarda ve metal aksamalarda, ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bor ve borlu yakıtlar, 1950'li yılların başında ABD Savunma Programında geleceğin yakıtı olarak adlandırılmış ve nükleer silahlanma dışında 2. önemli stratejik malzeme olarak nitelendirilmiştir [63].

Sodyum tetraborat, özel uygulamalarda yakıt katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Daha önce Amerikan Donanması tarafından uçuş yakıtı olarak kullanılmıştır.

Diboran, B_2H_6 ve B_5H_9 gibi bor hidrürler; uçaklarda yüksek performanslı potansiyel yakıt olarak araştırılmışlardır. Boranlar, hidrojenle karşılaştırıldığında daha yüksek performansla yanmaktadır. Fakat pahalı ve yakıldığında açığa çıkan bor oksit çevresel açıdan uygun değildir [63].

3.5.9. Borun Diğer Kullanım Alanları

Ahşap malzeme korunması için sodyum oktaborat kullanılır. % 30' luk sodyum oktaborat çözeltisi ile muamele görmüş tahta malzeme yavaş yavaş kurutulursa bozunmadan ve küllenmeden uzun süre kullanılabilir.

Silisyum üretiminde bor triklorür, polimer sanayiinde, esterleme ve alkilleme işlemlerinde ve etil benzen üretiminde bor trifluorür katalizör olarak kullanılmaktadır.

Bor karbür ve bor nitrür; döküm çeperlerinde yüksek sıcaklığa dayanıklı (refrakter) malzeme püskürtme memelerinde de aşınmaya dayanıklı (abrasif) malzeme olarak kullanılan önemli bileşiklerdir.

Tekstil sanayiinde, nişastalı yapıştırıcıların viskozitelerinin ayarlanmasında, kazeinli yapıştırıcıların çözücülerinde, proteinlerin ayrıştırılmasında yardımcı madde boru ve tel çekmede akıcılığı sağlayıcı madde, dericilikte kireç çöktürücü madde olarak boraks kullanılmaktadır. Borun önümüzdeki yıllarda önemli miktarda kullanılabileceği bir üretim dalı da çimento sanayiidir [59].

4. TOZ METALURJİSİ

4.1. Giriş

Toz metalürjisi' nin en eski tarihi bilinmemekle birlikte M.Ö. 3000'li yıllara kadar uzandığı tahmin edilmektedir. Eski mısırlılar bu tarihlerde, demir oksidi indirgeyerek sünger demir oluşturmuşlar ve sonra sünger demirden istedikleri şekilde kütleler elde etmişlerdir [66, 67].

Çok küçük partikülleri birbirine bağlayarak parça haline getirme işlemine Toz metalürjisi (T/M) denir. Daha geniş bir ifade ile toz metalürjisi, toz şeklindeki malzemelerin preslenmesini takiben yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile parça imalatını kapsamaktadır [64]. Bazı parçalar bu işlemi takiben kalibrasyon (yeniden presleme), yağ veya plastik emdirmeye, daha düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım sızdırma, ısıtma işlemi veya kaplama işlemlerine tabi tutulabilir. Diğer bir ifadeyle T/M, elementel tozların, tam ve/veya yarı ön alaşımlanmış tozların bağlayıcılar ve yağlayıcılarla birlikte harmanlanarak uygun sıkıştırma yöntemleri ve sıcaklıklar kullanılarak arzu edilen şekilde üretilmeleri süreçlerini içeren oldukça kapsamlı ve çok disiplinli bir malzeme üretim yöntemidir [65].

19. yüzyıl sonlarında, endüstride platin ve iridium gibi yüksek sıcaklıkta ergiyen metallerin kullanılması denenmiştir. Kimyasal bir yöntemle platin toz haline getirilmekte, bu toz çok yüksek basınçta sıkıştırılmakta ve sonra ısıtılmaktaydı. Böylece tozlar masif bir kütle haline gelmekteydi. 1826 yıllarında Rusya'da çıkarılan platin para, T/M' nin ilk endüstriyel tatbikatı olmuştur [68,80].

Küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatı için uygundur. Malzeme kaybı çok azdır, belirli derece porozite (gözenek) ve geçirgenlik elde edilir. Bu yüzden kullanım alanları çok geniştir. Presleme işlemi oda sıcaklığında ve bazen de yüksek sıcaklıklarda yapılır.

Günümüzde toz metalürjisi, yüksek gözenekli metal filtrelerden kendinden yağlamalı yataklara, kontrollü gözeneklilik ile sinterlenmiş parçalara ve son olarak tam yoğunluktaki mamullere kadar geniş ürün yelpazesini içermektedir [65].

4.2. Toz Özellikleri

Toz metalürjisi çok geniş bir alanda hizmet verdiği için, kullanılacağı yere göre tozların özelliklerinin dikkatli şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Metal tozlarını, geniş bir aralıkta mühendislik ihtiyaçlarını karşılamak üzere, toz metalürjisi yöntemi için oldukça fazla sayıda, tip ve derecede bulmak mümkündür. T/M parçalarının mekanik veya kimyasal özellikleri, üretim

teknikleri ile ortaya çıktığı için tozların özelliklerinin belirlenmesinde, tozun boyutu, şekli ve yüzey alanı incelenmektedir [69].

Metal tozların özellikleri iki ana başlık altında incelenebilir.

- Tozların kimyasal özellikleri
- Tozların fiziksel özellikleri

4.2.1. Kimyasal Özellikler

Kimyasal özellikler ifadesinden bileşim ve saflık anlaşılır. Tozlarda bulunabilen katı yabancı maddeler genelde kimyasal indirgeme sonucu ortaya çıkmaktadır. Tozlar kimyasal indirgeme ile üretilmişse bazı oksit parçacıkları indirgemenen kalmış olabilir (Cu ve Fe oksit tozlarında olduğu gibi). Bu tanecikler tozun özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bazen de bu yabancı maddeler kendini yüzey filmleri olarak gösterir. Atmosferle temas sonucu belli bir süre sonra tozlar oksitlenir. Tozların preslenmesi sırasında Cr, Zr, Al, Mg, Pb, ve Sn gibi metallerin dengeli oksitlerinin kalıp ve zımba yüzeylerinde olumsuz etkileri gözlenmiştir [64].

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

$$\%O_2 = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100 \quad [4.1]$$

W_i = İlk ağırlık W_s = Son ağırlık

Bu değer SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , BeO , Mn_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , MgO v.b. gibi dengeli oksitleri içermez. Çünkü deney şartları altında bu gibi oksitler indirgenmez. Asitte çözünmeyen maddelerin tayini için ise, numune asit içinde kaynatılır ve filtre edilerek fırında 980 °C 'de yakılarak sonuç çıkarılır [64].

$$\% \text{Asitte çözünmeyen madde} = \frac{W_i}{W_s} \times 100 \quad [4.2]$$

W_i = İlk ağırlık W_s = Son ağırlık

4.2.2. Fiziksel Özellikler

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

4.2.2.1. Parçacık Boyutu

Herhangi bir teorik sınır bulunmamasına rağmen, pratik olarak maksimum toz tane boyutu, toz özellikleri, parça yoğunluğu ve mümkün pres kapasitesi tarafından belirlenmektedir. Geleneksel preslenmiş T/M parçalarının büyüklüğü, tasarlanan alan 0.000-25 inç² ve yükseklik (presleme yönünde) 1/32 ila 6 inç arasındadır. Pratik yükseklik sınırı 3 inç'e yakındır. Verilen bir metal toz için gerekli yoğunluk ne kadar düşükse, bir özel pres üzerinde üretilebilir parça boyutu da o kadar büyüktür. Presleme yönünde nispeten uzun parçaları, toplam uzunluğu boyunca yeterli yoğunlukta üretmek zordur. Parça uzunluğunu kısıtlayan diğer bir faktörde metal tozlarının görünür yoğunluğudur [69].

4.2.2.2. Parçacık Şekli

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

Atomize Al ve Sn gibi demir dışı tozlar ve paslanmaz çelik gibi demirli alaşımlar, parçacık boyu azaldıkça daha küresel parçacıklar meydana getirme eğilimindedirler. Gaz veya hava atomizasyonu daha yuvarlak, su atomizasyonu düzgün olmayan şekiller oluştururlar. Parçacık şekli kontrolü, optik ve elektron mikroskopları ile yapılır [69,71].

Parçacık şekli tozların; akış hızı, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik ve sinterlenebilirlik gibi özelliklerini etkilemektedir.

Akış hızı, küresel tozlar kolay akarken, pul şeklindeki tozlar düşük akış özelliği gösterirler ve düzgün olmayan şekilli bazı tozlar ise hiç akmazlar. Akış hızı, 50 gr. kuru tozun hail akış hunisinden kendi halinde akış zamanıdır diye tanımlanır. Görünür yoğunluk, belli bir hacimdeki sıkıştırılmamış toz kütlenin ağırlığıdır. Görünür yoğunluk g/cm olarak ifade edilir. Küresel tozlar en yüksek, köşeli tozlar yüksek ve gözenekli tozlar ise düşük görünür yoğunluktadır. Sıkıştırılabilirlik, metal toz kütlelerinin, kolay sıkışabilme ve teorik yoğunluğa yaklaşabilme derecesine sıkıştırılabilirlik denir. Düzgün olmayan şekilli tozlar zor sıkıştırılır. Bunun için yağlayıcılar kullanılarak sıkıştırma işlemi kolaylaşmış olur. Buna karşın düzgün

şekilli tozlar daha rahat sıkıştırılabilirler. Sıkıştırılabilirlik yoğunlaşma parametresi ile belirlenebilir.

$$\text{Yoğunlaşma parametresi} = \frac{\text{Ham yoğunluk} - \text{Görünür yoğunluk}}{\text{Teorik yoğunluk} - \text{Görünür yoğunluk}} \times 100 \quad [4.3]$$

Sinterlenebilirlik; küçük taneli ve düzgün olmayan şekilli toz taneciklerin birim yüzey alanları daha büyük olduğu için difüzyon, düzgün tanelere oranla daha hızlı olacaktır.

4.3. Toz Üretim Yöntemleri

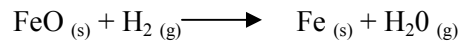
Metal tozların üretiminde temel olarak dört çeşit yöntem vardır. Kimyasal tepkimelerle, Elektroliz, Atomizasyon, Mekanik öğütme veya Mekanik alaşımlama ile toz üretim yöntemleridir [72].

4.3.1. Kimyasal Tepkimelerle Toz Üretimi

Genelde tüm metal tozları kimyasal tekniklerle üretilebilir [65,72]. Kimyasal yöntemle üretimde, katı, sıvı veya buhar fazı tepkimeleri ile toz üretimi gerçekleştirilebilir. Bu yöntemle üretilen tozların ebatları 5-10 µm ila 100-500 µm arasında ve değişik şekilli olabilmektedir. Bu üretim yöntemi; gaz altında katının ayrışması, temel ayrışma, sıvıdan çöktürme ve gazdan çöktürme olmak üzere dörde ayırmak mümkündür [65,70,73].

4.3.1.1. Gaz Altında Ayrışma ile Toz Üretim

Bu yöntemde, saf metal oksit tozları gerek karbon monoksit gerekse de hidrojen gazı ile tepkimeye sokularak yüksek sıcaklıklarda metal oksit indirgenmesi gerçekleşir [74]. Bu yöntemle, demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobaltın oksitleri indirgenerek bunların tozları üretilir. Gaz altında metal oksit indirgenmesine en iyi örnek demir oksit'in (FeO) indirgenmesi için geçerli olan tepkimedir [65].



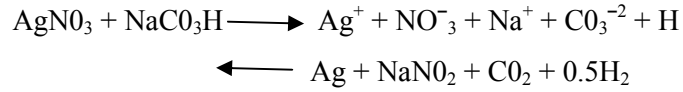
4.3.1.2. Termal Ayrışma ile Toz Üretim

Buhar fazında ayrışma ve yoğunlaşma süreçlerinin birleşimi ile metal tozların üretmek mümkündür. Bu süreçlerin birleşimindeki en temel örnekleri demir karbonil Fe (CO)₅ veya nikel karbonil Ni (CO)₄ tepkimelerini içeren üretim yöntemidir. Üretilen bu tozlar 2-4 µm veya 2-10µm arasında ve yaklaşık % 99.6 saflığındadır [70,73,74]. Diğer metallerden, bakır, krom,

platin, radyum, altın ve kobalt karbonil üretimi için gereken yüksek enerji ihtiyacı ile karbondioksit sirkülasyonunun beraberinde getireceği potansiyel tehlikelerden ötürü dünyada nikel ve demir karbonil üretimi tam olarak benimsenmiştir [65].

4.3.1.3. Sıvı Fazdan Çöktürme ile Toz Üretim

Sıvı çözeltide, nitrat, klorür ve sülfatlar olarak bulunan tuzlar çökeltilir. Çökeltilen bu tuzlar ısıtılarak parçalanır. Tuz suda eritilir ve ikinci birleşik yardımı ile çökeltilir. Örnek olarak aşağıda gümüş nitratin potasyum karbonhidrat ile tepkimesini ele alalım [65].



Son ürün olan katı gümüş çözeltisi öğütülerek toz ürün haline gelir. Kimyasal yöntemlerle çökelti fazında elde edilen tozların tipik boyutları 1 µm dolayında olup yüksek derecede safiyete sahiptirler. Bu yöntemle, kobalt, nikel veya demir ile kaplanmış Torya (ThO₂), Titanya (TiO₂) ve volfram karbür (WC) ve süper alaşım malzemeleri üretilir [74].

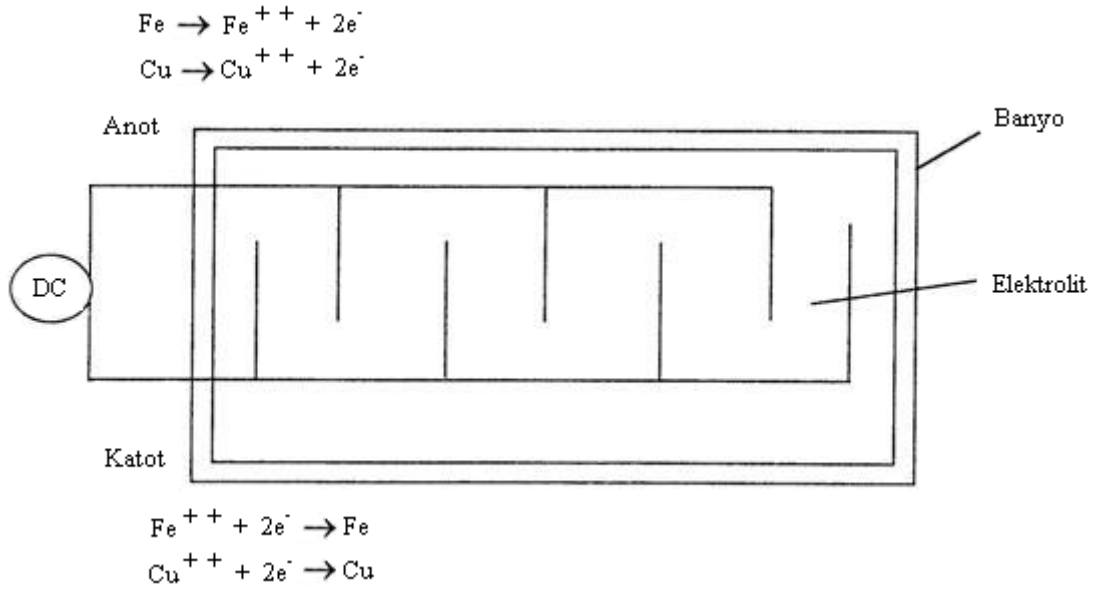
4.3.1.4. Gazdan Çöktürme ile Toz Üretim

Gaz bileşiklerin oluşturduğu kimyasal tepkimeler sonucu reaktif metallere ve nano ölçekli partiküllerden tozlar üretilir. Gaz esaslı tepkimelerin en büyük avantajı, tepkime sırasında toz üretiminde ergitmenin ortadan kalkması sonucu potanın kirlenmemesi ve yeniden kullanılabilir olmasıdır. Bu tür üretim sürecine en iyi örnek molibden trioksit'in saf hidrojen ile tepkimeye girerek metalik molibden tozunun üretimidir. Bu yöntemle, vanadyum, niobyum, volfram, hafmiyum, gümüş, nikel ve zirkonyum metallerinin klorürleri, florürleri ve hatta oksitleri işleme sokularak çok küçük tane boyutlarında metalik tozlar üretilir [65,75].

4.3.2. Elektroliz Yöntemi ile Toz Üretim

Yüksek iletkenliğe sahip metal tozlarını üretmenin bir başka yöntemi de elektroliz bir hücrenin katot çubuğunda metal tozlarını çöktürmektir. Bu yöntemi kullanarak % 94'e varan saflıkta Cu, Fe, Zn, Mn ve Ag tozlarını üretmek mümkündür [70].

Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilen bir elektroliz hücresinde uygulanan direkt voltaj altında Fe ve Cu anot-katot tepkimeleri gerçekleşir ve sülfat esaslı bir elektrolit içerisinde anot malzemesi çözülerek eksilir ve katotta artma veya depolanma gerçekleşir [64,65].



Şekil 4.1. Toz biriktirmede kullanılan örnek elektroliz şeması [65]

Üretilcek tozun ham maddesi anot'ta çözünerek katot'ta birikir. Hücreye verilen DC voltajı ise elektroliz biriktirmenin doğru yönde ilerlemesini sağlar [65].

Elektrolizle üretilen tozlar, yıkanarak elektrolitten ve tuzlardan iyice temizlenmesi gerekir (kurutma inert gaz altında yapılarak oksitlenme önlenmelidir). Kurutulduktan sonra ince taneli toz haline gelinceye kadar öğütülür. Elektroliz hücresinde üretilen tozlar genellikle süngerimsi biçimlerde yapılara sahiptirler. Ancak maliyetinin yüksekliği nedeni ile üretimi sınırlıdır [72].

4.3.3. Atomizasyon Yöntemi ile Toz Üretim

Bu yöntem, eritilebilen tüm metallerden toz üretmede kullanılabilen bir yöntemdir. Genel anlamda atomizasyon, bir sıvı metalin 100-150 μm 'den daha az boyutlarda sıvı damlacıkları oluşturacak şekilde parçalanması ve bu parçacıkların, ani ve aşırı soğuması ile toz haline gelmesi olarak tanımlanır [65].

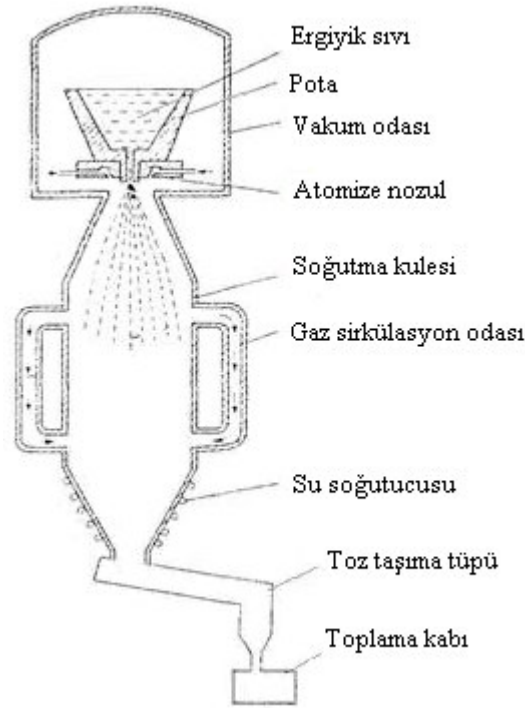
Dünyada üretilen tozların % 80'den fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. Diğer üretim tekniklerine göre, şekli, tane büyüklüğü ve dağılımın kontrolü çok kolaydır. Özellikle alaşım tozların üretimi için çok uygundur. Çünkü en iyi homojenliği bu yöntem sağlar.

Atomizasyon yöntemi ile toz üretmede,

- Su atomizasyonu,
- Gaz atomizasyonu,
- Döner disk atomizasyonu,
- Dönen elektrod atomizasyonu gibi değişik teknikler kullanılır [70,76].

Şekil 4.2' de görüldüğü gibi, geleneksel atomizasyon süreçlerinde atomize edilecek olan metal ergitme potasından (tandişten) sıvı, huzmeler halinde akarken tank içerisinde bu huzmeye belirli bir açı ve hızla çarpan gaz veya su jetlerinin etkisiyle atomizasyon gerçekleşir. Ergitme işlemi ayrı bir potada olabileceği gibi, tandiş etrafına sarılan indüksiyon bobinler ile de gerçekleştirilebilir [73].

Su ile atomizasyon, sağladığı yüksek soğuma hızları sayesinde kitlesel endüstriyel üretime uygun olmasına karşın üretilen tozlar düzensiz fleykler şeklindedir ve önemli miktarlarda oksit içerirler. Su ile atomizasyon 1600 °C'nin altında eriyen metallerden elementel veya alaşım tozları üretmek için yaygın olarak kullanılır. Gaz ile atomizasyon süreçlerinde ise, hava, azot, helyum veya argon gazları kullanılır. Bu yöntemin su ile atomizasyon yöntemine olan en önemli üstünlüğü, tozların küresel biçimlerde üretilibilmeleridir [65,73].

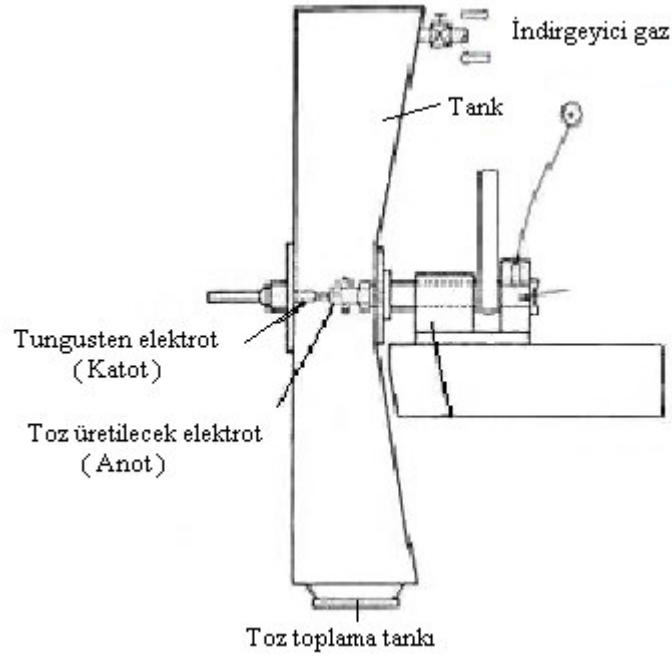


Şekil 4.2 Geleneksel su ve gaz ile atomizasyon yöntemlerinin şematik gösterimi [65,73].

Bazı reaktif elementler (titanyum, zirkonyum gibi) metaller ile nikel esaslı süper alaşımların geleneksel atomizasyon süreçleriyle üretilmeleri mümkün değildir. Bu tür reaktif metallerin toz haline getirilmesinde Şekil 4.3'te sunulan dönen elektrot prosesi (rotating electrode process REP) adı verilen bir savurma atomizasyon yöntemi geliştirilmiştir [65].

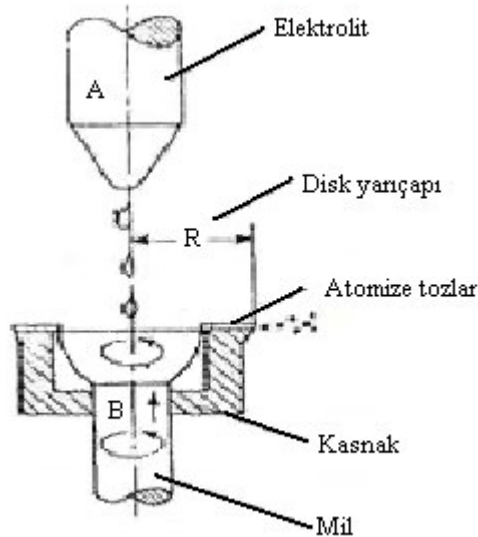
Dönen elektrot atomizasyonunda, atomize edilecek olan metal çubuğu yatay eksen etrafında dönerken, kullanılan volfram katot malzemesi bu çubuk üzerinde ark oluşturur. Bu ark sonucu kısmi ergitme gerçekleşir ve metal çubuktan savrulan damlacıklar atomize olur. Volfram

katot çubuğu veya plazma üreten uç kullanılarak gerçekleştirilen ark sayesinde metalik çubuktan küçük parçalar eritilerek savrulur [65].



Şekil 4.3 Dönen elektrot süreçleriyle savurma atomizasyonu [65]

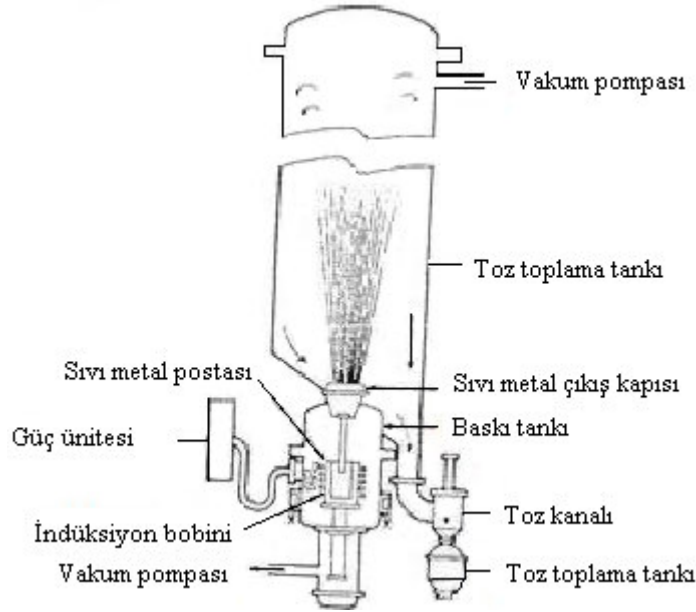
Şekil 4.4'de görülen dönen disk yönteminde ise, ergimiş metal bir potadan dönen bir disk üzerine dökülür. Ergimiş damlacıklar merkezkaç kuvvetinin etkisi ile dağılarak, asal bir gazla doldurulan bir odacıkta toplanır. Tane büyüklüğü 30-500 mikron arasında değişir ve taneler oldukça küreseldir [75].



Şekil 4.4 Döner disk atomizasyon yönteminin şematik gösterimi [65]

Bir başka atomizasyon yöntemi de vakum şartlarında gerçekleştirilen atomizasyon süreçleriyle gerçekleştirilir. Bu yöntem ile oksidasyona karşı duyarlı nikel, kobalt, demir ve

alüminyum alaşımları için geliştirilmiş olup vakum ve hidrojen gazı altında atomizasyon gerçekleştirilir. Şekil 4.5'de gösterilen vakum atomizasyonu cihazında metal indüksiyon ocağında ergitilir ve üretilen vakum sonucu ergiyik içerisine daldırılan bir seramik tüp vasıtasıyla atomizasyon kazanına iletilir. Bu iletim sonucu ani olarak genişleyen sıvı metal önce damlacıklara ayrılır, daha sonra bu damlacıklar ani ve aşırı soğuyarak toz haline geçerler [65].



Şekil 4.5 Vakum atomizasyon yönteminin şematik gösterimi [65]

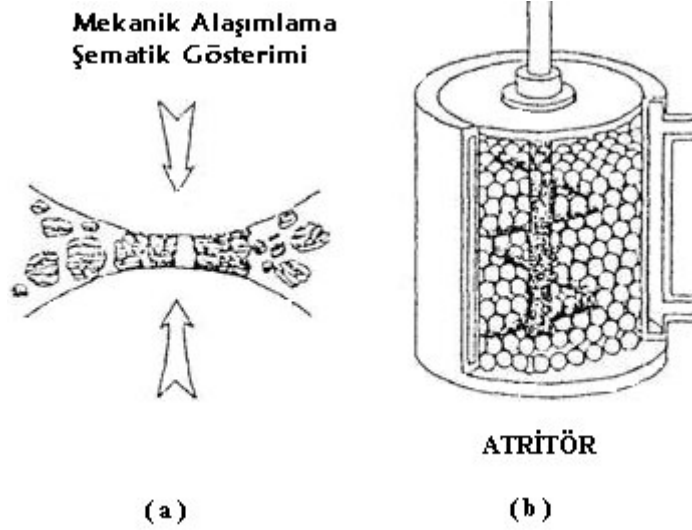
4.3.4. Mekanik Öğütme ile Toz Üretimi

Mekanik yöntemle ekonomik olarak toz imali için, kimyasal bağları zayıf olan ve kayma sistemi az olan karışık kristalli yapılarda malzemeler ile, çok sert ve gevrek olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır. Sünük malzemeler pul şeklinde tozların elde edilmesine neden olacağından, genellikle kolay parçalanıran kırılğan, sert ve gevrek malzemeler bu metot için uygundur [71].

Bu şekilde üretilen başlıca metal tozları Al, Cu, ve pirinçtir. Bunlardan başka, Sn, Pb, Mn, Co, Si, Zn, Fe, Fe-esaslı ve Cu- esaslı tozlarda üretilir. Mekanik öğütme sırasında üretilen tozun yapısına ve özelliklerine etki eden en önemli parametreler, öğütmede kullanılan toplam : toz ağırlık oranı, öğütme süresi ve öğütmede kullanılan sıvı ya da öğütme atmosferidir. Öğütme işlemi sırasında, toz parçacığının üzerine darbe, aşındırma, kesme ve basma olmak üzere dört tür kuvvet etki eder. Darbe, öğütme ortamında kullanılan bilyaların ya da diğer tozların herhangi bir toz parçacığı üzerine anlık çarpmasıdır. Aşınma bilya/toz etkileşimi ile olabileceği gibi, toz / toz etkileşimleri sonucu da oluşabilir [77].

Klasik öğütme süreçleri ile mümkün olmayan katı alaşımlama işlemi, yüksek enerjili öğütme ortamı sağlayan atritör, gezegen bilya değinileni, bazı titreşimli değirmenler ile

laboratuar ölçekli spex değirmenlerinde mekanik alaşımlama (MA) ile gerçekleştirilir. Şekil 4.6' da MA işlemi sırasında bilya/toz etkileşimi ile MA işleminin gerçekleştirildiği atritör cihazının şematik gösterimi sunulmuştur [65].



Şekil 4.6 Mekanik alaşımlama işlemi sırasında : a) bilya/toz etkileşiminin şematik görünümü, b) Kullanılan öğütme ortamlarından biri olan atritörün şematik görünümü [65]

4.4. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Parça Üretim Süreci

Toz metalürjisi ile üretim tekniğinin 4 aşama içerisinde toplamak mümkündür.

- Harmanlama (Toz hazırlama)
- Şekillendirme ve pekiştirme (Kompaktlama)
- Sinterleme
- Son işlemler

Belirli bir uygulama için amaca uygun özellikleri taşıyan ürünün elde edilmesi, her şeyden önce, uygun özelliklere sahip tozların üretimi ile mümkündür. Diğer taraftan, belirli özelliklere sahip toz malzeme ile bu malzemenin şekillendirilmesinde kullanılacak bir uygulama için parçadan beklenen özellikleri, bu özellikleri sağlayacak toz üretim tekniği ve söz konusu tozun şekillendirilmesinde kullanılacak tekniğin seçimi birlikte düşünülmelidir.

4.4.1. Harmanlama

İstenilen boyut, şekil ve bileşimdeki ham tozların yağlayıcı elemanlarla ve alaşım elemanlarıyla karıştırılması işlemidir. Bu işlem özel karıştırıcılarla homojen bir harman elde edilinceye kadar sürdürülür [78].

4.4.2. Şekillendirme ve Pekiştirme

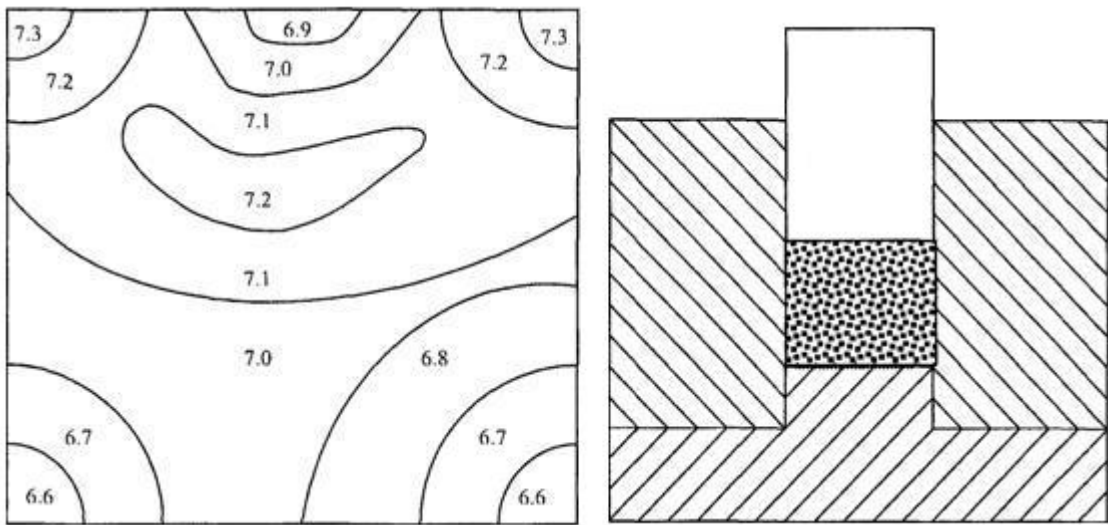
Toz metalürjisinin şekillendirme ve pekiştirme aşamalarında bölüm 4.3'deki metalik toz üretim yöntemleri ile üretilen tozlar kullanılarak katı halde (dağılmayan) metal yapılar üretilir.

Toz karışımı dayanıklı bir kap içerisinde istenilen şekil ve boyutta sıkıştırılır. Böylece tozun gevşek haldeyken yeterli mukavemet ve yoğunluk kazanması sağlanır. Sıkıştırma oranı, gevşek toz hacminin sıkıştırılmış toz hacmine oranıdır. Bu oran kullanılan ham maddelerin özelliklerine bağlı olarak değişecektir ve genellikle 3/1 mertebesindedir. Şekillendirme ve pekiştirme aşamasında presleme ve/veya kalıplama yöntemleri ile şekillendirildikten sonra belirli ham yoğunluğa ulaşmış parçalar yüksek sıcaklıklarda çeşitli atmosfer koşullarında ısıtılarak bünyede meydana gelen katı hal yayınma olaylarının etkisiyle sinterlenir [64].

4.4.3. Presleme

Presleme genellikle oda sıcaklığında özel şekilde hazırlanmış çelik kalıpta yapılır. Tozun plastik şekil değiştirme özelliğine göre 1-10 ton/cm² arasında değişen basınç tatbik edilir. Sinterlenmiş cisimlerin fiziksel özellikleri üzerinde yapılan araştırmalarda ise bazen 30 ton/cm² ye kadar ulaşan basınçlar da kullanılmıştır [68].

Geleneksel toz sıkıştırılması işleminde Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, tek eksen boyunca uygulanan basınç sonucu kalıbı dolduran tozlar preslenerek şekillenir. Toz doldurulduktan sonra, üst baskı plakası (dalgiç piston) ile basma gerçekleşir ve sıkıştırılmış toz metal blok parça alt pistonun hareketi ile çıkarılır. Kalıp duvarlarının aşınmasını engellemek ve tozların kolay sıkıştırılabilirliği için tozlara ve kalıp duvarlarına yağlayıcılar eklenir [65].

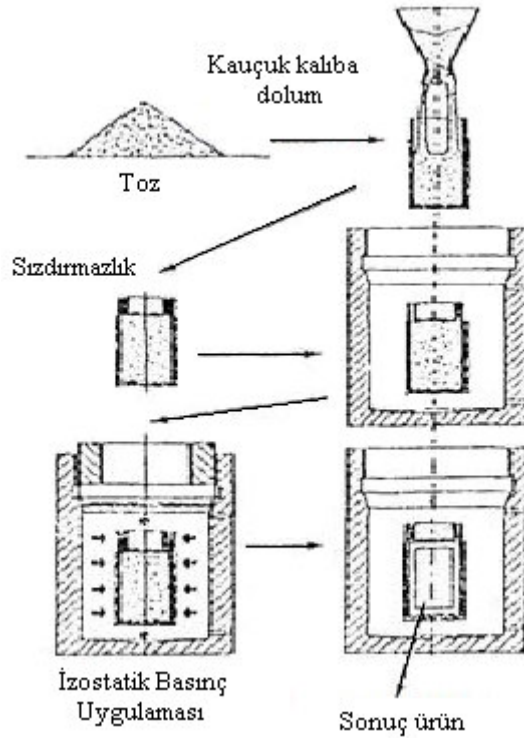


Şekil 4.7 Tek yönlü preslemede numune kesitinde görülen yoğunluk dağılımı [65]

Tek yönlü preslemede uygulanan basınç arttıkça toz kütleinin yoğunluğu artar. Yani bünyedeki gözeneklilik düşer. Tek yönlü presleme ekonomik bir yöntem olmasına karşın, bazı dezavantajları ve sınırlılıkları vardır. Karmaşık şekillerdeki parçalar ile boy/en oranı yüksek olan ($L/D > 2.5$) metalik parçalarda istenen ham yoğunluklar gerçekleşemez. Bu yüzden karmaşık ve boy/en oranı fazla olan şekillerdeki parçaları basmak amacıyla soğuk izostatik presleme (SİP) ile tozların preslenmesi işlemleri gerçekleştirilir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen SİP işleminde, tozlar kauçuk bir kalıba doldurularak yağla dolu basma hücresinin içerisine yerleştirilir. Basma pistonu veya dalgıcı sayesinde yağ, kalıba her yönden eşit baskı yapar ve bu sayede basılmış numunelerin her tarafı aynı yoğunlukta olur [62].

İzostatik presleme, hedeflenene yakın boyut ve şekillerdeki T/M parçalarını üretmek için kullanılır. Geleneksel presleme veya kalıplamadan farklı, izostatik presleme yağ, gaz veya su gibi bir basınçlı sistemde gerçekleştirilir. İzostatik preslemenin faydaları arasında [69];

- Karmaşık şekil kabiliyeti
- En aza indirilmiş pahalı toz girişi
- Azaltılmış malzeme kaybı (karmaşık şekil yapımında)
- Preslenmesi zor parçalara üretebilme
- Genellikle bağlayıcıya ihtiyaç yoktur.
- Parçayı son şekil ve boyutuna yakın üretebilme
- Homojen yoğunluk ve özellikler sıralanabilmektedir.



Şekil 4.8 Soğuk izostatik presleme [65]

Sıcak presleme veya basınç altında sinterleme, soğuk presleme ve sonra sinterlemeye nazaran daha az pratiktir. Sadece tel çekme haddelerinin, elmas alaşımlarının imali gibi istisnai hallerde kullanılmış olan bu yöntem, tozların veya özel bir şekilde ısıtılmış kömür, çelik veya grafit bir matris içine yerleştirilerek sıkıştırılmış parçaların sinterlenmesi esnasında basıncın tatbik edilmesinden ibarettir [68].

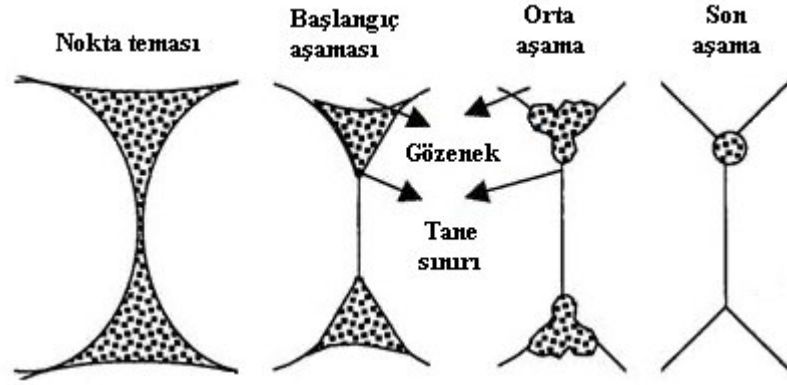
4.4.4. Sinterleme

Sinterleme toz metalürjisindeki önemli işlemlerden biridir. Şu an uygulama fırınlarındaki sinterleme, eskiden uygulanan birleştirme işlemi hataları üzerinde geliştirilmiştir [76]. Sinterleme yüksek sıcaklıklar kullanılarak preslenmiş ve ham kompaktlardaki toz parçacıklarının birleştirilmesi işlemi olarak tanımlanır [77].

Sinterleme süreçlerinde kullanılan sıcaklıklar genellikle sinterlenecek olan parçada katı-hal atom yayınma ve ergime sıcaklığının altında seçilirse de özellikle çok sistemli alaşımlarda sıvı-faz sinterlemesi olarak bilinen bir sıvı fazın varlığında da gerçekleşebilir. Toz parçacıkların yüksek yüzey enerjileri aşılarak ya da ortadan kaldırılarak gerçekleşen sinterleme sonucu parçacıklar arasında tam ve mükemmel bağlar oluşur ki bu suretle içyapıdaki gözeneklilik sıfıra düşer. Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapının tersi ile doğru orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları büyüklere kıyasla daha kolay sinterlenirler [65].

Sinterleme işlemi kullanılırken sinterleme esnasında, birleştirme ve sıcaklık şartları istenilen özellikleri elde edebilmek için kontrol altında tutulur. Malzemenin sinterlenmesi esnasında bir çok işlem basamakları da (Oksit indirgenmesi, bağlayıcıların kaldırılması veya kimyasal reaksiyonlar) meydana gelir. Mesela; Demirin sinterlenmesi esnasında, oksit indirgenmesi, yağlayıcıların dağılımı, karbon kaybı olması, sıcaklığa bağlı olarak azot çözünürlüğü ile değişir. Yüzeyin gazı dışarı atması (desorption) α' dan γ fazına dönüşüm, 900 °C üzerindeki tane büyümesi ve sıcaklığa bağlı olarak (bu dönüşüm bronz için 800 °C'dir) difüzyon artışı meydana gelir. Aynı zamanda boşluk morfolojisi değişir [76].

Sinterleme sırasında metalürjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması yayınmaya bağlı olarak Şekil 4.9'da görüldüğü gibi ilk, orta ve son aşamaları olan bir geometrik sıra takip eder [65].



Şekil 4.9 Sinterleme sırasında metalürjik bağların oluşumu ve gözeneklerin kapanması [70]

4.4.5. Sinterleme sonrası işlemler

T/M parçası genellikle sinterlemeden sonra kullanıma hazırdır. Ekonomik bakımdan arzu edilmese de bazı sinter sonrası işlemlere gerek duyulabilir. İlk sıkıştırma işleminde farklı bir kalıpta yüzey hassaslığı, yoğunluk ve ölçü hassaslığını sağlamak amacıyla yapılan sıkıştırma işlemine kalibrasyon veya yeniden presleme adı verilir. T/M parçasının gözeneklerini yağ, plastik vs. gibi metal olmayan bir malzeme ile doldurma gerekebilir. Gözeneklere düşük ergime noktalı bir metal veya alaşım emdirilerek yoğunluk, mukavemet, sertlik, süneklik ve darbe mukavemetinde artış sağlanabilir. Kaplama işlemi yapılmadan önce yüzeydeki gözenekler reçine veya deformasyonla kapatılmalı. Buhar işlemi ile demir asıllı parçaların yüzeyleri manyetik demir oksit ile kaplanarak sertlik, baskı mukavemeti, aşınma ve korozyon dirençleri artırılır. Bu işlem 600 °C de kuru basınçlı buharın parçalara uygulanmasıyla yapılmaktadır [64].

4.5. Toz Metalürjisi Uygulama Alanları

Çağın ekonomik dengeleri iletişim, yeni malzeme, biyoteknoloji, nükleer, uzay ve havacılık teknolojileri olmak üzere beş teknoloji üzerine kurulmuştur. Yeni veya ileri malzeme teknolojisi, aslında diğer teknolojilerin de temelidir. Çünkü bütün teknolojilerin gelişmesi, yeni üretilen malzemelerin özellikleri ve performansı üzerine kurulmuştur. Diğer teknolojilerle de iç içe olan malzeme teknolojisindeki başlıca atılım, doğal kaynaklarla rekabet eden sentetik malzeme kaynaklarının bulunmuş olmasıdır. Maddenin moleküler yapıda kontrolü sayesinde yeni özellikleri olan malzemeler gündeme gelmektedir. Yeni veya ileri malzeme teknolojisinin de temeli toz metalürjisidir. Çünkü pek çok özelliklere sahip sentetik malzeme üretimi ancak metal tozlarının karışım teknolojisi ile mümkün olmaktadır [79].

T/M parçaları otomobillerin hareket sistemleri, çamaşır makineleri, güç makineleri, spor malzemeleri, fotokopi makineleri, yol ekipmanları, av malzemeleri, hidrolik sistemler, x ışınlarının korunma sistemleri, petrol ve gaz kuyularının kapama sistemleri ve kasetçalar gibi

pek çok yerde kullanılmaktadır. İmalat endüstrisinde kullanılan T/M parçaları büyük ölçüde demir, çelik ve alaşımları, bakır ve bakır esaslı alaşımlar (prinç, tunç ve nikel, gümüş), alüminyum, paslanmaz çelik, nikel ve kalay esaslı tozlardan elde edilen alaşımlardır [67].

Dünya çapında üretilen tüm metalik tozlardan imal edilen sinter parçaların pazar paylarından en büyük kısmı, % 86 ile demir-çelik esaslı sinter parçalar almaktadır. İkinci sırada % 11 pazar payı toplamı ile bakır ve bakır esaslı sinter parçalar, üçüncü sırada % 0.6 ile alüminyum takip eder [65]. T/M'nin otomotiv sektöründe önemli uygulamaları tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 T/M' nin otomotiv sektöründe uygulama alanları [65]

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

4.6. Toz Metalürjisi'nin Avantaj ve Dezavantajları

T/M üretim tekniği bütün dünya ülkelerinde hızla yayılmaktadır. ABD' de Japonya'da, Avrupa ve Avustralya'da T/M üretiminin sürekli olarak arttığı rapor edilmektedir. Bunun en büyük nedeni, daha ekonomik bir üretim tekniği olması ve diğer tekniklere kıyasla daha az enerji tüketilmesi [66].

T/M, demir ve demir dışı parçaların üretiminde kullanılan, son derece gelişmiş bir yöntemdir. Elementel veya alaşım tozları karıştırılır ve bir kalıp içerisinde preslenerek sinterlenir veya ısıtılarak partiküller arasında metalürjik bağın oluşması sağlanır. Esası talaşsız metal işleme yöntemidir. T/M nihai parçada başlangıçtaki ham maddenin % 97'sinden fazlasını kullanmaktadır. Bundan dolayı, T/M bir enerji ve malzeme koruma yöntemidir [69].

Daha önce döküm, talaşlı üretim, dövme gibi tekniklerle üretildikleri halde ekonomik sebeplerle T/M tekniğine değiştirilen sayısız parça vardır. T/M'nin diğer tekniklerle karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmaktadır [69, 66, 75].

T/M'nin avantajları;

- İşlemeyi (talaş kaldırma) en aza indirir
- Yakın toleranslar ve düzgün yüzeyler elde edilir
- Yoğunluk ve ergime noktalarındaki farklılıklardan dolayı başka yollarla imkânsız olan alaşım ve karışımların veya karmaşık parçaların üretimi mümkündür
- Metal olmayan malzemeler, metal asıllı ürünlerin içinde ince ve homojen şekilde dağıtılabilir
- Isıl işlemle mukavemeti veya aşınma direnci yükseltilebilen malzemeler sağlanabilir (gözeneklere arzu edilen yağlayıcı maddeler emdirilebilir) [69].

T/M' nin dezavantajları;

- İlk yatırım (takımlar, presler ve sinter teçhizatı) oldukça pahalıdır. Seri üretim yapılmazsa amortisman değerleri yüksektir
- Metal tozların maliyeti, ingot halinde üretilen malzemelerden daha yüksektir
- Toleranslar talaşlı işlemlere göre daha kabadır
- Tozların kalıp içinde akışkanlığı sınırlıdır. Bu nedenle yapılacak parçanın şekli kısıtlayıcı bir faktör olabilir.

5. TRİBOLOJİ

5.1. Giriş

Triboloji, birbiriyle temas eden iki yüzey arasındaki etkileşimleri inceler. Fizik ve Kimya bilimlerinden, Mekanik ve Malzeme bilimine kadar birçok farklı alan tarafından incelenir ve çalışılır [85]. Ev aletlerinden uzay araçlarına kadar her alandaki teknik araç ve gerecin aşınması gibi ekonomik açıdan önem arz eden alanlarda büyük kayıplara neden olan problemleri tanımlayan ve işlevsel analizler uygulayan bir bilim alanıdır [84].

Bu bilim dalı 1967'de ortaya çıkmıştır. Yunanca bir terim olan "TRIBOS" kelimesinden türetilmiş olup (ovalama, kaydırma), disiplinler arası bir bilim dalıdır [90].

Çok sayıda yapı elemanı sürtünmeli ya da kaymalı zorlanmaya maruz kalır. Bu sırada meydana gelen aşınma, parçaların ömrünü ve güvenilirliğini sınırlar. Tekniğin her sahasında malzemelerin sürtünme özelliklerinden ve sürtünme kuvvetlerinden faydalanılarak çeşitli konstrüksiyonların gerçekleştirildiği ve çok çeşitli görevlerin yerine getirildiği görülmektedir. Bu görev, kavramalarda olduğu gibi bir güç nakli, frenlerde olduğu gibi hareket halinde bulunan bir makinenin kinetik enerjisinin alınarak durdurulması yani bir gücün yutulması veya sevk ve hareket silindirlerinde olduğu gibi bir hareketin iletilmesi gibi çok çeşitli olabilir [88].

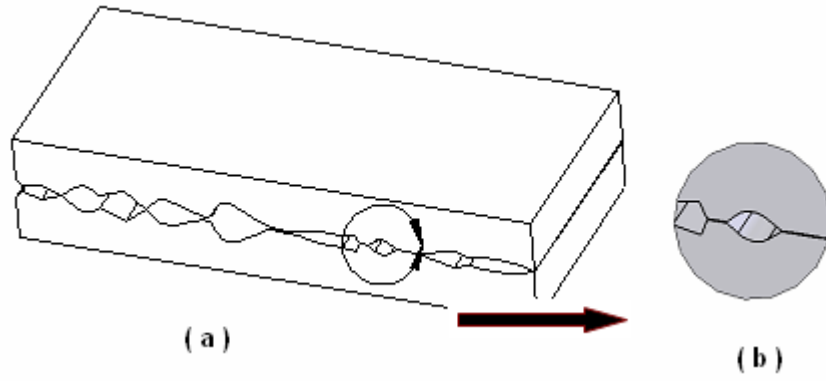
5.2. Sürtünme

Sürtünme; temasta bulunan iki malzemeden biri diğerinin üzerinde kayarken diğer malzemenin karşı yüzeyin hareketine gösterdiği direnç olarak adlandırılır [82].

Sürtünme, ilgili yüzeyler arasında belirli değerler içinde olmalıdır. Taşıt frenlerinde sürtünmenin azlığı nedeniyle taşıtın istenilen mesafe ve zamanda durmaması veya fazla sürtünme nedeniyle taşıtın frenlerinin bloke olması bu duruma tipik örnektir.

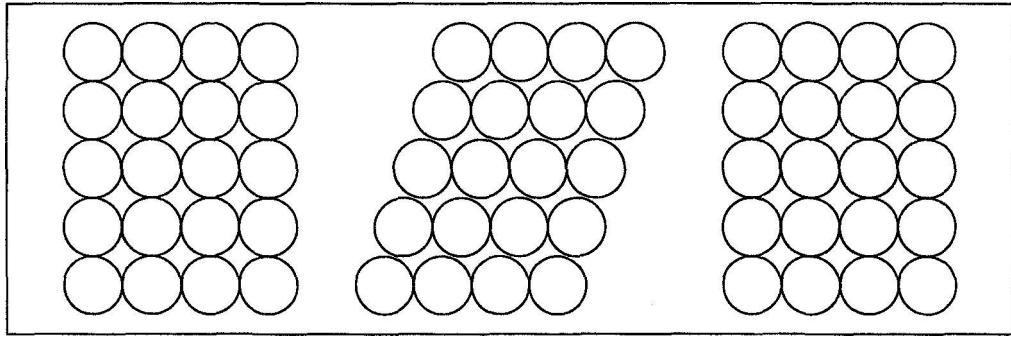
Sürtünme hareketin cinsine göre; yuvarlanma, kayma veya kayma yuvarlanma şeklinde olabilir. Birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulup, konulmaması bakımından da, temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç halde de incelenebilir [8, 90, 93]. Şekil 5.1 (a)'da üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, diyagram büyütülerek gösterilen (b)'de ise yüzeysel yapışma noktaları görülmektedir.

Son zamanlarda sürtünmenin meydana gelme nedenleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Araştırmacılar yüzey pürüzlülüğü, adhezyon, elastisite veya kuru sürtünme boyunca yüzey geçişleri gibi kuru sürtünmenin tek parametresi ile ilgilenmişlerdir [94].



Şekil 5.1 Sürtünmede temas alanları

Sürtünmenin sebebi; bir yüzeydeki atomların diğer yüzeydeki atomlar üzerinde hareket ettiği zaman katı yüzeyin kayması esnasında meydana gelen kafes hareketidir. Çünkü bir yüzeyin diğer bir yüzey üzerinde hareketi sonucunda mekanik enerjinin bir bölümü ses dalgaları ve ısıya dönüşür. Birbirleri ile temastaki her katı malzemenin kristal kafesi atomik düzeyde denge durumundadır. Sürtünen çiftlerden birine kayma gerilmesi uygulandığında her kafes elastik olarak deforme olur [95]. Eğer kayma daha da artarsa ve kararsız duruma gelirse atomlar yeni bir denge durumuna geri döner. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi bütün deformasyon enerjisi yok olana kadar kristal kafes hareket eder [96].



Şekil 5.2 Kuru kayma boyunca kristal kafesin elastik deformasyonu

5.2.1. Sürtünme Kanunları

Sürtünme kanunlarının belirlenmesinde iki temel esas vardır. Bunlar büyük oranda uyumluluk gösterirler. Birinci kanun; temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti, görünür temas alanında bağımsızdır. İkinci kanun; sürtünme kuvveti, cisimler arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Böylece bir cisim diğeri üzerinde kayarken, eğer normal yük iki katına çıkarsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Bu kural daha çok "Amontos" kuralı olarak bilinir ve ilk kez 1699 yılında Fransız bilim adamı Amontos tarafından çıkarılmıştır. Üçüncü kural olarak da; kinetik sürtünme kayma hızından yaklaşık olarak bağımsızdır. Bu kuralın ilk ikisine

göre uygulanabilirliği daha düşük değerdedir. Üçüncü kural Coulomb tarafından 1785 yılında açıklanmıştır [91].

5.2.2. Sürtünme Teorileri

Sürtünmede en önemli faktör pürüzlerin etkileşmesidir. Buna göre sürtünme rijit yani deformasyona uğramayan pürüzlü noktaların teması sonucu meydana gelir. Temel sürtünme teorileri şunlardır [110].

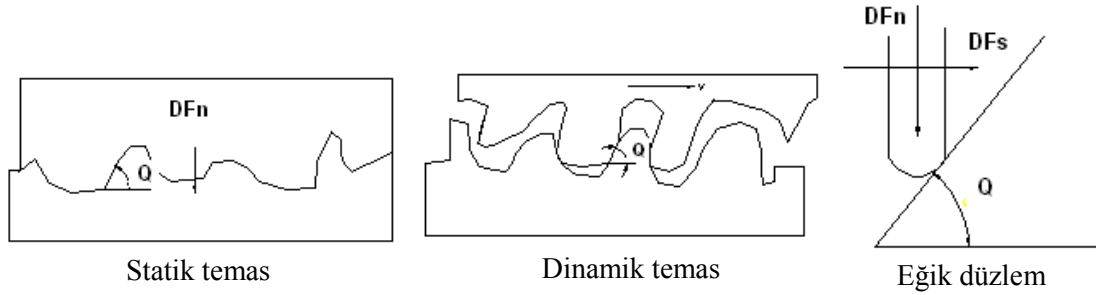
5.2.2.1. Mekanik Kilitlenme Teorisi

Bu teoriye göre yüzeylerdeki girintiler ve çıkıntılar birbiri içerisine geçerler. Yüzeyleri hareket ettirmek için uygulanan kuvvetin pürüzleri kesecek büyüklükte olması gerekir. Kesmeyi gerçekleştiren bu kuvvete sürtünme kuvveti denir. 1699'da Amontons Coulomb tarafından bulunan bu teori sürtünmedeki enerji kaybını açıklayamamaktadır. Şekil 5.3'de Coulomb'un sürtünme modeli görülmektedir. Burada;

DF_s : Sürtünme kuvvetini,

DF_n : Normal kuvveti

Q : Pürüz kısmın taban açısını ifade eder.



Şekil 5.3 Amontons Coulomb'un sürtünme modeli

5.2.2.2. Moleküler Çekim Teorisi

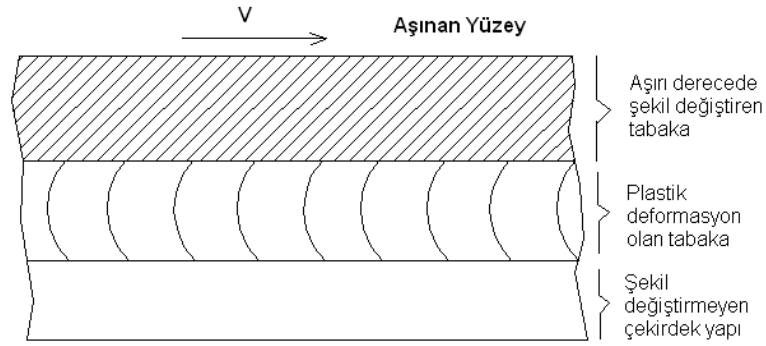
Bu teoride temas eden yüzeylerin molekülleri arasında bir bağ oluşur ve sürtünme kuvveti moleküller arası bağı yenen kuvvettir. Bu teori yapışkan aşınmanın anlaşılmasına yardımcı olan bir teoridir.

5.2.2.3. Elektrostatik Kuvvetler

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

5.2.2.4. Kaynaklaşma, Kesme-Kazıma

Bu teoride birbiri üzerine bastırılan yüzeylerin temasta olan pürüzleri (asperitileri) yüksek basınçlar nedeni ile bölgesel olarak kaynaşır. Hareketi başlatabilmek için kaynayan noktaları kesmek gerekir. Eğer iki yüzeyden biri diğerine göre sert ise sert yüzeyin asperitileri yumuşak yüzeye gömülür. O halde de hareketi başlatabilmek için sert yüzeyin yumuşak yüzeyi kazınması gerekir. Yapılan ölçümlerde taşlanmış iki yüzeyin gerçek temas alanının görünen toplam yüzeyin çok küçük bir miktarı olduğu görülmüştür. Teorik olarak ilk değme halinde en yüksek üç noktada oturma olur. Bu noktaların elastik ve plastik deformasyonu sonucu değme alanı genişler ve diğer tepelikler birbiri ile temas eder. Yüzeyleri bastıran kuvvetin büyüklüğü kuvvete bağlı olarak, yüzey teması gittikçe genişler ve sonunda bir denge oluşur [97].



Şekil 5.4 Sürtünmenin malzeme yapısı üzerine etkisi

5.2.3. Sürtünme katsayısı

TS 555'e göre, disk veya kampana ile disk veya kampana fren balatası arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı sürtünme katsayısı olarak tanımlanır. TS 555'e göre sürtünme katsayısı, sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sıcak sürtünme katsayısı ise, 300, 350 ve 400 °C sıcaklıklarda ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Soğuk sürtünme katsayısı, aşınma deneyi esnasında 100, 150 ve 200 °C'de ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Balata kalitesini belirlemede sürtünme katsayısı aralıkları verilmiştir. Tablo 5.1'de TS 555'te verilen sürtünme katsayısına göre balataların sınıflandırılması görülmektedir.

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

Tablo 5.1 TS 555’e göre balataların sınıflandırılması [111]

Sınıf	Sürtünme katsayısı (μ)
C	0,15’e kadar
D	0,15-0,25
E	0,25-0,35
F	0,35-0,45
G	0,45-0,55
H	0,55’ten yukarı

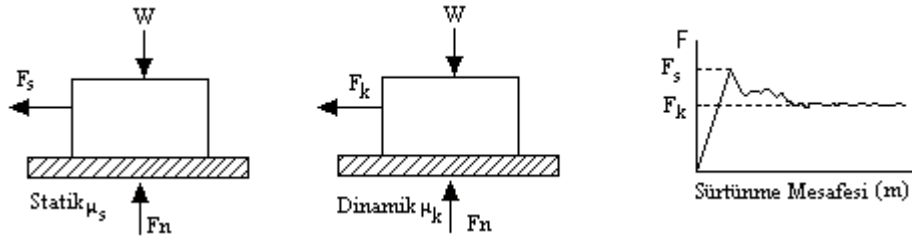
Bowden ve Tabor’e göre sürtünme iki temel faktörden kaynaklanmaktadır. Bunlardan birincisi kuvvetli adhezyondaki gerçek kontak bölgesinde oluşur. Bu bölgede kaynak bağlar meydana gelir ve bu bağların parçalanmasını sağlayan kuvvet F_s ’dir, diğeri ise sert yüzeydeki çıkıntıların yumuşak olan yüzeyde sürtünme anında açtığı yol için harcadığı (S) kuvvetinin etkisidir [112].

Toplam sürtünme kuvveti $F = F_s + S$ ’dir. Genellikle “S” kuvveti ihmal edilir ve böylece $F = F_s$ olarak yazılabilir. Sürtünme kuvvetleri uygulanan kuvvetlerin bileşkesine eşit ve ters yönde olur, böylece herhangi bir yatay hareket meydana gelmez. Buna göre bağlı hareket eden ve normal bir kuvvetin (W) etkisi altında bulunan iki cismin temas eden yüzeyleri arasında harekete karşı bir F_s sürtünme kuvveti oluşur.

$$F_s = \mu \times W \quad (5.1)$$

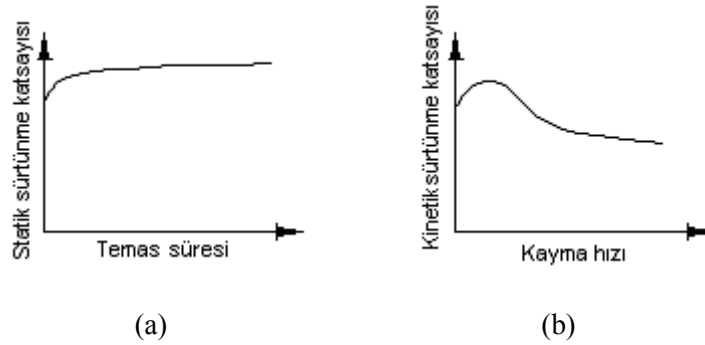
Bu ifadedeki (μ) değeri iki malzeme yüzeyine bağlı olarak değişen sürtünme katsayısı değeridir. Fren ve kavrama gibi sürtünme esasına göre çalışan makine elemanları hesabı $F_s = \mu \times W$ denkleminde dayanır.

Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_n) arasında; $F_s = \mu_s \times F_n$ bağıntısı mevcuttur. Burada, μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur (F_k). Bu durumda; $F_k = \mu_k \times F_n$ ilişkisi geçerlidir. Burada $\mu_k < \mu_s$ kinetik sürtünme katsayısıdır. Şekil 5.5’de statik ve dinamik sürtünme katsayıları görülmektedir [91, 92, 98].



Şekil 5.5 Statik ve dinamik sürtünme katsayıları [98]

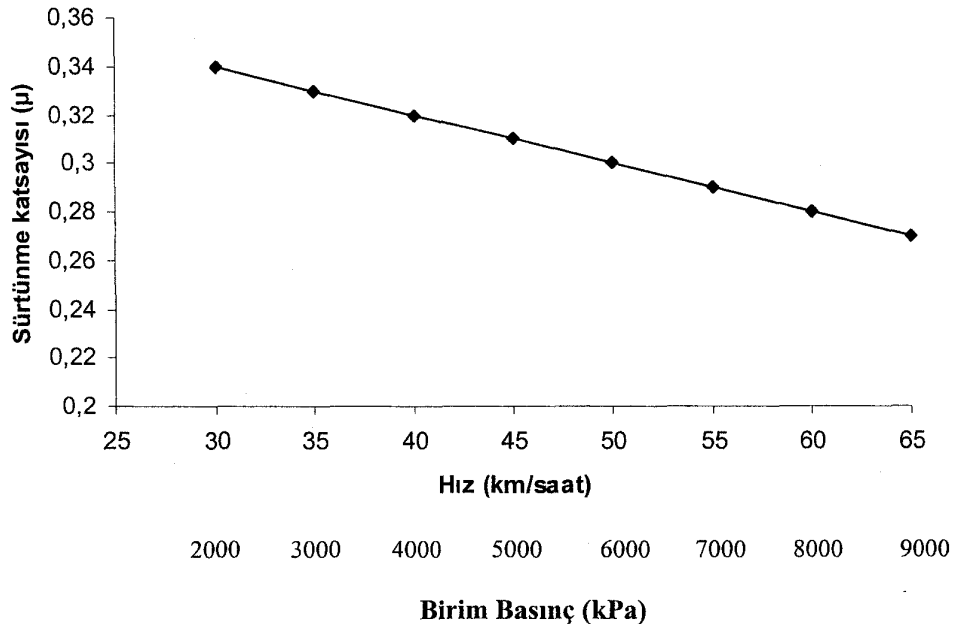
Şekil 5.5'de gösterildiği gibi, sürtünme statik veya dinamik olarak tanımlanabilir. Statik sürtünme katsayısı, sıfır hızındaki iki yüzeyin sürtünme değeridir. Dinamik sürtünme katsayısı ise, sıfırdan büyük hızlarda ölçülen sürtünme değeridir. Sürtünme katsayısı; sürtünme hızı, basınç ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlıdır [87]. İki yüzey arasındaki sürtünme hızının artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir. Uygulanan basınçta sürtünme katsayısı üzerinde benzer bir etki gösterir. Kinetik sürtünme katsayısının hız aralığının her noktasında hızın bir fonksiyonu olmasına karşılık, statik sürtünme katsayısının temas süresinin fonksiyonu olduğu görülmüştür. Statik sürtünme katsayısı-zaman ve kinetik sürtünme katsayısı-hız bağıntısı Şekil 5.6'de grafik halinde görülmektedir.



Şekil 5.6 a) Statik sürtünme katsayısının zamana göre değişimini b) Kinetik sürtünme katsayısının hıza göre değişimi

Islak balatalarda yüzey sıcaklığının 150°C üzerine çıkmasıyla sürtünme katsayısında önemli miktarda düşme olacaktır. Bu sıcaklık genelde "bozunum sıcaklığı" olarak anılır. Islak balatalarda genellikle aşınma hızları düşüktür [87, 66, 99].

Kuru balatalar, ıslak olanlara göre daha basit ve hafiftir. Şekil 5.7 basınç ve hızın, otomobil disk freni dinamik sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Islak balatalarda olduğu gibi dinamik sürtünme katsayısında artan basınçla sürtünme katsayısında düşme meydana gelmektedir.



Şekil 5.7 Kuru balatada basınç ve hızın sürtünme katsayısına etkisi

Pratikte sürtünme denilince akla gelen kinetik sürtünmedir. Aşınmada, enerji kaybı ve sıcaklık artışı gibi olaylar sürtünme sebebiyle oluşmaktadır. Bu duruma göre, uygulama alanlarını göz önünde bulundurarak sürtünmenin hem istenen hem de istenmeyen bir olay olduğu söylenebilir. Fren, kavrama ve sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında istenilen bir olay olduğu için, sürtünme artırılmaya çalışılır. Oysa diğer izafi hareket yapan bütün sistemlerde sürtünme istenmeyen bir olaydır ve azaltılması istenilir [91].

Buna göre sürtünme katsayısı (μ), sürtünme kuvvetinin değerini belirler. Sürtünme katsayısı, $0,001 < \mu < 10$ değerleri arasında değişir. Vakumda çok temiz yüzeyli metallerin birbirleri üzerinde kaydırılması sırasında sürtünme katsayısı $\mu > 10$ değerindedir. Çok hafif yüklü bir rulmanda ise $\mu = 0,001$ değerindedir. Birçok malzemenin havada birbiri üzerinde kayması durumunda sürtünme katsayısı ($0,1 < \mu < 1$) arasındaki değerlerde, yani daha dar bir aralıktaki değerlerdedir [98].

5.3. Aşınma

Karşılıklı yüzeylerin birbirleri ile etkileşimleri sonucu mekanik harekete bağlı olarak malzemede istenmeyen kopma şeklinde tanımlanan aşınma [2,83], sürtünme etkisinin de kaçınılmaz bir sonucudur. Aşınma sonucu birbiriyle çalışan yüzeyler arasında meydana gelen boşluklar çalışma sırasında istenilmeyen durumlara yol açarak o oranda da istenilen fonksiyonların yerine getirilmesini zorlaştırır [2].

Malzeme ve makine elemanlarının ömürlerine aşınmanın büyük etkisi vardır. DIN 50320'de aşınma cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak

ayrılması nedeni ile istenmeyen bir değişikliğin meydana gelmesi şeklinde tarif edilir [100].

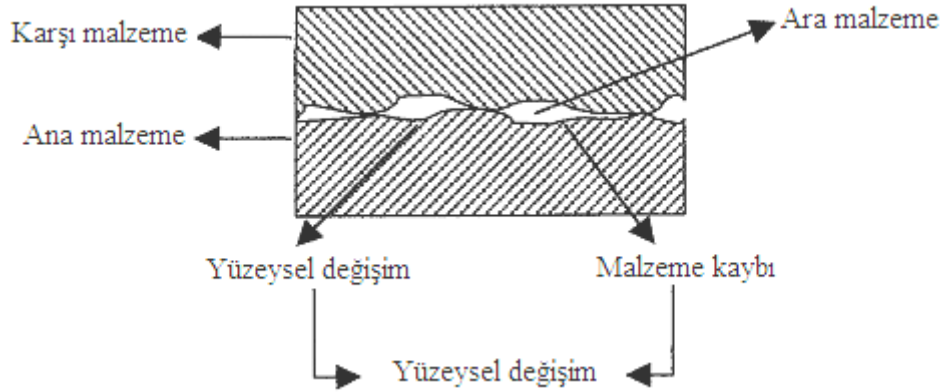
Aşınma mekanik, kimyasal veya elektro-kimyasal etkenlerin tribo-sistem içinde etkileşimleri ile meydana gelir. Aşınma iş sertleşmesi, oksitlenme, metal transferi, faz değişikliği, yağ ve kir filmleri gibi çok sayıda olaya bağlıdır. Pek çok malzeme çiftinin sürtünme katsayısı (μ) 0.1 ile 10 arasında değiştiği halde aşınma hızları çok farklı değerlerde olmaktadır. Malzemelerindeki yıpranmanın aşınma sayılması için;

- Mekanik bir etkinin olması,
- Sürtünmenin olması,
- Yavaş fakat devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi
- İsteğimiz dışında meydana gelmesi gerekir.

Bu şartlardan biri sağlanmıyorsa meydana gelen yıpranma aşınma değildir [101].

Tribolojik sistem, karşılıklı etkileşen elemanlarda hız, ısı şartları ve yükün etkisi ile sonuçlanan aşınma olayını inceler. Tribolojik sistem, Şekil 5.8’de görüldüğü gibi;

- Ana malzeme (aşınan)
- Karşı malzeme (aşındıran)
- Ara malzeme
- Yük, hareket (çevre ortamı) elemanlarından meydana gelir [98, 102, 103].



Şekil 5.8 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi [91, 98]

Aşınmanın incelendiği eleman esas sürtünme elemanıdır. Karşı eleman katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Eğer ortam vakumlu ise iyi temizlenmeyen yüzeylerde yağlayıcı özellik gösteren ara maddeler olabilir. Bu haldeki sürtünmeye teknik kuru sürtünme denir. Vakumsuz ortamda ise çevre devreye girer ve sistem elemanları sayısı üç tanedir. Eğer yağlama da var ise eleman sayısı dördür [97].

5.3.1. Aşınmanın Temel Unsurları

Aşınmanın başlaması ve devam etmesi için sürtünmenin olması gerekir. Sürtünen iki yüzeyin temas alanına mekanik etkileşim alanı denir. Bu alanın aşınmaya etkisi büyüktür. Yüzeylerin gerçek temas alanı görünen temas alanından çok küçüktür. Çok hassas işlenen yüzeylerde dahi yüzeylerde pürüzler bulunur. Yüzeylerin etkileşimi bu pürüzlerde olur. Pürüzler arası girintilerde ise etkileşim yoktur ve temas alanı dışında kalır. Yüklemin şekli ve değeri temas alanını, dolayısıyla aşınmayı etkileyen iki önemli faktördür. Yüklemin değeri arttıkça gerçek temas alanı artar. İki cisim birbirine göre kayma, yuvarlanma ve kaymalı-yuvarlanma hareketi veya çarpma hareketi yapabilir. Hareketin yönü ve hareketin miktarı aşınma miktarına ve aşınma cinsine tesir eder. Ayrıca sıcaklığın da aşınma üzerinde büyük etkisi vardır [104].

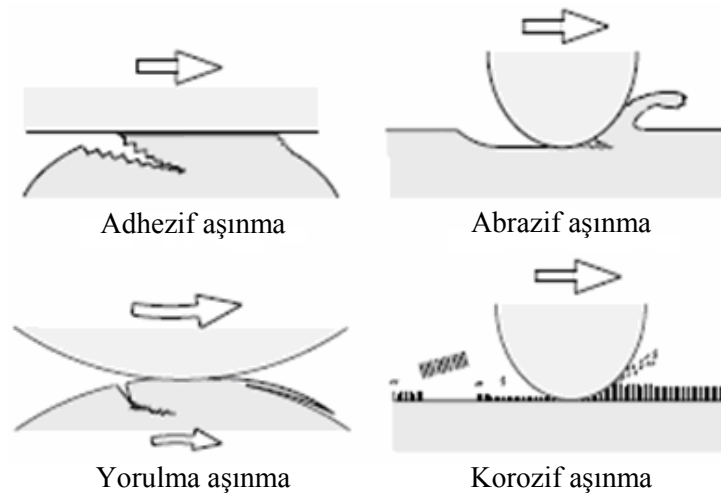
5.3.2. Aşınma Türleri

Sürtünerek çalışan malzeme çifti arasındaki karşılıklı zorlama neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri vardır ve bundan dolayı farklı sınıflandırılmaları gerekmektedir [2]. Aşınma sıcaklık, malzeme, yük, hız, yağlayıcı tipi, ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesinden etkilenmektedir [91].

Aşınma mekanizmaları genel olarak dört başlıkta incelenmektedir [81,83].

- Adhezif aşınma
- Abrasif aşınma
- Yorulma aşınması
- Korozyon aşınması

Evrensel bir aşınma türü olmadığı için, aşınmayı test edecek makine ve metot yoktur. Laboratuvar testleri, servis şartlarını taklit etmeyi amaçlar [105].



Şekil 5.9 Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi [83]

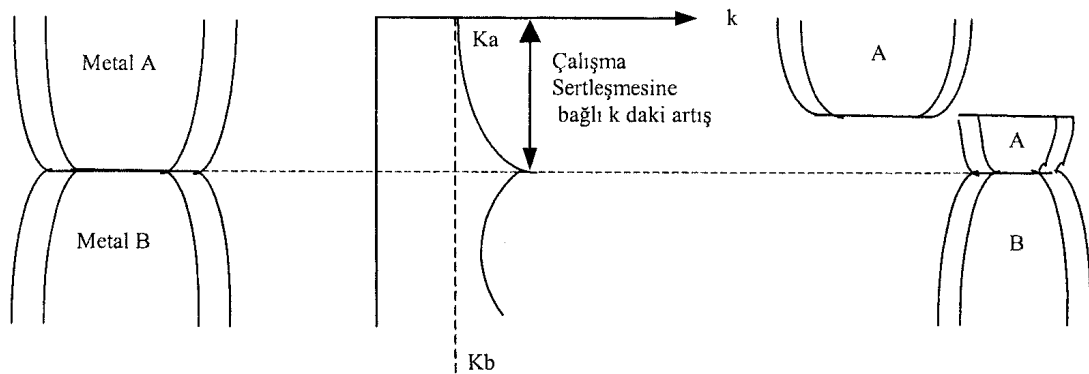
5.3.2.1. Adhezif Aşınma

Yapışma aşınma olarak da bilinen adhezif aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle adhezif aşınma hasarlarının hazırlayıcı etkisi bulunmaz [91].

Bu tür aşınma, iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sırasında yapışması ve kayması sonucunda küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşmaktadır. İki metal yüzeyi, birbiri ile temas ettiği taktirde, malzemelerin yüzeylerinde bulunan izler, düzensizlikler, malzeme yüzeyinde bölgesel yüksek basınçlar oluştururlar ve yüzey filmlerinin kırılmasına neden olurlar.

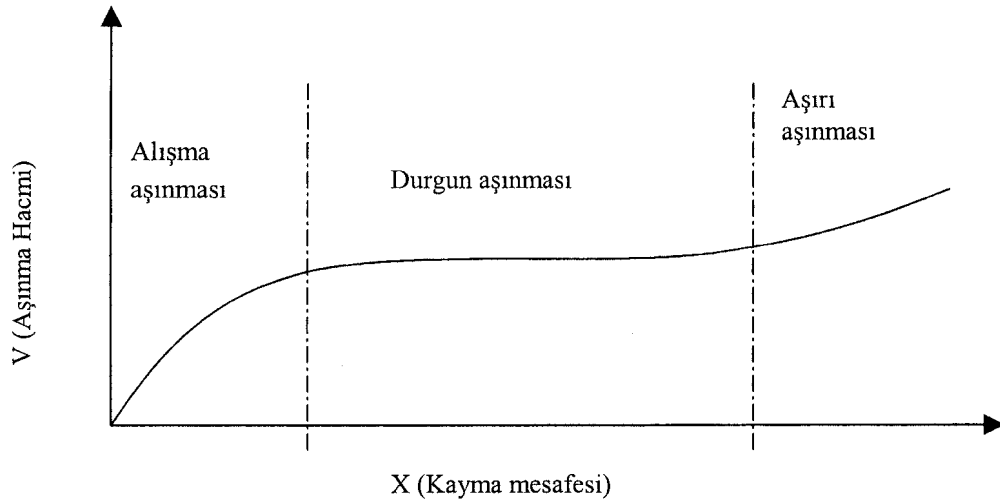
Temiz metal yüzeyleri birbirine temas ettirildiklerinde, yüzeylerdeki elektrostatik düzensizlikler sebebiyle kaynama için bir eğilim söz konusudur. Eğer bir yüzey diğer bir yüzey üzerinde hareket halinde ise, kaynamanın olduğu bölgeler kırılacaktır [89,90].

Bu aşınma çok düşük hızlarda da meydana gelmekte olup, uygulamada daha çok yüksek hız ve yüklerde görülen bir aşınma tipidir. Temasta olan yüzeyler birbirlerini pürüzlü noktalarda etkilerler. Gerçek temas alanı çok küçük olduğundan yüzeylere uygulanan yükün etkisi ile temas eden yüzeylerde temas artar. Temastaki pürüzler basıncı taşıyamayacak duruma geldiğinde akma sınırı aşılar ve plastik deformasyon meydana gelir [106]. Eğer malzemenin plastik olma kabiliyeti yüksek ise mikro adhezyon alanları hızlı bir şekilde temas yüzeyine tamamen yayılır. Malzeme molekülleri birbiri ile temasa geçerek temas noktalarında kaynak bağları meydana gelir. Yatay bir kuvvet ile yüzeyler birbirine göre hareket ettirilmek istenirse kaynak olan noktalar kesilebilir. Eğer kesilme tam ara yüzeyde gerçekleşir ise aşınma meydana gelmez. Eğer kopma yüzeylerden birinde gerçekleşir ise diğer yüzeye malzeme transferi olur. Sürtünmenin devam etmesi halinde transfer olan malzeme kopmak sureti ile aşınma ürününü meydana getirir [93, 97].



Şekil 5.10 Adhezif aşınma [92]

Şekil 5.10’da görüldüğü gibi A ve B atomları arasındaki yapışma yeteri kadar iyi ise, yumuşak olan A metalinden kopan parçacıklar taşınacaktır. Eğer, A ve B malzemeleri aynı ise, aşınma her iki yüzeyde de meydana gelecektir.



Şekil 5.11 Adhezif aşınmada aşınma bölgeleri

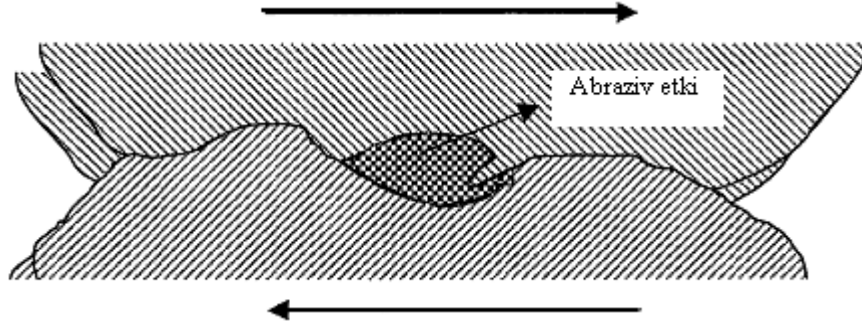
Şekil 5.11’de görüldüğü gibi, alışma aşınması üç aşınma bölgesinden meydana gelmektedir. Yüzeyler hareket ettirildiğinde başlangıçta yüzeylerin teması sivri tepeliklerde olduğundan yüksek gerilmeler meydana gelir ve aşınma hızla artar. Sivri noktaların düzleşmesi ile ve kopan partiküllerin yağlar tarafından uzaklaştırılması ile yüzey teması çok geniş bir alana yayılır. Dolayısıyla gerilme düşer ve aşınma miktarı azalır. Aşınmanın başlangıcında alışma aşınması (rodaj) denir. Bu aşınma halinde yüklerin yüksek olması tehlikelidir. Tüm yağlamalı sistemlerde alışma aşınması uygun şartlarda gerçekleşir ise faydalıdır. Alışma aşınması ile aşınma miktarı atılarak yüzeyler düzgünleşir. Dolayısıyla temas alanı artarak yük düşer. İkinci bölgedeki aşınmaya durgun aşınma denir ve uzun süre önemli bir aşınma meydana gelmez. Tezgâh ve makinelerin ömrünü bu aşınma tayin eder. Durgun aşınma sonunda aşırı aşınma meydana gelir. Bu aşınma durumunda malzeme çiftleri birbirine tamamen yapışabilir [90].

5.3.2.2. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, katı yüzey boyunca, katı yüzeye karşı hareket eden sert partikül ya da sert yükseltilerin oluşturduğu aşınma türüdür. Aşınma genellikle temas eden yüzeyler arasındaki sert partiküllerin ya da diğerine göre sert yüzeylerin relatif hareketlerinden dolayı meydana gelen malzeme kaybını içeren katı yüzeyin hasarı olarak tanımlanır [86].

Ayrıca, sürtünen iki yüzey arasına dışarıdan giren ya da iki yüzey arasında oksitlenmeden dolayı meydana gelen daha sert bir parçacığın yüzeylerde yaptığı hasar olarak tanımlanır. Bu sert parçacıklar, yüzeylerde taşlama işleminde olduğu gibi bir malzemeden parça kopartılması olayı ile benzer işlem gösterirler [92]. Yüzeylere baskı kuvveti uygulandığı zaman yüzey üzerindeki sert parçacık yumuşak yüzeye gömülür. Dolayısıyla yüzeyleri hareket ettirmek için bir kuvvet uygulandığı zaman bu sert parçacıklar yumuşak yüzeyi kazırlar. Aşınma

yumuşak ve sert iki yüzey arasında olduğu gibi sert taneciklerin yüzey üzerinde akması ile de gerçekleşir. Şekil 5.12’de tipik bir abrazif aşınma görülmektedir. Üç cisimli aşınmada yüzeyler arasındaki sert tanecikler tam bir kayma hareketi yapmaz, bazen de yuvarlanırlar. Bu nedenle aşınma daha yavaş olur. Metalin (aşınan malzeme) sertliği (Hm) ve aşındırıcının sertliği (Ha) olmak üzere H_m/H_a bir kriter olarak kullanılır. $H_m/H_a < 0.8$ ise metalde çok aşırı kazıma aşınması meydana gelir. Talaşlı imalatta istenen durum budur. $H_m/H_a > 0.8$ ise kazıma aşınması düşüktür. $H_m/H_a > 1$ ise metalde kazıma aşınması meydana gelmediği kabul edilir [24].



Şekil 5.12 Abrazif aşınma

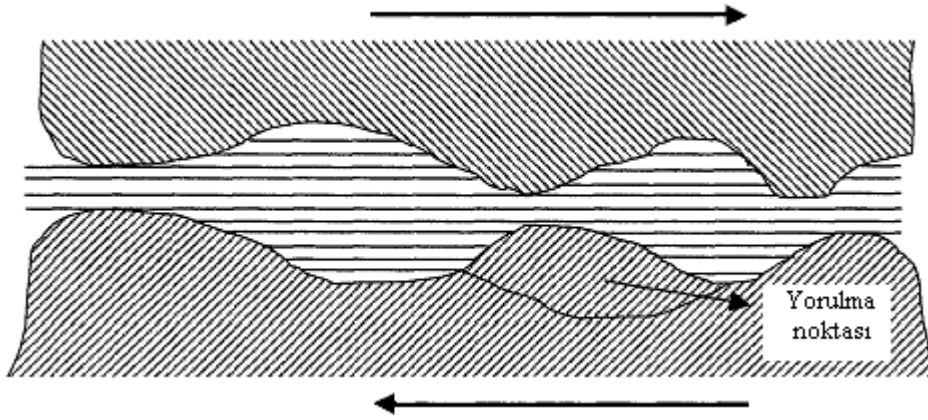
Kayma ve abrazif aşınma arasındaki fark çok belirgin değildir. Her ikisi de temiz yüzeylerde partikül (talaş) oluşmadan önce, meydana gelen deformasyona bağlı olarak bir aşınma alanı halkasının parçalarıdır [107]. Kayma aşınmasının ilerlemesine bağlı olarak abrazif duruma göre değişik bir aşınma boyutuna geçebilir. Örneğin, kaymanın ilk aşamalarında oluşan partiküller her iki kayma bileşenini de aşındırabilir [108]. Sert partiküllerin boyutunun kritik bir değer altına düşmesine göre abrazif aşınmadan kayma aşınmasına bir geçiş olduğu belirtilmiştir [109].

5.3.2.3. Yorulma aşınması

Adhezif ve abrazif aşınma mekanizmalarında aşınma partikülü oluşması için tekrarlı temasın olmasına gerek yoktur. Tekrarlı temasın olduğu yerlerde aşınma ürünlerinin oluşması için farklı bir aşınma mekanizması mevcuttur. Böyle tekrarlı temas halinde meydana gelen aşınma yorulma aşınması olarak adlandırılır [81,83]. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür.

Temas yüzeylerinde oluşan küçük çukurcuklar halinde kendini gösterir. Genellikle dişli çarklar, kamlar, rulmanlar gibi makine elemanlarında yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde oluşur ve zamanla yorulma sonucu zararlı hale gelirler [8]. Bu elastik ve plastik olayların devam etmesi sonucu mikro çatlaklar oluşur, çatlak büyümesi olur ve aşınma parçacıkları kopar. Burada harcanan enerji, malzemede belirli ölçüde tahribat yapar. Mesela,

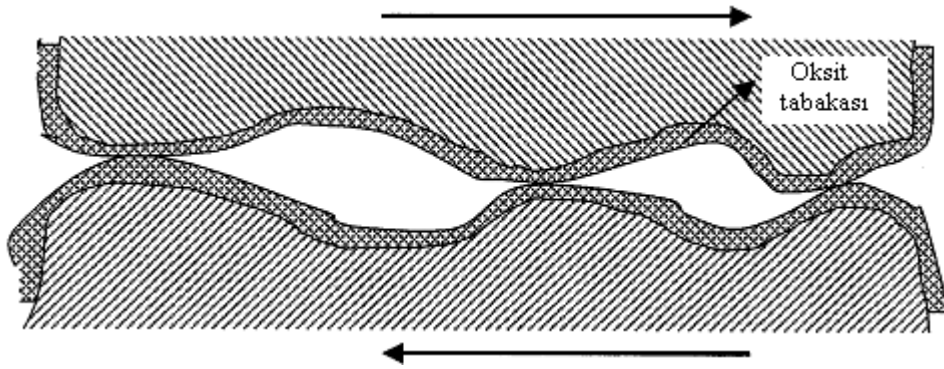
fazla zorlanan balata malzemelerindeki sürtünme ısını alması için endotermik işlem kullanımı (balata soğutma işlemi) gereklidir [88]. Şekil 5.13’de yorulma aşınması görülmektedir.



Şekil 5.13 Yorulma aşınması [98]

5.3.2.4. Korozi Aşınması

Temas yüzeylerinden en az birinin çalışma ortamında korozyona uğraması ve izafi hareket sebebiyle meydana gelen korozyon tabakasının silinerek alınması ve bunun devamlı olarak tekrarı ile meydana gelen aşınmadır. Sert olan ve koparak sürtünme yüzeyleri arasına giren parçacıklar abrazif bir tesir yaparak aşınmayı artırıcı rol oynarlar [93]. Şekil 5.14’de oksidasyon aşınma görülmektedir.



Şekil 5.14 Tribo oksidasyon aşınması [98]

Katı tanecik erozyonunda; katı bir cisim bir yüzeye dik olarak çarparsa ikinci yüzeyde plastik deformasyon veya kırılma meydana gelir. Çarpılan yüzey sünek ve çarpan cisim çok sert ise yüzeyde çukur oluşur. Malzeme kaybı meydana gelmeyebilir. Darbeler devam ettiği takdirde yorulmadan dolayı malzeme kaybı başlar. Erozyon aşınması tanecik darbe hızı arttıkça aşınmada lineer bir değişim gösterir. Sıvı tanecik erozyonunda ise; basınçlı sıvı jetleri katı cisim gibi davranır. Sıvı jetleri yüzeye çarptığı zaman ses dalgaları oluşur ve bunlar çekme-basma şeklinde yüzeyde yayılır. Sonuçta yüzeylerde plastik deformasyon ve pürüzler oluşur [100].

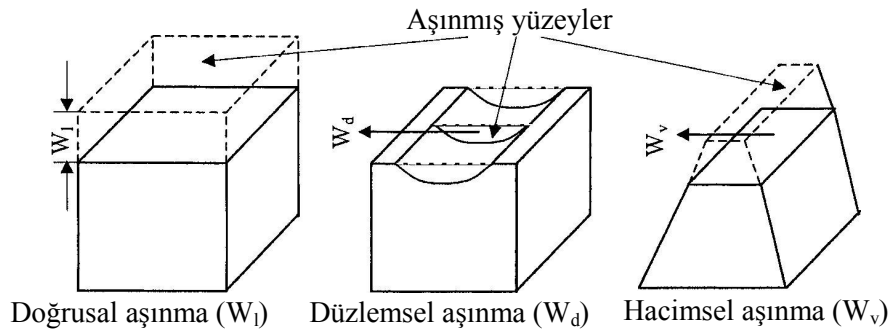
5.3.3. Aşınma Hasarları

Aşınma, makine ve konstrüksiyon tasarımında çok önemlidir. Temas eden yüzeylerde sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının azalmasına neden olmaktadır. Aşınma sorunlarının yaşandığı tesislerde meydana gelen aşınma maliyetini beş grupta toplamak mümkündür [90].

- Aşınmış ve dolayısıyla kullanılamaz duruma gelmiş parçanın ve yenisinin maliyeti,
- Aşınma yüzünden testteki işlem parametrelerinin meydana getirdiği maliyet
- Bakım ve onarım için tesisin durdurulması sebebiyle oluşan üretim kaybı ve dolayısıyla üretimin durdurulması ve yeniden başlatılması (ön ısıtma gibi) maliyeti,
- Aşınmanın önceden tahmin edilememesi yüzünden meydana gelecek kazaların sebep olduğu kayıplar,

5.4. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Malzeme kaybı olarak tanımlanan aşınmanın ölçümü, temas eden parçalardan birinde veya her ikisindeki hacim veya ağırlık kaybı esas alınarak yapılır. Aşınma doğrudan veya dolaylı ölçümlerle verilebilir. Aşınma deneyinde kullanılan deney sistemine bağlı olarak Şekil 5.15’de doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınma söz konusudur [98].



Şekil 5.15 Doğrusal, düzlemsel ve hacimsel aşınmanın belirlenmesi [98]

Endüstride kullanılan alet ve ekipmanlarda aranılan özelliklerden biri de servis ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyeti artırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir [91].

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

- Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin adhezif (metal-metal) aşınmanın değerlerinin ölçüldüğü deneylerdir.
- Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma deneylerinin ölçüldüğü deneyler.

ASLE (American Society of Lubrication Engineers, 1976) tarafından yüz kadar deney sistemi belirtilmiştir. Ölçüm yöntemlerinden; ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyo izotop metotları aşağıda sırayla açıklanmıştır [91].

5.4.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr. hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı, (gr/km), (mg/m) ile ifade edilir. Bir birim alan için hesap edilecekse, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir. Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntı şudur [91].

$$W_a = \frac{\Delta G}{d \times M \times S} \quad [5-2]$$

Burada;

W_a = aşınma oranı ($\text{mm} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$),

ΔG = ağırlık kaybı (mg),

S = kayma mesafesi (m),

M = yükleme ağırlığı (N),

d = aşınan malzemenin yoğunluğu (gr / cm^3), olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak gösterilir.

$$W_r = \frac{1}{W_a} \quad [5-3]$$

5.4.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımı ile $\pm \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir [91].

5.4.3. İz Değişimi Metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (Çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet vickers veya brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutundaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir [91].

5.4.4. Radyoizotop Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya α -parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarda kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir [91]

6. SÜRTÜNME MALZEMELERİ VE BALATALAR

6.1. Sürtünme Malzemeleri

Sürtünme malzemeleri, sürtünme hareketinin iletimi, ya da frenleme ve yavaşlatma için, sürtünme katsayılarının yüksek ve kayma özelliklerinin iyi olmasından dolayı kullanılırlar. Ancak sürtünme malzemelerinin fonksiyonlarını beklendiği gibi yapabilmeleri için, yalnız sürtünme katsayısının yüksek olması yetmez. Çok defa sürtünme katsayısının yüksek olmasından ziyade zorlanmalar altında ve özellikle yüksek sıcaklıklarda mümkün olduğu kadar sabit bir değeri muhafaza etmesi ve az bir dağılma göstermesi esas özelliği teşkil eder. Bundan başka aşınma miktarının az olması, karşı malzemenin çizilip hasara uğratılmaması, mekanik mukavemetin de maruz kalınan zorlamalara dayanabilecek değerde olması gerekir [113,93].

Türk standartlarında (TS), sürtünme malzemeleri için üç değişik standart hazırlanmıştır. TS 864'nolu standart debriyaj balataları için, TS 925 sürtünme kaplamaları adı altında, debriyaj balataları için kaplama malzemelerini sınıflandırmakta, TS 555 ise taşıtların fren balatalarını sınıflandırmaya yöneliktir [122].

6.2. Balatalar

Balatalar, TS 555'e göre sürtünmeli frenler için uygulanan fren kuvvetinin araçların tekerlekleri ile bağlantılı disk veya kampanalara sürtünme yolu ile aktarılmasını sağlayan elemanlar olarak tanımlanır [122].

Balata, pabuç ile kampana/disk arasındaki sürtünme görevini üzerine alır, pabuca yapıştırma veya perçinleme usullerinden biriyle tutturularak, pabuca bağlı olarak çalışır [113].

Frenlerde sürtünmenin önemi bilinmektedir. Bu nedenle sürtünme gereçlerinin istenilen özelliklerde bulunmaları gerekir. Sürtünme gereci düşükten, çok yüksek sıcaklıklara kadar sürekli değişebilen çalışma sıcaklıklarında ve yüksek hızlarda çalışmaktadır. Fren balatalarında gereç ne olursa olsun yüksek bir sürtünme katsayısı, üzerine uygulanan frenleme kuvvetlerine karşı dayanıklılık, iyi aşınma direnci ve sürtünme yüzeyine iyi oturma ilk bakışta istenilen özellik olarak karşımıza çıkmaktadır [123].

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

Metal esaslı balataların aşınma dayanımı ve yüksek ısı dayanımı, organik esaslı balatalara göre daha yüksektir. Hatta daha yüksek enerji absorbe edebilme kapasitesine sahiptir. Mesela; bazı boyutlardaki kavrama ve frenler için daha çok enerji absorbe edebilirler [115].

Sinterlenmiş sürtünme malzemeleri uygulama alanlarına göre kuru ve ıslak olmak üzere ikiye ayrılabilirler [88,91]. Islak şartlarda, güç değişimleri ve otomatik iletimleri sağlayan kavramalar şeklindeki sürtünme elemanları yağ içine daldırılır. Kuru şartlar altındaki sürtünme elemanları ise, (uçak frenleri ve standart kavramalar şeklindeki sürtünme elemanları) yağsız olarak direk kontak halindedir [115]. Islak balatalarda Tablo 6.1'de görüldüğü gibi ana madde bakır, kuru balatalarda ise, daha az bakır ve daha fazla demir kullanılır [87].

Tablo 6.1. Tipik ıslak ve kuru balata bileşimleri

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

Fren balatalarında kullanılan sinter malzemeleri ayrıca bakır ve demir esaslı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Bu gruplar da ayrıca karışimsız, grafit karışımı, seramik karışımı olmak üzere aralarında sınıflandırılabilir. Genellikle seramik karışımı malzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar, fakat ısı iletkenlikleri biraz daha azdır. Büyük uçaklarda demir esaslı veya özel balata alaşımları tercih edilir. Çünkü bronz esaslı malzemelerin 850 °C civarında yumuşamalarına karşılık, demir esaslılar 1100 °C'nin üzerine çıkabilirler [87].

Çalışma şartları göz önüne alındığında balataların ağır şartlarda çalıştığı söylenebilir. Özellikle ağır tonajlı yüksek hızlı taşıtlarda çalışma şartları daha da zorlaşmaktadır. Yüksek hızlarda taşıtın ani olarak durdurulmasında veya uzun süreli frenleme durumunda balata yüzeylerinde 700 °C ye kadar sıcaklık yükselmeleri mümkün olabilmektedir. Çalışma şartlarının ağır olması, balatalardan istenen özellikleri artırmaktadır. Çalışma şartları dikkate alınarak değişik balata malzemeleri geliştirilmiştir [119].

6.3. Balata Oluşumunda Kullanılan Malzemeler ve Fonksiyonları

Endüstri ve otomotiv uygulamalarındaki sürtünme malzemeleri üç ana gruba ayrılır. Bunlar organik, yarı metalik ve asbestsiz balatalardır. Tüm bu çeşitlerde performans karakteristikleri dikkate alınırken onların içindeki maddelerin benzerlikleri ile gruplanırlar. Otomotiv endüstrisinde kullanılan sürtünme malzemelerini oluşturan maddeler benzer özellik ve kullanım amacına göre dört sınıfta kategorize edilebilir [26]. Bunlar;

- Takviye malzemeleri
- Dolgu maddeleri
- Bağlayıcı Maddeler
- Sürtünme ayarlayıcı maddelerdir.

İstenen özelliklerde bir balata üretilebilmesi için ana grup olarak bağlayıcılar, takviye malzemeleri, dolgu maddeleri ve sürtünme ayarlayıcılar kullanılır [1]. Renklendiriciler, temizleyiciler gibi diğer katkı maddelerini dolgu malzemeleri arasında düşünebilir. Balata katkı maddeleri istenen fiziksel ve mekanik özellikleri sağlamak, sürtünme-aşınma ve diğer özellikleri iyileştirmek amacıyla kullanılır [111].

6.3.1. Takviye Malzemeleri (Fiberler)

Elyaf lar ana yapı oluşturabilmek için bir yandan diğer yana uzanan örülmüş veya üst üste bindirilmişlerdir. Bu işlemde fren balataları için gerekli güç, sağ lamlık ve rijitlik sağlamak amaçlanır. Ek olarak eğilme gerilmelerini artırır. Elyaf sürtünme malzemelerini kuru karışım durumunda, ön şekillendirmede ve yüksek sıcaklıklarda termal dengede tutar [26].

6.3.1.1. Asbest

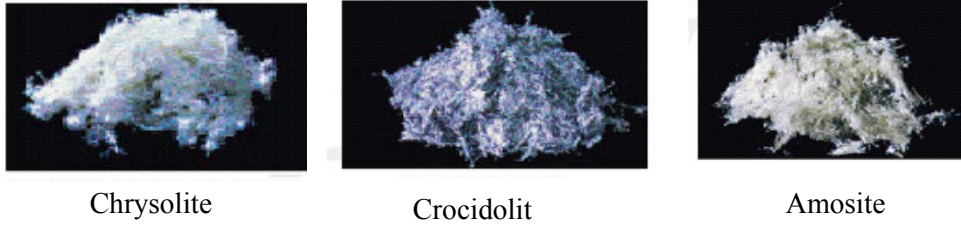
Asbest, endüstriye 19. asrın sonunda girmiş olmakla beraber tarihi kayıtlar insanoğ lunun bu minareli 2000 yıldır tanıdığını göstermektedir. Yunanlılar M.S. 46’da asbest elyaf larını lambalarda fitil olarak kullanmış lar, fitiller yağ içinde muhafaza edildiğ i sürece tükenmeden yanarak ışık kaynağ ı olmasından dolayı “asbestos-asbestinon” adı verilmiştir [128].

Asbest; kömür, demir cevherleri v.s. gibi doğ al bir mineraldir. İşlendikten sonra elde edilen asbest elyaf yumağ ı görünüş ündedir. Ateş e karşı dayanıklılığ ı kadar önemli olan diğer özellikleri gerilme direnci, esnekliğ i ve bükülebilme özelliğ idir. Elastikiyeti yumuş ak ipeksi görünüş ünden dolayı “mineral ailesinin ipeğ i” ismi verilmiştir. Asbestin teknolojik değ eri baş lıca üç özelliğ inden kaynaklanmaktadır.

1. Ateş e dayanıklıdır.
2. Elektrik ve ısı yalıtımı yüksektir.
3. Çimento ürünlerine katıldığında beton içindeki çelik kafeslere benzer şekilde özel bağ layıcılık özelliğ i gösterir.

Böylece, örneğ in fren balatalarında ve yer karolarında baş ka malzemelere karış tırılan asbest ileri derecede dayanıklılık sağlayabilmektedir [128]. Asbest elyaf ı kristal yapıya sahip olan magnezyum silikat, kalsiyum-magnezyum silikat ve kompleks sodyum-demir silikat bileş imindeki bir grup mineralin adıdır [129]. (Si_4O_{11}) anyonu, asbest $[CaMg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2]$ mineralinde bulunur ve uzun anyon zincirlerinin birbirlerine aş ağı yukarı paralel uzamasından dolayı elyaf yapısına sahiptir. Bu özelliğ inden dolayı dolgu malzemesi ve ateş e dayanıklı oluş u nedeniyle yalıtkan olarak kullanılır. Asbest kanserojen bir bileşiktir. Solunması veya yiyeceklerle alınması kansere neden olur [130].

Özgöl ağırlığı 2,1–2,8 gr/cm³ ve ergime noktası 1150–1550 °C olarak bilinen asbest genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi serpantin grubu veya yaygın adıyla krizotil asbest olarak adlandırılmaktadır. İkinci grup ise amfibal asbest veya diğer adıyla hornblent asbest olup bu grupta tremolit asbest yanında en fazla kullanılan asbest çeşitleri “mavi asbest” denilen krosidolit ve amositir. En önemli asbest mineralleri şunlardır; Serpentine Chrysolite (Krizotil) beyaz ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Amosite (Amosit) kahverengi ($(\text{FeMg})_6\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), Tremolite (Tremolit) ($2\text{CaO} \cdot 5\text{MgO} \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Anthophyllite (Antofillit) ($(\text{FeMg})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), Actinolite (Aktinolit) ($(\text{CaMgFe})_6\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), Crocidolite (Krosidolit) mavi ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{FeO} \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) [131].



Şekil 6.1 Çeşitli asbestler [131]

Asbest ve sağlık riski noktasında konuya bakıldığında, asbestle günlük yaşamda adeta iç içe girmiş durumdayız. Asbest tekstilden ilaç sanayine, kimyadan gıda sanayine, uzay teknolojilerinden otomotiv sanayine kadar kullanılmaktadır. Lif yapıya sahip olan asbest vücuda solunum, ağız ve sindirim yolu ile alınabilir. En tehlikeli sayılan solunum yolu ile alınmasıdır. Asbeste maruz kalmakla asbestos corns, asbestosis, mesolheima, mide, gırtlak ve akciğer kanseri gibi hastalıklar gelişebilir [125, 132]. Son 80 yıldır dünyada tartışma konusu olan asbest uluslararası sağlık örgütlerinin girişimleri ile son 10 yılda ulusal ve uluslar arası mahkemelerde kullanımı yasaklama kararları alınmıştır. Dolayısıyla asbestin özelliklerini karşılayacak asbeste alternatif malzeme araştırmaları hız kazanmıştır. Asbestin sıcaklığa dayanımına ilaveten balatalarda kullanımıyla ilgili faydalı özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sıcaklık dayanımı 650 °C’ye kadar kararlı, 650 °C üzerinde katı silikonlara ayrışır.
- Ayrışma ürünleri asbestten daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir.
- Düşük ısı iletkenliği
- Yeterli mukavemet
- Esneklik
- Kesmeye dayanıklı
- Yüksek yüzey alanı
- Ergimiş veya çökelti şeklinde reçine ve kauçuğu emer
- Yüzey reçine ve lastik tarafından kolayca ısıtılır ve yapışır.
- Belirli elyaf boyu aralığında makul fiyatlarla yeterince bulunabilir.

Asbestin en önemli özelliği ocaktan çıkarıldığında desteleri oluşturan elyafçıkların içi boştur ve bu özellik asbestte mükemmel işleme özellikleri kazandırır. Elyaf desteleri sürtünme malzemesi üretiminde bağlayıcı reçinenin kürleşmesi sırasında meydana gelen uçucu ürünleri havalandırabilir.

Asbeste alternatif düşünülen malzemeler, kompozite iyi sürtünme aşınma özellikleri kazandırmalıdır. Bunun için genellikle tek bir alternatif yerine yeni malzemelerin bir harmanı da kullanılmaktadır. Malzemeler kullanılan üretim yöntemine, ürünün kullanım şartlarına ve müşteri tarafından kabul edilebilecek fiyat göz önüne alınarak seçilmelidir [111,133].

6.3.1.2. Cam elyafı

Cam elyafı, eritilmiş cam karışımının basınçlı hava ile sıkıştırılması sonucu özel olarak yapılmış bölmelerden aşağı akıtılarak elde edilir [8,134]. Bu işlem sırasında erimiş cama, dolomit ve alümina katılarak istenilen fiziksel özelliklerdeki lif, belirli bir hızda masuralara sarılmak sureti ile çekilerek çekim hızına bağlı 10–15 µm arası kalınlıklara sahip elyaflar elde edilir.

Tablo 6.2’de yüzde miktarları görülen karışım genellikle 1500–1550 °C sıcaklıkta eritme işlemine tabii tutulur. Eriyen mamul silikon karbitten yapılmış bir kaba konularak, lif oluşumu için, 3/16”~1/4” ölçülerinde delikleri olan kaptan akıtılır. Bu akan sıvı cama hava verilerek sıvı camın soğuması ve lifin elde edilmesi sağlanır. Daha sonra elyafların bağlayıcı bir madde ile teması sonucu kek adı verilen madde ortaya çıkar. Liflerin yoğunluğu 2,5–2,54 gr/cm³ arasında değişir. Ticari amaçlı elyaflar hasır şeklinde örülerek yalıtım malzemesi olarak veya bağlayıcılarla birleştirilerek değişik amaçlar için kullanılır [8].

Asbestsiz sürtünme malzemelerinde ana yapının mukavemetini arttırmak amacı ile %10–15 oranında cam elyafına yer verilmiştir. Ayrıca cam elyafın ısı iletiminin az olması asbest liflerine iyi bir alternatif olması ve fleksibl özelliğinden dolayı sürtünme malzemelerinde kullanılabilir yapıya sahiptir [8,135].

Tablo 6.2 İki ayrı yapıdaki cam yünü ve cam elyafın kimyasal analizi [8]

% Analiz							
Cam Yünü	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O
İnce	42,4	4,4	8,35	28	15	0,25	0,29
Kaba	60,3	4,2	12,5	14,3	3,9	0,16	0,29
Cam Elyafı	41	4,5	0,17	35,3	14,1	1,6	0,82

Fenolik balata üretimi için cam elyafın takviyesi amacı ile “E” camı elyafından “PH2” kırılmış demetleri geliştirilmiştir. Yüksek integrite, kolay akma, iyi işlenebilirlik, iyi mekanik dayanım özelliklerine sahip olup, silan esaslı bağlayıcısı, fenolik reçineler ile uyumludur. PH2 kırılmış demetleri TS-EN-150 9002’ye göre üretilmektedir. Kırma boyu 3- 4,75 mm, elyaf çapı 13µm nem miktarı max. 0.07’dir [136]. Cam elyafın fiziksel, mekanik ve termal özellikleri Tablo 6.3’de verilmiştir [138].

Tablo 6.3 Cam elyafın fiziksel, mekanik ve termal özellikleri [138]

Özellik	Cam sınıfı			
	A	C	E	S
Fiziksel özellikler				
Yoğunluk	2,5	2,49	2,54	2,48
Mohs sertlik	—	6,5	6,5	6,5
Mekanik özellikler				
Çekme mukavemeti (MPa)				
22°C sıcaklıkta	3033	3033	3448	4585
371°C sıcaklıkta	—	—	2620	3758
538°C sıcaklıkta	—	—	1724	2413
Elastisite modülü (GPa)	—	6,9	72,4	85,5
Kopma uzaması (%)	—	4,8	4,8	5,7
Termal özellikler				
Lineer ısı genleşme katsayısı ($m/^{\circ}C$) $\times 10^{-6}$	8,6	7,2	5	5,6
Isıl iletkenlik katsayısı ($W/m^{\circ}K$)	—	—	10,4	—
Özgül ısı (KJ/kgK)	—	0,212	0,197	0,176
Yumuşama sıcaklığı ($^{\circ}C$)	727	749	841	—

Cam elyafın kullanıldığı balata kompozisyonlarında ön şekil verme aşamasında malzemelerin kuru olmasından dolayı problemler olduğu, bunu gidermek için harmanlama sonrasında %3 alkollü su püskürtülebileceği belirtilmiştir [8].

Cam elyafının takviye elemanı olarak kullanıldığı balatalarda işletme şartlarına uyum gösterebildiği fakat uygulamalarda ses çıkardığı gözlenmiştir. Balataların ses yapma özellikleri, balata kompozisyonu ve üretim proses özellikleri ile yakından ilgilidir. Literatürde Phenol-formaldehit reçine oranının azaltılması ile iyileştirilebileceği belirtilmiştir [139].

6.3.1.3. Kevlar (aramid)

Kevlar, ticari olarak mevcut olan en mukavim ve rijit organik elyafıdır. Kevlar, tescilli marka olup para aramid elyaflara Du-Pont firmasının verdiği ticari addır. Sıcaklığın artması ile bu özellikler tedricen azalır fakat 425 °C sıcaklığa kadar, hatta kısa süre içinde 530 °C dereceye kadar faydalı takviye sağlar. En az bu özellikleri kadar kevların doğal tokluğu, önemli sayılabilecek kopma uzaması ve kolaylıkla eğilebilmesi diğer önemli özellikleridir. Ayrıca pullama ve karıştırma gibi yüksek kayma gerektiren işlemler sırasında uzunluğunu muhafaza etmektedir. Bu özellikler ürünün sürtünme aşınmasında önemli özelliktir [51]. Kevlar, poly (p-phenylene terephthalamide) polimer yapısındadır. Aşağıdaki özellikler kevların balatalardaki kullanılabilirliğini sağlamıştır.

- Yüksek mukavemete sahip olduğundan balatalarda takviye elemanı olarak kullanılır.
- Tokluk değerinin yüksek olması veya kırılğan bir yapıya sahip olmadığından, balata kompozisyonunun hazırlanmasında karıştırma prosesinde dirençlidir.
- Termomekanik stabilitesi iyi olduğundan yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır.
- Statik sürtünme özelliklerine sahip olduğundan sürtünme davranışını iyileştirir.
- Korozyon direnci yüksektir, karşı malzemeyi (disk) kısa sürede aşındırmamaktadır.
- Nem ve sıcaklık değişimlerinden boyutsal olarak etkilenmemektedir.
- Düşük yoğunluğa sahiptir. Balataların hafif olmasını sağlar.

Kevlar fiberler ticari olarak Kevlar 29 ve Kevlar 49 olarak iki şekilde temin edilebilir. Kevlar 29 orta derecede elastisite modülüne ve yüksek mukavemete sahiptir. Kevlar 49 yüksek elastisite modülü ve yüksek mukavemete sahiptir. Kevlar 49 özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tavsiye edilmektedir [137]. Kevlar fiberlere ait mekanik ve termal özellikler Tablo 6.4’de verilmiştir.

Kevlar (aramid) fiberler uzun yani sürekli elyaf ip şeklinde üretilir. Çeşitli uzunluklarda kesilerek doğranmış elyaf oluşturulur. 0,5–8 mm arasındaki elyaflar ve elyaflara bağlı birçok ince elyafçıklardan oluşan bir şekli de pulp olarak adlandırılır. Elyafçıklar karmaşık kıvrılmış dallanmış ve çoğunlukla şerit şeklindedir. Bu elyafımsı yapı elyaf özellikleri üzerinde en büyük etkiye sahiptir [121,51].

Kevlar pulp, elyaf uzunluğu 0,5–8,0 mm aralığında elyaf çapı 12–15 mm, yoğunluğu 1,44 gr/cm³ bozulma sıcaklığı 425 °C, sürtünme katsayısı 300 °C’ye kadar kararlı, sıcak aşınma dayanımı mükemmel, aşındırıcılığı düşük, sıcak konsantre asit ve bazlar hariç, ketonların, alkollerin ve hidrokarbonların çoğuna kimyasal olarak dayanıklı ve sürtünme dayanımı mükemmel bir malzemedir.

Tablo 6.4 Kevlar fiberlerin özellikleri [51]

Özellik	Kevlar 29		Kevlar 49	
	Abbott	Sturgeon	Abbott	Sturgeon
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,44	1,44	1,44	1,44
1.5 denier-fiber çapı (μm)	12	11,9	12	11,9
Nem absorpsiyonu (%)	3,9	6	4,6	3,5
Kırılma Mukavemeti (Gpd)	3275	2785	3034	2758
Kopma uzaması (%)	3,9	4	2,3	—
Eğilme modülü (GPa)	53,1	—	105,5	—
Eksenel basma modülü (GPa)	40,7	—	75,8	—
Dinamik modülü (GPa)	96,5	—	137,9	—
Eğmeli yorulma direnci (çevrim)	—	—	—	200
Max. Çekme mukavemetinin %90'ında sürünme (cm/cm)	—	—	—	0,0011
Sürtünme katsayısı (μ)	—	—	—	0,46(0,41)

6.3.1.4. Taş yünü

Taş yünü İzocam Ticaret ve Sanayi A.Ş. firması tarafından üretilmektedir. Üretici firma ürettiği taş yününi daha çok yüksek sıcaklıklarda ısı izolasyonunda kullanılmak için üretmektedir. Taş yünü değişik boy elyaflardan oluşmakta, diğer malzemelerle birlikte karıştırıldığında parçalanarak içyapıya dağılmaktadır. Üretici firma tarafından verilen fiziksel ve kimyasal özellikler aşağıdadır [140].

Tablo 6.5 Taş yününiün özellikleri

Özellik	
Yoğunluğu	105 kg/m ³
Ergime sıcaklığı	> 1150 °C
Azami kullanım sıcaklığı	900 °C
Yangın dayanımı	Yanmaz
Asit dayanımı	İyi
Baz dayanımı	İyi
Elyaf çapı	8–20 μm
Kimyasal bileşimi	%45 SiO ₂ , %12 Al ₂ O ₃ , %10 Fe ₂ O ₃ , %9 CaO, %11 MgO, %2 Na ₂ O, %1,5 K ₂ O, %2,5 TiO ₂

6.3.1.5. Basarit

Basarit; endüstride yaygın olarak kullanılan bazalt taşı yünü parçalanarak üretilmektedir. Basarit tescilli marka olup Deutsche Basaltsteinwolle GmbH firmasının kullandığı ticari addır. Ergitilerek 1 m uzunluğa kadar elyaf yapılabilen bazalt, sıcaklığa dayanıklı, ısı ve ses izolasyonuna uygun, korozyona dayanıklı, sert ve elastiktir. Basarit bazaltla aynı özellikleri taşır. Lif çapı ve boyu ile karışım oranı iyi ayarlandığında balata mukavemeti ve korozyon dayanımını artırmaktadır. Basarit lif uzunluğu 1 mm, lif çapı $>3 \mu\text{m}$, yığılma yoğunluğu $0,4 \text{ g/cm}^3$, yoğunluğu $2,65 \text{ g/cm}^3$, asit, alkali ve çözücülerle kimyasal reaksiyona dayanımı iyi, 1000°C sıcaklığa kadar kullanılabilen bir malzemedir. Karıştırılabilir, istenilen lif uzunluğunda üretimi mümkün ve sürtünme malzemesi endüstrisinde kullanıma uygundur. Fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmiştir [111,133].

Tablo 6.6 Basarit'in özellikleri

Özellik	
Yoğunluğu	$2,65 \text{ gr/cm}^3$
Sürekli kullanım sıcaklığı	$<1000^\circ\text{C}$
Yumuşama sıcaklığı	$\sim 1100^\circ\text{C}$
Yanma reaksiyonu	Tutuşmaz
Asit dayanım	Orta
Baz dayanımı	İyi
Kimyasal bileşimi	$\%42\text{--}48 \text{ SiO}_2$, $\%9\text{--}14 \text{ Al}_2\text{O}_3$, $\%1\text{--}3 \text{ TiO}_2$, $\%11\text{--}14 \text{ Fe}_2\text{O}_3$, $\%10\text{--}14 \text{ MgO}$, $\%10\text{--}14 \text{ CaO}$, $\%2\text{--}4 \text{ Na}_2\text{O}$, $\%1\text{--}3 \text{ K}_2\text{O}$

6.3.1.6. Çelik elyaf (Çelik yünü)

Çelik elyaf uygun takviye etme özelliği, iyi ısı ve sürtünme kararlılığı, ekonomik oluşu ve karıştırma esnasında parçalanmaya karşı direnci sayesinde en çok kabul gören alternatif malzemelerden biridir. Korozyon dezavantajına rağmen yumuşak çelik elyaf daha kolay işlenebilir ve ucuz olması sayesinde tercih edilmektedir. Uzun elyaflar daha iyi takviye sağlarken kısa elyaflarda kalıplamada daha kolaylık sağlar. Uzun elyaflar ticari araçlarda disk balata uygulamalarında başarı ile kullanılmaktadır [125].

Yoğunluğu $7,86 \text{ gr/cm}^3$, elyaf uzunluğu 1-5 mm, elyaf kalınlığı $16 \mu\text{m}$, genişliği $50 \mu\text{m}$, çekme dayanımı 2600 MPa, elastiklik modülü 200 GPa, Mohs sertliği 5'tir [125,29].

6.3.1.8. Mika Grubu

Mika, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip levhamsı, kompleks bileşimli hidroalüminyum silikat minerallerine verilen isimdir. Mineralojik olarak yerkabuğunun ağırlıkça %3.8'ini oluşturan mikalar özellikle asidik magmatik ve metamorfik kayalarda bol olarak bulunur. Mika grubu mineralleri arasında endüstriyel öneme sahip ana mineral muskovittir. Bazı alanlarda muskovit yerine kullanılan filogopit ise ikinci derece öneme sahip bir mika grubu mineralidir. Biyotit ise düşük izolasyon özelliği ve yapısındaki demirin kolayca oksitlenmesi nedeni ile endüstride özel kullanım yerlerinde önem taşımaktadır [142].

Mika; mika gurubu mineraller silikat mineralleri olup pulsu yapıdadırlar. Sürtünme malzemelerinin yapımında en çok kullanılan mika minerali muskovit ($K_2.Al_4.(Al_2Si_6O_{20}).(OH)_4$) olarak bilinen mineraldir. Yoğunluğu 2,6-3,2 gr/cm³, sertliği 3 Mohs'dur. 500 °C sıcaklığa kadar kararlı olup bu sıcaklığın üzerinde ayrışır. Çekme dayanımı 255-295 MPa, elastiklik modülü $1,7 \times 10^5$ MPa olup kimyasal ortamlara dayanıklıdır. Rengi yeşilden kırmızıya değişik olabilir [111,143].

Vermikülit; mika mineralinden "(Mg, Ca)_{0,7}.(Mg, Fe, Al)₆.[(Al, Si)₈O₂₀].(OH)₄.8H₂O" [74] ve Biyotit $K_2.(Fe_2+.Mg)6.Al_2 Si_6O_{20}.(OH)_4$ den üretilir. % 11-21 su içerir. Isıtıldığında hacimce % 1500 oranında genişler. Pulsu yapıdadır. Isı izolasyonunda da kullanılır [111,143].

Wollastonit; bir kalsiyum silikattır ($CaSiO_3$). Yoğunluğu 2,8-2,9 gr/cm³, sertliği 4-5 Mohs olup rengi beyaz, gri veya sarımsı beyazdır [111,141].



Şekil 6.2 Wollastonit'in görünüşü [145]

Attapulgit; bir magnezyum silikat mineralidir ($Mg_5.Si_8.H_{10}.O_{26}.4H_2O$). İğnemsî kristallerden oluşur. Bu kristallerin boyu 0,5 µm, şekil oranı 20:1'dir [120,111].

6.3.2. Dolgu maddeleri

Dolgu maddeleri istenen sürtünme özelliklerini bozmadan balatayı geliştirmek, hacim doldurmak ve maliyeti düşürmek amacıyla katılır. İşletme şartlarında balatalarda meydana gelebilecek yüzeyden kopmalar, oluşan ısının homojen bir şekilde dağılması ve sürtünme katsayısının ayarlanması, mukavemetin ve korozyon direncinin artırılması ve balatanın renklendirilmesi dolgu maddelerinin yardımıyla sağlanmaktadır [119].

Genellikle sürtünmeye etkisiz kabul edilir fakat sürtünme ayarlayıcı bir maddede olabilirler. Dolgu maddesi olarak alçı, barit, kil veya kalsiyum karbonat gibi genellikle düşük fiyatlı mineraller kullanılmaktadır. Doğal barit (BaSO_4) yaygın bir dolgu maddesidir ve genellikle sürtünme katsayısına etkisiz kabul edilmektedir [111,41]. Genelde ideal bir dolgu maddesinden istenen bazı özellikler aşağıda verilmiştir.

- Takviye edici özelliği olmalıdır.
- Kalıcı olmalıdır. Yani, su ve diğer sıvılardan etkilenmemelidir.
- Kararlı olmalıdır. Yani, polimer stabilesini bozmamalıdır, polimerlerle temas eden kimyasal maddelerin ışığın ve ısının etkisiyle çözünmemeli, düşük yağ ve su absorpsiyonuna sahip olmamalıdır.
- Mekanik özellikleri iyileştirmelidir. Abrasif aşınma direncini arttırma, boyutsal stabiliteyi artırma, alevlenmeye karşı direnci arttırmalıdır.
- Maliyeti düşürmelidir [119].

6.3.2.1. Alçı

Alçı taşı tabiatta mineraller halinde bulunur. Bu mineral genellikle şist, kireç taşı ve dolomit ile birlikte bulunur. Çoğunlukla beyaz, gri, sarı ve pembe renklerde karışım halinde bulunan masif alçı taşı yumuşak bir yapıya sahiptir [146]. Kimyasal olarak %93,8 CaSO_4 , %6,2 H_2O 'dan oluşmaktadır. $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ formülü ile gösterilmekte ve yarım sulu alçı olarak da bilinmektedir. Su katıldığında $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ olarak sertleşmektedir. Yoğunluğu $1,23 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Alçının ortalama tane büyüklüğü $167 \mu\text{m}$ 'dur [147,148].

Alçı 0-50 °C ısıtıldığında bir miktar genleşir, sıcaklık arttıkça bünyeden su kaybı başlar ve hacimde küçülme gösterir. Alçı, ısı iletkenlik değeri çok düşük bir malzemedir ve bu değer yoğunluk ile orantılıdır. Yeni geliştirilen sürtünme malzemelerinde %50'lere kadar varan oranlarda yer verilerek dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır [8,146].

6.3.2.2. Talk

Talk formülü $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ olan bir magnezyum silikat mineralidir [144]. Talkın ortalama tane büyüklüğü 102 μm , yoğunluğu 2,7 gr/cm^3 , yanma kaybı %7,05–7,3, özgül ısı 0,870 KJ/kg, sertlik 1-2 Mohs, tipik kimyasal analizi; %42-54 SiO_2 , %7-25 Al_2O_3 , %0,94-1,25 Fe_2O_3 , %0,2-15 CaO , %23-32 MgO , olarak verilmektedir. Kâğıtta, plastiklerde, kozmetiklerde vb. dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır [149,150].

6.3.2.3. Barit

Barit minerali ($BaSO_4$) baryum (Ba) elementinin ve bileşiklerinin ana kaynağını teşkil eder. Ana mineral olan barit özellikle petrol endüstrisinde çok büyük kullanım yerine sahiptir ayrıca cam ve boya sanayi ile bazı sanayi dallarında dolgu malzemesi olarak da kullanılır. Saf barit %58.8 Ba (veya %65.7 BaO ve %34.3 SO_3) dan oluşur. Özgül ağırlığı 4,5 gr/cm^3 olup, içerisindeki katkı maddeleri bunu büyük ölçüde düşürebilir. Genelde en çok rastlanan renkleri beyaz, açık sarı ile koyu gri siyah arasındadır. Suda ve asitte kolay çözünmez, bu üstünlüğü bakımından kimyasal etkilere karşı mukavimdir. Sürtünme malzemelerinde önemli kullanım yerine sahiptir, genelde %5–10 arasında kullanılmaktadır. Yeni geliştirilen sürtünme malzemelerinde alçıya göre barit'in daha dengeli olmasından dolayı %50–55 arasında yer verilmektedir [8].

6.3.2.4. Kizelgur (Diatomit)

Kieselguhr “Diatomit” diye de bilinen sedimanter kayalara Almanca ve Fransızca literatürde verilen isimdir. Diatomit minerali tatlı veya tuzlu göl sularında yaşayan diatome adı verilen mikroskobik canlıların fosilleşmiş silisli kabuklarından oluşmuştur. Yurdumuzda Kütahya Alayunt'da bulunur. Kimyasal bileşimi %86,16 SiO_2 , %3,5 Al_2O_3 , %1,43 Fe_2O_3 , kalan Na_2O , K_2O , CaO , MgO , TiO_2 'den oluşur [151]. Beyaz renkli, yoğunluk 2,1–2,2 gr/cm^3 , ergime noktası ~1590 $^{\circ}C$ 'dir. Mohs sertliği 1,5'dur. Kizelgurun ortalama parçacık büyüklüğü 234 μm olarak ölçülmüştür. Sanayide dolgu malzemesi, izolasyon malzemesi, filtre malzemesi, olarak, ayrıca gübre ve tarım ilaçları sanayinde kullanılır [111,150].

6.3.2.5. Kil

Kil, püskürük kayalar içerisinde veya saf halde bulunan feldspatların zamanla karbonik asit'in etkisiyle çözülüp değişmesinden oluşur. Esas maddesi, içerisinde su bulunan silikattır. Doğadaki killerin çoğunun içinde kalker, mika ve daha birçok maden oksitleri bulunur [152].

Genellikle 0,002 mm den daha küçük tanelidir. Kili meydana getiren sulu SiO_2 ve Al_2O_3

olarak isimlendirilen bu maddeler, tabakalar meydana getirerek birleşirler ve kil minerallerini meydana getirirler. Böylece kil minerallerinin esas bileşimini oluştururlar [153].

Kil doğada toprak ve taş halinde bulunur. Bu toprağa her yerde saf olarak rastlanmaz. Genellikle demir hidroksit, kum, kalker, karbon ve manganez gibi maddelerle karışık olarak bulunur. Kilde bulunan maddelerin birçoğu renk verici olduğundan; kil'in rengi sarı, kırmızımsı, yeşilimsi, mavimsi, gri, esmer veya siyah olur. Arı killerin rengi beyazdır. Böyle killere "kaolin" denir, porselen eşyalar kaolinden yapılır [154].

6.3.3. Bağlayıcı maddeler

Bağlayıcılar balata bileşenlerini kullanım öncesinde ve kullanım sırasında bir arada tutan yapıştırıcılardır. Bağlayıcı olarak birçok termoset reçineyi kullanmak mümkündür. Doğal veya sentetik kauçuk da bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bağlayıcılar tek tek kullanılabilir olmakla beraber birden fazla bağlayıcı birlikte de kullanılmaktadır [43]. Fakat bunlar arasında fenol formaldehit reçine adı verilen termoset reçineler otomotiv sektöründe kullanılan en yaygın bağlayıcıdır.

Bu reçinelerin en büyük özelliği sıcaklıkta sertleşmeleridir. Termoset malzemelerin özelliği erime derecesi yanma derecesinin üzerindedir. Fenol (Phenol) (C_6H_6O) ve formaldehit (Formaldehyde) (CH_2O) kalıp pudrası halinde kullanılır, polimerleştirme reaksiyonu, polimerin normal sıcaklıklarda katı olduğu fakat ısı ve basınç etkisi altında akabileceği bir basınç etkisi altında durdurulur. Karışım basınç altında kalıplanır, sürtünmenin azaltılabilmesi için bir miktar grafitte yer verilir. Fenol formaldehitler yüksek sıcaklıklarda kullanışlıdır çünkü sürekli bir yapı kafesine sahip oldukları için moleküller arasında kayma olmaz. Böylece şekil değiştirme sıcaklığın yükselmesine bağlı değildir. Fenol formaldehit reçinenin içerisinde %40 fenol, %22 formaldehit, %4 kresol, %34 su, çözücü ve diğer dolgu maddeleri bulunmaktadır [8].

Reçinelerde gerekli şartlar sağlanıp (katalizör, ısı, basınç vs.) polimerizasyonun tamamlanarak reçinenin sertleşmesine kürleşme denir. Kürleşme termoset bir reçinenin özelliklerinin geri dönülmez bir şekilde kimyasal bir reaksiyonla değişmesidir. Fenolik reçineler yoğunlaşma polimerizasyonu ile sertleşir, polimerizasyon sonrası yan ürün olarak su oluşur [155].

Kürleşme, kürleştirici maddelerin katılması sıcaklık ve basınçla veya sıcaklık ve basınç olmadan meydana gelir. Fenolik reçinelerin kürleşme şartları 232 °C'ye kadar sıcaklıklarda birkaç dakikadan birkaç saate kadar olabilir. Yüksek sıcaklık dayanımının elde edilebilmesi için fenoliğin kalıpta başlayan kürleşmesinin tamamlanması gerekmektedir. Bunun için kalıplanmış parçalar 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hacmine bağlı olarak belli bir süre fırında tutularak kürleşmenin tamamlanması sağlanır [88]. Son kürleme işlemi ısı işlemi olarak da adlandırılır ve dayanım özelliklerini iyileştirmek için uygulanır [111,156].

6.3.4. Sürtünme ayarlayıcı maddeler

Sürtünme ayarlayıcı katkı maddeleri sürtünme katsayısını değiştiren maddelerdir. Bunları abrasif olan ve olmayan şeklinde ayırmak mümkündür. Toz halde alümina gibi abrasif özellikli malzemeler, sürtünme katsayısını artıran grafit gibi katı yağlayıcılar ise sürtünme katsayısını istenen düzeye getirmek için katılan bileşenlerdir. En çok çeşide sahip olan bileşen türü sürtünme ayarlayıcılardır. Bunlara aşınma özelliklerini ve mekanik özellikleri iyileştirmek için ilave edilen elastomerler, fenolik sürtünme parçacıkları, fenolik reçineler için kürleştiriciler ve diğer sürtünme artırıcı ve azaltıcı katkılar da dahildir. Pirinç, çinko veya diğer metal tozları abrasif özellikleri kontrol etmek için katılmaktadır. Metalik tozlar ısı iletimini artırdığı gibi fren zayıflama dayanımının iyileşmesinde faydalı olduğu da ifade edilmiştir [1, 111].

Grafit gibi sürtünme ayarlayıcılar aynı zamanda bir yağlayıcı olarak balataları kalıptan çıkarmaya da yardım etmektedir. Bir katkı maddesi birden çok etkiye sahiptir. Sürtünme ayarlayıcı maddeler aynı zamanda dolgu maddesi ve temizleyici madde etkisi de yaparlar.

Sürtünme ayarlayıcı olan yağlayıcıları kuru ve yağ yağlayıcı olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Grafit ve molibden disülfid yaygın olarak kullanılan kuru yağlayıcılardır. Kurşun ise önceleri yaygın olarak kullanılan yağ bir yağlayıcı (kurşun 327 °C sıcaklıkta eridiği için yağ yağlayıcı olarak sınıflandırılır, çünkü bu sıcaklık sürtünme yüzeyinde oluşan sıcaklığın oldukça altındadır) olmasına rağmen son yıllarda çevreye etkisi ve sağlık riski nedeniyle kullanımından vazgeçilmiştir. Yağlayıcılar sürtünme yüzeyinde bir film oluşturarak sürtünme katsayısını azaltmaktadırlar [111].

6.3.4.1. Grafit tozu

Sürtünme malzemelerinde önemli yer tutan grafit, şekilli karbonun bir dalıdır [8,157]. Tek kristalden oluşan grafit pulcukları mükemmel uzama özelliğine sahiptir. Balatalarda sürtünme olayına etkisi büyük olan grafitin, yapısı nedeniyle yüzeylerde küçük kontak alanları oluşturmakta buna bağlı yüzeylerden yırtılmanın az olmasını sağlamakta ve makaslama değerinin düşük olması sonucu sürtünmenin azaltılmasında da büyük rolü olmaktadır [8].

Grafit iki boyutlu halkalar şeklinde dizilmiş karbon atomu tabakalarından oluşan parlak, yumuşak bir malzemedir. Tek grafit kristalinin sertliği yönle değişir. Katmanlara paralel ölçüm yapılırsa yumuşaktır. Bunun yanında katmanlara dik olarak ölçüm yapılırsa grafit kristali hemen hemen elmas kadar serttir. Grafit kolayca talaşlı işlenebilir, sıcaklığa ve ısıl şoka dayanıklı, iyi bir ısıl iletken, kuvvetli oksitleyici maddeler hariç hemen hemen tüm korozyif maddelere dayanıklı ve kimyasal olarak inerttir. Grafitin özgün bir özelliği sıcaklık arttıkça dayanımının artmasıdır. Düşük sürtünme uygulamalarında sıkça kullanılır. Grafit ve diğer malzemeler

arasındaki sürtünme katsayısı karşı malzemeye, yüzey pürüzlülüğüne, kayma hızına, yük ve çevre şartlarına bağlıdır. Grafitin sürtünme katsayısı 0,1-0,15 civarındadır. Bu düşük sürtünme katsayısı grafitin tabakalı yapısına bağlanmıştır. Grafit şeklindeki karbon ince tabakalardan oluşur. Tabakaların basma dayanımı yüksek olmasına rağmen birbiri üzerinde kolayca kayabilirler. Basmaya karşı yüksek dayanım temas alanının küçük olmasını sağlarken kolay kayma düşük bir tabakalar arası kayma dayanımı sağlar. Bu özelliğiyle balatalarda sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılır. Yoğunluğu $2,1 \text{ gr/cm}^3$, ısı iletkenliği 5.000 W/mK 'dir [158].

Grafit sıcaklık değişimlerinden de büyük ölçüde etkilenir, öyle ki sürtünme katsayısı oda sıcaklığında yaklaşık 0,45 iken 1500°C 'ye kadar olan sıcaklık artışlarında sürtünme katsayısı değeri giderek azalmakta ve 0,2 değerine düşmektedir. Bu değişime sebep olarak, yükselen sıcaklıklarda bireysel kristaller arasındaki bağın zayıflaması buna bağlı sürtünen yüzeyler arasında yırtılma dayanımının az olmasıdır [112]. Sürtünme malzemelerinde önemli yer tutan grafitin, balatalarda yüzde miktarı uygun değerlerde tutularak, sürtünme katsayısı dağılımının istenilen düzeyde olması sağlanır.

6.3.4.2. Bronz tozu

Bileşimi ağırlıkça %80–83 Cu, %20–17 Sn olan bronzdan üretilmektedir. Bronz tozunun tane büyüklüğü kullanım amacına göre değişik ölçülerde olabilir. Yoğunluğu 8 gr/cm^3 , ergime sıcaklığı 900°C , ısı iletim katsayısı $86,0\text{--}116,0 \text{ W/mK}$ olarak verilmektedir [149,159].

6.3.5. Temizleyiciler

Temizleyiciler; balata bileşimine karşı malzemeye yapışıp katılaşmış olan bağlayıcıların kazınıp sökülmesi amacıyla katılmaktadır. Çoğu balatalar kendi kendine temizleyicidir. Temizleyiciye ihtiyaç duyulan bazı bileşim ve kullanım şartlarında genellikle pirinç tozu, bronz tozu, çinko tozu gibi metalik malzemeler kullanılmaktadır [160].

6.3.6. Renklendiriciler

Sürtünme malzemelerinde, malzemenin dış görünüş rengini değiştirerek göze daha iyi görünebilmesi ve konstrüksiyonda uyum sağlaması açısından renk verici maddeler kullanılır. Malzemenin dış görünüş renginde genellikle sarı, kırmızı ve siyah olanlar tercih edilir ve %1 oranında kullanılır. Siyah demir oksit (Fe_3O_4), sarı demir oksit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), kırmızı demir oksit (Fe_2O_3) ve karbon siyahı sıkça kullanılan renk vericilerdir [160].

6.3.7. Madeni dolgu malzemeleri

Sürtünme malzemelerinde (balatalarda) yapıyı homojenleştiren, ısı iletim katsayısını düzenleyen, aşınma ile sürtünme katsayısının dağılımına etkisi olan bu malzemeleri, metal yünleri ve metal talaşları oluşturur. Genellikle metal yünü olarak demir ve alüminyum yünleri, talaş için de pirinç, bakır ve alüminyum metallerinin talaşları kullanılır. Bu malzemelerin kompozit içerisindeki oranları ve sertlikleri iyi seçilerek karşı malzemeye zarar vermemesi gerekir [8].

6.4. Balata Çeşitleri

6.4.1. Organik balatalar

Organik esaslı sürtünme malzemelerinde ana yapıyı, dolgu maddeleri, bağlayıcı malzemeler ve özel katkı maddeleri oluşturmaktadır. Sürtünme malzemesinin çalışacağı yere göre bu maddelerin cinsi ve oranları değişebilir. Dolgu malzemesi olarak genellikle elyafli ve elyafsız dolgu malzemeleri kullanılır. Bu dolgu malzemeleri yapılarına göre organik esaslı, mineral esaslı ve madeni esaslı olmak üzere üç değişik yapıda bulunabilir.

Organik esaslı dolgu malzemeleri; selüloz, pamuk ve grafit'tir. Harman içerisinde %10-15 arasında değişmektedir.

Mineral esaslı dolgu malzemeleri; asbest, kaolin ve talktır. %20–80 arasında kullanılmaktadır.

Madeni esaslı dolgu maddeleri; metal yünü, pirinç, bakır ve alüminyum gibi malzemeler olup oran olarak %10–50 arasında kalmaktadır. Organik esaslı sürtünme malzemelerinde bağlayıcı eleman olarak kauçuklar, reçineler ve emprenye edici maddelere de yer verilmektedir. Bunların harman içerisindeki oranı malzeme özelliğine göre %20–40 arasında değişmektedir.

6.4.1.1. Asbest Esaslı balatalar

Ana malzeme olarak asbest kullanılmaktadır. Mineral yapısına göre asbest grubu magnezyum silikat'tır. Asbestli balatalarda balatanın sürtünme katsayısı kullanılan asbest miktarına, karıştırılan dolgu maddelerine ve bağlayıcı maddelere bağlıdır. Sıcaklığa dayanıklılık ve iyi sürtünme özellikleri, asbest için gösterilecek en iyi hususlardır. Balatanın mukavemeti ve ısı iletimi, karışıma çinko ve pirinç gibi malzemelerin katılması ile artırılır [116].

6.4.1.2. Asbestsiz Balatalar

Bağlayıcı malzeme olarak asbestin yerine geçebilecek birçok farklı elyaf, iğnesel yapılı madde ve diğer takviye malzemesi denenmiştir. Çoğunda elyaf ve diğer takviye malzemelerinin bir harmanı kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan elyaflar cam elyaf, doğranmış cam elyaf, mineral yünü ve muhtelif ticari markalı yünler, metal, seramik, para aramid (Kevlar), selülozik ve diğer organik elyaf türleridir. Asbestsiz balatalarda Wollastonit gibi iğnesel ve Attapulgit gibi pulumsu mineral esaslı takviye malzemeleri de kullanılmaktadır [111, 6].

Sürtünme malzemelerinin aşınma özellikleri inorganik bileşimlerin uygun seçimi yoluyla yükseltilebilmektedir. Genel olarak balata malzemelerinin ısı absorpsiyonu, sıcaklık genişmesi ve dayanıklılığı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Sürtünen malzemedeki ara yüzeyi, dengesiz olmayan ısısal tepkimelerin yüksek basınç ve sıcaklığın bulunduğu yer olarak düşünülebilir. Çoğu sürtünme ek katkı malzemelerinin fren performansı üzerindeki etkileri, yetersiz temel bilgiden dolayı doğru olarak önceden tahmin edilememektedir. Çoğu fren balata formulasyonları ilk deneyim ve test sonuçları ile yorumlama ve yanlışlar üzerinde ortaya çıkarılmıştır. Bir formulasyon malzeme içeriğinin ötesinde kullanılan bileşenlerin uygunluğunu da içerir [118].

6.4.1.3. Yarı Metalik Balatalar

Yarı metalik balatalar diğer asbestsiz balatalardan ayrılır. Bunun nedeni ise sınırlı bir bileşim değişimine sahiptirler. Bunların kendine has sürtünme ve aşınma özellikleri vardır. Yarı metalik balataları, ağırlıkça %65'ini demir (%10-25'ini çelik yünü ve kalanını genellikle gözenekli demir tozu) yaklaşık %10 ısıya dayanıklı fenolik tip bağlayıcı reçine ve yaklaşık %15'i grafitten oluşmaktadır [118].

6.4.2. Anorganik Balata

Bugün kullanılan arabaların ağırlıklarının ve hızlarının arttırılması ile ölçüleri aynı kalmış olan frenlerden istenenler de epeyce artmıştır. Normal olarak 300–350 °C sıcaklığa tahammül eden organik balatalar bu ısıya çevrilen enerji miktarına dayanamayacak duruma getirilmişlerdir. Bu yüzden sıcaklığa ve yüksek zorlamalara tahammül edebilecek olan anorganik yani sintermetal ve seramik balataların geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır [116].

Başka bir metalik sürtünme malzemesi dökme demirdir. Bu dengeli malzeme bazı eski demir yolu sisteminde fren pabucu olarak kullanılmasına rağmen, dökme demirin fren balatası olarak kullanımının yeni otomotiv uygulamalarında yeri yoktur. Bununla birlikte dökme demir çoğunlukla otomotiv fren sistemlerinde karşı yüzey malzemesi olarak kullanılmaktadır [118].

Bu tip sürtünme malzemeleri, organik sürtünme malzemelerinin yüksek sıcaklık değerlerinde yapılarının bozulmasından dolayı istenilen değerleri karşılamaması ve sürtünme katsayısının azalışı karşısında yeni bir malzeme olarak geliştirilmiştir. Yüksek basınç ve sıcaklıklara karşı koyabilecek tarzda geliştirilen ve metal ile metalsel alaşımların tozlarını ergitmeden, basınç ve sıcaklık yardımıyla çeşitli şekillerde üretilen bu malzemelere uygulanan ısıtıl şişlem nedeniyle sintermetal denilmektedir.

Metalik fren balataları genellikle bakır veya demir esaslıdır. Çoğunlukla performansı arttırmak için inorganik katkı maddeleriyle birlikte katı faz sinterlemesi uygulanarak üretilir. Bu malzemeler yüksek güç girişi olan uygulamalar için geliştirilmiştir. Katı fazda sinterlenmiş bronz ve mullite balatalar yarış arabalarında ve yüksek hızlı demiryolu araç frenlerinde, grafitle sinterlenmiş demir esaslı balatalar ise bazı ağır iş makinelerinde kullanılmaktadır [6].

Sintermetal ile yapılan ısıtıl şişlem, kullanılan metal tozlarının ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda yapılarak elde edilen malzemenin, organik sürtünme malzemelerine göre daha düşük sürtünme katsayısı değeri vermesi yanında, geniş sıcaklık bölgeleri ile basınç değerlerinde bu sürtünme katsayısının sabit kalmasını sağlar.

Sinterlenen tozlar genelde 1-4 µm boyutlarında metal tozlarıdır ve bu tozların presleme işlemi oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Son zamanlarda toz halinde metal tanecikleri yüksek basınç ve erime sıcaklığının hemen altındaki yüksek sıcaklıklarda preslenmektedirler. Bu yolla şekillendirilen madeni tozlardan sinter metal denilen yeni metaller elde edilmektedir. Bu metot ile sert madenler de preslenmektedir. Sinter metodu demir olmayan metallere de tatbik edilebilmektedir. Bu toz metalürjisi ile sinterdemir, sinterbronz ve karasinter balatalar elde edilmektedir.

Metalik balataların diğerlerine olan avantajları daha büyük hızda enerji absorbe etmeleri ve daha fazla aşınma mukavemetine sahip olmalarıdır. Bunlar daha yüksek sıcaklıklara dayanabildikleri gibi, daha fazla ısı iletirler. Sürtünme katsayıları sıcaklık ve basınçla daha az değişir ve sıcak, soğuk, yağ, tuzlu su gibi etkenlerden daha az etkilenir [87].

Fren balata malzemelerinde kullanılan sinter malzemeleri genellikle bakır (bronz) asıllı ve demir asıllı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Bu gruplarda ayrıca karışimsız, grafit karışimli ve seramik karışimli olmak üzere aralarında sınıflandırılabilirler [70, 99, 115].

Madeni esaslı sürtünme malzemelerinde kullanılan metal tozlarının üretiminde kullanılan dört çeşit temel yöntem vardır. Tüm metal tozları genelde bu toz elde etme yöntemleri kullanılarak üretilir. Metal tozlarını elde etme yöntemleri aşağıda verilmiştir.

Mekanik Yöntemler; Mekanik yöntemler olarak bilinen kaba ve ince oğtme yönteminde metal tozlarını elde etmek için metal freze, torna ve eğeleme işlemine tabii tutularak talaş kaldırılır. Daha sonra bu talaş, küçük zerrelere haline getirilir. Mekanik yöntemle

ekonomik olarak toz imali için, kimyasal bağları zayıf ve kayma sistemi az olan karışık kristalli yapılarda malzeme ile çok sert ve gevrek olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır. Bu yolla elde edilen tozların önemli bir uygulama alanı yoktur. Hammadde kırılğan ise, önce kaba, sonradan ince öğütme işlemine alınarak toz malzeme elde edilir [8, 68].

Granülasyon yöntemi; Granülasyon yönteminde eritilmiş metal ince eleklerden geçirilerek su içerisine dökülür. Aniden soğuyan metal damlaları hemen katılaşıp metal tozlarını oluşturur. Bu tozlar kaba taneli olup kullanım yerleri oldukça azdır.

Pulverizasyon yöntemi; Pulverizasyon yönteminde ise sıvı hale getirilen metal dar kesitli bir püskürtücüden basınçla geçirilirken bu metal üzerine su buharı, basınçlı soğuk hava veya başka bir gazın sevk edilmesi sonucu toz elde edilir. Bu tozun tane büyüklüğü ve diğer fiziki özellikleri üretim faktörleri değiştirilerek belirlenir [8, 68].

Fiziki yöntem; Genelde kaynama sıcaklığı düşük olan metal tozlarının hazırlanmasında uygulanır. Bu metoda metalin önce buharlaştırılması, daha sonra bu buharın yoğunlaştırılması ile metal tozları elde edilir. Yukarıda değinilen metal tozu hazırlama yöntemleri genelde sık kullanılan yöntemlerdir [8,68].

6.4.2.1. Bakır Esaslı Balata Malzemeleri

Bakır esaslı malzemeler genellikle sıvı veya yarı sıvı sürtünmenin olduğu yerlerde kullanılır. Kuru sürtünmede ise ancak ısı etkisinin daha hafif olduğu yerlerde kullanılır [88, 99]. Servis sıcaklığının 1000 °C den yüksek olduğu yerlerde demir matrislerin kullanılmasına rağmen, yüksek sürtünme şartlarında yaygın olarak kullanılan malzemeler bakır ve bronzdur [114]. Tablo 6.8'de bazı ülkelerde kullanılan kuru ve yağlı sürtünme için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri görülmektedir [88].

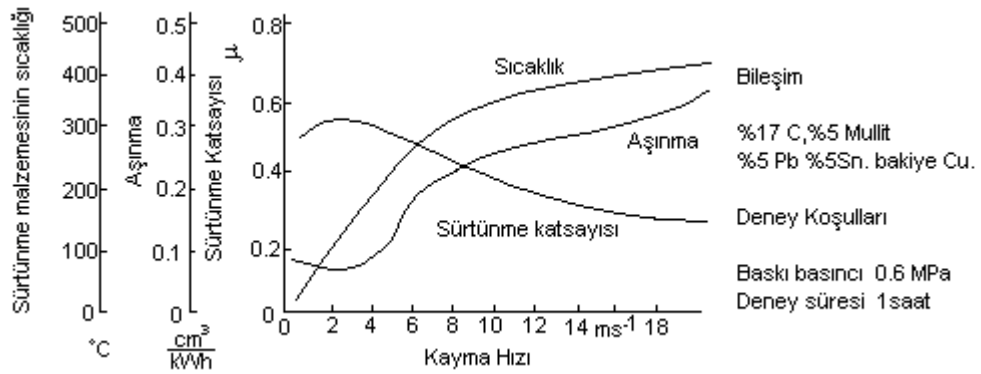
Tablo 6.8 Bazı ülkelerde kullanılan kuru için bronz esaslı malzemelerinin bileşimleri [88]

Ülke	Fe %	Cu %	Sn %	Grafit %	Pb. %	SiO ₂ %	MoS ₂ %	Diğer %
A.B.D	5–10	60–75	4–10	3–10	7,5	2–7	3–12	-
Almanya	7,9	67,8	5,2	6,5	1,8	3,3	<4	%3Al ₂ O ₃
Avusturya	8	68	5	6,2	1,5	2,5	<3	%3Al ₂ O ₃
B.D.T.	4–7	65–80	7–9	3–8	5–10	2–4	-	-
İngiltere	5–10	Bakiye	3–10	0,8	1–10	1,5–5	<4	-
İsveç	4,5	68,5	8	6	3	4	6	-
İtalya	7	68	5,5	6	9	4,5	-	-

Bakır esaslı (bronz) balata imali için bronz madeninin elde edilmesinde, bakır-çinko alaşımı oranı 9:1 olarak alınmaktadır. Bazı durumlarda çinkonun yerini kalay almakla beraber, bu sürtünme katsayısına hiçte iyi tesir etmez. Sinter bronz balataların imalinde, kayma özelliğini verecek olan grafit tozu, molibdensülfid, kalay, bizmut ve sürtünme özelliğini meydana getirecek olan silisyum, demir tozu ve koruna tozu gibi dolgu maddeleri kullanılmaktadır [116]. Tablo 7.9'da bronz esaslı balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri, Şekil 6.3'de ise % 17 grafit, % 5 kurşun, % 5 mullite, % 5 kalay ve % 63 bakır içeren malzemenin, sürtünme ve aşınma karakteristikleri görülmektedir.

Tablo 6.9. Bronz esaslı sinter balata malzemelerin kullanım karakteristikleri ve özellikleri [88]

Kullanım Sahası	Baskı basıncı $p < 5 \text{ MPa}$ (10 MPa) Kayma hızı $v < 40 \text{ m/s}$ $p \cdot v < 1,5 \text{ KW/cm}^2$
Sürtünme katsayısı	0,15-0,50
Aşınma	$p \cdot v = 0,8-1,0 \text{ KW/cm}^2$ olan orta yüklerde $0,5 \text{ cm}^3/\text{KW}$
Sıcağa Dayanımlılık	Sürekli çalışmada max.450 oC Kısa süreli çalışmada max.650 oC
Özgül ağırlık	5-7 gr/cm ³
Isı iletme kabiliyeti	6-35 W/mK
Sertlik	10-50 BSD



Şekil 6.3 Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma karakteristiği [88]

Sürtünme ve aşınma miktarı, kayma hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak değişir. Eğriler, yalnızca kullanım için bir fikir vermek üzere örnek olarak alınabilir. Bu malzemenin karşısında dökme demir, alaşımsız ve düşük alaşımlı ıslah çelikleri kullanılabilir [88].

Bakır esaslı sinterlenmiş malzemenin avantajları literatürde geniş olarak yer almaktadır. Fakat avantajları yanında dezavantajları da vardır [99].

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

Bu malzemeler pahalıdır ve az kalay ihtiva eder. Fiyatları, üretimin toplam maliyetinin % 50' sinden fazlasını kapsar. (Eğer kalay kullanılırsa oranı % 10' u geçmez)

Ukrayna Bilimler Akademisi Metal Seramik ve Özel alaşımlar Enstitüsü tarafından yeni bir bakır esaslı sinterlenmiş malzeme geliştirilmiştir. Deneyler gerçek şartlarda test edilmiştir. Bu malzeme kalay içermez ve sahip olduğu özellikler mevcut sürtünme malzemelerinden daha iyi çıkmıştır. Ancak diğerlerine göre daha pahalıdır. Bu yeni malzemenin üretimi, geleneksel sürtünme malzemelerinden farklı değildir. Sadece, yüksek sinterleme sıcaklığı (950-980 °C) ve sinterleme sırasında basınç (20-30 kp/cm)²'dir. Bu yeni malzeme ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik karakteristikleri Tablo 6.10'da görülmektedir [99].

Tablo 6.10 Yeni sürtünme malzemesi ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik özellikleri

Sürtünme malzeme Özellikleri	Bakır esaslı sürtünme malzeme özellikleri	Yeni sürtünme malzeme özellikleri
Brinell sertlik kp/mm ²	25–50	60–100
Kesme mukavemeti kp/mm ²	8–10	15–20
Burulma kp/mm ²	10–15	20–30

6.4.2.2. Demir Esaslı Balata Malzemeleri

Sinter demir balataları, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı dayanıklı olup, sadece eğilmeye karşı dayanıklı değildirler. Bu hatayı ortadan kaldırmak için sinter demir balatalar, bir sac levha üzerinde sinterlenerek kullanılırlar. Sinter demir balataların ısıyı çok iyi nakletme özelliklerinden dolayı yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği yerlerde kullanılmaktadırlar. Sinter demir balataların bu ısıyı nakletme özelliği, balatanın soğuk kalmasını temin etmekte ve bu durum balatanın ömrünü artırmaktadır. Sinter demir balataları, yüksek sıcaklıklarda perlit bünyenin meydana gelmesi ile iyi olan sürtünme durumları elde edilir. Fakat asıl yüksek sıcaklıklar, madeni toz taneciklerinin yanması ve kömürleşmesi ile arzu edilmeyen bir sert sementit bünye meydana getirebilir [116].

Tablo 6.11 Kuru sürtünme için demir esaslı malzemeler [88]

Ülke	Fe	Cu	Sn	Grafit	Pb	SiO ₂	MoS ₂	Diğer
A.B.D	60	-	5	15	-	-	-	%3Bi,%14 mullite
	67.5	-	-	-	-	-	-	%5Si, %7.5 Bi, %20 mullite
	60-70	-	-	20-30	-	-	-	%3-10 Bi
	80	-	-	4	2	-	2	%3 Al ₂ O ₃
Almanya	70-90	16	-	15-20	<5	-	-	Max. %0.8 P
B.D.T.	60-72	<15	-	9	<13	3	-	BaSO ₄ ,%3 Asbest
İtalya	62	16	-	13,4	8	0,6	-	

Demir esaslı balata malzemeleri, özellikle kuru çalışan kavramalarda tercih edilir. Bronz esaslı malzemelere göre daha ucuzdur. Belirli kullanım alanları için, değişik bileşimlerde imal edilirler. Tablo 6.11’de bazı ülkelerde kullanılan kuru sürtünme için demir esaslı malzemelerin bileşimleri görülmektedir [88].

Sürtünme olayı esnasında şekillenmeyle, yapı elemanları ve atmosfer arasında değişik etkiler meydana gelerek, disk-balata çiftlerinin yüzeyinde metal elemanlar oksit karbür ve grafitten oluşan kompleks yapıli bir tabaka oluşur ve böylece aşınma direnci önemli ölçüde yükselebilir. Bundan dolayı malzemenin bileşimi öyle seçilmelidir ki, kompleks tabaka geniş zorlanma sahasında dayanıklı olsun [88]. Tablo 6.12’de demir esaslı balata malzemesinin kullanım özelliklerinden bazıları verilmiştir.

Tablo 6.12 Demir asıllı balata malzemelerinin kullanım karakteristikleri ve özellikleri [88]

Kullanım Sahası	Baskı basıncı $p \leq 6$ MPa (10 MPa) Kayma hızı $v \leq 60$ m/s $p \cdot v \leq 3$ KW/cm ²
Sürtünme katsayısı	0,25-0,65
Aşınma	$p \cdot v = 1,5-2,0$ KW/cm ² olan orta yüklerde 0,5 cm ³ /KW
Sıcağa Dayanımı	Sürekli çalışmada max. 660 °C Kısa süreli çalışmada max. 880 °C
Özgöl ağırlığı	5-7 gr/cm ³
Isı iletme kabiliyeti	1,2-35 W/mK
Sertlik	15-40BSD

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

sürtünme özellikleri ve mekanik özellikleri üzerine olumlu etkiler sağlar [117]. Tablo 6.13' de sinterlenmiş demirin mekanik özelliklerine fosfor elementinin etkileri görülmektedir.

Tablo 6.13 Sinterlenmiş demirin mekanik özelliklerine fosfor'un etkisi [102]

Fosfor % ağırlık	Akma mukavemeti kg/mm ²	Uzama %	Brinel sertlik BSD	Darbe mukavemeti kgm/cm ²
0	13,14	6,7	30	0,28
0,4	33,3	14,7	76	0,5
0,8	56,9	18	146	0,1

Fosfor ilavesi, demir tozunun sinterleme özelliğine oldukça iyi bir şekilde etki eder. Bu durum, demir tozunun oluşumuna göre, partiküllerin yüzeyinde görülür ve demir tozu 1050 °C de erir. Bu durum dökme demirlerin sürtünme özelliklerinde fosforun etkisi ile ilgili çalışmaların sonucudur [117].

6.4.2.3. Seramik Katkılı Balata Malzemeleri

Daha yüksek güçler için, metalik olmayan katkı içeren metalik bağlantılı balata malzemeleri kullanılır. Metalik olanlar; bakır alaşımları, demir ve demir alaşımları, metalik olmayanlar ise; tercihen (SiO₂, Al₂O₃ veya mullite) silikatlardır. İlave katkı olarak düşük sıcaklıkta ergiyen metaller, sülfür ve sülfat, karbür, grafit ve sinter metalik tozlar kullanılabilir.

Metalik olmayan miktar, hacim olarak % 50 veya daha fazla olabilir. Metal seramik balata malzemelerinin sürtünme katsayısı 0,3–0,7 arasındadır. Bunlar 1000 °C sıcaklığa kadar kullanılabilirler. Yüksek miktarda metalik olmayan komponent içerdiklerinden dolayı kırılgandır ve çok az dayanıma sahiptirler. Bu nedenle, düz bir metal üzerine pres edilirler ve balata taşıyıcıya perçinle bağlanırlar [88].

6.4.3. Bileşik Balata

Organik balata ile sinter balatanın birleşmiş durumudur. Bu tür balatalar, organik balatalara sinter metalden yapılmış balata parçalarının yerleştirilmesiyle meydana getirilmektedir. Bu balatanın en iyi tarafı soğuk havalarda ve küçük basınçlarda tam olarak kullanabilme özelliğine sahip olabilmesidir. Faydalı tarafları ısının sürtünme yüzeyinden çabuk çekilmesine ilave olarak uzun ömürlü olmasıdır [116].

6.4.4. Karbon Esaslı Balata

Karbon esaslı fren balataları askeri ve ticari uçak disk frenleri için geliştirilmiştir. Bu balatalar ağırlığın kritik olduğu, yüksek performansın istendiği ve maliyetin ikinci derece önem

taşıdığı yarış arabalarında da kullanılmaktadır. Karbon–karbon sürtünme malzemeleri amorf karbonla bağlanan karbon elyaflardan imal edilmektedir. Amorf karbon bağlayıcıyı oluşturmak için organik reçinelere yüksek sıcaklıklarda pişirme veya kimyasal buhar çöktürme işlemi uygulanmaktadır. Daha sonraki işlemler sonunda oluşan balata düşük gözenekli saf karbon olmaktadır [111, 125].

Karbon elyaf takviyeli karbon/karbon kompozitler, geleneksel karbon ve grafit malzemelerin yüksek sıcaklıktaki mukavemet ve düşük sürtünme özelliklerinden çoğuna sahiptir. Karbon ve grafitlere göre üstünlükleri elyaf takviyeli oluşundan kaynaklanır. Aynı yönde elyaflara sahip karbon/karbon kompozitler elyaf takviyeli ve reçine matrisli kompozit malzemeler ile benzer özelliklere sahip olmasına rağmen özelliklerini 2000 °C ye kadar korurlar. Karbon/karbon kompozit malzemenin üretimi için genellikle reçine veya zift emdirilerek basınç altında ve yüksek sıcaklıkta karbonlaştırma ısıl işlemleri uygulanır. Bu malzemelerin ısıl iletkenlikleri yüksek, ısıl gerilim katsayısı düşük ve ısıl şoklara direnci yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda ve ısıl şoklara direnç gerektiren alanlarda, özellikle havacılık alanında ve uçak freninde çok sık olarak kullanılır [126].

Karbon fiberlerle güçlendirilmiş malzemelerin ana kriteri 2500 °C ye kadar ana yapıdaki termal denge düşük yoğunluk ve termal karakteristiktir. Son birkaç yılda hem askeri hem ticari hava araçlarında, ağırlığının az olmasından, dayanımının çeliklerden çok daha yüksek olmasından dolayı uçak frenlerinde kullanımı önem kazanmıştır. Ayrıca yarış arabalarının frenlerinde de kullanılmakta, muhtemelen kısa zaman içerisinde otomobil ve kamyonlarda da kullanılması beklenmektedir. Karbon/karbon kompozitler 400 °C de oksidasyona başlar ve exponansiyel sıcaklık maksimum frenleme sıcaklığı 1000 °C ye kadar çıkar. Karbon/karbon kompozitlerin uzun işlem çevrimi ve yüksek sıcaklık operasyonundan ocak ve enerji maliyetinden dolayı maliyetleri yüksektir [127].

Günümüzde fiyatın ikinci planda olduğu, performansın önemli, ağırlığın kritik olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Karbon/karbon sürtünme malzemesi, amorf karbonla birleştirilen karbon fiberinden (grafit fiber adı da verilir) yapılır. Organik resinler yüksek sıcaklıkta fırınlanmıştır ya da bu özelliği olmayan karbon binderini dönüştürmek için uygulanan bir kimyasal buhar çökeltme işlemine tabii olurlar. Daha ileri işlemlerden sonra sonuçlanan sürtünme malzemesi çok düşük gözenekli saf karbondur. 2000 °C işlem sıcaklığı ve yüksek spesifik sıcaklığa müsaade edilen özellikteki karbon/karbon malzeme demir döküm yerine kullanıldığında %85 daha hafiftir [118].

6.5. Balatalardan İstenilen Özellikler

Balata malzemelerinde istenilen özellikleri belirtmek için çalışma şartlarının çok iyi bilinmesi gerekir. Özellikle balata yüzeyine etki eden basınç, aracın hızı ve sürtünmeden dolayı balata yüzeylerinde oluşan sıcaklık yükselmelerinin önemli olduğu görülür. Çalışma şartlarının hafif-orta-ağır olmasına göre balatadan istenen özellikler de değişmektedir. Balataların denenmesinde basınç-hız-sıcaklık değerlerinin birbiriyle olan kombinasyonları göz önüne alınır ve basınç-hız değerleri birbiri ile paralel olarak arttırılır [124].

Fren elemanlarının, sürtünme ve aşınma karakteristiklerini fren tasarımı, malzemeye ve balataya etkileyen şartlar belirler. Balata ömrünü belirleyen şartlar; sıcaklık, sürtünme hızı ve basınçtır. Fren sistemindeki sürtünme elemanları sürekli olmayan farklı büyüklükteki basınç ve sıcaklık etkisi altında çalışması nedeniyle aşınma ve sürtünme davranışları, şaşırtıcı derecede karmaşıktır. Temas halindeki yüzeyler 1 m/s'de 1000 °C den 1100 °C ye ulaşır ve diğer yüzeyler gibi aktif olarak soğur. Heterojen ve sürekli davranış özelliği olmayan termoelastik özelliğinden kurtulmak için yüksek kabiliyetli, anizotropik sürtünme malzemeleri geliştirilmiştir.

Fren, balatalarının sürtünme ve aşınmasına bilimsel ve sınıfsal ayırım getirmek karmaşık bileşenler ve birbirleriyle etkileşimleri yüzünden mümkün değildir. Temel mekanizmaların etkileşimlerini oluşturan makul etkenler ile fren performans etkisi açıklanabilir. Farklı fren dizaynları ve tasarlanmış işlemler için balata malzeme seçimi de yapılabilir [118].

Sürtünme esnasında yüzeylerin pürüzlülüğü ve absorpsiyonu sonucu meydana gelen sıcaklık, sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkiler, sıcaklığın artması malzemede sürtünme katsayısının düşmesine neden olur ve sistem görev yapmaz hale gelir [87].

Tüm bu kabullerin ışığında balatalar bütün frenleme durumlarında sabit kalan bir sürtünme katsayısına (μ) sahip olmalıdır. Ancak uygulamada hız ve basıncın artmasıyla sıcaklığın yükselmesi sonucu sürtünme katsayısında düşme görülür. Araçların farklı hızlarında yapılan frenleme sırasında taşıtın kullanılma yeri, kullanım ve iklim şartları hiçbir zaman ve hiçbir şekilde fren kuvvetine negatif yönde tesir etmemelidir [116]. Balata özellikleri olumsuz şartlardan etkilenmemelidir.

Literatürde balatalardan istenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Her çalışma şartlarında sabit sürtünme performansı,
- Sürtünme katsayısının sıcaklık, fren basıncı ve hızdan bağımsız olması veya sürtünme davranışındaki değişimin az olması,
- Yüksek sıcaklık direnci,
- Yüksek ısı iletkenliği,
- İyi korozyon direnci,

- Yüksek mekanik mukavemet,
- Düşük gürültü seviyesi,
- Hava koşullarından etkilenmeme,
- Balata malzemesinin sağlığa zararsız olması,
- Yüksek aşınma mukavemeti ve karşı malzemede düşük aşınma istenmektedir.

6.6. Disk ve Kampana Malzemesi

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

Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeni ile disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genleşme katsayısının küçük olması istenir. Ayrıca fren esnasında kısa zamanda meydana gelen yüksek ısı miktarları, kampana veya disk tarafından alınıp iletilerek dışarıya verileceğinden, disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletme kabiliyetine sahip olması gerekir [93].

Genelde disk ve kampana imalinde perlitik dökme demir kullanılır. Dökme demir için % 3,40 dolaylarında karbon kullanılır ve bu dökme demirin sertliği 170-255 HB (kg/mm²) arasında değişir [8]. Diğer alaşım yüzdeleri ise; Tablo 6.14' de görülmektedir.

Tablo 6.14 Disk ve kampana için kullanılan dökme demir analizi [8]

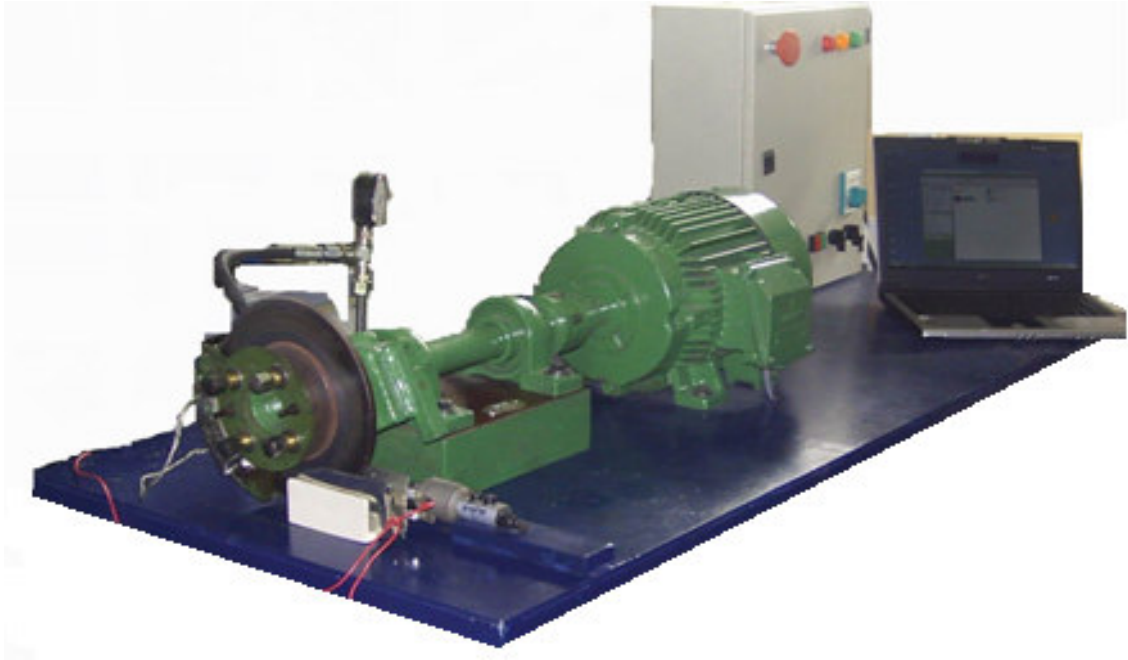
%C	%Si	%Mn	%S	% P
3,40	2,00–2,40	0,60–0,90	0,15	2

Olshevski ve Larin'in çalışmalarına göre [88], dökme demirlere eklenen fosfor, 0,118 ve 2,01 (% ağırlıkça) arasında bir değere yükseltirse, bu malzemenin sürtünme katsayısı yükselir. Fren sistemi üzerinde bu katsayının kararlılığı ve bunlara ilaveten aşınma dirençleri de düzelir. Sürtünen dökme demirlerin en iyi fosfor bileşimi Olshevskiye göre % 1,5–2 arasında, Larin' e göre ise % 1,4' tür.

7. MATERYAL VE METOT

7.1. Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Bu çalışma, bor ve bor türevlerinin otomotiv fren balatalarında kullanılmalarının frenleme performansına etkisinin incelenmesi amacıyla yapılmıştır. Polimerik bağlayıcılı kompozit grubunda bor ve bor türevleri katkılı üretimi yapılan balataların sürtünme katsayısı, aşınma dayanımı gibi özelliklerini belirlemek amacıyla TS 555 ve TS 9076’da belirtilen şartlara uygun olarak deneylerin yapılabilmesi için bir deney düzeneği üretilmiştir. Daha önce bu konuda yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak deney düzeneğine bir takım aparatlar ve ölçü aletleri konulmuştur. Balataların, farklı devir, sıcaklık, basınç vb. gibi faktörlerin etkisinde sürtünme katsayısı incelenebilmektedir. Fren balatası test cihazı ile sürtünme katsayısı-sıcaklık, sürtünme katsayısı-zaman, sıcaklık-zaman grafiklerini oluşturmak mümkündür.



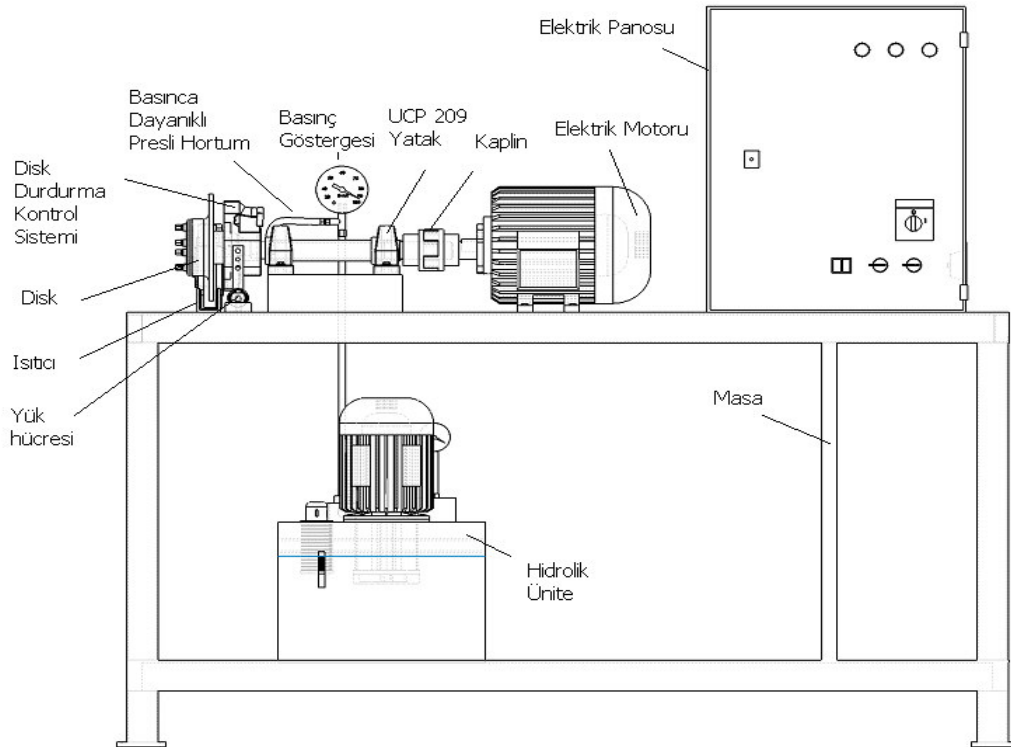
Şekil 7.1 Fren Balatası Test Cihazı

Şekil 7.1’de görülmekte olan sürtünme katsayısı test cihazında diski döndürmek için 5.5 Kw gücünde 1400 dev/dak trifaze elektrik motoru seçilmiştir. Elektrik motorundan elde edilen hareketin iletilmesi için Ø 30 mm’lik transmisyon miline ihtiyaç duyulmuştur. Bu mil üzerine iki adet UCP 209 yatak yerleştirilerek milin salınımının engellenmesi amaçlanmıştır.

Elektrik motorundan çıkan dairesel hareketin mil üzerinden diske istenilen devirlerde aktarılması invertör sayesinde gerçekleşmektedir. Bu devirler 0–1400 dev/dak arasındadır. Elektrik motorunun devir sayısı bilgisayar programından kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Sistemde bulunan hidrolik ünite sayesinde fren diskine istenilen değerlerde basınç

uygulanabilmektedir. Deneyler esnasında basınç düzensizliğini önlemek ve basıncı istenilen değerde sabit tutmak için piston ile hidrolik motor arasına basınç kontrol valfi yerleştirilmiştir. Kontrol paneli göstergesindeki kuvvet kısmına girilen değerler ile hidrolik ünite devreye girmekte üzerine ürettiği yapılmış balata takılı fren pabuçlarını diske doğru itmektedir.

Disk dönmeye başladığında disk ile papuçlar arasında numune balata parçası olduğu için diskin dönmesi sırasında fren balatasına uygulanan basınçtan doğan sürtünme kuvveti yüzünden balatanın da disk ile beraber dönme isteği dikkate alınarak bu döndürme kuvveti elektronik olarak yük hücresi vasıtasıyla ölçülmektedir. Disk ile balata yüzeyi arasındaki yüzey basıncına bağlı olarak sürtünme kuvveti dolayısıyla döndürme momenti de değişmektedir. Papuçlara takılı numune balatalar disk ile birlikte dairesel olarak dönmek isteyecektir. Numune balata ile diskin bu dairesel dönme hareketi, yük kolunun ucuna yerleştirilmiş olan bir mil ile yük hücresinin yük algılama ucundan algılanan değerler fren balata test cihazının bilgisayar kontrol paneline aktarılmaktadır. Böylece dönme sırasında balata ile fren diski arasındaki sürtünme kuvveti F_s değeri elde edilmiş olunmaktadır. Fren balatası test cihazının şematik görünüşü Şekil 7.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.2 Fren balatası test cihazının şematik görünüşü

Farklı yüzey basınçlarında yük hücresi ekranından okunan değer ve moment kolu dikkate alınarak program tarafından otomatik olarak belirlenen sürtünme katsayısı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{F_s \times 1,92}{F} \quad (7.1)$$

$$F = P \times A \quad (7.2)$$

Burada;

μ = Sürtünme katsayısı

F = Uygulanan kuvveti (kg)

F_s = Sürtünme kuvveti (Yük hücresinden okunan kuvvet (kg)

P = Basınç (kg/mm²)

1,92= Cihaz sabiti

A= Balata alanı (mm²)

7.1.1. Bilgisayar Programı

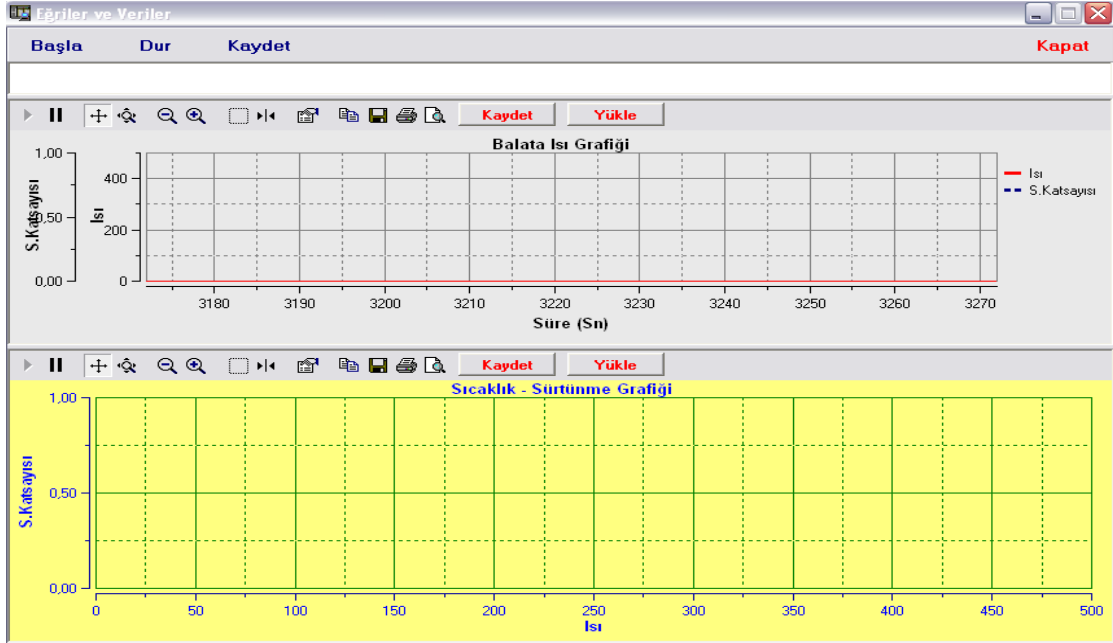
Fren balata test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan süre, kuvvet, devir, moment farkı ve alan değerleri girildikten sonra kontrol paneli üzerinde bulunan başlat düğmesine basılarak sistem çalışmaktadır. Süre değeri dakika olarak işlemektedir. Deneyin süresi, süre kısmına girilerek istenilen zaman dilimi içerisinde cihazın otomatik olarak durması sağlanmaktadır. Devir göstergesi kısmına girilen devir değeri ile istenilen devirlerde deneyler yapılabilmektedir. Şekil 7.3’de fren balata test cihazının bilgisayar kontrol paneli görülmektedir.



Şekil 7.3 Fren balatası test cihazı otomatik kontrol paneli

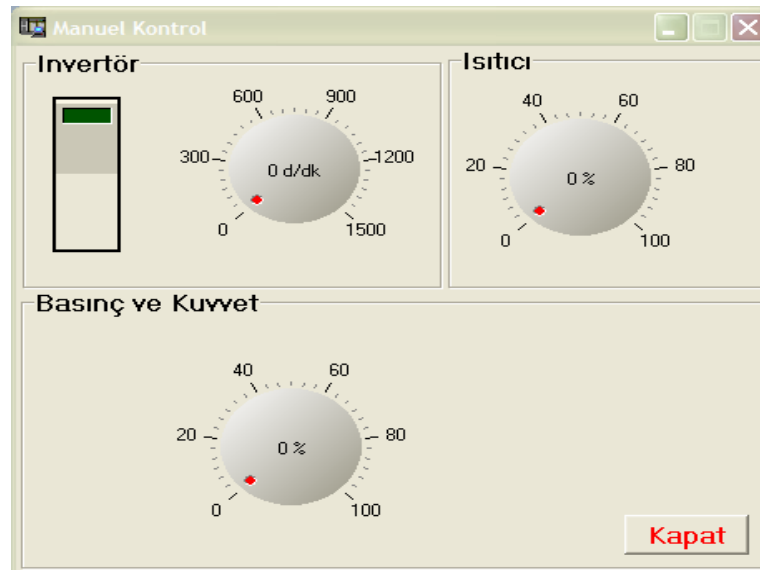
Fren balata test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan eğri başlat ikonu işaretlenmişse deney sırasında bilgisayar ortamına aktarılan verilerin grafikleri otomatik olarak çizilmektedir. Otomatik olarak çizilen grafiklere kontrol paneli üzerindeki eğriler kısmından ulaşılmaktadır. Programın, grafikleri otomatik olarak çizmesi istenmiyorsa deneyler esnasında

elde edilen veriler metin dosyası olarak kaydedilmekte ve Excel programına aktarılmaktadır. İstenildiği zaman deneylerden elde edilen grafiklere, kontrol paneli eğriler kısmından yükle ikonu tıklanarak bir önceki grafikler tekrar çizdirilmekte ve grafik üzerinde değişiklikler yapılabilmektedir. Şekil 7.4’de program tarafından çizilen grafik göstergesi görülmektedir.



Şekil 7.4 Bilgisayar kontrol paneli grafik göstergesi

Deney seti tüm deney işlemlerini otomatik olarak yapmaktadır. Ayrıca fren balata test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan manüel kısmına girilip devir ve basınç el ile ayarlanarak deneyler manüel olarak yapılabilmektedir. Şekil 7.5’de fren balatası test cihazı manüel kontrol paneli görülmektedir.



Şekil 7.5 Fren balatası test cihazı manüel kontrol paneli

Basınç bilgisayar programı tarafından 0-40 MPa arasında değiştirilebilmektedir. Hız, devir sayısı kontrolü sağlandığından devir sayısı 0-1400 1/d arasında değiştirilebilmektedir. Bu değişken etkenlerin sürtünme performansına etkilerini belirleyebilmek için farklı deney şartlarının oluşturulması ve hassas sonuçlar alınması gerekmektedir. Bu nedenle verilerin kaydedilmesi, kullanılması ve istenildiğinde yeniden ulaşılabilmesi gerekmektedir. İstenilen deney şartlarının girilerek deneylerin güvenilir olarak yapılabilmesi amacıyla sürtünme katsayısı test cihazı için Delphi yazım dilinde program geliştirilmiştir.

7.1.2. Yük Hücresi

Sürtünme kuvveti F_s 'i belirlemek için kullanılan yük hücresi (loadcell) elektronikte strain gage olarak adlandırılan manyetoelastik cihazlardır. Transdüserlerin kuvvet ölçmek için kullanılanlarına yük hücresi adı verilir [161]. Bu cihazlar gelen yükü, milivolt cinsinden algılayarak ekrana yansıtmaktadırlar. Deney setinde kullanılan yük hücresi Esit marka BB100 modeli olup 100 kg kapasitelidir. Yük hücresinin bir ucu belirli bir noktaya sabitlenir. Diğer ucuna bir noktadan kuvvet uygulandığında oluşan gerilim wheatstone köprüsü üzerinden 0-20 milivolt arasında algılanır ve değer ekrana yansıtılır.



Şekil 7.6 Yük Hücresi

7.1.3. İnvörtör

Telemecanique marka invertör 5.5 Kw 0-1400 dev/dak aralıklarında çalışmaktadır. Çalışma sistemi; elektrik panosundaki pako şartel 1 numaralı konuma getirilerek motora elektrik verilir. Bilgisayar programında invertör ayarları otomatik veya manuel olarak yapılarak istenilen devire kolaylıkla ulaşılması sağlanır.



Şekil 7.7 Devir ayarlayıcı İnvörtör

7.1.4. Hidrolik Ünite

Elektrik motoruna bağlı olan hidrolik pompa, elektrik motorundan aldığı hareketle döndürüldüğünde depo içerisindeki yağı emerek hidrolik on/off valfe gönderir. On/off valften sistemin basınç kontrolü için elektro hidrolik oransal valfe (basınç kontrol valfi) gönderir. On/off valf ve oransal valf kontrol panosundaki elektronik kartlarla kumanda edilmektedir. Elektronik kartlara verilen sinyal test cihazı için geliştirilen program aracılığıyla bilgisayardan gönderilmektedir.

7.1.5. Sıcaklık Ölçme Cihazı

Deneyler sırasında balatanın fren diskine sürtünmesi sonucunda sürtünme yüzeyi sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklık artışının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla balatanın diske sürtünme yüzeyinden 2 cm ilerisinden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümünde her saniye veri alabilen, -50 - +500 °C aralıklarında çalışabilen, hafızasına 6000 saniye veri kaydedebilen Extech 42582 İnfrared termometre kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri RS232 veri aktarma yolu ile bilgisayara aktarılabilir.



Şekil 7.8 Sıcaklık ölçme cihazı

7.1.6. Elektrikli Isıtıcı

Frenleme sırasında sürtünme enerjisi nedeniyle fren diskini ve balatanın ısınacağı açıktır. Numune fren balatasını Türk standartlarında belirtilen sıcaklıklara ulaştırabilmek için diskin alt tarafına 0,5 Kw'lık 2 adet rezistans disk yüzeyine 0,5 cm kadar mesafe ile yerleştirilmiştir. Böylece sürtünme etkisiyle oluşan disk sürtünme yüzeyi sıcaklığı sabitlenme sürecine girince rezistanslar devreye girerek disk sürtünme yüzeyinin Türk standartlarında belirtilen 400 °C'ye ulaşmasını sağlamaktadır.



Şekil 7.9 Elektrikli ısıtıcı

7.1.7. Hassas terazi

Aşınma deneyleri kütle kaybı esasına göre yapılmıştır. Kütle kaybını ölçmek için KERN PLS 360–3 marka 0,001gr hassasiyetinde terazi kullanılmıştır. Bu terazi ölçümler sırasında hava akımlarından etkilenmemesi için kefe kısmı sürgülü bir camkân ile kapatılmıştır. Her ölçüm öncesinde terazinin kalibrasyonu yapılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi ve deney sonrası numuneler tartılarak kütle kaybı, fark değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.10 Hassas terazi

7.1.8. Fren Diski ve Balata Tutucu Pabuç

Fren diskinin mekanik ve ısıl zorlanmalara karşı mukavim olması istenir. Fren sistemlerinde, sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının, en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılabilmesi için karşı malzemenin yüksek ısı iletim katsayısı ile özgül ısıya sahip olması gerekir. Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genleşme katsayısının büyük olması istenir. Genelde disk ve kampana üretiminde perlitik yapılı dökme demir

kullanılır. Kullanılan dökme demirde % 3,4 civarında karbon bulunur. Diğer alaşım yüzdeleri Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1 Disk malzemesinin içeriği

Disk için kullanılan dökme demir analizi				
%C	%Si	%Mn	%S	%P(max)
3,4	2,00–2,40	0,60–0,90	0,15	2

Perlitik dökme demir grafit yaprakçıkları bulundurduğundan iyi bir kayma özelliği gösterir. Yüksek işlenebilirlik, titreşimi soğurma, yüksek ısı iletkenlik ve aşınma direnci en önemli özelliklerdendir. Bunun yanında kırılma oluşu ve dinamik yüklere karşı hassas oluşu dikkati çeker. Dökme demirlere eklenen fosfor, % 0,118-% 2,01 (ağırlıkça) arasında bir değere yükseltirse, bu malzemenin sürtünme katsayısı yükselir. İlave fosfor ile sürtünme katsayısının kararlılığı ve aşınma dirençleri de düzelir. Sürtünen dökme demirlerin en iyi fosfor bileşimi % 1,4–% 2 arasındadır [2].



Şekil 7.11 Fren diski görünüşü

Üretimi yapılmış farklı içerikteki fren balataları fren test cihazının pabuçlarına yerleştirilerek deneyler yapılmıştır.



Şekil 7.12 Fren balatası test cihazında kullanılan fren pabuçları

7.1.9. Sertlik Ölçüm Cihazı

Deneylerde kullanılan fren diskinin ve üretilen balataların sertliğini belirlemek için Mettes marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 7.13 Mettest Sertlik Ölçme Cihazı

Disk in karşılıklı bölgelerinden ölçümler alınarak ölçüm değerlerinin ortalaması alınmış ve disk in sertlik değeri 116 HB-41.86 HRA olarak bulunmuştur.

Tablo 7.2 Fren Diski Sertlik Değerleri

Rockwell sertlik değerleri (HRA)		Brinell Sertlik değerleri (HB)
39.2		106
43.8		123
42.6		119
Ortalama	41.86	116

7.1.10. Numune Parlatma Cihazı

Üretilen balataların mikro yapı incelemelerinde görüntünün daha iyi alınabilmesi için numuneler karbon kaplama yapılmadan önce Metkon Gripo 2V marka metalografik numune hazırlama cihazında 600-800-1000 numara zımpara ile zımparalama işlemi yapıldıktan sonra keçe üzerinde temizlenerek parlatılmıştır.



Şekil 7.14 Numune parlatma cihazı

7.1.11. Yüzey Pürüzlülük Cihazı

Disk yüzeyinde meydana gelen pürüzlülük değerlerini belirlemek için Mahr marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır.

Bu ölçümlerde pürüzlülük değeri sol yüz $R_a = 0,514 \mu m$ sağ yüz $R_a = 0,495 \mu m$ olarak tespit edilmiştir. Bu elde edilen değerlerle, deneyde kullanılan diskin uygun standartlarda olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7.3 Fren Diski Yüzey Pürüzlülük Değerleri ($R_a-\mu m$)

Sol Yüz		Sağ Yüz
0,507		0,510
0,468		0,485
0,567		0,490
Ortalama	0,514	0,495



Şekil 7.15 Mahr Perthometer Yüzey Pürüzlülük Cihazı

7.1.12. Numune Kaplama Cihazı

Taramalı elektron mikroskobundan mikro yapı resimlerinin alınabilmesi için numunelerin iletken olması gerekmektedir. Numuneler yeterli iletkenliğe sahip olmadıklarından, iletkenlik kazandırmak amacıyla parlatma işleminden sonra numunelerin yüzeyi ‘‘BAL-TEC SCD 005 Sputter-Coater’’ marka kaplama cihazı ile karbon kaplanarak iletkenliği sağlanmıştır.



Şekil 7.16 Numune kaplama cihazı

7.1.13. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

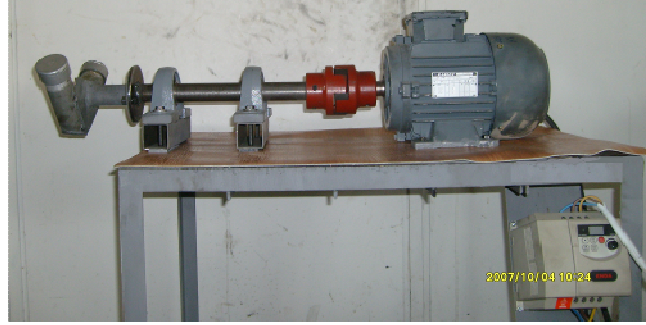
Sürtünme ve aşınma deneyleri sonrasında numune balataların mikro yapısını incelemek amacıyla LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobunda (SEM) çalışması yapılmıştır. LEO 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve X ışınları (EDX- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak elementer analizleri yapabilmektedir. Cihaz işletim yazılımında görüntü işleme imkânı sağlamaktadır. Cihaz ‘‘değişken basınç’’ prensibi ile çalışma yeteneğine sahiptir.



Şekil 7.17 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

7.1.14. Toz Karıştırma Cihazı

Toz malzemelerin homojen karışımını sağlamak için şekil 7.18’de gösterilen I ve V karıştırma haznesine sahip toz karıştırma cihazı kullanılmıştır. Cihaz karıştırma devri cihaz üzerinde bulunan invertör tarafından farklı devirlerde yapılabilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.18 Toz Karıştırma Mikseri (a) Karıştırıcı (b) I tipi toz haznesi (c) V tipi toz haznesi

7.1.15. Yoğunluk Ölçüm Cihazı

Üretilen numunelerin yoğunlukları, Arşimet terazisi ile belirlenmiştir. Normal terazilerden farklı olarak terazinin alt kefesini saf su içine daldırılarak alt kefesinden de ölçüm alınmaktadır. Saf suyun hacmindeki değişim numunenin hacmini verdiği için dereceli silindirdeki fark miktar belirlenmiş ve cismin kütlesi cismin hacim farkına bölünmüş cismin yoğunluğu belirlenmiştir. Numune yoğunluk belirlemede aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$D_h = \frac{G_k}{G_{dh} - G_{ds}} \quad (7.3)$$

D_h = Numune yoğunluğu (gr/cm^3)

G_k = Numune kuru ağırlığı

G_{dh} = 48 saat su içerisinde bekletildikten sonra numune ağırlığı

G_{ds} = 48 saat su içerisinde bekleme sonrası numunenin saf su doldurulmuş kaptaki ağırlığı



Şekil 7.19 Arşimet terazisi

7.2. Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi

7.2.1. Toz Karıştırma Süresinin Belirlenmesi

Kompozit üretiminde karşılaşılan en büyük problem, komponenti oluşturan malzemelerin matris içerisindeki homojen dağılımını sağlamak ve takviye malzemesi ile matris ara yüzey bağı arttırmaktır [162]. Karıştırma şekli ve süresi, bu malzemelerin matris içerisindeki dağılımını, tozların boyutunu ve diğer bazı özelliklerini belirlemede etkili olmaktadır [163]. Karıştırma işlemi segregasyonu önlemek açısından çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Segregasyonu önlemek için karışıma genellikle yağlayıcı (grafit gibi) eklenir [164] ve düşük viskoziteye sahip olan toz veya sıvı (sıvı reçine gibi) komponentlerin homojen karışması için karıştırıcı kollar ile kesici bıçakların birlikte karıştırma işlemini gerçekleştirmesi gerekir [165]. Karıştırma işleminin tipi çoğunlukla karışımı oluşturan malzemelerin türüne bağlıdır. Özellikle yoğunlukları, partikül boyutları ve bazen yüzey karakteristikleri ve şekilleri önemli farklılıklar gösteren toz bileşenlerde karıştırma işlemi zor olabilmektedir [2]. Çalışmanın bu aşamasında balata üretimi sırasında tüm diğer parametreler sabit kalmak şartıyla toz karıştırma süresinin sürtünme ve aşınmaya etkisi araştırılmıştır. Bu amaç çerçevesinde yapılan çalışmada 3 farklı karıştırma süresi uygulanarak numuneler üretilmiş ve üretilen numunelerin sürtünme katsayısı-zaman, sıcaklık-zaman ve aşınma değerleri incelenmiştir. Sonuç olarak polimerik kompozit sürtünme malzemelerinin üretiminde 10 dakikalık karıştırma süresi sürtünme katsayısı ve aşınma değerleri için olumlu sonuç vermiştir.

7.2.2. Üretim Basıncının Belirlenmesi

Kompozitlerin tribolojik özelliklerindeki iyileşme kompozit formülasyonu, üretim ve çalışma parametrelerine bağlıdır [26]. Yapılan çalışmalarda yüksek performanslı sürtünme

malzemesini güçlendirme işlemleri olarak, teorik yoğunluğun artırılması ve poroziteyi yok etmek için çeşitli sıcak yoğunlaştırma (densifikasyon) işlemleri yapılmaktadır [50]. Balatanın bileşimindeki malzemelerin homojen dağılımı yapıldıktan sonra balatanın yoğunluğunu presleme basıncı belirleyeceği için sürtünme performansında önemli rol oynamaktadır.

Balata üretim parametrelerinden presleme basıncının balata üzerindeki etkisini incelemek için aynı içeriklere sahip karışımlar 10 MPa, 15 MPa, ve 20 MPa basınç altında preslenerek, üretilen numunelerin sürtünme katsayısı testi yapılmıştır. Böylece sıcak presleme basıncının sürtünme karakteristiği etkisi incelenmiştir.

Sonuç olarak 15 MPa sıcak presleme (pişirme) basıncı uygulamanın yapılacak çalışmalarda uygun bir değer olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda pişirme basıncı 15 MPa alınmıştır.

7.3. Deney Numunelerinin Üretilmesi

Üretimde kullanılan bor ve türevlerinden borik asit, boraks pentahydrate Kırka Eti-Bor tesislerinden, üleksit ve kolemanit Bigadiç Eti-Bor tesislerinden temin edilmiştir. Komponenti oluşturacak malzemelerin temininden sonra üretim aşamasına geçilmiştir. Tablo 7.4’de görülen ortak içerikler belirlenmiştir.

Tablo 7.4 Ortak içerik olarak belirlenen katkı maddelerinin kütleli oranları

Malzeme Cinsi	% Oranları
Reçine	22
Bakır	8
Al ₂ O ₃	3
Çelik Yünü	15
Grafit	3
Barit	20
Prinç Talaşı	5
TOPLAM	76

Ortak içerikler ifadesinden tüm balatalarda kütleli oran esas alınarak bağlayıcı olarak fenolik reçine, metalik katkı olarak bakır ve pirinç talaşı, seramik katkı olarak alümina (Al₂O₃), katı yağlayıcı olarak grafit, dolgu maddesi olarak barit, parçalanmaya karşı direnci artırmak için çelik yünü kullanılmaktadır. Bu kısım kütleli olarak % 76’lık kısmı oluşturmaktadır.

Ortak içerik olarak belirlenen miktardan geriye kalan % 24 lük oran ise Sürtünme Ayarlayıcı Maddeler (SAM) cashew (maun cevizi tozu), sedir, fıstık çamı ve Bor

Minerallerinden (BM) ham bor ürünleri olarak Üleksit, Kolemanit, rafine bor ürünleri olarak Borik asit, Boraks pentahydrate'tan oluşan malzemeler kullanılmaktadır.

Tablo 7.5 Karışımında kullanılan maddelerinin kütle oranları

Numuneler	% Oranlar				
SAM	4	8	12	16	20
BM	20	16	12	8	4
Ortak içerik	76	76	76	76	76
TOPLAM	100	100	100	100	100

Deneyisel çalışmaların birinci aşamasında, temin edilen Üleksit, Kolemanit, Borik asit, Borax gibi Bor mineralleri ve fenolik reçine, bakır, pirinç talaşı, çelik yünü, Al_2O_3 vs. gibi toz malzemelerin en iyi karışım oranları ve karıştırma sürelerini belirlemek için literatür çalışmaları ve Yüksel Balatacılık (Konya) ile yapılan çalışmalar neticesinde piyasada kullanılan balata oranlarının yaklaşık olarak ortalamaları tespit edilerek ön deneyler yapıldı. Ön deneyler sonucunda sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılması düşünülen fıstık çamı kozalağının çok düşük değerlerde sürtünme katsayısı oluşturduğu için deneylerde sürtünme ayarlayıcı olarak cashew ve sedir kullanılmasına karar verildi. Karışım miktarları belirlenen tozlar, toz karıştırma cihazında karıştırılarak farklı formülasyonlar da balata üretimine geçildi.

Farklı içeriğe sahip deney numunelerinin üretimi esnasında malzeme oranları belirlemede hesaplama kolaylığı olması için kütle oran esas alınmıştır. Her bir formüldeki balata içeriğini oluşturan bağlayıcı, sürtünme malzemesi ve diğer katkı malzemeleri 0,001g hassasiyetindeki terazi ile tartılmıştır. Daha sonra, hazırlanan bu karışımın homojenliğini sağlamak için numune içeriği Şekil 7.16'da gösterilen özel olarak yapılmış karıştırıcıda 10 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karışımlar, daha önce yapılmış olan komprime kalıplarına, balatanın üretimi tamamlanmış hacmi dikkate alınarak uygun miktarda doldurulmuştur. Kalıplara doldurulan karışım miktarı, balatanın yoğunluğunun $1,9 \text{ gr/cm}^3$ olacak şekilde hazırlanmıştır.

7.3.1. Komprime (Soğuk presleme)

Belirlenen miktarlarda tartılarak soğuk presleme için Şekil 7.20'de gösterilen komprime kalıbına doldurulmuştur ve 9810 kPa (90 kg/cm^2) basınç altında soğuk olarak preslenmiştir.



Şekil 7.20 Deney numunelerinin üretildiği soğuk presleme kalıbının görünüşü

Bu presleme sonrası kalıplardaki soğuk sıkıştırılmış malzemelerin çıkarılabilmesi için dişi kalıbın alt tablası çıkarılmış erkek kalıp ile dişi kalıbın üzerine düşük yük uygulanmış ve dişi kalıbın altından numune malzeme taşımak için hazırlanmış olan sac levhaların üzerine alınmıştır. Bu çıkarılan malzeme Şekil 7.21’de görüldüğü gibi tablet haldedir.

Tablet haldeki malzeme soğuk presten çıkarılırken, taşınırken ve pişirme için sıcak pres kalıplarına konulması sırasında oldukça çabuk dağılma gösterir. Soğuk presleme kalıplarının kalıp derinliği 8~10 cm civarındadır.



Şekil 7.21 Soğuk pres ile imal edilen balata resimleri

Deney numunelerinin üretiminin soğuk presleme aşamasında, numuneler birer birer preslenmektedirler. Bu durumun sebebi soğuk pres kalıplarının derinliğinin yaklaşık 10 cm olmasından soğuk preslemesi yapılmış olan tablet balataların kalıplardan çıkarılma sırasında dağılma ve parçalanma gibi birçok problemlerle karşılaşılmasıdır. Üretimdeki bu tip hataları gidermek için soğuk pres kalıbı bir adet balata presleyecek şekilde hazırlanmıştır.

7.3.2. Pişirme (Sıcak Presleme)

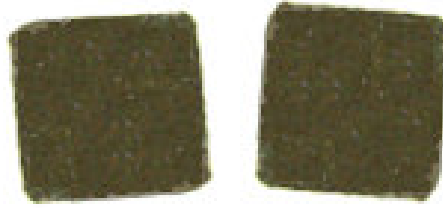
Soğuk presleme işleminden sonra tablet haldeki numuneler pişirme işlemi için sıcak presleme kalıplarına yerleştirilmişlerdir. Numunelere sıcak presleme sırasında 14715 kPa (150 kg/cm²) basınç uygulanmıştır. Pişirme presindeki kalıplar alt ve üst tablalardan elektrik enerjisi kullanılarak ısıtılmıştır. Pişirme presi 250 °C’ye kadar ısıtma kapasitesine sahip olup sıcaklık kontrolü ± 5 °C toleransla termostat ile yapılmaktadır. Deney numuneleri ~180 °C sıcaklıkta 10 dakika pişirilmiştir. Her bir mm kalınlık için ~1 dakika pişirme süresi uygulanmıştır. Bu pişirme süresinin ilk % 60’lık kısmında her 30 saniyede bir, pres kalıplar açılarak havalandırma işlemi

yapılmıştır. Bu sıcaklık neticesinde balata bileşenlerinin oluşturduğu reaksiyonlar sonucu meydana gelen buharların komponentten dışarı atılması sağlanmıştır. Böylece söz konusu buharların balatada oluşturabileceği kılcal çatlamlar ve bir takım olumsuz deformasyonlar önlenmiştir. Yine burada pişirme ve presleme sonrası balataların kalıptan parçalanmadan kolay bir şekilde çıkarılmasını sağlamak amacıyla sıcak kalıplara granül sabunlu sıcak su pülverize olarak basınçlı hava ile püskürtülmüştür.



Şekil 7.22 Deney numunelerinin üretildiği sıcak presleme kalıbı

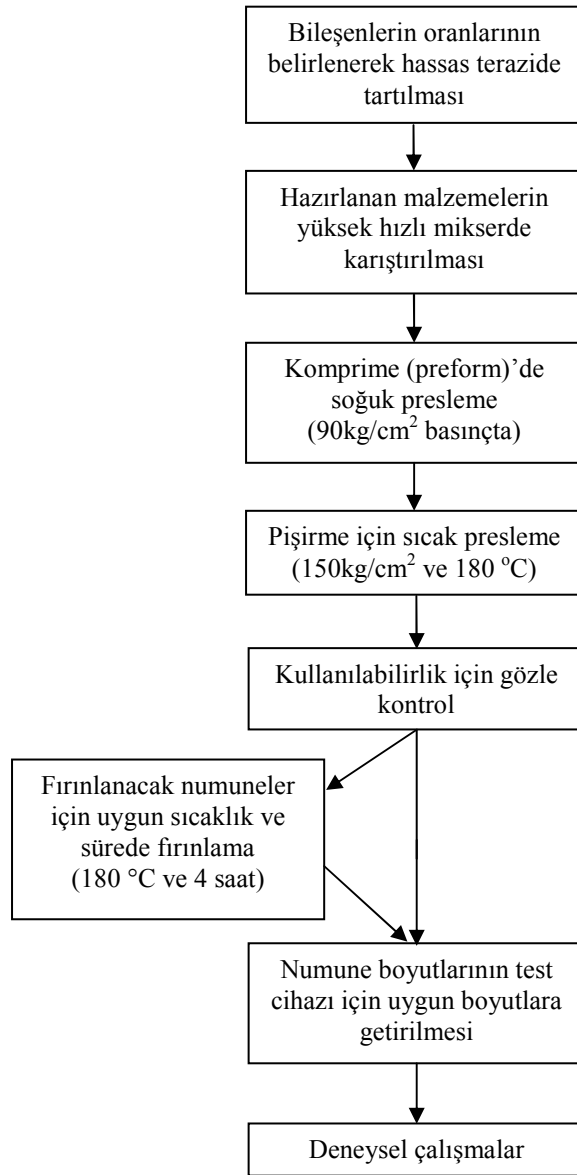
Sıcak presleme kalıpları soğuk presleme kalıplarından oldukça farklıdır. Numunelerin üretildiği pres tabla yüzey boyutu 50x50 cm olduğu için üretilmesi düşünülen balata boyutuna göre birden çok balata pişirilebilmektedir. Ayrıca sıcak presleme kalıplarının derinliği, üretilcek olan numune balatanın kalınlığı dikkate alınarak belirlenmektedir.



Şekil 7.23 Sıcak pres ile imal edilen balatalar

7.3.3. Sinterleme (Fırınlama-Isıl İşlem)

Preslenmiş numunelerde toz tanelerinin yüksek yüzey enerjilerinin minimuma indirilmesi ve tozlar arasında metalurjik bağlar oluşturulması amacı ile sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Bir balata numunesinin üretimi sırasındaki aşamalar Şekil 7.24'te şematik olarak gösterilmiştir.



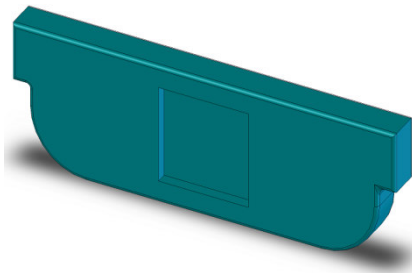
Şekil 7.24 Deney numunelerinin üretim şeması

7.4. Deney Numunelerinin Test İçin Hazırlanması

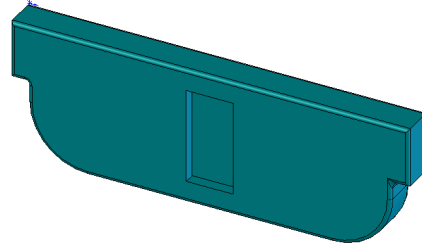
Sıcak presleme işlemi neticesinde pişirilmiş olan numuneler sıcak pres kalıplarından çıkarıldıktan sonra numunelerin gözle kontrolü yapılmıştır. Bu numunelerin pişme sırasında kalıplara yapışma ve benzeri durumlardan dolayı yüzeyleri pürüzlü olduğundan numuneler verilen paso miktarı kadar ince taneli zımpara taşı aralığından geçirilerek düzgün yüzey oluşturulmuştur.

Üretilen numuneler iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısım numuneler sıcak pres kalıbından çıkarıldıktan sonra deneylere tabi tutulmuştur. Bu numunelerde bağlayıcı olarak kullanılan fenolik reçine üretim süresi içerisinde ısı ve basınç etkisiyle toz tanecikleri içerisine yayılarak

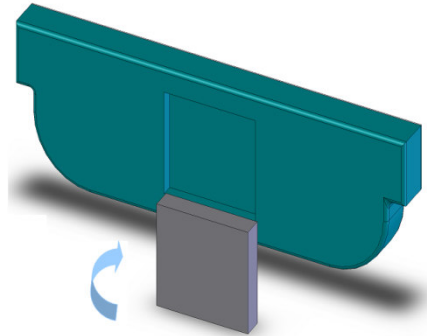
balata bütünlüğünü oluşturmuştur. Bu numunelerde reçinenin kürleşme süresi üretim süresi ile sınırlı kalmıştır. İkinci kısım numuneler ise, reçinenin kürleşme süresi uzun tutularak balata kalitesini artırmak amacıyla belirli zaman ve sıcaklıkta fırınlamaya tabi tutulmuştur. Fırınlama işlemi zaman ve sıcaklık kontrol ünitesine sahip Naberterm marka tav fırınında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu fırın 1100 °C'ye kadar ± 2 °C toleransla ısıtma ve zaman ayarı dakika olarak programlanma özelliğine sahiptir. Numuneleri fırınlama işlemi bölüm 7.4.3'de bahsedilen sıcaklık ve sürede normal atmosfer şartları altında gerçekleştirilmiştir. Fırınlanmayan ve fırınlanan tüm numuneler deney düzeneğindeki numune balata için açılmış olan balata yuvası ölçülerine getirilirken kesme ve taşlama yöntemleri kullanılmıştır. TS 9076'da [166] deney numunelerinin boyutları en ve boy 25.4x25.4 mm, kalınlık 5-8 mm eşit kalınlıkta olacak şekilde hazırlanır ve sürtünen yüzeylerde hiçbir işaret bulunmamalıdır ifadesi bulunmaktadır. Ancak üretimi yapılan test cihazının numune yuvası yukarıda belirtilen ölçülerde orantılı olarak küçültülerek boy ve en 25.4x12.7 mm olarak alınmıştır. Numunelerin kalınlığı ise 2 mm'si numune yuvasına gireceği ve 4 mm'si dışarıda kalacağı dikkate alınarak toplam 6 mm olarak hazırlanmıştır. Test cihazında balatanın takılabilmesi için 1" (25.4x25.4 mm) ve ½" (25.4x12.7 mm)'lik yüzey alanı 2mm derinlikte boşaltılmış olan balata tutucu sac kullanılmaktadır. Balataların, balata tutucu saca takılabilmesi için ½" (25.4x12.7 mm) boyutlarında kesilmişlerdir. Şekil 7.25, şekil 7.26'de balata tutucu sac çeşitleri, şekil 7.27 de balatanın balata tutucu saca takılışı görülmektedir. Balata malzemesi şekildeki parçanın orta kısmında bulunan 2 mm derinliğindeki alana sıkı geçme yapılarak tutunma sağlanır.



Şekil 7.25 1" lik Balata Tutucu



Şekil 7.26 ½" lik Balata Tutucu



Şekil 7.27 Balatanın Takılma İşlemi

7.5. Deney Numuneleri

Üretilen numune balatalar asbestsiz organik balatalar (NAO-nonasbestos organic) grubunda olup polimerik bağlayıcılı ve üretim metoduna göre presleme yoluyla üretilmiştir. Numune balataların üretimi iki farklı grup olarak planlanmıştır. Birinci grupta cashew ve sedir takviye malzemeleri ile birlikte belirlenen diğer bileşenler seçilmiş ve normal üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci grupta ise aynı içerikli numunelere sinterleme işlemi uygulanmıştır. Numunelerde bağlayıcı ve sürtünme ayarlayıcı malzemelere yardımcı olacağı düşüncesiyle sedir çamı kozalak tozu kullanılmıştır. Her iki grupta da balata bileşenleri içerisinde bor türevleri olan borik asit ve borax, ham bor ürünleri olan üleksit ve kolemanit'e yer verilmiştir.

Birçok endüstri alanında kullanılan bor türevleri asbeste alternatif malzeme olan cam elyafın üretiminde, ısıl dayanım kazandırmak için borcam üretiminde ve aşınmaya karşı sert yüzey oluşturmak için seramik endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu nedenle bor türevleri fren balatası komponenti içerisine katılmıştır.

Balatanın özellikleri; balata içeriği, bu içeriğin konsantrasyonu ve üretim şartlarına göre farklılıklar göstermektedir. Yapılan çalışmada balata içeriği, formülasyonu ve üretim şartları değiştirilerek üretilen balataların aşınma davranışları incelenmiş ve sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Bu amaçla temel olarak aşağıdaki balata numuneleri üretilmiştir.

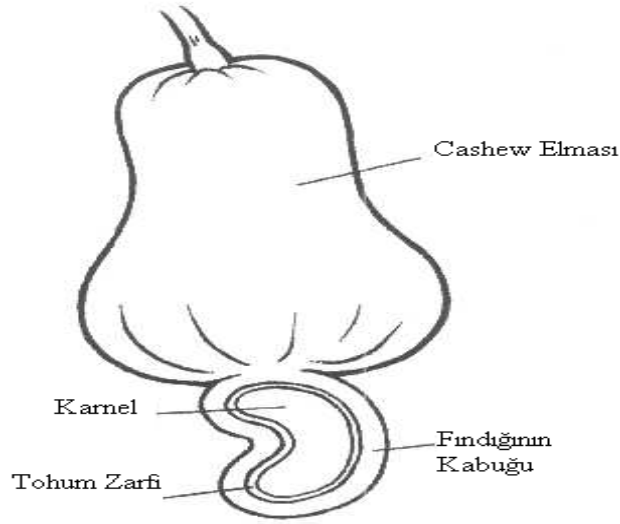
7.5.1. Bor Mineralleri ile Birlikte Cashew Kullanılan Numuneler

Fren balataları yapımında elyaf malzeme olarak en çok asbest kullanılmakta idi ancak asbestin çevre kirliliği ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle günümüzde asbest özelliklerini sağlayan komponent malzemelerin araştırılması güncelliğini korumaktadır. Bilindiği gibi elyaf malzemeler sürtünme katsayısı üzerinde oldukça etkili olup taşıt emniyeti bu değerle doğrudan ilgilidir [167].

Asbestsiz olarak üretilen bu balatalarda kullanılan cashew ve bor mineralleri ile balatanın mekanik ve tribolojik özellikleri güçlendirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan bileşenler yüksek sıcaklıkta termal bozulmayı önleyecek şekilde seçilmiştir. Elyaf katkı olarak çelik yünü kullanılmıştır. Bu formülasyonlarda üretilen numunelerde sürtünme katsayısını ve aşınma direncini artırmak için cashew, üleksit, kolemanit, borik asit ve borax kullanılmıştır. Bunların komponent içerisindeki % oranları değiştirilerek standartlara uygun sürtünme katsayısı, termomekanik özellikler ve uygun aşınma direncinin sağlanmasına çalışılmıştır.

Hindistan'ın ünlü maun ağacından elde edilen cashew fıncığı bir takım işlemlerden geçtikten sonra otomotiv fren balataların kullanılmaktadır. Cashew fıncığı kabuğu ünlü, son derece aşındırıcı CNSL (Cashew Nut Shell Liquit) gibi yapışkan ve koyu bir sıvı içerir. CNSL

(Cashew Nut Shell Liquit) çok yönlü endüstriyel ham malzeme olmasından dolayı öneme sahiptir. Endüstriyel uygulamalar için 200 den fazla patent almıştır. Özel olarak, fenol reçine için ham malzeme olarak ve otomotiv endüstrisi için sürtünme tozu olarak kullanılır (fren balatası ve kavrama freni için). Kampanalı fren balatası da cashew reçinesi dolgu olarak kullanılmakta ve ayrıca bağlayıcı madde olarak ta kullanılmaktadır. cashew meyvesi Şekil 7.28’de gösterilmiştir [168].



Şekil 7.28 Cashew Meyvesi

Maun ağacı ürünleri başlıca ham cashew fındığı, cashew karnel ve CNSL olup uluslararası marketlerde satılmaktadır. Cashew fındığı genellikle yerel olarak işlenir ve tüketilir. Ham cashew fındığı maun ağacının ana ticari ürünüdür. Ham cashew fındığı işlem gördükten sonra CNSL ürünüyle endüstride ve tıbbi uygulamalarda kullanılır.

Cashew üretim metodları uzun yıllardan beri gelişmektedir. Isı uygulanarak cashew fındığı CNSL’ yi serbest bırakır ve kırılgan bir kabuk oluşur böylece kabuğu kırıp açma esnasında karneli çıkarmak kolaylaşır. Cashew fındığına üç şekilde ısı uygulanır [169],

- Açık Havada Kavurma Metodu
- Tambur Kavurma Metodu
- Sıcak Yağ Metodu

Hindistan’daki cashew endüstrisinin başlangıcından beri açık havada kavurma metodu kullanılır. Bu metodun tek avantajı düşük maliyetli olmasıdır. Açık havada kavurma metodu Şekil 7.29’de gösterilmektedir [169].

Açık havada kavurma metodu geliştirilerek tambur kavurma metodu ortaya çıkmıştır. Belli bir açıda eğimli olan tambur kavurma esnasında dönerek cashew fındığının yanmasını önler. Bu metod orijinal metodun geliştirilmiş olmasına rağmen hatalıdır. Aşırı ısıtma ve yanma sonucu cashew karnel kaybedilir [169].



Şekil 7.29 Açık havada kavurma metodu

1930'ların ortalarında cashew karnel artırılmak istenmiş ve sıcak yağ metodu geliştirilmiştir. Basit olarak sıcak yağ metodu cashew fındığının tank içerisindeki sıcak yağ ile kavrulmasıdır. Fındıklar sıcak yağ içerisinde 185°C de 1,5 dakika bekletilerek kavrulur. Kavrulan cashew fındığının kabuğu kırılğan bir yapıya sahip olduğundan kabuk kolaylıkla fındıktan ayrılır. Böylece CNSL endüstriyel ve tıbbi uygulamalar için ayrılırken, kavrulan cashew fındığı kabuğu ise fren balatalarında sürtünme malzemesi olarak kullanılmak üzere değirmende toz haline getirilir [169].

Sürtünme tozu genellikle üretilen cashew reçinesine dayanır. Cashew reçinesi, bazı katkı maddeleri de kullanılarak kendiliğinden tutuşmayı önler ve malzemenin komponent içerisinde homojen olarak dağılımına yardımcı olur.

Cashew katkılı sürtünme tozu, sürtünmeyle oluşan ısı oluşumunu absorbe ederek frenleme etkisini sabit tutmaktadır. Cashew reçinesinin sağladığı avantajlar sentetik fenol reçinesiyle karşılaştırıldığında daha ekonomik olması ve daha yumuşak malzeme üretimiyle daha sessiz fren etkisi vermesidir ayrıca düşük hızdaki araçlarda ısı oluşumunu alarak frenleme nispeten soğuk iken aşınmaya karşı daha dayanıklıdır. Cashew sürtünme tozu taneli yapıdadır ve CNSL (Cashew Nut Shell Liquit) polimer reçineden elde edilir. CNSL (Cashew Nut Shell Liquit) işlemindeki ana bileşen cardenoldür. Cardenol doğal olarak hidrofobiktir ve çok düşük sıcaklıklarda esnek ve sıvı olarak kalır [170].

Cardenol CNSL (Cashew Nut Shell Liquit) den imal edilen fenol olarak bilinir. Cardenol'ün kendine özgü moleküler içeriği, özellikle doymamış uzun hidrokarbon zincirleri çapraz bağların kolayca polimerleşmesiyle esnekliğe katkıda bulunmasını, yüksek elektrik yalıtımı uygulamalarını ve termal stabilite sağlar. Ayrıca zincirler polimerin hidrofobik özelliğini açığa çıkarır. Cardenol bulunan reçineler mineral yağlarını yumuşatmada, anti mikrobik proseslerde, böcek ilacı olarak, boyama ve verniklemede, epoxy reçinesi ve yağ çözücü reçine olarak, elektriksel yalıtım malzemesi olarak da kullanılır. Cardenol asitlere ve alkalilere karşı yüksek direnç gösterir.

Cashew sürtünme parçacıkları stabilite sağlamak için fren balatası bileşiminde kullanılmaktadır. Doğal esnekliğe sahip olmasıyla yoğun etkileri absorblama ve tamponlama özeliği bileşime katılan cashew sürtünme parçacıklarının etkileyici özelliklerindendir. Ayrıca fren yüzeyinde kolayca ayrışır çeşitli sıcaklıklarda geliştirilerek aşınma kontrol edilir. Aşırı sıcaklık artışını engelleyerek koruyucu organ olarak davranır. Aynı zamanda ısıyı kolayca absorbe eder ve ısıyı balatanın içerisinde her alana eşit olarak dağıtır. Bu özelliklerinden dolayı cashew sürtünme tozu önceleri ham malzeme olarak ağır taşıtlar için asbestli ve asbestsiz fren balatalarında kullanılmıştır [170].

Borik asit ve boraks, türevleri ısıya karşı dayanıklılık, yüzey sertliği ve yüksek aşınma dayanımı gibi özelliklerin istendiği özel camların üretiminde, seramiklerin yüzey kaplamalarında ve diğer sanayi dallarında kullanılmaktadır [37, 171]. Borik asit'in aşınmaya karşı sert yüzey oluşturması nedeniyle seramik sanayisinde ve ısıya dayanıklı borcam üretiminde, ayrıca cam elyaf üretiminde kullanıldığı bilinmektedir [28]. Bölüm 3'de bor ve mineralleri ile ilgili geniş bilgi verilmiştir.

Borik asit ve boratlar selülozik maddelerin ateşe karşı dayanıklılığını sağlarlar, tutuşma sıcaklığına gelmeden selülozdaki su moleküllerini uzaklaştırırlar ve oluşan kömürün yüzeyini kaplayarak daha ileri bir yanmayı engellerler. Borlu elyaf kompozitleri tekniğin en son harikaları olarak kabul edilir. Al ve Mg'un bor elyaf ile güçlendirilmeleri ile elde edilen kompozitler de 360 kg/mm²'lik basınca dayanır. Karbon elyaflardan daha pahalıdır. Ti ve Tungsten tel üzerine bor buharı depozite edilerek elde edilen bu lifler F-16 savaş uçağında % 2,1, F-18 savaş uçağında % 10 kadar ve uzay araçlarında kullanılmaktadır. Lazer hücumunda ısıyı belirli noktadan uzaklaştırdığı için askeri amaçla kullanılır. Talk pudrasında borik asit % 5-10 civarında kullanılır. Talk pudrası bazı balatalarda dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır [171].

Seramik ve emaye sırlarının ana hammaddesi olan fritte kullanılan bor mineralleri (kolomanit-üleksit-tinkal) ve ürünleri (borax (penta-deka), borik asit), yüzeyde oluşacak çatlama ve kavlama gibi yüzey hatalarına mani olur. Aynı zamanda genleşme değeri de düşüktür. Üleksitin en önemli kullanım alanları, yalıtkan ve ateşe dayanıklı kimyasal maddelerin üretim sanayileridir. Ayrıca cam elyafı üretiminde de kullanılmaktadır.

Bor mineralleri olan üleksit, kolemanit, borik asit ve borax'ın bu özellikleri göz önüne alınarak standartlara uygun balata üretiminde olumlu katkı sağlayacağı düşünüldükçe bor mineralleri katkılı balata numunesi üretilmiştir.

Bu numunelerde seramik sürtünme elemanı olarak Al₂O₃, metalik katkı elemanı olarak pirinç talaşı ve bakır (Cu) tozu kullanılmıştır. Dolgu malzemesi olarak kullanılan baritin sıcaklıkla kararlılığını muhafaza etmesi ve nemden etkilenmeyişi dikkate alındığında barit

ilavesinin balata özelliklerine olumlu katkı sağladığı söylenebilir. Ayrıca baritin ucuz ve temininin kolay olması kayda değer bir avantaj olarak dikkati çekmektedir.

Kullanılan cashew ve bor mineralleri, 100 µm anma boyutu tane büyüklüğüne sahiptir. UC, BC, KC ve XC kodlu numunelerde pişirme (sıcak preslenme) sonrası deneyler yapılmıştır. Aynı içeriğe sahip numunelere 4 saat süre ile 180 °C’de normal atmosfer şartları altında fırınlama işlemi yapılmıştır. Fırınlama işlemine tabii tutulmuş numuneler UCH, BCH, KCH ve XCH kodlu numunelerdir. Söz konusu balata numunelerinin içerikleri Tablo 7.6, 7.7, 7.8, 7.9’da verilmiştir.

Tablo 7.6 Üleksit ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Cashew %	Üleksit %
UC-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
UC-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
UC-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
UC-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
UC-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

Tablo 7.7 Kolemanit ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Cashew %	Kolemanit %
KC-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
KC-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
KC-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
KC-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
KC-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

Tablo 7.8 Borik asit ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Cashew %	Borik asit %
BC-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
BC-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
BC-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
BC-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
BC-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

Tablo 7.9 Borax ile birlikte cashew kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Cashew %	Borax %
XC-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
XC-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
XC-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
XC-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
XC-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

7.5.2. Bor Mineralleri ile Birlikte Sedir Çamı Kozalak Tozu Kullanılan Numuneler

Bu grupta üretilen numunelerde asbeste alternatif olan malzemelerin balata maliyetini artırdığı ve beraberinde yurtdışına bağımlılığı getirdiği için sürtünme ayarlayıcı madde olarak cashew yerine Cedrus (sedir) kullanılarak disk fren balatası üretimi hedeflenmiştir.

Sedir içerisindeki yabancı maddeler olan reçine, tanen ve diğer boyalı maddeler itibarıyla öz odununda depo edilmiştir. Bol sayıda reçine bezeleri bulunmaktadır. Bu maddelerin çoğu ekstraktif maddeler olarak bilinmektedir ve odunu çürüten mantarlara karşı dayanıklılık sağlar. Sedir; tel direği, inşaat ve gemi kerestesi, yonga levha imalinde, su üstü ve su altı inşaatlarında kullanılmaktadır. Çatlamaya, şekil değiştirmeye ve dış sertleşmeye eğilimi yoktur. Su içinde büyük bir dayanma gücü gösterir. Isı karşısında çözünmez bileşikler oluşturur.

Üretilen bu balatalarda kullanılan sedir ve bor mineralleri ile balatanın mekanik ve tribolojik özellikleri, cashew tozuna alternatif olabilecek bir şekilde güçlendirilmeye çalışılmıştır. Cashew tozunda olduğu gibi bu balata numunelerinde de kullanılan bileşenler yüksek sıcaklıkta termal bozulmayı önleyecek şekilde seçilmiştir. Elyaf katkı olarak çelik yünü kullanılmıştır. Bu formülasyonlarda üretilen numunelerde sürtünme katsayısını ve aşınma direncini artırmak için cashew tozuna alternatif olabileceği düşünülen sedir, üleksit, kolemanit, borik asit ve borax kullanılmıştır. Bunların komponent içerisindeki % oranları değiştirilerek standartlara uygun sürtünme katsayısı, termomekanik özellikler ve uygun aşınma direncinin sağlanmasına çalışılmıştır.

Tüm numunelerde fenolik reçine % 22, Al₂O₃ ve grafit % 3 olarak alınmıştır. Numunelerden ‘‘US, KS, BS, XS’’ kodlu olanlar hiçbir fırınlama işlemi görmemişler sadece 10 dakika ve 180 °C’de pişirme (sıcak presleme) işleminden geçirilmişlerdir. ‘‘USH, KSH, BSH, XSH’’ kodlu olanlar ise ‘‘US, KS, BS, XS’’ kodlu olan numuneler ile aynı içeriklere sahiptir, fakat normal atmosferde 180 °C’de 4 saat süre ile fırınlama işlemine tabii tutulmuştur. Böylece üretim aşamasında uygulanan işlemlerin balatanın frenleme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Balata numunelerinin içerikleri Tablo 7.10, 7.11, 7.12, 7.13’de verilmiştir.

Tablo 7.10 Üleksit ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Sedir %	Üleksit %
US-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
US-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
US-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
US-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
US-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

Tablo 7.11 Kolemanit ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Sedir %	Kolemanit %
KS-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
KS-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
KS-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
KS-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
KS-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

Tablo 7.12 Borik asit ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Sedir %	Borik asit %
BS-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
BS-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
BS-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
BS-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
BS-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

Tablo 7.13 Borax ile birlikte sedir kullanılan numunelerin içerikleri

Numune No	Reçine %	Çelik Yünü %	Al ₂ O ₃ %	Pirinç Talaşı %	Grafit %	Barit %	Bakır %	Sedir %	Borax %
XS-4	22	15	3	5	3	20	8	4	20
XS-8	22	15	3	5	3	20	8	8	16
XS-12	22	15	3	5	3	20	8	12	12
XS-16	22	15	3	5	3	20	8	16	8
XS-20	22	15	3	5	3	20	8	20	4

7.6. Fren Balataları için Türk Standartlarında Belirlenen Deney Şartları

Mart 1992 tarihli Türk Standartları (TS) 555'te sürtünme katsayısı, "Disk veya kampana ile disk fren veya kampana fren arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır" şeklinde ifade edilmiştir [28].

Nisan 1991 tarihli TS 9076'da, fren balataları için sürtünme katsayısının belirlenmesinde uygulanacak deney şartları açıklanmıştır. Bunlar;

Sıcaklık Grubu A: 350 °C'ye kadar sınırlanmış sıcaklıkta ve 1050 kPa basınçta yapılan aşınma deneyi,

Sıcaklık Grubu B: 400 °C'ye kadar sınırlanmış sıcaklıkta ve 3000 kPa basınçta yapılan aşınma deneyi, deney programları belirtilmiştir.

Alıştırma aşamasında 700 kPa basınç altında, gerektiğinde soğutma yapılarak 200 °C'de yüzey teması en az % 95 oluncaya kadar sürekli olarak yapılmalıdır. Aralıklı olarak 100 °C'de 10 saniye yüklü, 20 saniye yüksüz olmak üzere 1050 kPa basınç altında yapılmalıdır veya 700 kPa basınç altında 100 °C sıcaklıkta sürtünme katsayısı sabitleşinceye ve yüzey teması en az %95 oluncaya kadar 310 dev/dak döndürülür [126].

Deney cihazında sürtünme yüzeyi gerekli taşlama, zımparalama işlemleri yapıldıktan sonra tane büyüklüğü 320 olan zımpara ile zımparalanır ve tozlar kuru hava veya lif bırakmayan eşdeğeri malzeme ile temizlenir.

Soğuk sürtünme katsayısı: Aşınma deneyi esnasında sıcaklık grubu A şartlarında 100 °C, 150 °C, 200 °C'de ölçülen sürtünme katsayısı değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

Sıcak sürtünme katsayısı: Sıcaklık grubu A şartlarında 300–350 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyi esnasında, sıcaklık grubu B şartlarında 350–400 °C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyi esnasında ölçülen sürtünme katsayısı değerlerinin aritmetik ortalamasıdır [126].

Asbest ihtiva etmeyen kompozit malzemeli demir yolu taşıtları fren pabucuna yönelik olarak düzenlenmiş olan Nisan 1998 tarihli TS 12464'te kompozit malzemeli fren pabucu özellikleri olarak; "Pabuçların kullanımı esnasında çıkan tozlar, aşınma parçacıkları veya gazlar sağlık açısından olumsuz etki yaptığından, pabuçlar asbest, kurşun, çinko gibi sağlığa zararlı maddeler ihtiva etmemelidir" ifadesi yer almaktadır [172].

Balatalarda sertlik deneylerinin TS 139'da belirtilen şartlarda yapılması gerektiği TS 555'te belirtilmiştir. TS139'da Brinell sertlik; belirli çapta bir bilye ile malzemeye uygulanan yükün malzeme yüzeyinde meydana getirdiği iz alanına bölümüyle orantılı bir değerdir. Yükleme derecesi; deney yükü kuvveti ile bilye çapının karesi arasındaki oranın 0,102 sabiti ile çarpımıdır, şeklinde ifade edilmektedir [173].

$$BS = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (7.4)$$

BS= Balata sertliği

F = Deney yükü (N)

D = Batıcı bilye çapı (mm)

d = Bilye izi ortalama çapı (mm) olarak alınmıştır.

Ayrıca ölçümlerin sağlıklı olabilmesi için ‘d’ iz çapı 0,2 D ile 0,7 D arasında bulunmalıdır. Genellikle çelik ve dökme demirler için x = 30, bakır ve alüminyum alaşımları için x = 10 veya 5, çok yumuşak metaller için 2,5 veya 1,25 alınır daha büyük veya küçük izler ve yükleme derecesi kullanılması halinde yanlış yâda karşılaştırılabilir olmayan sertlik değerleri elde edilir [174].

Sertliği ölçülecek malzeme çelik ise, bilyeyi basan kuvvetin değeri bilye çapı karesinin 30 katı, eğer malzeme Al, Mg, Cu veya bu metallerin alaşımları ise o zaman bilye çapı karesinin 10 katı, malzeme daha yumuşak olursa 5 katı ve en yumuşak malzemeler için bu katsayı 2,5 katı olarak alınır [175, 176]. Brinell sertlik ölçme yönteminde sertleştirilmiş standart çelik bilye kullanılmaktadır. Bilye üzerine bir zaman dilimi içerisinde uygulanan ağırlık, malzemede bilyenin küresel bir iz bırakmasına neden olur. Malzemenin sert veya yumuşak olmasına göre iz büyük veya küçük olur [177].

TS 555’te aksi belirtilmedikçe özgül aşınma deneyi mecburi değildir ifadesi yer almaktadır. Söz konusu standardın ilgili maddelerinde bahsedilen test cihazının kampanalı olması, bu çalışmada numune balataların deneylerinin yapılabilmesi için üretimi yapılan deney düzeneğinde ise aşındırıcı yüzey olarak disk kullanılmış olmasından dolayı standartta istenilen tüm şartlar sağlanamadığından özgül aşınma miktarını belirlemede bu çalışmada yapılan aşınma deneyinin değerleri dikkate alınmıştır. TS 555’te belirtilmiş olan kütle metodu seçilmiş ve aşağıdaki hesaplama yöntemi kullanılarak özgül aşınma değerleri belirlenmiştir.

$$V = \frac{1}{2 \pi R_d} \times \frac{(m_1 - m_2)}{n f_m \rho} \quad (7.5)$$

V = Özgül aşınma

m₁ = Deneyden önce ölçülen balata kütlesi (gr)

m₂ = Deneyden sonra ölçülen balata kütlesi (gr)

ρ = Balata yoğunluğu (gr/cm³)

R_d = Disk yarıçapı (m)

f_m = Deneydeki ortalama sürtünme kuvveti (N)

n = Toplam devir sayısı (devir)

7.7. Üretilen Balataların Deney Aşamaları

7.7.1. Sürtünme ve Aşınma Deneyleri

Deneylerde bor mineralleri, cashew ve sedir olmak üzere toplam seksen adet numune kullanılmıştır. Bor mineralleri, cashew ve sedir numunelerin kırk tanesi diğerleri ile eş içerikli olup üretim sonrasında 4 saat süre ile 180 °C sıcaklıkta fırınlanmıştır. TS 555'te belirtildiği gibi deneylerde aynı içeriğe sahip beşer adet deney parçası numunesi kullanılarak aritmetik ortalama değerler alınmıştır. Toplam 80 adet farklı içerik ve farklı üretim işlemine tabii tutulmuş numunenin frenleme karakteristiği, aşınma direnci ve sürtünme katsayısının belirlenmesi için aşağıdaki işlem sırasına göre deneyler gerçekleştirilmiştir.

1. Tüm deneylerde deney başlangıç sıcaklığı 50 °C olarak alınmıştır.
2. Bütün numuneler 700 kPa basınç altında sürekli sürtünmeye tabi tutularak balata yüzeyinin % 95'i fren diskine temas edinceye kadar alıştırma işlemi yapılmıştır. Bu işlemler esnasında TS 9076'da belirtildiği gibi zımparalama, temizleme ve soğutma işlemleri gerçekleştirilmiştir [126].
3. Sıcaklık grubu A için yapılan deneylerde 1050 kPa basınç altında 50 °C sıcaklıktan başlanarak 50'şer derece aralıklarla 400 °C sıcaklığa kadar sekiz kademedeki sıcaklık-sürtünme katsayısı değişimini belirlemek için frenleme işlemi yapılmıştır. Bu işlemler sonucunda her bir balata numunesinden alınan değerlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak söz konusu sıcaklıklarda sürtünme katsayısı hesaplanarak sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi belirlenmiştir.
4. TS 555'te balataların aşınma dirençlerini belirlemek amacıyla özgül aşınma ifadesi balatada meydana gelen hacimsel azalma olarak ifade edilmiştir. TS 555'te özgül aşınma için aksi belirtilmedikçe bu özellik aranmaz ifadesi yer almaktadır. Bu çalışmada üretimi yapılan test cihazının ölçüleri arasında farklılık bulunmaktadır. Bu sebeple literatür çalışmaları dikkate alınarak bu çalışmaya özgü yapılan aşınma deneyinde kütleli fark metodu seçilerek elde edilen değerler TS 555'te belirtilen hesaplama yolu ile hesaplanmıştır. Sonuçlar 8. Bölümde verilmiştir.
5. Bu çalışmada üretilen numune balataların aşınma direncini ölçmede kütleli fark yolu seçilmiştir. Balataların aşınma miktarı ve aşınma dirençlerinin belirlenmesi amacıyla 1050 kPa basınç altında 6 m/s hızda 500 saniye süre ile 3000 m yol alması sağlanmıştır. Bu deney sonunda her bir numune balata hassas terazide tartılarak kütle kaybı bulunmuştur. Bulunan kütle kaybının sürtünme yüzey alanına bölümüyle birim alana düşen aşınma miktarı belirlenmiştir. Özgül aşınma değerleri 7.5 numaralı formül ile hesaplanarak elde edilen sonuçlar Bölüm 8'de verilmiştir.

7.7.2. Mikro yapı çalışmaları

Sürtünme ve aşınma deneyleri sonrasında numune balataların mikro yapısını incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışması yapılmıştır. Sürtünme ve aşınma deneyinde numune balataların yüzeyinde oluşan yapıyı gözlemlemek için yüzeyden koparak yine yüzeye sıvıyan parçacıkları uzaklaştırmak amacıyla aşınan yüzey Metkon Gripo marka 600 d/d sabit devirde dönen 240 numara zımparaya daha sonra 850 d/d sabit devirde dönen keçeyle tutulmuştur.

Taramalı elektron mikroskobundan mikro yapı resimlerinin alınabilmesi için numunelerin iletken olması gerekmektedir. Numuneler yeterli iletkenliğe sahip olmadıklarından, iletkenlik kazandırmak amacıyla numunelerin yüzeyinin kaplanarak iletkenliğin sağlanması gerekmiştir. Numuneler ‘‘BAL-TEC SCD-005 Sputter-Coater’’ marka kaplama cihazında 4×10^{-2} mbar mertebesine vakumlanarak 3 ang/s (Å/s) hızda, 15 saniye sürede carbon ile 10^{-8} m kalınlıkta buharlaşma tekniği ile kaplanmıştır.

Kaplama işlemi sonrasında ‘‘LEO 1430 VP’’ marka taramalı elektron mikroskobunda $1,25 \times 10^{-4}$ mbar basınçta vakumlanmıştır. Vakumlama sırasında malzeme içyapısı gözenekli olduğundan gözeneklerde bulunan hava, cihazın vakumlama (disşarj) süresini olması gerekenden daha uzun sürdürmüştür. Cihaz iç basıncı $1,25 \times 10^{-4}$ mbar’a düşüncü mikro yapı resimlerinin çekilebilmesi için cihaz aktif hale geçmiştir. Malzeme içyapı resimleri literatür çalışmaları dikkate alınarak 500 kat büyütölerek çekilmiştir.

7.7.3. Sertlik, Yoğunluk ve Dayanım Testleri

Numune balataların sertliklerinin belirlenmesinde TS 139’da belirtilen işlemler uygulanmıştır. Bu aşamada yapılan çalışmalarda statik sertlik ölçme yöntemlerinden olan Brinell sertlik ölçme yönteminin söz konusu balataların sertliğini belirlemede uygun yöntem olduğu belirlenmiştir.

Sertlik ölçme işlemlerinde ‘‘Mettes’’ marka üniversal sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Yukarıda verilen bilgiler dikkate alınarak batıcı uç olarak çapı 2,5mm olan çelik bilye uç kullanılmıştır. Uygulanan yük 62,5 kgf (612,9 N) olarak alınmıştır. Yükleme sırasında 8 saniye uygulama, 15 saniye sabit yükleme süresi olarak uygulanmıştır. Daha sonra ‘‘Mikrovu’’ marka 117 volt’luk 3 ampulün kullanıldığı optik mikroskop ile bilye iz çapı belirlenmiştir. Alınan iz çapı değeri sertlik cihazının değeri kısmına yazılarak sertlik değeri elde edilmiştir. Ayrıca 7.4 numaralı formölde yerine konularak Brinell sertlik değeri hesaplanmıştır. Bu değeri çalışmış yüzeye sahip üçer numune üzerinden alınmıştır. Bu numunelerin yüzey boyutları 25.4×12.7mm olduğu için yüzey köşegenlerinin çakıştığı orta

noktalarından değerler alınmıştır. Deney sırasında kullanılan disk'te numune balataların sürtündüğü yüzeyden ve numune balataların sürtünmediği yüzeyden üçer farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen değerler Bölüm 8'de verilmiştir.

Ayrıca yukarıda bahsedilen ölçme yöntemi kullanılarak, deneysel çalışmalarda kullanılan diskin sertliği belirlenmiştir. 5 mm çapında bilye kullanılarak 1471 N (150 kg) yük uygulanmıştır. Bu değerler demir döküm malzemeler için ilgili kaynaklarda öngörülen değerlerdir.

Numune balataların su, tuzlu su, yağ ve fren sıvısına dayanımını belirlemek için TS 9075'te belirtilen deney şartları dikkate alınmıştır. Bu deneyler dizisinde her bir deney için üçer adet numune kullanılmıştır. Numuneler üzerinde kalınlık ölçümleri yapılmış ve hassas terazide kütleleri belirlenmiştir. Kalınlık ölçümlerinde numunelerin en, boy ve yükseklikleri ölçülmüştür. Böylece deneyde kullanılan sıvıların malzemenin üç boyutundaki oluşturduğu farklılıklar belirlenmiştir. Numuneler söz konusu sıvılar içerisinde belirtilen süre boyunca bekletilmiştir. Deney sonunda numuneler kurutma kâğıdı ile kurutulmuş ve ilk 10 dakika içerisinde kalınlık ölçümleri yapılmış ve kütleleri tartılmıştır. Fark değerler % değişme miktarı olarak hesaplanarak Tablo haline dönüştürülmüştür. Kalınlık ölçümlerinde 0,01 mm hassasiyetinde mikrometre, kütle farkı belirlemede 0,001 hassasiyetinde hassas terazi kullanılmıştır. Su ve tuzlu su deneyinde numuneler yedi gün sıvı banyosunda bekletilmiştir. Tuzlu su hazırlamak için litrede 100 gr sodyum klorür katılmıştır. Yağ ve fren sıvısı deneyi için numuneler 48 saat sıvı içerisinde tutulmuştur. TS 3563'te belirtilen iki numaralı yağ özelliklerini en yakın karşılayan yağ piyasadan temin edilmiştir. Piyasa araştırması sonunda en yakın özellikteki yağın parlama noktası 248 °C ve kinematik viskozitesi 20 m²/s olan yağ piyasadan temin edilerek kullanılmıştır. Fren sıvısı olarak TS 1046 da belirtilen özellikleri taşıyan fren sıvısı piyasadan temin edilerek kullanılmıştır. Bu deneylerden elde edilen değerler Bölüm 8'de verilmiştir.

Numunelerin yoğunluğu, aynı içerikli üç adet numune "Sartorius MC 1" marka 0,0001 hassasiyetli Arşimet terazide belirlenmiştir. Bu numuneler saf su ile doldurulmuş dereceli silindir (mezür)'e daldırılmıştır. Saf suyun hacmindeki değişim numunenin hacmini verdiğinden dereceli silindirdeki fark miktar belirlenmiş ve cismin kütlesi cismin hacim farkına bölünmüş, üç numuneden çıkan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak cismin yoğunluğu belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen değerler Bölüm 8'de verilmiştir.

8. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Farklı formüllerde ve farklı üretim işlemine tabi tutulmuş 80 adet numune üzerinde frenleme karakteristiği, aşınma direnci, farklı sıvı içerisindeki dayanımı ve sürtünme katsayısı gibi özellikleri belirlemek amacıyla bir dizi testler yapılmıştır. Bu numuneleri kesin hatları ile birbirinden ayırmak oldukça zordur. Ancak Bölüm 7’de anlatıldığı gibi bor katkılı cashew ve bor katkılı sedir olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Numuneler içerisinde muhtelif oranlarda bor minerali, cashew ve sedir katmak suretiyle farklı karakteristik özelliklere sahip yeni formüllü fren balatası numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler farklı üretim aşamaları ve farklı işletme şartlarından geçirilerek bu faktörlerin balata karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Üleksit katkılı numuneler “U” harfi ile, kolemanit katkılı numuneler “K” harfi ile, Borik asit katkılı numuneler “B” harfi ile, boraks katkılı numuneler “X” harfi ile simgelenmiştir. Cashew katkılı olan numunelerin simgelerinde “C”, Sedir katkılı olan numunelerin simgelerinde “S” harfi bulunmaktadır. Simgelerde bulunan sayı ise katılan malzemenin % oranını ifade etmektedir. “H” harfi fırınlama işlemine tabi tutulmuş numune olduğunu belirtmektedir.

Deneylerde Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv laboratuvarlarında bulunan fren test cihazı ve Teknoloji uygulama ve araştırma merkezinde (TUAM) bulunan cihazlar kullanılmıştır.

8.1. Bor Mineralleri ile Cashew Kullanılan Fren Balataları

Deneylerde toplam kırk adet numune kullanılmıştır. Numunelerin yirmi tanesi diğerleri ile eş içerikli olup üretim sonrasında 4 saat süre ile 180 °C sıcaklıkta fırınlanmıştır. TS 555’te belirtildiği gibi deneylerde aynı içeriğe sahip beşer adet deney parçası numunesi kullanılarak aritmetik ortalama değerler alınmıştır.

Numunelerin sıcaklık-sürtünme katsayısı değişimini belirlemek için 1050 kPa basınçta deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında disk hızı 6m/sn de tutulmuş sıcaklık 50 °C’den 400 °C’ye yükselene kadar 1 saniye aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Tüm balatalarda kütleli oran esas alınmıştır. Bağlayıcı olarak fenolik reçine, metalik katkı olarak bakır ve pirinç talaşı seramik katkı olarak alümina (Al_2O_3) katı yağlayıcı olarak grafit, dolgu maddesi olarak barit, parçalanmaya karşı direnci artırmak için çelik yünü sürtünme ayarlayıcı madde olarak cashew ve bor minerallerinden ham bor ürünleri Üleksit, Kolemanit, rafine bor ürünleri olarak Borik asit, Boraks pentahydrate’tan oluşan malzemeler kullanılmıştır.

8.1.1. Üleksit ve Cashew Katkılı Fren Balataları

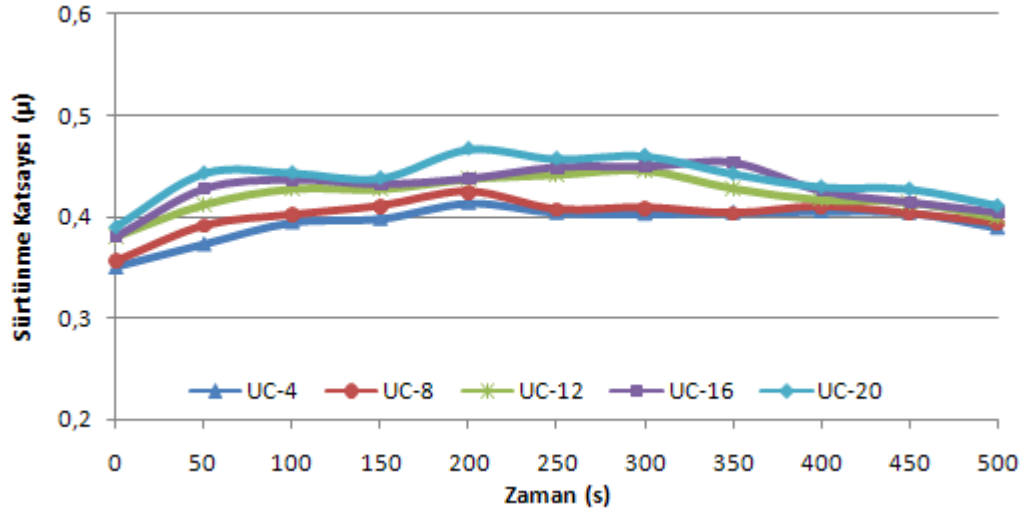
8.1.1.1. Sürtünme Performansı

Deneyisel çalışma sonuçlarına dayanılarak bulunan sürtünme katsayıları ve sıcaklık ile ilgili grafikler Şekil 8.1, Şekil 8.2, Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'te görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde fırınlama işlemi yapılmış bütün numunelerde (UCH) sürtünme katsayılarının daha kararlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlardan; fırınlamanın balata bütünlüğünü sağlayan iç reaksiyon tamamlanma süresini uzatarak balata performansını kararlı hale getirdiği, bu sayede frenleme sırasında balatanın ısınması neticesinde mikro yapıda olabilecek değişiklikleri azalttığı söylenebilir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerin (UC) sürtünme katsayılarında sıcaklık değişimleri ile beraber hızlı yükselme ve dalgalanma veya hızlı düşmeler gözlenmiştir. Sonuç olarak fırınlama işleminin sürtünme katsayısına kararlılık kazandırdığı söylenebilir.

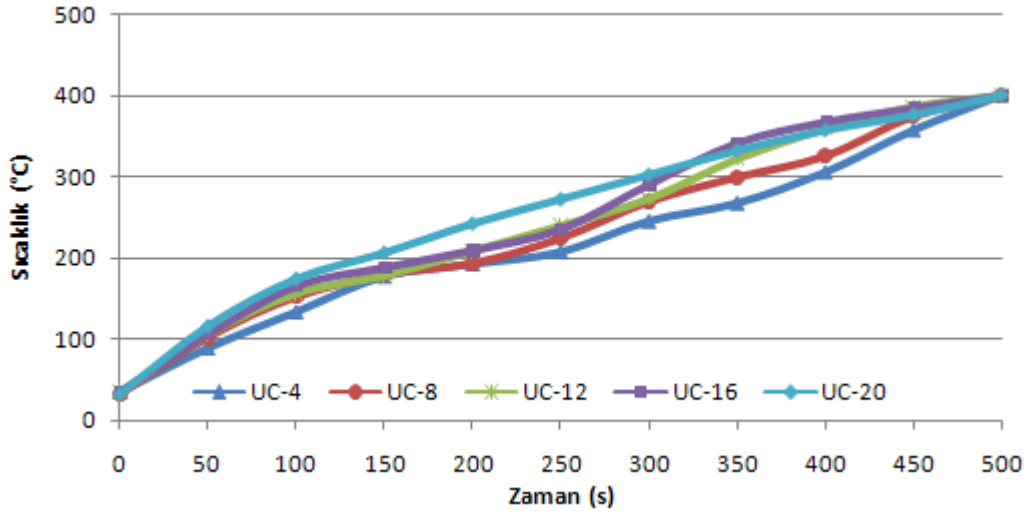
Şekil 8.1'de fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafiğini göstermektedir. Şekil incelendiğinde zamana bağlı olarak sürtünme katsayısında değişim dalgalı olarak görülmektedir. En yüksek sürtünme % 43 ile UC-20 kodlu numunede görülmektedir. Şekilde üleksit miktarının artışıyla birlikte sürtünme katsayısında da bir artış olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısı yüksek olan numunenin sıcaklık değeri de yüksek çıkmaktadır. Şekil 8.2 sürtünme katsayısında meydana gelen sıcaklık değişimlerin zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde en yüksek sıcaklık, sürtünme katsayısı en yüksek olan UC-20 kodlu numunede meydana gelmiştir. Sıcaklığın artışıyla birlikte sürtünme katsayısında bir düşüş gözlenmektedir. Anderson [118] sürtünme kuvveti değişiminin, disk kalınlık değişimi, diskin sıcaklığı ve sürtünme yüzeyinde meydana gelen bileşenlerden güçlü bir şekilde etkilendiğini belirtmiştir.

Üleksit ve Cashew katkılı tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi sürecinden sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.1-8.4). Sürtünme katsayısı değişimi için bu grafikler incelendiğinde, UC-4, UC-8 kodlu numuneler UC-12, UC-16 ve UC-20 kodlu numunelere göre daha az dalgalanma göstermiştir. UC-4 ve UC-8 kodlu numuneler sürtünme tabakası oluşumunun tamamlanmasıyla birlikte yavaş yavaş düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 8.1). Bu safhada henüz sıcaklık 200 °C - 250 °C arasındadır. Sürtünme katsayısındaki bu düşme, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin sürtünme çiftinin karşı yüzeyini oluşturan disk'e tutunma özelliği gösteremediği, yani ya komponenti oluşturan malzemelerin birbirleri ile iyi uyum sağlamadığından dolayı sürtünme yüzeyine karşı bir direnç oluşturamadığı ya da oluşan sürtünme yüzeyi sert malzemelerden

oluşmadığı için sürtünme katsayısında beklenen artış veya stabil kalamadığı şeklinde açıklanabilir.



Şekil 8.1 UC kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi



Şekil 8.2 UC kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

UC-4 kodlu numunenin 200. saniyeye kadar sürtünme katsayısında yükselme meydana gelirken 200. saniyeden sonra sürtünme katsayısında sıcaklığın artışıyla birlikte bir düşme olmuştur (Şekil 8.1 ve Şekil 8.2) UC-4 kodlu numune sıcaklık artışıyla birlikte düşük ama kararlı bir sürtünme sergilemiştir. UC-4 kodlu numune için yukarıda ifade edilen termo-mekanik gerekçeler UC-8 kodlu numune için de geçerlidir. Ek olarak UC-8 kodlu numunede % 16 üleksit ve % 8 cashew olduğundan balatayı oluşturan komponentler içerisinde uyumsuzluk olabileceği düşünülmektedir. Aynı durum UC-4 kodlu numunede de geçerlidir, burada cashew

oranı % 4 ve üleksit oranı % 20 olduğundan balatayı oluşturan komponentler içerisinde uyumsuzluk olabileceği düşünülmektedir.

Fren balatalarından istenen en önemli özelliklerden birisi, frenleme sırasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan sıcaklık artışına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin minimum seviyede olmasıdır [182,183]. Fırınlanmamış numunelerin şekilleri (Şekil 8.1-Şekil 8.2) incelendiğinde sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayısında bir düşüş gözlenmiştir. Ostermeyer [181] sürtünme katsayısının dinamiği üzerine yapmış olduğu çalışmada sürtünme katsayısının sıcaklıktaki artışa bağlı olarak azalacağını belirtmiştir, bu da bizim fırınlanmamış numuneler ile yaptığımız deney çalışmalarını doğrular niteliktedir. Ancak, numuneler karşılaştırıldığında kararlı bir sürtünme katsayısını fırınlanmış numunelerde görmek mümkündür. Genellikle sürtünme katsayısı (μ) 0,1 ile 0,7 arasında, sürtünme kuvveti ve disk balata ara yüzey sıcaklığına bağlı olarak değiştiği literatürde vurgulanmaktadır [184].

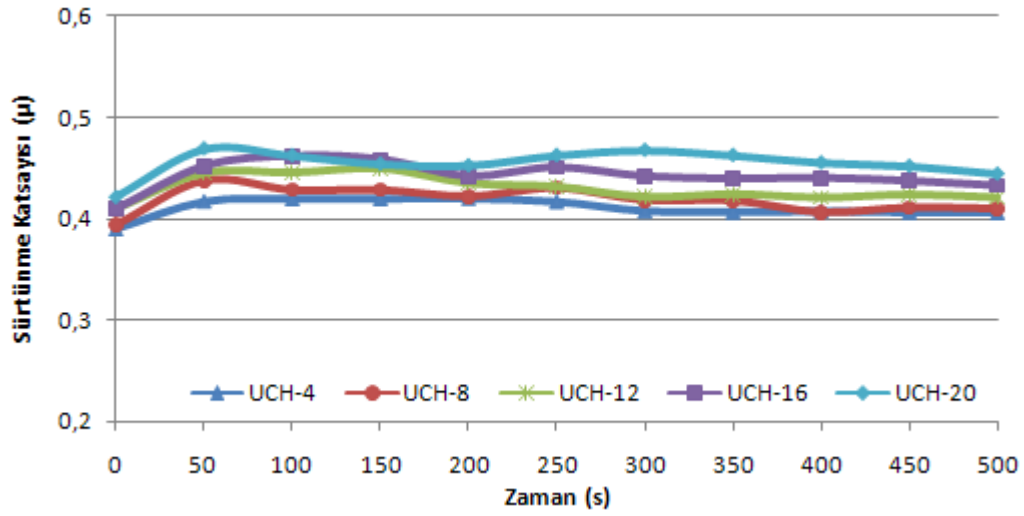
Şekil 8.3 aynı içeriklere sahip fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonraki numunelerden (UCH) elde edilen sürtünme katsayısını göstermektedir. Şekil 8.1 ve Şekil 8.3 karşılaştırıldığında fırınlama işlemine tabi tutulmuş numunelerin sürtünme katsayısında artış meydana getirdiği görülmektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerden en yüksek sürtünme katsayısını veren UC-20 balata numunesinin sürtünme katsayısı değeri ortalama %43 iken, fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra bu numunenin (UCH-20) sürtünme katsayısı % 45 olarak ölçülmüştür. Şekiller karşılaştırıldığında fırınlama işlemine tutulmuş numunelerin sürtünme katsayılarında daha doğrusal bir grafik elde edildiği görülmektedir.

Üleksit ve cashew katkılı fırınlanmış UCH-4, UCH-8, UCH-12, UCH-16 ve UCH-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.3-8.4) ilk 50 saniyede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda yukarıda bahsedildiği gibi benzer karakteristik göstermiştir. Tüm numunelerde sıcaklığın artışıyla birlikte 50. saniyeden 200. saniyeye kadar kısmi bir düşüş ve sonrasında tekrar toparlanma mevcuttur. 350. saniyeden sonra sıcaklık tüm numunelerde birbirine yakın değerde seyretmiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra tüm numunelerde stabil bir sürtünme katsayısı görülmüştür.

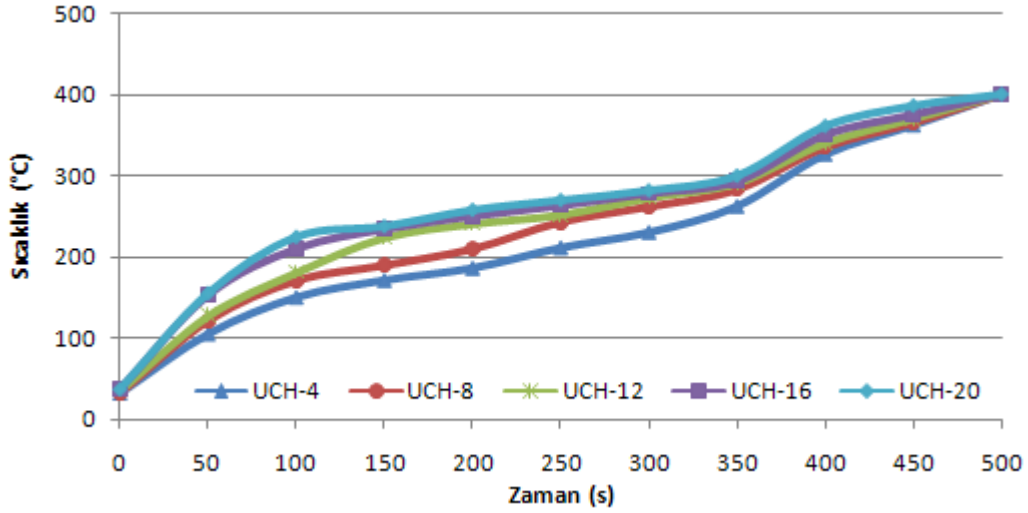
En düşük sürtünme katsayısına sahip UCH-4 ve UCH-8 kodlu numuneler Şekil 8.4’de görüldüğü gibi düşük sıcaklık sergilemişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısı sergileyen UCH-20 kodlu numunenin sıcaklık eğrisi en yüksektir ve UCH-16 kodlu numune ile benzer özellik göstermiştir. 400. saniyeden sonra tüm numuneler stabil bir sürtünme eğilimi sergilemiştir.

UCH-12 kodlu numune ilk 50 saniyeden sonra diğer numunelerde olduğu gibi sürtünme katsayısında fazla düşüş görülmemiştir. 150. saniyeye kadar yüksek ortalama sergileyen UCH-16 kodlu numune ile aynı özellikleri göstermiştir. 150. saniyeden sonra sürtünme katsayısında meydana gelen düşüş ile sıcaklık yavaş yavaş artmaya başlamıştır (Şekil 8.4). 300. saniyeye

kadar sürtünme katsayısında düşme görülmüştür. 300. saniyeden sonra stabil bir sürtünme katsayısı göstermiştir.



Şekil 8.3 UCH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

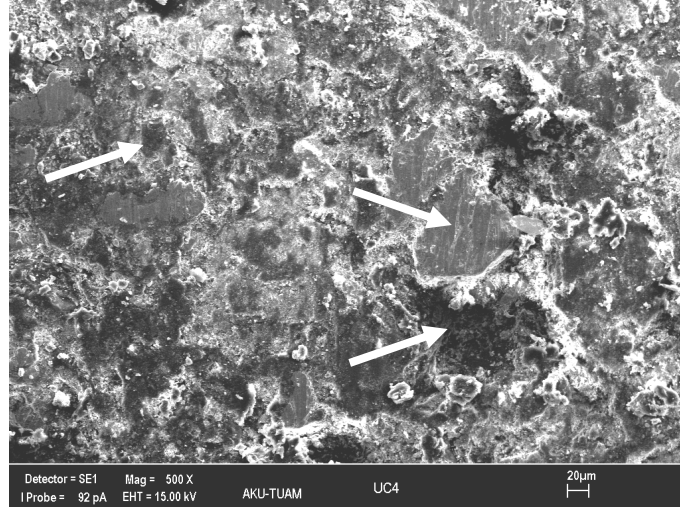


Şekil 8.4 UCH kodlu fırınlanmış numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

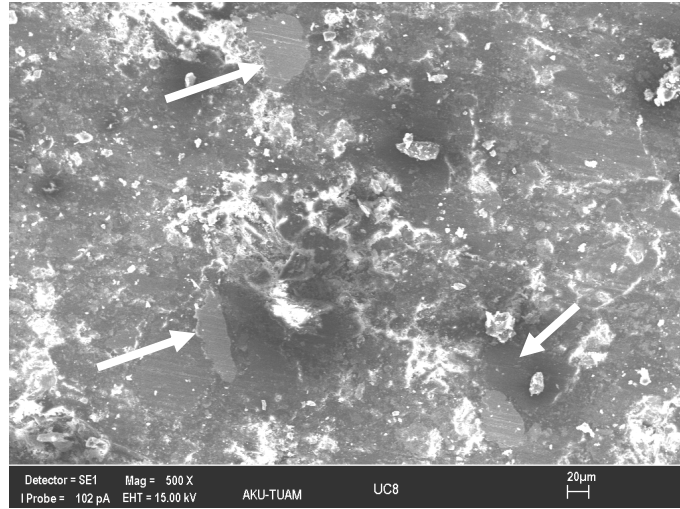
8.1.1.2. Mikro Yapı Karakteristiği

Üleksit katkılı fren balatalarının sürtünme yüzeyinin karakteristiğini belirlemek amacıyla çekilen SEM resimleri Şekil 8.5–8.9'da görülmektedir. Söz konusu resimlerde genel olarak, sürtünme yüzeylerinde abrazif aşınmalar sonucu oluşan çizikler, mikro ve makro boşluklar ve adhezif aşınmalar sonucu oluşan üzeri kaplanmış sürtünme tabakaları ile termomekanik gerilmelere bağlı olarak mikro çatlakların olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşan sürtünme yüzeylerinde komponentti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldıkları da anlaşılmaktadır.

UC-4 kodlu numunenin sem resminde sıkı bir yüzey yapısı ile birlikte komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı Şekil 8.5’de görülmektedir. Sürtünmenin etkisiyle parçacıkların bünnyeden kopması sonucu oluşan mikro ve makro boşluklar görülmektedir. UC-4 kodlu numunede % 20 üleksit ve % 4 cashew mevcuttur. SEM resminden anlaşıldığı kadarıyla kısmen abrazif aşınma görülmekte ve kısmen adhezif aşınma belirtileri mevcuttur. Dolayısıyla sergilediği sürtünme performansı sürtünme yüzey karakteristiğinde de görülmektedir.



Şekil 8.5 UC-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

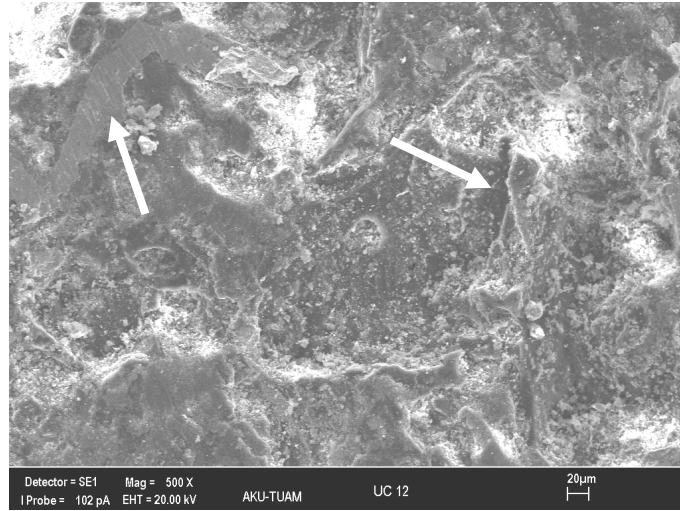


Şekil 8.6 UC-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

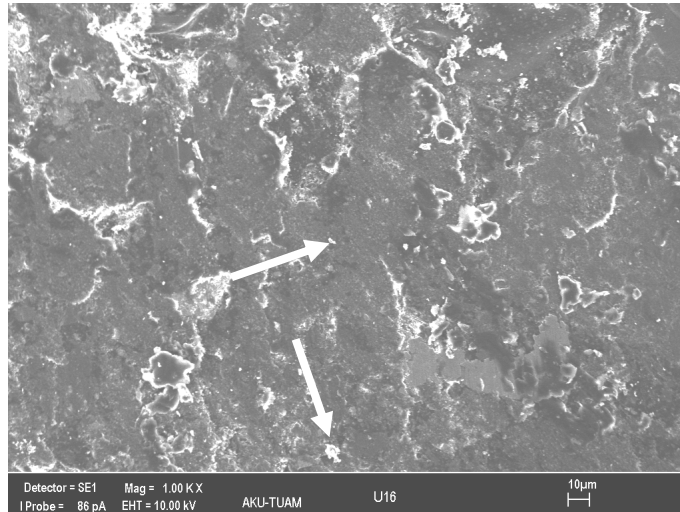
UC-8 kodlu numunenin sem resminde sıkı bir yüzey yapısı ile birlikte komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.6). Sürtünmenin etkisiyle parçacıkların bünnyeden kopması sonucu oluşan mikro ve makro boşluklar görülmektedir. UC-8 kodlu numunede % 16 üleksit, % 8 cashew mevcuttur ve 0,40 sürtünme katsayısı ortalaması göstermiştir. SEM resminden anlaşıldığı kadarıyla yer yer abrazif aşınma görülmekte ve kısmen

adhezif aşınma belirtileri mevcuttur. Dolayısıyla sergilediği sürtünme performansı sürtünme yüzey karakteristiğini de etkilemiştir.

Şekil 8.7’de UC-12 kodlu numunenin sem resmi görülmektedir. Üleksit katkılı diğer numunelerin sürtünme yüzey karakteristiğine benzer özellikler göstermektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerin abrazif aşınmadan kaynaklandığı ve balata bünyesinden kopan bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar oluşturduğu görülmektedir. 0,42 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen UC-12 kodlu numune % 12 cashew, % 12 üleksit içermektedir.

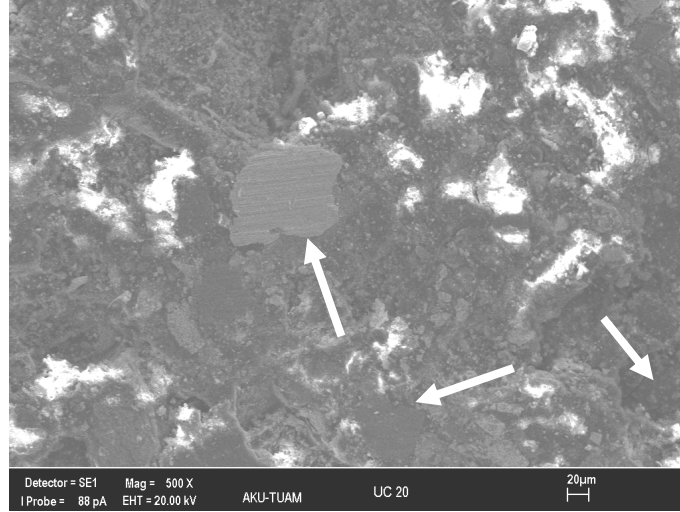


Şekil 8.7 UC-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



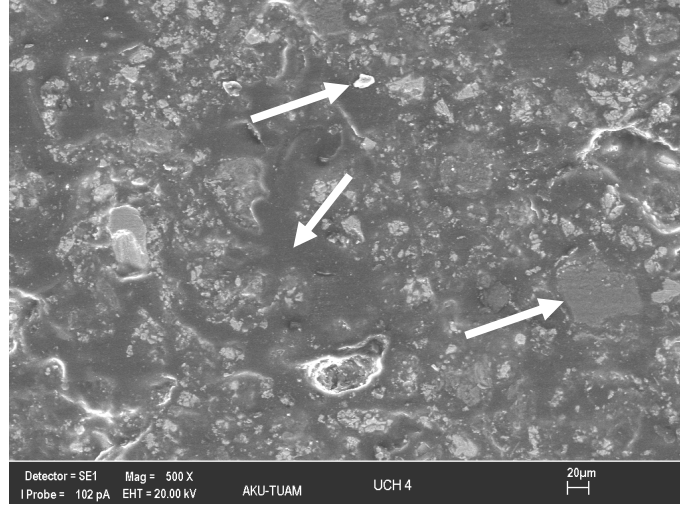
Şekil 8.8 UC-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.8’de SEM resmi görülen UC-16 kodlu numune % 8 üleksit, % 16 cashew içermektedir ve 0,42 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin sürtünme oluşan yüzeyinde mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Oluşan abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler ile dikkat çekmektedir.



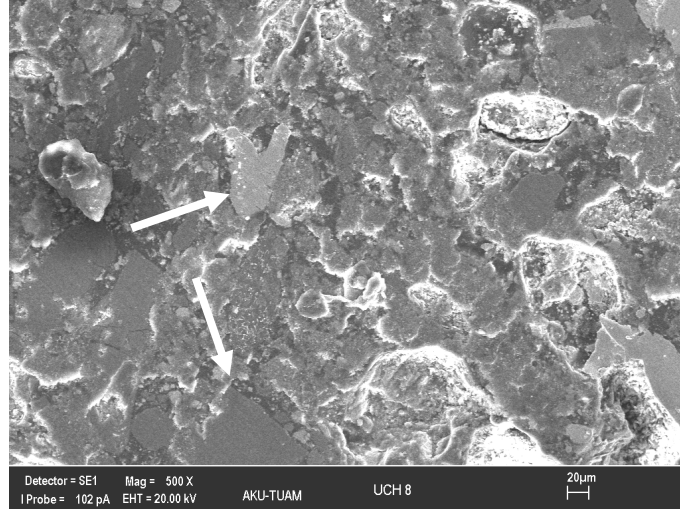
Şekil 8.9 UC-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

% 20 cashew, % 4 üleksit içeren ve 0,43 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen UC-20 kodlu numunenin sem resmi Şekil 8.9’da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi adhezif aşınmaya maruz kalmış bir sürtünme yüzeyi mevcuttur. Yine diğer numunelerde de görülen sürtünmeye bağlı mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Fakat abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler görülmektedir.



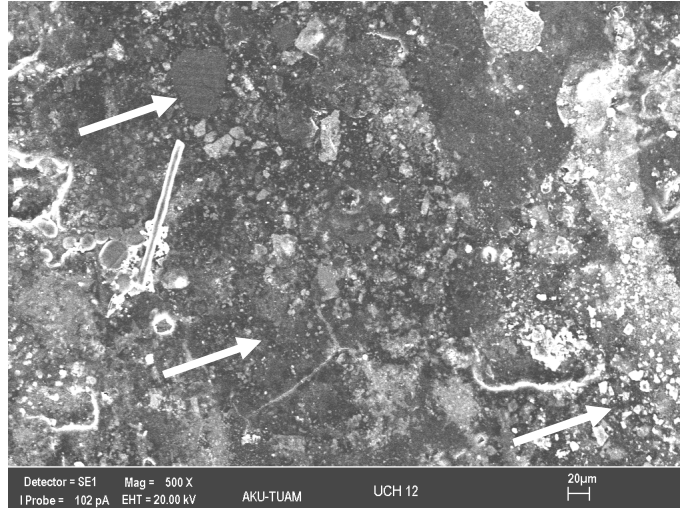
Şekil 8.10 UCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.10’da UC-4 kodlu numune ile aynı içeriklere sahip, fakat 4 saat süre ile 180°C’de fırınlama işlemine tabi tutulmuş UCH-4 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. % 20 üleksit ve % 4 cashew içeren ve 0,41 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro boşluklara ilaveten, beyaz renkli bölgeler sürtünmeye aktif olarak katılıp aşınmış metal parçacıklarıdır. Ayrıca sürtünme yüzeyinde oluşan renk farklılıkları hem adhezif hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 8.11 UCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

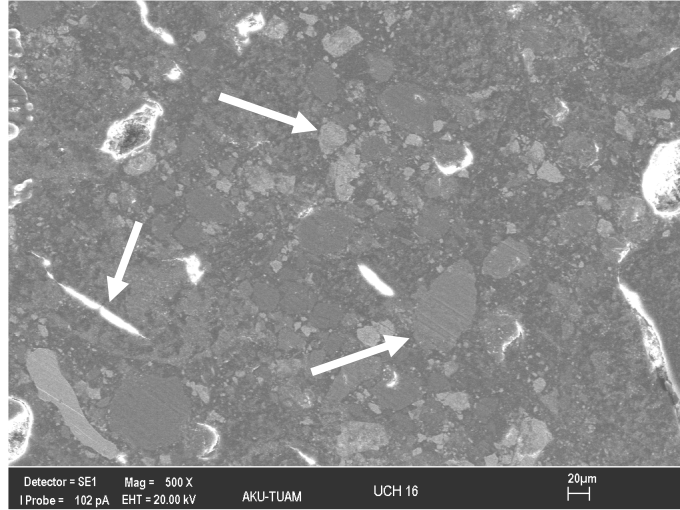
UCH-8 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.11’de görülmektedir. UCH-8 kodlu numunenin sem resminde komponentti oluşturan malzemelerden büyük taneli olan veya küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. UCH-8 kodlu numunede % 8 cashew, % 16 üleksit mevcuttur. Ayrıca % 20 barit içermektedir. Bu küçük topaklanmalar barit topaklanması olabilir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvıyan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir.



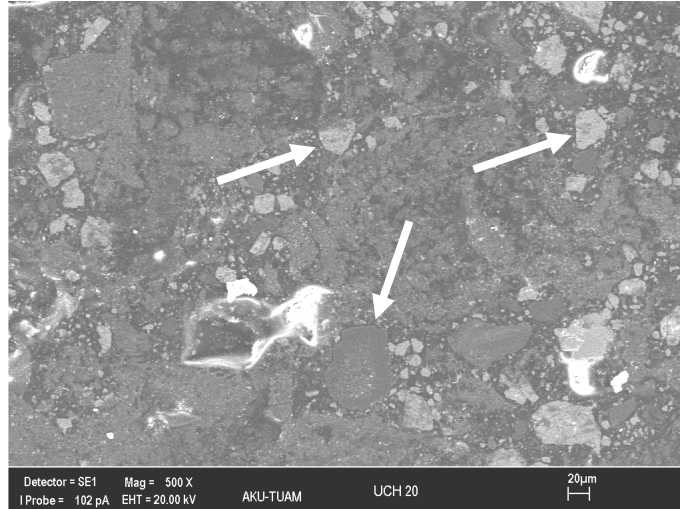
Şekil 8.12 UCH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.12’de UCH-12 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. 0,43 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro boşluklar

mevcuttur. Beyaz renkli bölgeler sürtünmeye aktif olarak katılıp aşınmış metal parçacıklarıdır. Ayrıca sürtünme yüzeyinde oluşan kısa çizikler ve renk farklılıkları hem adhezif hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiği göstermektedir. Ayrıca sürtünme yüzeyinde görülen çelik yününün sürtünmeye iştirak ettiği görülmektedir.



Şekil 8.13 UCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.14 UCH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.13 UCH-16 ve Şekil 8.14 UCH-20 kodlu numunelerin mikro yapısını göstermektedir. Her iki numunenin mikro yapıları incelendiğinde birbirlerine benzer oldukları görülmektedir. UCH-16 kodlu numune % 16 cashew, %8 üleksit içeriğiyle 0,44 sürtünme katsayısı gösterirken UCH-20 kodlu numune % 20 cashew, % 4 üleksit içeriğiyle 0,45 sürtünme katsayısı ortalaması göstermiştir.

Her iki numunenin sem resimlerine bakıldığında sürtünmeye bağlı mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Numuneler fırınlama işlemine tabi tutulduklarından komponenti oluşturan

malzemeler arasında homojen bir dağılım meydana gelmiştir. Koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvı adhezif malzemelerin olduğu görülmektedir.

8.1.1.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Muhtelif Sıvılara Dayanım Testleri

Üleksit takviyeli fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin yapılan deneysel çalışmalarında tespit edilen sertlik, yoğunluk, özgül aşınma değerleri Tablo 8.1 ve Tablo 8.2,'de ve muhtelif sıvılara dayanım test sonuçları ise Tablo 8.3'de verilmiştir.

Tablo 8.1 UC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
UC-4	0,26	1,935	18,2	0,394	0,0181646
UC-8	0,27	1,842	16,2	0,401	0,0172077
UC-12	0,34	1,765	15,9	0,420	0,0192307
UC-16	0,37	1,704	14,7	0,427	0,0216357
UC-20	0,38	1,680	13,9	0,437	0,0222927

Değerler incelendiğinde aşınma direnci ile sertlik arasında doğrudan bir bağlantı kurmak mümkündür. Tablodan, sertliği yüksek olan balatanın aşınma direncinin de yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum numuneleri oluşturan komponentin içeriği ile ilgilidir. Farklı içerikli balata bileşiklerinde komponenti oluşturan malzemeler sert yapıya sahip olabilir, bunun sonucu sertlik değeri yüksek çıkabilir. Ancak komponenti oluşturan malzemeleri tutan reçine miktarı yeterli değilse veya parçacık tutunma yüzeyi azalmışsa komponenti oluşturan parçacıklar sürtünme sırasında küçük zorlamalarda ana yapıdan çabucak ayrılması aşınma oranını beklenenden yüksek çıkarabilir. Genelde fırınlama işleminin balatanın mikro yapısında etkili olduğu buna bağlı olarak sertliğin arttığı görülmektedir. Tablo 8.1-8.2 incelendiğinde UC-4 kodlu numunenin sürtünme katsayısı 0,39 aşınma miktarı 0,26 iken fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra bu numunenin sürtünme katsayısı değeri 0,41 aşınma miktarı 0,21 olmuştur. Fırınlama işlemi hem sürtünme katsayısında hem de özgül aşınmada olumlu etki sağlamıştır.

Fırınlanmış (UCH) ve fırınlanmamış (UC) olan her iki özellikteki numunelerin ortalama sürtünme katsayısı, sertlik ve özgül aşınma oranları birbirleriyle paralellik göstererek malzeme karakteristiğini sergilemektedirler. Ortalama sürtünme katsayısı yüksek olan numunenin özgül aşınma değeri de yüksek çıkmıştır. Ortalama sürtünme katsayısı yüksek olan fırınlanmış numunelerin özgül aşınma değerlerinin de yüksek çıkması, sürtünme sırasında zorlanmanın

etkisiyle balata bünyesinden büyük parçacıkların kopmalarının önemli bir etkisi vardır. Düşük ortalama sürtünme katsayısına sahip olan numunelerin standart sapma değerleri de düşüktür. Yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip numunelerin standart sapma değerleri de yüksektir. Burada sürtünme yüzeyinde sürtünme direnci oluşturacak malzemelerin etkisiyle hem sürtünme katsayısı yüksek hem de standart sapma yüksek çıkmıştır. Fakat fırınlanmamış yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip numunelerin dalgalı sürtünme katsayısı göstermesi bünyedeki sert parçacıkların sürtünme direnci oluşturmaları sonrasında da balata bünyesinden koparak özgül aşınma değerini artırdıkları şeklinde açıklanabilir.

Tablo 8.2 UCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
UCH-4	0,21	1,834	23,2	0,410	0,0091226
UCH-8	0,22	1,782	20,3	0,418	0,0127395
UCH-12	0,29	1,717	18,9	0,430	0,0127434
UCH-16	0,33	1,652	18,2	0,442	0,0140431
UCH-20	0,35	1,588	15,3	0,454	0,0134274

Fırınlama sonrası yoğunlukların düşmesi ise, fırınlama esnasında düşük buharlaşma sıcaklığına sahip malzemelerin bünyeden uzaklaşarak bünyede mikro ölçülerde gözeneklilik oluşturduğu ve kararlı bir sürtünme performansı sergilerken yoğunluğun düşmesine de sebep olmaktadır.

Tablo 8.3 üleksit ve cashew katkılı numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testlerini göstermektedir. Dayanım testleri için uygulanan deneysel yöntemler Bölüm 7’de anlatılmıştır. Saf su dayanım testinde ortalama % 2,64 bir kütle artışı gözlenirken en yüksek dayanıksızlık UC-4 kodlu numunede görülmüştür. Tuzlu su (% 2,68) ve fren sıvısı (% 2,78) dayanım ortalamaları saf su ile yaklaşık çıkmıştır. Hidrolik yağ dayanım testi % 5,55 kütle artışı ile en yüksek çıkmıştır. Tüm numunelerin dayanım testleri TS 9075 standartlarına uygun çıkmıştır. Ayrıca dayanım test Tablosunda fırınlama işlemi sonrası deneylere tabi tutulan numunelerin dayanım testlerinin sonuçlarına bakıldığında aynı içerikli fırınlanmamış numunelere göre daha dayanıklı çıkmışlardır. Saf su dayanım testinde ortalama % 1,76, tuzlu su ortalaması % 1,70, hidrolik yağ % 3,29, fren sıvısı 2,22 kütle artışı göstermişlerdir. Fırınlanmış numuneler içerisinde en fazla kütle artışı % 3,29 ile hidrolik yağda meydana gelmiştir.

Tablo 8.3 Üleksit ve cashew katkılı fırınlanmamış (UC) ve fırınlanmış (UCH) numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

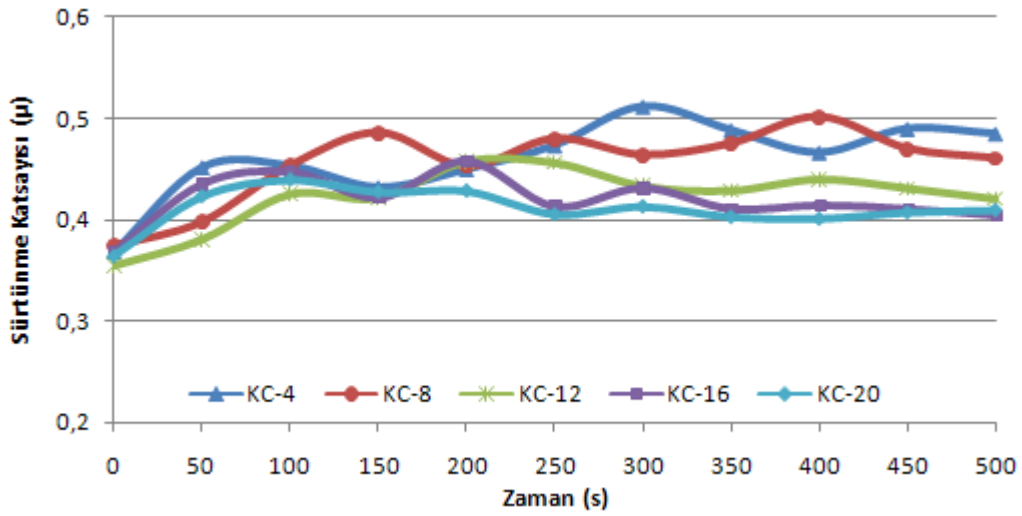
Numune Adı	Saf su		Tuzlu su		Yağ		Fren sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
UC-4	2,35	0,28	2,10	0,25	3,3	0,36	2,00	0,27
UC-8	2,40	0,30	2,36	0,29	4,7	0,38	2,69	0,30
UC-12	2,60	0,33	2,56	0,35	5,36	0,40	2,90	0,36
UC-16	2,88	0,35	2,77	0,37	6,1	0,43	2,99	0,39
UC-20	3,01	0,39	3,63	0,43	8,3	0,65	3,34	0,45
UCH-4	1,44	0,21	1,11	0,18	2,42	0,30	1,72	0,21
UCH-8	1,67	0,23	1,23	0,20	2,59	0,33	1,83	0,23
UCH-12	1,84	0,25	1,60	0,23	3,09	0,39	1,99	0,27
UCH-16	1,92	0,27	1,65	0,25	3,59	0,41	2,08	0,30
UCH-20	1,95	0,31	2,92	0,35	4,78	0,45	2,49	0,33

8.1.2. Kolemanit ve Cashew Katkılı Fren Balataları

8.1.2.1. Sürtünme Performansı

Kolemanit ve cashew katkılı fırınlama işlemine tabi tutulmuş (KCH) ve fırınlama işlemine tutulmamış (KC) numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri Şekil 8.15, Şekil 8.17 ve sıcaklık-zaman grafikleri Şekil 8.16 ve Şekil 8.18’de görülmektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerin grafiklerine genel olarak bakıldığında, KC-4, KC-8, KC-12, KC-16 ve KC-20 kodlu numuneler stabil bir sürtünme değeri sergilememiştir ve fırınlanmış numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahiptirler. En yüksek sürtünme katsayısı KC-4 kodlu numunede meydana gelmiştir. Fakat stabil bir sürtünme elde edilememiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise KC-20 kodlu numunede olmuştur. KC-12, KC-16 ve KC-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısındaki dalgalanma birbirleri ile önemli derecede benzerlik göstermektedir. Yalnızca dalgalanmanın şiddeti çok az bir farklılık göstermiştir. Bu numunelerde dalgalanma sürtünme yüzey sıcaklığı 100 °C’de başlamış ve 350 °C’de son bulmuştur. Şekil 8.15’de fırınlanmamış numunelerin sürtünme katsayısı incelendiğinde kolemanit miktarının artışıyla birlikte sürtünme katsayısında bir düşme gözlemlenmiştir. Kolemanit miktarının artışıyla birlikte sürtünme katsayısında % 12 bir azalma meydana gelmiştir.

KC-20 kodlu numune, KC-4, KC-8, KC-12 ve KC-16 kodlu numunelere göre daha az dalgalanmış ve en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerine sahiptir (Şekil 8.15). KC-4, KC-12, KC-16 ve KC-20 kodlu numunelerin sürtünme testinin başlangıcında sürtünme tabakası oluşum süreci ilk 100 saniye içerisinde oldukça belirgindir.



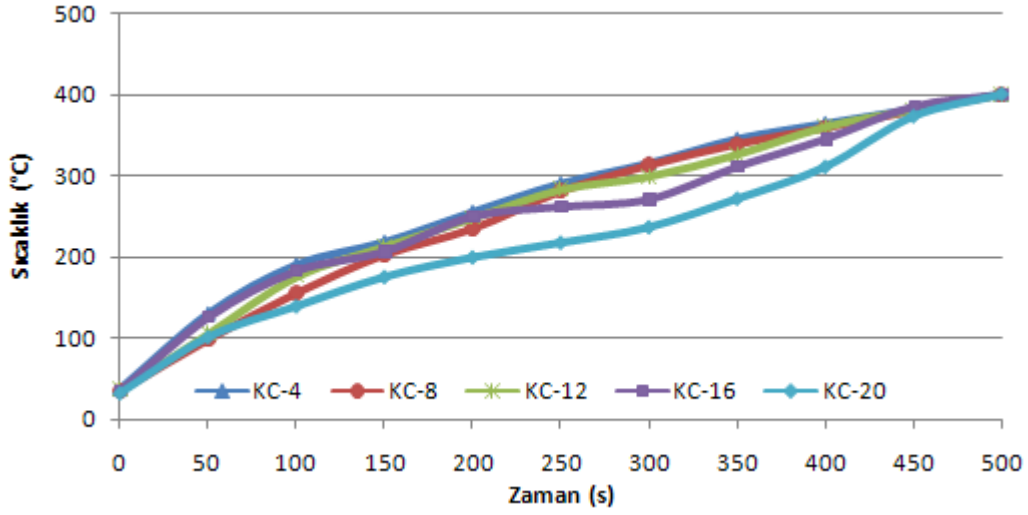
Şekil 8.15 KC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Özellikle KC-4 kodlu numune sürtünme tabakası oluşum sürecinde sürtünme katsayısında yaklaşık 0,10’luk önemli bir artış göstermiştir. Fakat deneyin devamında $\mu=0,50$ den $\mu=0,45$ ’e kadar dalgalanmalı olarak düşme göstermiştir. Sürtünme katsayısındaki düşmenin başladığı sırada sürtünme yüzey sıcaklığı 200 °C ve dalgalanmanın durması 300 °C civarında olmuştur (Şekil 8.16). Buradan, sürtünme yüzey sıcaklığı 150 °C-450 °C arasında sürtünme yüzeyinde nedeni henüz tam belirlenemeyen bir kısım termo-mekanik etkileşimlerin olduğu ve 300 °C’nin üzerinde söz konusu etkileşimlerin son bulduğu sonucu çıkarılabilir (Şekil 8.16). KC-8, KC-16 ve KC-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısındaki dalgalanma birbirleri ile önemli derecede benzerlik göstermektedir. Yalnızca dalgalanmanın şiddeti çok az bir farklılık göstermiştir. Bu numunelerde dalgalanma sürtünme yüzey sıcaklığı 250 °C’de başlamış ve 450 °C’de son bulmuş denilebilir (Şekil 8.16). Yukarıda bahsedildiği gibi sürtünme yüzey sıcaklığına bağlı termo-mekanik etkileşimleri olduğu anlaşılmaktadır. KC-4 kodlu numune sürtünme katsayısındaki dalgalanmaya rağmen 0,46 ile en yüksek sürtünme katsayısını vermiştir (Şekil 8.15).

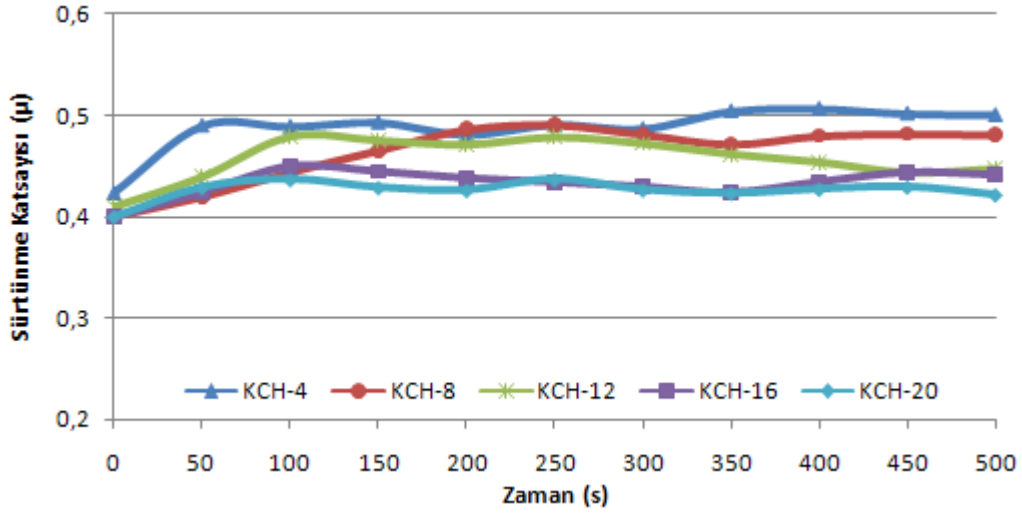
Söz konusu sıcaklıklar sürtünme katsayısının düşmesinde etkili olacak kadar yüksek değerde değildir. Sürtünme katsayısındaki bu düşme davranışı bor türevleri katkılı diğer numunelerle karşılaştırıldığında, kullanılan bor türevinin yani kolemanite özgü olarak 200 °C-300 °C arasında düşme gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 8.16). Bu durumun giderilmesinde yapılacak çalışmalarda balata üretim aşamasının sonunda 300 °C’lik bir fırınlama işlemi yapılarak balata bünyesinde oluşan termo-mekanik etkileşimlerin daha önceden tamamlanması sağlanmış olur.

Sürtünme katsayısında inişli çıkışlı sürekli bir değişimin sebebini, Anderson [184] balata temas yüzeyinde ısı yükünün homojensizliğinden olduğu şeklinde yorumlamıştır. Burada

deney süresince disk yüzeyindeki temas bölgelerinin içine doğru ısıdaki değişim periyodik olarak değişir. Bu etkiden dolayı sürtünme katsayısında sürekli bir değişim meydana gelir. Ayrıca bu durum Batchelor [84] sürtünme çiftlerinin yüzeyindeki pürüzlerde birleşme olması ve büyümesi ile açıklar. Bu durumda bir yapışma ve bir bırakma hali sürekli tekrarlanır, bu da sürtünme katsayısında sürekli artma ve azalma olmasına sebep olur.



Şekil 8.16 KC kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi



Şekil 8.17 KCH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Şekil 8.17 aynı içeriklere sahip fırınlama işlemine tabi tutulmuş numunelerin (KCH) sürtünme katsayısı grafiğini göstermektedir. Şekil 8.15'de 0,46 oranıyla en yüksek sürtünme katsayısını veren KC-4 kodlu numune fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra (KCH-4) stabil bir hal almış ve sürtünme katsayısı 0,48 olarak elde edilmiştir. En düşük sürtünme oranına sahip KC-20 numunesi 0,41 sürtünme değerine sahip iken bu değer fırınlama işleminden sonra

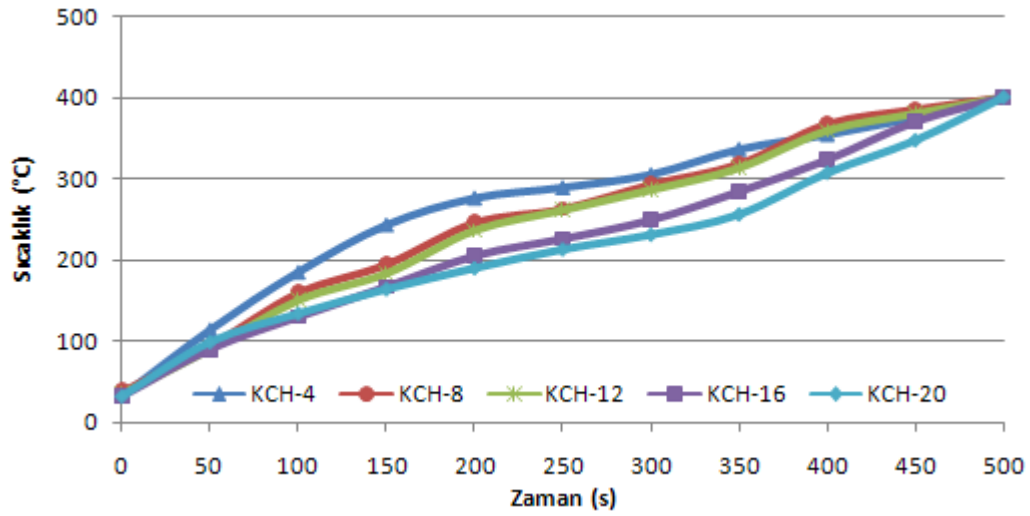
yapılan deneyler sonucunda KCH-20 0,42 olarak ölçülmüştür. Her iki grafikte de görülüyor ki kolemanit miktarının artması sürtünmeyi olumsuz etkilemektedir. Ayrıca fırınlama işlemine tabi tutulmuş numuneler ile yapılan deneylerin sürtünme katsayıları, fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelere göre daha düzgün ve stabil bir eğri göstermiştir.

Kolemanit ve cashew katkılı fırınlanmış tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi süreci yaklaşık 100 saniye sürmüş ve daha sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.17). Sürtünme katsayısı değişimi için bu grafikler incelendiğinde, KC kodlu numuneler KCH kodlu numunelere göre daha az dalgalanma göstermiştir. KCH-12 ve KCH-16 kodlu numuneler sürtünme tabakası oluşumunun tamamlanmasıyla birlikte yavaş yavaş düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 8.17). Bu safhada henüz sıcaklık 100 °C – 200 °C arasındadır. Sürtünme katsayısındaki bu düşme, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin sürtünme çiftinin karşı yüzeyini oluşturan disk'e tutunma özelliği gösteremediği, yani ya komponenti oluşturan malzemelerin birbirleri ile iyi uyum sağlamadığından dolayı sürtünme yüzeyine karşı bir direnç oluşturamadığı ya da oluşan sürtünme yüzeyi sert malzemelerden oluşmadığı için sürtünme katsayısında beklenen artış veya stabil kalamadığı şeklinde açıklanabilir.

KCH-12 kodlu numune 100. saniyeye kadar sürtünme katsayısında yükselme meydana gelirken 100. saniyeden sonra sürtünme katsayısında sıcaklığın artışıyla birlikte bir düşme olmuştur (Şekil 8.17 ve Şekil 8.18) KC-12 kodlu numune sıcaklık artışıyla birlikte düşük ama kararlı bir sürtünme sergilemiştir. KC-12 kodlu numune için yukarıda ifade edilen termomekanik gerekçeler KCH-16 ve KCH-20 kodlu numuneler için de geçerlidir.

Tüm numunelerde sıcaklığın artışıyla birlikte 50. saniyeden 350. saniyeye kadar kısmi bir düşüş ve sonrasında tekrar toparlanma mevcuttur. 400. saniyeden sonra sıcaklık tüm numunelerde birbirine yakın değerlerde seyretmiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra tüm numunelerde stabil bir sürtünme katsayısı görülmüştür.

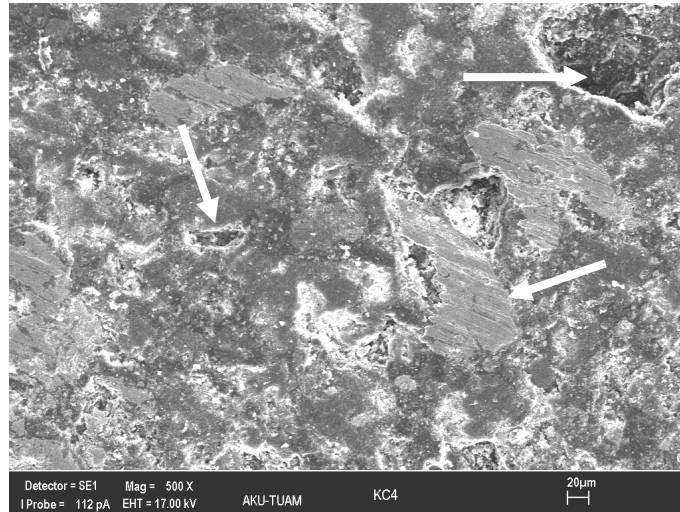
En düşük sürtünme katsayısına sahip KCH-16 ve KCH-20 kodlu numuneler Şekil 8.18'de görüldüğü gibi düşük sıcaklık sergilemişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısı sergileyen KCH-4 kodlu numunenin sıcaklık eğrisi en yüksektir. KCH-8 ve KCH-12 kodlu numunelerin sıcaklık artışları benzer özellik göstermiştir. 350. saniyeden sonra KCH8 kodlu numunenin sürtünme eğilimi artarken KCH-12 kodlu numune sıcaklığın artışıyla birlikte düşme eğilimi sergilemiştir. Ek olarak KCH-8 kodlu numunede kolemanit oranı % 12 cashew % 12 olduğundan balatayı oluşturan komponentler içerisinde uyumsuzluk olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8.18 KCH kodlu fırınlanmış numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi

8.1.2.2. Mikro Yapı Karakteristiği

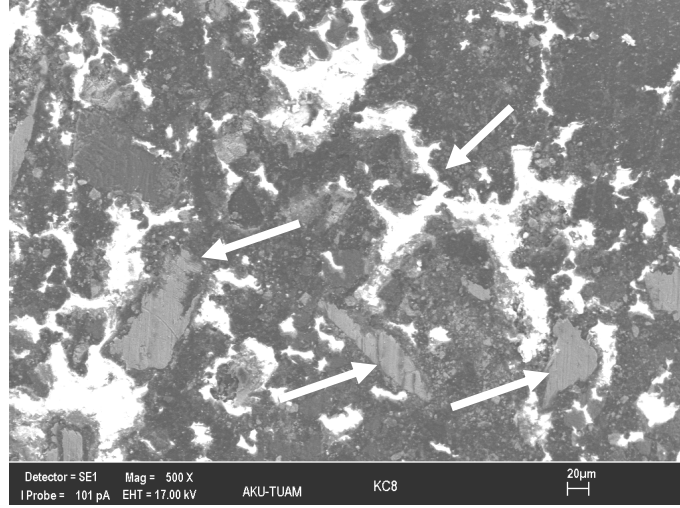
Kolemanit katkılı fren balatalarının sürtünme performansının belirlendiği deneylerden sonra sürtünme yüzey karakteristiğinin belirlenmesi için çekilen SEM resimleri Şekil 8.19–8.28’de görülmektedir.



Şekil 8.19 KC-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

% 20 kolemanit ve % 4 cashew içeren KC-4 kodlu numunenin SEM resminde makro boşluklar ve bu makro boşlukların yakın çevresinde de mikro boşluklar dikkat çekmektedir (Şekil 8.19). Bu numunenin sürtünme performansı grafiğinden de anlaşıldığı gibi sürtünme tabakası oluşum sürecinde sürtünme katsayısında 200. saniyeye kadar hızlı bir yükselme ve sonra bir düşüş görülmektedir. SEM resmi ile bağlantılı düşünülürse bu hızlı yükselme sırasında

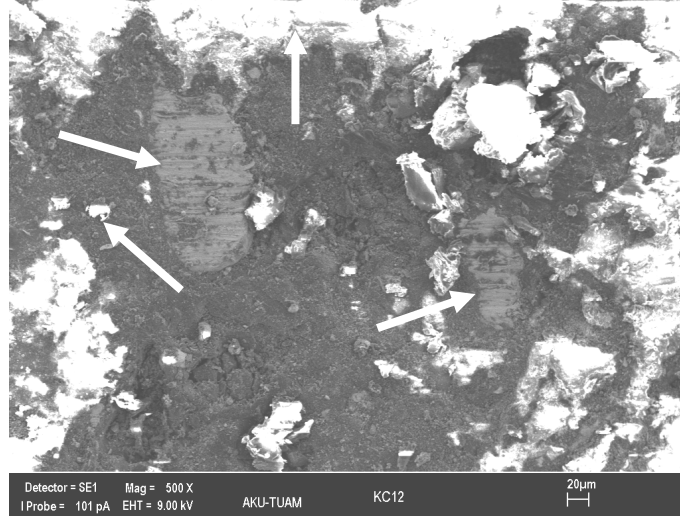
komponenti oluşturan malzemelerden büyük ve sert parçacıkların sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve sonrasında aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan zorlanmaların etkisiyle balata bünyesinden kopması sonucu makro boşlukların oluştuğu sonucuna varılmıştır.



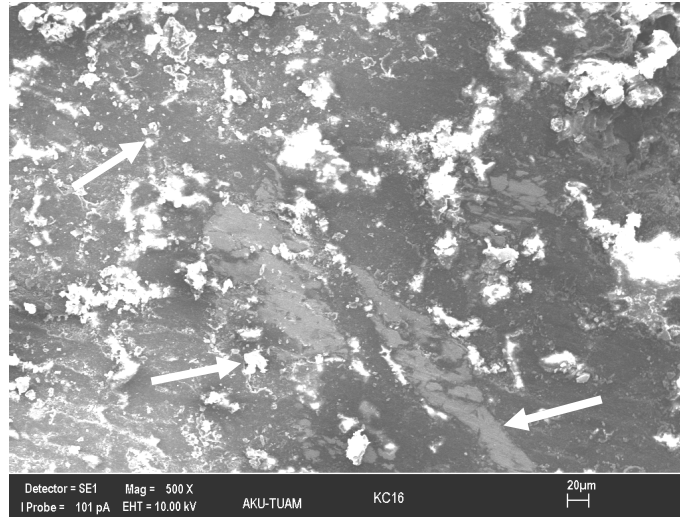
Şekil 8.20 KC-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.20 KC-8 kodlu numunenin SEM resmini göstermektedir. Numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir. Kısa boyutlu sürtünme yüzeyleri abrazif aşınmaların olduğunu göstermektedir. Görülen küçük topaklanmalar içerikteki baritten kaynaklanmaktadır ve bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvayan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır.

% 12 üleksit ve % 12 cashew içeren ve 0,42 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen KC-12 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.21’de görülmektedir. Şekil 8.21’den anlaşıldığı gibi abrazif aşınmaya maruz kalmış geniş bir sürtünme yüzeyi mevcuttur. Genel olarak komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Yine diğer numunelerde görülen sürtünmeye bağlı mikro ve makro boşlukları vardır. Fakat abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler ile dikkat çekmektedir. Aşırı miktarda beyaz bölge görülen kısımlar SEM cihazının filament ışığının etkisinden oluşmaktadır.

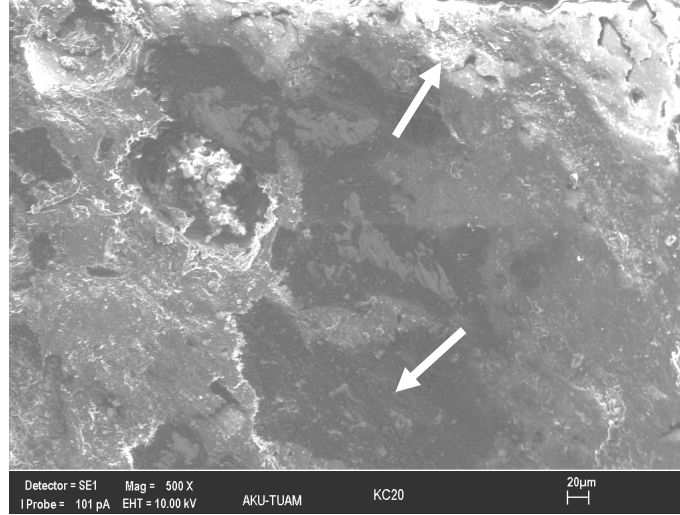


Şekil 8.21 KC-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.22 KC-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

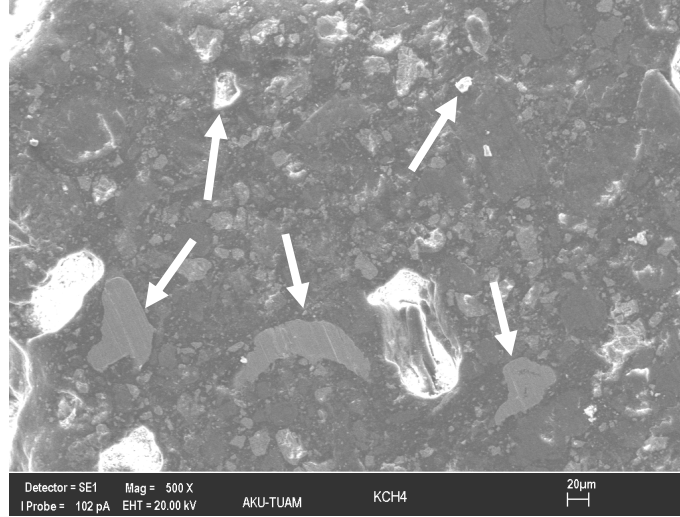
KC-16 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.22). Resimde mikro ve makro boşluklarla birlikte sürtünmeye aktif olarak katılan bölgeler de görülmektedir. Bu bölgelerde sürtünmeden dolayı oluşan çizikler abrazif aşınma olduğunu, koyu ve açık gri renkli olan bölgeler ise adhezif aşınmanın mevcut olduğunu göstermektedir. Aşınmış metal parçacıklar beyaz renkli bölgeler olarak dikkat çekmektedir. Beyaz renkli bölgelerin yanında küçük boşluklar mevcuttur. Bu boşluklar aşınma sonucunda sert malzemelerin kopması ile oluşmuştur. Sürtünme performans grafiğinden de görüldüğü gibi sürtünme yüzey sıcaklığı 350 °C kadar şiddetli dalgalanma mevcuttur (Şekil 8.15-Şekil 8.16). Bu durum büyük ölçüdeki sert malzemelerin aşınmasının son kısmında bünnyeden kopması sonucu oluşmuş olabilir. Dolayısıyla sürtünme yüzeyindeki boşluklar makro ölçüde değil de mikro ölçüde oluşmuştur.



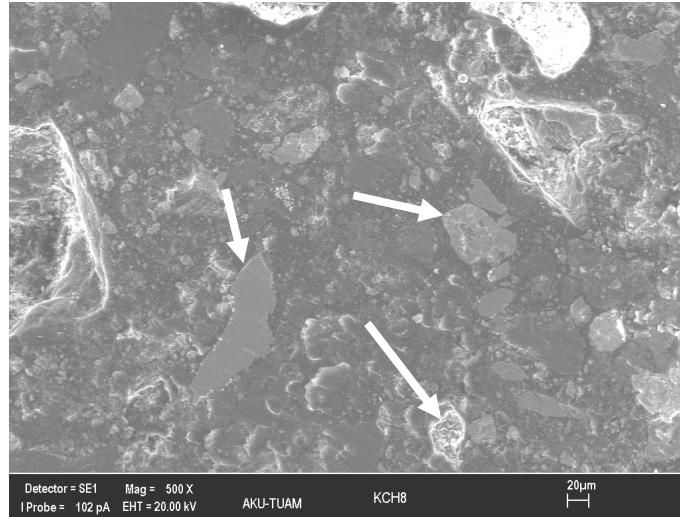
Şekil 8.23 KC-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.23’de KC-20 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı görülmektedir. Parlak renkli bölgeler, bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar olarak dikkat çekmektedir. Resimde mikro ve makro boşluklar görülmektedir. Bu makro boşluklar, sürtünme yüzey sıcaklığının 300-350 °C’lere yükselmesi sonucu bağlayıcı madde fenolik reçinenin gevşemesi ile komponenti oluşturan büyük metal parçacıkların sürtünmenin etkisiyle bünyeden kopması sonucu oluşmuştur. Ayrıca mikro boşluklar balatanın üretim aşamasında komponenti oluşturan malzemeler içerisinde sıcaklık ve basıncın etkisiyle kimyasal reaksiyonlar sonucu bu boşlukların oluştuğu ve bu boşlukların birbirleriyle tutunmayı zayıflattığı sonucuna varılmıştır. Yine bu faktörlerin etkisiyle bu numune 0,41 sürtünme katsayısı ortalaması ile en düşük sürtünme katsayısı değeri göstermiştir. Sürtünme katsayısının düşük olması mikro boşlukların oluşumunda komponenti oluşturan toz tanelerinin arasındaki boşlukların da mutlak bir etkisi vardır.

Şekil 8.24’de SEM resmi görülen KCH-4 kodlu numune, KC-4 kodlu numune ile aynı içeriklere sahiptir. Fakat 4 saat süre ile 180 °C’de fırınlama işlemine tabi tutulmuştur. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış KC-4’e ait SEM resmine bakıldığında KCH-4’ün daha kararlı bir yapı sergilediği görülmektedir. Bu durum sürtünme katsayısını 0,46’dan 0,48’e çıkarmıştır. % 20 üleksit, % 4 cashew içeren ve 0,48 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro boşluklar ve birbirleriyle tutunma sağladıkları anlaşılan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Küçük beyaz renkli bölgeler metal parçacıklar adhezif aşınmalar dikkat çekmektedir.

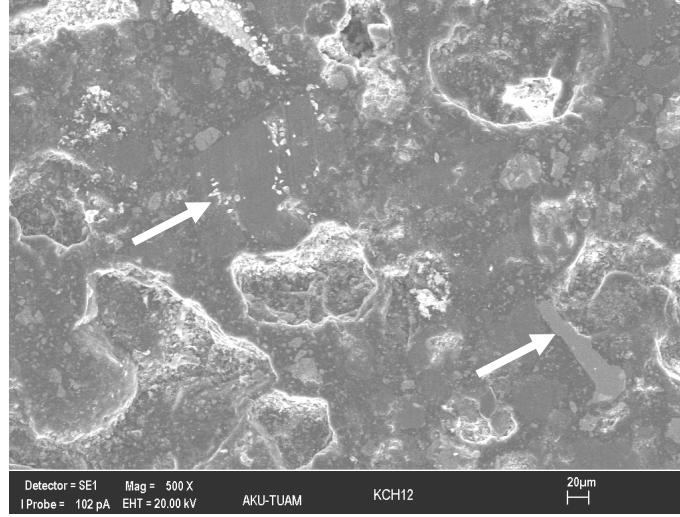


Şekil 8.24 KCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



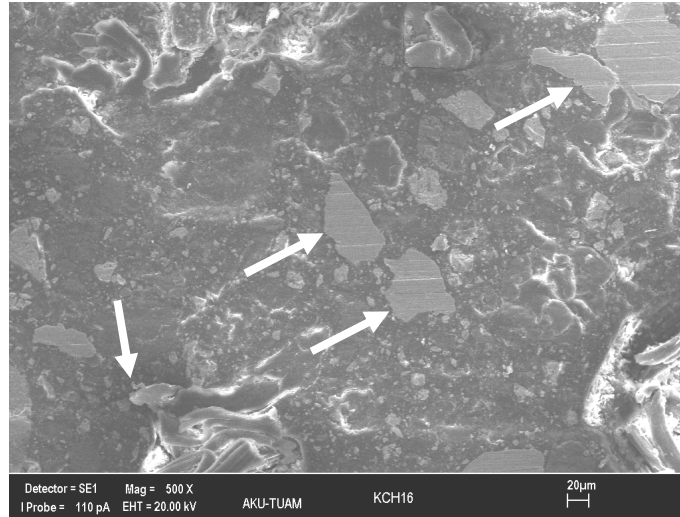
Şekil 8.25 KCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

KCH-8 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerden büyük taneli olan veya küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. KCH-8 kodlu numunede % 16 kolemanit ve % 8 cashew mevcuttur, bu küçük topaklanmalar barit topaklanması olabilir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvıyan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak dikkat çekmektedir (Şekil 8.25).



Şekil 8.26 KCH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

KCH-12 kodlu numunenin sem resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.26). Kısa boyutlu sürtünme yüzeyleri abrazif aşınmaların olduğunu göstermektedir. Görülen küçük topaklanmalar içerikteki baritten (% 20) kaynaklanmaktadır ve bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır (Şekil 8.26).



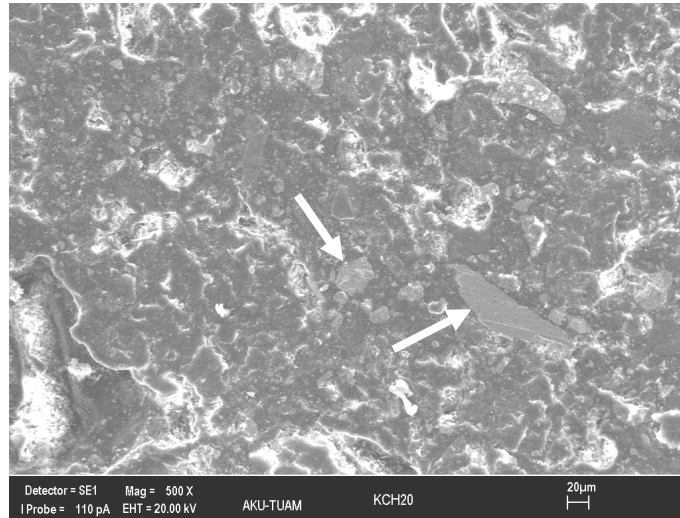
Şekil 8.27 KCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.27 KCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi görüntüsünde, baskın aşınma mekanizmasının karışık adhezif ve abrazif aşınma şeklinde olduğu

görülmektedir. Adhezyon ile yüzeyden kopan aşınma ürünlerinin deforme olarak tekrar yüzeye yapışması sonucu adhezif aşınma meydana gelmiştir. Bununla beraber karşı yüzeyden kopan parçacıklar, aşınma ürünleri ile birlikte balata yüzeyinde kızaklama (Ploughing) tipi abrazyona sebep olmuşlardır.

Zhang ve çalışma arkadaşının kompozit malzemelerde yaptıkları aşınma çalışmasında karşı yüzeyin, daha yumuşak olması sebebiyle aşındırılan malzemenin arasına sıvandığı belirtilmektedir. Bu durumda aşınma, bakır matriksin karşı yüzeyle iki-yüzeyli aşınması ve bakır matriksli kompozit ile alüminyum matriksli kompozit yüzeylerinin arasına yerleşen aşınma ürünleri sebebiyle üç-yüzeyli aşınma mekanizmasının kombinasyonu şeklinde meydana gelir. Üç-yüzeyli aşınma, SiC partiküllerinin yerlerinden çıkarak kayma ara yüzeyine yerleşmeleri sonucu artar [179].

Şekil 8.28 % 20 cashew ve % 4 kolemanit içeren KCH-20 numunesinin deney sonrası sürtünme yüzey karakteristiğini gösteren SEM resmi. Şekilde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir. Yüzeyden kopan aşınmış parçacıkların deforme olarak tekrar yüzeye yapışması sonucu adhezif aşınma meydana gelmiştir.



Şekil 8.28 KCH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

8.1.2.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri

Tablo 8.4 ve Tablo 8.5’de kolemanit katkılı fırınlanmamış KC ve fırınlanmış KCH numunelerinin özgül aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı ve standart sapma değerleri görülmektedir. Yoğunluk değerlerinde, içerikte kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranlarının etkili olduğu belgindir.

Komponenti oluşturan malzemelerin birbirleriyle uyumları özgül aşınmada ve sergiledikleri sürtünme katsayısında etkili olmaktadır. Eğer komponenti oluşturan malzemelerin birbirleriyle tutunmaları iyi ise sürtünme katsayısı yüksek, özgül aşınma oranı düşük çıkar. Eğer komponenti oluşturan malzemeler birbirleriyle iyi tutunamamış ise sürtünme katsayısı düşük, özgül aşınma oranı yüksek çıkar. Fakat sürtünme tabakasını, sürtünme katsayısının yükselmesinde etkili olacak sert malzemeler oluşturmuşsa sürtünme katsayısı da aşınma oranı da yüksek çıkar. Ayrıca yoğunluk değerlerinde, içerikte kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranları oldukça etkili olmaktadır. Fakat balatanın üretimi sırasında pişirme aşamasında sıcaklığın ve basıncın etkisiyle oluşan bazı reaksiyonlar sonucu iç gözenekler oluşmakta ve beklenen teorik yoğunluk pratikte sağlanamamaktadır. Bu yüzden numunelerin oluşan yoğunlukları tam olarak kullanılan malzeme yoğunluk ve oranları ile paralellik göstermemektedir.

Fırınlanmamış numuneler içerisinde KC-4 kodlu numune ile en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Fırınlama işleminden sonra KCH-4 kodlu numunenin yoğunluk ve sertliğinde artış görülmüştür. Bu artış numunenin içyapısını sıkılaştırdığından sürtünme katsayısını olumlu yönde etkilemiştir.

Tablo 8.4 KC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
KC-4	0,33	1,681	16,6	0,460	0,0379615
KC-8	0,30	1,852	17,2	0,455	0,0373865
KC-12	0,28	2,019	18,2	0,422	0,0306427
KC-16	0,26	2,099	19,8	0,419	0,0238929
KC-20	0,24	2,288	20,3	0,410	0,0199205

Tablo 8.4’de KC-4 kodlu numunede deney boyunca meydana gelen aşınma miktarı $0,33 \times 10^{-6}$ gr/mm² iken, KC-8 numunesinde bu değer $0,30 \times 10^{-6}$ gr/mm², KC-12 numunesinde $0,28$ gr/mm², KC-16 numunesinde $0,26$ gr/mm², KC-20 numunesinde $0,24$ gr/mm²’dir. Kolemanit miktarının azalması ve cashew miktarının artışıyla aşınma miktarında azalma meydana gelmiştir. Ancak ortalama sürtünme katsayısı da kolemanit oranının düşmesiyle 0,46’dan 0,41’e düşmüştür. Yani bu içeriklere sahip numunelerde yüksek kolemanit oranı daha yüksek sürtünme katsayısı sağlamaktadır.

Tablo 8.5 KCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
KCH-4	0,32	1,566	17,6	0,487	0,0228355
KCH-8	0,28	1,730	18,1	0,463	0,0297591
KCH-12	0,27	2,001	18,7	0,457	0,0212674
KCH-16	0,25	2,049	20,8	0,432	0,0135815
KCH-20	0,22	2,150	21,9	0,426	0,0098618

Aynı içeriklere sahip fırınlanmış numunelerde ise aşınma daha az çıkmıştır. Tablo 8.5’de KCH-4 kodlu numunede meydana gelen aşınma miktarı $0,32 \times 10^{-6}$ gr/mm², KCH-8 kodlu numunede $0,28 \times 10^{-6}$ gr/mm², KCH-12 numunesinde $0,27 \times 10^{-6}$ gr/mm², KCH-16 kodlu numunede $0,25 \times 10^{-6}$ gr/mm² ve KCH-20 kodlu numunede $0,22 \times 10^{-6}$ gr/mm² dir. Fırınlanmış tüm numuneler fırınlanmamış tüm numunelere oranla ortalama olarak % 10 daha az aşınmıştır.

Tablo 8.6 Kolemanit ve cashew katkılı fırınlanmamış (KC) ve fırınlanmış (KCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

Numune Adı	Saf Su		Tuzlu su		Yağ		Fren Sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
KC-4	2,44	0,45	3,76	0,45	3,62	0,43	3,75	0,44
KC-8	2,38	0,41	3,12	0,40	3,18	0,39	3,13	0,37
KC-12	2,12	0,37	3,04	0,37	2,48	0,35	3,06	0,35
KC-16	1,88	0,33	2,73	0,33	2,26	0,33	2,95	0,31
KC-20	1,76	0,27	2,51	0,28	2,22	0,31	2,83	0,28
KCH-4	1,79	0,31	2,24	0,33	1,59	0,27	2,24	0,37
KCH-8	1,77	0,28	1,89	0,30	1,56	0,24	1,92	0,31
KCH-12	1,32	0,25	1,73	0,28	1,41	0,20	1,62	0,25
KCH-16	1,20	0,20	1,60	0,25	1,40	0,20	1,56	0,23
KCH-20	1,02	0,17	1,28	0,19	1,31	0,17	1,20	0,20

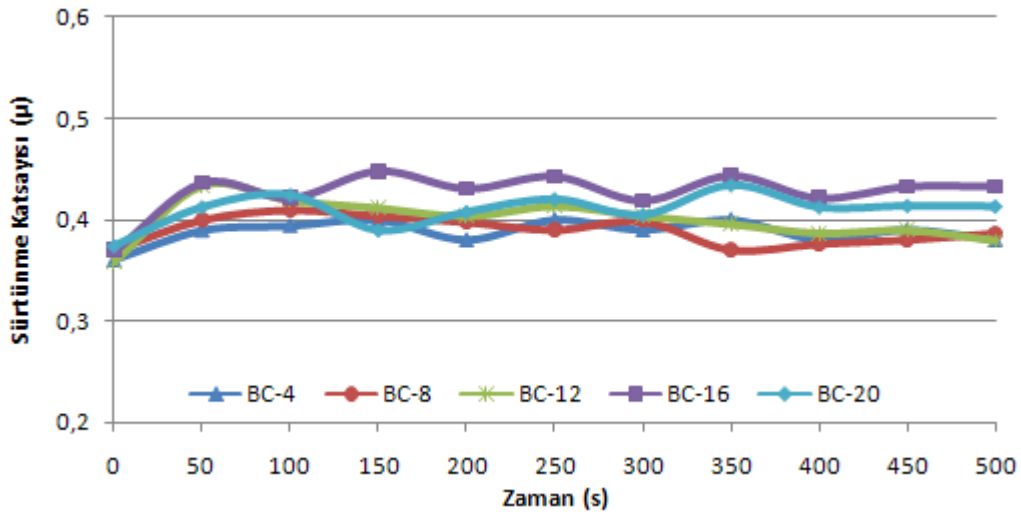
Tablo 8.6 Kolemanit ve cashew katkılı numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testlerini göstermektedir. Kolemanit katkılı numunelerin dayanım testleri sonuçlarını gösteren Tablo 8.6 incelendiğinde üleksit içerikli numunelere göre daha dayanıklı çıktığı görülmektedir. KC kodlu numunelerde en yüksek kütleli artış % 3,14 ortalama ile fren sıvısında meydana gelmiştir. Sonra sırasıyla % 3,03 ile tuzlu su, % 2,75 ile hidrolik yağ ve % 2,11 ile saf su da meydana gelmiştir. Aynı içerikli fırınlanmış numunelerde en yüksek kütleli artış % 1,74 ile tuzlu suda ve sırasıyla, 1,70 ile fren sıvısında 1,45 hidrolik yağ, % 1,42 ortalama ile saf suda meydana gelmiştir. Fırınlanmış numuneler fırınlanmamış

numunelere göre daha az sıvı emme özelliği göstererek çevresel etkilere daha dayanıklı çıkmıştır.

8.1.3. Borik asit ve Cashew Katkılı Fren Balataları

8.1.3.1. Sürtünme Performansı

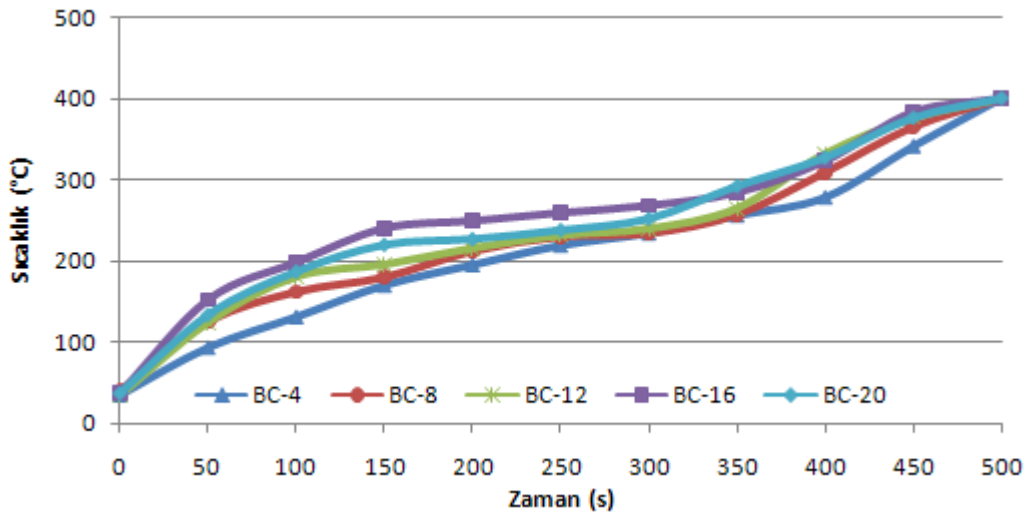
Sürtünme katsayısı ve sürtünme yüzey sıcaklığı, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin özelliklerine ve bu malzemelerin birbirleriyle etkileşimlerine bağlı olarak çok farklı özellikler gösterir. Testin başlangıç safhası, sürtünme katsayısının değişiminde önemli rol oynar. Test başladığı andan itibaren kontak alanındaki artışla birlikte hem sürtünme katsayısı artar hem de yüzeyde sürtünme tabakası gelişir. Bu yüzden testin başlangıç safhasında, başlama anına göre sürtünme katsayısında hızlı bir artış görülür.



Şekil 8.29 BC kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

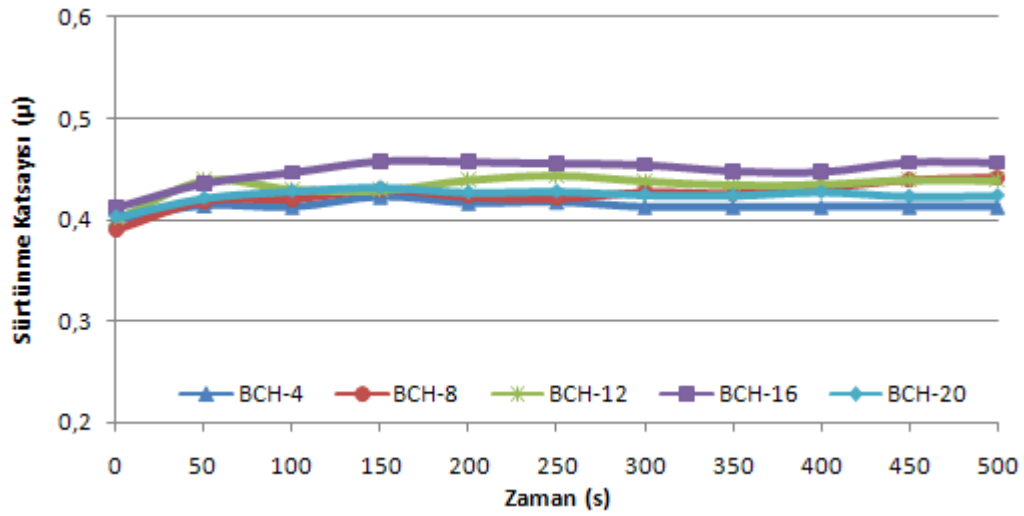
Şekil 8.29, Şekil 8.30, Şekil 8.31 ve Şekil 8.32 borik asit katkıli fırınlanmış (BCH) ve fırınlanmamış (BC) numunelerin sürtünme katsayısı-zaman ve sıcaklık-zaman grafiklerini göstermektedir. Borik asit katkıli tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi sürecinden sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir. Sürtünme katsayısı değişimi için bu grafikler incelendiğinde, BC-4, BC-8, BC-12, BC-16 kodlu numuneler borik asit miktarının artışı ile orantılı olarak sürtünme katsayısında artış göstermiştir. BC-16 kodlu numuneden sonra sürtünme katsayısı düşüş göstermiştir. BC-20 kodlu numune BC-16 ile aynı dalgalanmaları göstermektedir. Fakat sürtünme katsayısı düşüktür. Buradan anlaşıyor ki % 16 katkı oranından fazla borik asit kullanılması sürtünmeyi olumsuz etkilemektedir. Şekil 8.31 incelendiğinde Şekil 8.29'da fırınlanmamış numuneler ile yapılan

deneylerde meydana gelen dalgalanma olayı görülmemektedir. Sürtünme değerleri daha stabil bir durumdadır. Fırınlanmamış numuneler içerisinde en yüksek sürtünme BC-16 numunesinde 0,42 en düşük sürtünme ise BC-4 kodlu numunede 0,38 olarak belirlenmiştir. Bu numunelerin fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonraki sürtünme oranları BCH-16 kodlu numunede 0,44 ve BCH-4 kodlu numunede 0,41 olmuştur. BC-4, BC-8, BC-12 kodlu numuneler birbirlerine yakın sürtünme değerleri göstermişlerdir. Fırınlanmamış tüm numunelerde 50. saniyelerden hemen sonra yani sürtünme tabakası oluşumunun tamamlanmasıyla birlikte yavaş yavaş düşme eğilimi görülmüştür (Şekil 8.29). Bu safhada henüz sıcaklık 150 °C - 200 °C arasındadır. Söz konusu sıcaklıklar sürtünme katsayısının düşmesinde etkili olacak kadar yüksek değerde değildir. Sürtünme katsayısındaki bu düşme, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin sürtünme çiftinin karşı yüzeyini oluşturan disk'e tutunma özelliği gösteremediği, yani ya komponenti oluşturan malzemelerin birbirleri ile iyi uyum sağlamadığından dolayı sürtünme yüzeyine karşı bir direnç oluşturamadığı ya da oluşan sürtünme yüzeyi sert malzemelerden oluşmadığı için sürtünme katsayısında beklenen artış veya stabil kalamadığı şeklinde açıklanabilir.



Şekil 8.30 BC kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

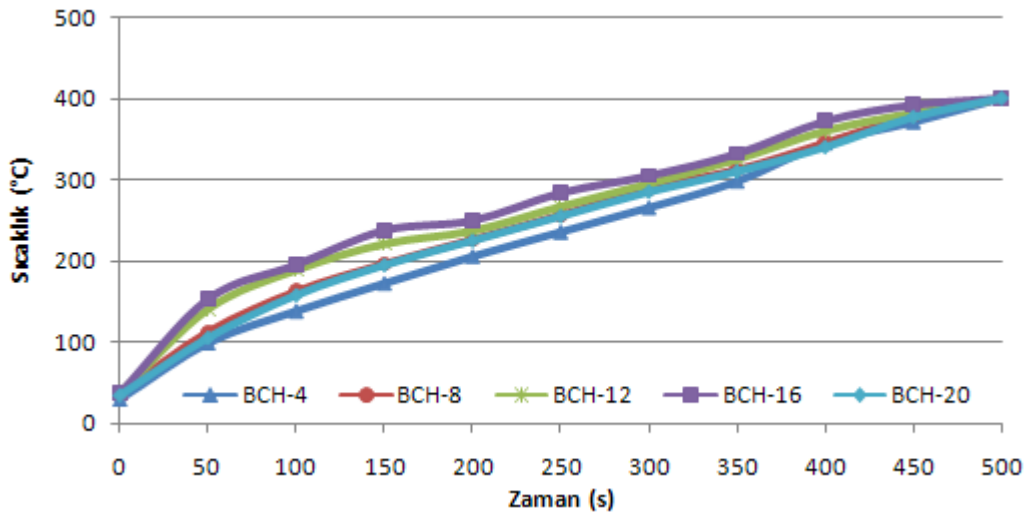
Borik asit katkı ile üretilen fırınlanmış numunelerden BCH-4, BCH-8, BCH-12, BCH-16 ve BCH-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.31) ilk 50 saniyelik sürede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda yukarıda bahsedildiği gibi benzer karakteristik görülmemiştir. Fırınlanan numuneler homojen bir yapı sergilediği için deneylerin başlamasından bitişine kadar stabil bir sürtünme sergilemişlerdir. Fren balatalarında aşınmanın sıfır olması beklenemez. Çünkü aşınma direnci çok yüksek sürtünme malzemeler karşı malzemenin aşınmasına sebep olur. Bu nedenle sürtünme malzemelerinde aşınma sürecinden ziyade sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi önemli görülür.



Şekil 8.31 BCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

BCH-12 kodlu numunede 50 inci saniyeden sonra 150. saniyeye kadar kısmi bir düşüş ve sonrasında tekrar toparlanma mevcuttur. BCH-8 kodlu numunenin sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde sürtünme tabakası oluştuktan sonra 300. saniyeye kadar yavaş yavaş bir düşüş ve sonrasında bir artış göstermiştir. Testin bu aşamasında sürtünme yüzey sıcaklığı 300 °C’ye yükselmiştir. Bu noktadan sonra testin son 200 saniyesinde sürtünme yüzey sıcaklığı 400 °C’ye çıkarken sürtünme katsayısı da stabil bir şekilde devam etmiştir (Şekil 8.31-Şekil 8.32).

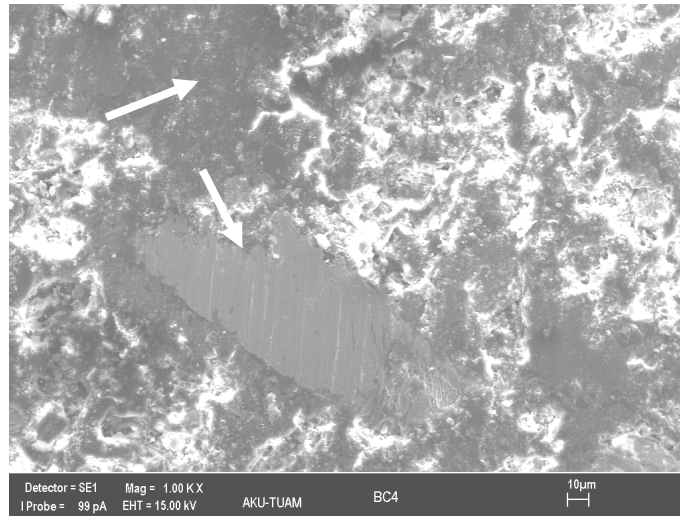
BCH-4 ve BCH-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.31) ilk 50 saniyelik sürede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda benzer karakteristik göstermiştir ve 500. saniyeye kadar stabil bir sürtünme sergilemişlerdir. BCH-4 ve BCH-20 kodlu numunelerin sıcaklık grafiği incelendiğinde sürtünme katsayısı benzerliği sıcaklık grafiğinde de görülmektedir (Şekil 8.32).



Şekil 8.32 BCH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi

8.1.3.2. Mikro Yapı Karakteristiği

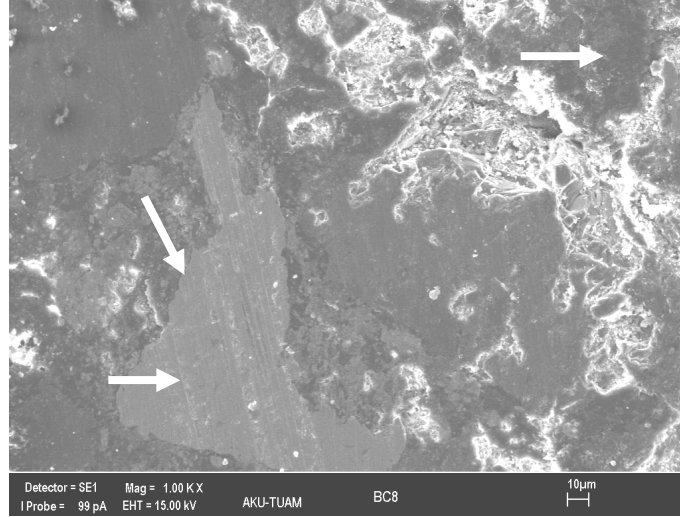
Borik asit ve cashew katkılı fren balatalarının sürtünme performansının belirlendiği deneylerden sonra oluşan sürtünme yüzeyinin karakteristiğini belirlemek amacıyla çekilen SEM resimleri Şekil 8.33–8.42’de görülmektedir. Söz konusu resimlere genel olarak bakıldığında, sürtünme yüzeylerinin resimlerinden mikro çatlaklar, mikro ve makro boşluklar ve adhezif aşınmayı gösteren üzeri kaplanmış sürtünme tabakalarının ile abrazif aşınmayı gösteren çizikli sürtünme izleri olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşan sürtünme yüzeylerinde komponenti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldıkları da anlaşılmaktadır.



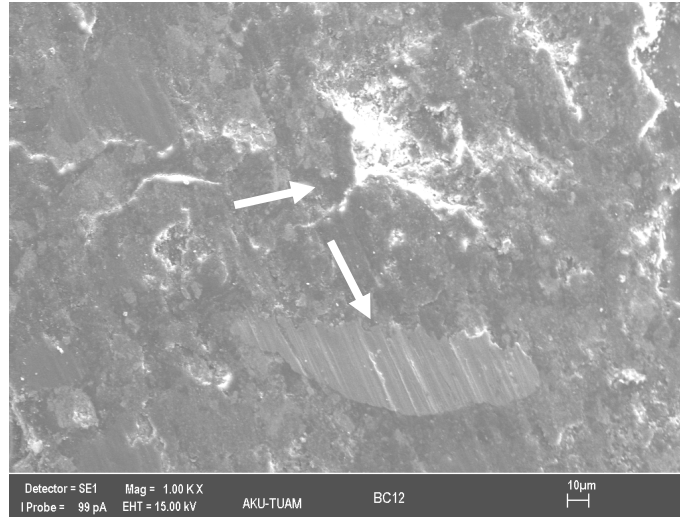
Şekil 8.33 BC-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

% 20 borik asit ve % 4 cashew içeren BC-4 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.33’de görülmektedir. Bu numune 0,38 sürtünme katsayısı ortalaması sergilemiştir. Bünyeden kopan parçacıkların oluşturduğu mikro ve makro boşluklar resimde görülmektedir. Sürtünme yüzeyindeki kısa çizikler ve renk farklılıkları adhezif ve abrazif aşınmanın gerçekleştiğini ve beyaz renkli bölgelerde aşınmış metal parçacıklarını göstermektedir.

BC8 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.34’de görülmektedir. % 16 borik asit ve % 8 cashew içeren bu numune 0,38 sürtünme katsayısı ortalaması ile BC-4 numunesinin sürtünme katsayısı ile aynı değeri göstermiştir. Sürtünme yüzeyinde çok belirgin adhezif aşınma ve abrazif aşınmanın gerçekleştiğini gösteren çizikler ve buna bağlı olarak mikro ve makro boşlukların olduğu görülmektedir. Disk yüzeyinde tutunma sağlayacak sert ve büyük parçacıkların sürtünme tabakasında fazla bulunmaması sonucu düşük sürtünme katsayısı sergilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.34 BC-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

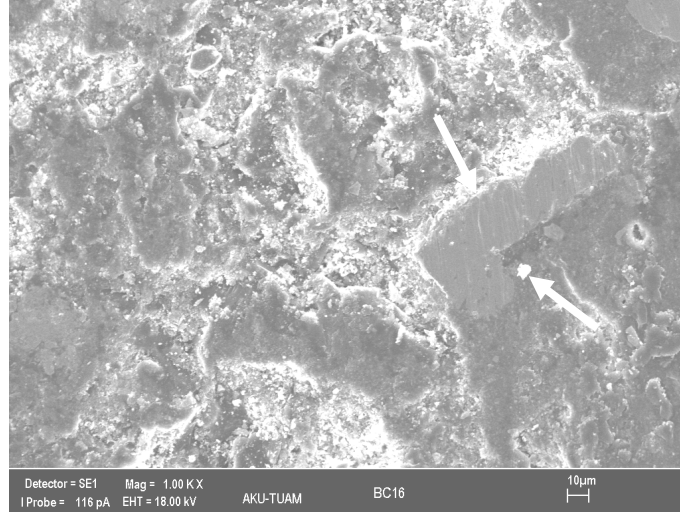


Şekil 8.35 BC-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

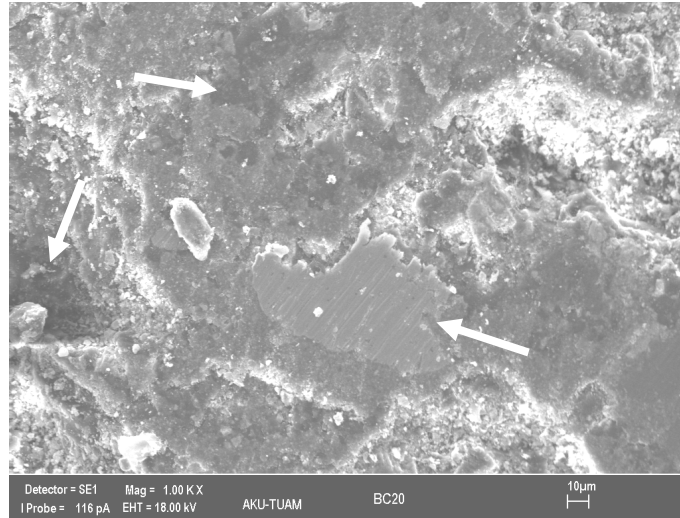
BC-12 kodlu numunenin SEM resminde sürtünme yüzeyinde abrazyif aşınmaların olduğunu göstermektedir. Görülen topaklanmalar içerikteki baritten kaynaklanmaktadır ve bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvıyan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır (Şekil 8.35). Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerin sürtünme yüzeyindeki malzemelerin karşı yüzey ile tutunmaya çalıştığı anlaşılmaktadır.

Şekil 8.36'da BC-16 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. % 8 borik asit, % 16 cashew içeren ve 0,42 sürtünme katsayısı ile en yüksek sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Komponenti

oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Sürtünme yüzeylerinde sürtünmeye bağlı mikro ve boşlukları vardır. Oluşan adhezif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler ile dikkat çekmektedir.



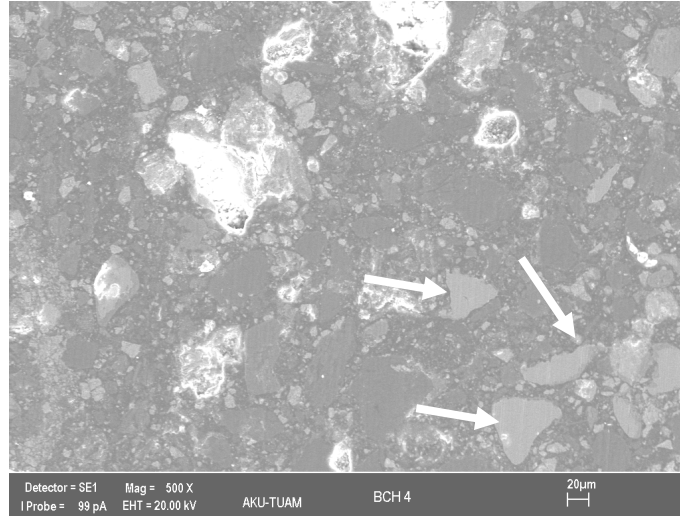
Şekil 8.36 BC-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.37 BC-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

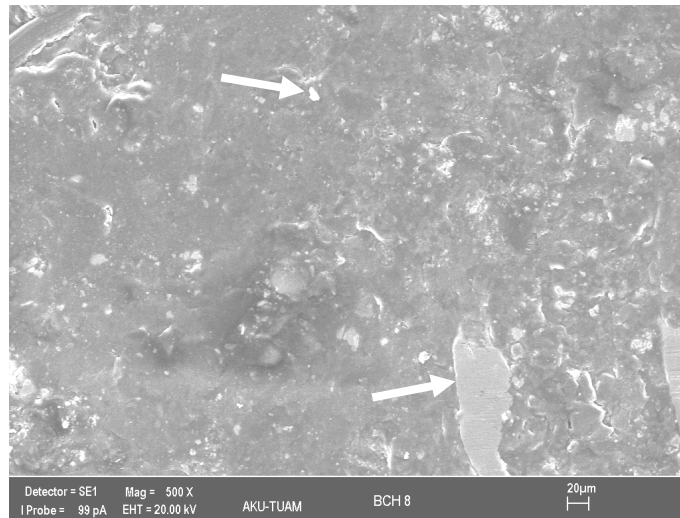
Şekil 8.37’de BC-20 kodlu numunenin sem resmi görülmektedir. Borik asit katkılı diğer numunelerin sürtünme yüzey karakteristiğine benzer özellikler göstermektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerin abrazif aşınmadan kaynaklandığı ve balata bünyesinden kopan bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeyindeki malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve homojen dağıldığı anlaşılmaktadır. 0,40 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen numune % 4 borik asit ve % 20 cashew içermektedir.

Borik asit miktarının azalması cashew oranının artması sürtünme katsayısını olumsuz etkilemiştir. Fakat 0,40 sürtünme katsayısı ortalaması ile BC-4, BC-8, BC-12 kodlu numunelerden daha yüksek sürtünme katsayısı ortalaması vermiştir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır.



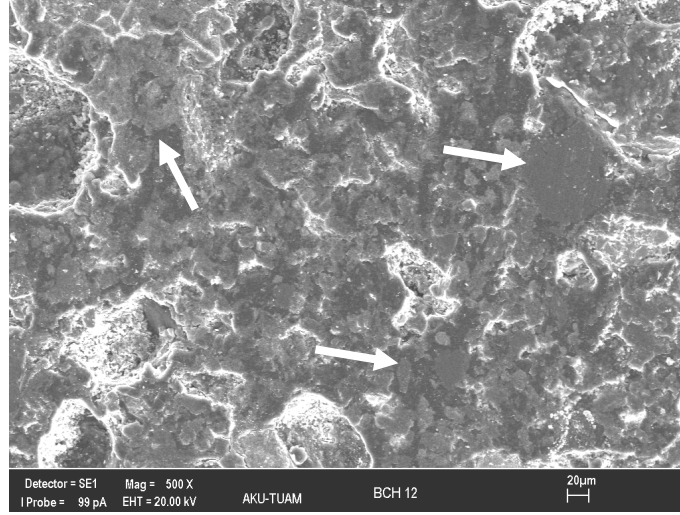
Şekil 8.38 BCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.38 BC-4 kodlu numunenin fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonraki BCH-4 kodlu numunenin SEM resmini göstermektedir. Şekilde küçük topaklanmaların miktarının fazla olduğu görülmektedir. Diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu görülmektedir. BC kodlu numuneler 0,38 sürtünme katsayısı ortalamasına sahipken BCH kodlu numuneler 0,41 sürtünme ortalamasına sahiptir.



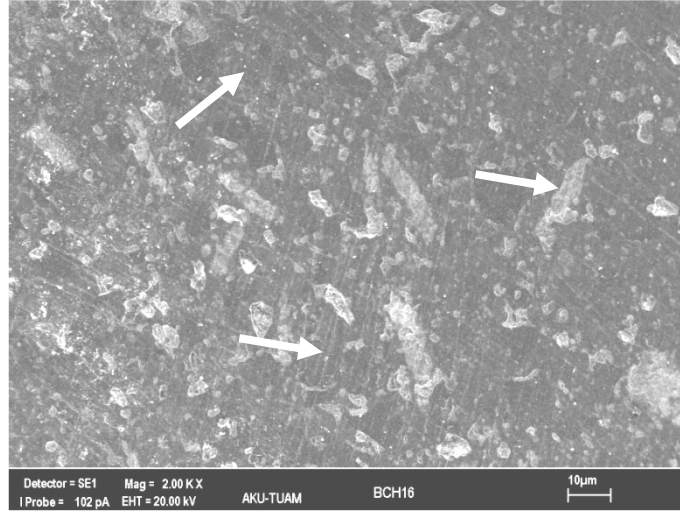
Şekil 8.39 BCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.39’da BCH-8 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. % 16 borik asit ve % 8 cashew içeren ve 0,42 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Oluşan abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler görülmektedir.



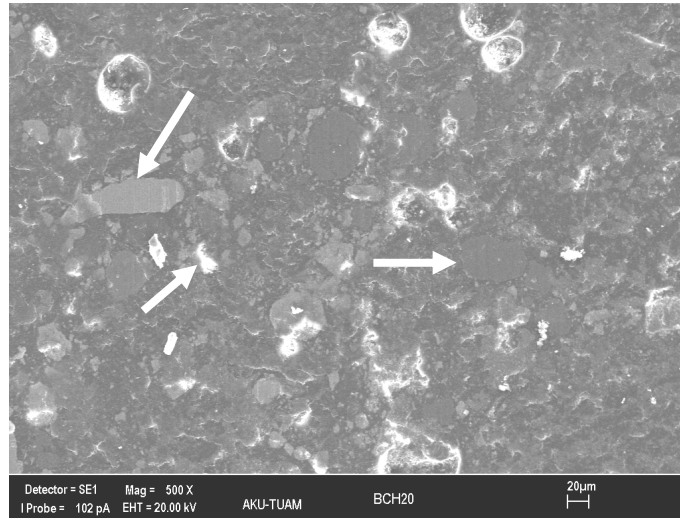
Şekil 8.40 BCH–12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

BCH-12 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.40). Kısa boyutlu sürtünme yüzeyleri abrazif aşınmaların olduğunu göstermektedir. Görülen küçük topaklanmalar içerikteki baritten (% 20) kaynaklanmaktadır ve bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır (Şekil 8.40).



Şekil 8.41 BCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Borik asit katkılı BCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyinin karakteristiğini belirlemek amacıyla çekilen SEM resmi Şekil 8.41’de görülmektedir. Söz konusu resimde genel olarak, sürtünme yüzeylerinde abrazyon aşınmalar sonucu oluşan kısa çizikler, mikro ve makro boşluklar ve adhezyon aşınmalar sonucu oluşan üzeri kaplanmış sürtünme tabakaları ile termomekanik gerilmelere bağlı olarak mikro çatlakların olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşan sürtünme yüzeylerinde komponenti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldıkları da anlaşılmaktadır. BCH-16 kodlu numune tüm numuneler içerisinde 0,44 ile en yüksek sürtünme katsayısı ortalaması vermiştir.



Şekil 8.42 BCH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

BCH-20 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerden büyük taneli olan veya küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri

görülmektedir. BCH-20 kodlu numunede % 20 barit, % 20 cashew ve % 4 borik asit mevcuttur, bu küçük topaklanmalar barit topaklanması olabilir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvıyan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak dikkat çekmektedir (Şekil 8.42).

8.1.3.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri

Tablo 8.7 ve Tablo 8.8’te borik asit ve cashew katkılı fırınlanmış (BCH) ve fırınlanmamış (BC) numunelerin özgül aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı ve standart sapma değerleri görülmektedir. Özgül aşınmada komponenti oluşturan malzemelerin birbirleriyle uyumları ve sergiledikleri sürtünme katsayısı etkili olmaktadır. Bu yüzden fırınlanmamış numunelerde (0,42) ve fırınlanmış numunelerde (0,44) ile en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerini gösteren numunelerin özgül aşınma miktarı da diğer numunelere göre yüksek çıkmıştır. Balata bünyesindeki büyük parçacıkların sürtünme sırasında zorlanmanın etkisiyle kopmaları sonucu özgül aşınma değerinin daha yüksek çıktığı anlaşılmaktadır. Yoğunluk değerlerinde, içerikte kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranları oldukça etkili olmaktadır.

Tablo 8.7 BC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
BC-4	0,31	2,170	19,1	0,387	0,0120501
BC-8	0,32	1,739	17,1	0,389	0,0139083
BC-12	0,35	1,709	16,8	0,399	0,0206207
BC-16	0,39	1,678	16,1	0,426	0,021199
BC-20	0,36	1,704	16,6	0,409	0,0164941

Numunelerin sertlik değerlerinde barit, cashew ve borik asit oranlarına bağlı olarak değişimler görülmüştür. BC-4 kodlu numune, % 20 barit ve borik asit, % 4 cashew içermektedir, sertlik değeri 19,1 HB değeri ile birinci sırada iken % 20’lik bir oranla barit, % 4’lik bir oranla borik asit ve % 20 cashew içeren BC-20 kodlu numunesi de 16,6 HB değeri ile sertlikte dördüncü sıradadır. % 20’lik bir oranla barit % 16’lık bir oranla borik asit ve %8 cashew içeren BC-8 kodlu numune 17,1 HB ile orta sertlik değeri sergilemiştir. BC-16 kodlu numune en yüksek sürtünme katsayısını en yüksek özgül aşınma ve 16,1 HB ile en düşük sertlik

değerini göstermiştir (Tablo 8.7). Diğer numuneler sürtünme karakteristiği grafiklerinde görüldüğü gibi sürtünme katsayısındaki salınıma bağlı olarak standart sapma değerleri göstermişlerdir (Şekil 8.29–8.31).

Borik asit ve cashew katkılı numunelerden bir kısmı 180 °C, 4 saat süre ile fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra sertlik ve sürtünme katsayısında yükselme kaydedilmiştir. Fırınlama işleminden önce 0,38 sürtünme katsayısı ve 19,1 sertlik değeri olan BC-4 numunesi fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra 0,41 sürtünme katsayısı ve 22,9 sertlik değerine çıkmıştır. Fırınlanan numunelerin içyapısındaki kürleşmeyi sağlayan reaksiyonlar fırınlama işlemi ile tamamlanmış olup daha kararlı bir yapı oluşturmuş ve sürtünmeyi önemli ölçüde etkilemiştir. Balata üretiminde fırınlama işleminin ne kadar önemli olduğu buradan anlaşılmaktadır. İki farklı yöntemle üretilen numunelerin deneyleri sonucunda borik asit miktarı %8'den aşağı olması durumunda sürtünme katsayısında olumsuz bir etki meydana getirdiği Tablolardan anlaşılmaktadır.

Tablo 8.8 BCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
BCH-4	0,29	2,003	22,9	0,413	0,0055245
BCH-8	0,31	1,685	19,2	0,424	0,0137899
BCH-12	0,34	1,592	18,2	0,433	0,0116266
BCH-16	0,35	1,533	17,4	0,448	0,0138393
BCH-20	0,33	1,620	18,9	0,424	0,0075541

Tablo 8.9 Borik asit ve cashew katkılı fırınlanmamış (BC) ve fırınlanmış (BCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

Numune Adı	Saf Su		Tuzlu su		Yağ		Fren Sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
BC-4	4,86	0,60	2,69	0,40	2,14	0,39	3,07	0,47
BC-8	3,78	0,57	2,47	0,37	2,03	0,33	2,78	0,43
BC-12	2,96	0,50	2,03	0,34	1,98	0,33	2,04	0,37
BC-16	2,94	0,40	2,14	0,29	1,85	0,31	1,78	0,33
BC-20	2,01	0,35	1,10	0,19	1,66	0,26	1,77	0,29
BCH-4	2,94	0,47	1,92	0,38	1,84	0,34	2,17	0,33
BCH-8	2,90	0,43	1,79	0,35	1,52	0,32	1,97	0,30
BCH-12	1,97	0,37	1,78	0,33	1,51	0,30	1,94	0,28
BCH-16	1,78	0,31	1,64	0,27	1,47	0,27	1,93	0,26
BCH-20	1,54	0,25	1,18	0,23	1,37	0,25	1,80	0,23

Tablo 8.9 Borik asit ve cashew katkılı numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testlerini göstermektedir. Fırınlanmamış BC kodlu numunelerde saf su dayanım testinde ortalama % 3,31 bir kütleli artış gözlenirken en yüksek kütleli artış BC-4 kodlu numunede görülmüştür. BC kodlu numunelerin tuzlu su % 2,08 fren sıvısı % 2,28 ve hidrolik yağ % 1,93 kütleli artış ortalamaları çıkmıştır. Boyutsal değişimde kütleli artışa orantılı olarak çıkmıştır ve en yüksek etki saf su testlerinde olmuştur. Bu durum borik asitin saf suda çözünme özelliğinden kaynaklanmaktadır [186]. Tüm numunelerin dayanım testleri TS 9075 standartlarına uygun çıkmıştır. Ayrıca dayanım test Tablosunda fırınlama işlemi sonrası deneylere tabi tutulan numunelerin dayanım testlerinin sonuçlarına bakıldığında aynı içerikli fırınlanmamış numunelere göre daha dayanıklı çıkmışlardır. Fırınlanmamış numunelerde (BC) en yüksek saf su deneylerinde kütleli artış % 3,31 iken aynı içeriklere sahip numuneler fırınlama işleminden sonra kütle artış ortalamaları (BCH) 2,22 olarak tespit edilmiştir. BCH kodlu numuneler de tuzlu su % 1,66, fren sıvısı % 1,96 ve hidrolik yağ % 1,54 kütleli artış ortalamaları çıkmıştır. Sürtünme katsayı ortalamalarında stabil durum sağlayan fırınlama işlemi, dayanım testlerin de de iyi sonuç vermiştir.

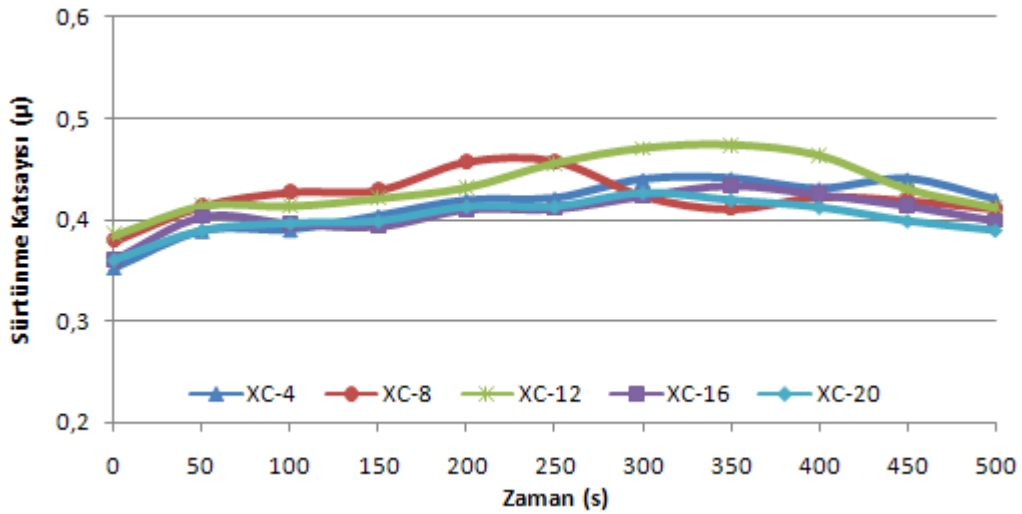
8.1.4. Borax ve Cashew Katkılı Fren Balataları

8.1.4.1. Sürtünme Performansı

Boraks katkılı tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi süreci yaklaşık 50 saniye sürmüş ve daha sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.43–8.46). Sürtünme katsayısı değişimi için fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerin sürtünme katsayısı değişimi için grafikleri incelendiğinde, XC-12 ve XC-8 kodlu numuneler XC-4, XC-16, XC-20 kodlu numunelere göre daha az dalgalanma göstermiştir. XC-4, XC-16, XC-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısında, sürtünme tabakası oluşumundan sonra 50 saniye kadar sabit kalıp hızlı düşme ve hızlı yükselme izleyerek sık dalgalanma göstermiştir. Söz konusu düşme 50 °C civarında başlamış ve 300 °C'ye kadar sürtünme tabakasını oluşturan malzeme özelliklerine bağlı olarak dalgalandığı düşünülmektedir. Sürtünme tabakasının sıcaklığı 300 °C civarında iken sürtünme katsayısında dalgalanma durmuş ve sabit kabul edilecek şekilde seyretmektedir (Şekil 8.43, 8.44). Bu aşamada sürtünme katsayısı değeri 0,40 civarındadır. Bu durum boraks katkılı diğer numunelerde de görülmektedir (Şekil 8.43). XC-12, XC-16 ve XC-20 kodlu numunelerin ilk 50 saniyelik kısmı XC-4 ve XC-8 kodlu numunelerle ortak özellik göstermekle birlikte en az dalgalanmayı XC-12 kodlu numune sergilemiştir. XC-4 kodlu numunede 400. saniyeden sonra dalgalanma tekrar kendini göstermeye başlamıştır (Şekil 8.43). 400. saniyede tüm numunelerin

sıcaklık değerleri birbirine yakın değerdedir. Fakat XC-4 ve XC-8 numunelerindeki sürtünme dalgalanmaları devam etmektedir. Sürtünme katsayısındaki bu dalgalanma, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin sürtünme çiftinin karşı yüzeyini oluşturan disk'e tutunma özelliği gösteremediği, yani ya komponenti oluşturan malzemelerin birbirleri ile iyi uyum sağlamadığından dolayı sürtünme yüzeyine karşı bir direnç oluşturmadağı ya da oluşan sürtünme yüzeyi sert malzemelerden oluşmadığı için sürtünme katsayısında beklenen artış veya stabil kalamadığı şeklinde açıklanabilir.

XC-4, XC-16 ve XC-20 kodlu numuneler sergiledikleri sürtünme katsayısı değişimi ile birlikte ortalama sürtünme katsayısı değerleri de birbirine çok yakındır ve 0,40 civarındadır. Aynı durum XC-8 ve XC-12 kodlu numuneler içinde geçerlidir ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri 0,42 civarındadır. Sürtünme katsayısı değişiminde en az dalgalanmayı XC-12 kodlu numune göstermiştir. XC-12 kodlu numunenin sürtünme davranışı diğerlerinden farklı olmakla birlikte ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,43 civarındadır (Şekil 8.43). Ortalama sürtünme katsayısı değerleri kabul edilebilir olmakla birlikte sürtünme katsayısındaki dalgalanma sürtünme performansında önemli bir kusur olarak görülür.



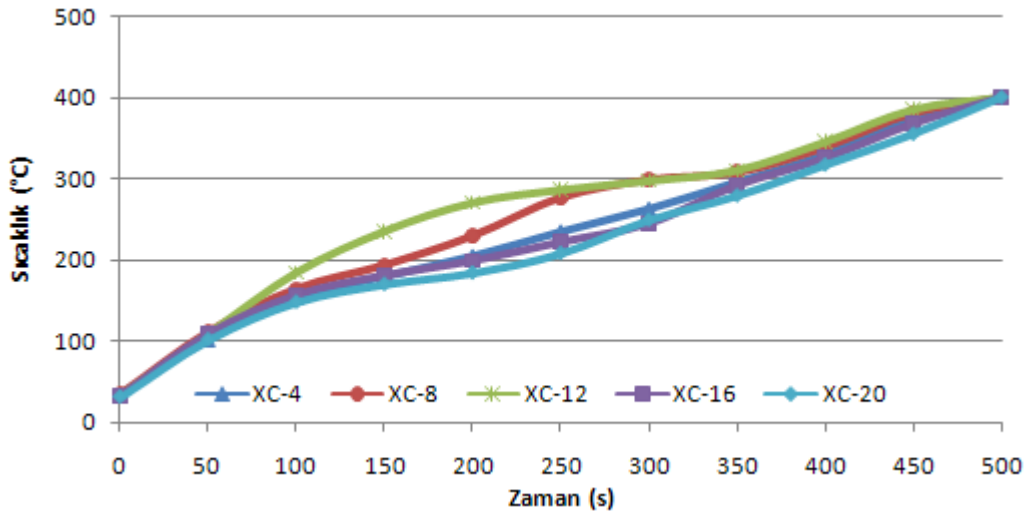
Şekil 8.43 XC kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Sürtünme katsayısı değişiminde sık dalgalanma gösteren XC-8 ve XC-12 kodlu numuneler birbirleriyle benzeşirken (Şekil 8.43), XC-4, XC-16 ve XC-20 kodlu numunelerde birbirleriyle benzeşen sürtünme katsayısı değişimi göstermiştir. XC-8 ve XC-12 kodlu numuneler sergiledikleri sürtünme katsayısı değişimi ile birlikte ortalama sürtünme katsayısı değerleri de birbirine çok yakındır ve 0,42 civarındadır. Aynı durum XC-4, XC-16 ve XC-20 kodlu numuneler içinde geçerlidir ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri 0,41 civarındadır.

Ortalama sürtünme katsayısı değerleri kabul edilebilir olmakla birlikte sürtünme katsayısındaki dalgalanma sürtünme performansında önemli bir kusur olarak görülür.

% 12 civarında boraks ve % 12 cashew kullanımı sürtünme katsayısında stabilite sağlamada etkili olmuştur. Fakat içerikteki boraks ve cashew oranlarına bağlı olarak sürtünme yüzey sıcaklığı 400 °C’de iken sürtünme katsayısında bir düşme olmuştur. Sürtünme katsayısındaki bu düşmenin sebebi sıcaklığın etkisiyle balata iç yapısındaki kompleks termomekanik etkiler sonucu olduğu düşünülmektedir.

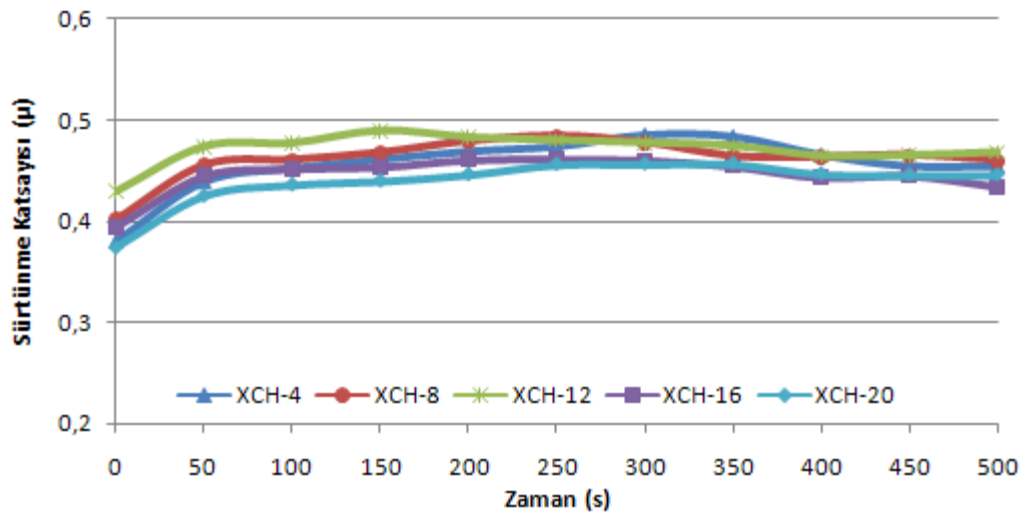
Boraks ve cashew katkılı tüm numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde, sürtünme katsayısındaki dalgalanma 50 °C-300 °C arasında oluşmuştur (Şekil 8.44). İçerik değişimine bağlı olarak yaklaşık 300-400. saniyelerde yani sürtünme yüzey sıcaklığı 300 °C’den sonra komponente bağlayıcı olarak kullanılan fenolik reçine yumuşaya başlamıştır. Daha sonra sürtünme yüzeyinde mevcut bulunan ve karşı yüzeye direnç gösterecek sert malzemelerin bünyeden kopması sonucu sürtünme katsayısında fade oluşmuştur.



Şekil 8.44 XC kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi

Şekil 8.45 ve Şekil 8.46 aynı içeriklere sahip fırınlanmış numunelere ait sürtünme, sıcaklık değerlerini göstermektedir. Şekil 8.43’de dalgalanma eğilimi gösteren XC-8 ve XC-12 kodlu numuneler fırınlama işleminden (XCH-8 ve XCH-12) sonra stabil bir hal almışlardır (Şekil 8.44). Fırınlama işlemine tabi tutulmadan önce en yüksek sürtünme katsayısı 0,43 olan XC-12 (Şekil 8.43), fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra (XCH-12) 0,47 sürtünme ortalamasına ulaşmıştır. Hem fırınlama işlemi görmüş hem de fırınlama işlemi görmemiş numunelerde % 12 borax katkı miktarından sonra sürtünme de azalma görülmüştür. Buradan anlaşılabileceği üzere % 12 borax katkı maddesinden fazla borax kullanılması sürtünme katsayısını olumsuz etkilemektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmuş numunelerde sürtünme katsayısı,

sıcaklıktaki artmaya bağlı olarak kararlı bir şekilde devam etmiştir. Ancak XCH-4 ve XCH-16 numuneleri 350 °C'ye kadar kararlı bir seyir izlerken, bu sıcaklıktan sonra ani olarak düşmüştür (Şekil 8.45). Benzer bir çalışmayı Ravikiran ve arkadaşları çalışmışlardır [185]. Bu çalışmada kaymaya bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimi incelemişlerdir. Kaymanın ilk 10 metresinde sürtünme katsayısı lineer olarak artarken 40 metreden sonra kararlı bir değere ulaştığını ve bu noktadan sonra ani bir düşüşün olduğunu belirtmişlerdir. XCH-4 ve XCH-16 numunelerinin 350 °C'den sonraki ani düşüşün literatürle benzer bir davranış gösterdiği görülebilir. Bu noktadaki sürtünme katsayısında ki düşüşün sebebi olarak fenolik reçinenin sıcaklığın etkisiyle yumuşaması sonucu bağlayıcılık özelliğinin azalması söylenebilir.

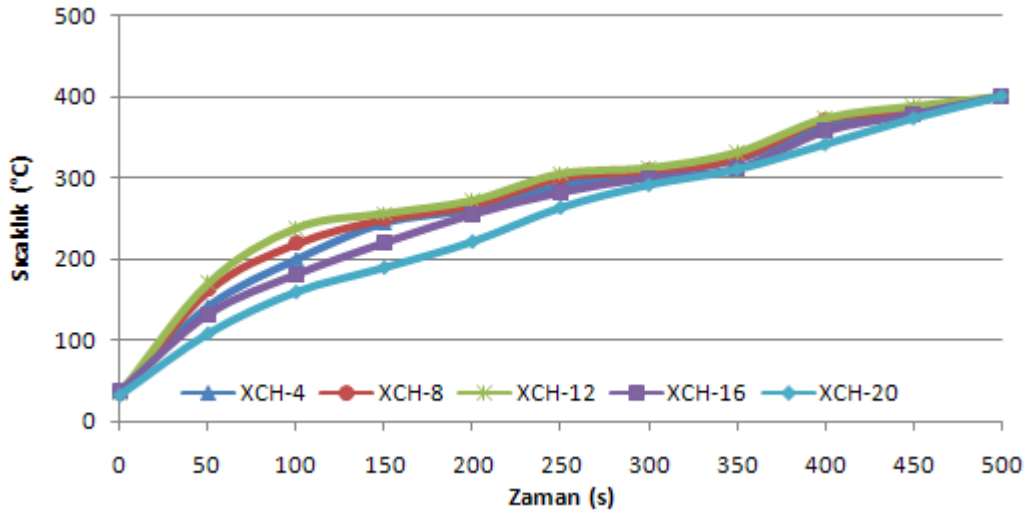


Şekil 8.45 XCH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Borax ve cashew katkılı fırınlanmış tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi süreci yaklaşık 50 saniye sürmüş ve daha sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.45). XCH-4, XCH-8, XCH-16 ve XCH-20 kodlu numuneler 350. saniyeye kadar sürtünme katsayısında artış olmuş ve sıcaklık 300 °C yaklaştığında düşmeye başlamıştır. Bu düşüş 400. saniyeye kadar devam etmiş ve sonra stabil bir sürtünme katsayısı sergilemişlerdir. XCH-12 kodlu numunenin 150. saniyeye kadar sürtünme katsayısında artış olmuş ve 150. saniyeden sonra 400. saniyeye kadar sürtünme katsayısında düşüş görülmüştür (Şekil 8.45). XCH-12 kodlu numunenin bu değerler arasında sıcaklığı 250-380 °C arasındadır (Şekil 8.46).

En düşük sürtünme katsayısına sahip XCH-20 kodlu numune Şekil 8.46'da görüldüğü gibi düşük sıcaklık sergilemişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısı sergileyen XCH-12 kodlu numunenin sıcaklık eğrisi en yüksektir. XCH-20 kodlu numune 350. saniyeye kadar sürekli yükselen bir sürtünme katsayısı değeri sergilemiştir. 350. saniyeden sonra stabil bir eğri

göstermiştir ve sıcaklık 320 °C civarındadır (Şekil 8.46). XCH-16 kodlu numune XCH-20 kodlu numune gibi 350. saniyeye kadar sürtünme katsayısında artış göstermiş ve bu değerden sonra düşmeye başlamıştır. Bu değerde XCH-16 kodlu numunenin sıcaklığı 330 °C civarındadır (Şekil 8.46). Bu iki numunenin sürtünme katsayısı ortalaması da birbirine yakın ($\mu=0,40$) çıkmıştır.

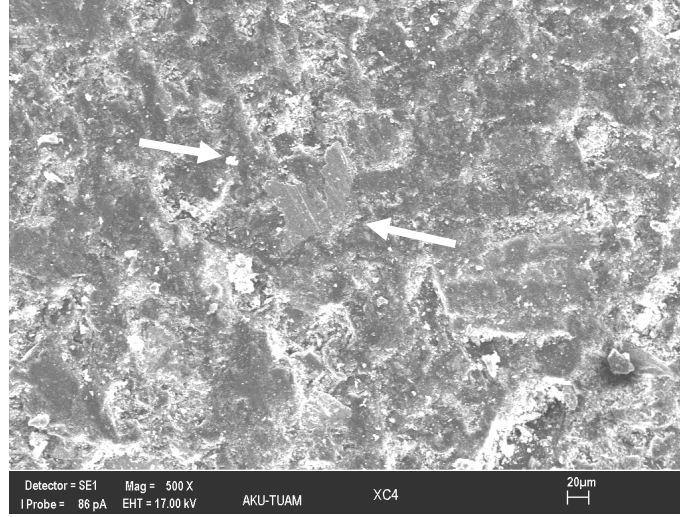


Şekil 8.46 XCH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

XCH-8 ve XCH-12 kodlu numunelerin sıcaklık artışları benzer özellik göstermiştir. XCH-12 kodlu numune 150. saniyeden sonra sürtünme katsayısında düşme görülürken XCH-8 kodlu numune 250. saniyeden sonra sürtünme katsayısında düşme görülmüş fakat bu düşüş 350. saniyeden sonra stabil bir durumda devam etmiştir. XCH-8 kodlu numunenin sürtünme katsayısının düşmeye başladığı 250. saniyedeki sıcaklık değeri 280°C civarındadır.

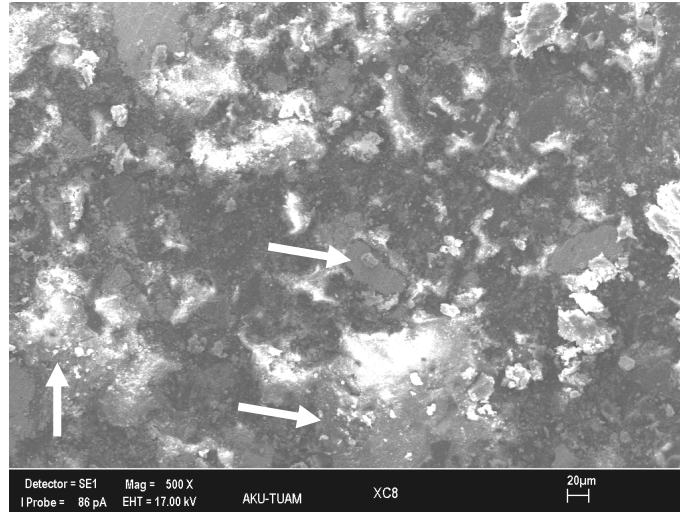
8.1.4.2. Mikro Yapı Karakteristiği

Boraks katkılı fren balatalarının sürtünme yüzeyinin karakteristiğini belirlemek amacıyla SEM resimleri çekilmiştir. Bu resimler (XC-XCH) Şekil 8.47–8.56'da görülmektedir. Söz konusu resimlere genel olarak bakıldığında, sürtünme yüzeylerinde mikro çatlaklar, mikro ve makro boşluklar ve üzeri kaplanmış sürtünme tabakalarının olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşan sürtünme yüzeylerinde komponenti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldıkları da anlaşılmaktadır.



Şekil 8.47 XC-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

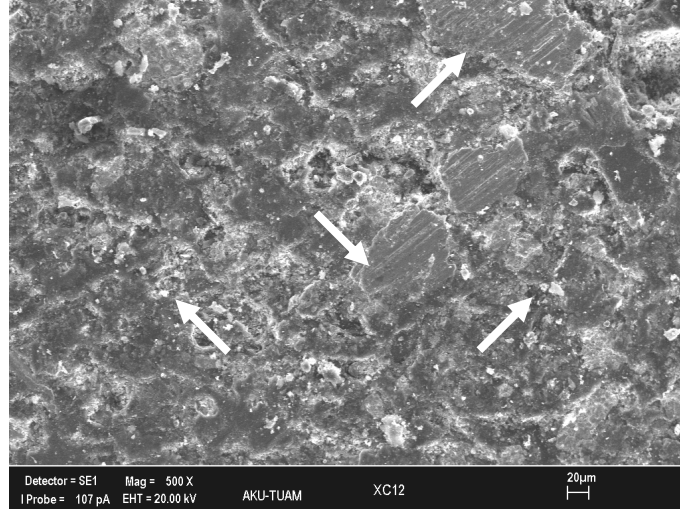
Şekil 8.47’de XC-4 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. % 20 barit, % 20 borik asit ve % 4 cashew içeren ve 0,41 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde sürtünmeye bağlı mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Oluşan abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler ile görülmektedir.



Şekil 8.48 XC-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

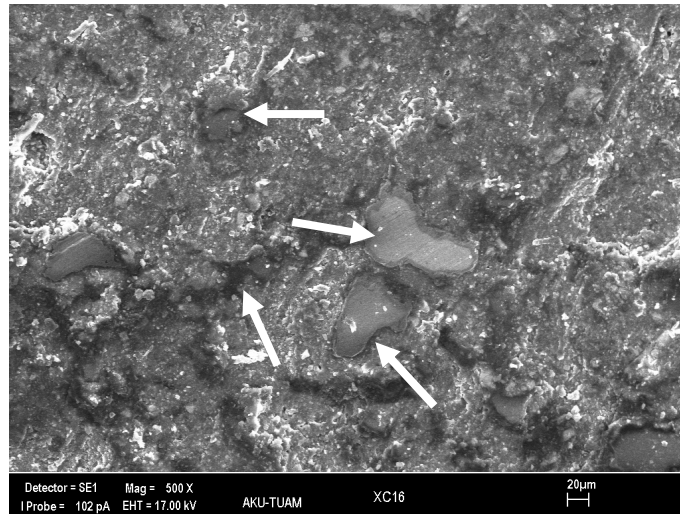
XC-8 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı görülmektedir (Şekil 8.48). Beyaz parlak renkli bölgeler, bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar olarak dikkat çekmektedir. Resimde mikro boşluk görülmektedir. Bu boşluk, sürtünme yüzey sıcaklığının 300 °C -350 °C’lere yükselmesi

sonucu bağlayıcı madde fenolik reçine gevşer ve komponenti oluşturan büyük tanelerin, malzemelerin veya metal parçacıkların sürtünmenin etkisiyle bünnyeden kopması sonucu oluşmuştur. XC-8 kodlu numunede % 20 barit, % 16 borax, % 8 cashew mevcuttur ve 0,42 sürtünme katsayısı değeri göstermiştir.



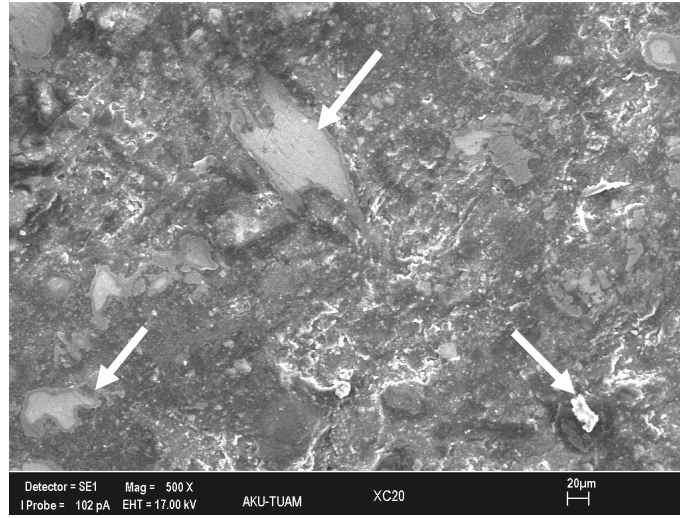
Şekil 8.49 XC-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

% 20 barit, % 12 borax, % 12 cashew içeren ve 0,43 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen XC-12 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.49’da görülmektedir. Şekil 8.49’dan anlaşıldığı gibi abrazif aşınmaya maruz kalmış bir sürtünme yüzeyi mevcuttur. Genel olarak komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Diğer numunelerde görülen sürtünmeye bağlı mikro boşluklar bu numunede de vardır. Abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler ile görülmektedir.



Şekil 8.50 XC-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

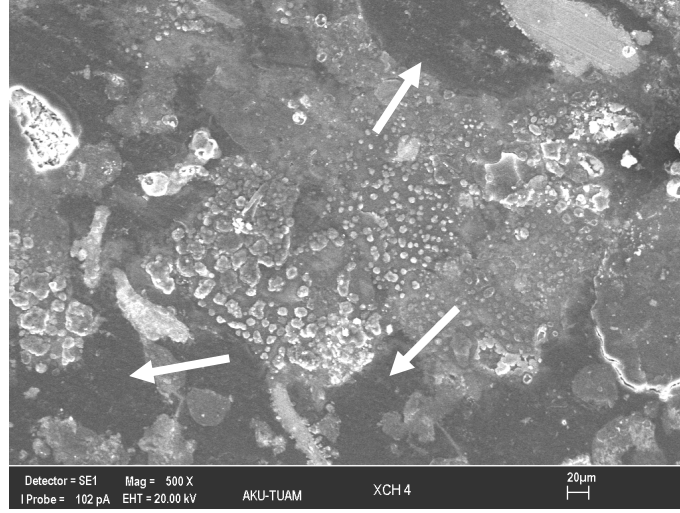
XC-16 kodlu numunenin SEM resminde sıkı bir yüzey yapısı ile birlikte komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.50). Sürtünmenin etkisiyle parçacıkların bünyeden kopması sonucu oluşan mikro ve makro boşluklar görülmektedir. XC-16 kodlu numunede % 20 barit, % 8 borax, % 16 cashew mevcuttur ve 0,40 sürtünme katsayısı ortalaması göstermiştir. SEM resminden anlaşıldığı kadarıyla yer yer abrazif aşınma görülmekte ve kısmen adhezif aşınma belirtileri mevcuttur. Dolayısıyla sergilediği sürtünme performansı sürtünme yüzey karakterini de etkilemiştir.



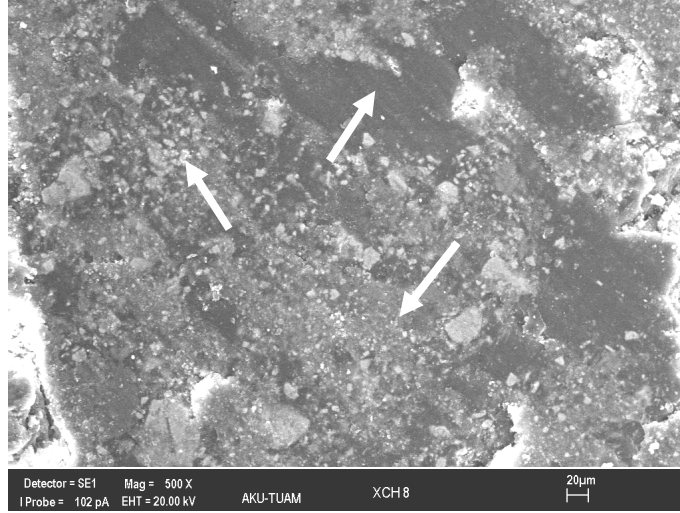
Şekil 8.51 XC-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

XC-20, % 20 barit, % 4 borax ve % 20 cashew içeren 0,40 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen XC-16 kodlu numune ile aynı sürtünme katsayısı ortalaması sergilemiştir. XC-20 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.51’de görülmektedir. Şekilde adhezif aşınmaya maruz kalmış sürtünme yüzeyleri mevcuttur. Genel olarak komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı görülmektedir. Yine diğer numunelerde görülen sürtünmeye bağlı mikro boşluklar bu numunede de mevcuttur. Abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği beyaz renkli bölgeler görülmektedir.

Şekil 8.52 XCH-4 kodlu numunenin fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonraki SEM resmini göstermektedir. XCH-4 kodlu numune % 20 barit, % 4 boraks ve % 20 cashew içermektedir. Şekil 8.52’de görüldüğü gibi gözenekli bir yapı oluşmuştur. Oluşan gözenekli yapıda mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Balatanın üretim aşamasında komponenti oluşturan malzemeler içerisinde sıcaklık ve basıncın etkisiyle kimyasal reaksiyonlar sonucu bu boşlukların oluştuğu ve bu boşlukların birbirleriyle tutunmayı zayıflattığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu mikro boşlukların oluşumunda komponenti oluşturan toz tanelerinin arasındaki tane boşluklarının da mutlak bir etkisi vardır.



Şekil 8.52 XCH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

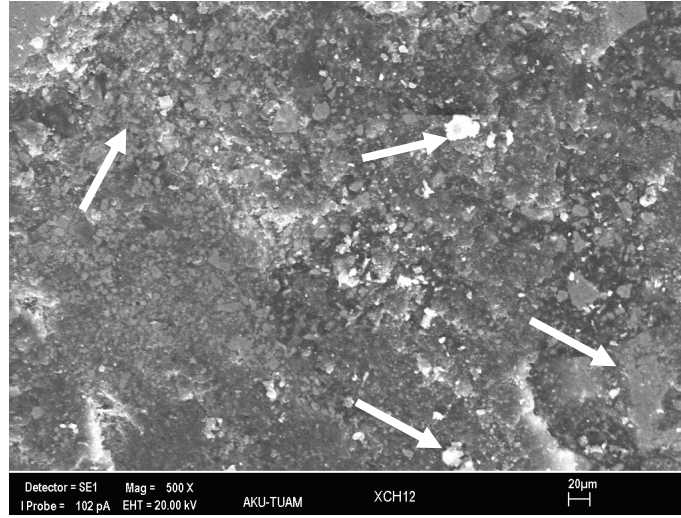


Şekil 8.53 XCH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

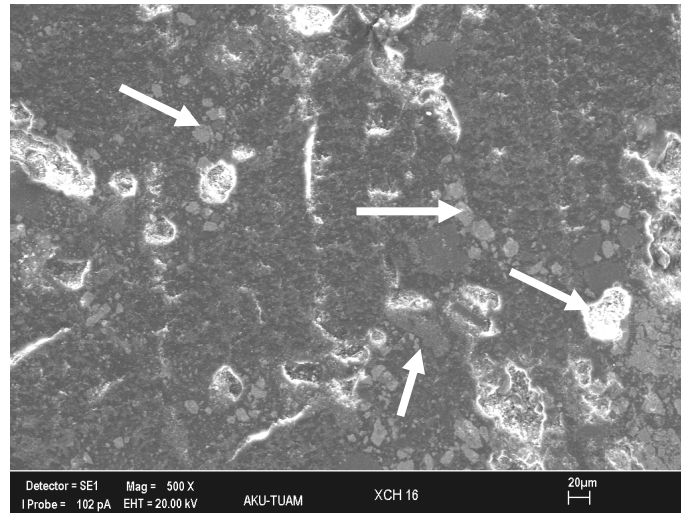
Şekil 8.53’de XCH-8 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. % 20 barit, % 16 borax, % 8 cashew içeren ve 0,46 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde sürtünmeye bağlı mikro ve makro boşluklar mevcuttur. Komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Oluşan abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler ile görülmektedir.

XCH-12 kodlu numunenin SEM resminde sıkı bir yüzey yapısı ile birlikte komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı Şekil 8.54’de görülmektedir. Sürtünmenin etkisiyle parçacıkların bünnyeden kopması sonucu oluşan mikro ve makro boşluklar görülmektedir. XCH-12 kodlu numunede % 20 barit, % 12 borax ve % 12 cashew mevcuttur. SEM resminden anlaşıldığı kadarıyla abrazif aşınma görülmemekte ve kısmen adhezif aşınma belirtileri

mevcuttur. Dolayısıyla sergilediği sürtünme performansı sürtünme yüzey karakteristiğinde de görülmektedir. 0,47 ile en yüksek sürtünme katsayısı ortalaması vermiştir.



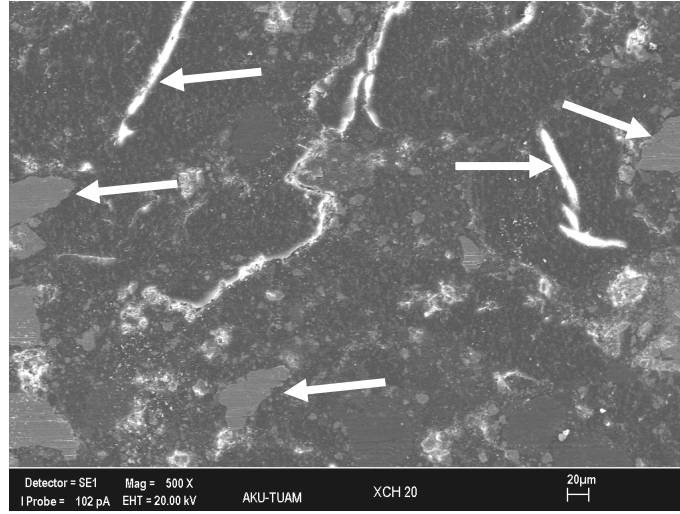
Şekil 8.54 XCH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.55 XCH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.55 XCH-16 ve Şekil 8.56 XCH-20 kodlu numunelerin SEM resimlerinde komponenti oluşturan malzemelerden büyük taneli olan veya küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. XCH-16 kodlu numunede % 20 barit, % 16 cashew ve % 8 borax, XCH-20 kodlu numunede % 20 barit, % 20 cashew ve % 4 borax mevcuttur ve her iki numunenin SEM resimleri birbirine benzemektedir. Her iki resimde de oluşan bu küçük topaklanmalar barit topaklanması olabilir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvıyan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca

sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir.



Şekil 8.56 XCH–20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

8.1.4.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri

Tablo 8.10 ve Tablo 8.11’de boraks katkılı fırınlanmamış (XC) ve fırınlanmış (XCH) numunelerin özgül aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı ve standart sapma değerleri görülmektedir. Yoğunluk değerlerinde, içerikte kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranları oldukça etkili olduğundan ve en yüksek oranı barit, cashew ve borax oluşturduğundan, katkı maddelerinin oranına bağlı olarak sıralanmaktadır. Özgül aşınmada komponentti oluşturan malzemelerin birbirleriyle uyumları ve sergiledikleri sürtünme katsayısı etkili olmaktadır. Bu yüzden en yüksek ortalama sürtünme katsayısını gösteren XC-12 ($\mu=0,43$) ve XCH-12 ($\mu=0,47$) kodlu numunelerin özgül aşınma değeri de diğerlerine göre yüksek çıkmıştır. Sürtünme sırasında zorlanmanın etkisiyle balata bünyesindeki büyük parçacıkların kopmalarının özgül aşınma değerinin yüksek çıkmasında önemli etkisi vardır.

Numunelerin sertlik değerlerinde barit ve boraks oranlarına bağlı olarak çok küçük değişimler görülmüştür. Boraks katkılı numunelerin yoğunluk ve özgül aşınma değerlerinde farklılıklar olmasına rağmen sertlikte çok önemli farklılıklar göstermemesi, fakat yoğunluk ve özgül aşınmada balata bünyesinin gözeneklilik ve sergiledikleri sürtünme davranışları etkili olmuştur. Yalnızca XC-20 kodlu numunenin sertliği diğerlerinden farklı çıkmıştır. Burada içerikteki boraks oranı etkili olmuş olabilir. Sürtünme performansında fazla dalgalanma gösteren XC-8 ve XC-12 kodlu numune 0,43 civarında sürtünme katsayısı gösterirken standart sapma değerleri de birbirine yakındır. Sürtünme performansında en az dalgalanma gösteren XCH kodlu numuneler ortalama 0,45 civarında sürtünme katsayısı değeri göstermiştir. Bu

değerler balata bünyesinde oluşan yapının birbirlerine çok yakın olduğu ve sonuç olarak ta yakın deneysel sonuçlar elde edildiği yönündedir.

Tablo 8.10 XC kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
XC-4	0,31	1,923	18,4	0,413	0,0272153
XC-8	0,32	1,752	16,8	0,422	0,0218229
XC-12	0,34	1,704	16,1	0,434	0,0287069
XC-16	0,30	2,034	20,2	0,406	0,0200583
XC-20	0,29	2,086	22,3	0,401	0,0183887

Tablo 8.11 XCH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
XCH-4	0,29	1,841	21,2	0,456	0,0287854
XCH-8	0,30	1,675	20,9	0,461	0,0217728
XCH-12	0,31	1,611	18,1	0,471	0,0156926
XCH-16	0,28	1,994	22,9	0,445	0,0192444
XCH-20	0,27	2,008	24,2	0,438	0,0235204

Tablo 8.12 Borax ve cashew katkılı fırınlanmamış (XC) ve fırınlanmış (XCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

Numune Adı	Saf Su		Tuzlu su		Yağ		Fren Sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
XC-4	1,87	0,27	1,72	0,25	1,67	0,23	1,47	0,25
XC-8	1,94	0,29	2,50	0,28	1,96	0,28	2,37	0,31
XC-12	2,34	0,35	2,52	0,31	2,51	0,33	2,49	0,35
XC-16	2,52	0,37	2,77	0,38	2,53	0,34	3,14	0,41
XC-20	2,65	0,40	3,27	0,47	2,62	0,37	3,72	0,48
XCH-4	1,05	0,20	1,26	0,21	1,16	0,17	1,25	0,23
XCH-8	1,53	0,25	1,58	0,27	1,18	0,20	1,59	0,27
XCH-12	1,57	0,28	1,61	0,33	1,34	0,23	2,09	0,30
XCH-16	1,76	0,32	1,83	0,37	1,35	0,25	2,60	0,35
XCH-20	1,86	0,34	1,86	0,39	1,45	0,29	3,05	0,40

Tablo 8.12 Borax ve cashew katkılı numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testlerini göstermektedir. Fırınlanmamış XC kodlu numunelerde saf

su dayanım testinde ortalama % 2,26 bir kütleli artış gözlenirken en fazla artış XC-20 kodlu numunede görülmüştür. XC kodlu numunelerin tuzlu su % 2,55, fren sıvısı % 2,63 ve hidrolik yağ % 2,25 kütleli artış ortalamaları göstermiştir. % boyut değişimi olarak 0,36 ortalama ile en yüksek fren sıvısı testlerinde olmuştur. Ayrıca dayanım test Tablosunda fırınlama işlemi sonrası deneylere tabi tutulan numunelerin dayanım testlerinin sonuçlarına bakıldığında aynı içerikli fırınlanmamış numunelere göre daha az değişim çıkmıştır. Fırınlanmamış numunelerin (XC) dayanım testlerinde en yüksek ortalama kütleli artış fren sıvısının da % 2,63 iken, aynı içeriklere sahip numuneler fırınlama işleminden sonra yapılan dayanım testleri sonucunda % kütleli artışı ortalamaları (XCH) 2,11 olarak tespit edilmiştir. XCH kodlu numuneler de tuzlu su % 1,62, saf su % 1,55 ve hidrolik yağ % 1,29 kütleli artış ortalamaları göstermiştir. Tüm numunelerin dayanım testleri TS 9075 standartlarına uygun çıkmıştır.

8.2. Bor Mineralleri ile Sedir Kullanılan Fren Balataları

Fren balatalarında sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılan Cashew'e alternatif olarak serdi çam kozalak tozu bor türevleri ile birlikte kullanılmıştır. Deneylerde toplam kırk adet numune kullanılmıştır. Numunelerin yirmi tanesi diğerleri ile eş içerikli olup üretim sonrasında 4 saat süre ile 180 °C sıcaklıkta fırınlanmıştır. Fırınlama işlemi ile balata üretim aşamasında komponentler arasındaki sıcaklığın etkisiyle birbirlerine tutunmayı sağlayan reaksiyonların tamamlanmasını ve daha kararlı balata yapısı oluşturmak hedeflenmiştir. Sürtünme katsayısındaki stabilite, fırınlama işlemi yapılmış numunelerde uçucu maddelerin bünyeden uzaklaştırıldığı ve yapısal değişikliklerin sağlandığı şeklinde açıklanabilir. Frenleme sırasında balatanın ısınacağı ve sıcaklığının artacağı açıktır. Fırınlanmamış balatalarda frenleme sırasında artan sıcaklıkla birlikte, balatanın sürtünme katsayısını belirleyen malzemelerin özelliklerinde az veya çok bir takım değişimler söz konusu olmuştur. Ayrıca artan sıcaklıkla birlikte balatayı oluşturan komponentlerin birbiri ile etkileşimi artmıştır. Sıcaklığın artması ile uçucu maddelerin gazlaşarak bünyeden uzaklaşması da dikkate alınırsa fırınlanmamış balatalar, frenleme sırasında sıcaklık artışının etkisiyle çok daha hızlı özellik değiştirerek sürtünme katsayısında kararsızlık ve dalgalanmalara sebep olduğu görülmüştür. TS 555'te belirtildiği gibi deneylerde aynı içeriğe sahip beş adet deney parçası numunesi kullanılarak aritmetik ortalama değerler alınmıştır.

Numunelerin sıcaklık-sürtünme katsayısı değişimini belirlemek için 1050 kPa basınçta deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında disk hızı 6m/s de tutulmuş sıcaklık 50 °C'den 400 °C'ye yükselene kadar 1 s aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Tüm balatalarda kütleli oran esas alınmıştır. Bağlayıcı olarak fenolik reçine, metalik katkı olarak bakır ve pirinç talaşı, seramik katkı olarak alümina (Al_2O_3), katı yağlayıcı olarak grafit, dolgu maddesi olarak barit, parçalanmaya karşı direnci artırmak için çelik yünü, sürtünme ayarlayıcı madde olarak cashew

tozunun yerine sedir ve bor minerallerinden ham bor ürünleri üleksit, kolemanit, rafine bor ürünleri olarak borik asit, boraks pentahydrate'tan oluşan malzemeler kullanılmıştır.

Üleksit katkılı numuneler “U” harfi ile kolemanit katkılı numuneler “K” harfi ile borik asit katkılı numuneler “B” harfi ile boraks katkılı numuneler “X” harfi ile simgelendirilmiştir. Sedir katkılı olan numunelerin simgelerinde “S” harfi bulunmaktadır. Simgelerde bulunan sayı ise katılan malzemelerden sedir çam kozalak tozunun % oranını ifade etmektedir. “H” harfi fırınlama işlemine tabi tutulmuş numune olduğunu belirtmektedir.

8.2.1. Üleksit ve Sedir Katkılı Fren Balataları

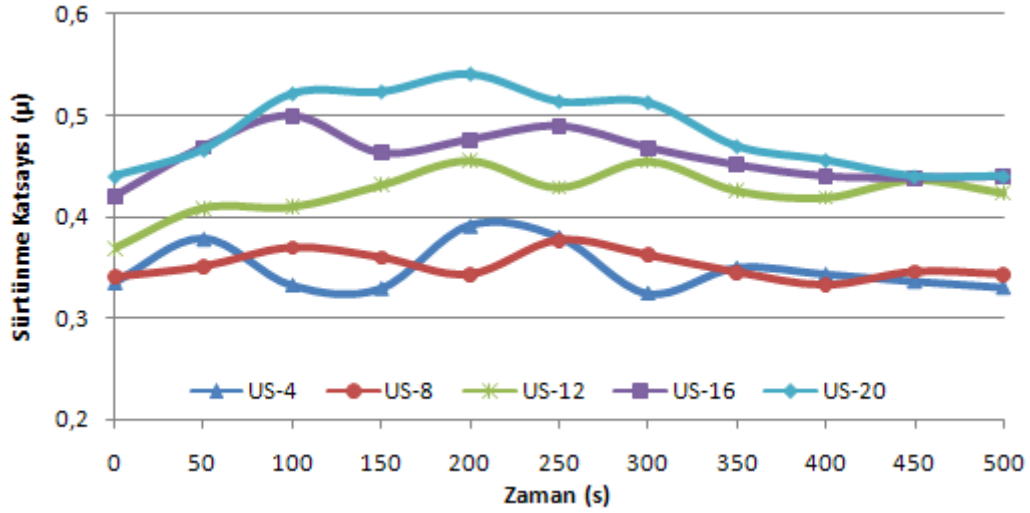
8.2.1.1. Sürtünme Performansı

Şekil 8.57 Şekil 8.58, Şekil 8.59 ve Şekil 8.60'de cashew'e (friction dust-sürtünme tozu) alternatif olarak kullanılan sedir ve üleksit katkılı numunelerin deneysel çalışma sonuçlarına göre sürtünme katsayısı ve sıcaklık ile ilgili grafikleri görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, fırınlama işlemi yapılmış bütün numunelerde (USH), cashew katkılı fırınlama yapılmış deney sonuçlarını destekleyici sonuçlar içermektedir. Şekillerden fırınlanmış numunelerin (USH), fırınlanmamış numunelere göre (US) sürtünme katsayılarının daha kararlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlardan; fırınlamanın balata performansını daha kararlı hale getirdiği, bu sayede frenleme sırasında balatanın ısınması neticesinde mikro yapıda olabilecek değişiklikleri azalttığı açık bir şekilde görülmektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerin (UC) sürtünme katsayılarında sıcaklık değişimleri ile beraber hızlı yükselme ve dalgalanma veya hızlı düşmeler gözlenmiştir. Fırınlama işleminin sürtünme katsayısına kararlılık kazandırdığı söylenebilir.

Şekil 8.57 üleksit ile birlikte sedir katkılı numunelerin sürtünme katsayısı-zaman grafiğini göstermektedir. Tüm numuneler içerisinde en yüksek sürtünme katsayısı ortalamasını 0,48 ile US-20 kodlu numune vermektedir. Aynı içeriklere sahip cashew ile yapılan deneylerde UC-20 0,43 sürtünme katsayısı ortalaması vermektedir. En düşük sürtünme katsayısı ortalamasını 0,34 ile US-4 kodlu numune vermiştir. Şekilde sedir miktarının artıp üleksit miktarının azalmasıyla sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir.

Üleksit ve sedir katkılı tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi sürecinden sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.57-8.60). US8 kodlu numune US-4, US-12, US-16 ve US-20 kodlu numunelere göre daha az dalgalanma göstermiştir. Bu dalgalanma Jang tarafında yapılan bir çalışmada [35], yüksek ara yüzey sıcaklıklarında sürtünme kuvvetinin bu derece inişli çıkışlı bir şekilde artmasının sebebinin, dökme demirden yapılan diskin mikro yapısının homojen olmadığından

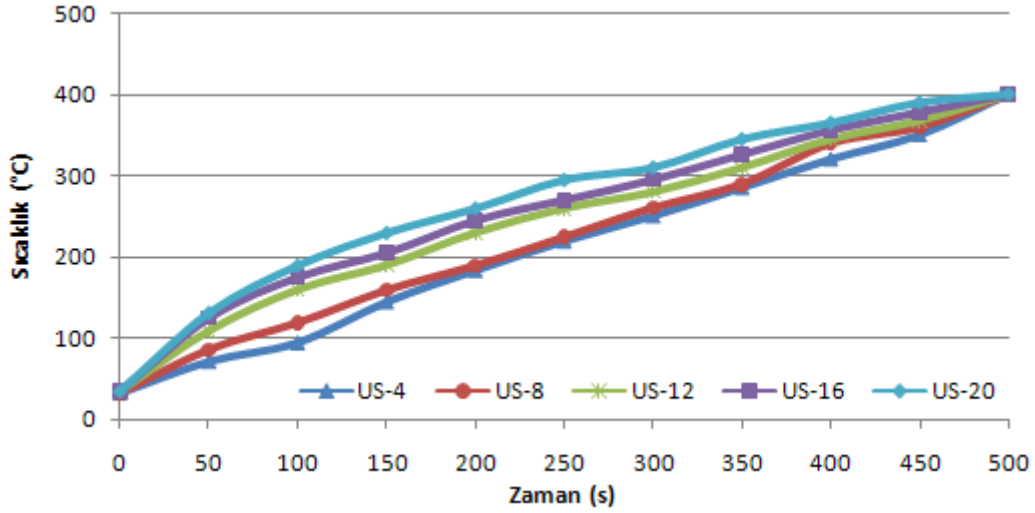
kaynaklandığını belirtmiştir. Ayrıca, ilk temasta balata numunesin karşı yüzeyi aşındırmaya çalışması ve uygun yüzey oluşuncaya kadar meydana gelen zorlanmalar daha fazla olmasından dolayı başlangıçtaki sürtünme kuvvetleri artma eğiliminde de olabilir. Ayrıca, artan sıcaklıkla birlikte reçinenin yüzeye yapışma ve tutunma özellikleri ile sürtünme katsayısını artırması da etki edebilir [178].



Şekil 8.57 US kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

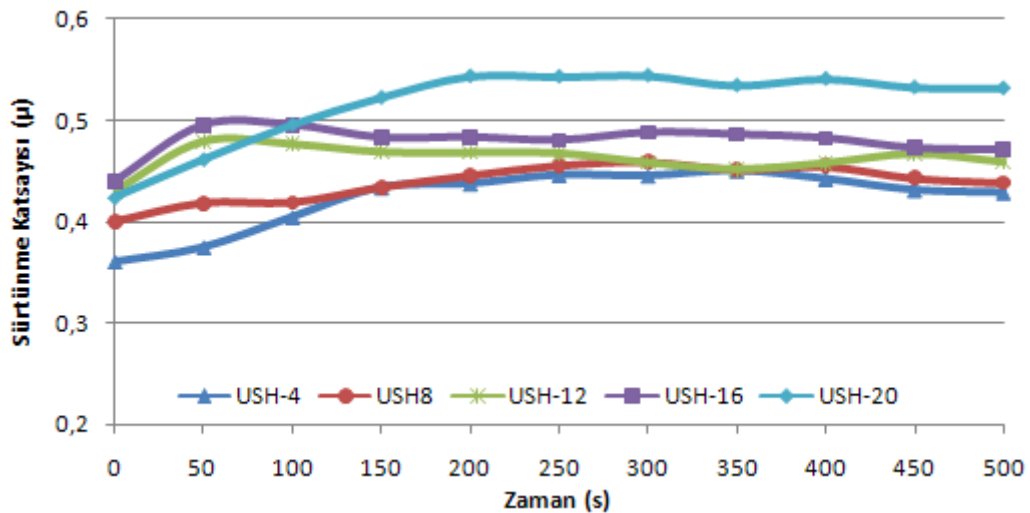
US-4 kodlu numune 50. saniyeden sonra sürtünme tabakası oluşumunun tamamlanmasıyla birlikte yavaş yavaş düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 8.57). Bu safhada henüz sıcaklık 20-100 °C arasındadır. Sürtünme katsayısındaki bu düşme, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin sürtünme çiftinin karşı yüzeyini oluşturan disk'e tutunma özelliği gösteremediği, yani ya komponenti oluşturan malzemelerin birbirleri ile iyi uyum sağlamadığından dolayı sürtünme yüzeyine karşı bir direnç oluşturamadığı ya da oluşan sürtünme yüzeyi sert malzemelerden oluşmadığı için sürtünme katsayısında beklenen artış veya stabil kalamadığı şeklinde açıklanabilir. 150. saniyeye kadar düşme eğilimi gösteren US-4 kodlu numune tekrar yükselme eğilimi göstermiştir. Fakat bu yükselme süresi 50 saniye kadar sürmüştür ve tekrar düşmüştür. Sıcaklığın 280 °C olduğu 300. saniyeden sonra sürtünme katsayısında yükselme başlamış ve bu yükselme 500.saniyeye kadar stabil bir şekilde olmuştur (Şekil 8.57). US-12 ve US-20 kodlu numuneler benzer bir sürtünme katsayısı sergilemişlerdir. Her iki numunede 200. saniyeye kadar sürtünme katsayılarında yükselme kaydetmişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısı sergileyen US-20 kodlu numunenin 200. saniyedeki sıcaklığı 280 °C iken en düşük sürtünme katsayısına sahip US-4 kodlu numune bu sıcaklık değerine 300. saniyede ulaşmıştır. US-20 ve US-16 kodlu numuneler 450. saniyede aynı sürtünme değerini

sergilemişlerdir. Aynı değeri gösterdikleri 450. saniyede her iki numunenin de sıcaklığı 390 °C civarındadır (Şekil 8.58).



Şekil 8.58 US kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

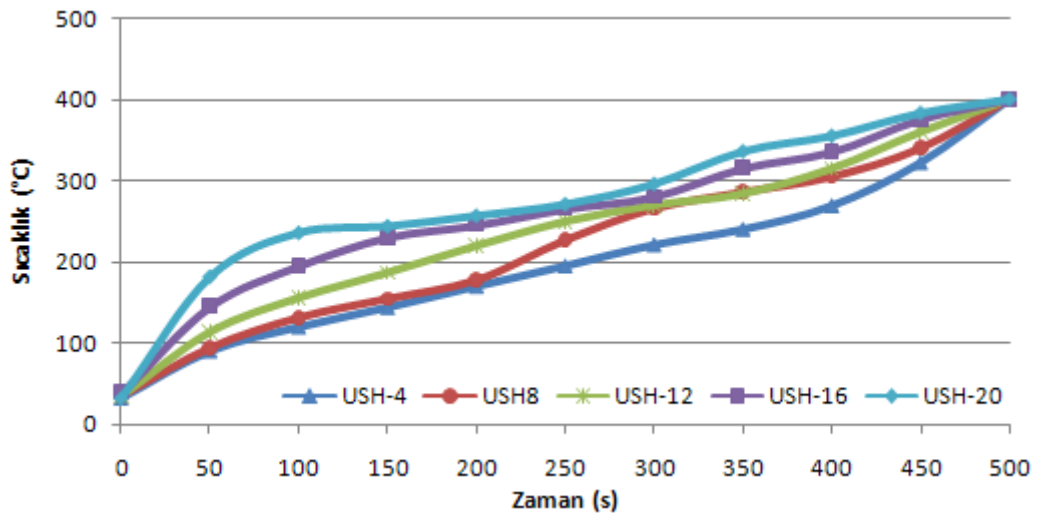
US-16 kodlu numune 100. saniyeye kadar sürtünme tabakası gelişimi sergilemiştir. 100. saniyeden sonra sürtünme katsayısında sıcaklığın artışıyla birlikte bir düşme olmuştur (Şekil 8.57 ve Şekil 8.58). Bu düşüş 150. saniyeye kadar devam etmiştir ve 150. saniyeden sonra 250. saniyeye kadar sürtünme katsayısında yükselme meydana gelmiştir. Bu sırada sıcaklık 200 °C'den 280 °C'ye kadar yükselmiştir (Şekil 8.58). UC-4 kodlu numune sıcaklık artışıyla birlikte düşük ama kararlı bir sürtünme sergilemiştir.



Şekil 8.59 USH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Şekil 8.59 aynı içeriklere sahip fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonraki numunelerden (USH) elde edilen sürtünme katsayısı ortalamalarını göstermektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numuneler ile yapılan deneylerde en yüksek sürtünme katsayısı US-20 kodlu numune fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra (USH-20) 0,51 sürtünme ortalaması vermektedir. Şekilde ayrıca fırınlama işlemi sonrası numunelerin daha stabil bir sürtünme katsayısı eğrisi oluşturduğu görülmektedir.

Üleksit ve sedir katkılı fırınlanmış USH-12 ve USH-16 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.59-8.60) ilk 50 saniyede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda yukarıda bahsedildiği gibi benzer karakteristik özellik göstermiştir. USH-4, USH-8 ve USH-20 numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde ilk 100 saniyede sürtünme yüzey tabakası oluşmuştur. USH-12 ve USH-16 kodlu numuneler sürtünme yüzey tabakası oluşumunun 50. saniyesinden sonra sürtünme katsayıları USH-12 kodlu numunede 350. saniyeye kadar USH-16 kodlu numunenin ise 250. saniyeye kadar düşmektedir (Şekil 8.59). Bu saniyeler arasında USH-12'nin sıcaklığı 100 °C'den 280 °C'ye kadar yükselmiştir (Şekil 8. 60). USH-16 kodlu numunenin ise 150 °C'den 250 °C'ye kadar çıkmıştır. USH-12 kodlu numune ilk 50 saniyeden sonra diğer numunelerde olduğu gibi sürtünme katsayısında fazla düşüş görülmemiştir. 100. saniyeye kadar yüksek ortalama sergileyen USH-16 kodlu numune ile aynı özellikleri göstermiştir. 150. saniyeden sonra sürtünme katsayısında meydana gelen düşüş ile sıcaklık artışı azalmıştır (Şekil 8.60). 300. saniyede ani bir sürtünme katsayısında artış görülmüştür, bu artış ile sıcaklık 300 °C'ye kadar çıkmıştır. Tekrar 450. saniyeye kadar sürtünme katsayısında düşme görülmüştür. 450. saniyeden sonra stabil bir sürtünme katsayısı göstermiştir.



Şekil 8.60 USH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

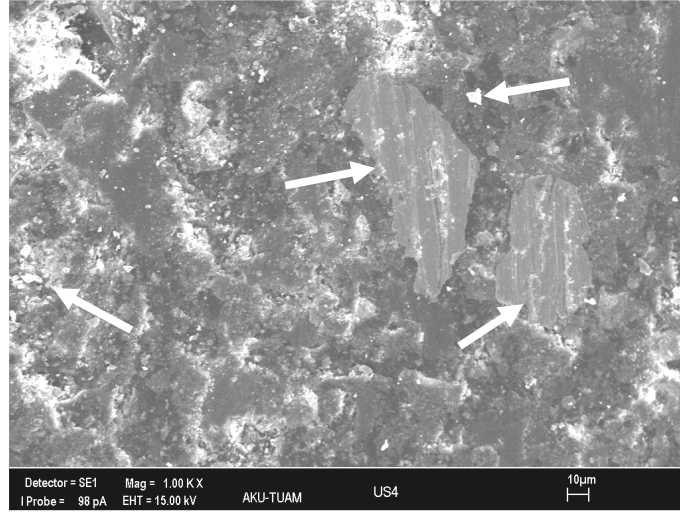
En düşük sürtünme katsayısına sahip USH-4 ve USH-8 kodlu numuneler Şekil 8.60’da görüldüğü gibi düşük sıcaklık sergilemişlerdir. Her iki numunenin de 300. saniyeye kadar sürtünme katsayılarında yükselme görülmüştür. USH-4 kodlu numunenin 300. saniyedeki sıcaklığı 220 °C iken, USH-8 kodlu numunenin 300. saniyedeki sıcaklığı 280 °C civarındadır. En yüksek sürtünme katsayısı sergileyen USH-20 kodlu numunenin sıcaklık eğrisi en yüksektir (Şekil 8.60). USH-20 kodlu numune % 4 üleksit, % 20 sedir içerirken, USH-4 kodlu numune % 20 üleksit, % 4 sedir içermektedir. 450. saniyeden sonra tüm numuneler stabil bir sürtünme eğilimi sergilemiştir.

Jang ve arkadaşları [35] disk ile balata ara yüzeyinde yağlayıcılar yetersiz olduğunda, sürtünmenin çok zor oluşabileceğini ve sürtünme malzemesi içerisindeki maddeler ile disk yüzeyi arasında direk etkileşimden sürtünme kuvvetinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Diğer taraftan malzeme yüksek miktarda yağlayıcılar içerdiğinde, sürtünme ara yüzeyinde ince bir film tabakası oluşur ve sürtünme kuvveti, sürtünme filminin kesme dayanımıyla oluştuğu bilinmektedir. Disk yüzeyinde ince sürtünme filmi oluştuğunda, sürtünme malzemelerindeki sert maddelerin abrazif hareketi artan sıcaklıklarda kararlı hale geçtiği düşünülür. Bundan sonra sürtünme katsayısı Şekil 8.59’daki gibi kararlı bir tavır sergiler. Ayrıca yüzeyde oluşan bu film, balata malzemesinin aşınmasında da önemli rol oynar.

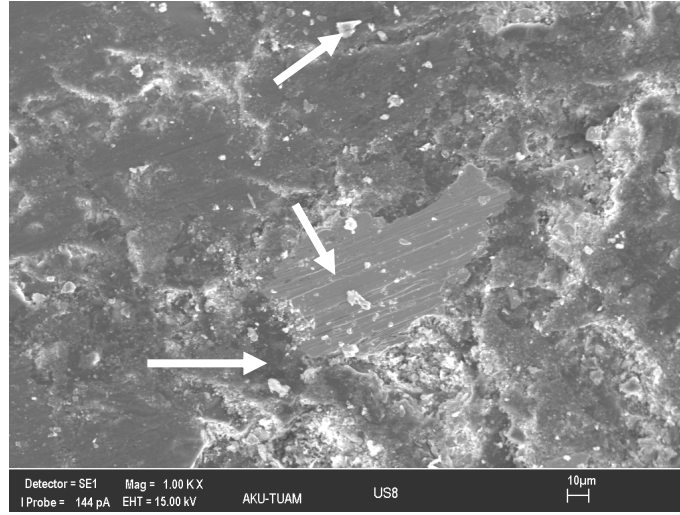
8.2.1.2. Mikro Yapı Karakteristiği

Üleksit ve sedir katkılı fırınlanmış (USH) ve fırınlanmamış (US) fren balatalarının sürtünme yüzeyinin karakteristiğini belirlemek amacıyla çekilen SEM resimleri Şekil 8.61-8.70’de görülmektedir. Söz konusu resimlerde genel olarak, sürtünme yüzeylerinde abrazif aşınmalar sonucu oluşan çizikler, mikro ve makro boşluklar ve adhezif aşınmalar sonucu oluşan üzeri kaplanmış sürtünme tabakaları ile termo-mekanik gerilmelere bağlı olarak mikro çatlakların olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşan sürtünme yüzeylerinde komponenti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldıkları da anlaşılmaktadır.

US-4 kodlu numunenin Şekil 8.61’de gösterilen SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir. Kısa boyutlu sürtünme yüzeyleri abrazif aşınmaların olduğunu göstermektedir. Görülen küçük topaklanmalar içerikteki baritten (% 20) kaynaklanmaktadır ve bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvı malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır.



Şekil 8.61 US-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

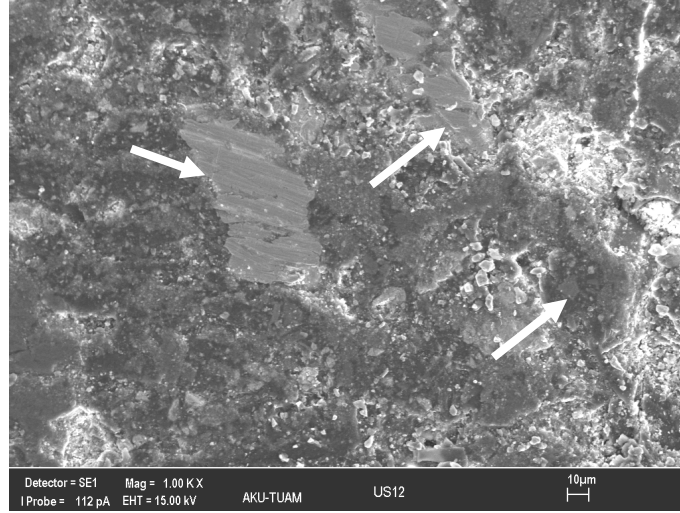


Şekil 8.62 US-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

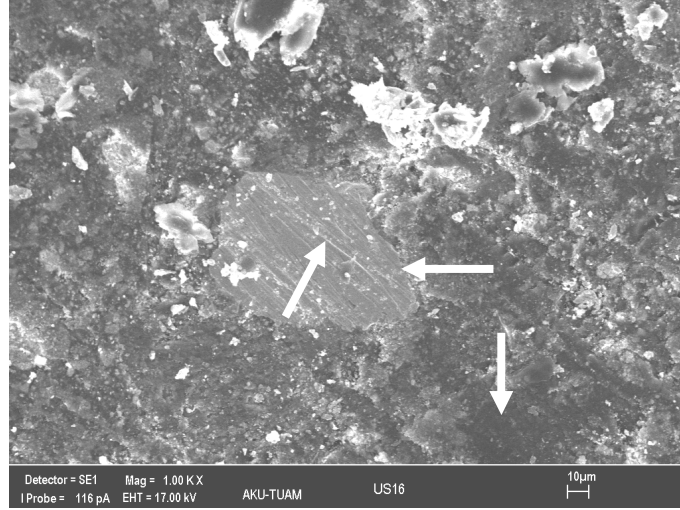
Şekil 8.62’de US-8 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Üleksit ve sedir katkılı US-4 kodlu numunenin sürtünme yüzey karakteristiğine benzer özellikler göstermektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerin abrazif aşınmadan kaynaklandığı ve balata bünyesinden kopan bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeyindeki malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve homojen dağıldığı anlaşılmaktadır. 0,35 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen US-8 kodlu numune % 20 barit, % 16 üleksit ve % 8 sedir içermektedir.

% 20 barit, % 12 üleksit ve % 12 sedir içeren US-12 kodlu numunenin SEM resminde makro boşluklar ve bu makro boşlukların yakın çevresinde de mikro boşluklar dikkat çekmektedir (Şekil 8.63). Bu numunenin sürtünme performansı grafiğinden de anlaşıldığı gibi sürtünme tabakası oluşum sürecinde sürtünme katsayısında 200. saniyeye kadar hızlı bir

yükselme ve sonra bir düşüş görülmektedir. SEM resmi ile bağlantılı düşünülürse bu hızlı yükselme sırasında komponenti oluşturan malzemelerden büyük ve sert parçacıkların sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve sonrasında aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan zorlanmaların etkisiyle balata bünyesinden kopması sonucu makro boşlukların oluştuğu sonucuna varılmıştır.



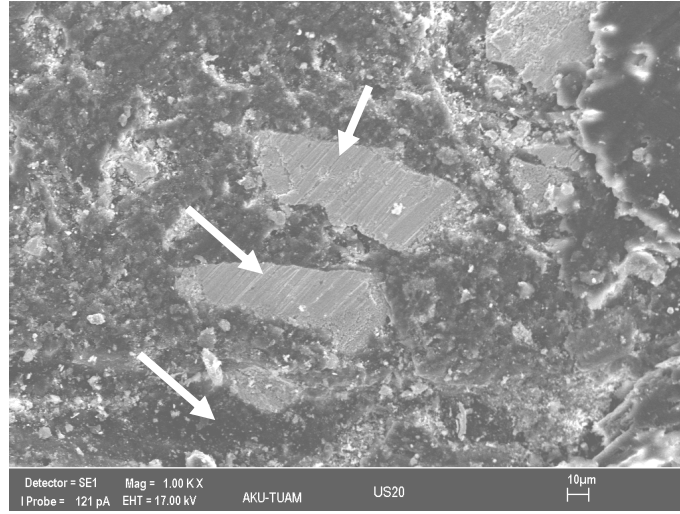
Şekil 8.63 US-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.64 US-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

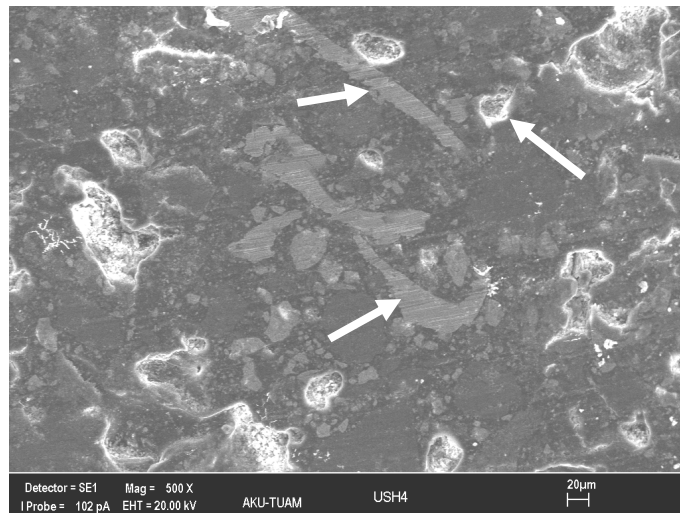
0,45 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen US-16 kodlu numune % 20 barit, % 8 üleksit ve % 16 sedir içermektedir. Şekil 8.64’de US-16 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Üleksit katkılı diğer numunelerin sürtünme yüzey karakteristiğine benzer özellikler göstermektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerin abrazif aşınmadan kaynaklandığı ve balata bünyesinden kopan bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar

oluşturduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeyindeki malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır.



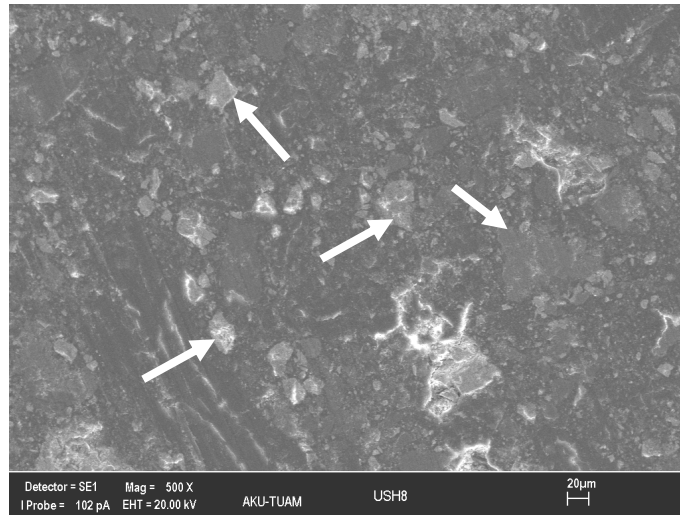
Şekil 8.65 US-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

US-20 kodlu numunenin sem resminde sıkı bir yüzey yapısı ile birlikte komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.65). Sürtünmenin etkisiyle parçacıkların bünnyeden kopması sonucu oluşan mikro ve makro boşluklar görülmektedir. US-20 kodlu numunede % 20 barit, % 4 üleksit ve % 20 sedir mevcuttur ve 0,48 sürtünme katsayısı ortalaması ile en yüksek sürtünme katsayısı değeri göstermiştir. SEM resminden anlaşıldığı kadarıyla abrazyif aşınma ve kısmen adhezif aşınma belirtileri mevcuttur. Dolayısıyla sergilediği sürtünme performansı sürtünme yüzey karakterinde de görülmektedir.



Şekil 8.66 USH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

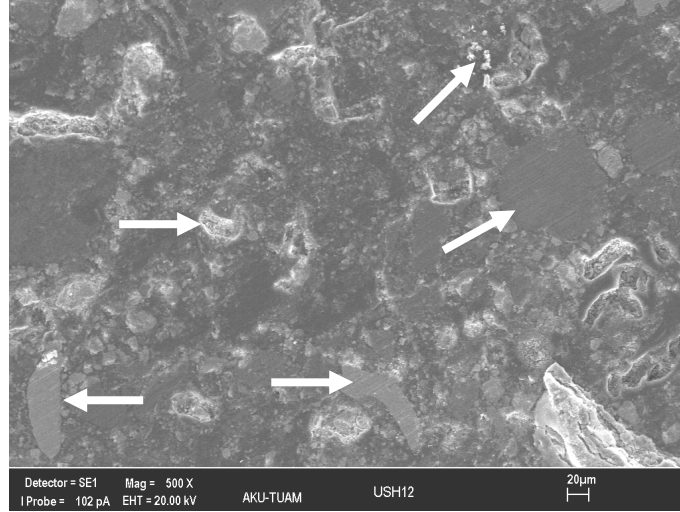
Şekil 8.66'da 4 saat süre ile 180 °C'de fırınlama işlemine tabi tutulmuş numunelerden USH-4 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış US-4'e ait SEM resmine bakıldığında (Şekil 8.61) USH-4 daha homojen dağılım ve kararlı bir yapı sergilemektedir. Bu özellikler sürtünme katsayısını 0,34'den 0,42'ye çıkarmıştır. % 20 barit, % 20 üleksit, % 4 sedir içeren ve 0,42 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro boşluklar ve birbirleriyle tutunma sağladıkları anlaşılan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Küçük beyaz renkli bölgeler metal parçacıklar olarak dikkat çekmektedir.



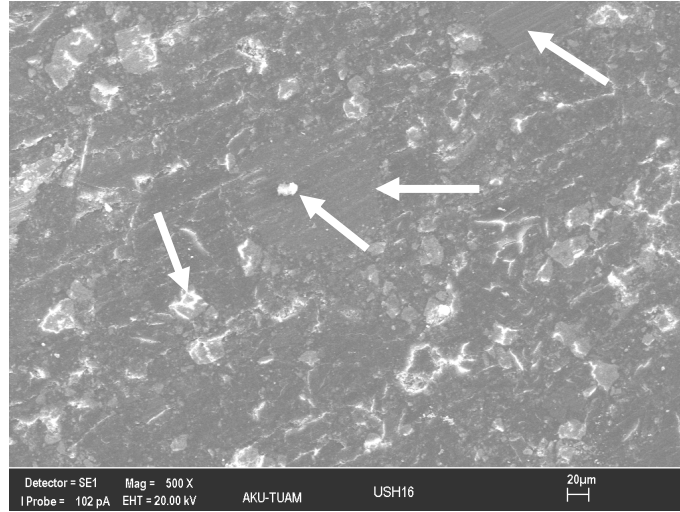
Şekil 8.67 USH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.67 % 16 üleksit ve % 8 sedir içeren USH-8 numunesinin deney sonrası SEM resmidir. Şekilde komponenti oluşturan bileşimin homojen bir şekil de karıştığı ve sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir. Yüzeyden kopan aşınmış parçacıkların deforme olarak tekrar yüzeye yapışması sonucu adhezif aşınma meydana gelmiştir.

USH-12 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerden büyük taneli olan veya küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. USH-12 kodlu numunede % 12 üleksit ve % 12 sedir mevcuttur, sürtünme yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir (Şekil 8.68). Üleksit miktarı azalıp ve sedir miktarı artıkça sürtünme katsayısı yükselmektedir. SEM resimlerinden de görüldüğü gibi sedir miktarının artması ile daha kararlı bir yapı olduğu net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 8.68 USH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

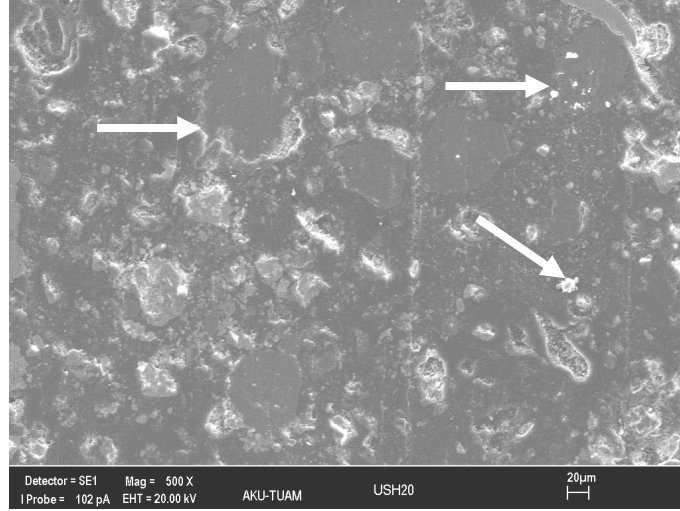


Şekil 8.69 USH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.69 % 16 sedir ve % 8 üleksit içeren USH-16 numunesinin deney sonrası SEM resmidir. Şekilde komponenti oluşturan bileşimin homojen bir şekilde karıştığı ve sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir. Yüzeyden kopan aşınmış parçacıkların deforme olarak tekrar yüzeye yapışması sonucu adhezif aşınma meydana gelmiştir. Ayrıca sürtünme yüzeyinde oluşan kısa çizikler ve renk farklılıkları abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. USH-16'nın mikro yapısı USH-12'ye benzemektedir.

Şekil 8.70 0,51 sürtünme katsayısı ortalamasıyla hem fırınlama işlemi görmemiş numuneler içerisinde hem de fırınlama işlemi görmüş numuneler içerisinde en yüksek sürtünme ortalamasına sahip USH-20 kodlu numunenin SEM resmini göstermektedir. Şekil USH-12 ve USH-16 ile benzerlik göstermektedir. USH-20 den sonra en yüksek sürtünme USH-16 ve USH-

12'den elde edilmiştir. USH-20 numunesinin SEM resmine bakıldığında homojen bir dağılım görülmektedir. Yine diğer numunelerde görülen sürtünmeye bağlı mikro boşluklar vardır. Ayrıca abrazyon aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler dikkat çekmektedir.



Şekil 8.70 USH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

8.2.1.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Muhtelif Sıvılara Dayanım Testleri

Üleksit ve cashew kodlu numunelerle aynı içeriği sahip cashew'e alternatif olarak sedir çam kozalak tozu kullanılarak fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin yapılan deneysel çalışmalarında tespit edilen sertlik, yoğunluk, aşınma değerleri Tablo 8.13 ve Tablo 8.14,'de ve muhtelif sıvılara olan dayanım test sonuçları ise Tablo 8.15'de verilmiştir. Tablolar incelendiğinde US kodlu numunelerin sürtünme katsayısı ortalaması 0,40 aşınma miktarı ortalamaları 0,41 iken fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra bu numunelerin sürtünme katsayısı ortalama değeri 0,46 aşınma miktarı 0,38 olmuştur. Sürtünme katsayısı arttıkça aşınma miktarı da artış göstermiştir. Fırınlama işlemine tabi tutulan numuneler hem stabil bir sürtünme katsayısı sergileyerek sürtünme ortalaması yüksek çıkmıştır hem de aşınma oranı fırınlanmamış numunelerden düşük çıkmıştır. Balatalarda, sertliği yüksek olan balatanın aşınma direnci de yüksek olmalı sonucuna gidilemez. Komponenti oluşturan malzemeler sert yapıya sahip olabilir, bunun sonucu sertlik değeri yüksek çıkabilir. Ancak komponenti oluşturan malzemeleri tutan reçinenin bağlayıcılığı ve genel olarak içerik oryantasyonu uygun değilse, komponenti oluşturan parçacıkların sürtünme sırasında küçük zorlamalarda ana yapıdan çabucak ayrılması aşınma oranını beklenenden yüksek çıkarabilir. Genelde fırınlama işleminin balatanın mikro yapısında etkili olduğu buna bağlı olarak sertliğin arttığı ve daha kararlı bir yapı sergilediği görülmektedir. Bazı numunelerin daha sert olduğu halde daha fazla aşınmaları, bu şekilde açıklanabilir.

Tablo 8.13 US kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgöl Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
US-4	0,37	2,334	34,3	0,348	0,0234949
US-8	0,39	2,231	31,8	0,351	0,0139241
US-12	0,39	2,211	31,8	0,424	0,0238913
US-16	0,42	2,209	31,1	0,459	0,0238874
US-20	0,45	2,187	28,4	0,483	0,0387016

Tablo 8.14 USH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgöl Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
USH-4	0,35	2,203	37,7	0,422	0,0302716
USH-8	0,37	2,168	36,5	0,438	0,0187935
USH-12	0,38	2,131	35,4	0,462	0,0135075
USH-16	0,40	2,127	33,9	0,480	0,0153268
USH-20	0,42	2,065	30,2	0,515	0,0396497

Sürtünme tozu (ayarlayıcı) olarak kullanılan Cashew'e alternatif sedir ile birlikte üleksit kullanılan numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testlerini göstermektedir. Fırınlanmamış US kodlu numunelerde saf su dayanım testinde ortalama % 2,5'lik bir kütleli artış gözlenirken en yüksek dayanıksızlık US-4 kodlu numunede görülmüştür. Aynı içerikli sedir yerine cashew kullanılan numunelerin saf su dayanım testinde ortalama % 2,64 bir kütleli artış gözlenmişti. Saf su dayanım testlerinde sedir kullanılan balataların cashew'e göre daha dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır. US kodlu numunelerin tuzlu su % 2,54, fren sıvısı % 2,36 ve hidrolik yağ % 2,67 kütleli artış ortalamaları göstermiştir. Cashew ile yapılan testlerde tuzlu su % 2,68, fren sıvısı % 2,78 ve hidrolik yağ % 5,55 kütleli artış ortalamaları göstermişti. Sedir ve cashew içerikli numunelerin kütleli artış ortalamalarına bakıldığında sedir kullanılan numunelerin dayanım test sonuçlarının cashew kullanılan numunelere göre daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca sedir ve cashew kullanılan numunelerin hidrolik yağ içerisinde 2 gün bekletildikten sonra alınan deney sonuçlarının aynı olduğu görülmektedir. Boyut farklılıkları olarak 0,44 ortalama ile en yüksek saf su testlerinde olmuştur. Dayanım test Tablosunda fırınlama işlemi sonrası deneylere tabi tutulan numunelerin dayanım testlerinin sonuçlarına bakıldığında aynı içerikli fırınlanmamış numunelere göre daha az kütleli değişim gösterdiği Tablo 8.15'ten görülmektedir. Fırınlanmamış numunelerin (US)

dayanım testlerinde en yüksek ortalama % kütleli artış hidrolik yağda % 2,67 iken aynı içeriklere sahip numuneler fırınlama işleminden sonra (USH) yapılan dayanım testleri sonucunda % kütleli artış ortalamaları hidrolik yağda % 1,79 olarak tespit edilmiştir. USH kodlu numuneler de tuzlu su % 1,27, fren sıvısı % 1,30 ve saf suda % 1,44 kütleli artış ortalamaları göstermiştir. Tüm numunelerin dayanım testleri TS 9075 standartlarına uygun çıkmıştır.

Tablo 8.15 Üleksit ve sedir katkılı fırınlanmamış (US) ve fırınlanmış (USH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

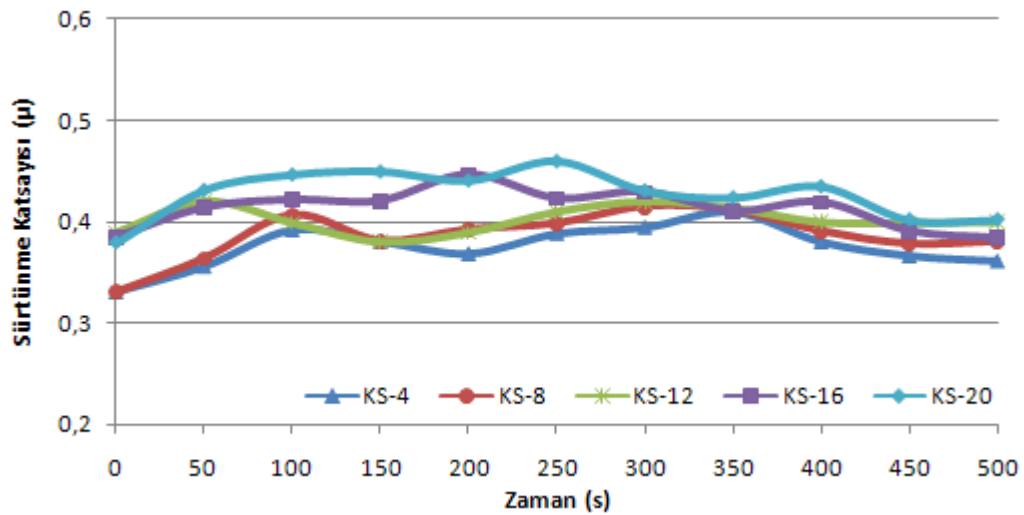
Numune Adı	Saf Su		Tuzlu su		Yağ		Fren Sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
US-4	2,85	0,53	3,91	0,53	3,66	0,46	2,90	0,38
US-8	2,77	0,50	2,82	0,47	3,30	0,41	2,89	0,36
US-12	2,62	0,43	2,79	0,45	2,42	0,31	2,81	0,33
US-16	2,43	0,40	1,71	0,37	2,20	0,27	1,68	0,26
US-20	1,84	0,37	1,50	0,35	1,77	0,25	1,56	0,21
USH-4	2,01	0,30	1,61	0,26	2,35	0,33	1,46	0,27
USH-8	1,45	0,27	1,35	0,23	2,20	0,29	1,35	0,20
USH-12	1,33	0,23	1,34	0,21	1,69	0,27	1,31	0,17
USH-16	1,28	0,20	1,03	0,17	1,48	0,23	1,22	0,15
USH-20	1,15	0,17	1,02	0,15	1,23	0,20	1,20	0,13

8.2.2. Kolemanit ve Sedir Katkılı Fren Balataları

8.2.2.1. Sürtünme Performansı

Sedir ve kolemanit katkılı numunelerin sürtünme katsayısı ve sıcaklık ile ilgili deneysel sonuçları Şekil 8.71 Şekil 8.72, Şekil 8.73 ve Şekil 8.74’de görülmektedir. Bu grafiklere genel olarak bakıldığında, % 20 kolemanit ve %4 sedir içeren KS-4 kodlu numune ile % 16 kolemanit ve % 8 sedir içeren KS-8 kodlu numune birbirine yakın sürtünme eğrisi oluşturmuştur. KS-12 kodlu numunen ilk 50 saniyede yüksek sürtünme ortalaması sergilemesine rağmen daha sonra sürtünme katsayısında sıcaklık artışıyla birlikte düşüş gözlenmiştir. KS-16 ve KS-20 kodlu numuneler aynı sürtünme dalgalanmaları göstermesine karşın KS-20 kodlu numune daha yüksek sürtünme katsayısı ortalaması vermiştir (Şekil 8.71-Şekil 8.72). Literatürde [180], kompozit malzeme içerisindeki sert partiküllerin kayma boyunca, sert tepeliklerin birbiri ile etkileşiminden dolayı daha geniş plastik deformasyona ve takviye-matriks arasındaki adhezyonu azaltmalarına rağmen daha yüksek sürtünme katsayılarına sebep oldukları belirtilmektedir. Aynı içeriklere sahip numunelerin fırınlama işleminden sonra yapılan deneylerinde Şekil 8.71’de görülen dalgalanmalar meydana gelmemiştir. Bunun yanında sürtünme katsayısında bir artış gözlenmiştir. Fırınlama işlemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayı ortalamaları

birbirine yakın çıkmıştır (Şekil 8.73). En yüksek sürtünme ortalaması 0,45 ile KSH-16 ve KSH-20 numunelerinden alınmıştır. Deney aşamasının 100. saniyesinden sonra numuneler stabil bir sürtünme ortalaması göstermiştir (Şekil 8.73). Aynı içeriklere sahip cashew ile yapılan çalışmalarda fırınlanmamış numunelerin (KC) sürtünme katsayısı ortalaması 0,43 iken KS ile yapılan çalışmada bu değer 0,40 olarak belirlenmiştir. Cashew ve kolemanit katkılı numunelerde yapılan deneylerde cashew miktarı arttıkça sürtünme ortalaması azalmakta, fakat cashew yerine sedir kullanılan numuneler ile yapılan deneylerde (KS) sedir miktarı arttıkça sürtünme katsayısı ortalaması artmaktadır. Cashew ve sedir katkılı numunelerin fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra ki sürtünme katsayısı ortalamaların da ise yüksek sürtünme katsayısı ortalaması elde edilmesine rağmen (0,45) cashew miktarı arttıkça sürtünme ortalaması azalmakta, sedir katkılı numunelerde fırınlanmamış numuneler de olduğu gibi sedir miktarı arttıkça sürtünme katsayısı ortalaması artmaktadır (0,44). Sedir katkılı numuneler fırınlama işleminden sonra cashew katkılı numunelere yakın sürtünme katsayısı ortalaması vermektedir.

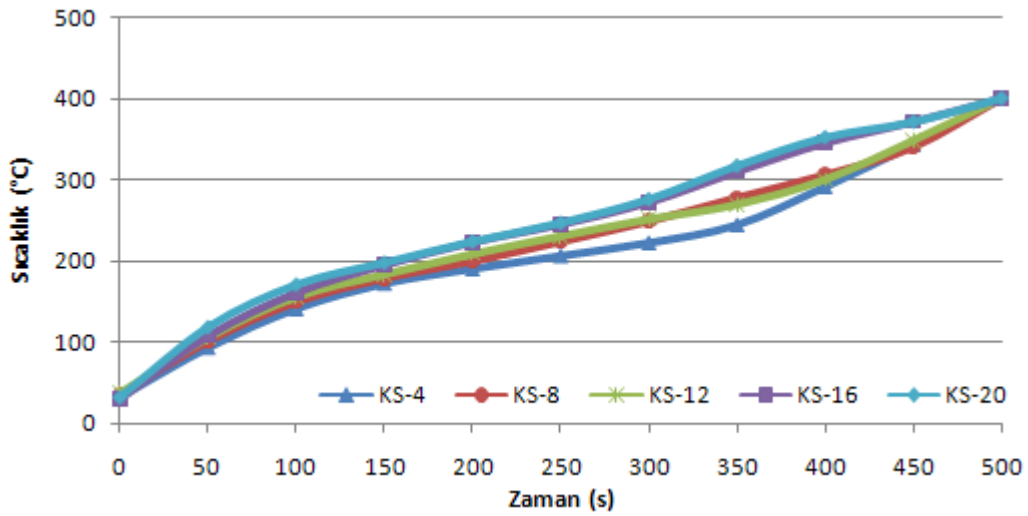


Şekil 8.71 KS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Kolemanit ve sedir katkılı tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi sürecinden sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.71-8.74). KS-12 kodlu numune KS-4, KS-8, KS-16 ve KS-20 kodlu numunelere göre daha az dalgalanma göstermiştir. KS-12 kodlu numune 50. saniyelerden hemen sonra yani sürtünme tabakası oluşumunun tamamlanmasıyla birlikte yavaş yavaş düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 8.71). Bu safhada henüz sıcaklık 100 °C-150 °C arasındadır (Şekil 8.72). Söz konusu sıcaklıklar sürtünme katsayısının düşmesinde etkili olacak kadar yüksek değerde değildir. Sürtünme katsayısındaki bu düşme, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin sürtünme çiftinin karşı yüzeyini oluşturan diske tutunma özelliği gösteremediği, yani ya

komponenti oluşturan malzemelerin birbirleri ile iyi uyum sağlamadığından dolayı sürtünme yüzeyine karşı bir direnç oluşturamadığı ya da oluşan sürtünme yüzeyi sert malzemelerden oluşmadığı için sürtünme katsayısında beklenen artış veya stabil kalamadığı şeklinde açıklanabilir.

Sürtünme katsayısı değişiminde KS-4, KS-8, KS-16 ve KS-20 kodlu numunelerde dalgalanma daha belirgin şekilde mevcuttur (Şekil 8.71). Kolemanit ve sedir katkılı üretilen diğer numunelerden KS-4, KS-8 ve KS-16 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.29) ilk 100 saniyelik sürede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda yukarıda bahsedildiği gibi benzer karakteristik göstermiştir. KS-4 kodlu numunelerde 100. saniyeden sonra 200. saniyeye kadar kısmi bir düşüş ve sonrasında tekrar toparlanma mevcuttur. Bu toparlanma dalgalı bir şekilde kendini göstermiştir. Bu aşamada sıcaklık 200 °C civarındadır (Şekil 8.72). KS-8 kodlu numune 100. saniyeden sonra 150. saniyeye kadar kısmi bir düşüş ve sonrasında tekrar 300.saniyeye kadar bir toparlanma mevcuttur. Bu toparlanma dalgalı bir şekilde kendini göstermiştir. Bu aşamada sıcaklık 250 °C civarındadır (Şekil 8.72).



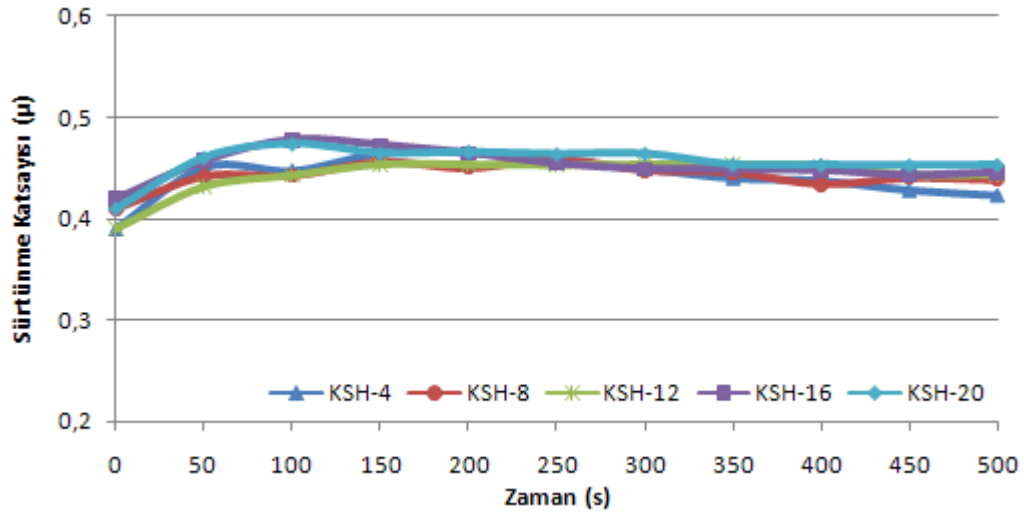
Şekil 8.72 KS kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

Kolemanit ve sedir katkılı balatalardan KS-20 kodlu numunenin sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde sürtünme tabakası oluştuktan sonra 450. saniyeye kadar inişli çıkışlı bir sürtünme katsayısı artışı göstermiştir. Testin bu aşamasında sürtünme yüzey sıcaklığı 370 °C'ye yükselmiştir. Bu noktadan sonra testin son 50 saniyesinde sürtünme yüzey sıcaklığı 400 °C'ye çıkarken sürtünme katsayısı da stabil bir hal almıştır (Şekil 8.71-Şekil 8.72).

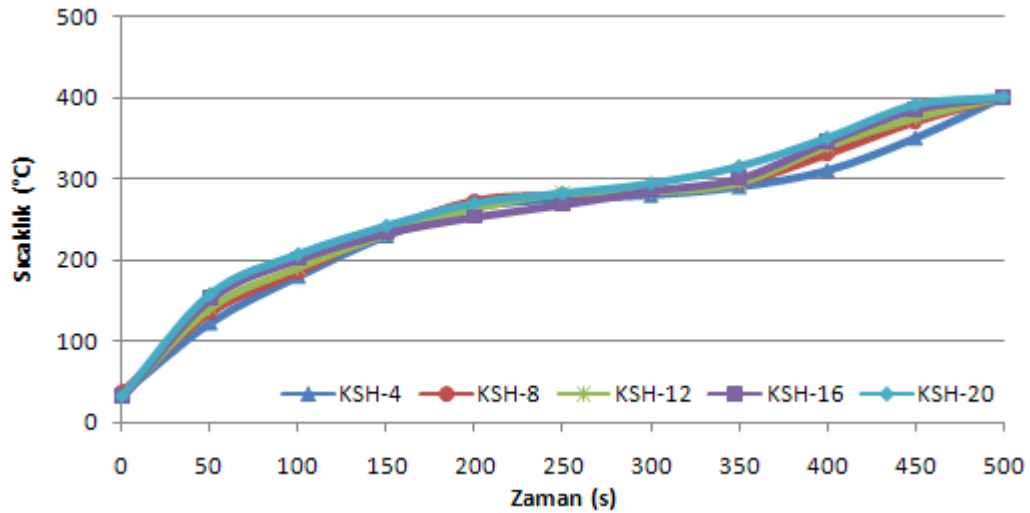
Kolemanit ve sedir katkılı fırınlanmış numunelerden KSH-4, KSH-8, KSH-12, KSH-16 ve KSH-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.73-8.74) ilk 50 saniyelik sürede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda yukarıda bahsedildiği gibi benzer

karakteristik göstermiştir. KSH-4 ve KSH-8 kodlu numunelerde 50. saniyeden sonra 150. saniyeye kadar kısmi bir düşüş ve sonrasında tekrar toparlanma mevcuttur.

KSH-8 kodlu numunenin sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde sürtünme tabakası oluştuktan sonra 300. saniyeye kadar inişli çıkışlı bir artış ve sonrasında bir azalış göstermiştir. Testin bu aşamasında sürtünme yüzey sıcaklığı yaklaşık 300 °C'ye yükselmiştir. Bu noktadan sonra testin son 200 saniyesinde sürtünme yüzey sıcaklığı 400 °C'ye çıkarken sürtünme katsayısı da stabil bir şekilde devam etmiştir (Şekil 8.73-Şekil 8.74).



Şekil 8.73 KSH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı-zaman değişimi



Şekil 8.74 KSH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

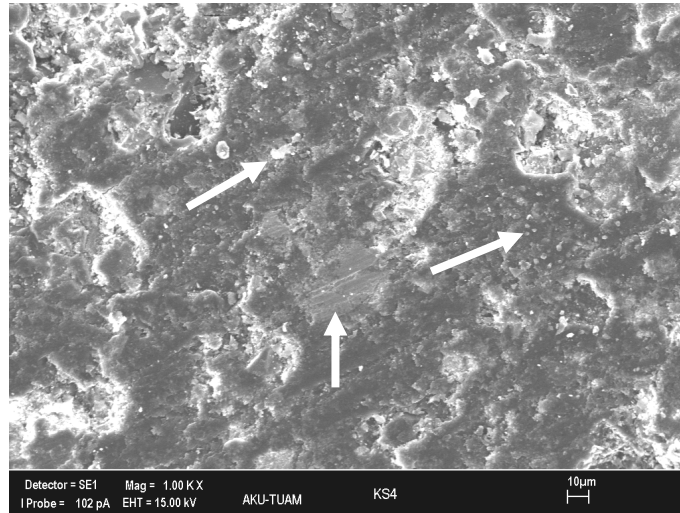
KSH-12 kodlu numune 250. saniyeye kadar sürtünme katsayısında yükselme meydana gelirken 250. saniyeden sonra sürtünme katsayısında sıcaklığın artışıyla birlikte bir düşme

olmuştur (Şekil 8.73 ve Şekil 8.74) KSH-12 kodlu numune sıcaklık artışıyla birlikte 250. saniyeden sonra kararlı bir sürtünme sergilemiştir.

KSH-16 ve KSH-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.73) ilk 100 saniyelik sürede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda benzer karakteristik göstermiştir ve 500. saniyeye kadar stabil bir sürtünme sergilemişlerdir. KSH-16 ve KSH-20 kodlu numunelerin sıcaklık grafiği incelendiğinde sürtünme katsayısı benzerliği sıcaklık grafiğinde de görülmektedir (Şekil 8.74).

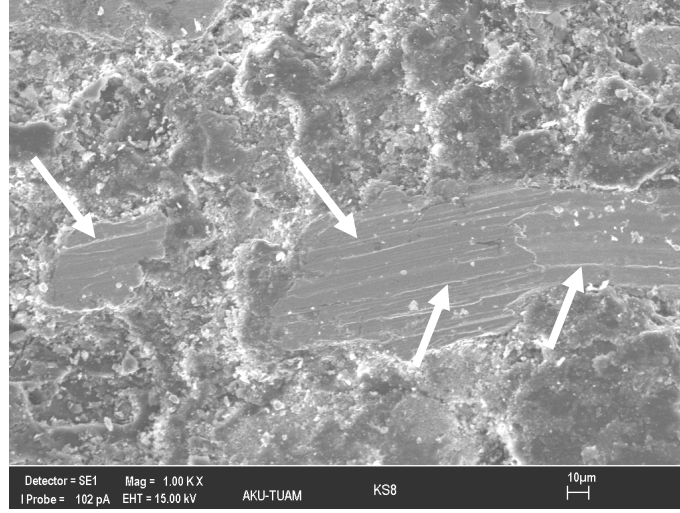
En yüksek sürtünme oranı sergileyen KSH-16 kodlu numune 100. saniyeye kadar yüksek sürtünme ortalaması sergilemiştir, sıcaklık 280 °C civarındadır. 100. saniyeden 350. saniyeye kadar sürtünme tabakasında düşüş meydana gelmiştir. 400. saniyede sıcaklık 350 °C olarak görülmektedir (Şekil 8.74). 400. saniyeden sonra sıcaklığın yavaş yavaş artması sürtünme katsayısının 500. saniyeye kadar stabil bir şekilde sürmesini sağlamıştır.

8.2.2.2. Mikro Yapı Karakteristiği



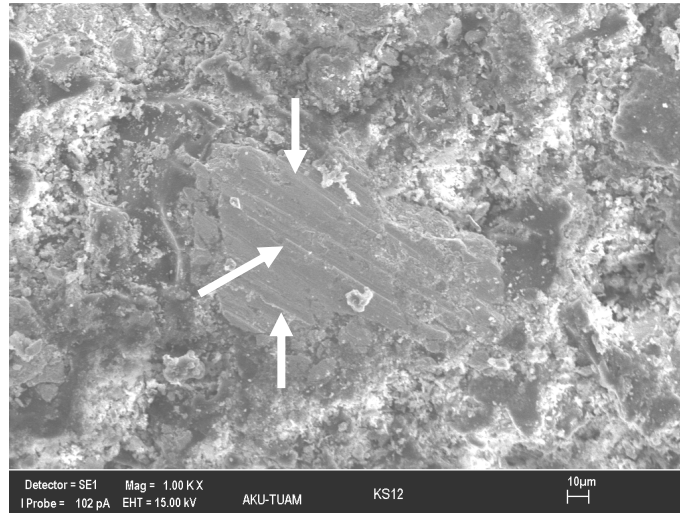
Şekil 8.75 KS-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

KS-4 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı görülmektedir (Şekil 8.75). Küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen metal parçacıkların bir kısmı aşınmadan dolayı beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir. Bu topaklanmalar barit topaklanması olabilir çünkü KS-4 kodlu numune % 20 barit, % 4 sedir ve % 20 kolemanit içermektedir. Sürtünme yüzeylerinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu bölgelerin üzerine sıvayan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.76 KS-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

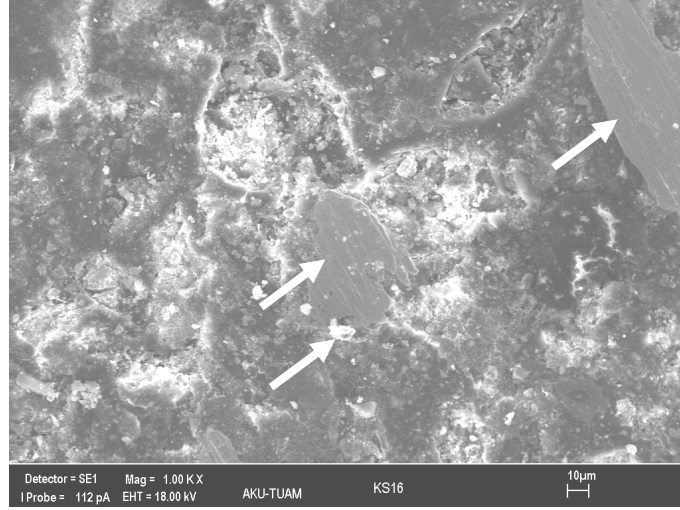
Şekil 8.76’da görülen KS-8 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. % 8 sedir, % 16 kolemanit içeren ve 0,39 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde çok belirgin adhezif ve abrazif aşınmanın gerçekleştiği ve buna bağlı olarak mikro ve makro boşlukların olduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan uzun çizikler, sürtünme yüzeyindeki malzemelerin karşı yüzey ile tutunmaya çalıştığı fakat yeterli bir direnç oluşturacak komponent bütünlüğünün mevcut olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sürtünme karakteristiği olarak hızlı bir yükselme ve düşme ile dalgalı sürtünme katsayısı özelliği göstermiştir.



Şekil 8.77 KS-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

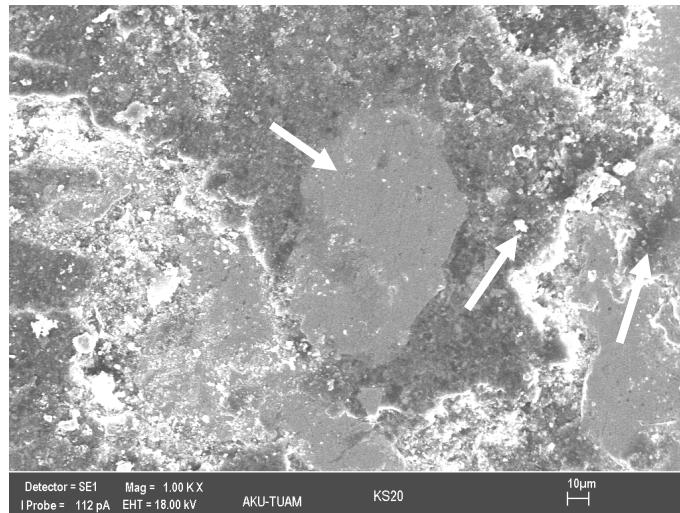
Şekil 8.77’de KS-12 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Üleksit katkılı diğer numunelerin sürtünme yüzey karakteristiğine benzer özellikler göstermektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerin abrazif aşınmadan kaynaklandığı ve balata bünyesinden kopan

bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeyindeki malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve homojen dağıldığı anlaşılmaktadır. 0,39 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen numune %12 kolemanit ve %12 sedir içermektedir.



Şekil 8.78 KS-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

KS-16 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.78). Resimde mikro ve makro boşluklarla birlikte sürtünmeye aktif olarak katılan bölgeler görülmektedir. Bu bölgelerde sürtünmeden dolayı oluşan çizikler abrazif aşınma olduğunu, koyu ve açık gri renkli olan bölgeler ise adhezif aşınmanın mevcut olduğunu göstermektedir. Aşınmış metal parçacıklar beyaz renkli bölgeler olarak dikkat çekmektedir. Beyaz renkli bölgelerin yanında küçük boşluklar mevcuttur. Bu boşluklar aşınma sonucunda sert malzemelerin kopması ile oluşmuştur.



Şekil 8.79 KS-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

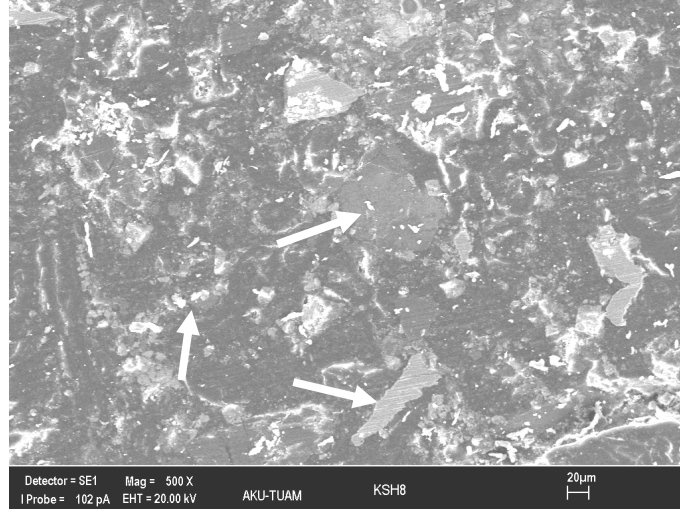
% 4 kolemanit ve % 20 sedir içeren KS-20 kodlu numunenin sem resminde makro boşluklar ve bu makro boşlukların yakın çevresinde de mikro boşluklar dikkat çekmektedir (Şekil 8.79). Bu numunenin sürtünme performansı grafiğinden de anlaşıldığı gibi sürtünme tabakası oluşum sürecinde sürtünme katsayısında 150. saniyeye kadar hızlı bir yükselme ve sonra bir düşüş görülmektedir. SEM resmi ile bağlantılı düşünülürse bu hızlı yükselme sırasında komponenti oluşturan malzemelerden büyük ve sert parçacıkların sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve sonrasında aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan zorlanmaların etkisiyle balata bünyesinden kopması sonucu makro boşlukların oluştuğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.80 KSH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

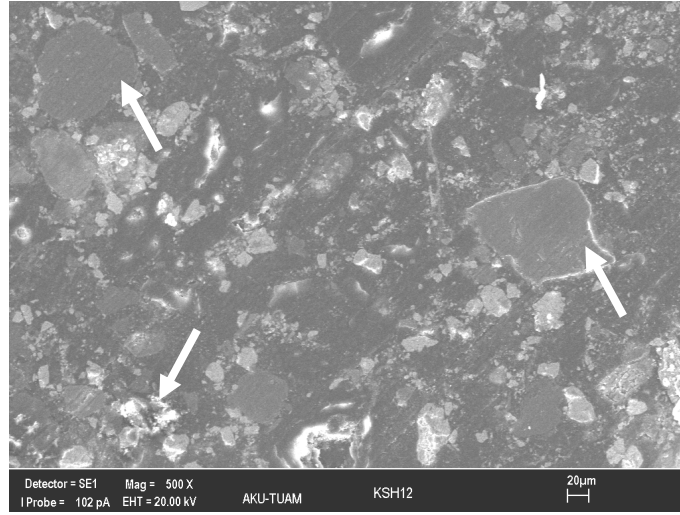
Şekil 8.80’de 4 saat süre ile 180 °C’de fırınlama işlemine tabi tutulmuş KSH-4 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış KS-4 kodlu numunenin SEM resmi ile kıyaslandığında KSH-4 daha homojen ve daha kararlı bir yapı sergilemektedir. Bu durum sürtünme katsayısını 0,38’den 0, 44’e çıkarmıştır. % 20 kolemanit ve % 4 sedir içeren ve 0,44 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro boşluklar ve birbirleriyle tutunma sağladıkları anlaşılan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Küçük beyaz renkli bölgeler metal parçacıklar olarak dikkat çekmektedir.

Söz konusu resimlerde genel olarak, sürtünme yüzeylerinde abrazif aşınmalar sonucu oluşan çizikler ve adhezif aşınmalar sonucu oluşan üzeri kaplanmış sürtünme tabakaları ile termo-mekanik gerilmelere bağlı olarak mikro çatlakların olduğu görülmektedir.



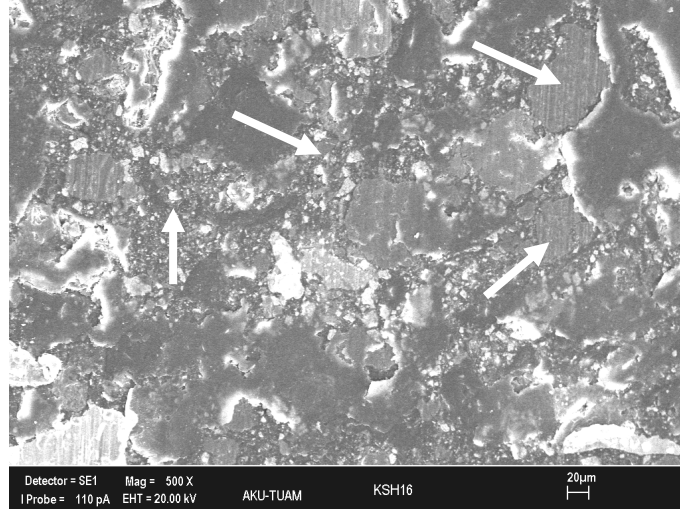
Şekil 8.81 KSH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

KSH-8 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. Oluşan sürtünme yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak dikkat çekmektedir (Şekil 8.81).



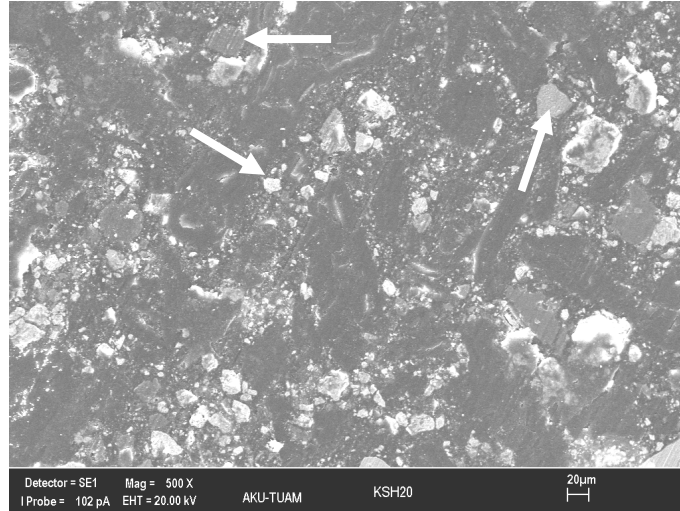
Şekil 8.82 KSH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.82 KSH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi görüntüsünde, baskın aşınma mekanizmasının karışık adhezif ve abrazif aşınma şeklinde olduğu görülmektedir. Adhezyon ile yüzeyden kopan aşınma ürünlerinin deforme olarak tekrar yüzeye yapışması sonucu adhezif aşınma meydana gelmiştir.



Şekil 8.83 KSH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

% 8 kolemanit ve % 16 sedir içeren 0,45 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen KSH-16 kodlu numune, KSH-20 kodlu numune ile aynı sürtünme katsayısı ortalaması sergilemiştir. Şekil 8.83'den anlaşıldığı gibi adhezif ve abrazif aşınmaya maruz kalmış sürtünme yüzeyleri mevcuttur. Genel olarak komponenti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Yine diğer numunelerde görülen sürtünmeye bağlı mikro boşluklar vardır. Fakat abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği küçük beyaz renkli bölgeler dikkat çekmektedir.



Şekil 8.84 KSH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

KSH-20 kodlu numunenin SEM resminde sıkı bir yüzey yapısı ile birlikte komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.84). Sürtünmenin etkisiyle parçacıkların bün-yeden kopması sonucu oluşan mikro ve makro boşluklar görülmektedir. KSH-20 kodlu numunede % 4 kolemanit, % 20 sedir mevcuttur ve 0,45 sürtünme katsayısı ortalaması

göstermiştir. SEM resminden anlaşıldığı kadarıyla yer yer abrazif aşınma görülmekte ve kısmen adhezif aşınma belirtileri mevcuttur. Dolayısıyla sergilediği sürtünme performansı sürtünme yüzey karakteristiğini de etkilemiştir.

8.2.2.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri

Tablo 8.16 ve Tablo 8.17’te kolemanit ve sedir katkılı fırınlanmamış (KS) ve fırınlanmış (KSH) numunelerin özgül aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı ve standart sapma değerleri görülmektedir. Yoğunluk değerlerinde, içerikte kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranları etkilidir. Özgül aşınmada komponenti oluşturan malzemelerin birbirleriyle uyumları ve sergiledikleri sürtünme katsayısı etkili olmaktadır. Bu yüzden en yüksek ortalama sürtünme katsayısını gösteren KS-20 ($\mu=0,42$) ve KSH-20 ($\mu=0,45$) kodlu numunelerin özgül aşınma değeri de diğerlerine göre yüksek çıkmıştır. Sürtünme sırasında zorlanmanın etkisiyle balata bünyesindeki büyük parçacıkların kopmalarının özgül aşınma değerinin yüksek çıkmasında önemli etkisi vardır.

Numunelerin sertlik değerlerinde sedir ve kolemanit oranlarına bağlı olarak değişimler görülmüştür. KS-4 kodlu numune % 4 sedir ve % 20 kolemanit içermektedir sertlik değeri 33,3 HB ile birinci sırada iken, % 16’lık bir oranla kolemanit ve % 8 sedir içeren KS-8 kodlu numunesi de 31,9 HB değeri ile sertlikte ikinci sıradadır. % 4 kolemanit ve % 20 sedir içeren KS-20 kodlu numune 25,9 HB ile en düşük sertlik değeri sergilemiştir. Diğer numuneler sürtünme karakteristiği grafiklerinde görüldüğü gibi sürtünme katsayısındaki salınıma bağlı olarak standart sapma değerleri göstermişlerdir.

Tablo 8.16 KS kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgöl Aşınma (gr/mm^2) $\times 10^{-6}$	Yoğunluk (gr/cm^3)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
KS-4	0,33	2,181	33,3	0,388	0,0295999
KS-8	0,35	2,148	31,9	0,391	0,0269927
KS-12	0,37	2,134	29,6	0,396	0,0144958
KS-16	0,40	2,122	27,5	0,405	0,0278918
KS-20	0,41	2,111	25,9	0,425	0,030599

Tablo 8.16’ da en yüksek sertlik değeri gösteren KS-4 kodlu numune $0,33 \times 10^{-6} \text{ gr/mm}^2$ ile en düşük aşınma oranına sahiptir. Daha sonra sırasıyla KS-8 $0,35 \times 10^{-6} \text{ gr/mm}^2$, KS-12 $0,37 \times 10^{-6} \text{ gr/mm}^2$, KS-16 $0,40 \times 10^{-6} \text{ gr/mm}^2$ ve KS-20 $0,41 \times 10^{-6} \text{ gr/mm}^2$ oranlarında aşınma

değerleri göstermişlerdir. Sedir oranının artması kolemanit oranının azalması aşınma oranını arttırmıştır.

Tablo 8.17 KSH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
KSH-4	0,30	2,150	35,4	0,441	0,0217211
KSH-8	0,31	2,113	34,3	0,442	0,0132103
KSH-12	0,33	2,083	30,4	0,443	0,0190791
KSH-16	0,35	2,070	28,7	0,453	0,0157938
KSH-20	0,38	2,018	28,3	0,455	0,0165703

Aynı içerikli numunelerin 180 °C, 4 saat süre ile fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra sertlik ve sürtünme katsayısında yükselme kaydedilmiştir. Fırınlama işleminden önce 0,38 sürtünme katsayısı ve 33,3 sertlik değeri olan KS-4 numunesi fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra (KSH-4) 0,44 sürtünme katsayısı ve 35,4 sertlik değerine çıkmıştır. Fırınlanan numunelerin içyapısı daha homojen bir yapı oluşturmuş ve sürtünmeyi önemli ölçüde etkilemiştir. İki farklı yöntemle üretilen numunelerin deneyleri sonucunda kolemanit miktarının azalması sedir miktarının artması sürtünme katsayısında olumsuz bir etki meydana getirdiği Tablolardan anlaşılmaktadır.

Aynı şekilde, Tablo 8.16'da KSH-4 kodlu numunede deney boyunca meydana gelen özgül aşınma miktarı $0,30 \times 10^{-6}$ gr/mm² iken, KSH-8 numunesinde bu değer $0,31 \times 10^{-6}$ gr/mm², KSH-12 numunesinde $0,33 \times 10^{-6}$ gr/mm², KSH-16 numunesinde $0,35 \times 10^{-6}$ gr/mm², KSH-20 numunesinde $0,38 \times 10^{-6}$ gr/mm²'lik aşınma meydana gelmiştir. Kolemanit miktarının azalıp, sedir miktarının artışıyla aşınma miktarında artma meydana gelmiştir.

Tablo 8.18 Kolemanit ve sedir katkılı numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testlerini göstermektedir. Kolemanit katkılı numunelerin dayanım test sonuçlarını gösteren Tablo 8.18 incelendiğinde fırınlanmış numunelerin fırınlanmamış numunelere göre daha dayanıklı çıktığı görülmektedir. KS kodlu numunelerde en yüksek kütleli artış % 3,19 ortalama ile fren sıvısında meydana gelmiştir. Sonra sırasıyla % 2,84 ile saf su, % 2,77 ile tuzlu su ve hidrolik yağda meydana gelmiştir. Aynı içerikli fırınlanmış numunelerde en yüksek kütleli artış % 2,06 ile saf suda ve sırasıyla % 2,05 fren sıvısı, % 1,96 tuzlu su ve % 1,71 ile hidrolik yağda meydana gelmiştir. Fırınlanmış numuneler fırınlanmamış numunelere göre daha dayanıklı çıkmıştır.

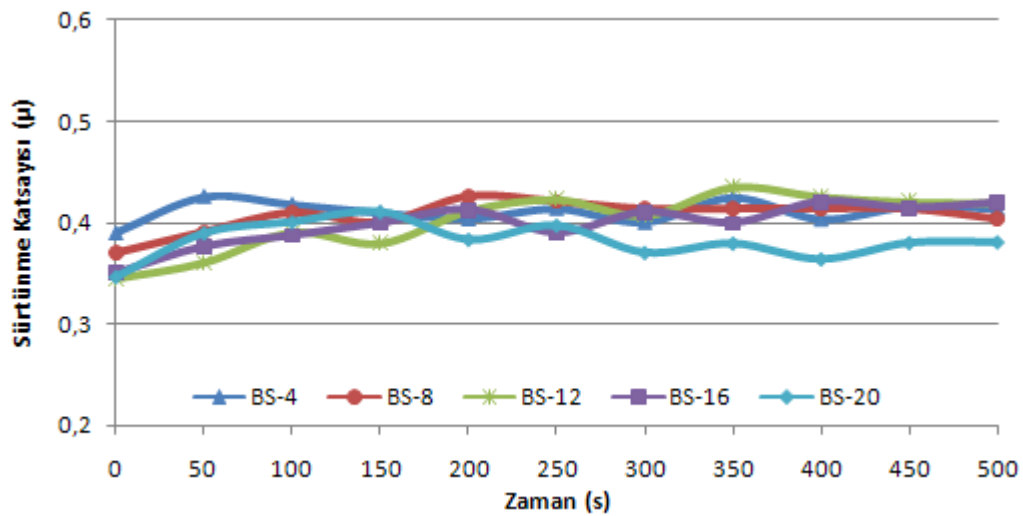
Tablo 8.18 Kolemanit ve sedir katkılı fırınlanmamış (BC) ve fırınlanmış (BCH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

Numune Adı	Saf Su		Tuzlu su		Yağ		Fren Sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
KS-4	2,40	0,33	2,08	0,28	2,20	0,33	2,90	0,33
KS-8	2,46	0,37	2,29	0,30	2,78	0,30	2,99	0,38
KS-12	2,76	0,47	3,05	0,40	2,81	0,40	3,10	0,43
KS-16	3,10	0,53	3,10	0,45	2,89	0,43	3,11	0,53
KS-20	3,52	0,60	3,33	0,47	3,21	0,50	3,87	0,67
KSH-4	1,66	0,18	1,77	0,20	1,41	0,21	1,91	0,17
KSH-8	2,01	0,23	1,90	0,27	1,41	0,23	1,95	0,18
KSH-12	2,10	0,28	1,94	0,31	1,45	0,27	1,99	0,21
KSH-16	2,18	0,30	1,97	0,32	1,92	0,30	2,17	0,25
KSH-20	2,35	0,33	2,23	0,37	2,39	0,34	2,23	0,29

8.2.3. Borik asit ve Sedir Katkılı Fren Balataları

8.2.3.1. Sürtünme Performansı

Borik asit ve sedir katkılı fırınlama işlemine tabi tutulmuş (BSH) ve fırınlama işlemine tutulmamış (BS) numunelerin sürtünme performansları Şekil 8.85, Şekil 8.86, Şekil 8.87 ve Şekil 8.88’de görülmektedir. Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerin grafiklerine genel olarak bakıldığında (Şekil 8.85-Şekil 8.86), BS-4, BS-8, BS-12, BS-16 ve BS-20 kodlu numuneler stabil bir sürtünme değeri sergilememiştir ve fırınlanmış numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahiptirler.

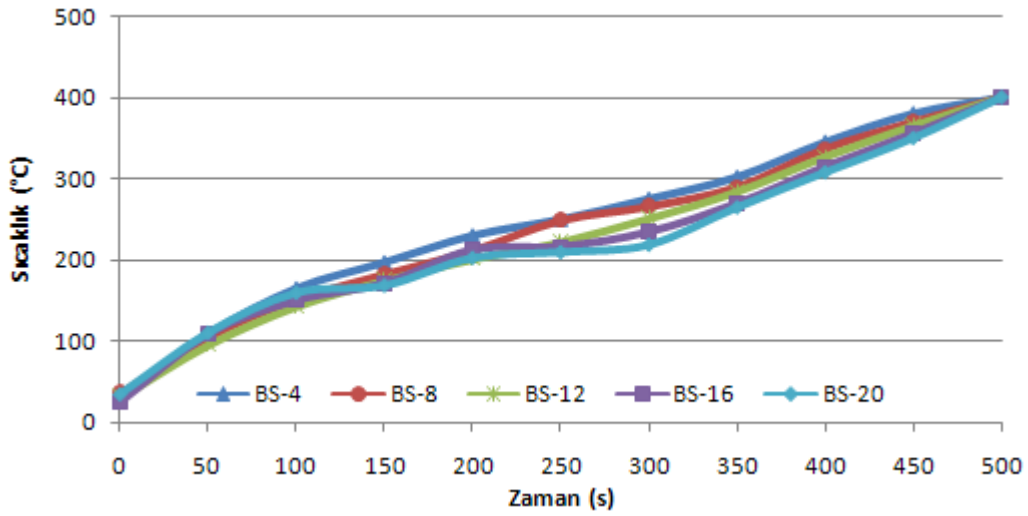


Şekil 8.85 BS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

En yüksek sürtünme katsayısı BS-4 ($\mu=0,41$) kodlu numunede meydana gelmiştir. Fakat stabil bir sürtünme elde edilememiştir. En düşük sürtünme katsayısı BS-20 ($\mu=0,38$) kodlu numunede olmuştur. BS-8, BS-12, BS-16 ve BS-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısındaki dalgalanma birbirleri ile benzerlik göstermektedir. Yalnızca dalgalanmanın şiddeti çok az bir farklılık göstermiştir. Bu numunelerde dalgalanma sürtünme yüzey sıcaklığı 100 °C’de başlamış ve 400 °C’de son bulmuştur. Şekil 8.85’de fırınlanmamış numunelerin sürtünme katsayısı grafiğinde borik asit miktarının azalması ile birlikte sürtünme katsayısında % 7 bir azalma meydana gelmiştir.

Borik asit ve sedir katkılı tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi sürecinden sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.85-8.88). BS-8, kodlu numune BS-4, BS-12, BS-16 ve BS-20 kodlu numunelere göre daha az dalgalanma göstermiştir. BS-20 kodlu numune 50. saniyeden sonra sürtünme tabakası oluşumunun tamamlanmasıyla birlikte yavaş yavaş düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 8.85). Bu safhada henüz sıcaklık 100 °C-150 °C arasındadır. Sürtünme katsayısındaki bu düşme, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin sürtünme çiftinin karşı yüzeyini oluşturan diske tutunma özelliği gösteremediği, yani ya komponenti oluşturan malzemelerin birbirleri ile iyi uyum sağlamadığından dolayı sürtünme yüzeyine karşı bir direnç oluşturamadığı ya da oluşan sürtünme yüzeyi sert malzemelerden oluşmadığı için sürtünme katsayısında beklenen artış veya stabil kalamadığı şeklinde açıklanabilir. 400. saniyeye kadar düşme eğilimi gösteren BS-20 kodlu numune tekrar yükselme eğilimi göstermiştir. Sıcaklığın 310 °C olduğu 400. saniyeden sonra sürtünme katsayısında yükselme başlamış ve bu yükselme 500. saniyeye kadar stabil bir şekilde devam etmiştir (Şekil 8.85). BS-8 ve BS-12 kodlu numuneler benzer bir sürtünme katsayısı sergilemişlerdir. Her iki numunede 100. saniyeye kadar sürtünme katsayılarında yükselme kaydetmişlerdir. 100. saniyeden 350. saniyeye kadar inişli çıkışlı bir sürtünme sergilemişlerdir. Sıcaklığın 280 °C olduğu 350. saniyeden sonra stabil bir sürtünme sergilemişlerdir. En yüksek sürtünme katsayısı sergileyen BS-4 ($\mu=0,41$) kodlu numunenin 200. saniyedeki sıcaklığı 280 °C iken en düşük sürtünme katsayısına sahip BS-20 kodlu numune bu sıcaklık değerine 300. saniyede ulaşmıştır. BS-12 ve BS-16 kodlu numuneler 450. saniyede aynı sürtünme değerini sergilemişlerdir. Aynı değeri gösterdikleri 450. saniyede her iki numunenin de sıcaklığı 390 °C civarındadır (Şekil 8.86).

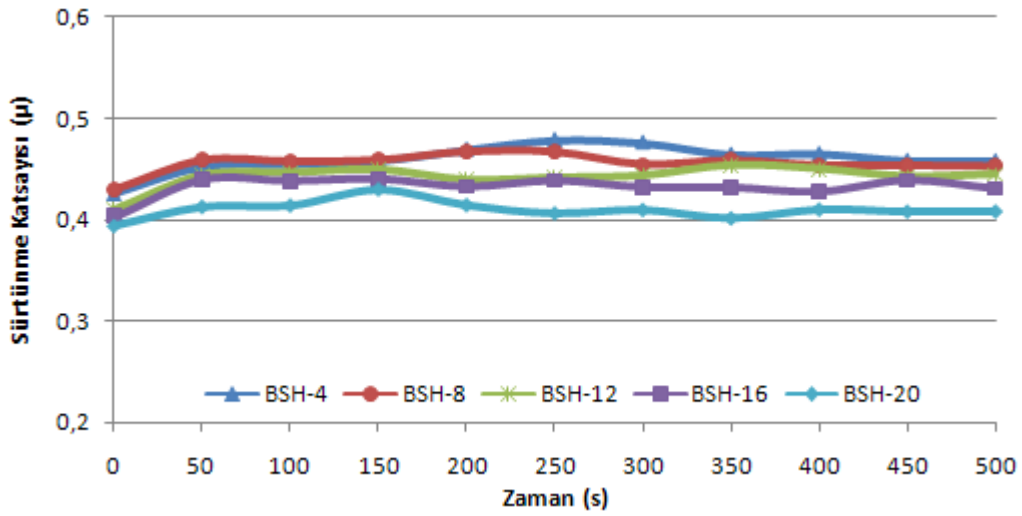
BS-16 kodlu numune 200. saniyeye kadar sürtünme tabakası gelişimi sergilemiştir. 200. saniyeden sonra sürtünme katsayısında sıcaklığın artışıyla birlikte bir düşme olmuştur (Şekil 8.85 ve Şekil 8.86). Bu düşüş 400. saniyeye kadar dalgalı bir şekilde devam etmiştir, sıcaklık 200 °C’den 300 °C’ye kadar yükselmiştir ve 400. saniyeden sonra 500. saniyeye kadar sürtünme katsayısı stabil bir şekilde devam etmiştir (Şekil 8.85-Şekil 8.86).



Şekil 8.86 BS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi

Şekil 8.87 borik asit ve sedir katkılı numunelerden fırınlama işlemine tabi tutulmuş numunelerin (BSH) sürtünme katsayısı grafiğini göstermektedir. Şekil 8.85’de 0,41 ortalama ile en yüksek sürtünme katsayısı değerini veren BS-4 numunesi fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra (BSH-4) stabil bir hal almış ve sürtünme katsayısı 0,46 olarak elde edilmiştir. En düşük sürtünme ortalamasına sahip BS-20 numunesi 0,38 sürtünme değerine sahip iken bu değer fırınlama işleminden sonra yapılan deneyler sonucunda BSH-20 0,41 olarak ölçülmüştür. Her iki grafikte de görülüyor ki borik asit oranının azalması, sedir oranının artması sürtünmeyi olumsuz etkilemektedir. Ayrıca fırınlama işlemine tabi tutulmuş numuneler ile yapılan deneylerin sürtünme katsayıları, fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelere göre daha stabildir. Bu oran cashew kullanılan numunelerde tam tersi bir durum sergilemiş, borik asit miktarının artışıyla sürtünme katsayısı ortalamasında artış gözlenmiştir. Yani borik asit ile birlikte katkı maddesi olarak %4’den daha fazla sedir kullanılması sürtünme katsayısını olumsuz etkilerken, katkı maddesi olarak cashew kullanımında cashew oranı arttıkça sürtünme katsayısı ortalaması artmaktadır.

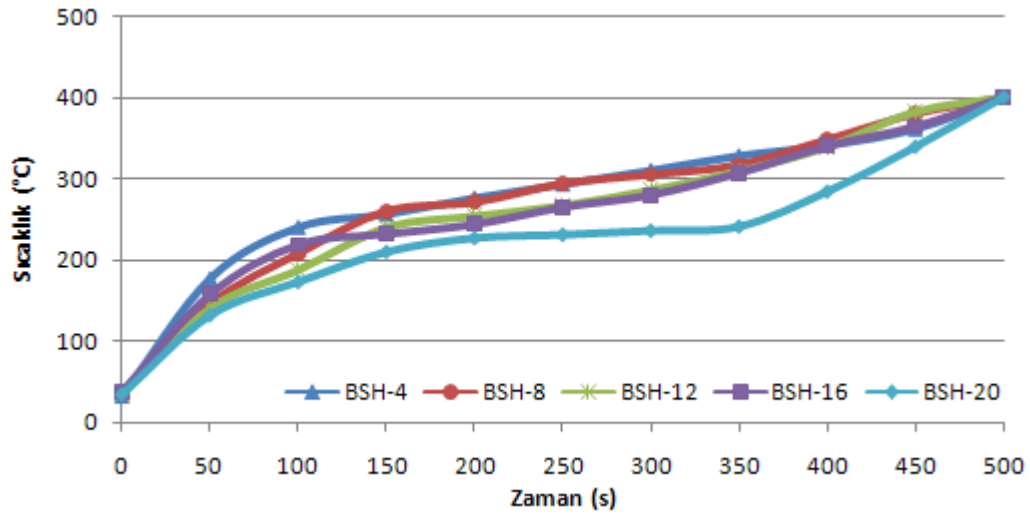
Borik asit ve sedir katkılı fırınlanmış numunelerden BSH-4, BSH-8, BSH-12, BSH-16 ve BSH-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.87-Şekil 8.88) ilk 50 saniyelik sürede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda yukarıda bahsedildiği gibi benzer karakteristik özellik göstermiştir. BSH-4 ve BSH-8 kodlu numunelerde 50. saniyeden sonra 150. saniyeye kadar kısmi bir düşüş ve sonrasında tekrar toparlanma mevcuttur. Bu toparlanma sıcaklığın 300 °C olduğu 300. saniyeye kadar devam etmiş ve sıcaklığın 320 °C olduğu 350. saniyeden sonra stabil bir hal alarak sıcaklığın 400 °C’e olduğu 500. saniyeye kadar devam etmiştir.



Şekil 8.87 BSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Borik asit ve sedir katkılı fırınlanmış BSH-12 ve BSH-16 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde (Şekil 8.87-8.88) ilk 50 saniyede sürtünme yüzey tabakası oluşumunda yukarıda bahsedildiği gibi benzer karakteristik özellik göstermiştir. BSH-12 ve BSH-16 kodlu numuneler sürtünme yüzey tabakası oluşumunun 50. saniyesinden sonra sürtünme katsayıları, BSH-12 kodlu numunede 300. saniyeye kadar BSH-16 kodlu numunenin ise 400. saniyeye kadar düşmektedir (Şekil 8.87). Bu saniyeler arasında BSH-12’nin sıcaklığı 150 °C’den 280 °C’ye kadar yükselmiştir (Şekil 8.88). BSH-16 kodlu numunenin ise 150 °C’den 330 °C’ye kadar çıkmıştır. BSH-12 kodlu numune ilk 50 saniyeden sonra diğer numunelerde olduğu gibi sürtünme katsayısında fazla düşüş görülmemiştir.

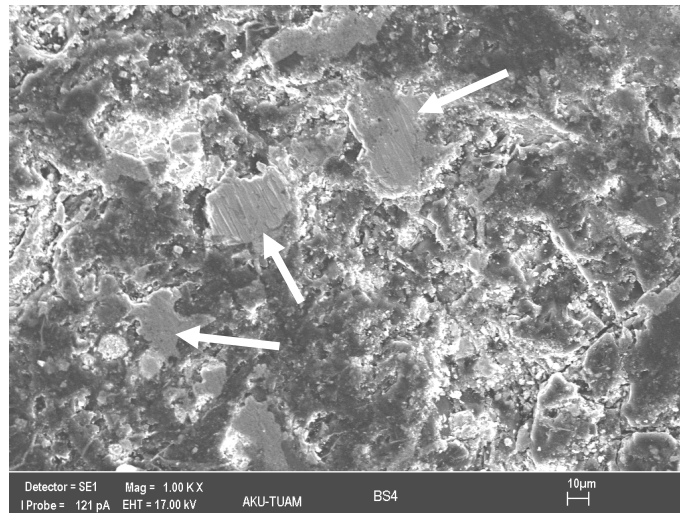
En düşük sürtünme katsayısına sahip BSH-20 kodlu numune Şekil 8.88’de görüldüğü gibi düşük sıcaklık sergilemişlerdir. 150. saniyeye kadar sürtünme katsayılarında yükselme görülmüştür. 150. saniyeden sonra BSH-16 kodlu numunede olduğu gibi 400. saniyeye kadar sürtünme katsayısında düşüş görülmüştür. 400. saniyede sıcaklık 280 °C civarındadır. 400. saniyeden sonra BSH-4 ve BSH-8 kodlu numunelerde olduğu gibi sürtünme stabil bir şekilde, sıcaklığın 400 °C olduğu 500. saniyeye kadar devam etmiştir. BSH-20 kodlu numunenin 400. saniyedeki sıcaklığı 280 °C iken, BSH-4 ve BSH-8 kodlu numunenin 300. saniyedeki sıcaklığı 350 °C civarındadır. En yüksek sürtünme katsayısı sergileyen BSH-4 kodlu numunenin sıcaklık eğrisi en yüksektir (Şekil 8.88). BSH-4 kodlu numune % 20 borik asit, % 4 sedir içermektedir. 450. saniyeden sonra BSH-16 hariç diğer tüm numuneler stabil bir sürtünme eğilimi sergilemiştir.



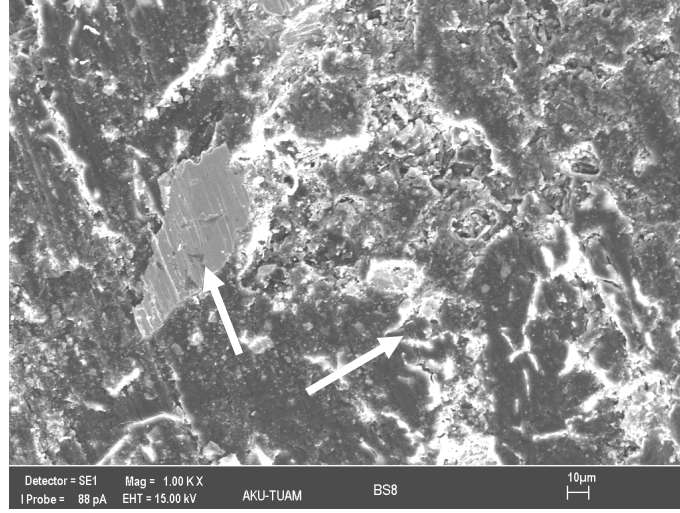
Şekil 8.88 BSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi

8.2.3.2. Mikro Yapı Karakteristiği

BS-4 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. BS-4 kodlu numunede % 20 borik asit ve % 4 sedir mevcuttur. Küçük topaklanmalar barit topaklanması olabilir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvıyan adhezif malzemelerin olduğu görülmektedir. Sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak dikkat çekmektedir (Şekil 8.89).

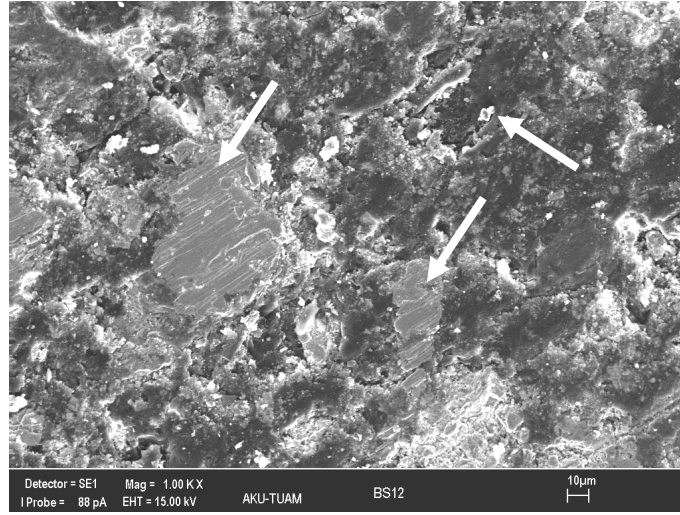


Şekil 8.89 BS-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.90 BS-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

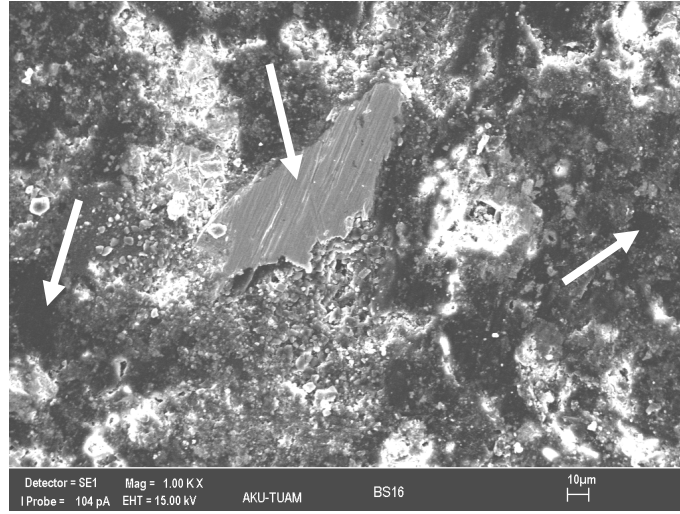
Şekil 8.90’da BS-8 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir. Kısa boyutlu sürtünme yüzeyi abrazyon aşınmanın olduğunu göstermektedir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvayan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır.



Şekil 8.91 BS-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

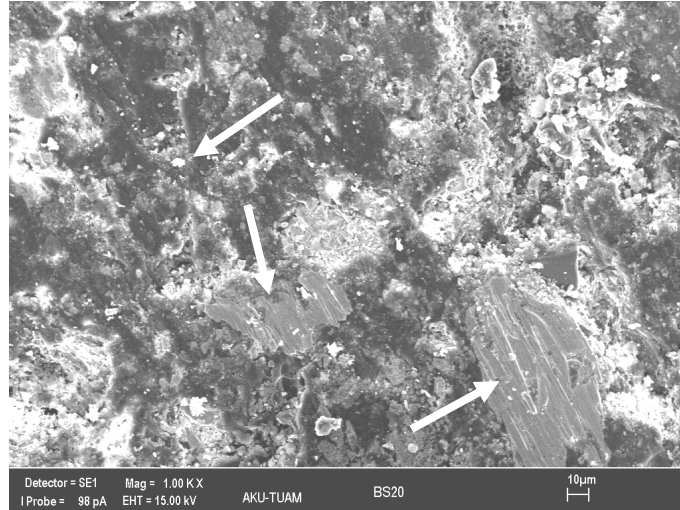
Şekil 8.91’de BS-12 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Borik asit katkılı diğer numunelerin sürtünme yüzey karakteristiğine benzer özellikler göstermektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerin abrazyon aşınmadan kaynaklandığı ve balata bünyesinden kopan bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeyindeki

malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve homojen dağıldığı anlaşılmaktadır. 0,40 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen numune % 12 borik asit ve % 12 sedir içermektedir.



Şekil 8.92 BS-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

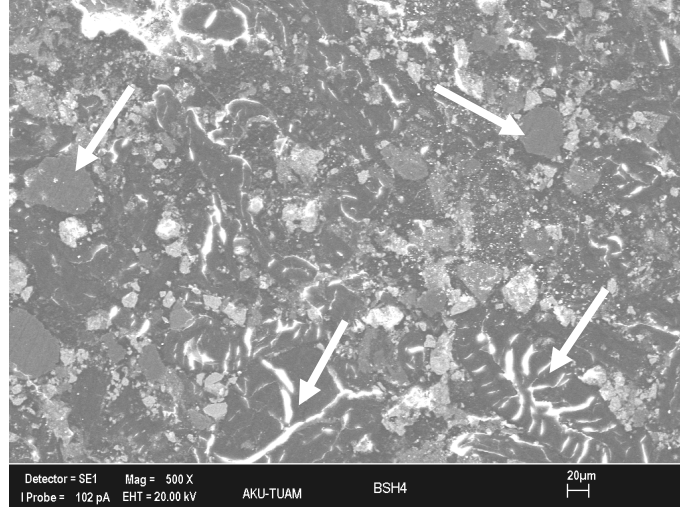
% 8 borik asit ve % 16 sedir içeren BS-16 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.92’de görülmektedir. Bu numune 0,39 sürtünme katsayısı ortalaması sergilemiştir. Bünyeden kopan parçacıkların oluşturduğu makro boşluklar görülmektedir. Sürtünme yüzeyinde çok belirgin adhezif ve abrazif aşınmanın gerçekleştiğini ve beyaz renkli bölgelerde aşınmış metal parçacıklarını göstermektedir.



Şekil 8.93 BS-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

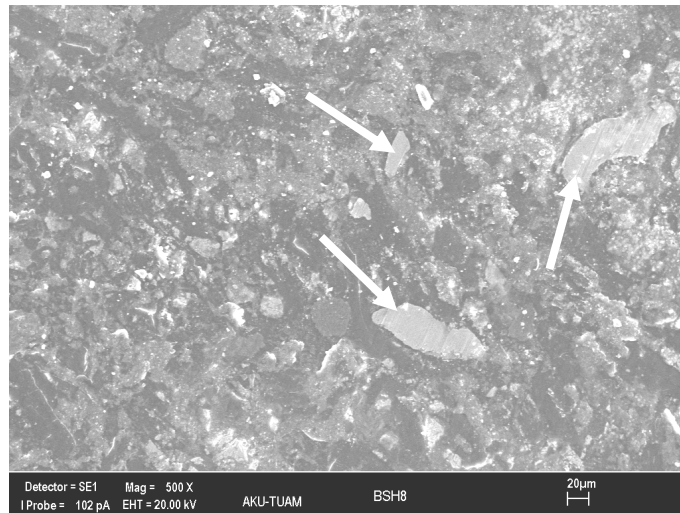
BS-20 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı görülmektedir. Küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen malzemeler ve metal parçacıkların bir kısmı aşınmadan dolayı beyaz parlak renkli bölgeler

olarak görülmektedir (Şekil 8.93). Sürtünme yüzeylerinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu bölgelerin üzerine sıvayan adhezif malzemelerin olduğu düşünülmektedir.



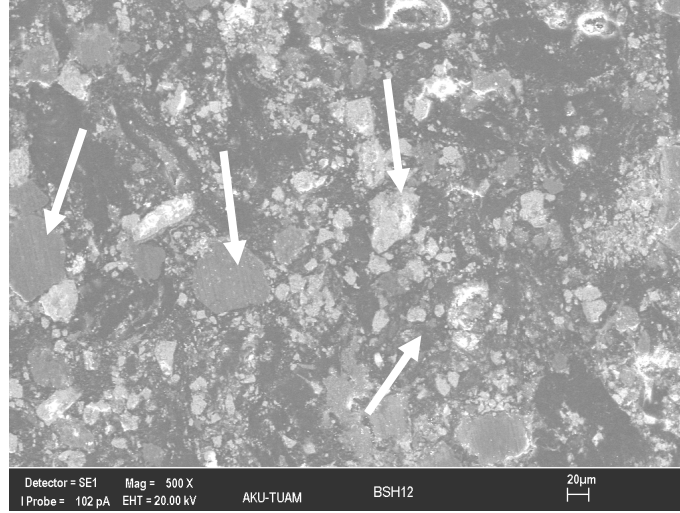
Şekil 8.94 BSH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.94 BSH-4 kodlu numunenin SEM resmi göstermektedir. BS-4 kodlu numune 0,41 sürtünme katsayısı ortalamasına sahipken BSH-4 kodlu numune 0,46 sürtünme ortalamasına sahiptir. % 4 borik asit ve % 20 sedir içeren BSH-4 kodlu bu numune en yüksek sürtünme katsayısı ortalamasını vermiştir. Küçük topaklanmaların miktarının fazla olduğu görülmektedir. Sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvayan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu ve sürtünme katsayısı ortalamasını yükselttiği görülmektedir.



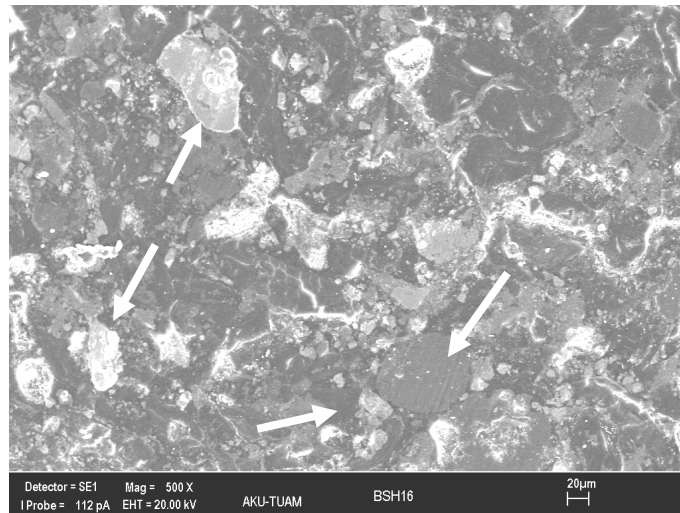
Şekil 8.95 BSH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

BSH-8 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.95'te görülmektedir. BSH-8 kodlu numunede % 8 sedir ve % 16 borik asit mevcuttur, görülen küçük topaklanmalar barit topaklanması olabilir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvayan adhezif malzemeler görülmektedir (Şekil 8.95).



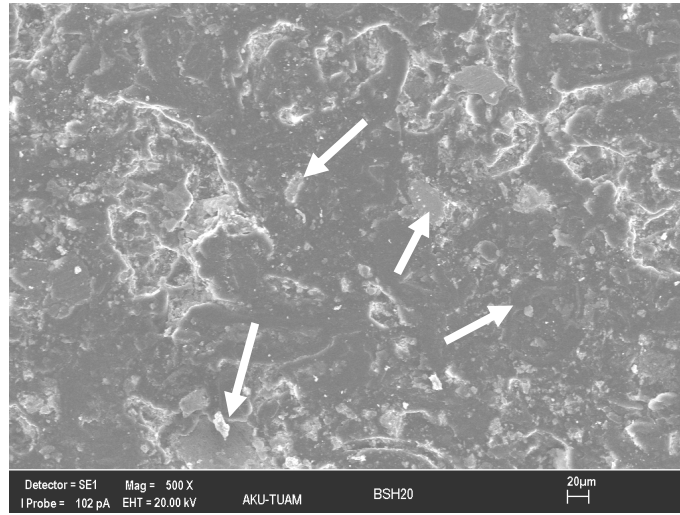
Şekil 8.96 BSH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.96'da BSH-12 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Şekilde küçük topaklanmaların miktarının fazla olduğu görülmektedir. Diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvayan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu görülmektedir. BS-12 kodlu numune 0,40 sürtünme katsayısı ortalamasına sahipken, BSH-12 kodlu numune (fırınlanmış) 0,44 sürtünme ortalamasına sahiptir.



Şekil 8.97 BSH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.97’de BSH-16 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Borik asit ve sedir katkılı diğer numunelerin sürtünme yüzey karakteristiğine benzer özellikler göstermektedir. Balata bünyesinden kopan bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar oluşturduğu görülmektedir. Sürtünme yüzeyindeki malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve homojen dağıldığı anlaşılmaktadır. 0,43 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen numune % 8 borik asit ve % 16 sedir içermektedir. Borik asit miktarının azalması sedir oranının artması sürtünme katsayısını olumsuz etkilemiştir. Fakat 0,43 sürtünme katsayısı ortalaması ile fırınlama işlemine tabi olmamış, BS-4, BS-8, BS-12, BS-16 ve BS-20 kodlu numunelerden yüksek sürtünme katsayısı ortalaması vermiştir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır.



Şekil 8.98 BSH–20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.98’de BSH-20 kodlu numunede % 20 sedir ve % 4 borik asit mevcuttur. Parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümler diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan adhezif malzemelerdir. Ayrıca sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak görülmektedir (Şekil 8.98).

8.2.3.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri

Tablo 8.19 ve 8.20’de borik asit ve sedir katkılı numunelerin özgül aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı ve standart sapma değerleri görülmektedir. Yoğunluk değerlerinde, içerikte kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranlarının etkili olduğu belirgindir. BS kodlu tüm numunelerde borik asit oranının düşmesi ve sedir oranının yükselmesi

durumunda daha düşük aşınma değeri ve daha düşük sürtünme katsayısı çıkmıştır. Bu duruma, numunelerin bünyesinde oluşan iç gözeneklerin etkisi olduğu söylenebilir.

Ortalama sürtünme katsayısı, sertlik ve özgül aşınma oranları birbirleriyle paralellik göstererek malzeme karakteristiğini sergilemektedirler. Ortalama sürtünme katsayısı yüksek olan özgül aşınma değeri de yüksek çıkmıştır. Fakat değerler birbirlerine yakındır. Ortalama sürtünme katsayısı yüksek olan numunelerin özgül aşınma değerinin de biraz yüksek çıkmasında sürtünme sırasında zorlanmanın etkisiyle balata bünyesindeki büyük parçacıkların kopmalarının önemli etkisi vardır. Düşük ortalama sürtünme katsayısına sahip olan BS-20 kodlu numunenin standart sapma değeri de düşüktür. Yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip diğer numunelerin standart sapma değerleri de yüksektir. Burada sürtünme yüzeyinde sürtünme direnci oluşturacak malzemelerin etkisiyle hem sürtünme katsayısı yüksek hem de standart sapma yüksek çıkmıştır. Fakat yüksek ortalama sürtünme katsayısına sahip numunelerin dalgalı sürtünme katsayısı göstermesi bünyedeki sert parçacıkların sürtünme direnci oluşturmaları sonrasında balata bünyesinden koparak özgül aşınma değerini artırdıkları şeklinde açıklanabilir.

Tablo 8.19 BS kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
BS-4	0,40	1,803	27,5	0,410	0,0178555
BS-8	0,37	2,007	28,3	0,407	0,0156627
BS-12	0,33	2,086	30,1	0,402	0,0290736
BS-16	0,32	2,128	30,5	0,398	0,0214069
BS-20	0,30	2,141	31,8	0,381	0,0108249

Tablo 8.19 BS kodlu numunelerin fırınlama işleminden sonraki BSH kodlu numunelerin; özgül aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı ve standart sapma değerlerini göstermektedir. Fırınlanmadan önce 0,41 ortalama ile en yüksek sürtünme katsayısı ve 0,40x10⁻⁶ gr/mm² ile en yüksek aşınma değeri gösteren BS-4 kodlu numune, fırınlandıktan sonra sürtünme katsayısı yükselmiş buna rağmen en düşük aşınma oranını sergilemiştir. Buradan fırınlama işlemi gören numunelerin içyapılarının gözenek miktarının azaldığı ve numunelerin birbiri ile daha kararlı bir yapı oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 8.20 BSH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgöl Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
BSH-4	0,36	1,702	28,6	0,460	0,0140497
BSH-8	0,35	1,983	29,6	0,455	0,0099066
BSH-12	0,29	1,994	31,9	0,442	0,0115654
BSH-16	0,27	2,023	33,3	0,431	0,0104291
BSH-20	0,25	2,047	36,1	0,410	0,0089724

Tablo 8.20 aynı içeriklere sahip BS kodlu numunelerin fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra (BSH), yapılan deneyler sonucunda elde edilen özgöl aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı (μ) ve standart sapma değerlerini göstermektedir. En yüksek aşınma ortalama sürtünme katsayısı en yüksek olan BSH-4 kodlu numunede gerçekleşmiştir. Bu numunenin sertlik değeri en düşüktür. Numuneler arasında en az aşınma BSH-20 kodlu numunede $0,25 \times 10^{-6}$ gr/mm² olarak belirlenmiştir. Aşınma, yoğunluk ve sertlik değerleri numunelerin içeriğini oluşturan borik asit ve sedir miktarına göre değişmektedir. BSH kodlu numunelerde sedir oranının artması, borik asit oranının azalması özgöl aşınma değeri ve sürtünme katsayısını azalmakta, sertlik ve yoğunluk değerlerini artırmaktadır.

Tablo 8.21 Borik asit ve sedir katkılı fırınlanmamış (BS) ve fırınlanmış (BSH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

Numune Adı	Su		Tuzlu su		Yağ		Fren Sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
BS-4	1,96	0,29	1,49	0,27	1,99	0,22	2,31	0,23
BS-8	2,22	0,34	1,63	0,32	2,45	0,26	2,85	0,28
BS-12	2,63	0,40	1,97	0,37	2,48	0,29	3,20	0,32
BS-16	2,78	0,42	2,30	0,41	2,87	0,36	3,29	0,33
BS-20	3,45	0,53	2,94	0,47	3,52	0,40	3,71	0,35
BSH-4	1,22	0,17	1,36	0,22	1,19	0,16	1,13	0,15
BSH-8	1,41	0,20	1,60	0,20	1,50	0,23	1,35	0,17
BSH-12	1,69	0,22	1,81	0,27	1,51	0,27	1,46	0,20
BSH-16	1,87	0,26	1,97	0,30	1,80	0,33	1,64	0,23
BSH-20	1,87	0,28	1,99	0,33	1,88	0,35	1,73	0,27

Tablo 8.21 Borik asit ve sedir katkılı numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testlerini göstermektedir. Fırınlanmamış BS kodlu numunelerde fren sıvısı dayanım testinde ortalama % 3,07 bir kütleli artış gözlenirken en fazla kütleli artış % 3,71 ile BS-20 kodlu numunede görülmüştür. BS kodlu numunelerin tuzlu su % 2,06, saf su %

2,60 ve hidrolik yağ % 2,66 kütleli artış ortalamaları çıkmıştır. Boyut farklılıkları olarak en yüksek % 0,50 ortalama ile hidrolik yağ testlerinde olmuştur. Tüm numunelerin dayanım testleri TS 9075 standartlarına uygun çıkmıştır. Ayrıca dayanım test Tablosunda fırınlama işlemi sonrası deneylere tabi tutulan numunelerin dayanım testlerinin sonuçlarına bakıldığında aynı içerikli fırınlanmış numuneler fırınlanmamış numunelere göre çevresel etkilere daha dayanıklı çıkmışlardır. Fırınlanmamış numunelerde (BS) en yüksek fren sıvısı deneylerinde kütleli artış % 3,07 iken aynı içeriklere sahip numunelerde fırınlama işleminden sonra kütleli artış ortalamaları (BSH) % 1,46 olarak tespit edilmiştir. BSH kodlu numuneler de tuzlu su % 1,74, saf su % 1,61 ve hidrolik yağ % 1,57 kütleli artış ortalamaları çıkmıştır. Sürtünme katsayı ortalamalarında stabil durum sağlayan fırınlama işlemi, dayanım testlerinde de iyi sonuç vermiştir.

8.2.4. Borax ve Sedir Katkılı Fren Balataları

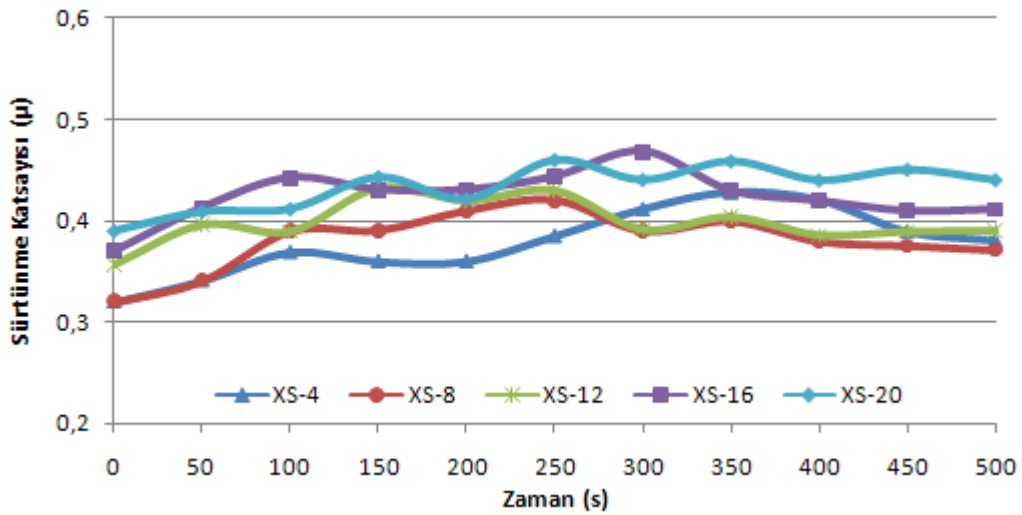
8.2.4.1. Sürtünme Performansı

Şekil 8.99, Şekil 8.100, Şekil 8.101 ve Şekil 8.102 borax ve sedir katkıli fırınlanmış (XSH) ve fırınlanmamış (XS) numunelerin sürtünme katsayısı-zaman ve sıcaklık-zaman grafiklerini göstermektedir. Borax katkıli tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi sürecinden sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir. Sürtünme katsayısı değişimi için bu grafikler incelendiğinde, XS-4, XS-8, XS-12, XS-16 ve XS-20 kodlu numuneler borax miktarının azalması ile orantılı olarak sürtünme katsayısında artış göstermiştir.

Borax ve sedir katkıli numuneler ile yapılan deneylerde 0,37 ile en düşük sürtünme katsayısı ortalamasını % 20 borax ve % 4 sedir içeren XS-4, en yüksek sürtünme katsayısı ortalamasını ise 0,43 ile % 4 borax ve % 20 sedir içeren XS-20 kodlu numune vermiştir. Sedir oranının artışıyla birlikte sürtünme katsayısı ortalamasında artış gözlenmektedir. Aynı içeriklere sahip sedir yerine cashew kullanılan deneylerde (XC) en düşük sürtünme katsayısı ortalamasını 0,41 ile XC-4 kodlu numune verirken, en yüksek sürtünme katsayısı ortalamasını 0,43 ile XC-12 numunesi vermişti. Buradan anlaşılıyor ki, borax ve sedir katkıli numunelerde sedir oranının artması sürtünme katsayısı ortalamasını artırırken, cashew katkıli numunelerde % 12'den daha fazla miktarda cashew'in borax ile birlikte kullanılması sürtünme katsayısı ortalamasını olumsuz etkilemektedir. Aynı şekilde fırınlama işlemine tabi tutulan sedir ve cashew katkıli numunelerde de (XSH-XCH) aynı sonuç elde edilmiştir. Fakat fırınlama işlemi sonunda yapılan deneylerde her iki katkı maddesi içinde yüksek sürtünme katsayısı ortalaması oluşmuştur. Fırınlama işlemi uygulanmamış (XC) numunelerinin sürtünme katsayısı ortalaması 0,41 iken,

fırınlama işlemi yapıldıktan sonra aynı içerikli numunelerin sürtünme katsayı ortalamaları (XCH) 0,45 olmuştur. Aynı özelliklere sahip sedir katkılı fırınlanmamış numuneler (XS) ile yapılan deneylerde 0,40 sürtünme katsayısı ortalaması elde edilirken, bu numunelerin fırınlanması sonrası (XSH) 0,44 sürtünme katsayısı ortalaması elde edilmiştir.

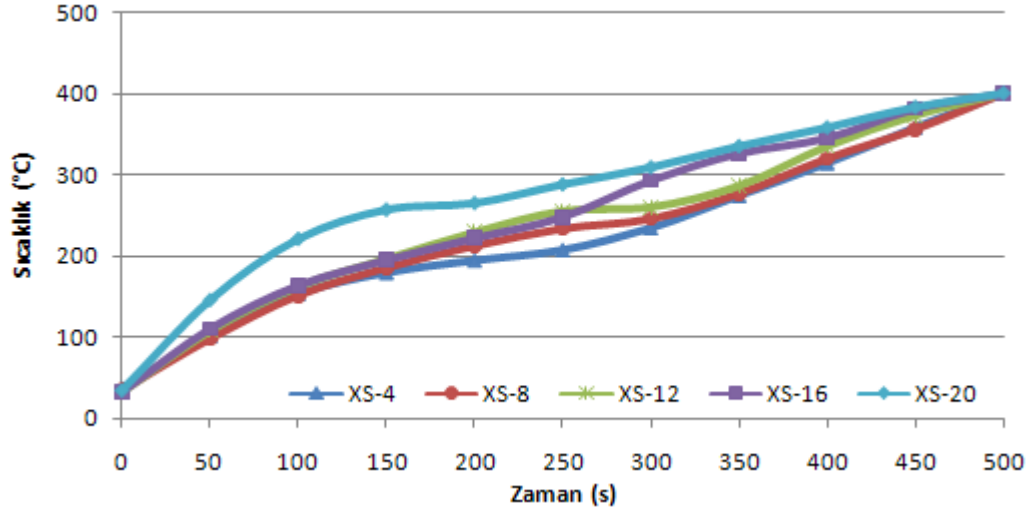
Boraks ve sedir katkılı tüm örneklerde sürtünme tabakası gelişimi süreci yaklaşık 50 ile 100 saniye arasında sürmüştür ve daha sonra sürtünme tabakasını oluşturan içeriklerin özelliğine göre sürtünme karakteristiği şekillenmiştir (Şekil 8.99-8.102). Sürtünme katsayısı değişimi için bu grafikler incelendiğinde, XS-4 ve XS-8 kodlu numuneler XS-12, XS-16 ve XS-20 kodlu numunelere göre daha az dalgalanma göstermiştir. Sürtünme katsayısı değişiminde sık dalgalanma gösteren XS-12, XS-16 ve XS-20 kodlu numuneler birbirleriyle benzeşirken (Şekil 8.99), XS-4 ve XS-8 kodlu numunelerde birbirleriyle benzeşen sürtünme katsayısı değişimi göstermiştir (Şekil 8.99). XS-4 ve XS-8 kodlu numuneler sergiledikleri sürtünme katsayısı değişimi ile birlikte ortalama sürtünme katsayısı değerleri de birbirine çok yakındır ve 0,38 civarındadır. Sürtünme katsayısı değişiminde en az dalgalanmayı XS-4 kodlu numune göstermiştir. XS-4 kodlu numunenin sürtünme davranışı diğerlerinden farklı olmakla birlikte ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,37 civarındadır (Şekil 8.99). Ortalama sürtünme katsayısı değerleri kabul edilebilir olmakla birlikte sürtünme katsayısındaki dalgalanma sürtünme performansında önemli bir kusur olarak görülür.



Şekil 8.99 XS kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

XS-4, XS-8 ve XS-16 kodlu numunelerin ilk 100 saniyelik kısmı birbirleriyle ortak özellik göstermekle birlikte bu numuneler arasında en az dalgalanmayı XS-16 kodlu numune sergilemiştir. XS-4, XS-8 ve XS-16 kodlu numunelerin sürtünme katsayısında, sürtünme tabakası oluşumu 100. saniyeye kadar devam etmiştir. 100. saniyeden sonra XS-4 kodlu

numune 200. saniyeye kadar sürtünme katsayısında bir düşüş sergilemiş, 200. saniyeden sonra 350. saniyeye kadar sürtünme katsayısında artış göstermiştir. Sıcaklığın 280 °C olduğu 350. saniyeden sonra sıcaklığın artışıyla birlikte sürtünme katsayısı düşme eğilimi göstermiştir.



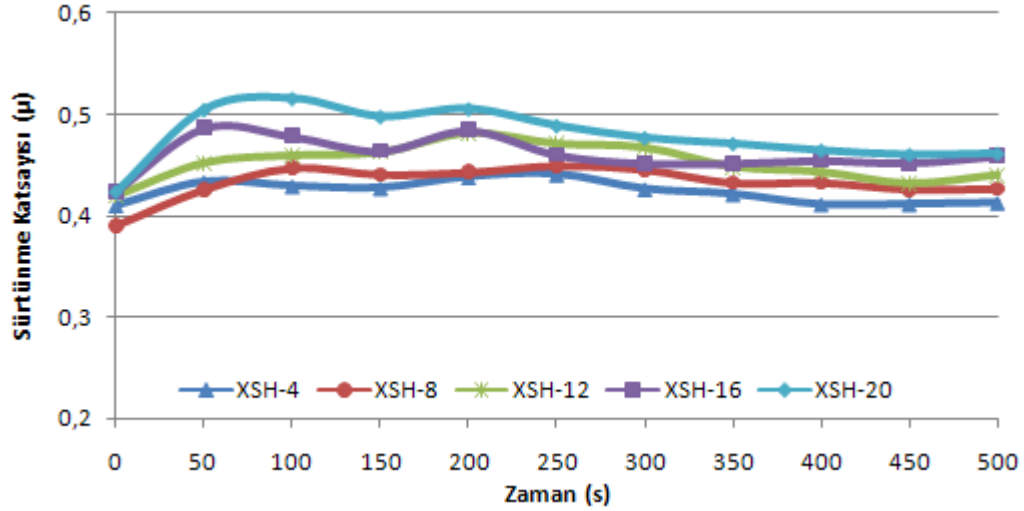
Şekil 8.100 XS kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

XS-8 kodlu numune ise 100. saniyeden sonra çok az bir azalma gösterdiği 150. saniyeden 250. saniyeye kadar sürtünme katsayısında artış göstermiştir. Sıcaklık 100 °C ile 250 °C arasında değişmiştir (Şekil 8.100). 250. saniyeden sonra sıcaklığın artışıyla birlikte XS-8 kodlu numunenin sürtünme katsayısında azalma görülmüştür. XS-16 kodlu numunenin sürtünme tabakasının oluştuğu 100. saniyeden sonra 200. saniyeye kadar sürtünme katsayısında düşme meydana gelmiştir. 200. saniyede sıcaklık 220 °C civarındadır (Şekil 8.100). 200. saniyeden 300. saniyeye kadar sürtünme katsayısında yükselme görülen XS-16 kodlu numunenin sıcaklığın artışıyla birlikte sürtünme katsayısında karalı bir şekilde düşüş meydana gelmiştir (Şekil 8.99).

XS-12 ve XS-20 kodlu numuneler sürtünme tabakasının oluştuğu 50. saniyeden sonra inişli çıkışlı bir sürtünme eğrisi sergilemişlerdir. Her iki numunenin dalgalanma şeklinde görülen sürtünme eğrileri birbirine benzemektedir (Şekil 8.99). XS-12 kodlu numune sıcaklığın 280 °C olduğu 350. saniyeden itibaren ve XS-20 kodlu numunede sıcaklığın 320 °C olduğu 350. saniyeden sonra sıcaklığın artışıyla sürtünme katsayıları 500. saniyeye kadar azalmıştır.

Borax katkılı üretilen fırınlanmış numunelerden XSH-4, XSH-8, XSH-12, XSH-16 ve XSH-20 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı değişimi incelendiğinde sürtünme yüzey tabakasının oluştuğu ilk 100 saniyelik süre ve sonrasında yukarıda bahsedildiği gibi benzer karakteristik görülmemiştir (Şekil 8.101). Fırınlanan numuneler deneylerin başlamasından bitişine kadar stabil bir sürtünme katsayısı grafiği sergilemişlerdir.

Borax ve sedir katkılı fırınlanmış örneklerde sürtünme tabakası gelişimi içeriğe bağlı olarak 50 ile 100 saniye arasında sürmüştür. Daha sonra sürtünme tabakası ile disk yüzeyi arasındaki etkileşim sonucu dalgalanma veya stabil kalma davranışı göstermişlerdir (Şekil 8.101-Şekil 8.102).



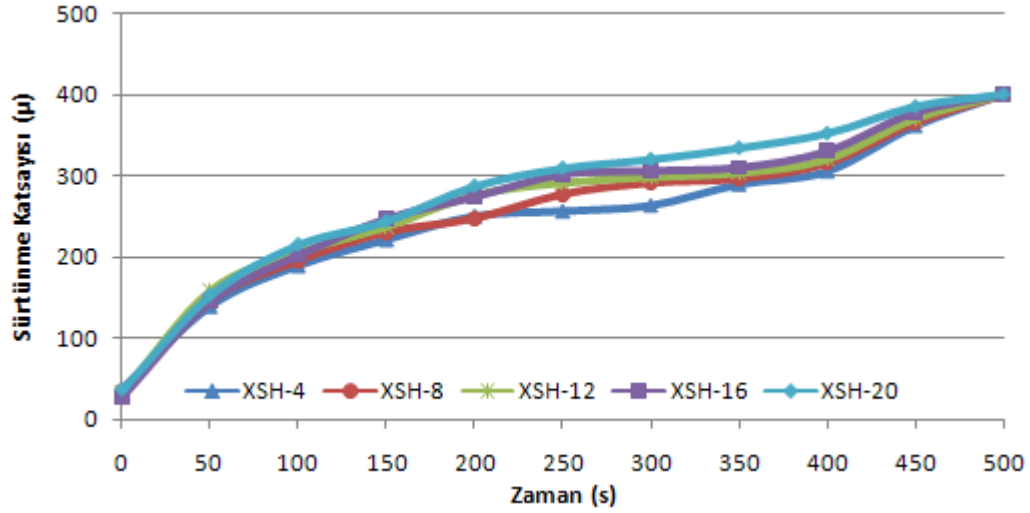
Şekil 8.101 XSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sürtünme katsayısı-zaman değişimi

Sürtünme katsayısı değişimi için bu grafikler incelendiğinde, XSH-4 kodlu numunenin ilk 50 saniyede sürtünme tabakası oluşmuş ve 250. saniyelere kadar stabil sayılabilecek bir sürtünme davranışı sergilemiştir (Şekil 8.101). Bu aşamada sürtünme yüzey sıcaklığı 250 °C civarındadır. 250-300 °C arasında yani 250 ile 400. saniyeler arasında sürtünme katsayısında bir düşme olmuştur. Sürtünme katsayısındaki bu düşme sıcaklığın etkisiyle olduğu için fade olarak değerlendirilebilir. Daha sonra komponenti oluşturan malzemeler disk yüzeyine karşı bir direnç oluşturmadağı için sürtünme katsayısı 0,40 civarında devam etmiştir.

XSH-8 kodlu numunenin sürtünme performansı ise stabil sayılabilecek bir davranış sergilemiş olup değer olarak XSH-4 kodlu numune ile yakın değerdedir (Şekil 8.101). Dolayısıyla kullanılan bu içeriklerle birlikte olumlu bir etki oluşturduğu söylenemez. XSH-8 kodlu numune XSH-4 kodlu numuneye çok benzer sürtünme performansı sergilemiş olup nispeten daha yüksektir (Şekil 8.101). XSH-16 kodlu numunenin sürtünme performansı diğerlerine göre hem sürtünme tabakası oluşumunda hem de sonrasında fazla dalgalanma göstermiştir. Bu, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin diske tutunma özelliği gösterdiği sırada sürtünme katsayısında yükselme, sonra aşınma veya zorlama sonucu balata bünyesinden koptuğu sırada sürtünme katsayısında düşme olduğu şeklinde açıklanabilir.

Ayrıca sıcaklığın 300 °C’nin üzerine çıktığı 350. saniyeden sonra ise sıcaklığın etkisiyle fade görülmektedir (Şekil 8.101). Sürtünme katsayısı değişiminde XSH-20 kodlu numune XSH-

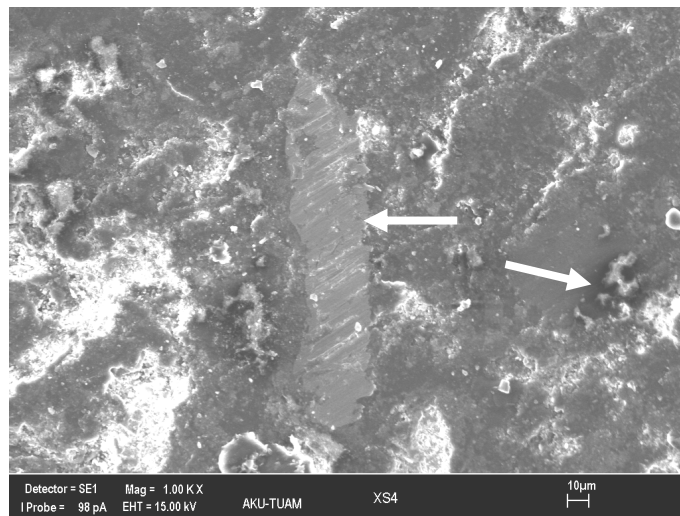
12 ve XSH-16 kodlu numunelerle benzer davranış göstermiş olup bu numunelere oranla daha yüksek sürtünme katsayısı sergilemiştir.



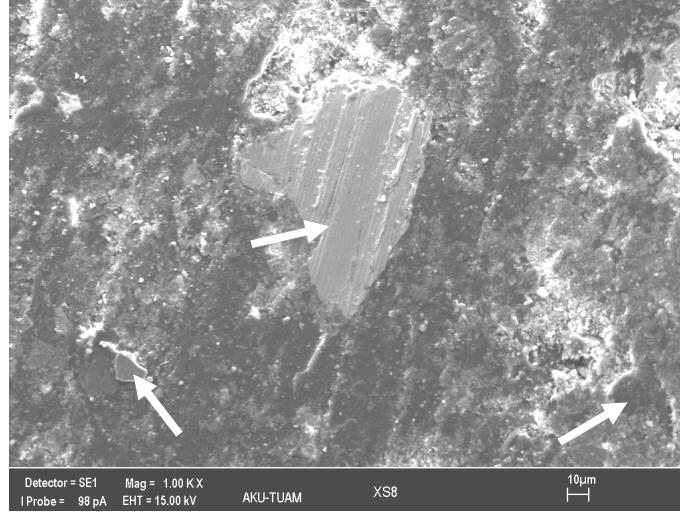
Şekil 8.102 XSH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi

8.2.4.2. Mikro Yapı Karakteristiği

XS-4 kodlu numunenin SEM resmi Şekil 8.103’de görülmektedir. % 20 borax ve % 4 sedir içeren bu numune 0,37 sürtünme katsayısı ortalaması sergilemiştir. Sürtünme yüzeyinde çok belirgin abrazif aşınmanın gerçekleştiğini gösteren çizikler ve buna bağlı olarak boşlukların oluştuğu görülmektedir. Sürtünme yüzeylerinde oluşan çiziklerden sürtünme yüzeyindeki malzemelerin karşı yüzey ile tutunmaya çalıştığı anlaşılmaktadır.

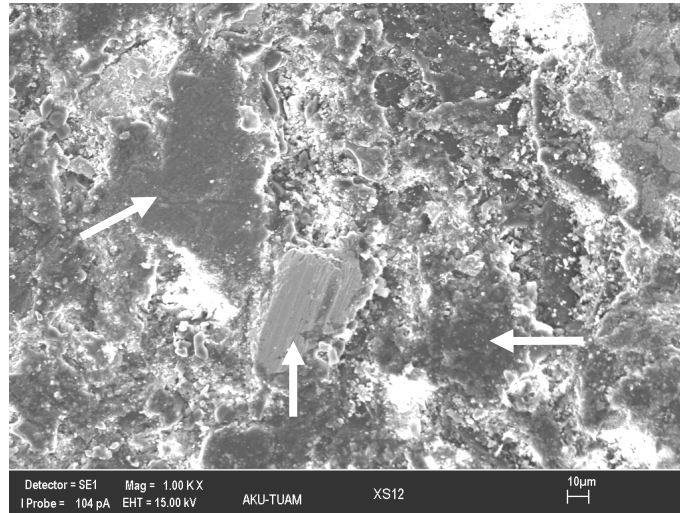


Şekil 8.103 XS-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.104 XS-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

XS-8 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı görülmektedir (Şekil 8.104). Sürtünme yüzeylerinde görülen renk farklılıkları adhezif aşınmaların gerçekleştiğini göstermektedir. Fakat görülen SEM resminde makro boşluklar fazla dikkat çekmemektedir. Mikro boşluklar mevcuttur. Dolayısıyla disk yüzeyinde tutunma sağlayacak sert ve büyük parçacıkların sürtünme tabakasında fazla bulunmaması sonucu düşük sürtünme katsayısı sergilediği sonucuna varılmıştır.



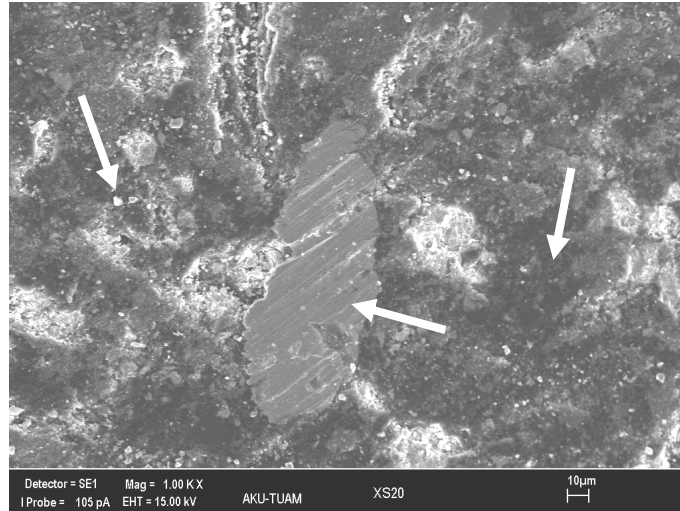
Şekil 8.105 XS-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

% 12 borax ve % 12 sedir içeren XS-12 kodlu numunenin SEM resminde makro boşluklar ve bu makro boşlukların yakın çevresinde de mikro boşluklar görülmektedir. Bu numunenin sürtünme performansı grafiğinden de anlaşıldığı gibi sürtünme tabakası oluşum sürecinde sürtünme katsayısında ilk 50 saniyede hızlı bir yükselme görülmekteydi. SEM resmi

ile bağlantılı düşünülürse bu hızlı yükselme sırasında komponenti oluşturan malzemelerden büyük ve sert parçacıkların sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve sonrasında aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan zorlanmaların etkisiyle balata bünyesinden kopması sonucu makro boşlukların oluştuğu sonucuna varılmıştır (Şekil 8.105).



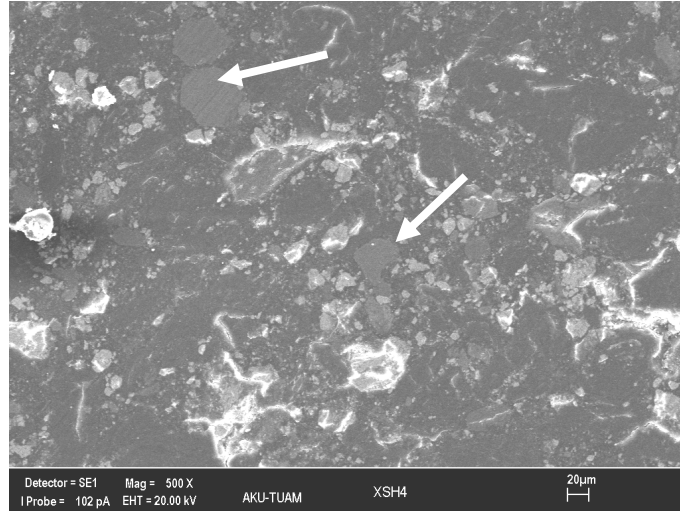
Şekil 8.106 XS-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.107 XS-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

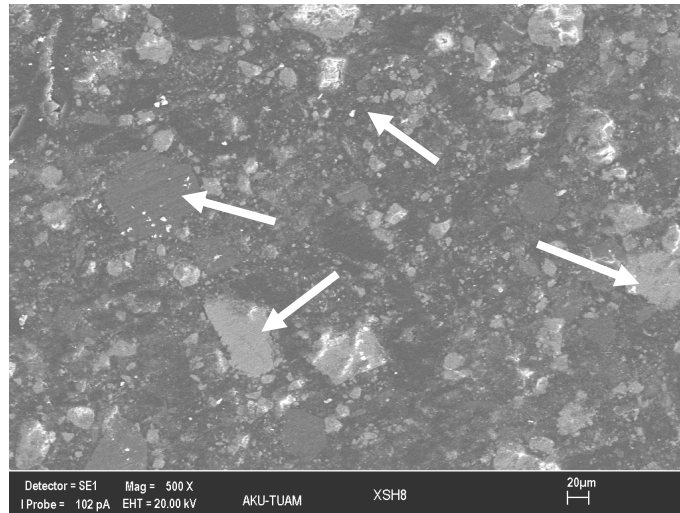
Şekil 8.106 XS-16 ve Şekil 8.107 XS-20 kodlu numunelerin SEM resimlerini göstermektedir. Her iki resimde birbiri ile benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik her iki numunenin sürtünme katsayısı-zaman grafiklerinde de görülmektedir. En yüksek sürtünme katsayısı ortalama değerleri bu iki numuneden elde edilmiştir. Malzemelerin homojen dağıldığı, sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve birbirleriyle tutunma sağladıkları anlaşılmaktadır. Beyaz renkli bölgeler sürtünmeye aktif olarak katılıp aşınmış metal parçacıklarıdır. Ayrıca sürtünme

yüzeyinde oluşan kısa çizikler ve renk farklılıkları hem adhezif hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 8.108 XSH-4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

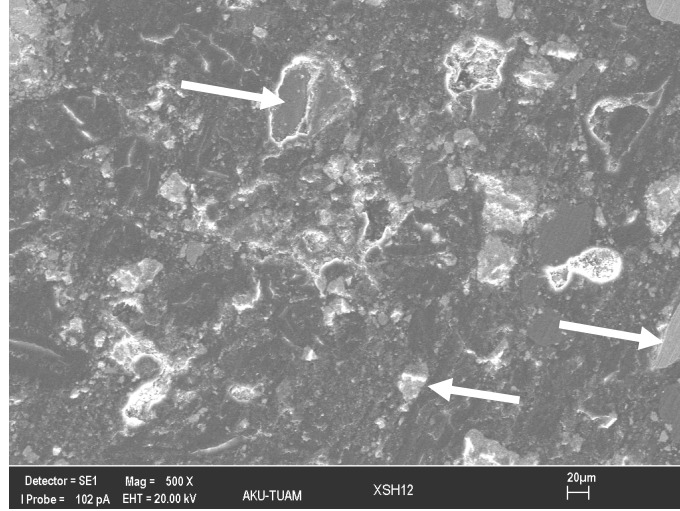
Şekil 8.108 XSH-4 kodlu numunenin SEM resmini göstermektedir. Şekilde küçük topaklanmaların miktarının fazla olduğu görülmektedir. Diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvayan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu görülmektedir. XS-4 kodlu numune 0,37 sürtünme katsayısı ortalamasına sahipken XSH-4 kodlu numune 0,42 sürtünme ortalamasına sahiptir.



Şekil 8.109 XSH-8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

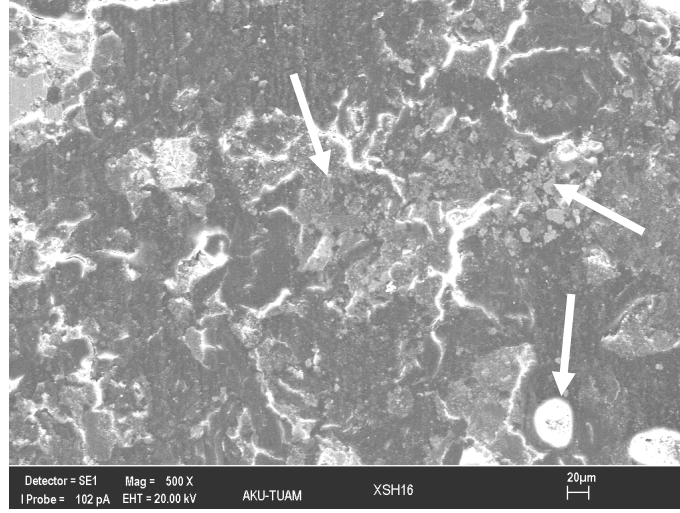
XSH-8 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı görülmektedir (Şekil 8.109). . Kısa boyutlu sürtünme yüzeyleri abrazif aşınmaların olduğunu göstermektedir. Görülen küçük topaklanmalar içerikteki baritten kaynaklanmaktadır

ve bir araya gelen malzemelerin sınır bölgeleri görülmektedir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan malzemelerin adhezif aşınmaya sebep olduğu düşünülmektedir. Beyaz parlak renkli bölgeler, sürtünmeye aktif olarak katılmış metal parçacıklardır



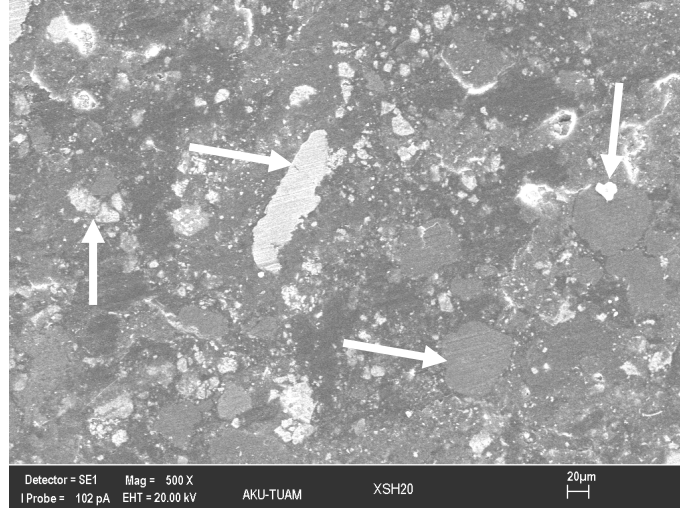
Şekil 8.110 XSH-12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

XSH-12 kodlu numunenin SEM resminde komponenti oluşturan malzemelerden büyük taneli olan veya küçük topaklanmalar şeklinde bir araya gelen malzeme bölgeleri görülmektedir (Şekil 8.110). XSH-12 kodlu numunede % 12 borax ve % 12 sedir mevcuttur, bu küçük topaklanmalar barit topaklanması olabilir. Bu parçacıkların yüzeyinde koyu ve açık gri renkli olarak görülen bölümlerde ise diğer sürtünme bölgelerinden koptuktan sonra bu parçacıkların üzerine sıvanan adhezif malzemelerin olduğu görülmektedir. Ayrıca sürtünmeye aktif olarak katılmış ve bir kısmı aşınmış olan metal parçacıklar, beyaz parlak renkli bölgeler olarak dikkat çekmektedir.



Şekil 8.111 XSH-16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.111’de XSH-16 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. % 16 sedir, % 8 borax içeren ve 0,46 sürtünme katsayısı ortalaması sergileyen bu numunenin oluşan sürtünme yüzeyinde mikro boşluklar mevcuttur. Komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Oluşan abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği beyaz renkli bölgeler görülmektedir.



Şekil 8.112 XSH-20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Şekil 8.112’de fırınlama işlemi görmüş XSH-20 kodlu numunenin SEM resmi görülmektedir. Tüm fırınlama işlemi görmüş numunelerde olduğu gibi bu numunede abrazif aşınma sonucu oluşmuş bölgeler görülmektedir. Bu bölgeler ne kadar fazla olursa sürtünme katsayısı ortalaması o kadar yüksek olmaktadır. Bu numunede % 4 borax ve % 20 sedir oranı mevcuttur. 0,47 ile en yüksek sürtünme katsayısı ortalaması göstermiştir. Balata bünyesinden kopan bazı parçacıkların makro ve mikro boşluklar oluşturduğu görülmektedir. En yüksek

sürtünme katsayısı oranı ile sürtünme yüzeyindeki malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı ve homojen dağıldığı anlaşılmaktadır.

8.2.4.3. Aşınma, Yoğunluk, Sertlik ve Dayanım Testleri

Tablo 8.22’de borax ve sedir katkılı numunelerin özgül aşınma, yoğunluk, sertlik, ortalama sürtünme katsayısı ve standart sapma değerleri görülmektedir. Komponenti oluşturan malzemelerin birbirleriyle uyumları özgül aşınmada ve sergiledikleri sürtünme katsayısında etkili olmaktadır. Eğer komponenti oluşturan malzemelerin birbirleriyle tutunmaları iyi ise sürtünme katsayısı yüksek, özgül aşınma oranı düşük çıkar. Eğer komponenti oluşturan malzemeler birbirleriyle iyi tutunamamış ise sürtünme katsayısı düşük, özgül aşınma oranı yüksek çıkar. Fakat sürtünme tabakasını, sürtünme katsayısının yükselmesinde etkili olacak sert malzemeler oluşturmuşsa sürtünme katsayısı da aşınma oranı da yüksek çıkar. Sert malzemelerde oluşan sürtünme yüzeylerine sahip numunelerde, aşınma oranının yüksek çıkmasının nedeni, sert partikülün balata bünyesi ile tutunmanın aşınma sonucu zayıflaması ile oluşmaktadır. Ayrıca yoğunluk değerlerinde, içerikte kullanılan malzemelerin yoğunlukları ve oranları oldukça etkili olmaktadır. Fakat balatanın üretimi sırasında pişirme aşamasında sıcaklığın ve basıncın etkisiyle oluşan bazı reaksiyonlar sonucu iç gözenekler oluşmakta ve beklenen teorik yoğunluk pratikte sağlanamamaktadır. Bu yüzden numunelerin oluşan yoğunlukları tam olarak kullanılan malzeme yoğunluk ve oranları ile paralellik göstermemektedir. Fakat fırınlanmış numunelerde bu gözeneklilik pek oluşmamakta ve sürtünme katsayısı yüksek, buna karşın aşınma oranı fırınlanmamış numunelere göre düşük çıkmaktadır.

Tablo 8.22 XS kodlu fırınlanmamış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
XS-4	0,31	2,201	36,1	0,378	0,0333788
XS-8	0,33	2,160	33,3	0,380	0,0288336
XS-12	0,35	2,138	29,1	0,398	0,0218966
XS-16	0,39	2,051	25,6	0,424	0,0248583
XS-20	0,43	2,011	23,5	0,433	0,0225505

Numunelerin sertlik değerlerinde barit, sedir ve borax oranlarına bağlı olarak değişimler görülmüştür. XS-4 kodlu numune, % 20 barit ve borik asit, % 4 sedir içermektedir, sertlik değeri 36,1 HB değeri ile birinci sırada iken % 20’lik bir oranla barit, % 8’lik bir oranla

borax ve % 16 sedir içeren XS-16 kodlu numunesi de 25,6 HB değeri ile sertlikte dördüncü sıradadır. % 20'lik bir oranla barit % 12'lik bir oranla borax ve % 12 sedir içeren XS-12 kodlu numune 29,1 HB ile orta sertlik değeri sergilemiştir. XS-20 kodlu numune en yüksek sürtünme katsayısını en yüksek özgül aşınma ve 23,5 HB ile en düşük sertlik değerini göstermiştir (Tablo 8.22). Ayrıca Tablodan sedir miktarı artıp borax miktarının azalması ile aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı artmış, sertlik ve yoğunluk değerleri azalmıştır.

Borax ve sedir katkılı numunelerden bir kısmı 180 °C, 4 saat süre ile fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra sertlik ve sürtünme katsayısında yükselme kaydedilmiştir. Fırınlama işleminden önce 0,37 sürtünme katsayısı ve 36,1 HB sertlik değeri olan XS-4 numunesi fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra 0,42 sürtünme katsayısı ve 42,9 sertlik değerini göstermiştir. Aynı şekilde 0,43 ile en yüksek sürtünme katsayısı ortalaması ve 23,5 HB sertlik değeri sergileyen XS-20 kodlu numune ise fırınlama işleminden sonra 0,47 ortalama sürtünme katsayısı ve 25,1 HB sertlik değerini vermiştir. Fırınlanan numunelerin içyapısındaki kürleşmeyi sağlayan reaksiyonlar fırınlama işlemi ile tamamlanmış olup daha kararlı bir yapı oluşturmuştur. Fırınlanmamış numunelerde olduğu gibi Tablo 8.23'den sedir miktarının artıp borax miktarının azalmasıyla özgül aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri artarken, yoğunluk ve sertlik değerleri azalmıştır. Fakat fırınlanmamış numunelerden daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Tablo 8.23 XSH kodlu fırınlanmış numunelerin özellikleri

Numune	Özgül Aşınma (gr/mm ²)x10 ⁻⁶	Yoğunluk (gr/cm ³)	Sertlik (HB)	Ortalama (μ)	Standart Sapma
XSH-4	0,29	2,126	42,9	0,423	0,0112412
XSH-8	0,31	2,113	40,2	0,432	0,0166177
XSH-12	0,33	2,085	34,4	0,452	0,0178124
XSH-16	0,37	2,026	28,3	0,460	0,0179935
XSH-20	0,39	1,992	25,1	0,479	0,0267071

Burada, XS-20 kodlu numune yoğunluğu yüksek, ortalama sürtünme katsayısı yüksek ve sonuç olarak yüksek özgül aşınma değerine sahiptir. Bununla birlikte en yüksek sertlik değerine sahiptir. Aynı numune fırınlandıktan sonra yoğunluğu ve sertliği düşük, sürtünme katsayısı yüksek çıkmıştır.

Borax ve sedir katkılı numunelerin saf su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki dayanım testleri Tablo 8.24'de gösterilmektedir. XS kodlu numunelerde hidrolik yağ dayanım testinde ortalama % 3,08 bir kütleli artış gözlenirken en yüksek dayanıksızlık

XS-4 kodlu numunede görülmüştür. XS kodlu numunelerin tuzlu su % 2,93, fren sıvısı % 2,92 ve saf su % 2,63 dayanım ortalamaları göstermiştir. Boyut farklılıkları olarak % 0,38 ortalama ile en yüksek hidrolik yağ ve fren sıvısı testlerinde olmuştur. Ayrıca dayanım test Tablosunda fırınlama işlemi sonrası deneylere tabi tutulan numunelerin dayanım testlerinin sonuçlarına bakıldığında aynı içerikli fırınlanmamış numunelere göre daha dayanıklı çıkmışlardır. Fırınlanmamış numunelerin (XS) dayanım testlerinde en yüksek ortalama kütleli artış hidrolik yağda % 3,08 iken aynı içeriklere sahip numunelerin fırınlama işleminden sonra yapılan dayanım testleri sonucu hidrolik yağda meydana gelen kütleli artış ortalaması (XSH) 2,55 olarak tespit edilmiştir. XSH kodlu numuneler de tuzlu su % 1,79, fren sıvısı % 1,32 ve saf su % 2,23 kütleli artış ortalamaları göstermiştir. Tüm numunelerin dayanım testleri TS 9075 standartlarına uygun çıkmıştır.

Tablo 8.24 Borax ve sedir katkılı fırınlanmamış (XS) ve fırınlanmış (XSH) numunelerin su, tuzlu su, hidrolik yağ ve fren sıvısı içerisindeki kütle ve boyut değişim değerleri (%)

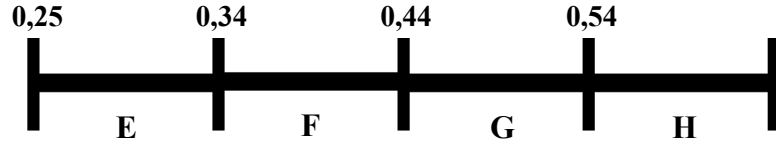
Numune Adı	Saf Su		Tuzlu su		Yağ		Fren Sıvısı	
	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)	Kütle (%)	Boyut (%)
XS-4	3,11	0,45	3,55	0,49	3,29	0,45	3,84	0,48
XS-8	2,82	0,40	3,34	0,38	3,28	0,41	3,48	0,45
XS-12	2,61	0,33	3,10	0,35	3,20	0,39	2,89	0,38
XS-16	2,51	0,30	2,49	0,29	2,91	0,35	2,21	0,31
XS-20	2,10	0,27	2,17	0,25	2,76	0,31	2,18	0,28
XSH-4	2,94	0,37	2,04	0,34	2,69	0,35	1,78	0,27
XSH-8	2,40	0,34	1,96	0,33	2,61	0,30	1,65	0,25
XSH-12	2,35	0,33	1,84	0,30	2,53	0,27	1,09	0,17
XSH-16	1,99	0,23	1,78	0,21	2,50	0,24	1,08	0,14
XSH-20	1,50	0,20	1,34	0,17	2,44	0,22	1,03	0,12

8.3. Değerlendirme

8.3.1. Balataların Performans Değerlendirmesi

8.3.1.1. Balata Performans Türleri

Bu çalışmada; TSE 555 standardına göre elde edilen sonuçlar aşağıdaki skala üzerinde gösterilmiştir. Bu skalada fren balataları için sürtünme katsayısı değerleri 0,25- 0,55 ve daha yukarısı için kabul edilmiş ve her bir sürtünme katsayısı aralığı skaladaki gibi harflerle kodlanmıştır. Deneyler sonucunda her bir numune için alınan sürtünme katsayısı ortalaması ve kodu Tablo 8.25’de verilmiştir.



Şekil 8.113 TS 555 standardına göre balata sürtünme katsayısı performans türleri

Tablo 8.25’de verilen sonuçlara göre, bütün numunelerin sürtünme katsayıları TSE 555 standardına uygun sonuç vermiştir. 0,25-0,55 aralığındaki sürtünme katsayısına sahip bütün numunelerin, yol taşıtlarının fren balatalarında TSE 555 standardına göre uygun olduğu Tablo 8.25’de görülmektedir.

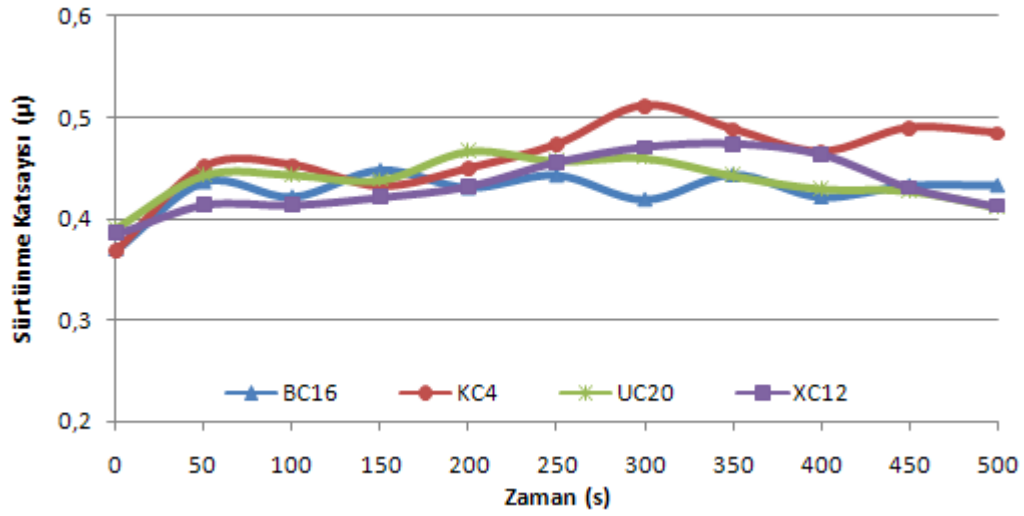
Tablo 8.25 TS 555 standardına göre deney numunelerinden alınan sonuçlar

Numune Adı	Skalada Okunan Değer	Numune Adı	Skalada Okunan Değer	Numune Adı	Skalada okunan değer	Numune Adı	Skalada okunan değer
UC-4	F	UCH-4	F	KC-4	G	KCH-4	G
UC-8	F	UCH-8	F	KC-8	G	KCH-8	G
UC-12	F	UCH-12	F	KC-12	F	KCH-12	G
UC-16	F	UCH-16	F	KC-16	F	KCH-16	F
UC-20	F	UCH-20	G	KC-20	F	KCH-20	F
BC-4	F	BCH-4	F	XC-4	F	XCH-4	G
BC-8	F	BCH-8	F	XC-8	F	XCH-8	G
BC-12	F	BCH-12	F	XC-12	F	XCH-12	G
BC-16	F	BCH-16	F	XC-16	F	XCH-16	F
BC-20	F	BCH-20	F	XC-20	F	XCH-20	F
US-4	E	USH-4	F	KS-4	F	KSH-4	F
US-8	F	USH-8	F	KS-8	F	KSH-8	F
US-12	F	USH-12	G	KS-12	F	KSH-12	F
US-16	G	USH-16	G	KS-16	F	KSH-16	G
US-20	G	USH-20	G	KS-20	F	KSH-20	G
BS-4	F	BSH-4	G	XS-4	F	XSH-4	F
BS-8	F	BSH-8	G	XS-8	F	XSH-8	F
BS-12	F	BSH-12	F	XS-12	F	XSH-12	G
BS-16	F	BSH-16	F	XS-16	F	XSH-16	G
BS-20	F	BSH-20	F	XS-20	F	XSH-20	G

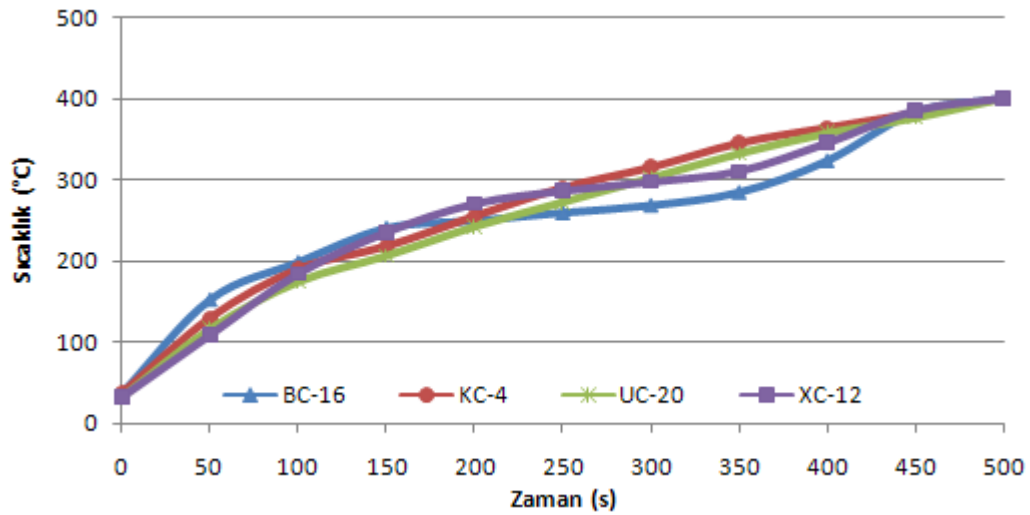
8.3.1.2. Cashew Katkılı Bor Türevlerinin Performans Karşılaştırması

Cashew katkılı üleksit (UC), kolemanit (KC), borik asit (BC) ve borax (XC) kodlu numunelerin yapılan deneyleri sonucunda en iyi sonuçların elde edildiği numunelerin sürtünme katsayısı-zaman karşılaştırılması Şekil 8.114’de verilmiştir. Borik asit katkılı numuneler içerisinde en iyi performansı % 12 cashew ve % 12 borik asit içeren BC-16 kodlu numuneden

elde edilmiştir. Kolemanit katkılı numuneler içerisinde en iyi performans % 4 cashew ve % 20 kolemanit içerikli KC-4 kodlu numuneden elde edilirken, üleksit içerikli numuneler içerisinde % 20 cashew ve % 4 üleksit içeren UC-20 kodlu numuneden en iyi performans elde edilmiştir. Borax katkılı numuneler içerisinde ise % 12 cashew ve % 12 borax içeren numuneden en iyi performans alınmıştır. Cashew ile birlikte kullanılan bor türevleri içerisinde en iyi performansı 0,46 sürtünme katsayısı oranı ile KC-4 kodlu numuneden alınmıştır. Daha sonra sırasıyla 0,43 ile UC-20 ve XC-12, 0,42 ile BC-16 kodlu numunelerden alınmıştır.



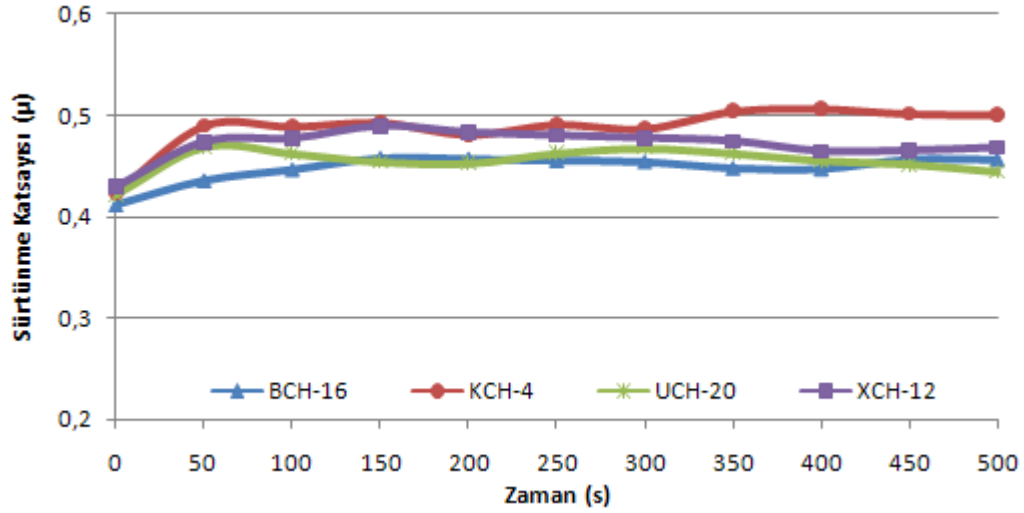
Şekil 8.114 C kodlu numunelerin 1050 kPa'da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi



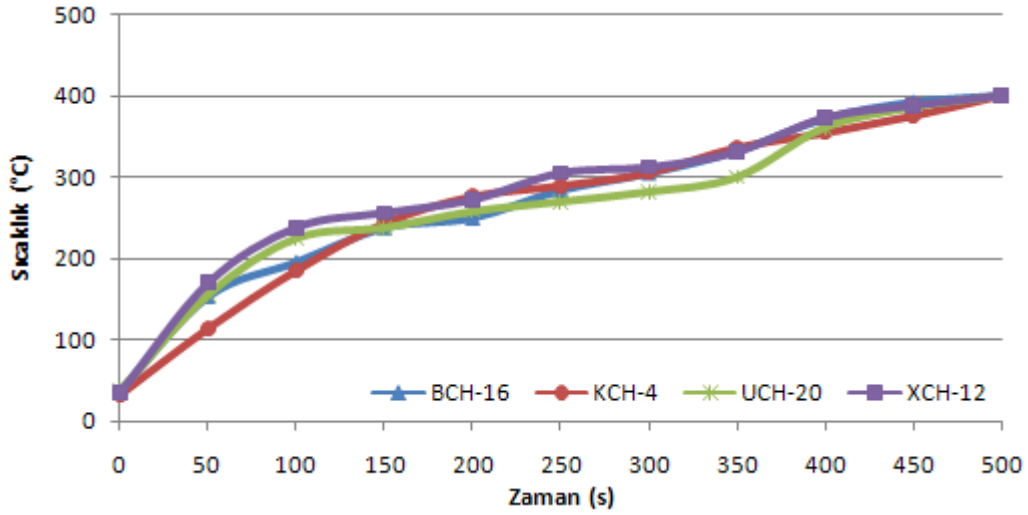
Şekil 8.115 C kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

Şekil 8.115 sürtünme katsayısında meydana gelen sıcaklık farklarının zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde en yüksek sıcaklık, sürtünme katsayısı en yüksek olan KC-4 kodlu numunede meydana gelmiştir. Sıcaklığın artışıyla birlikte bazı

numunelerin sürtünme katsayısında bir düşüş gözlenirken bazı numuneler de ise aşırı bir dalgalanma göze çarpmaktadır.



Şekil 8.116 CH kodlu numunelerin 1050 kPa'da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi



Şekil 8.117 CH kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

Şekil 8.116 ve Şekil 8.117 aynı içeriklere sahip fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonraki numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı-zaman ve sıcaklık-zaman grafiğini göstermektedir. Şekil 8.114 ve Şekil 8.116 karşılaştırıldığında fırınlama işlemi numunelerin sürtünme katsayısında artış meydana getirdiği ve kararlılık gösterdiği görülmektedir. Ayrıca fırınlama işlemine tabi tutulmamış numuneler içerisinde en iyi performansı sağlayan numune fırınlama işleminden sonrada tüm numuneler içerisinde en iyi performansı göstermiştir.

Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerden en yüksek sürtünme katsayısını veren KC-40 kodlu balata numunesinin sürtünme katsayısı değeri ortalama % 46 iken, fırınlama

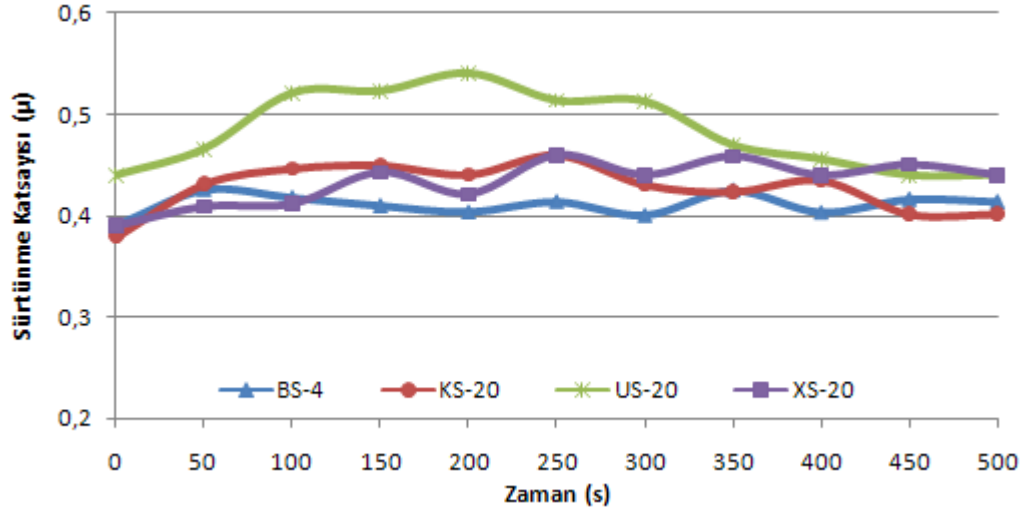
işlemine tabi tutulduktan sonra bu numunenin (KCH-4) sürtünme katsayısı % 48 olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde XCH-12 numunesinden % 47, UCH-20 numunesinden % 45 ve BCH-16 numunesinden % 44 sürtünme katsayı ortalamaları elde edilmiştir. Şekiller karşılaştırıldığında fırınlama işlemi yapılmış numunelerin sürtünme katsayılarında daha doğrusal bir grafik elde edildiği görülmektedir.

8.3.1.3. Sedir Katkılı Bor Türevlerinin Performans Karşılaştırması

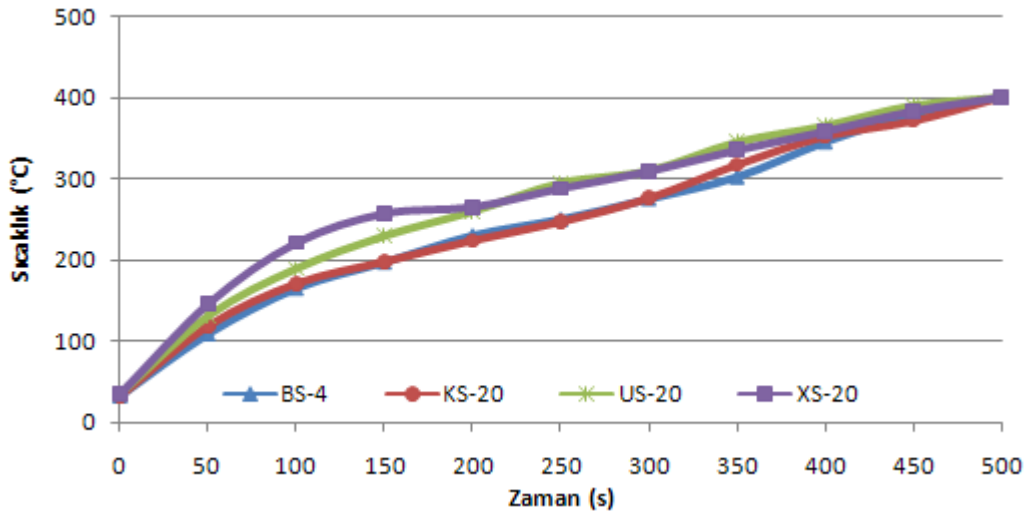
Sürtünme malzemelerinde sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılan cashew'e alternatif olarak sedir ile birlikte bor türevleri kullanılan balata numuneleri içerisinde en iyi performansı gösteren fırınlanmamış ve fırınlanmış numunelerin karşılaştırılması Şekil 8.118, Şekil 8.119, Şekil 8.120 ve Şekil 8.121'da gösterilmiştir. Sedir katkılı üleksit (US), kolemanit (KS), borik asit (BS) ve borax (XS) kodlu numunelerin yapılan deneyleri sonucunda en iyi sonuçların elde edildiği numunelerin sürtünme katsayısı-zaman karşılaştırılması Şekil 8.118'de verilmiştir. Kolemanit katkılı numuneler içerisinde en iyi performans % 20 sedir ve % 4 kolemanit içerikli KS-20 kodlu numunesinden elde edilirken, üleksit içerikli numuneler içerisinde % 20 sedir ve % 4 üleksit içeren US-20 kodlu numuneden en iyi performans elde edilmiştir. Borik asit katkılı numuneler içerisinde en iyi performansı % 4 sedir ve % 20 borik asit içeren BS-4 kodlu numuneden, borax katkılı numuneler içerisinde ise % 20 sedir ve % 4 borax içeren numuneden en iyi performans alınmıştır. % 20 sedir ve % 4 üleksit içeren US-20 kodlu numunenin sürtünme katsayısındaki iniş ve çıkışlı dalgalanma olayı fazla görülmektedir. Bunun sebebi Anderson [187] balata temas yüzeyinde ısı yükün homojensizliğinden olduğu şeklinde yorumlamıştır. Burada deney süresince disk yüzeyindeki temas bölgelerinin içine doğru ısıdaki değişim periyodik olarak değişir. Bu etkiden dolayı sürtünme katsayısında sürekli bir değişim meydana gelir. Ayrıca bu durum Batchelor [84] sürtünme çiftlerinin yüzeyindeki pürüzlerde birleşme olması ve büyümesi ile açıklar. Bu durumda bir yapışma ve bir bırakma hali sürekli tekrarlanır, bu da sürtünme katsayısında sürekli tekrarlanır, bu da sürtünme katsayısında sürekli artma ve azalma olmasına sebep olur. Sedir ile birlikte kullanılan bor türevleri içerisinde en iyi performansı 0,48 sürtünme katsayısı oranı ile US-20 kodlu numune vermiştir. Daha sonra sırasıyla 0,43 ile XS-20, 0,42 ile KS-20 ve 0,41 ile BS-4 kodlu numunelerden alınmıştır. Şekil 8.121 sürtünme katsayısında meydana gelen sıcaklık farklarının zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde en yüksek sıcaklık, sürtünme katsayısı en yüksek olan US-20 ve KS-20 kodlu numunelerde meydana gelmiştir.

Fırınlama işlemine tabi tutulmamış numunelerden en yüksek sürtünme katsayısını veren US-20 kodlu balata numunesinin sürtünme katsayısı değeri ortalama % 48 iken, fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonra bu numunenin (USH-20) sürtünme katsayısı % 51 olarak

ölçülmüştür. Aynı şekilde XSH-20 numunesinden % 47, KSH-20 numunesinden % 45 ve BSH-4 numunesinden % 46 sürtünme katsayı ortalamaları elde edilmiştir. Şekiller karşılaştırıldığında fırınlama işlemine tutulmuş numunelerin sürtünme katsayılarında daha doğrusal bir grafik elde edildiği görülmektedir.



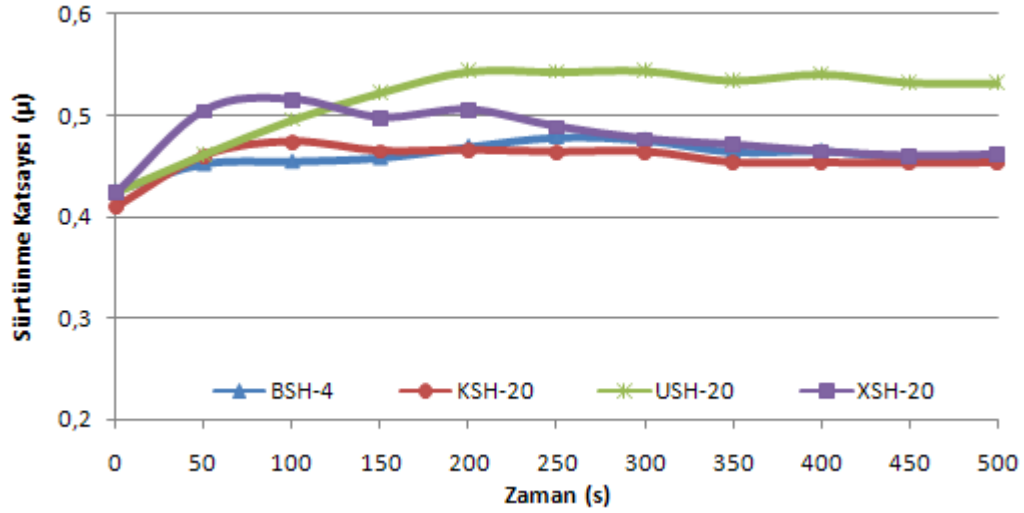
Şekil 8.118 S kodlu numunelerin 1050 kPa'da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi



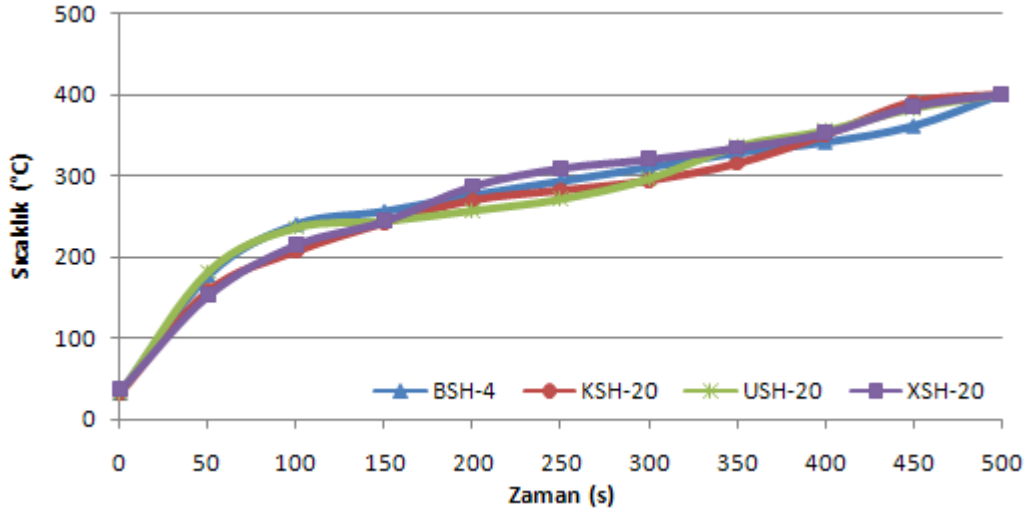
Şekil 8.119 S kodlu numunelerin 1050 kPa'da sıcaklık-zaman değişimi

Şekil 8.120 aynı içeriklere sahip fırınlama işlemine tabi tutulduktan sonraki numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafiğini göstermektedir. Şekil 8.118 ve Şekil 8.120 karşılaştırıldığında fırınlama işlemine tabi tutulmamış numuneler içerisinde en iyi performansı sağlayan numune fırınlama işleminden sonrada tüm numuneler içerisinde en iyi performansı göstermiştir. 4 saat, 180 °C fırınlama işlemine tabi tutulmuş numunelerin sürtünme katsayısında artış meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca fırınlanmamış numunelerin sürtünme

katsayısı-zaman grafiğinde görülen iniş çıkışlı dalgalanmalar fırınlanmış numunelerde görülmemektedir. Şekil 8.118’de en yüksek sürtünme katsayısı ortalamasını veren BS-4 kodlu numune 500 saniye sürede stabil olmayan sürtünme katsayısı sergilerken, aynı numune fırınlama işleminden sonra 500 saniye sürede daha uzun süreli ve stabil bir sürtünme ortalaması sergilemiştir.



Şekil 8.120 SH kodlu numunelerin 1050 kPa’da en iyi sürtünme katsayısı-zaman değişimi



Şekil 8.121 SH kodlu numunelerin 1050 kPa’da sıcaklık-zaman değişimi

8.3.3. Maliyet Analizi

Non-asbestos organik adı altında piyasaya sunulan yeni balatalarda kullanılan malzemeler genel olarak endüstriyel ürünlerdir. Fakat bu ürünlerin maliyeti, normal asbestli balatalara göre üç dört kat fazladır. Üstelik yeni geliştirilen bu endüstriyel ürünler konusunda üretici firmalar çok hassas davranarak bilgi vermekten kaçınmaktadırlar.

Balata komponentini oluşturan malzemelerin büyük kısmı yurtdışından ithal edilmekte ve büyük miktarda döviz ödenmektedir. Bu çalışma ile Türkiye’de bulunan sedir ve bor minerallerinin ve türevlerinin balata üretiminde kullanılmasıyla yurtdışına bağımlılığın azaltılması sedir ve bor minerallerinin üstün özelliklerinin sürtünme malzemeleri alanında da kullanılmaya başlanmasını sağlamaktır. Bu kapsamda yapılan çalışmaların ekonomik açıdan değerlendirilmesinde öncelikle balatada kullanılan bor minerallerinin ve türevlerinin birim fiyatları belirlenmiştir. Bu fiyatlar toptan fiyatlar olup ETİBOR-Kırka ve ETİBOR-Bandırma tesislerinden elde edilmiştir. Tablo 8.26’de görüldüğü gibi bor minerallerinin, cashew sürtünme tozunun ve cashew tozuna alternatif olarak kullanılan sedir tozunun birim fiyatları görülmektedir.

Tablo 8.26 Bor mineralleri, cashew ve sedir ürünlerinin birim fiyatları

	Borikasit	Borax	Üleksit	Kolemanit	Cashew	Sedir
TL/kg	1	0,52	0,09	0,22	1,93	0,18
\$/kg	0,64	0,33	0,05	0,14	1,25	0,11
€/kg	0,45	0,23	0,04	0,10	0,87	0,08

Balata üretiminde kullanılan bor mineralleri, cashew ve sedir oranları % 4 ile % 20 arasındadır. Cashew, sedir ve bor minerallerinin balata fiyatına etkisini belirlerken en iyi sürtünme performansını sergileyen sedir, cashew ve bor minerallerinin katıldığı numuneler hesap edilerek balatanın üretim birim maliyeti belirlenmiştir. Burada üretim masrafları dikkate alınmamış olup yalnızca kullanılan malzemelerin birim fiyatları ön plana çıkarılmıştır.

Tablo 8.27 Bor mineralleri, cashew ve sedir katkılı balataların birim fiyatları

Balata çeşitleri	Üretim fiyatı (€/kg)
Piyasadaki balata	2-2,5
Üleksit ve cashew katkılı balata	1,21
Üleksit ve sedir katkılı balata	0,79
Borikasit ve cashew katkılı balata	1,23
Borikasit ve sedir katkılı balata	0,76
Kolemanit ve cashew katkılı balata	1,21
Kolemanit ve sedir katkılı balata	0,71
Borax ve cashew katkılı balata	1,22
Borax ve sedir katkılı balata	0,72

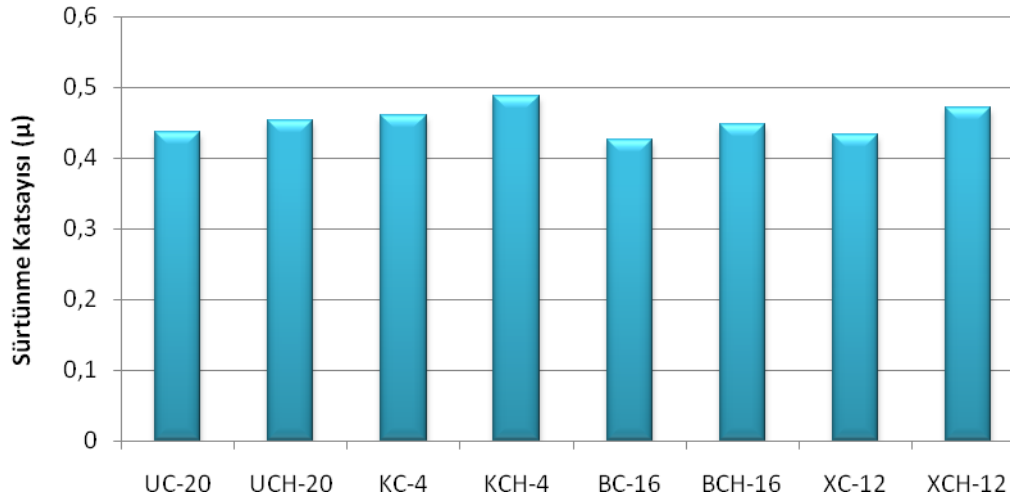
Balata komponentini oluşturan malzemelerin maliyetlerine ek olarak üleksit, kolemanit, borik asit, borax, sedir ve cashew deneyleri sonucunda en iyi performans sergileyen balata karışımlarının fiyatları Tablo 8.27’de görölmektedir.

Tablo 8.27’de göröldüğü gibi normal piyasadaki balatanın üretim fiyatı 2–2,5 €/kg civarındadır. Bu değer, ölkemizdeki balata üretici üç firmadan alınmış yaklaşık değerdir. Balata komponentinde en iyi performansı gösteren sedir ve bor mineralleri kullanılması durumunda ortalama % 76 daha ucuz balata üretilmiş olunacaktır.

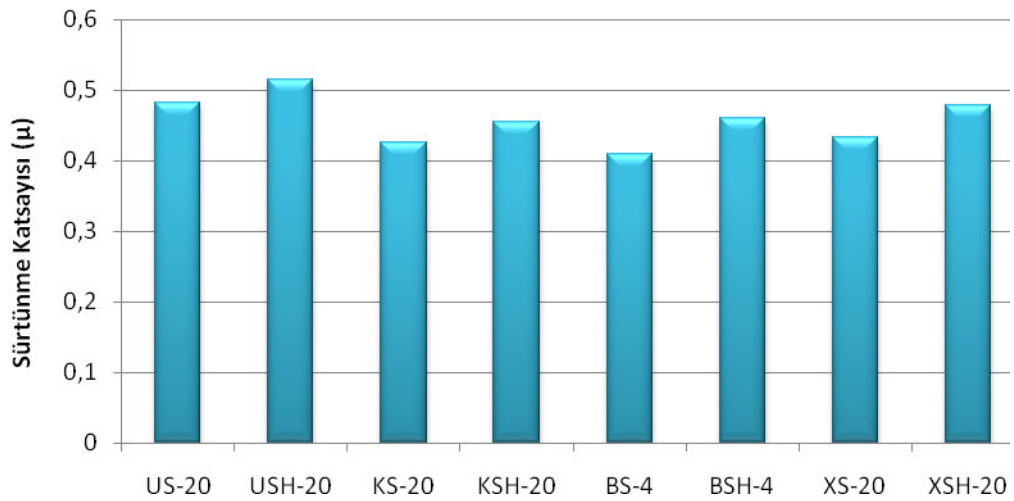
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, bor minerallerinden ham bor ürünleri üleksit, kolemanit, rafine bor ürünleri olarak borik asit, boraks pentahydrate'tan oluşan malzemeler kullanılarak bor katkılı balata üretilmiş ve üretilen balataların sürtünme-aşınma, sıcaklık, dayanım özellikleri incelenmiştir. Ayrıca sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılan cashew tozuna alternatif sedir kullanılarak sürtünme-aşınma, sıcaklık dayanım özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

1. Fren balatası olarak üretilen numunelerin optimum toz karıştırma süresi 10 dakika ve sıcak presleme basıncı da 15000 kPa olması gerekmektedir.



Şekil 9.1 Bor türevleri ve cashew katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 9.2 Bor türevleri ve sedir katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa'da sürtünme katsayısı değişimi

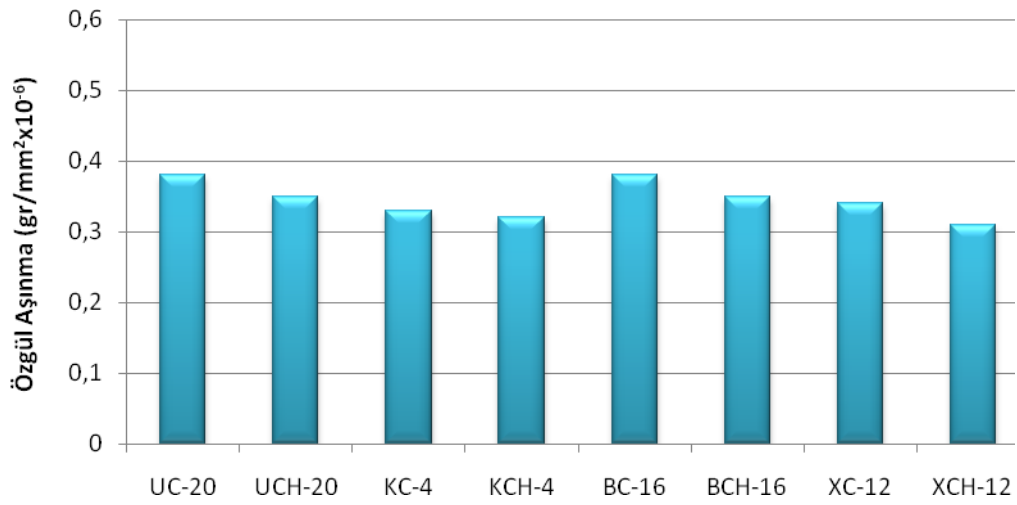
2. Sürtünme katsayısı açısından en iyi sonucu fırınlanmış numuneler verirken, bütün numuneler TSE 555 standart aralığında bulunmuştur.
3. Bor türevleri kullanılan ısıtılma tabi tutulmamış numuneler içerisinde en iyi sürtünme katsayısı performansını kolemanit katkılı cashew (KC-4) ve üleksit katkılı sedir (US-20) numuneleri göstermiştir. Isıtılma tabi tutulmuş tüm numuneler içerisinde en iyi sürtünme katsayısı performansını kolemanit katkılı cashew (KCH-4) ve üleksit katkılı sedir (USH-20) numuneleri göstermiştir.
4. En iyi sürtünme performansı sergileyen bor türevleri katkılı cashew içeren tüm numuneler içerisinde en düşük sürtünme katsayı performansı borik asitten (BC-16) alınmıştır. Sedir içerikli numunelerde ise en düşük performans yine borik asitten (BS-4) elde edilmiştir.
5. Ara yüzey sıcaklığının artmasına bağlı olarak sürtünme katsayıları azalırken, ara yüzey sıcaklığının azalması ile sürtünme katsayılarının arttığı gözlenmiştir.
6. Üleksit katkılı balataların ortalama sürtünme katsayıları borik asit ve boraks katkılı numuneler ile aynı balata grubunda çıkmıştır. Üleksit ve cashew katkılı balatalarda üleksit oranının artıp, cashew miktarının azalmasıyla sürtünme katsayısında düşüş olmuştur. % 4 Üleksit katkılı balata bileşiminde en iyi sonuç alınmıştır. Aynı sonuç cashew yerine kullanılan sedir içinde geçerlidir. Cashew yerine sedir kullanımında da üleksit oranının azalması sürtünme katsayısını arttırmıştır. Üleksit ve sedir katkılı fırınlama işlemine tabi tutulmuş numuneler, sürtünme katsayısı ortalaması olarak en iyi sonuçları vermişlerdir. Üleksit ve sedir katkılı numunelere ısıtılma işlemi uygulanması sedir tozunu cashew tozuna alternatif yapmaktadır. Çevresel etkilere dayanımı ölçmek için muhtelif sıvılarla yapılan testlerde de üleksit içerikli balata en fazla hidrolik yağdan etkilenmiştir. Fakat TS 9075 standartlarına uygundur. Numuneler de üleksit miktarı arttıkça sertlik değeri yüksek çıkmıştır. Genel olarak sürtünme katsayısını artıracak malzemelerin kullanılmasıyla birlikte %4-%12 arasında üleksit kullanımı önerilebilir. Balata bileşimine ısıtılma işlemi uygulanırsa daha iyi sonuç alınabilir.
7. Kolemanit katkılı balatalarda en iyi sonuçlar kolemanit oranının yüksek, cashew oranının düşük olduğu numuneden alınmıştır. Yani kolemanit miktarı arttıkça sürtünme katsayısı ortalaması da artmaktadır. %20 ve % 16 kolemanit kullanılan numuneler birbirine yakın sürtünme katsayısı ortalaması sergilemiştir. Isıtılma tabi tutulmuş kolemanit ve cashew katkılı numunelerde sürtünme katsayısı daha stabil kalmaktadır ve ısıtılma işlemi görmemiş kolemanit katkılı numunelere göre daha yüksek sürtünme katsayısı ortalaması sergilemektedir. Cashew ile birlikte kullanılacak kolemanit içerikli balata numunelerinde % 16-% 20 oranında kolemanit kullanılması daha iyi sonuç vermektedir.

Fakat sedir katkılı numunelerde kolemanit miktarı arttıkça sürtünme katsayısı ortalaması düşmektedir. Yani cashew ile ters bir orantı sergilemektedir. Cashew yerine sedir kullanılan kolemanit katkılı numunelerde en iyi sonuç % 4 kolemanit içerikli numuneden alınmıştır. Cashew kullanımında kolemanit artışıyla orantılı olarak numunelerin sertlik değerleri düşme eğilimi gösterirken, sedir kullanılan numunelerde kolemanit artışıyla numunelerin sertlik değeri artmaktadır. Her iki katkı maddesi (cashew-sedir) fırınlama işlemi sonucu sürtünme katsayısı ortalaması olarak en iyi sonuçları vermiştir. Yapılan çevresel etkilere dayanım testlerin de her iki katkı maddesi en fazla fren sıvısından etkilenmiştir fakat TS 9075 standartlarına uygundur.

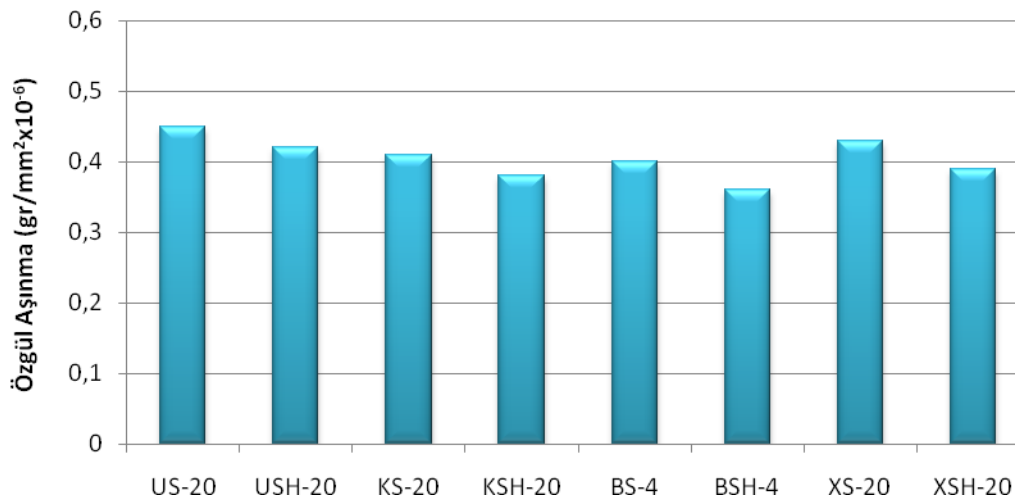
8. Borik asit ve cashew katkılı numuneler ve bu numunelerin fırınlanmış şekilleri TS 555 göre F grubunda çıkmıştır. Diğer bor türevleri kullanılan numunelere göre düşük sürtünme katsayısı sergilemiştir. Cashew tozuna alternatif olarak kullanılan sedir tozu da F grubunda yer almaktadır. Fakat sedir tozu kullanılan numunelerin fırınlama işlemi uygulanmış olanların bir kısmı G grubunda çıkmıştır. Katkı maddesi olarak cashew tozu kullanılan numunelerde % 16 oranından daha fazla borik asit kullanılması durumunda sürtünme katsayısı ortalaması olumsuz etkilenmektedir. Aynı olumsuzluk bu numunelerin fırınlanmış olanlarında da görülmektedir. Bu nedenle cashew ile birlikte kullanılacak olan borik asit içerikli balatalarda % 16 oranından daha fazla borik asit kullanılması olumsuz sonuçlar vermektedir. Cashew tozuna alternatif olarak kullanılan sedir içerikli numunelerde ise borik asit miktarı azaldıkça sürtünme katsayısı ortalaması yüksek çıkmaktadır. Aynı sonuç fırınlama işlemi uygulanmış numunelerde de görülmektedir. Sedir ve cashew kullanılan numuneler için yapılan dayanım testleri TS 9075 şartlarına uygundur. Cashew içerikli numuneler saf sudan etkilenirken, sedir içerikli numuneler fren sıvısından etkilenmiştir. Fırınlama işlemi tüm numunelerin sürtünme testlerinde stabil bir eğilim göstermiştir. Fırınlanmamış numunelerde aşınma daha yüksek çıkmaktadır.
9. Borax kullanılan numuneler borik asit kullanılan numunelerin bulunduğu F grubunda yer almıştır. Fakat fırınlanmış numunelerin birkaçı (KCH-4, KCH-8, KCH-12) G grubunda yer almıştır. % 12 oranında borax'ın cashew ile kullanımında sürtünme ortalaması en iyi çıkmıştır. Cashew kullanılan numuneler içerisinde % 12'den fazla borax kullanılması sürtünme ortalamasını olumsuz etkilemektedir. Bu durum fırınlanmış numuneler içinde geçerlidir. Cashew tozuna alternatif olarak düşünülen sedir tozu ile yapılan deneylerde borax miktarının azalmasıyla sürtünme ortalaması iyi çıkmaktadır. Aynı sonuç fırınlanmış sedir içerikli numuneler içinde geçerlidir. Sedir kullanılan numunelerde borax miktarının artması numunelerin sertliğini de

arttırmaktadır. Her iki katkı maddesi kullanılan borax içerikli numunelerin dayanım testleri TS 9075 standartlarında çıkmıştır. Cashew katkılı numuneler fren sıvısından etkilenirken sedir katkılı numuneler tuzlu su ve hidrolik yağdan etkilenmiştir.

10. Balata malzemelerine ilave edilen bor türevlerinin oranı arttıkça, numunelerin yoğunluğu bor minerallerinin çeşitliliğine göre farklılık göstermiştir. Örneğin, cashew katkılı numunelerde üleksit ve borik asit miktarı arttıkça yoğunluk artmış, kolemanit miktarı arttıkça yoğunluk azalmıştır. Sedir katkılı numunelerde ise, üleksit, kolemanit ve borax miktarı arttıkça yoğunluk artmış, borik asit miktarı arttıkça yoğunluk azalmıştır.



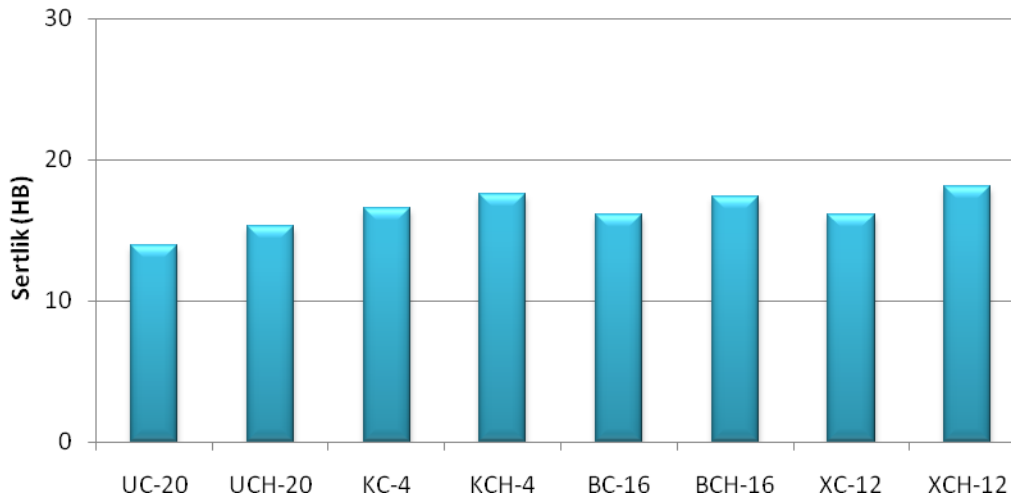
Şekil 9.3 Bor türevleri ve cashew katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa’da özgül aşınma değişimi



Şekil 9.4 Bor türevleri ve sedir katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin 1050 kPa’da özgül aşınma değişimi

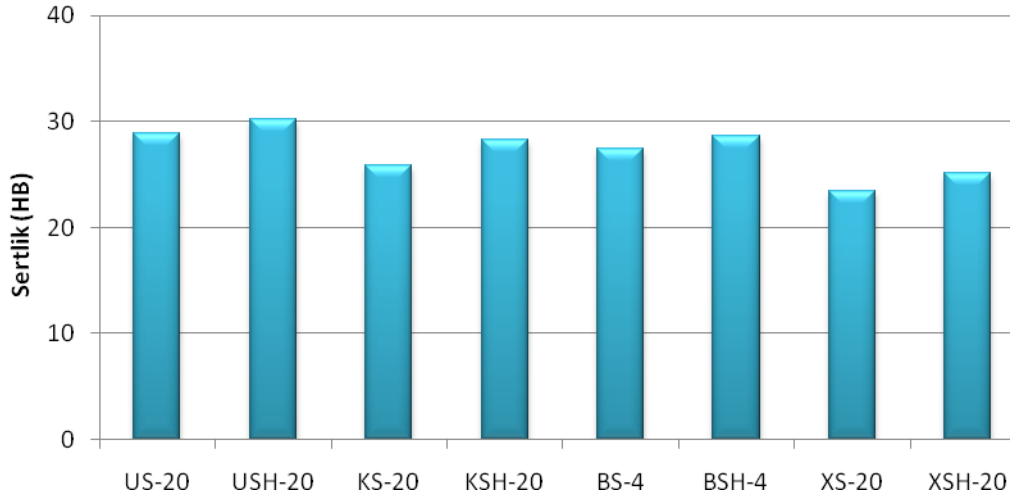
11. Fırınlama işleminin; deney numunelerinin aşınma dayanımlarını artırdığı belirlenmiştir.

12. Bor türevleri kullanılan ısıtılma tabi tutulmamış en iyi sürtünme katsayısı performansı sergileyen numuneler içerisinde en az aşınmayı kolemanit katkılı cashew (KC-4) ve borik asit katkılı sedir (BS-4) numuneleri göstermiştir. Isıl işleme tabi tutulmuş numuneler içerisinde ise en az aşınmayı kolemanit katkılı cashew (KCH-4) ve borik asit katkılı sedir (BSH-4) numuneleri göstermiştir.
13. Balata malzemelerine ilave edilen cashew ve sedir toz miktarına bağlı olarak, aşınma yüzeyin de oluşan sürtünme filminden dolayı deney numunelerinin sürtünme katsayılarının arttığı gözlenmiştir.
14. Aşınma partikülleri tarafından sürtünme filmi diye tanımlanan sürtünme tabakalarının, frenleme boyunca numunelerin sürtünme katsayılarının kararlı kalmasını sağladığı tespit edilmiştir.
15. Genelde bütün deney numunelerinde, aynı tür aşınma mekanizmaları görülmüş ve adhezif aşınmanın hem sürtünme katsayısını artırdığı, hem de deney numunelerinin aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir.
16. Deney numunelerinin aşınma miktarını azaltmak için, katı yağlayıcı olarak kullanılan grafit oranı arttırılabilir, ancak grafit miktarının sinterlenebilirliğe olumsuz etkisi dikkate alınmalıdır.



Şekil 9.5 Bor türevleri ve cashew katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin sertlik değişimi

17. Bor tozlarının ilave miktarına bağlı olarak, fırınlama sonrası sertliklerin arttığı gözlenmiştir. Fırınlama sonrası sertlikler bütün numunelerde fırınlama öncesi sertliklere göre artış göstermiştir. Fırınlama sırasında tamamlanan kürleşme reaksiyonlarının etkisiyle sertleşmenin olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9.6 Bor türevleri ve sedir katkılı numunelerde en iyi performans sergileyen fırınlanmış ve fırınlanmamış numunelerin sertlik değişimi

18. Isıl işleme tabi tutulmamış en iyi sürtünme katsayısı performansı sergileyen cashew katkılı numuneler içerisinde en düşük sertlik üleksit katkılı cashew (UC-20) numunesinde en yüksek sertlik oranı ise kolemanit katkılı cashew (KC-4) numunesinde görülmüştür. Sertlik değeri düşük olan tüm numunelerde sürtünme katsayısı daha yüksek sonuçlar vermiştir. Sertlik oranı arttıkça numunelerdeki sürtünme katsayısı performansında düşüşler gözlenmiştir. Sedir katkılı numuneler içerisinde ise en düşük sertlik borik asit katkılı sedir (BS-4) numunesinde, en yüksek sertlik ise üleksit katkılı sedir (US-20) numunesinde görülmüştür. Isıl işleme tabi tutulmuş numuneler içerisinde en düşük sertlik üleksit katkılı cashew (UCH-20) ve borax katkılı sedir (XSH-20) numunesinde, en yüksek sertlik oranı ise borax katkılı cashew (XCH-12) ve üleksit katkılı sedir (USH-20) numunelerinde görülmüştür. Cashew yerine sedir kullanılan numunelerde sertlik oranı daha yüksek çıkmıştır.
19. Fırınlama işleminin balatanın mikro yapısında etkili olduğu buna bağlı olarak sertliğin arttığı görülmektedir.
20. Sürtünme esnasında aşındırıcı diskten de sürtünme ara yüzeyine partikül geçişinin olduğu görülmüş, bu partiküllerin sürtünme ara yüzeyinde yumuşak matrisle birleşerek sürtünme tabakasında aktif rol aldığı tespit edilmiştir.
21. Balataların kararlı yapılarını koruyabilmeleri ve sürtünme katsayılarının sabit kalması için numunelerin fırınlama işlemine tabi tutulması gerekir.
22. Bütün numunelerin mikro yapı fotoğraflarından malzeme içerisindeki düşük ergime dereceli tozların sıvı faz sinterleme oluşturduğu ve buna bağlı olarak gözeneklerin küçüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca düşük buharlaşma sıcaklığına sahip malzemelerin bir kısmının fırınlama sırasında buharlaştığı gözlenmiştir.

23. Harmanlanmış balata kompozisyonunun komprime sonrasında elle rahat bir şekilde taşınabilmesi gerekir. Bunun sağlanabilmesi için karışımın nemlendirilmesi gerekmektedir.
24. Balata tozlarının homojen bir şekilde dağılımını sağlamak için 10 dakikadan daha az bir sürede karıştırma yapılmalıdır.
25. Balataların üretim aşamasında soğuk ve sıcak işlem sırasında kullanılan kalıpların balata koyulacak yuvaları aynı ölçülerde yapılmamalıdır. Sıcak presleme kalıbının balata yerleştirilecek kısmı soğuk presleme kalıbının yuvasından 1 mm² daha büyük olmalıdır.
26. Optik mikro yapılar kompozit fren balata malzemelerinin üretimlerinin başarı ile gerçekleştirildiğini göstermiştir.
27. Balataların aşınma deneyleri sonrasında, değerlendirilebilir aşınma kayıpları kaydedilememiştir.
28. Tüm deneyler boyunca ortalama sürtünme katsayısı 0,35–0,55 arasında olduğu bulunmuştur.
29. Bor ve cashew katkılı balata üretilerek yapılan deneylerde en iyi sonuçlar % 16 borik asit, % 4 kolemanit, % 20 üleksit ve % 12 borax içerikli numunelerden alınmıştır.
30. Bor ve sedir katkılı balata deneylerinde en iyi sonuçlar % 4 borik asit, % 20 kolemanit, % 20 üleksit ve % 20 borax içerikli numunelerden alınmıştır.
31. Sedir içeriğinde tanen bulunmasından dolayı, tanen içerisindeki “yağ” gibi yanabilecek maddelerin az olmasına dikkat edilmelidir.
32. Üretilen balataların tümünün asbestli geleneksel organik balatalara alternatif olarak asbest içermeyen, çevre dostu malzemeler olarak kullanılabilirliği mümkündür.
33. Bor mineralleri ile üretilen tüm numuneler TS 555 standardına göre fren balatası olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Bijwe, J., 1997, Composites as A Friction Material: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Review, Polymer Composites, 18, 3, 378-396.
2. Mutlu, İ., 2002, Seramik katkılı asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
3. Milevski, J. V., Ketz, H. S., 1987, Handbook of Reinforcements for Plastics, Van Nostrend Reinhold, NY.
4. Gopal, P., L. R. Dharani, F. D. B., 1996, Hybrid phenolic friction composites containing Kevlar pulp. Part I. Enhancement of friction and wear performance, Wear 193, 199-206.
5. Robinson, J.W., Mogensen, G.E., Pakard, K.D, Herman, J., 1992, SAE Paper 901-700.
6. Othmer, K., 1966, Friction Materials, Encyclopedia of Chemical Technology, Vol.10, 2nd Ed., John Wiley and Sons Inc., New York.
7. Gemalmayan, N., 1983, Hava Kirliliğinde Gizli Tehlike: Asbest, Bilim ve Teknik, 16, 32-33, TÜBİTAK.
8. Gemalmayan, N., 1984, Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara
9. Washabaugh, F. J., 1986, Ultra-Short Fibers Aid Brake Lining Materials, Automotive Engineering, 94, 9, pp. 51-57.
10. Leroy, S., and Fri., 1990, Feasibility Analysis of Asbestos Replacement in Automobile and Truck Brake Systems, Mechanical Engineering, March.
11. Hando, Y., Kato, T., 1996, Effects of Cu Powder, BaSO₄ and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristic of Automotive Brake Pads, Tribology Transactions, Vol.39, pp. 346–353.
12. Mutlu İ., Öner C., Fındık F., 2007, Boric Acid Effect in Phenolic Composites On Tribological Properties in Brake Linings, Materials and Design 28, 480-487.
13. Jang, H., Koa, K., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W., 2004, The Effect of Metal Fibers on The Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials, Wear, Vol.256, pp. 406–414.
14. Hee, K. W., Filip P., 2005, Performance of Ceramic Enhanced Phenolic Matrix Brake Lining Materials for Automotive Brake Linings, Wear, Vol.259, pp. 1088–1096.
15. Kurt, A., Boz, M., 2005, Wear Behavior of Organic Asbestos Based and Bronze Based Powder Metal Brake Linings, Materials and Design, Vol.26, pp. 717–721.

16. Liu, Y., Fan, Z., Ma, H., Tan, Y., Qiao, J., 2005, Application of Nano Powdered Rubber in Friction Materials, *Wear*, Vol.261, pp. 225–229.
17. Cho, M. H., Ju J., Kim, S. J., Jang, H., 2006, Tribological Properties of Solid Lubricants for Automotive Brake Friction Materials, *Wear*, Vol.260, pp. 855–860.
18. Lu Y., 2006, A Combinatorial Approach for Automotive Friction Materials: Effects of Ingredients on Friction Performance, *Composites Science and Technology*, Vol.66, pp. 591–598.
19. Ma, Y., Martynkova, G. S., Valaskova, M., Matejka, V., Lu, Y., 2008, Effects of ZrSiO₄ in Non-Metallic Brake Friction Materials on Friction Performance, *Tribology International*, Vol.41, pp. 166–174.
20. Mohanty, S., Chugh, Y. P., 2007, Development of Fly Ash-based Automotive Brake Lining, *Tribology International*, Vol.40, pp. 1217–1224.
21. Kim, S. J., Cho, M. H., Cho, K. H., Jang, H., 2007, Complementary Effects of Solid Lubricants in The Automotive Brake Lining, *Tribology International*, Vol.40, pp. 15–20.
22. Hong, U. S., Jung, S. L., Cho, K. H., Cho, M. H., Kim, S. J., Jang, H., 2008, Wear Mechanism of Multiphase Friction Materials with Different Phenolic Resin Matrices, *Wear*, pp. 6.
23. Matejka, V., Lu, Y., Fan, Y., Kratosova, G., Leskova, J., 2008, Effects of Silicon Carbide in Semi-Metallic Brake Materials on Friction Performance and Friction Layer Formation, *Wear*, Vol.265, pp. 1121–1128.
24. Azaklı, Z., Savaşkan, T., 2008, An Examination of Friction and Sliding Wear Properties of Zn-40Al-2Cu-2Si Alloy in Case of Oil Cut Off, *Tribology International*, Vol.41, 9-16.
25. EL-Tayeb, N. S. M., Liew, K. W., 2009, On The Dry and Wet Sliding Performance of Potentially New Frictional Brake Pad Materials for Automotive Industry, *Wear*, Vol.266, pp. 275–287.
26. Washabaugh, F. J., 1987, EMCOR 66 Ultra-Short Fibers for Asbestos-Free Friction Materials, SAE 860630.
27. Kondoh, K., Takano, Y., Takeda, Y., 1997, Friction and Wear Properties of Integrated Composite Copper-Based Friction Materials, SAE 970979.
28. Mutlu, İ., Çevik, İ., Öner, C., 2002, Borik Asit Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, 3rd International Powder Metallurgy Conference September 4-8, Turkish Powder Metallurgy Association, pp.1307-1314, Gazi Üniversitesi, Ankara,
29. Crosa, G., Baumvol, I. J. R., Friedrich, K., 1993, Advances In Composite Tribology, Composite Materials Series, Vol.8, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.

30. Yamaguchi, Y., 1990, Tribology of Plastic Materials, Tribology Series, Vol.16, 1st Ed., Elsevier, Netherland.
31. Streib, W. S., 1983, Encyclopedia of Composites Materials and Components, M. Grayson. Ed., John Wiley.
32. Fazan, P., Giezendanner, H. R., Van-Den-Hurk, H., 1988, Engineering Products Of Kevlar Para-Aramid Pulp For High Performance Brake Linings, 6th SAE Annual Colloquium, pp. 1-25, Orlando, October.
33. Kato, T., Magario, A., 1994, Friction and Wear Properties of Kevlar 29 Fiber Reinforced Composites, Tribology Transactions, Vol.37, pp. 559.
34. Sinha, S. K., Biswas, S. K., 1995, Tribological Properties of Compression Molded Cast Composites of Kevlar 49, Journal of Material Science, Vol.30, pp. 2430.
35. 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, Vol.239, pp. 229–236.
36. Bahadur, S., Gong, D., 1992, The Action of Fillers In The Modification of The Tribological Behavior of Polymers, Wear, Vol.158, pp. 41–59.
37. Mutlu, İ., Çevik, İ., Öner, C., 2002, Fren Balatalarında Boraks ve Borik Asitin Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, 1st International Boron Symposium, 3-4 October, Kütahya.
38. Subramaniam, N., Sinha, B. R., Blum, F. D., Chen, Y. R., Dharani, L. R., 1991, ‘Glass Fiber Based Friction Materials’, International Journal of Polymer Materials, Vol.15, pp. 93–102.
39. Jang, H., Kim, S. J., Cho, M. H., Lim, D. S., 2001, Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in The Automotive Friction Material, Wear, Vol.251, pp. 1484–1491.
40. Kim, Y. C., Cho, M. H., Kim, S. J., Jang, H., 2008, The Effect of Phenolic Resin, Potassium Titanate, and CNSL on The Tribological Properties of Brake Friction Materials, Wear, Vol.264, pp. 204–210.
41. Tanaka, K., Ueda, S., Noguchi, N., 1973, Fundamental Studies on The Brake Friction of Resin-Based Friction Materials, Wear, Vol.23, pp. 349–365.
42. Rhee, S. K., 1971, Wear of Metal Reinforced Phenolic Resin, Wear, Vol.18, pp. 471–477.
43. Vishwanath, B., Verma, A. P., Kameswaro Rao, C. V. S., 1993, Effect of Reinforcement on Friction and Wear of Fabric Reinforced Polymer Composites, Wear, Vol.167, pp.93-99.
44. Stadler, Z., Krnel, K., Kosma, C. T., 2008, Friction and Wear of Sintered Metallic Brake Linings on A C/C-SiC Composite Brake Disc, Wear, Vol.265, pp. 278–285.

45. Luo, R., 2002, Friction Performance of C/C Composites Prepared Using Rapid Directional Diffused Chemical Vapor Infiltration Processes, *Carbon*, Vol. 40, pp.1279-1285.
46. Luo, R., 2002, Fabrication of C/C Composites By An Electrified Preform Heating CVI Method, *Carbon* 1.
47. Filip, P., Weiss, Z., Rafaja, D., 2001, On Friction Layer Formation in Polymer Matrix Composite Materials for Brake Applications, *Wear*, Vol. 9028, pp. 1–10.
48. Boz, M., Kurt, A., 1988, The effect of Al_2O_3 on the friction performance of automotive brake friction materials.
49. Yamashita, Y., Hiroshi, A., Kawase, M., Iwata, K., 1988, High Performance Asbestos Free Friction Material for Disk Brake Pads with The Controlled Grain Structure, Sumitomo Electric Industries, Ltd., SAE 890-861.
50. Youssef, H., Comte, C., 1989, Consolidation of High Performance Friction Materials, Alliage Frittes Metafram, Beauchamp, France, MPR, March.
51. Stocks, A. I., Giezendanner, H., Van-Der-Hurk, H., 1985, Asbestos-Free Clutches and Brakes Reinforced with Kevlar-Aramid Fibers, *Int. J. of Vehicle Design*, 6, 4/5, pp. 483–487.
52. Cho, M. H., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W., Jang, H., 2003, Tribological Study of Gray Cast Iron with Automotive Brake Linings: The Effect of Rotor Microstructure, *Tribology International*, Vol.36, pp. 537–545.
53. Cho, 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*, Vol.264, pp. 291–297.
54. Natarajan, N., Vijayarangan, S., Rajendran, I., 2006, Wear Behavior of A356/25SiCp Aluminum Matrix Composites Sliding Against Automobile Friction Material, *Wear*, Vol.261, pp. 812–822.
55. Mackin, T. J., and Fri., 2002, Thermal Cracking in Disk Brakes, *Engineering Failure Analysis*, Vol.9, pp. 63–76.
56. Nakanishi, H., and Fri., 2002, Development of Aluminum Metal Matrix Composites (Al-MMC) Brake Rotor and Pad, SAE, March.
57. Sallit, I., and Fri., 1998, Characterization Methodology of A Tribological Couple: Metal Matrix Composite/Brake Pads, *Elsevier Materials Characterization*, Vol. 40, pp. 169–188.
58. Yılmaz, A. 2002, "Her Derde Deva Hazinemiz Bor", *TUBİTAK-Bilim ve Teknik Dergisi*, Ankara, Mayıs.
59. <http://www.etiholding.gov.tr> ETİBOR A.Ş. web sitesi erişim tarihi 05.04.2009

60. Helvacı, C., Firman, R., J., 1976, Geological setting and mineralogy of Emet borate deposits, Turkey. Applied Earth Sciences. Extract from Transactions/Sections B of the Inst. of Mining and Metallurgy. Vol. 85, p. 141-152.
61. Helvacı, C., 1977, Geology, mineralogy and geochemistry of the borate deposits and associated rocks of the Emet Valley, Turkey: Ph.D. Thesis, University of Nottingham, England.
62. <http://www.boraxtr.com/boraxtr/Anadosya/bormadennedir.html> erişim tarihi 09.04.2009
63. Çinkı, M., 2001, Ulusal Maden Varlığımız ve Bor Gerçeği, Ankara Ticaret Odası, Ankara.
64. Uygur, M. E., 1986, Toz metalürjisi seminer notları, SEGEM, İstanbul.
65. Öveçoğlu, M. L., 1997, Toz metalürjisi tarihsel gelişim, üretim aşamaları ve yeni eğitimler, 9. Uluslararası metalürji ve malzeme kongresi, 449-475, İstanbul, Türkiye.
66. Uygur, M. E., 1996, Toz metalürjisi ekonomik bir üretim tekniği, 1. Ulusal toz metalürjisi konferansı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
67. <http://www.mpif.org/industhtml>, Powder Metallurgy Industry, 1995, 24.02.2009, s. 1-3.
68. Ersümer, A., 1970, Toz metalürjisi sert metal sinterleme, İstanbul Üniversitesi matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
69. German, R. M., 1997, The fundamental principles of powder metallurgy, Powder metallurgy, papers/powder metallurgy.html, 1-7.
70. Kurt, A., 1992, Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-55.
71. Ekşi, A., 1996, Metal tozu üretim teknikleri, Endüstriyel Teknoloji, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara, 2: 2.
72. German, R. M., 1994, Powder metallurgy science, Metal powder industries federation, Princeton, pp. 84-125.
73. Roll, K. H., 1984, History of powder metallurgy, Metals Handbook, 9th edition, Vol.7, ASM Metals Park, Ohio.
74. Thimmler, F., Oberacker, R., 1993, Introduction to powder metallurgy, Printed and bound in Great Britain at the university press, Cambridge.
75. Uygur, E. M., 1979, Metal tozlarının imali, ODTÜ Uygulama araştırmalar dergisi, cilt.2, sayı.5, Ankara.
76. Lawley, A., 1988, Apelian, D., Process control in powder metallurgy, Department of materials engineering, Drexel university, Philadelphia, USA.

77. Kara, H., Çelebi, T. M., Aslanoğlu, Z., Övecioğlu, M, L., 1995, Elementel volfram ve karbon tozlarının mekanik alaşımlama, sinterleme süreçleri ve karakterizasyonu, 8. Uluslararası metalürji ve malzeme kongresi, 607-613, İstanbul, Türkiye.
78. Libsch, T. A., Rhee, S.K., 1978, Microstructural changes in semimetallic disc brake pads created by low temperature dynamometer testing, *Wear*, 46: 208-212.
79. Tanberk, O., 1997, Toz metalürjisinde Türkiye'nin yeri, 9. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, Türkiye, 11-15.
80. Tsukeman, S. A., Robert, E. H., Massey, H. S. H., 1965, Powder metallurgy, Lecturer in Metallurgy, University of Sheffield, pp. 1-9, England.
81. Aslan, S., 2005, SiC ve grafit takviyeli çinko alüminyum hibrid kompozit malzemelerin aşınma davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
82. Staab, G. H., 1999, Laminar composites. Butterworth-Heinemann, Chapter 1.
83. Bhushan, B., 2001, Principles of tribology. Modern Tribology Handbook, Volume I, CRC Press.
84. Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W., 2001, Engineering Tribology, Heinemann, Boston, 1:36-44.
85. Ferrante, J., Abel, P. B., 1999, Surface physics in tribology. Chapter 3, Handbook of Micro/Nanotribology, 2nd ed
86. Ludema, K. C., Introduction to Wear. University of Michigan, in ASM Handbook, Vol 18.
87. Uygur, M. E., 1996, Balata üretim teknolojisi, I.Ulusal Toz metalurjisi kongresi, Bildiriler kitapçığı, Gazi Üniversitesi, sf. 17 , Ankara.
88. Topbaş, M. A., 1993, Endüstri malzemeleri, Yıldız Üniversitesi Matbaası, Cilt. 2, 264 sf , İstanbul.
89. Wakelin, R. J., 1974, Tribology: The friction,lubrication, and wear of moving parts Annual Review of Materials Science, 4:221-53.
90. Szeri, A. Z., McGraw, H.,1980 ,Tribology (Friction,Wear, Lubrication), Hemisphere pab.,Washington ,1:30-75.
91. Yılmaz, F.,1997 , Sürtünme ve aşınma, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi , İstanbul, Türkiye, 229-247.
92. Ashby, M. F. and Jones, D. R. H., 1996 , Engineering materials 1, 2nd edition, Butterworth, Heineman.
93. Gediktaş, M., 1968, Sürtünme malzemelerinin deneysel tayini, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul, 10-80.

94. Holinski, R., 2001 , Fundamentals of dry friction and some practical examples, *Industrial Lubrication and tribology*, 53 : 61-65.
95. Persson, B. N. J., 1994, *Theory of Friction*, The American Physical Society 50: 47-71.
96. Tabor, D., 1996, Friction as a dissipated process. Friction of organic polymers in fundamentals of friction, *Macroscopic and Microscopic Processes*, 220:3.
97. Moore, D. F., 1975, *Principless and Application Tribology*, Pergamon Press, Oxford, 109-156.
98. Kayalı, E. S., 1996, Aşınma ve kaplı takımların aşınması, Nato-TU PVD kaplamaları projesi, İ.T.Ü. Kimya-Metalürjisi Fakültesi, İstanbul, 5-18.
99. Fedorchesco, I. M., Kırýachek, V. M., 1970, New sintered friction materials, *Fiction and Antifriction Materials*, 4:139-142.
100. Alision, V. V., Krogelsky, I. V., 1981, *Tribology Handbook*, Pergamon Press, Oxford, 2:35-56.
101. Tuç, B., 2003, *Tribology*, Basılmamış Ders Notları, Gazi Üniversitesi, Ankara.
102. Kjeldsteen, P., Trilk, N., 1995, Wear map production on P/M materials and the definition of transition, *The Danish for Powder Metallurgy*, Nordberg, Denmark, 50-110.
103. Trilk, N. C., Eyre, T. S., 1993, *Tribology Methodology*, Brunel University, Kingston Lane, Uxbridge, U.K., 114-145.
104. Halling, J., 1983, *Principles of Tribology*, The Macmillian Press Ltd. America, 83-98.
105. Testing for materials selection, 1991, *Advanced materials and processes*, *International Journal of Fatigue*, 13: 99-191.
106. Bedge, D. And Starcevic, J., 2003, Topographic properties of the contact zones of wear surfaces in disc brakes, *Wear*, 254:195-202.
107. Rigney, D. A., 1988, Sliding wear of metals, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 18:141-63.
108. Godet, M., 1984, The third-body approach: A mechanical view of wear, *Wear*, 100:437-52.
109. Sasada, T., Oike, M., Emori, N., 1984, The effect of abrasive grain size on the transition between abrasive and adhesive wear, *Wear*, 97:291-302.
110. Halling, J., 2000, *Principles of tribology*, The Macmillan Process. Ltd. pp.72-92
111. Dönmez, A. G., 2000, Asbest dışı elyaflarla üretilen balata malzemelerinin özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
112. Bowden, F. P., and Tabor, D., 1994, *The friction and lubrication of solids*, pp. 12-16, 29-31, 52-55, 78-79, 187-191.

113. Reinsch, E. W., 1970, Sintered metal brake linings for automotive applications, Delco-Moraine division, General motors corp. Dayton, Chapter 2, 9-21, Ohio.
114. Powder metallurgy practice and application, sintered friction materials, 1966, Chapter 9, 198-203.
115. Klar, E., 1983, Powder metallurgy, Metals Handbook 9th edition, by the American society for metals, Chapter 25, pp. 1-14, USA.
116. Demirsoy, M., 1973, Balatalar, Mühendis ve Makine, cilt.17, sayı.189, 157-170, Ankara.
117. Fedorchesco, I. M., Pamaioti, I. I., Derkacheva, G. M., Dzykovich, I. Y., Gordon, G. N., 1970, Studies of friction materials, Friction and antifriction materials, pp. 139-150, N. Y., London.
118. Anderson, A.E., 1992, Friction and Wear of Automotive Brakes, Friction, Lubrication and Wear Technology ASM Handbook, Vol.18, 1st Ed.,USA,
119. Ayar. H. H., Disk Fren Balatalarında Bileşimin Performansa Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1991
120. Crouse, W.H., Çev: Anlaş, İ., 1979, Otomobil Şasisi, E.T.Y.Ö.O. Matbaası, Ankara.
121. Boz, M., 1999, Toz Metalürjisi ile Üretilmiş Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
122. TS 555, 1992, Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Balatalar-Sürtünmeli Frenler İçin, Türk Standartları Enstitüsü, 1. Baskı, Ankara.
123. Anlaş, İ., 1988, Şasi temel ders kitabı, M. E. B. yayınları, İstanbul.
124. Gemalmayan, N., 1986, Asbestsiz Sürtünme Malzemelerinin (Balataların) Yapımı ve Uygulanması, 2. Ulusal Makine Tasarımı ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara.
125. Baker, R., 1992, Changes Caused By Legislation Against Asbestos, Powder Metallurgy, 35, 4, 255-256.
126. Pektaş, İ., 1995, 21. Yüzyıl Malzemeleri, Karbon-karbon Kompozit Malzemeler, Teknik Gelişim, Sayı11-12-13.
127. Gibson, D. W. and Taccini, G. J., 1988, Carbon/Carbon Friction Materials for Dry and Wet Brake and Clutch Applications, Hitco, 890950 Gardena, CA.
128. Toplum ve Çevre Sağlığı Açısından Soru Cevaplarla Asbest, 1991, Türk Sağlık Ajansı Yayınları 1, Ankara.
- 129.İRkeç, T., 1990, Asbest, MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, Eğitim serisi no 31, Ankara.
130. Erdil, E., Sarıkaya, Y., 1984, Temel Üniversite Kimyası, Hacettepe Kitap LTD., Ankara.
131. Sophie, K. T. and mason, E., 2002, Asbestos: Mineral and Fibers, Division of Chemical Health and Safety of the American Chemical Society.

132. Berry, G., 1994, Mortality and Cancer Incidence of Workers Exposed To Chrysotile Asbestos In The Friction Product Industry, Ann. Occup. Hyg., 38, 4, 539-546.
133. Katalog, 1993 , Basarit Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri, Deutsche Basaltsteinwolfe GmbH, Rodetal 40 D-3406 Bovenden, I, Germany.
134. Welch, P. A. and A. F., 1953, The Development of Mineral Wool From Florida Minerals, Greaves-Walker, Fla. Eng. and Ind. Exp. Sta. Bull. 59.
135. Katalog, abex, 1983, Friction Products Division, Michigan USA.
136. Şişecam A.Ş., Cam elyaf, www.sisecam.com.tr, erişim tarihi 08.02.2009
137. Hull, D., 1987, An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, New York.
138. Knox, C. E., 1982, Fiberglass Reinforcement, Handbook of Composites, Van Nosrand Reinhold Company. 136-159.
139. Eckert, A., Bethke, H., 1987, Neue Erkenntnisse zur Asbestubstitution in Reibbelagen (Recent Development and Results in the Substitution of Asbestos in Friction Materials), Automobiltechnische Zeitschrift, 89:145-147, 150-152.
140. Genel ürün kataloğu, İzocam Ticaret ve Sanayi A.Ş., Dilovası Mevkii, 41810 Gebze/Kocaeli.
141. Katalog, 1998, Carborundum Resistant Materials, GmbH, Postfach 160260, Deutschland.
142. DPT, 1975, 6. Beş Yıllık Kalkınma Planı, ÖİK Raporu. Mica: Mineral Research Consultative Comitte, London, 22 p 2 Turner, D.C..
143. Othmer, K., 1967, Encyclopaedia of Chemical Technology, Vol.13, 2nd Ed, John Wiley And Sons Inc., NewYork.
144. Lide, D. R., 1997-1998, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 78.th edition.
145. <http://web.umn.edu/~karakus/natural/sld011.htm> erişim tarihi 28.02.2009
146. Alçı Teknolojisi, 1978, M. T. A. Teknoloji Servisi Başkanlığı Endüstriyel Hammaddeler ve Seramik Bölümü Yayınları, Ankara.
147. Çavuşoğlu, E., N., 1989, Döküm Teknolojisi I, İTÜ, İstanbul.
148. Lavrence, A, R., 1975, Industrial Minerals and Rocks, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc., 4rd Edition, New York.
149. Kaya. F., 1983, Plastikler Katkı Maddeleri ve İşleme Metotları, 1. Baskı, Kıpış Dağıtımcılık, İstanbul.
150. Akkurt, S., 1991, Plastik Malzeme Bilgisi, 1. Baskı, Birsan Yayınevi, İstanbul.
151. Mete, Z., 1985, Kütahya Alayunt Yöresi Diatomit Yataklarının İzole Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Seramik Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, s.253-260, Ankara.

152. Ekmekyapar, T., Örüñ, İ., 1997, İnşaat Malzeme Bilgisi, 3. Baskı, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Tesisi, Erzurum.
153. Süme, V., Güner, M. S., 1999, Yapı Malzemesi ve Beton 2, Aktif Yayınevi, Rize.
154. Tekinel, O. ve Ark., 1999, İnşaat Malzeme Bilgisi, K.S.Ü. Rektörlüğü Yayın no 58, Kahramanmaraş.
155. Othmer, K., 1966, Phenolic Resin, Encyclopaedia of Chemical Technology, Vol. 15, 2nd Ed., John Wiley And Sons Inc., New York.
156. Hao Ko, T., Sheng Ma, T., 1998, Effect of Post Curing on The Mechanical Properties of Carbonized Phenolic Resins, Polymer Composites, 19, 4, pp. 456-462.
157. Hakdiyen, İ., 1972, Genel ve teknik kimya, S 257-258, 135-136.
158. Esin, A., 1981, Properties of Materials for Mechanical Design, 1. Baskı, ODTÜ Mühendislik Fakültesi.
159. Yaşar, H., 1992, Plastikler Dünyası, 1.Baskı, TMMOB, Ankara.
160. Dong, F., Blum, F. D., Drahani, L.R., 1996, Polimer-Polimer Composites, 4, pp. 155-159.
161. Parr, E. A., 1997, Endüstriyel Kontrol El Kitabı, MEB, İstanbul.
162. Şahin S., Özdemir İ., Ünlü B. S., 2002, T/M Yöntemi ile Üretilmiş Al-SiCp Kompozitlerde Üretim Parametrelerinin Aşınma Davranışına Etkisi, 3rd International Powder Metallurgy Conference, pp. 951-957, Ankara, Türkiye.
163. Yetgin S. H., Aydın M., Aksoy A., Ünal R., 2005, The Effect of the Mixer Type and Ratio of Reinforcement Particle on the Mechanical Properties of Nbc Reinforced Al Composite Material Produced Via Powder Metallurgy, EURO PM2005 Congress And Exhibition, Prague, Czech Republic, p:721-725.
164. Kuhn, H. A., Lawley, A. 1978, Powder Metallurgy Processing New Techniques and Analyses, Academic Press, New York, San Francisco.
165. Oehl K. H. and Paul H. G., 1990, Brake Linings for Road Vehicles. Verlag Moderne Industry AG&Co, D- 8910, Box 1751, Germany.p. 4-44.
166. TS 9076, 1991, Fren Balataları-Malzeme Sürtünme Özelliklerinin Küçük Deney Parçaları ile Değerlendirilmesi, T.S.E., 1. Baskı, Ankara, Nisan.
167. Gemalmayan, N., 1987, Ankara’da Pilot Bölge Seçilen Kızılay Kavşağında Taşıtların Fren sistemlerinden Atılan Tozlarda Asbest Analizi ve Sonuçları, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, s.79-80, Ankara.
168. <http://goldenproducts.org/html/dust.html> erişim tarihi 19.01.2009
169. Azam-Ali S. H., 2001, Judge Schumacher Centre for Technology and Development Bourton on Dunsmore, Rugby, Warwickshire, UK.

170. Peter J. B., 2001, Compositions, Functions, and Testing of Friction Materials and Their Additives, August.
171. Bor LTD, 2002, Bor Ürünleri, www.boraxtr.com.
172. TS 12464, 1998, Demiryolu Taşıtları-Fren pabucu-Kompozit Malzemeli-Asbest ihtiva etmeyen, T.S.E., 1. Baskı, Ankara, Nisan.
173. TS 139, 1992, Metalik Malzemelerin Brinell Sertlik Deneyi, T.S.E., 1. Baskı, Ankara,
174. Güleç, Ş., Aran, A., 1993, Malzeme Bilgisi, İTÜ Makine Fakültesi, s.153, İstanbul.
175. Akbıyık, H., 1966, Malzeme Bilgisi, Ogun Matbaası, s.101, Ankara.
176. Kayıran, E., 1999, Malzeme Teori ve Pratik, Nurol Matbaacılık, s. 43, İskenderun.
177. Baydur, G., 1987, Malzeme, MEB, s. 55, İstanbul.
178. Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S., 2002, On The Nature of tribological Contact in Automotive Brakes, *Wear*, 252, 26–36.
179. Yongzhong, Z., and Guoding, Z., 2003, Friction and wear behavior of copper matrix composites reinforced with SiC and graphite particles. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai.
180. Rohatgi, P. K., Liu, Y., Ray, S., 1992, Friction and wear of metal-matrix composites. ASM Handbook, Vol 18, University of Wisconsin-Milwaukee.
181. Ostermeyer, G. P., 2003, On The Dynamics of The Friction Coefficient, *Wear*, 254:852-858.
182. Kato, K., 1990, Tribology of Ceramics, *Wear*, 136:117-133.
183. Wirth, A., Eggleston, D., Whitaker, R., 1994, A Fundamental tribochemical study of the body layer formed during automotive friction braking, *Wear*, 179:75-81.
184. Arnold, E. A., 1983, Friction, lubrication and wear technology, ASM handbook, 18:569-577.
185. Ravikiran, A., Jahanmir, S., 2001, Effect of contact pressure and load on wear of alumina, *Wear*, 251: 980-984
186. Geçkinli, A. E., 1992, İleri Teknoloji Malzemeleri, Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul, 20-50.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Otomotiv Öğretmenliği bölümünü kazandı. 2002 yılında mezun oldu. Ocak 2003'de Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Bilim Dalında Yüksek Lisans çalışmasına başladı ve 2005 yılında bitirdi. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı Otomotiv Bilim Dalında doktora eğitimine başladı. 2006-2009 tarihlerinde Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi bölümünde proje asistanlığı ve aynı zaman da ders ücreti karşılığı öğretim görevlisi olarak görev yaptı.

İlker SUGÖZÜ