

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

**KOMPOZİT MALZEMELERİN FREN BALATALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
VE FRENLEME PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim KOCABAŞ

(092120101)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Konstrüksiyon ve İmalat

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 12 Haziran 2012

HAZİRAN - 2012

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

**KOMPOZİT MALZEMELERİN FREN BALATALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE
FRENLEME PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim KOCABAŞ

(092120101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 / 06 / 2012

Tezin Savunulduğu Tari : 27 / 06 / 2012

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cengiz ÖNER (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Latif ÖZLER (F.Ü)

HAZİRAN-2012

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda, değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, beni bu konuya yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI'ya her konuda bana destek olduğu, çalışmalarımın her aşamasında yol gösterdiği, yardımlarını esirgemediği ve en önemlisi güvendiği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında beni daima destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocalarım ve çalışma arkadaşlarım, mikro yapı çalışmalarındaki yardımlarından ve önerilerinden dolayı Yrd. Doç. Dr. M. Yavuz SOLMAZ'a mekanik testlerin yapılmasında, Doç. Dr. Cengiz ÖNER'e organik tozların öğütülmesinde, Arş. Gör. Gökçen AKGÜN, Arş. Gör. Yusuf BİLGİÇ ve bölümümüz öğrencisi Tuncay ÇAKIR'a numunelerin üretileceği kalıpların tasarımında ve üretiminde yardım ve önerilerinden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Latif ÖZLER, Arş. Gör. İ. Hakkı ŞANLITÜRK ve Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü çalışanlarına her türlü yardımlarından, fikirlerinden, maddi ve manevi desteklerinden dolayı en içten şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Aile olmanın önemini ve güzelliğini, bana her zaman sevgi, saygı ve güven duyarak, her konuda destekleyerek gösteren ve çalışmanın her aşamasında özverilerinden ve sabırlarından dolayı sevgili eşim Pelin İSTANBULLU KOCABAŞ'a teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tezi, M.F.11.27 nolu proje kapsamında Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAB) tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAB'a teşekkür ederiz.

İbrahim KOCABAŞ
ELAZIĞ 2012

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	11
3.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri	11
3.2. Matris Malzemeler.....	12
3.3. Katalizörler	12
3.4. Dolgu Malzemeleri ve Boyalar.....	12
3.5. Takviye Malzemeleri	13
3.5.1. Cam Lifler	13
3.5.2. Wisker.....	13
3.5.3. Karbon Fiber.....	14
3.5.4. Kevlar	14
3.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	14
3.6.1. Matris Malzemesine Göre	14
3.6.2. Takviye Malzemesine Göre.....	15
3.6.2.1. Partikül Esaslı Kompozitler.....	15
3.6.2.2. Fiber Esaslı Kompozitler	16
3.6.2.3. Tabakalı Kompozitler	17
4. SÜRTÜNME VE AŞINMA	18
4.1. Sürtünme.....	18
4.2. Sürtünme Kuvvetine Etki Eden Faktörler	19
4.2.1. Genel faktörler.....	19
4.2.2. Yüzey sıcaklığı faktörü.....	20

4.3. Aşınma.....	20
4.4. Aşınma Sistemleri	21
4.5. Aşınmaya Etki Eden Faktörler	23
4.5.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler	23
4.5.1.1. Malzemenin Kristal Yapısı.....	23
4.5.1.2. Malzemenin Sertliği	23
4.5.1.3. Isıl İşlemin Etkisi.....	24
4.5.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü	24
4.5.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler ve Aşındırıcının Etkisi	24
4.5.3. İşletme Koşulları (Basınç, Hız, Kayma Yolu).....	25
4.5.4. Aşınma Direncine Karbürlerin Etkisi	25
4.5.5. Matrisin Etkisi	26
4.6. Aşınmanın Sınıflandırılması.....	27
4.7. Aşınma Mekanizmalarına Göre Aşınma Türleri	27
4.7.1. Adhesiv Aşınma	27
4.7.2. Tabaka Aşınması	28
4.7.3. Yorulma Aşınması.....	29
4.7.4. Ablativ Aşınma.....	29
4.7.5. Abrasiv Aşınma	30
4.8. Aşınmanın Ölçülmesi ve Birimleri.....	32
4.8.1. Ağırlık Farkı Yoluyla Ölçme.....	32
4.8.2. Kalınlık Ölçme Metodu	33
4.8.3. İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu	33
4.8.4. Radyoizotoplarla Ölçme Metodu	33
5. SÜRTÜNME MALZEMELERİ VE BALATALAR.....	34
5.1. Balatalarda İstenilen Özellikler	34
5.2. Balata Çeşitleri	35
5.2.1. Organik Balatalar.....	35
5.2.2. Anorganik Balatalar.....	36
5.2.3. Bileşik Balatalar	39
5.2.4. Karbon Esaslı Balatalar	39
5.3. Balata Üretiminde Kullanılan Malzemeler.....	40
5.3.1. Takviye Malzemeleri (Elyaf)	40

5.3.2. Dolgu Malzemeleri	44
5.3.3. Sürtünme Malzemeleri	45
5.3.4. Temizleyiciler	46
5.3.5. Renklendiriciler	46
5.3.6. Madeni dolgu malzemeleri	46
6. FREN VE FRENLEME	47
6.1. Fren ve Frenleme Kuvveti	47
6.2. Fren Performansı	47
6.3. Diskli Frenlerde Frenleme Torku	48
6.4. Disk ile Kampana Tipi Frenlerin Kıyaslanması	50
6.5. Disk ve Kampana Malzemeleri	51
7. MATERYAL METOD	53
7.1. Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri	53
7.1.1. Deney Düzenekinin Tanıtılması	53
7.1.2. Yük Hücresi	56
7.1.3. Termometre	56
7.1.4. Pnömatik Sistem ve Elemanları	58
7.1.5. İnvertör	59
7.1.6. Yüzey Parlatma Cihazı	59
7.1.7. Sertlik Ölçme Cihazı	60
7.1.8. Basma Test Cihazı	61
7.1.9. Toz Karıştırıcı Mikser	62
7.1.10. Hidrolik Pres	62
7.1.11. Isıl İşlem Fırını	63
7.1.12. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	64
7.1.13. Optik Mikroskop	65
7.1.14. Bilyeli Değirmen	65
7.1.15. Numune Kalıbı	66
7.1.16. Hassas Terazî	67
7.2. Kullanılan Balata Malzemeleri	68
7.2.1. Bağlayıcı (Matris) Malzemeler	69
7.2.2. Takviye Malzemeleri	69
7.2.3. Dolgu Malzemeleri	70

7.2.4. Sürtünme Ayarlayıcı Malzemeler (SAM)	70
7.3. Numunelerin Üretimi.....	70
7.3.1. Tozların Öğütülmesi	74
7.3.2. Toz Karıştırma İşlemi	78
7.3.3. Soğuk Pres	79
7.3.4. Numunelerin Fırınlanması	80
7.3.5. Yüzey İşlemleri ve Numunelerin Test İçin Hazır Hale Getirilmesi	80
7.3.6. Fren Balataları için Türk Standartlarında Belirlenen Deney Şartları	81
8. DENEYSEL SONUÇLAR	83
8.1. Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Test Sonuçları	83
8.1.1 Midye Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları.....	84
8.1.2 Kemik Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları	92
8.1.3 Boynuz Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları.....	99
8.1.4 Tırnak Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları.....	107
8.1.5 Organik Esaslı Balataların Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları	113
8.1.6 Midye ve Kemik Tozu İçeren Balataların Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları.....	92
9. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	132
10. KAYNAKLAR.....	135
ÖZGEÇMİŞ	142

ÖZET

Bu yüksek lisans çalışmasında, kompozit fren balataları genel olarak incelenmiş olup günümüzde imal edilen kompozit malzemeden yapılan balatalarda kullanılan takviye elemanları, matris elemanları ve balatanın içerdiği diğer malzemeler ve bu malzemelerin kompozit fren balatalarının frenleme performansı, aşınma direnci, sürtünme katsayısı ve termal mukavemetine etkileri araştırılmıştır. Bunun yanında, frenleme sistemleri ve türleri araştırılmış frenleme basınçları ve balata boyutları standartları da yapılan literatüre araştırmalarında ortaya konmuştur. Üretilen balatalarda hayvansal esaslı organik tozlar kullanılarak bu tozların balata içerisindeki kullanılabilirliği ve frenleme performansı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda midye ve kemik tozlarının yarı metalik fren balatalarında kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bunun yanında boynuz ve tırnak tozlarının balatanın aşınma miktarını artırdığından kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Organik malzeme, Fren balatası, Sürtünme katsayısı

SUMMARY

An Investigation on the Usability of Composite Materials in Brake Linings and Braking Performance Characteristics

In this master study, brake pads manufactured from composite materials were investigated at overall and the matrix materials, reinforcement materials, the other ingredient materials of the present composite brake linings with the effects of those materials on the wear behaviour, braking performance, friction coefficient and thermal strength were entirely taken into account. Accordingly, besides the braking systems with their types were investigated, braking pressure, standartized disc and pad dimensions were also figured out in the studies of literature part. Organic based powders are used for the manufacturing of brake linings with their usability as a brake lining material and investigation of their braking performances. As a result of the performed experiments, shell and bone powders are decided to be suitable for the semi organic brake linings. On the other hand, it is concluded that the horn and nail powders are not met the required brake lining characteristics.

Keywords: Wear, Organic material, Brake lining, Friction coefficient

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Partikül takviyeli kompozitlerin genel yapısı.....	16
Şekil 3.2. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri.....	16
Şekil 3.3. Tabakalı kompozit malzemelerin ayrık görünümü.	17
Şekil 4.1. Hidrodinamik yağlamada oluşan sürtünme tabakaları	19
Şekil 4.2. Tribolojik Sistem.....	22
Şekil 4.3. Adhesiv aşınma oluşum safhalarının şematik gösterilişi	28
Şekil 4.4. İki cisimli abrasiv aşınma.....	31
Şekil 4.5. Üç cisimli abrasiv aşınma	31
Şekil 5.1 Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma karakteristiği.....	38
Şekil 6.1. Diskli fren sistemleri ve sistemi oluşturan elemanlar	49
Şekil 6.2. Fren sistemleri ve sistemi oluşturan elemanlar	51
Şekil 6.3. a) Kampana tipi fren, b) Disk tipi fren	52
Şekil 7.1 Deney düzeneğinin önden görünüşü	54
Şekil 7.2 Deney düzeneğinin izometrik görünüşü.....	55
Şekil 7.3 Deney düzeneğinin şematik görünüşü ve elemanları	55
Şekil 7.4 (a) Yük hücresi, (b) İndikatör	56
Şekil 7.5 Kızılötesi termometrenin görünüşü	57
Şekil 7.6 Termometre ara yüz programı	57
Şekil 7.7 Pnömatik devre elemanları.....	58
Şekil 7.8 Kullanılan inverterin görünüşü.....	59
Şekil 7.9 Yüzey parlatma cihazı	60

Şekil 7.10 Brinell Sertlik ölçme cihazı.....	61
Şekil 7.11 Üniversal basma-çekme test cihazının görünüşü	62
Şekil 7.12 Hidrolik pres.....	63
Şekil 7.13 Dijital sıcaklık ayarlı fırın	64
Şekil 7.14 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	64
Şekil 7.15 Optik mikroskop.....	65
Şekil 7.16 Bilyeli değirmen	66
Şekil 7.17 Soğuk pres kalıbının şematik görünüşü.....	67
Şekil 7.18 Hassas terazi	67
Şekil 7.19 Numunelerin üretim şeması.....	71
Şekil 7.20 Bakır tozlarının optik mikroskop görüntüsü	75
Şekil 7.21 Çelik yününün optik mikroskop görüntüsü	75
Şekil 7.22 Alüminyum oksit (Al_2O_3) tozlarının optik mikroskop görüntüsü	76
Şekil 7.23 Barit tozlarının optik mikroskop görüntüsü	76
Şekil 7.24 Kemik tozlarının optik mikroskop görüntüsü	77
Şekil 7.25 Midye tozlarının optik mikroskop görüntüsü	77
Şekil 7.26 Boynuz tozlarının optik mikroskop görüntüsü	78
Şekil 7.27 Elde edilen toz karışımının görünüşü	78
Şekil 7.28 Farklı presleme basınçları altında elde edilen aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri	79
Şekil 7.29 (a) Yarı metalik balata (b) Organik balata.....	80
Şekil 8.1 Midye tozu katkılı numunelerin 1050kPa basınç altında sürtünme katsayısı zaman grafiği.....	85
Şekil 8.2 Midye tozu katkılı numunelerin 1050kPa basınç altında sürtünme katsayısı sıcaklık grafiği.....	85
Şekil 8.3 Midye tozu katkılı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarının değişimi	86

Şekil 8.4 Midye tozu içermeyen N1 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi ...	88
Şekil 8.5 %5 Midye tozu içeren N2 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	89
Şekil 8.6 %10 Midye tozu içeren N3 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi ..	90
Şekil 8.7 %20 Midye tozu içeren N4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi ..	91
Şekil 8.8 %30 Midye tozu içeren N5 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi ..	92
Şekil 8.9 Kemik tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	93
Şekil 8.10 Kemik tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	94
Şekil 8.11 Kemik tozu içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri	95
Şekil 8.12 %2,5 Kemik tozu içeren N6 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	96
Şekil 8.13 %5 Kemik tozu içeren N7 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi .	97
Şekil 8.14 %7,5 Kemik tozu içeren N8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	98
Şekil 8.15 %10 Kemik tozu içeren N9 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	99
Şekil 8.16 Boynuz tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi.....	100
Şekil 8.17 Boynuz tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	101
Şekil 8.18 Boynuz tozu içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri	102
Şekil 8.19 %4 Boynuz tozu içeren N10 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	104
Şekil 8.20 %8 Boynuz tozu içeren N11 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	105
Şekil 8.21 %12 Boynuz tozu içeren N12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	105
Şekil 8.22 %15 Boynuz tozu içeren N13 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	106
Şekil 8.23 Tırnak tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	107
Şekil 8.24 Tırnak tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	108
Şekil 8.24 Tırnak tozu içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı.....	109

Şekil 8.25 %4 Tırnak tozu içeren N14 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	110
Şekil 8.26 %8 Tırnak tozu içeren N15 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	111
Şekil 8.27 %12 Tırnak tozu içeren N16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	112
Şekil 8.28 %15 Tırnak tozu içeren N17 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	113
Şekil 8.29 Tırnak ve boynuz tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	114
Şekil 8.30 Tırnak ve boynuz tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	114
Şekil 8.31 Tırnak ve boynuz tozu içeren organik esaslı balata numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı	115
Şekil 8.32 %25 Boynuz tozu içeren N18 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	116
Şekil 8.33 %15 Boynuz ve %10 tırnak tozu içeren N19 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	116
Şekil 8.34 %5 Boynuz ve %20 tırnak tozu içeren N20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	117
Şekil 8.35 Kemik ve midye tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	118
Şekil 8.36 Kemik ve midye tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	118
Şekil 8.37 Tırnak, boynuz, kemik ve midye tozu içeren organik esaslı balata numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı	119
Şekil 8.38 Kemik ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	119
Şekil 8.39 Kemik ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	120
Şekil 8.40 Midye ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	121
Şekil 8.41 Midye ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme	

katsayısı sıcaklık değişimi	121
şekil 8.42 Midye ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı	122
şekil 8.43 %0 Midye ve %30 barit tozu içeren N27 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	123
şekil 8.44 %10 Midye ve %20 barit tozu içeren N28 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	124
şekil 8.45 %20 Midye ve %10 barit tozu içeren N29 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	125
şekil 8.46 Bakır ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	126
şekil 8.47 Bakır ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	126
şekil 8.48 elik yünü ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi	127
şekil 8.49 elik yünü ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi	128
şekil 8.50 Midye, bakır, elik yünü ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı	129
şekil 8.51 %5 Bakır ve %20 kemik tozu içeren N30 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi.....	130
şekil 8.52 %5 elik yünü ve %20 kemik tozu içeren N33 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	131
şekil 8.53 %15 elik yünü ve %10 kemik tozu içeren N35 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi	131

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Aşındırıcı malzemelerin sertlik değeri.....	24
Tablo 5.1 Yeni sürtünme malzemesi ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik özellikleri	37
Tablo 5.2 iki ayrı yapıdaki cam yünü ve cam elyafın kimyasal analizi	42
Tablo 6.1 Disk ve kampana malzemelerinin içeriği	52
Tablo 7.1 Midye tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri	72
Tablo 7.2 Kemik tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.....	72
Tablo 7.3 Boynuz tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri	72
Tablo 7.4 Tırnak tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.....	73
Tablo 7.5 Organik tozlardan üretilen balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri	73
Tablo 7.6 Organik tozlardan üretilen balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri	74
Tablo 8.1 Midye tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değeri	87
Tablo 8.2 Kemik tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değeri	96
Tablo 8.3 Boynuz tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değeri	103
Tablo 8.4 Tırnak tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değeri	109
Tablo 8.5 Midye ve barit tozu katkılı organik esaslı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değeri.....	123
Tablo 8.6 Midye, bakır, çelik yünü ve kemik tozu katkılı organik esaslı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değeri	129

SEMBOLLER LİSTESİ

F	: Ortalama kuvvet (N)
G	: Taşıt ağırlığı (N)
F_s	: Sürtünme kuvveti (N)
W	: Normal yük (N)
T_B	: Frenleme torku (Nm)
N	: Normal reaksiyon tepki kuvveti (N)
R₀	: Balata ortalama yarıçapı (cm)
R₁	: Balata iç yarıçapı (cm)
R₂	: Balata dış yarıçapı (cm)
T_B	: Frenleme torku (Nm)
T_w	: Tekerlek yavaşlatma torku (Nm)
N	: Normal reaksiyon tepki kuvveti (N)
R₀	: Balata ortalama yarıçapı (cm)
R	: Tekerlek yarıçapı (cm)
R₂	: Balata dış yarıçapı (cm)
F_t	: Çevresel kuvvet (N)
W_i	: İlk ağırlık
W_s	: Son ağırlık
F_n	: Normal kuvvet
W_a	: Aşınma oranı (mm . N ⁻¹ m ⁻¹)
S	: Kayma mesafesi (m)
W_r	: Aşınma direnci
P	: Basınç (kg/mm ²)
A	: Balata alanı (mm ²)
SAM	: Sürtünme Ayarlayıcı Maddeler
BS	: Brinell sertlik
n	: Toplam devir sayısı
η_f	: Frenleme verimi
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_a	: Tutunma faktörü (yol ile tekerlek arasındaki)
μ_k	: Kinetik sürtünme katsayısı
μ_s	: Statik sürtünme katsayısı

1. GİRİŞ

Fren ve frenleme sistemleri günümüzde kullanılan motorlu taşıtların emniyetini ve güvenliğini sağlaması itibari ile en önemli aksamlarından biridir. Fren sistemleri aracın hareket enerjisini yani kinetik enerjisini ısı enerjisine çeviren sistemlerdir. Dolayısıyla frenleme işlemi süresince sürtünmenin yardımıyla hareket enerjisi ısı enerjisine çevrilir. Frenleme esnasında sürtünme yüzeyine uygulanan basınçtan yararlanır. Fren mekanizmasında bir balata ve karşı yönde fren diski bulunur. Balata karşı yöndeki cismin temas yüzeyi kontak halinde olarak kontrollü bir şekilde aracı ya tamamen durdurmaya ya da hızını azaltmaya çalışır. Bu tür işlev gören malzemeler balata olarak adlandırılır. Frenleme sırasında yüksek hız ve sıcaklık artışı nedeni ile sürtünme ve balata içerisindeki malzemelerin doğru seçimi çok büyük bir önem arz etmektedir [1].

Yakın zamana kadar fren balataları ve disklerinde dökme demir ve asbest kullanılıyordu. Fakat asbestin insan sağlığına son derece zararlı olduğu anlaşıncaya kadar asbest esaslı sürtünme malzemeleri tamamen piyasadan kaldırılmış ve yerini kompozit malzemelerden yapılan fren balataları almaya başlamıştır. Kompozit malzemelerin ısıya dayanıklılık, aşınma ve yüksek mukavemet özellikleri sayesinde ısıya dayanıklı aşınma direnci yüksek ve sürtünme katsayısı daha iyi olan kompozit balatalar elde edilmesi mümkündür [2].

Kompozit malzemeden yapılan fren balataları genel olarak birçok bileşenden oluşur (dolgu malzemeleri, sürtünme malzemeleri ve takviye malzemeleri gibi). Bunlardan herhangi bir tanesinin küçük bir değişimi bile balatanın sürtünme katsayısını, aşınma davranışını ve ısıya dayanıklılığını önemli ölçüde değiştirmektedir [3]. Bununla beraber balatanın üretim yönteminin türü, ısı işlem şartları ve kalıplama basıncı da önemli ölçüde bu özellikleri etkilemektedir. Dolayısıyla bütün bu parametreleri en iyi şekilde optimum hale getirmek iyi bir fren performansı ve çalışma süresi ortaya çıkaracaktır.

Otomobil icat edilene kadar sürtünme mekanizmaları ve sürtünme malzemeleri konusunda çok az gelişme olmuştur. İlk otomobillerde deri sürtünme malzemeleri (balatalar) kullanılmış, 1902'de deriden daha iyi özelliklere sahip sürtünme malzemeleri

üretilmeye başlanmıştır [4]. Bu ilk balatalar zift veya zift ve kauçuk emdirilmiş pamuk dokumalardan oluşmakta, ağır kullanım şartlarında alev alıp yanmaktaydılar. 1905’de F.C. Stanley ilk defa dokunmuş asbest fren balatasını geliştirmiş, 1906 yılında zift uygun bağlayıcılarla değiştirilmiş ve balatalar uçucu maddelerin uzaklaştırılması için ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Reçine bağlı metalik balatalar 1950’lerde ortaya çıkmıştır. 1960’larda birçok metal katkıları içeren semi-metaller geliştirilmiştir.

Yapılan araştırma ve deneylerde en zor şartlarda çalışabilen, yüksek ısıya dayanıklı, düşük ses ve aşınmaya dayanıklı fren balatalarının özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda fren balatalarının sahip olunması gereken minimum sürtünme katsayısı ve aşınma direnci irdelenmiş olup bunların standartları gösterilmiştir. Fren balatalarında kullanılan malzemeler literatür araştırması sonucunda tespit edilmiş olup bu malzemelerin balata içerisindeki oranları belirlenmiştir. Farklı üretim basınçları ve sıcaklıkları altında her bir balata numunesi denenerek optimum üretim şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Üretilen organik ve yarı metalik kompozit fren balatalarında metal ve seramik esaslı tozların yanı sıra sürtünme katsayısını istenen düzeye getirmek için bazı hayvansal kaynaklı organik tozlar kullanılmıştır. Gerekli üretim aşamalarından geçen balata numuneleri test için hazır hale getirilmiş ve sürtünme-aşınma, mekanik ve mikro yapı testlerine tabi tutularak gerekli incelemeler yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde kompozit fren balataları ile ilgili bir çok çalışma yapılmaktadır. Özellikle bu çalışmalar fren balatası üretiminde katılan bileşenlerin oranı ile olmuştur. Ve bu oranların balatalar üzerindeki etkileri yapılan çalışmalarda genel inceleme konusu olmuştur.

D. Aleksendric ve C^ˆ. Duboka yapay sinir ağları modeli oluşturarak fren balataların 26 değişik parametre için soğuk performansını incelemiştir. Bu çalışmada 18 parametre fren balatasını oluşturan malzemeler için 5 tanesi fren balatasının üretim metodu ile ilgili ve son 3 parametre test koşulları için alınmıştır. Ayrıca burada gerçek deneyden elde edilen 15 farklı sonuç değerlendirilmiş bunlardan 5 tanesi seçilip yapay sinir ağı modelinde öğrenme için kullanılmıştır. Sonuç olarak 26 farklı girdi için bir tane çıktı alınabileceğini ve lineer olmayan kompleks fren balatalarında yapay sinir ağları modelinin kullanılabileceği sonucuna varmışlardır [1].

J. Bijwe ve arkadaşları modifiye edilmiş fenolik reçinelerin sürtünme malzemelerinde frenleme performansı ve iyileştirilmesi üzerinde bir çalışma ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada beş farklı reçine malzemesi için numuneler imal edilmiş ve bu malzemelerin kinetik sürtünme katsayısı üzerinde olan etkileri araştırılmıştır. Ayrıca sıcaklık artışının ve frenleme performansının değişimi her bir numune için test edilerek malzeme üzerinde oluşan hasarları mikroskop altında inceleyerek her birinin etkileri ayrı ayrı incelenmiş. Ve sonuç olarak en büyük kinetik sürtünme katsayısı 0.336 lık bir değerle NBR-modified reçine eklenmiş kompozit malzemede, en fazla sıcaklık artışı 362°C ile Linseed oil modified reçine eklenmiş kompozit malzemede ve genel olarak en iyi performans değeri Alkyl-benzene modified reçine eklenmiş kompozit malzemede bulunmuştur [2].

Chen Zhenhua ve arkadaşları Al-Si/SiCp kompozit malzemelerde silikon miktarının ve termo-mekanik sertleştirilmenin kuru kayma aşınmasına etkisini incelemiştir. Bu çalışmalarında hacimsel olarak %9, %15 ve %19 SiC içeren silicon numuneleri kullanarak kompozit malzemeyi oluşturmuşlar ve özel bir aparat sayesinde torna tezgâhında aşınma

deneylerini yapmışlardır. Sonuç olarak çalışmalarında artan silikon içeriğinden dolayı kompozit malzemenin sertliğinin artmasıyla aşınma miktarlarında düşüş olmuştur. Ve termo-mekanik işlem sayesinde poroziteler azaldığı ve sertlik arttığı için önemli ölçüde kompozit malzemenin aşınma direncinde artma gözlemlemiştir [3].

Ji-Hoon Choi ve In Lee fren disklerinin zamana bağlı termo-plastik analizini sonlu elemanlar modeli oluşturarak incelemiştir. Fren balatası ve diskini ortotropik malzeme olarak modelleyip değişik fren basınçlarında balata ve disk üzerinde ısı iletim katsayısının ve sıcaklığın dağılımını gözlemlemiştir. Sonuç olarak en büyük gerilme değerini kontak bölgelerinde bulmuş olup ortotropik malzemelerin frenleme performansına ve gerilme dağılımına göre izotropik malzemelere göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya koymuşlardır [4].

N.S.M. EL-Tayeb ve K.W. Liew otomotiv endüstrisi için yeni potansiyel fren balatası malzemelerin kuru ve ıslak frenleme performanslarını incelemiştir. Deney için beş farklı ticari olmayan yeni malzemeler kullanmışlardır ve dönen bir disk üzerinde aşınma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Kuru aşınma sonuçları 1.3m/s iken sürtünme katsayısında %11-19 arası artış 2.1m/s iken %5-15 arası ve aynı zamanda kontak basıncı arttıkça sürtünme katsayısında artış olduğunu gözlemlemiştir. Islak durumda ise sürtünme katsayısının önemli ölçüde düştüğünü ve farklı hız ve basınçlarda çok ciddi değişimler olmadığını ve önemli bir güvenlik sorunu getirdiği sonucuna varmışlardır. Genel olarak yaptıkları çalışmada, kullandıkları malzemelerin birinde sürtünme kuvveti çok iyi ve diğerinde de aşınma davranışı çok iyi olup piyasadaki malzemelere göre daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir [5].

Mikael Eriksson ve arkadaşları 2001 yılında yaptığı bir çalışmada kompozit malzemedan yapılmış fren balatalarının cam disk üzerinde aşınmasını sağlayarak kontak bölgesinin dinamik durumunu çeşitli elektronik cihazlarla gözlemlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmalarında frenleme performansını sürtünme katsayısının değişik hız ve fren kuvvetleri altında değişimlerini incelemiştir. Sonuç olarak yaptıkları bu çalışmada düşük hız basınç kullanarak cam disk üzerinden aldıkları dinamik görüntülerin gerçek fren mekanizmasına çok yakın olduğunu ve basınç değeri artırıldıkça frenleme performansının arttığını ortaya koymuşlardır [6].

Rukiye Ertan ve Nurettin Yavuz yaptıkları çalışmada, kompozit malzemeden imal ettikleri fren balatalarının üretim parametrelerinin aşınma ve fren performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak çalışmalarında kalıplama basıncının fren performansını önemli ölçüde yükselttiğini ve ısıtılma sıcaklığının ise önemli bir değişme göstermediğini ortaya koymuşlardır ve ayrıca üretim parametresi olarak kalıplama süresi 5 dakika kalıplama sıcaklığı 120°C ve basıncı ise 7.5MPa değerlerini optimum değer olarak gözlemlemişlerdir. Bunun dışında 150°C de 10 saat ısıtılma işlemi en iyi sonuç ortaya çıkardığı görülmüştür [7].

Shangwu Fan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon/silikon karbidlerin kompozit malzemeden yapılmış fren balatalarında, mikro yapısı, sürtünme katsayısı, termo-mekanik özelliklere olan etkisini deneysel olarak ele almışlardır. Ve sonuç olarak ortalama dinamik sürtünme katsayısını 0.34, statik sürtünme katsayısını 0.41 olarak elde etmişler ve ayrıca karbon/silikon kompozitlerin çok iyi bir tokluğa sahip olduğunu ve elde ettikleri mekanik ve termal özelliklere göre uçak endüstrisinde kullanılabilecek mükemmel bir malzeme olduğunu savunmuşlardır [8].

Shangwu Fan ve arkadaşları 2008 yılında yaptığı çalışmada, uçaklarda kullanılan geliştirilmiş karbon fiber ve silikon (C/SiC) kullanarak ürettiği kompozit fren balatalarının tribolojik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Numunelerini örgülü şekilde farklı oryantasyonlarda oluşturmuş ve aralarına iğne şeklinde karbon fiber takviyesi yapmışlardır ve diğer malzemeleri partikül şeklinde malzemeye katmışlardır. Sonuç olarak yaptıkları deneylerde sürtünme katsayısının, fren performansının, aşınma davranışının ve tabaka açısının etkilerini araştırmışlardır. Ve Nano-SiC partiküllerinin dengeli bir sürtünme tabakası oluşturduğu, aşınma oranını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bunun dışında kuru şartlarda ortalama kinetik sürtünme katsayısını 0.25 ve statik sürtünme katsayısını ise 0.46 civarında bulmuşlardır. Islak şartlarda ise frenleme performansı yaklaşık olarak %8 civarında düşüş gözlemlenmişler ve bu malzemenin uçakların fren sistemi için çok uygun olduğunu öne sürmüşlerdir [9].

Shangwu Fan ve arkadaşları yaptıkları bir sonraki çalışmada, fren basıncının ve fren hızının C/SiC kompozit malzemenin aşınma davranışına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Ve bulgularında frenleme sıcaklığının frenleme hızının artışı ile arttığını fakat fren basıncının sıcaklık üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığını ortaya koymuşlardır.

Ve ayrıca, sürtünme katsayısı hız 10m/s iken maksimum değere ulaşmış ve sonra azalmıştır ayrıca aynı hızda fren basıncı arttıkça sürtünme katsayısında düşüş gözlemlenmiştir [10].

Klaus Friedrich ve arkadaşları yaptığı çalışmada çeşitli dolgu maddelerinin polimer kompozitlerinin üzerindeki aşınma davranışlarına olan etkisini incelemiştir. Sonuç olarak polimer esaslı kompozit malzemelerin 220°C 'ye kadar olan sıcaklık şartlarında, 10MPa'a kadar basınç altında ve 10m/s hız değerine kadar olan şartlarda çalışabildiği ortaya konmuştur. Bu da gösteriyor ki düşük sürtünme katsayısı ve aşınma karakteristiği sayesinde birçok uygulamada yer alması mümkündür [11].

D. Gültekin ve arkadaşları kompozit fren balatasını ve diskini iki farklı malzemeden seçerek bir çalışma ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalarında Cu-MMC den yapılmış kompozit fren balatası ile Al-SiCp MMC den yapılmış fren diskini ele alıp farklı yükler altında sürtünme katsayısının değişimini gözlemlemeye çalışmışlardır. Bulgularında genel olarak bütün numuneler ve yük değerleri için dengeli bir sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Ayrıca grafit miktarına, aşınma mesafesine ve uygulanan yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı 0.2 ile 0.45 arasında değiştiği gözlemlenmiştir ve uygulanan yük arttıkça sürtünme katsayısında belli bir değerden sonra azalma görülmüştür [12].

P.V. Gurunath ve J. Bijwe ise yeni geliştirilen reçineler kullanarak kompozit malzemeden yapılmış fren balatalarının sürtünme ve aşınma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Ve değerlendirmelerinde yeni geliştirilen reçinelerin sıradan kullanılan fenolik reçinelere göre daha performans ortaya koymuştur eğer sıcaklık 400°C ye kadar ulaşsa bile. Ve ayrıca bu yeni geliştirilen reçinenin üretim esnasında herhangi zararlı gaz ortama vermediği, daha uzun kabuk ömrü ve kalıplama sonrasında çekme oranının çok düşük olduğu gözlemlenmiştir [13].

Abdulhaqq A. Hamid ve arkadaşları porozitenin ve parçacık miktarının in-situ döküm tekniği ile oluşturdukları Al(Ti)-Al₂O₃(TiO₂) kompozitlerin kuru aşınma davranışları ve mekanik özelliklere olan etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Ve sonuç olarak belli bir değere kadar hızın ve porozitenin aşınma miktarını artırdığı partikül takviyesinin ise malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirip daha düşük bir aşınma oranı ortaya çıkardığı tespit edilmiştir. Ayrıca porozitenin az olduğu kompozitlerde partikül takviyesinin artması

sürtünme katsayısını bir miktar da olsa artırmıştır. Fakat sürtünme katsayılarında sürekli iniş çıkışlar olduğu için çok önemli ölçüde farklı numunelerin etkisi ortaya çıkmamıştır [14].

K.W. Hee ve P. Filip beraber yaptıkları bir çalışmada otomotiv sanayisinde kullanılan seramik katılmış fenolik matrisli kompozit fren balatalarının frenleme performansını incelemişlerdir. Bu çalışmalarında daha az metal içeren kompozitler daha kararlı ve düşük sürtünme katsayısına sahip iken seramik eklenmesi sürtünmeyi yükseltmiş olup dengeli bir dağılım ortaya koymuştur. Bundan farklı olarak, potassium titanate ilavesi daha iyi bir sürtünme film tabakası oluşturmuş ve frenleme performansını önemli ölçüde artırdığı bu çalışmada ortaya konmuştur [15].

S.C. Ho ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmasında fiber katkısının bakır/fenolik esaslı kompozit sürtünme malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada fiber olarak çelik, pirinç, bakır, selüloz, karbon ve seramik fiberler kullanmışlardır. Her bir numune için sürtünme katsayılarına, sıcaklık artışını, yüzey pürüzlülüğünü ve ağırlıktaki değişimleri ayrı ayrı göz önünde bulundurmuşlardır. Ve deneysel sonuçlarda mekanik özellik olarak selüloz ve karbon fiberler düşük, bakır ve pirinç fiberler yüksek ve diğerleri orta derece olarak tespit edilmiş ve aşınma sonuçlarına göre bakır fiber aşınmayı düşürücü en ideal malzeme olarak tespit edilmiş çelik ve karbon fiberler ise aşınmayı artırıcı yönde etki göstermiştir fakat seramik fiberler ise aşınmayı düşürücü yönde bir etki göstermiştir. Genel sonuç olarak bakır fiberin yüksek sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranından dolayı en uygun malzeme olduğu görülmüştür [16].

Kompozit fren balatalarında genellikle en çok kullanılan reçine türü fenolik reçine olduğunu yapılan bir çok çalışmalarda görüyoruz. Bu konu U.S. Hong ve arkadaşları tarafından da ele alınmış ve onlar, çok fazlı(multi-phase) sürtünme malzemelerine çeşitli fenolik reçineler ekleyerek aşınma mekanizmasına olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, katkısız fenolik reçine, silikon eklenmiş fenolik reçine ve bor-fosfor eklenmiş fenolik reçine olmak üzere üç tip reçine kullanarak 400°C ye kadar olan sıcaklık değişimleri altında malzemelerin sürtünme katsayılarını ve aşınma mekanizmasını incelemişlerdir. Ve elde ettikleri sonuçlarda genel olarak, bor-fosfor reçinesi eklenmiş

kompozit sürtünme malzemesinde en iyi aşınma ve düzgün sürtünme katsayılarını elde etmişlerdir [17].

Diğer bir fren malzemesi olarak son yıllarda karbon nano tüpler çok gözde bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Mekanik zellikleri ve aşınma davranışları oldukça yüksektir. Bu konu ile ilgili H.J. Hwang ve arkadaşları 2010 yılında yeni bir çalışma ortaya koymuşlardır. Yaptıkları bu çalışmada karbon nano tüp içeren kompozit malzemelerin aşınma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ve elde ettikleri deneysel sonuçlarda karbon nanotüp ilavesinin artması ile yüksek sıcaklarda daha kararlı bir sürtünme katsayısı ve çok düşük aşınma miktarı elde etmişler fakat sürtünme katsayısında bir azalma gözlemlemişlerdir. Bunun yanında mekanik özelliklerin çok yükseldiği ve daha etkin aynı zamanda titreşimin ve sesin azaldığı frenleme elde edilmiş fakat ısı iletim katsayısı düşük olduğu için yüksek sıcaklarda kararlı ısı dağılımı ve soğuma problemi ortaya çıktığı bulgulara elde edilmiştir [18].

Ho Jang VE Seong Jin Kim tarafından yapılan diğer bir çalışmada kompozit fren balatasına antimony trislfat ($Sb_2 S_3$) ve zirkon silika ($ZrSiO_4$) katkısı yapılarak kompozit fren balatasının sürtünme davranışına olan etkileri incelenmiştir. Genel sonuç olarak yapılan deneylerde bu katkı malzemelerin eklenmesiyle sürtünme katsayısı daha kararlı bir hale getirilmiştir ve bunun dışında tork değeri değitirildike frenleme mesafesinin sadece sürtünme katsayısına bağlı olamadığı aynı zamanda sıcaklık artıının da frenleme mesafesinde önemli bir rolü olduğu ortaya konmuştur [19].

H. Jang ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada alüminyum elik ve bakır gibi bu üç metali kompozit malzemedenden yaptıkları fren malzemesine dolgu malzemesi olarak kullanmış ve yaptıkları deneylerle bu malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışına olan etkisini incelemişlerdir. Ve elde ettikleri sonuçlarda en büyük aşınma miktarını sırasıyla elik fiberlerde sonra bakır fiberlerde en düşük değerini ise alüminyum fiberlerde elde etmişlerdir. Bunu yanında bakır yada elik fiberler kullanıldığı zaman en yüksek sıcaklık dayanımı ortaya çıkmış olup fren diski olarak alüminyum metal matrisli kompozit kullanıldığı zaman en iyi fren performansı elde edilmiştir [20].

Yapılan diğer bir çalışmada günümüzde otomotiv sektöründe kullanılan fren balatalarına aramid pulp ve potasyum titanate katkısı yapılarak meydana gelen etkiler S.J. Kim ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada farklı yük, hız ve

aşınma mesafesi altında meydana gelen değişimler (sürtünme katsayısı, sıcaklık artışı ve aşınma gibi...) incelenmiş olup bu iki malzemenin katkısı sürtünme katsayısında ve aşınma direncinde güçlü bir kararlılık meydana getirmiş olup sürtünme yüzeylerinde daha düzgün yüzey kalitesi ve sürtünme kuvveti sağlamıştır [21].

Genellikle kompozit fren balataları parçacıklı takviye malzemelerinden üretilir. Dolayısıyla buradaki parçalıklı takviye malzemelerinin tane büyüklüğü çok büyük bir önem arz etmektedir. Bu konuyla ilgili D.K. Kolluri ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada doğal grafit tane büyüklüğünün frenleme esnasında meydana gelen lokal sıcaklık yoğunlaşmalarına ve frenlemeye olan etkisi araştırılmıştır. Farklı tane boyutlarında (21µm, 41µm, 71µm ve 137µm) kompozit numuneler hazırlanmış ve yapılan deneyler sonucunda tane büyüklüğü azaldıkça daha iyi sıcaklık dağılımı gözlenmiş fakat yüzeyler daha düzgün olduğu için sürtünme katsayısında bir miktar düşüş görülmekle birlikte 0.34-0.40 arasında değişmiştir. Bunun yanında en iyi sıcaklık dağılımı 21µm için ve en kötü ise 71µm tane boyutunda meydana gelmiştir [22].

Fren balatalarında kullanılabilecek diğer bir malzeme ise yüksek korozyon direnci ve dökme demire göre yaklaşık olarak %37 daha hafif olan titanyum alaşımlarıdır. Bu konu ile ilgili bir çalışma Peter J. Blau ve arkadaşları tarafından ortaya konmuştur. Çalışmasında titanyum esaslı parçacık takviyesi yapılmış ve sprey ile titanyum kaplanmış kompozit numuneler ile piyasada kullanılan aşındırıcı disk ile deneyleri yapmış ve titanyum takviyesinin balata üzerindeki aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda titanyum esaslı kompozitlerde ve titanyum alaşımlarında kabul edilebilir bir sürtünme katsayısı olmasına rağmen aşınma direnci dökme demire göre düşük çıkmış ve düşük termal özellik nedeni ile de ısı transferi daha kötü elde edilmiştir. Fakat daha farklı ve sert parçacıklar aynı zamanda daha düzgün yüzeyler ve farklı aşındırıcı diskler kullanarak bu malzemelerin daha iyi sonuçlar vermesi olasılığını yapılacak olan diğer çalışmalarda öne sürmüşlerdir [23].

Mukesh Kumar ve Jayashree Bijwe yaptıkları çalışmada kompozit fren balatalarına farklı metal tozları (demir, bakır ve brass tozları gibi...) ekleyerek aşınma davranışına ve fren performansına olan etkisinin deneysel olarak incelemişlerdir. Ve elde ettikleri sonuçlarda, metal tozlarının sürtünme katsayısını 0.35-0.45 arasında korumayı başarmış ve basma mukavemeti, ısı iletim katsayısı, yoğunluk, ısı difüzyonu gibi birçok parametrede

iyileşme meydana getirmiştir. Genel olarak en iyi sonuçlar sırasıyla bakır, brass ve demir tozları ilavesinde ortaya çıkmış ayrıca bütün malzemeler için sıcaklık ve hız arttıkça frenleme performansında ve sürtünme katsayısında düşüş gözlemlenmiştir[24].

Frenleme şartlarında bazen yüksek basınç ve yüksek sıcaklık değerlerine dayanıklı malzemeler gerekir. Bu koşullarda çalışabilecek fren balatası malzemelerinden bir tanesi de karbon-karbon esaslı kompozit malzemelerdir. Bu konu ile ilgili Do-Wan Lim ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada bu malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada deneysel, sonlu elemanlar modeli ve maksimum gerilme hipotezi ile sonuçları elde etmişler ve bunlar arasında bir bağlantı kurmuşlardır [25].

Kompozit fren balatalarında sürtünme katsayısını belli bir kabul edilebilir değerin üstünde tutmak için birçok farklı katkı maddeleri eklenir. Bu katkı maddelerinin sürtünme katsayısını artırmasının yanında belirli bir sıcaklık ve aşınma direncine sahip olması gerekir.

Bu yönüyle bu maddeler kompozit fren balatası üretiminde çok büyük bir önem arzeder. Bu konuyla ilgili Yafei Lu bir çalışma ortaya koymuş 23 farklı katkı malzemesi kullanarak oluşturduğu kompozit numunelerin bir kısmına bu maddelerden eklemiş diğerlerine eklemeden bu katkı malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini gözlemlemeye çalışmıştır. Elde ettiği sonuçlarda ise bu maddelerin karıştırılması sürtünme katsayısını çok fazla değiştirmiyor ancak daha iyi aşınma direnci ortaya çıkarabiliyor. Fakat doğru karışım oranlarında sürtünme katsayısı 0.8'e kadar çıkabiliyor ve Steel wool/B Al_2O_3 /B katkı malzemesi en yüksek aşınma direnci kazandığını gözlemlemiştir [26].

W. Österle ve I. Urban yaptıkları çalışmasında polimer matrisli %50 metal içeren kompozit fren balatalarında (Tablo 1) sürtünme katmanları ve sürtünme filmi oluşumu üzerine deneysel inceleme yapmış ve aşındırıcı disk olarak dökme demir kullanmıştır [27].

İlker SUGÖZÜ ve İbrahim MUTLU ise fren balatası üretiminde toz karıştırma süresinin frenleme karakteristiğine etkisini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlarda toz karıştırma süresi arttıkça sürtünme katsayısında ve sıcaklık artışında kısmen de olsa bir miktar artış görülmüştür [28].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Teknolojinin gelişimi, son yüzyılda bilgisayarların da devreye girmesiyle beraber büyük bir ivme kazanmıştır. Doğadan elde ettiğimiz malzemelerin sınırlı olmasından dolayı, özellikleri bu büyük gelişime ayak uyduramamış ve sanayi için temel bir girdi olan malzeme ve malzeme biliminde gelişme kaçınılmaz bir duruma gelmiştir.

Bilim adamları çağın yenilikleri ile birlikte bilimin gelişmesi paralelinde ekonomik, yüksek mukavemetli ve hafif malzemeleri imal etme yolunu seçmişlerdir. Bu şekilde kompozit malzemeler imalat sanayinde ve yeni teknoloji ürünlerinde çok önemli bir rolü üstlenmiştir.

Genel bir tanım yapacak olursak; kompozit malzeme, kimyasal bileşenleri farklı birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun malzeme oluşumu için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelerdir. Makroskobik muayene ile yapı bileşenlerinin ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına karşılık mikroskobik muayene ile mikro ölçüde heterojen olduğu görülür. Kompozit malzemelerde yapı bileşenlerinin makro boyutta oldukları kabul edildiğinden bu kavram karışıklığı, bazı kural dışı durumlar olmakla beraber ortadan kalkmaktadır [29].

Kompozit malzeme temel olarak matris olarak adlandırılan ana yapı ve takviye elemanından oluşmaktadır. Uygulamada kompozit malzeme üretiminde, aşağıdaki özelliklerin bir veya bir kaçının geliştirilmesi hedeflenmektedir.

-  Mekanik dayanımı
-  Yorulma dayanımını
-  Aşınma dayanımını
-  Korozyon dayanımı

- ✚ Kırılma tokluğunu
- ✚ Yüksek sıcaklıktaki özellikler
- ✚ Isıl iletkenlik
- ✚ Elektrik iletkenliğini
- ✚ Akustik özellik
- ✚ Rijitlik
- ✚ Ağırlık azalması
- ✚ Estetik

Kuşkusuz bu özelliklerin hepsinin tek bir malzemede toplanması mümkün değildir [30].

3.2. Matris Malzemeler

Kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Bunlar metaller, hafif metaller, seramikler ve plastiklerdir.

Metal ve hafif metal matris malzemeler teorik olarak kompozit malzemeyi teşkil eder ancak hafiflik ve imalat kolaylığı sağlamadığından bazı özel uygulamalar dışında çok fazla tercih edilmez. Bununla birlikte otomotiv sanayinde fren balatası olarak üretilen kompozit malzemelerde yüksek aşınma ve ısıya direnci önem teşkil ettiğinden dolayı matriks elemanı olarak genellikle seramik ve metal matrisler kullanılırlar [31].

3.3. Katalizörler

Bu malzemeler hızlandırıcı ve sertleştirici olarak kompozit malzemelerin üretiminde kullanılır. Reçinelerin reaksiyon vermeleri ve jelleşip sertleşmeleri için çeşitli hızlandırıcılar operasyon şartlarına bağlı olarak farklı miktarlarda kullanılırlar. Reçineye ilave edilecek sertleştirici miktarı reçine ağırlığının %0,5 ile %3 arasında olmalıdır. Hızlandırıcılar ise genellikle reçine ağırlığının %0,5 ile %4 arasında kullanılmalıdır [30].

3.4. Dolgu Malzemeleri ve Boyalar

Dolgu malzemeleri bazı hallerde reçine ile birlikte kullanılarak mukavemet kazandırır. Ve daha ucuz olduklarından mamulün fiyatını düşürür. Bu malzemeler reçinen sertleşmesi

sırasında çatlamayı önler, büzülmeyi azaltır ve daha düzgün yüzeyler elde edilmesini sağlar.

En fazla kullanılan dolgu maddeleri karbonatlar ve kildir. Reçine içerisinde %10 ile %70 arasında bulunabilirler. Boya ve benzeri maddelerde reçine içine doğrudan karıştırılırlar. Genellikle reçine miktarının %0.05 ile %0.1'i kadar kullanılırlar [32].

Boya ve dolgu malzemelerinin yanı sıra reçinenin içine yanmayı geciktirici, elektriksel özellikleri düzenleyici hatta ultraviyole ışıklarını absorbe edecek katkı maddelerinin de reçineye karıştırılabileceği bilinmektedir.

3.5. Takviye Malzemeleri

Reçineler pek çok malzeme çeşidi ile takviye edilebilirler. Plastik fiberler, metal veya hafif metal fiberler, tabii fiberler, karbon ve cam fiberler çok kullanılanlardandır. Takviye malzemelerini birçok farklı geometride kullanmak mümkündür ve balata üretiminde genellikle parçacık halinde takviye elemanları kullanılmaktadır. Fren balatalarında en çok kullanılan türleri yüksek ısı ve aşınma dayanımından dolayı karbon fiberler, metal fiberler, seramikler, kevlar ve bazı oksitlerdir. Ayrıca cam fiberlerinde kompozit malzeme imalatında önemli bir yeri vardır [31].

3.5.1. Cam Lifler

Camı oluşturan ham maddeler bir fırında eritmek suretiyle üzerinde 400 ile 2400 delik bulunan kovanlardan aşağıya kendi ağırlığı ile akıtılarak belli bir hızda masuralara sarılmak suretiyle elde edilirler. Çekim hızına bağlı olarak 10 ile 15 mikron arasında kalınlıklara sahip elyaflar elde edilir. İstenilen özelliğe göre çeşitlenmişlerdir [29].

3.5.2. Wisker

Liflere benzer şekilde olup aynı çaplara sahiptirler ancak daha kısa ve kütürler. Liflere göre daha iyi özelliklere sahiptirler. Kristallerin hemen hemen en mükemmel

halleridir. Çelik wiskerler teorik olarak 220.000 daN/cm^2 'lik kopma mukavemetine sahiptirler [30].

3.5.3. Karbon Fiber

Karbon fiberler ile takviye edilmiş kompozit malzemeler mukavemetlerinin ve rijitliklerinin cam lifleri ile imal edilen kompozitlere oranla çok fazla olması, yoğunluğunun az olması ve yorulma mukavemetlerinin fazla olması sebebiyle günümüzde kullanımları gittikçe artmaktadır. Uçak, roket ve türbin kanatçıklarının imalinde kullanılmasının yanında fren balataları içinde çok önemli bir takviye malzemesi haline gelmiştir [33].

3.5.4. Kevlar

İki versiyonu mevcuttur. Bunlar; Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Kevlar 29 kurşungeçirmez yelek ve sürtünen malzemelerde özellikle kompozit fren balatalarında ve araç lastiklerinde sıkça kullanılırlar. Kevlar 49 ise yüksek elastisite modülüne sahip olduğu için takviye elemanı olarak yorulma ve kimyasal etkilere karşı özelliği de iyi olup cam ve karbon elyaflarla birlikte kullanılabilirler. Özellikle uzay sanayinde kullanımı yoğundur. Suya karşı çok hassas olmaları dezavantajlarıdır [30].

3.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri en genel halde matris malzemesi ve takviye malzemesine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür.

3.6.1. Matris Malzemesine Göre

Matris malzemesine göre kompozitleri üç şekilde sınıflandırabiliriz.

- a) **Metal matrisli kompozit malzemeler:** Metal matrisler taşıyıcılık açısından plastik matrislere oranla daha iyi performans sağlamaktadır. Metal matris kullanarak fiber takviyeli kompozit üretimi daha zor ve maliyetlidir ancak metal matris kompozitin tokluğunu önemli ölçüde artırmakta ve yüksek sıcaklıkta dayanımları olumlu yönde

artmaktadır. En çok kullanılan metal matris malzemeleri olarak alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, nikel ve gümüş gelmektedir. Glass fiberler plastik matris malzemeleri ile çok başarılı bir şekilde kullanılmasına rağmen metal matrislerle kullanıldığında yüksek sıcaklıklarda taşıyıcılığını kaybetmektedir. Bu nedenle metal matrislerle kullanım için whisker adı verilen çok ince metal kıllar üretilmiştir.

- b) Polimer matrisli kompozit malzemeler:** Fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan matris çeşididir. iç yapılarına göre termoplastikler ve termoset plastikler olmak üzere iki gruba ayrılırlar.
- c) Seramik matrisli kompozit malzemeler:** Çok yüksek sıcaklık ve termal şoklara karşı dayanımları yüksektir. Gevrektiler ve çentik hassasiyetleri yüksektir. Bu gruba en iyi örnek olarak SiC ve Al₂O₃ fiber ile takviye edilmiş SiC ve Si₃N₄ seramikleri gösterilebilir.

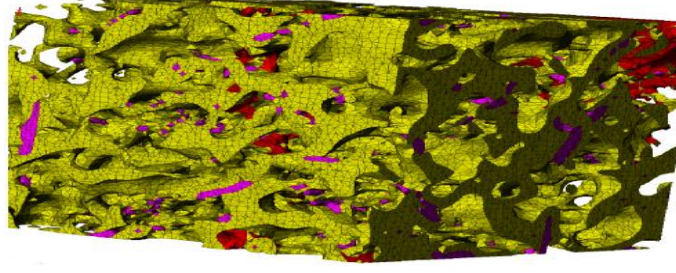
3.6.2. Takviye Malzemesine Göre

Takviye malzemesine göre kompozitleri en basit ve genel halde üç şekilde sınıflandırmamız mümkündür. Bunlar;

- a) Partikül takviyeli kompozit malzemeler
- b) Fiber (Elyaf) takviyeli kompozit malzemeler
- c) Tabakalı kompozit malzemeler

3.6.2.1. Partikül Esaslı Kompozitler

Partikül kompozitler bir veya iki boyutlu mikroskobik malzemelerin veya sıfır boyutlu kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazıyla oluşturdukları malzemelerdir. En karakteristik özellikleri partikülleri matris içinde tamamen rastgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermesidir. Kompozit fren balataları genellikle bu gruba girer.



Şekil 3.1. Partikül takviyeli kompozitlerin genel yapısı

3.6.2.2. Fiber Esash Kompozitler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, sünek matris malzemesi içerisinde, mukavemeti ve elastiklik modülü yüksek fiberlerin ilave edilmesiyle oluşturulurlar. Yük taşıma kapasitesinin önemli olduğu durumlarda sıklıkla kullanılan fiber takviyeli kompozit malzemelerde, matris malzemesi kompozite uygulanan yükü fiberlere transfer eder. Bu sayede yüksek mukavemete sahip fiber yükün büyük bölümünü taşıyabilmektedir.

Fiberler, kompozit malzeme içerisinde tek yönlü şekilde ya da yönlendirilmiş olarak bulunabilmektedirler. Fiberler genel olarak, malzemeye uygulanacak yüklerin doğrultusunda konumlandırılırlar. Şekil 3.2’de fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri gösterilmiştir.

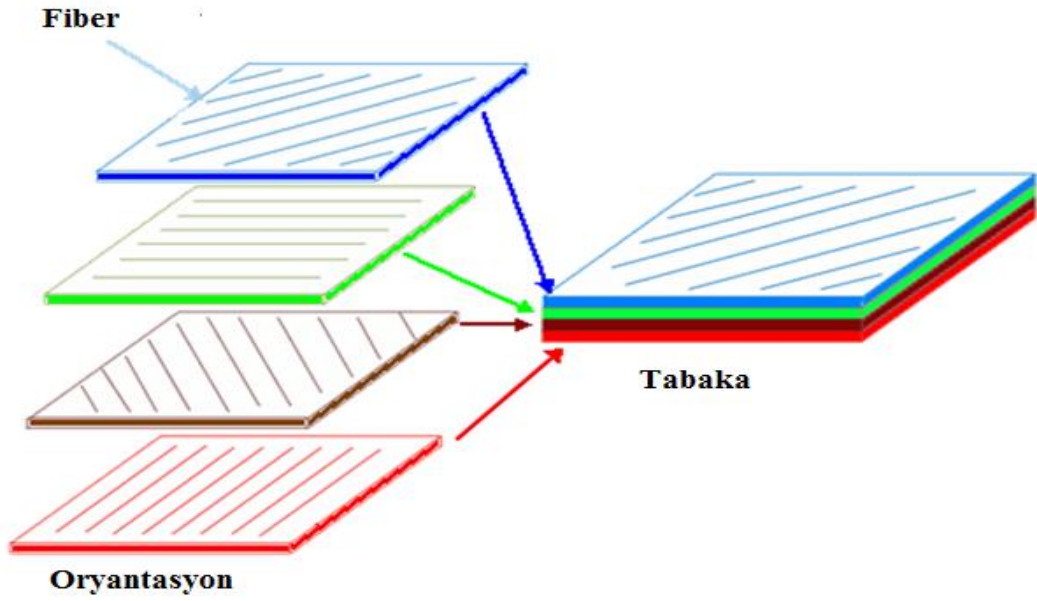
Eksen		0	1	2	3	4
Boyut		Rastgele	Tek eksenli	İki eksenli	Üç eksenli	Çok eksenli
1 Boyut						
2 Boyut						
3 Boyut	Liner element					
	Yüzeyel element					

Şekil 3.2. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri

3.6.2.3. Tabakalı Kompozitler

Farklı özelliklerdeki tabakaların üst üste veya yan yana getirilmesiyle oluşturulan tabakalı kompozit malzemeler, tasarlanan tabakaların yapısına bağlı olarak aşınma direnci, korozyon dayanımı, yük asıma kapasitesi gibi özelliklerin istendiği alanlarda kullanılabilmektedirler.

Tabakalar, farklı malzemelerden oluşabileceği gibi farklı türde ve şekillerde takviye içeren kompozit malzemelerden de oluşabilmektedir. Kullanım amacına göre değişik şekillerde tasarlanabilen tabakalı kompozit malzemelerin uygulama alanlarına örnek olarak askeri ekipmanlar ve hafif zırhlar verilebilir [32].



Şekil 3.3. Tabakalı kompozit malzemelerin ayrık görünümü .

4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

Temas halinde olan malzemelerin sürtünmesi ve bunun sonucu meydana gelen aşınma özellikleri; makine elemanlarının ve dizaynlarının en önemli problemlerinden biridir. Çünkü temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının kötüleşmesine sebep olmaktadır.

4.1. Sürtünme

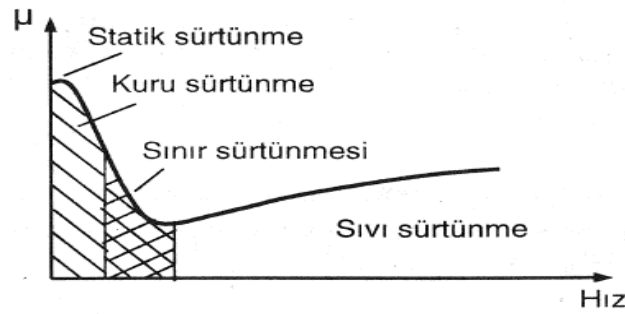
Sürtünme, bir katı cismin, kendisiyle temasta olan başka bir katı cismin bağlı hareketine göstermiş olduğu dirençtir. Hareket doğrultusunda ve zıt yönde olan bu dirence sürtünme kuvveti denir. Temasta olan katı cisimlerden birinin diğeri üzerinde kayma hareketine başlaması için gerekli olan kuvvete Statik sürtünme kuvveti, kayma hareketini devam ettirmek için gerekli kuvvete de Kinetik (Dinamik) sürtünme kuvveti denir. Dinamik sürtünme kuvveti, statik sürtünme kuvvetinden daha küçüktür. Sürtünme de, temas eden yüzeyler arasındaki hareket kayma ve yuvarlanma yada bu iki hareketin bileşimi şeklindedir[73].

İki temel sürtünme kanunu vardır. Birinci kanunda; Sürtünme kuvvetini sürtünen yüzeyler arasındaki temas alanından bağımsız olduğu, ikinci kanunda ise sürtünme kuvvetinin, sürtünen cisimlere gelen normal kuvvetle orantılı olduğu belirtilmiştir[74]. İkinci kanuna göre sürtünme katsayısı tanımı yapılabilir. Buna göre; Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır.

Sürtünme katsayısı μ , sürtünmeyi karakterize eden, önemli bir faktördür. Statik durumda statik, dinamik durumda ise dinamik sürtünme katsayısı olarak tanımlanır. Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından biraz daha büyüktür. Deneyler göstermiştir ki; dinamik sürtünme katsayısı kayma hızına bağlıdır. Hızın artması halinde azda olsa değerinde bir düşme görülür[73]. Statik sürtünme katsayısı temas süresine bağlıdır. Temas süresini artmasıyla, sürtünme katsayısı da artar.

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulduğu takdirde sürtünmenin azaldığı bilinmektedir. Yağlayıcı madde, malzeme yüzeyi üzerinde adhezyon kuvveti nedeniyle bir film teşkil ederek, metalik teması kısmen veya tamamen önler. Eğer yüzeyler tamamen metalik temastan ayrılmış ise buna sıvı sürtünmesi, kısmen ayrılmış ise bu durumda da yarı sıvı sürtünmesi denir.

Yük tatbik edilmeden önce yüzeylerdeki bu tabakalar arasında bir bağlantı oluşur. Yüklemeden sonra tabakaların bir kısmı kopar ve temas alanında metal kayması meydana gelir.



Şekil 4.1. Hidrodinamik yağlamada oluşan sürtünme tabakaları [75].

4.2 Sürtünme Kuvvetine Etki Eden Faktörler

4.2.1 Genel faktörler

Sürtünme kuvvetine, temas eden yüzeylerin pürüzlülüğü ve temas yüzeylerinin büyüklüğü nedeniyle yüzey basıncının değişmesi etki etmektedir. Sürtünme katsayısı, düzgün ve kuru temas yüzeylerinde pürüzlü yüzeylere göre daha fazladır. Pürüzsüz yüzeyler sürtünme sırasında daha fazla ısınır ve pürüzlü yüzeylere göre daha fazla yapışır. Sonuç olarak sürtünme katsayısı değeri artar. Keskin uçlu sert bir yüzeyin yumuşak yüzey üzerinde hareket etmesi durumunda yumuşak yüzey üzerinde sertliği ve keskinliği oranında çentik meydana getirir. Çentiğin açılmasında sarf edilen deformasyon enerjisinin sürtünme kuvvetinden sağlandığı söylenebilir. Çentik etkisinden dolayı sürtünme kuvveti değeri çentik büyüklüğüne bağlı olarak artmış olur. Farklı malzemelerin birbiri ile teması sonucu malzemelerin farklı oranlarda potansiyel elektrikle yüklendiği bilinmektedir. Her temas noktasında bir elektriksi çift tabaka meydana gelir ki bu etki sürtünme kuvvetinde bir artış meydana getirir. Sürtünme katsayısının değişimi üzerinde bu faktör diğer faktörlere oranla daha küçüktür [76].

4.2.2. Yüzey sıcaklığı faktörü

Sürtünme olayında harcanan gücün büyük bir bölümü sürtünme sonucu meydana gelen ısıya dönüşür. Bu ısı enerjisinin yaklaşık hepsi temas bölgelerinde üretilir. Bunun sonucu oluşan yüzeydeki sıcaklık dağılımını belirtmek oldukça zordur. Çünkü bu sıcaklık yüzeylerin farklı noktalarında büyük ölçüde değişir [76].

Deneysel olarak yüzey sıcaklığını ölçmede kullanılan termokuppllar sürtünen yüzeylerin yakınına konularak sürtünme olayı sırasında oluşan sıcaklığı ortalama değer olarak verdiğinden, noktasal sıcaklığın değerlendirilmesi de oldukça zordur.

Sürtünme işinin ısıya dönüşmesi sonucu artan balata sıcaklığının o balata malzemesi için belirlenmiş olan sınır sıcaklığının altında kalması istenir. Aksi halde sürtünme kuvveti aşırı derecede değişir veya aşınma çok büyük değerler alır. Sürtünme sonucu oluşan yüksek sıcaklık temas eden maddelerden birinin yumuşamasına, hatta erimesine yol açabilir. Bunun sonucu olarak sürtünme kuvveti değerinde ani düşüş olabilir. Yüksek sıcaklık, yüzeylerde normal sıcaklıkta oluşmayan oksit veya diğer kimyasal bileşiklerin meydana gelmesine yol açar.

Sonuç olarak sürtünme olayı farklı faktörlerden etkilenmekte ve başlangıçta her yüzey bir malzemeden oluşmakta iken sürtünmenin devam etmesi ile bir malzemenin küçük parçacıkları diğerine transfer olarak sürtünme yüzeylerinde değişmelere yol açmaktadır. Bu değişimler hiçbir zaman sabit kalmayıp alternatif dalgalar halinde kendini göstermektedir.

4.3. Aşınma

Aşınmanın tanımı genellikle aşağıdaki şekillerde ifade edilmiştir.

“Birbirlerine göre hareket halinde olan eş yüzeylerden birinde veya ikisinde meydana gelen malzeme kaybı”

“Katı cisimlerin yüzeylerinden tribolojik tesirlerle sürekli malzeme kaybı”

“Kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması neticesinde çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyinden mikro taneciklerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulması”

“Malzeme yüzeylerinin, daha ziyade mekanik zorlamalar sebebiyle, bazı hallerde kimyasal tesirlerle küçük parçacıkların ayrılması sonucu değişmesi”

“Aşınma, sürtünen yüzeylerde malzemenin mekanik etkenlerle ve istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır.”

“Mekanik bir etkinin sonucunda, bir yüzeyden parçacıkların yavaşça kalkmasıdır.”

“Tribolojik sistemi oluşturan eleman ve faktörlerin karşılıklı etkileşimlerinin ortak bir ürünüdür.”

Bu tariflerin bütününe kapsayan genel bir tarif şu şekilde verilebilir:

“Aşınma; kullanılan malzemelerin yüzeylerinin daha ziyade mekanik olarak etkileyen enerjiler ve mekanik etkiler ile küçük parçacıkların ayrılması sonucu istenilmeyen şekilde değişikliğidir.”

Bu genel tarife göre meydana gelen hasarın aşınma olarak ele alınabilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekir:

- Mekanik bir etkinin olması,
- Sürtünmenin olması (izafi hareket),
- Yavaş, fakat devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İstenmediği halde meydana gelmesi

Yukarıda belirtilen etkilerin dışında herhangi bir sebepten dolayı hasar meydana geliyor ise aşınmanın diğer hasarlarla beraber olduğu söylenebilir. Fakat bu şartlar herhangi birini gerçekleмиyorsa bu hasar türünün aşınma olarak değerlendirilmesi mümkün değildir.

4.4. Aşınma Sistemleri

Bir aşınma sisteminde;

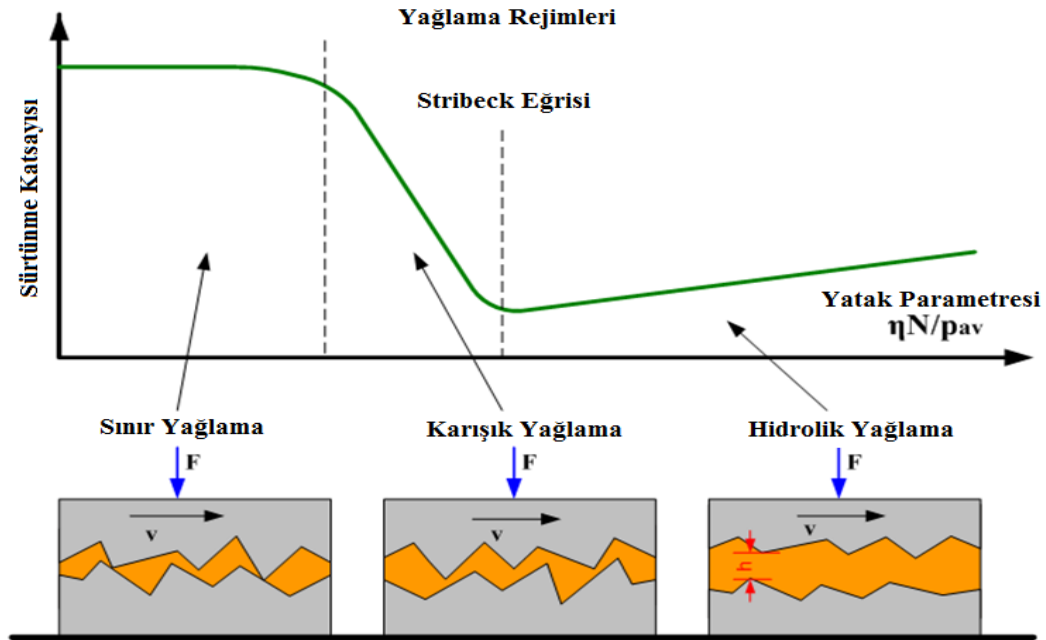
- Ana malzeme (aşınan),
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,

- ✚ Yük,
- ✚ Hareket.

aşınmanın temel unsurlarıdır.

Aşınma hadisesi içerisinde karşılaşılan temel unsurlar bir sistemi oluşturacaktır. Bu sebeple aşınma problemi kendi sistemi içerisinde incelenmeyi gerektirmektedir. Bu sistem, tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır.

Triboloji; sürtünme, yağlama ve aşınma kavramlarını kapsayan ve inceleyen bilim dalıdır. Tribolojik sistem ise; “karşılıklı etkileyen elemanlarda esas cisim, karşı cisim ve ara madde, hız, termal şartlar ve yükün kombine etkisiyle neticelenen aşınmayı inceler.” Bir tribolojik sistem, elemanları ile birlikte şematik olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Tribolojik Sistem [77]

Sistem içinde aşınmayı etkileyen diğer faktörler;

- Temas eden malzemelerin yapısı
- Basınç veya kuvvet
- Hız
- Sıcaklık, ortamın nemi ve basıncı, korozyon etkiler, yağlama gibi çevre şartları
- Yüzey düzgünlüğü

şeklinde özetlenebilir.

4.5. Aşınmaya Etki Eden Faktörler

Aşınmayı etkileyen pek çok faktörlerden bahsetmek mümkündür. Bu faktörler genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılarak incelenmiştir[78].

- a) Ana malzemeye bağlı faktörler (malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü, malzeme boyutu).
- b) Karşı malzemeye bağlı faktörler (aşındırıcının etkisi).
- c) Ortamın etkisi (sıcaklık, nem, atmosfer).
- d) İşletme koşulları (basınç, hız, kayma yolu).

4.5.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler

4.5.1.1. Malzemenin Kristal Yapısı

Malzemenin kristal yapısının aşınma direncine etkisi araştırılmış olup sıkı paket yapıya sahip malzemede aşınma direncinin, diğer kristal yapılarına göre daha büyük olduğu gözlenmiştir [79]. Buna örnek olarak kobalt gösterilebilir. Kobalt oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal kristal yapısına sahiptir ve aşınma direnci oldukça yüksek olan bir metaldir. Fakat bu metalin 417°C 'deki kübik yüzey merkezli kristal yapıya dönüşümü ile metalin aşınma direnci düşmektedir [80].

4.5.1.2. Malzemenin Sertliği

Aşınma direncini etkileyen faktörlerin başında gelen sertlik ile aşınma direnci arasındaki ilişki belli bir düzeye kadar doğrusal değişim gösterir. Yani sertliğin artması ile aşınma direnci de artar. Ancak belli bir değerden sonra sertlik, aşınmaya karşı yeterli direnci sağlayamaz [81].

Tavlanmış saf metallerde ve çeliklerde bağlı aşınma direnci (R) ile sertlik (H) arasında doğru orantılı bir değişim tespit edilmiş olup, aşağıdaki gibi doğrusal bir ilişkinin varlığı belirlenmiştir [82].

$$R=b.H$$

Burada “b” bir malzeme sabitidir.

4.5.1.3. Isıl İşlemin Etkisi

Isıl işlemin etkisiyle mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler aşınma direncini büyük ölçüde etkiler. Isıl işlemle sağlanan sertleştirme ile aşınma direnci artırılabilir. Yine ısıl işlemle malzemenin mikro yapısı değiştirilebildiğinden aşınmaya etki eden birçok faktör değiştirilerek metallerin aşınma davranışlarını önemli ölçüde geliştirmek mümkündür.

4.5.1.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Sürtünme kuvvetini yakından ilgilendirdiği için yüzey pürüzlülüğünün aşınmaya etkisi büyüktür. Pürüzlülüğün yüksek olduğu yüzeylerde temas alanı küçük, birim yüzeye tesir eden kuvvet büyük olacaktır. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü yüksek olan malzemelerde aşınma miktarı daha fazla olmaktadır.

Başlangıç şartlarında yüzey pürüzlülüğünün kontrolü kolaydır. Fakat çalışma sırasında aşınma mekanizmasına göre değişen yüzey profilinin kontrolü imkansızdır. Bunun için uygun çalışma çiftleri ile çalışılması uygundur.

4.5.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler ve Aşındırıcının Etkisi

Laboratuvar deneylerinde çok çeşitli aşındırıcılar kullanılır. Aşındırıcı tanenin boyutu, sertliği ve şekli aşınma hızında önemli rol oynar. Tablo 4.1 de bazı aşındırıcıların sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri.

Aşındırıcı cinsi	Mikro sertlik(kg/mm ²)	Dayanabildiği sıcaklık(°C)
Elmas	10000	700-800
Bor karbür	3700-5000	700-800
Silisyum karbür	2300-2600	1300-1400
Alüminyum oksit	2000-2300	1700-1800

Alüminyum oksit (Al_2O_3) aşındırıcı taneleri sert ve köşelidirler. Silisyum karbür (SiC) aşındırıcı taneleri ise daha sert ve köşeli olmalarına rağmen, alüminyum aşındırıcılara göre kırılğıandırılar. Yüksek sıcaklıklarda bazı alümina ve silisyum karbür aşındırıcıların sürtünme katsayıları incelenmiş, neticede silisyum karbürün sürtünme katsayısının sıcaklığın yükselmesi ile azaldığı bulunmuştur [83].

Yüzeyler arasında aşınma söz konusu olduğuna göre sürtünme kuvvetinin bir kısmı sistemde sıcaklık olarak ortaya çıkacaktır. Özellikle sistemde kuru bir sürtünme söz konusu ise ortaya çıkan ısıнын boyutları oldukça yüksek olmakta, hatta bazı malzemelerde mikroyapı değişikliğine bile sebep olmaktadır. Co-Co çiftinin sıcaklığa bağlı olarak, belli bir sıcaklıktan sonra değişik mikro yapıya sahip olması sıcaklığın aşınma üzerindeki etkisini karakterize etmesi bakımından ilgi çekicidir.

Yapılan araştırmalar sıcaklığın artmasının aşınmayı belli bir sıcaklık değerine kadar etkilemediğini daha sonraki sıcaklıklarda ise tesirini hissettirdiğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarda ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin yüksek aşınma direncine sahip olduğu da tespit edilmiştir [84].

Rabinowicz, yüksek nem oranının, abrasiv aşınma miktarının yaklaşık %15 artmasına sebep olduğunu ve su buharının diğer yağlayıcılara benzer olarak abrazyon etkisini fazlalaştırdığını belirtmiştir [85].

4.5.3. İşletme Koşulları (Basınç, Hız, Kayma Yolu)

Aşınma sistemi içerisinde aşınma yüzeyinin maruz kalacağı basıncın büyüklüğü, birim yüzeye uygulanan kuvvetin ve dolayısıyla sürtünme kuvvetini büyümesini sağlayacağından, aşınmanın da artmasına sebep olacaktır. Araştırmacıların bir çoğı kritik bir yükleme miktarına kadar yükün artışı ile hacimsel aşınmanın orantılı bir değişim gösterdiğini açığa çıkarmıştır. Kritik yükleme miktarı, aşınma yüzeyinin sertliğinin soğuk deformasyonla belli bir oranda arttığı değer olarak belirlenmiştir.

4.5.4. Aşınma Direncine Karbürlerin Etkisi

Çok fazlı alaşımlarda abrasiv aşınma ile sertlik arasında her zaman doğru bir orantı yoktur. İlişki kısmen fazların ayrı ayrı gösterdikleri davranışa dayanmaktadır. Ayrıca

karbürlerin hacim oranı, şekli ve karbür/matris ara yüzeyinin mukavemeti de aşınmada önemli bir rol oynamaktadır [79]. Birbirine yakın olarak yerleşmiş karbürler, matrisin desteklenmesi ve matrisin plastik deformasyon kabiliyetinin azaltılması bakımından abrasiv aşınma direnci üzerine faydalı bir etkiye sahiptir. Örneğin karbürlerin abrasivlere direnç gösterecek kadar sert olduğu farz edilirse ve abrasivlerin, komşu iki karbür arasındaki matris fazına batacak kadar küçük, sert ve keskince olduğu kabul edilirse; malzemenin aşınma mekanizması, büyük oranda matris fazıyla kontrol edilecektir. Eğer matris fazı kolayca abrasiv aşınmaya maruz kalıyorsa ve karbür/matris ara yüzeyindeki bağ zayıf ise karbüre destek azalacaktır. Öte yandan eğer abrasiv partiküller komşu iki karbürün arasındaki matris fazına batacak kadar küçük değilse aşınma hızı karbürlerin kopma hızına bağlı olacaktır. Böyle bir durumda karbür ve abrasivin sertliği, karbür boyutu, karbür hacim oranı, abrasiv tipi daha az önemlidir.

Karbürlerin kırılması ve dökülmesi durumunda aşırı ağırlık kaybından dolayı aşınma direncinde bir azalma görülür. Bazı araştırmacılar ağırlık kaybının karbür hacim oranı ile doğrusal olarak azaldığını öne sürmüşlerdir. Fakat yüksek karbür hacim oranına ve yüksek sertliğe sahip alaşımda en düşük aşınma direnci elde edilmesinden dolayı bu hususta kesin yorum yapmak zorlaşmaktadır. Aşınmış yüzeylerin incelenmesi neticesinde matris içindeki M_7C_3 ve M_2C karbürlerinin aşınma sırasında koptuğu ve bunların ilave abrasiv partiküller oluşturarak aşınma hızını arttırdığı görülmüştür [86].

4.5.5. Matrisin Etkisi

Karbürler matris içerisinde süresiz olduğunda matris tarafından desteklenmesi gerekir. Eğer matris tarafından yeterli destek sağlanır ise abrasiv aşınma sırasında karbürlerin dökülmesi önlenabilir [87]. Çoğu durumlarda bilhassa ağır abrasiv aşınma şartları altında çatlaklar önce karbür/matris ara yüzeyindeki yüksek gerilme konsantrasyonlarından dolayı bu bölgelerde başlamaktadır. Daha iyi abrasiv aşınma direncinin matris fazının artan mikro sertliği ile elde edilebildiği düşünülebilir. Her ne kadar saf metallerdeki sertlik ve aşınma direnci arasındaki ilişki doğrusal olsa da, çok bileşenli alaşımlar için hiçbir basit kural bulunmamaktadır. Abrasiv aşınma da ise aşınmış yüzeylerde deformasyon sertleşmesi ile aşınma yüzeyin de sertliğini arttıracak ve aşınma direnci aşınan yüzeyin sertliği ile daha iyi belirlenecektir. Matris mukavemeti, katı eriyik

sertleşmesi ile de artabilir. Bazı araştırmacılar yüksek mukavemetli matrisin, karbürlere daha iyi destek sağlayabileceğini ve ince partiküllerin daha erken dökülmesini önleyebileceğini ileri sürmektedir [88].

4.6. Aşınmanın Sınıflandırılması

Aşınma türlerinin iki ana prensip altında incelenmesi daha doğru olacaktır.

- 1- Aşınma mekanizmalarına göre
- 2- İzafi hareketin şekline göre

4.7. Aşınma Mekanizmalarına Göre Aşınma Türleri

- 1- Adhesiv Aşınma
- 2- Tabaka Aşınması
- 3- Yorulma Aşınması
- 4- Ablativ Aşınma
- 5- Abrasiv Aşınma

4.7.1. Adhesiv Aşınma

Kaynaklaşma, yapışma ve yenme şeklinde tarif edilen bu tür aşınma birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan metal-metal çiftinde meydana gelen kaynaklaşmanın bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan, çok küçük yüzeylerdeki gerilmeler küçük yüklemelerde dahi akma gerilmesi sınırına erişirler veya geçerler. Böylece bu yüzeyler arasında yapışma kuvveti ortaya çıkar. Bu sebeple bir parçadan diğerine malzeme geçişi, soğuk kaynaklaşma ve küçük parçacıkların kesilmesi meydana gelir. Bu tür aşınma genellikle iki safhada oluşur. İlk safhada temas yerindeki parçacık, yerinde deformasyona uğrar. İkinci safhada yerinden kopar ve malzeme yüzeyinden ayrılır.

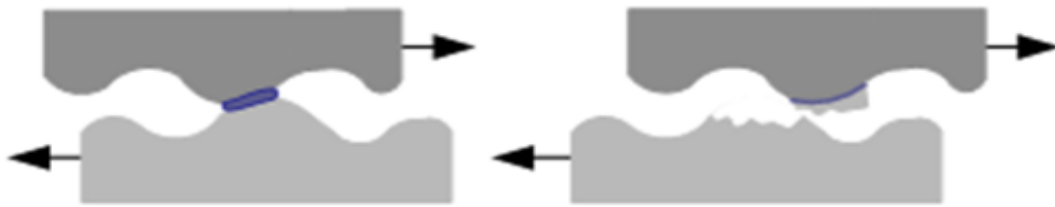
Burada kastedilen yüzeyler arası yapışma kuvvetleri Adhezyon Kuvveti olarak tarif edilebilir. Benzer kafes yapılı iki metalik yüzey arasında bu kuvvetin doğması daha kolaydır. Bu esnada hareket ve sürtünme sebebiyle ortam sıcaklığının artması yapışma eğilimini arttıracak bir yönde etki yapacaktır.

Malzeme yüzeyinden kopan parçacık ya tekrar orijinal parçanın yüzeyine transfer olacak veya düşerek kaybolacaktır. Adhesiv aşınmanın görülebilmesi için yüzeyler arasında güçlü bir temasın olması gereklidir.

Pürüzlerin deformasyonu sonucu, mikro adhezyon hızla temas yüzeyi boyunca yayılır. Sonuçta yüzeyde absorbe edilmiş sıvı ve gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanır. Malzeme molekülleri direk temasa geçer. Neticede, temas noktalarında mikro seviyede soğuk kaynak bağları meydana gelir. Özellikle çelik ve plastik gibi esnek malzemelerde, böyle bir temas sonucu, difüzyon veya tane büyümesi ile çok güçlü adhezyon oluşur. Sürtünmenin bağlı hareketinin devamı halinde, bağlar kırılarak malzeme kaybına neden olur.

Eğer adhezyon ile oluşan bağ kuvveti pürüz mukavemetinden daha düşükse, pürüz temas noktalarından kopar ve hiçbir malzeme kaybına neden olmaz. Eğer aksi olursa, yani adhezyon bağın mukavemeti, pürüz mukavemetinden büyük olursa, bu durumda pürüz kopar ve malzeme kaybına neden olur [75]. Kırılan parçalar ara yüzeyde serbest kalacağı gibi metallere birine bağlı kalarak taşınabilirler. Parçacığın bir yüzeyden diğer bir yüzeye taşınmasına metal transferi adı verilir.

Bu tür bir mekanizmayı Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi karakterize etmek mümkündür.



Şekil 4.3. Adhesiv aşınma oluşum safhalarının şematik gösterilişi.

4.7.2. Tabaka Aşınması

Tabaka aşınması, malzemelerin sürtünme yüzeyinde cereyan eder. Malzemelerin birbirlerine göre izafi hareketi esnasında sürtünme ve bunun bir sonucu olarak da titreşim hareketleri gözlenecektir. “Bu titreşimler tribolojik zorlanmaların işaretidir. Tribolojik zorlanmalar sırasında temas yüzeyleri arasındaki küçük genlikli titreşimlerin sebep olduğu bir oksit filmi oluşur.” Aşınma çifti yüzeylerinde, çevrede bulunan ara malzeme ve gazlar

etkisiyle bahsedilen titreşim hareketleri sonucu tribokimyasal, tribo-adsorbsiyon ve benzeri hadiseler sonucunda sınırda bir tabaka oluşur. Bu tabaka oksit tabakasıdır.

Malzeme yüzeyinde oluşan bu oksit tabakası ana malzemenin aşınmaya karşı olan direncini önemli ölçüde değiştirir. Bu değişiklik genel olarak sürtünmeyle parçalanmış tabakanın abrasiv etki göstermesiyle kendini gösterir. Bu da tabii olarak aşınmayı arttırıcı bir etki yapacaktır. Parçalanmış tabakanın yerine de tekrar yeni bir oksit tabakası meydana gelecektir.

4.7.3. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, titreşim zorlamalarında yorulma kırılması hasarı olarak ortaya çıkar. Özellikle malzemenin yüzeyine yakın kısımlarında, sürekli sabit veya değişken dinamik zorlamalar sonucunda değme yüzeyinin altında veya yüzeye yakın bölgelerin yorulması sonucu yüzeyden parçacıkların ayrılması şeklinde yorulma aşınması görülmektedir.

Bu aşınma türünde iç yapı tahribatı; çatlamlar, lokal ayrılmalar şeklinde kendini gösterir. Maksimum çekme gerilmelerinin bulunduğu bölgelerde plastik deformasyon ve dislokasyon hadiselerine bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana getirmektedir. Bu tür aşınma daha ziyade dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür.

4.7.4. Ablativ Aşınma

Ablativ aşınma mekanizmasının oluşması tamamen sürtünme ve diğer reaksiyon ısısının durumuna bağlıdır. Eğer sürtünme yüzeyindeki bazı bölgelerde sıcaklık çok yüksek noktalara ulaşırsa o yüzey bölgesinde bir değişiklik söz konusudur. Bu değişiklik mikro mertebededir. Yeterli sıcaklık ve zaman sonunda sürtünme elemanının molekül veya atomları, çevreye veya diğer sürtünme elemanlarına transfer olur. Bu hadise Tribosüblüstasyon ve difüzyon esasına dayanır. Ablativ aşınmaya bölgesel olarak aşırı zorlanan ve fiziksel olarak veya kimyasal değişimler sebebiyle ısınan yerlerde rastlanır.

Fren balataalarında ve uzay araçlarının sıcaklığa dayanıklı kabuğunda görülen aşınma türünün en mükemmel örnekleri olarak verilebilir.

4.7.5. Abrasiv Aşınma

Bu aşınma türü endüstriyel aletlerde malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Abrasiv aşınma en basit tarifiyle yumuşak olan malzemeye sürtünen daha sert malzemenin kesme etkisi şeklinde tarif edilebilir. Bu aşınma çeşidine katı-katı, katı-mineral, katı-sıvı çiftlerinde rastlanmaktadır. Arada üçüncü bir cisim bulunup bulunmamasına göre;

1- İki Cisimli Abrasiv Aşınma

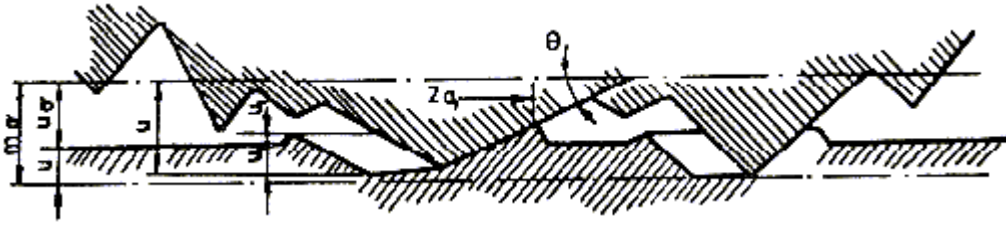
2- Üç Cisimli Abrasiv Aşınma

şeklinde gruplandırılması mümkündür.

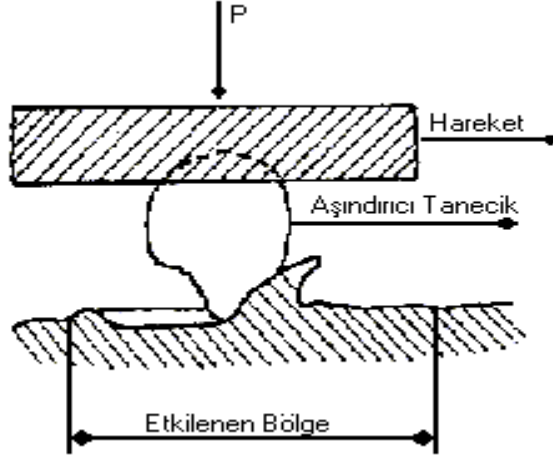
İki cisimli abrasiv aşınma, sürtünen cisimlerin doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelmektedir.

Üç cisimli abrasiv aşınmada ise, sürtünen iki cismin arasında üçüncü bir cismin olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları şeklinde ortaya çıkmasıdır. Sert malzeme yüzeyindeki pürüzler kesici kenarlar gibi çalışır ve yumuşak olan yüzeyden talaş kaldırır veya kopan aşınma ürünü, parça aralarında kayan ara malzemeler, iki yüzey arasında aşındırıcı bir rol oynarlar.

Aşınma mekanizmaları metal-metal sürtünmelerinde iki cisimli abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp, üç cisimli abrasiv olarak devam eder. Üçüncü cisim olarak araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar veya parçalanmış oksit parçacıkları olabilir. Üç cisimli abrasiv aşınmanın, aşınmayı hızlandırdığı belirlenmiştir. Serbest hale geçen mikro talaş partiküllerinin, ana malzemedan daha sert olması bunun en büyük sebebi olarak gösterilebilir [89]. Şekil 4.4.'de iki cisimli, Şekil 4.5.'de ise üç cisimli abrasiv aşınma durumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.4. İki cisimli abrasiv aşınma.



Şekil 4.5. Üç cisimli abrasiv aşınma.

Endüstriyel aletlerdeki en önemli aşınma türü olan abrasiv aşınmaya genel olarak aşağıda verilen endüstriyel uygulamalarda rastlanmaktadır.

- ✚ Cevher işleme ve öğütme tesisleri
- ✚ Traktör, greyder gibi tarım, iş makinelerinin bıçak ve tırnaklarında
- ✚ Eleklerde
- ✚ Nakletme makinelerinde

Bu gibi makine ve makine parçalarında yalnızca abrasiv aşınmadan söz edileceği gibi, diğer aşınma türlerinin de birlikte görülmesi mümkündür.

Yukarıdaki uygulamalara bakıldığında abrasiv aşınmanın daha ziyade maden sektörünün olduğu ortaya çıkmaktadır. Maden çıkarma işlemlerinde karşılaşılan aşınmaya dayanıklılık şartları, Avery tarafından açıklanmış olan üç kısımda incelenebilir.

1. Scratching or Low-Stress Abrasion
2. Grinding Abrasion
3. Gouging Abrasion

Birinci tür abrasiv aşınma darbenin yokluğu halinde serbestçe hareket eden küçük aşındırıcı parçacıkların vasıtasıyla oluşur. Bu tür aşınmaya pervanelerde, pompa gövdelerinde v.b. rastlamak mümkündür.

İkinci abrasiv türü olarak verilen Grinding abrasionda ise, aşındırıcı parçacıklar, iki metalik parça arasına girdiğinde ortaya çıkar. İlgili kısmi gerilmeler oldukça yüksektir. Bu tür aşınma daha önce açıklanan üç cisimli abrasiv aşınma türüne uymaktadır. Değirmen bilyelerinde görülen aşınma bu tür aşınmalardan biridir.

Gouging abrasion ise, gerçekte işlenmekte olan mineralin metal parçacıklarını koparması ile meydana gelen bir parça kaldırma veya aşındırma olayıdır. Bu tip aşınmaya da kırıcılarda kırma sırasında rastlanır.

4.8. Aşınmanın Ölçülmesi ve Birimleri

Aşınma miktarının ölçülmesi sırasında her ölçme metodunda olduğu gibi yeterli hassasiyet, kolay ve seri uygulanabilirlik, ekonomiklik ve standartlaştırılmış bir ölçme yapılması istenir. Bu esaslar çerçevesinde imkânlar ve sistemin yapısına göre aşağıda sıralanan aşınma miktarı ölçme metotları söz konusudur.

4.8.1. Ağırlık Farkı Yoluyla Ölçme

Ekonomik olması, kullanılan ölçme aletinin duyarlılık kapasitesine göre hassas olması sebebiyle oldukça sık olarak kullanılan bir metottur. Deney numunelerinin her ölçülmesi için yerinden çıkarılıp ölçme yapılması, yani yerinde ölçme alınamaması dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-4} g veya 10^{-5} g hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi yardımıyla yapılır.

Aşınma miktarı gram veya miligram cinsinden ifade edilmiş ise, metre veya kilometre olarak tespit edilmiş bulunan kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade olunur. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse (gr/cm^2) gibi bir birim ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde ise yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu göz önünde bulundurularak veya aşınan

yüzeyin geometrik hesabından gidilerek bulunabilir. Burada elde edilecek birim hacimdeki aşınma miktarı (cm^3/m), (cm^3/km) gibi birimlerle ifade edilir.

4.8.2. Kalınlık Ölçme Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması, suretiyle elde edilir. Bu kalınlık olarak tespit edilen değer hacimsel olarak tespit edilerek birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir.

Kalınlık hassas ölçme aletleri yardımıyla $\pm 1 \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülebilir.

4.8.3. İz Değişiminin Ölçülmesi Metodu

Sürtünme yüzeyi bölgesine geometrisi belirli bir iz (küre izi=daire, gibi) plastik deformasyonla oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür.

Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletidir. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz çapındaki değişme, mikroskop yardımıyla ölçülmesi suretiyle ölçme yapılır.

4.8.4. Radyoizotoplarla Ölçme Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α -parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması yani uygulanabilirliği fazla masraf gerektirdiğinden özel amaçlarla kullanılır. Özel problemlerin dışında yaygın bir metot değildir [90].

5. SÜRTÜNME MALZEMELERİ VE BALATALAR

5.1. Balatalarda 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 artırılır [34].

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 yapılabilmektedir [35].

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 [36].

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 [37].

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.

5.2. Balata Çeşitleri

5.2.1. 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.

5.2.2. Anorganik Balatalar

Bugün kullanılan arabaların ağırlıklarının ve hızlarının arttırılması ile ölçüleri aynı kalmış olan frenlerden istenenler de epeyce artmıştır. Normal olarak 300–350 °C sıcaklığa dayanabilen organik balatalar bu ısıya çevrilen enerji miktarına dayanamayacak duruma getirilmişlerdir. Bu yüzden sıcaklığa ve yüksek zorlamalara dayanabilecek anorganik yani sintermetal ve seramik balataların geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır [37].

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 yeni otomotiv uygulamalarında artık kullanılmamaktadır. Bununla birlikte dökme demir çoğunlukla otomotiv fren sistemlerinde karşı yüzey malzemesi olarak kullanılmaktadır [38].

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 ısıtım işlemi 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 [39].

Sintermetal ile yapılan ısıtım işlemi, 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 [36].

Fren balata malzemelerinde kullanılan sinter malzemeleri genellikle bakır-bronz asıllı ve demir asıllı olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Bu gruplarda ayrıca karışimsız, grafit karışımlı ve seramik karışımlı olmak üzere aralarında sınıflandırılabilirler [40, 41, 42].

Tablo 5.1 Yeni sürtünme malzemesi ile bakır sürtünme malzemelerinin mekanik özellikleri [41].

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

Maden 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.

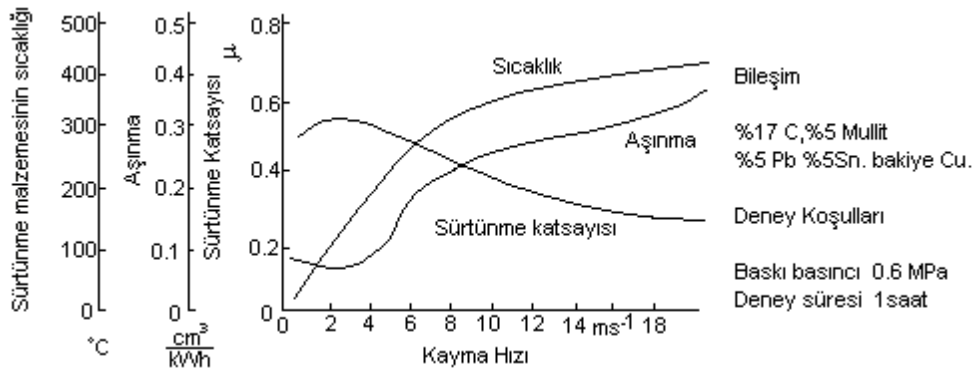
Mekanik Yöntemler; Bu yöntemle, kaba ve ince öğütme yönteminde metal tozlarını elde etmek için metal freze, torna ve eğeleme işlemine tabii tutularak talaş kaldırılır. Daha

sonra bu talaş, küçük zerreler 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 alınılarak toz malzeme elde edilir [43,44].

Granülasyon yöntemi; Bu yöntemle, 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; Bu yöntem de 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 [43, 44].

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 [43,44].



Şekil 5.1 Sinterlenmiş bronz-grafit balata malzemesinin sürtünme ve aşınma karakteristiği [45]

5.2.3. Bileşik Balatalar

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 [37].

5.2.4. Karbon Esaslı Balatalar

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 [46,47].

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 [48].

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 ve dayanımının çeliklerden çok daha yüksek olmasından dolayı uçak frenlerinde kullanımı önem kazanmıştır. Ayrıca yarış arabalarının frenlerinde de kullanılmaktadır. Muhtemelen kısa zaman

içerisinde otomobil ve kamyonlarda da kullanılması beklenilmektedir. 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 [49].

Bu tür balatalar, fiyatın ikinci planda olduğu, performansın önem arz ettiği ve ağırlığın kritik olduğu yerlerde tercih edilmektedir. Karbon/karbon sürtünme malzemesi, amorf karbonla birleştirilen karbon fiberinden (grafit fiber adı da verilir) yapılır. Organik reçineler yüksek sıcaklıkta fırınlanmış 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 [38].

5.3. Balata Üretiminde Kullanılan Malzemeler

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 [50]. Bunlar;

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

5.3.1. Takviye Malzemeleri (Elyaf lar)

Elyaf lar ana yapı oluşturabilmek için bir yandan diğer yana uzanan örülmüş veya üst üste bindirilmişlerdir. Bu işlemde fren balataları için gerekli güç, sağlamlık ve rijitlik sağlamak amaçlanır. Ek olarak eğilme gerilmelerini artırır. Elyaf sürtünme malzemelerini

kuru karışım durumunda, ön şekillendirmede ve yüksek sıcaklıklarda termal dengede tutar [50].

a) Asbest

Asbest; kömür, demir cevherleri v.s. gibi doğal bir mineraldir. İşlendikten sonra elde edilen asbest elyaf yumağı görünüşündedir. Ateşe karşı dayanıklılığı kadar önemli olan diğer özellikleri gerilme direnci, esnekliği ve bükülebilme özelliğidir. Elastikiyeti yumuşak ipeksi görünümünden dolayı “mineral ailesinin ipeği” ismi verilmiştir. Asbestin teknolojik değeri başlıca üç özelliğinden kaynaklanmaktadır.

1. Ateşe dayanıklıdır.
2. Elektrik ve ısı yalıtımı yüksektir.
3. Çimento ürünlerine katıldığında beton içindeki çelik kafeslere benzer şekilde özel bağlayıcılık özelliği gösterir.

Genellikle örneğin fren balatalarında ve yer karolarında başka malzemelere karıştırılan asbest ileri derecede dayanıklılık sağlayabilmektedir [51]. Asbest elyafı kristal yapıya sahip olan magnezyum silikat, kalsiyum-magnezyum silikat ve kompleks sodyum-demir silikat bileşimindeki bir grup mineralin adıdır [52]. (Si_4O_{11}) anyonu, asbest $[CaMg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2]$ mineralinde bulunur ve uzun anyon zincirlerinin birbirlerine aşağı yukarı paralel uzamasından dolayı elyaf yapısına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı dolgu malzemesi ve ateşe dayanıklı oluşu nedeniyle yalıtkan olarak kullanılır. Asbest kanserojen bir bileşiğe sahip olduğundan sağlık açısından tehlikeli bir malzemedir [53].

b) Cam elyafı

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 fleksible özelliğinden dolayı sürtünme malzemelerinde kullanılabilir yapıya sahiptir [43,54].

Tablo 5.2 iki ayrı yapıdaki cam yünü ve cam elyafın kimyasal analizi [43]

	% 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

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 [43].

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 Phenolformaldehit reçine oranının azaltılması ile iyileştirilebileceği belirtilmiştir [55].

c) 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 rahatlıkla dayanabilirler. Bu özelliklerin yanı sıra 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 [56].

Kevlar, poly (pphenylene 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.

d) Basarit

Basarit; endüstride yaygın olarak kullanılan bazalt taşı yn parçalanarak üretilmektedir. Basarit tescilli marka olup Deutsche Basaltsteinwolle GmbH firmasının kullandığı ticari addır. Ergitilerek 1 m uzunluğa kadar elyaf yapılabilen bazalt, sıcakluğa dayanıklı, ısı ve ses izolasyonuna uygun, korozyona dayanıklı, sert ve elastiktir. Basarit bazaltla aynı özellikleri taşıır. Lif apı ve boyu ile karışım oranı iyi ayarlandığında balata mukavemeti ve korozyon dayanımını artırmaktadır. Basarit lif uzunluğu 1 mm, lif çapı >3 µm, yığılma yoğunluğu 0,4 g/cm³, yoğunluğu 2,65 g/cm³, asit, alkali ve çözücülerle kimyasal reaksiyona dayanımı iyi, 1000°C sıcakluğa kadar kullanılabilen bir malzemedir. Karıştırılabilir, istenilen lif uzunluğunda üretimi mümkün ve sürtünme malzemesi endüstrisinde kullanıma uygundur [46,57].

e) elik elyaf

elik elyaf, uygun takviye etme özelliği, iyi ısı ve sürtünme kararlılığı, ekonomik oluşı ve karıştırma esnasında parçalanmaya karşı direnci sayesinde en çok kabul gören alternatif malzemelerden biridir. Korozyon dezavantajına rağmen yumuşak elik 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 [47].

Yoğunluğu 7,86 gr/cm³, elyaf uzunluğu 1-5 mm, elyaf kalınlığı 16 µm, genişliği 50 µm, çekme dayanımı 2600 MPa, elastiklik modülü 200 GPa, Mohs sertliği 5'tir [47,58].

f) 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 [59].

Mika;grubu mineraller silikat mineralleri olup pulsu yapıdadırlar. Sürtünme malzemelerinin yapımında en çok kullanılan mika minerali muskovit ($K_2 \cdot Al_4 \cdot (Al_2Si_6O_{20}) \cdot (OH)_4$) 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 255-295MPa, elastiklik modülü 1,7x10⁵MPa olup kimyasal ortamlara dayanıklıdır. Rengi yeşilden kırmızıya değişik olabilir [46,60].

5.3.2. Dolgu Malzemeleri

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 [61].

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 (BaSO₄) yaygın bir dolgu maddesidir ve genellikle sürtünme katsayısına etkisiz kabul edilmektedir [46,62]. 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 stabilitesini bozmamalıdır, polimerlerle temas eden kimyasal maddelerin ışığın ve ısıнын etkisiyle çözünmemeli, düşük yağ ve su absorpsiyonuna sahip olmamalıdır.
- Mekanik özellikleri iyileştirmelidir. Abrasif aşınma direncini artırma, boyutsal stabiliteyi artırma, alevlenmeye karşı direnci artırmalıdır.
- Maliyeti düşürmelidir [61].

5.3.3. Sürtünme Malzemeleri

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 ayarlayıcılarıdır. Bunlara aşınma özelliklerini ve mekanik özellikleri iyileştirmek için ilave edilen elastomerler, fenolik sürtünme parçacıkları, fenolik reçineler için kürleştiriciler ve diğer sürtünme artırıcı ve azaltıcı katkıları 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 [63, 46].

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 yağlayıcılarıdır. Kurşun ise önceleri yaygın olarak kullanılan yağ bir yağlayıcı (kurşun 327 °C sıcaklıkta ergidiği 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 [46].

5.3.4. Temizleyiciler

Temizleyiciler; balata bileşimine karşı malzemeye yapışıp katılmış olan bağlayıcıların kazınip 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 [64].

5.3.5. 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 [64].

5.3.6. 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 [43].

6. FRENLER VE FRENLEME

6.1. Fren ve Frenleme Kuvveti

Fren, hareket halinde olan bir aracı isteğe bağlı olarak en kısa mesafede veya en kısa sürede yavaşlatma veya durdurma işlemidir. Frenleme kuvveti, hareket halinde olan bir aracın hızını kesip yavaşlatmak veya durdurmak için uygulanan kontrollü bir kuvvettir.

Frenleme esnasında balata dönmekte olan kampanaya basınç uygulayarak sürtünme meydana getirir. Araç sürtünme kuvvetinin yavaşlatma etkisi ile kontrollü olarak yavaşlar veya durur. Hareket halinde bulunan her cisim kinetik enerjiye sahiptir. Yani kinetik enerji hareket halindeki cismin hızının karesi ile kütesinin çarpımının yarısına eşittir.

$$E_k = 1/2 M V^2 \quad (6.1)$$

Bu ifadeden yola çıkarak otomobilin hızı bir an için iki katına çıkarsa kinetik enerji dört kat artar. Bu nedenle aracı durdurmak için gereken frenleme enerjisinin de taşıt hızının karesi ile artacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Örnek olarak V hızı yerine 2V alınırsa;

$$E_k = 1/2 M (2V)^2 = 1/2 M 4V^2 = 2M V^2 \quad (6.2)$$

Fren sistemi ve elemanlarının aracı direksiyon kontrolü kaybolmadan tüm yol durumu ve trafik şartlarında en kısa sürede ve en uygun şartlarda durdurabilecek şekilde konstrüksiyonu ve imalatı yapılmalıdır [65].

6.2. Fren Performansı

Frenleme ile araç tekerleklerinin hareketine zıt yönde bir kuvvet oluşturulur. Bu kuvvet frenleme kuvveti olarak bilinir. Aracın frenleme verimi ise;

$$\eta_f = \frac{F}{G} \times 100 \quad (6.3)$$

η_f = Frenleme verimi

F = Ortalama kuvvet (N)

G = Taşıt ağırlığı (N)

Fren verimi, sürtünen yüzeyler arasında (kampana-pabuç, disk-balata) meydana gelen sürtünme kuvvetinin normal yüklere oranıdır [66]. Yani;

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (6.4)$$

μ = Sürtünme katsayısı

F_s = Sürtünme kuvveti (N)

F_n = Normal yük (N)

6.3. Diskli Frenlerde Frenleme Torku

Diskli frenlerde ısıнын havaya iletilmesinin kolay olması ve her iki dönüş yönünde aynı frenleme torkunu sağlamaları nedeniyle otomotiv alanında en çok kullanılan fren sistemidir [67].

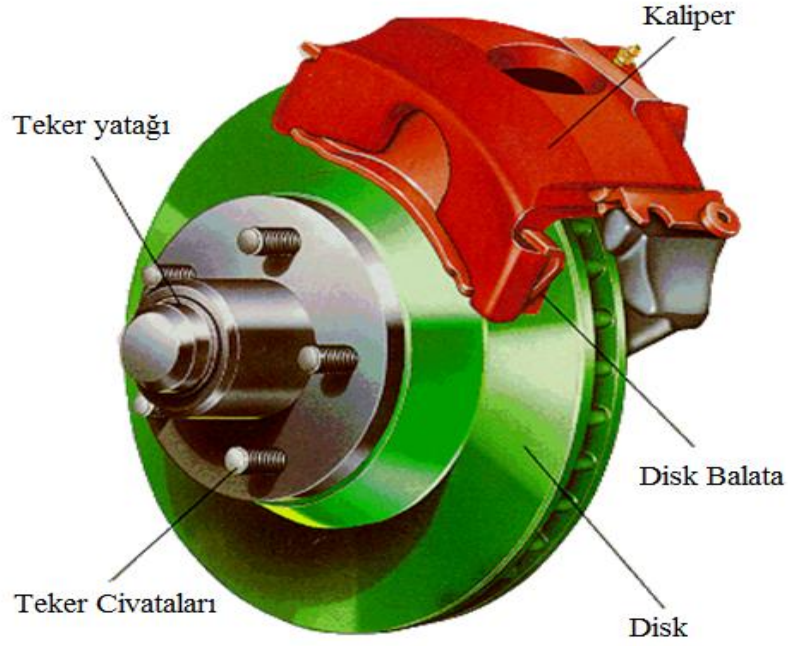
Diskler yüzeydeki yabancı maddelerden kolay kurtulur. Diskli fren balatasının disk üzerindeki kuvvet dağılımı kampanalı fren tipine oranla daha kararlı ve daha homojendir. Yüksek hızlardaki frenlemede, ani kavrama eğilimi daha düşüktür. Diskli frenlerde sürtünme, diskin iki tarafında olduğundan, sürtünme kuvveti;

$$F = 2 \mu N \quad \text{olur. Buradan;} \quad (6.5)$$

$$R_0 = \frac{R_2 + R_1}{2} \quad \text{olacağından frenleme torku;} \quad (6.6)$$

$$T_B = 2 \mu N R_0 \quad \text{olur.} \quad (6.7)$$

T_B = Frenleme torku (Nm)



Şekil 6.1. Diskli fren sistemleri ve sistemi oluşturan elemanlar.

Günümüzde kullanılan frenlerde, fren sürtünme katsayısı genellikle $\mu = 0.3-0.4$ arasında değişmektedir. Balata yüzeyine gelen ortalama fren basınçları ise $P = 600-800 \text{ N/cm}^2$ arasındadır. Bu değer 1200 N/cm^2 basınca kadar çıkabilir. Diskli frenlerde tekerlek torku aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [68].

Literatürde $R_0/R = 0,4$ kabulü yapılır.

Buna göre;

$$T_B = 2 \mu N R_0 = F_t R_0 \quad (6.8)$$

$$T_w = 2 \mu_a G R \quad (6.9)$$

$$T_B = T_w \Rightarrow 2\mu NR_0 = \mu_a GR \quad (6.10)$$

$$R/R_0 = 2.5$$

$$N = \left(\frac{G\mu_a}{2\mu} \right) \left(\frac{R}{R_0} \right) \text{ olur [39].} \quad (6.11)$$

Burada;

T_B = Frenleme torku (Nm)

T_w = Tekerlek yavaşlatma torku (Nm)

N = Normal reaksiyon tepki kuvveti (N)

μ = Sürtünme katsayısı

R_0 = Balata ortalama yarıçapı (cm)

R = Tekerlek yarıçapı (cm)

R_2 = Balata dış yarıçapı (cm)

F_t = Çevresel kuvvet (N)

G = Taşıt ağırlığı (N)

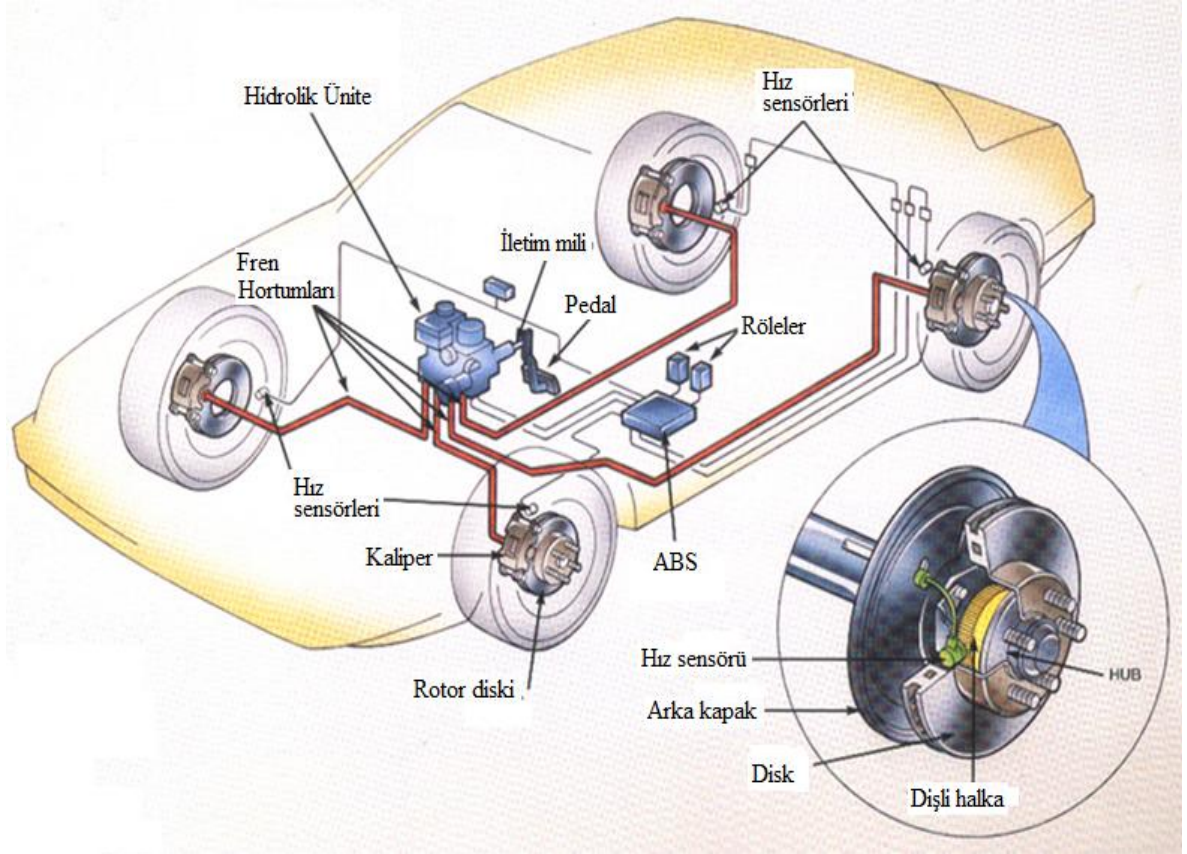
μ_a = Tutunma faktörü (yol ile tekerlek arasındaki), olarak tanımlanmaktadır.

6.4. Disk ile Kampana Tip Frenlerin Kıyaslanması

Diskli frenler oldukça verimlidirler ve aşırı ısınmadan doğan balata ile disk arasındaki sürtünme kayıplarına karşı dayanıklıdır. Aşırı ısınmalar, hem balatanın hem de kampananın sürtünme yüzeylerinde zamanla cam gibi bir parlaklık oluşturur ve frenleme etkisinde zayıflama meydana getirir.

Diskli frenler dış ortama açıktır ve daha küçük sürtünme yüzeylerine sahiptir. Diskli frenlerin nem ve dış kirliliklere açık oluşu şikâyet konusu olmakla birlikte diskli frenlerin kuru ve ıslak havada rahatlıkla çalıştıkları belirlenmiştir. Diskli frenlerde sürtünme yüzeyi daha küçük olduğundan daha büyük frenleme kuvvetlerine ve basınçlarına ihtiyaç duyulabilir. Diskli frenlerde servo enerji olmaması, frenlemenin daha sabit olarak çalışmasını sağlar ve yüksek hızlardaki durmalarda tutukluk veya fren kapması meydana gelmez.

Disk ısındıkça frenleme iyileşir. Kampanalıda kampananın ısınması ile genişleme olacağından verim düşüklüğü giderek artar. Disk ısıdıktan sonra pabuçlara doğru açılır ve bu nedenle otomatik ayarlayıcıların işini kolaylaştırır. Diskleri dış etkenlerden korumak zordur [65].



Şekil 6.2. Fren sistemleri ve sistemi oluşturan elemanlar.

6.5. Disk ile Kampana Malzemeleri

Disk ve kampananın mekanik ve ısıl zorlamalara karşı mukavemetli 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 [69].

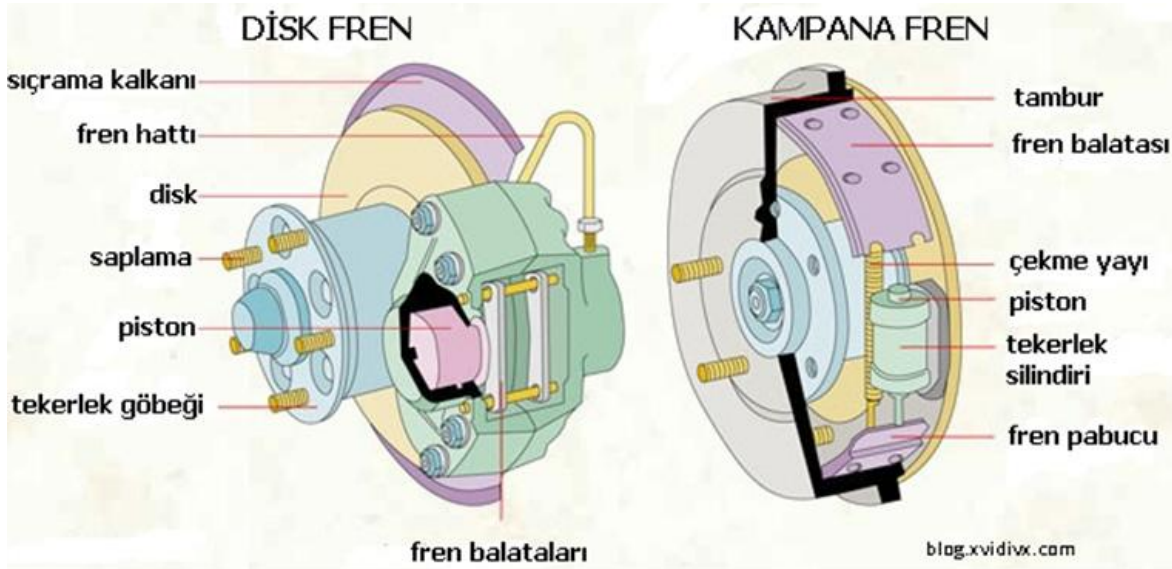
Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampanaların bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısı iletim katsayısının büyük olması istenir. Frenleme esnasında kısa zamanda meydana gelen yüksek ısı miktarı, kampana veya disk tarafından alınıp iletilerek dışarıya verileceğinden, disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletme kabiliyetine sahip olması istenir [70].

Genelde disk ve kampana üretiminde perlitik yapılı dökme demir kullanılır. Kullanılan dökme demirde %3.4 civarında karbon bulunur. Bu dökme demirin sertliği 170-255 HB (kg/mm^2) arasında değişir. Diğer alaşım yüzdeleri Tablo 6.1'de verilmiştir [69].

Tablo 6.1 Disk ve kampana malzemelerinin içeriği

Disk ve Kampana için kullanılan dökme demir analizi				
%C	%Si	%Mn	%S	%P(maks)
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, titreşim soğurma, yüksek ısıl iletkenlik ve aşınma direnci önemli özelliklerindendir. Bunun yanında kırılma oluşu ve dinamik yüklere karşı hassas oluşu dikkati çeker [69,71]. Dökme demirlere eklenen fosfor, %0.118-2.01 (ağırlıkça) arasında bir değere yükseltirise, bu malzemenin sürtünme katsayısı yükselir. İlave fosfor ile sürtünme katsayısının kararlılığı ve aşınma dirençleri de düzelir. Sürtünen dökme demirlerin en iyi fosfor bileşimi Ol'shevskiye göre %1,5-2 arasında, Larin'e göre ise %1,4'tür [72].



Şekil 6.3. a) Kampana tipi fren, b) Disk tipi fren [68]

7. MATERYAL METOD

7.1. Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri

Kompozit malzemelerden üretilen fren balataları bünyesinde bağlayıcı, takviye, dolgu, katı yağlayıcı ve sürtünme malzemeleri gibi birçok farklı malzemelerin farklı oranlardaki kompozisyonlarından meydana gelmektedir. Bu yüzden kompozit bir fren balatası, üretiminden test aşamasına kadar birçok değişik işlemlerden geçmektedir. Bunların başında kullanılacak olan metal ve seramik esaslı tozların öğütülerek uygun tanecik boyutuna getirilmesi, hızlı mikserlerle homojen bir dağılım elde edilene kadar karıştırılması, presleme ve ardından fırınlama işlemleri takip etmektedir. Tüm bu üretim süreçlerini doğru ve hassas şekilde yapılabilmesi için birçok cihazın kullanılması gerekmektedir. Ayrıca üretilen numunelerin sürtünme ve aşınma testlerinin standartlara uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bunun için gerekli olan deney düzeneği ve cihazlar aşağıda verildi.

7.1.1. Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Bu çalışmada, metallerin ve seramik balata malzemelerinin yanı sıra organik malzemeler kullanılarak yarı organik fren balatası üretilmesi ve frenleme performansının incelenmesi amaçlandı. Üretilen balataların, farklı hız, basınç ve sıcaklık şartlarında sürtünme katsayısı ve aşınma deneylerinin yapılabilmesi için TS 555 ve TS 9076 standartlarında belirtilen şartlar göz önüne alınarak bir deney düzeneği tasarlandı. Tasarım ve imalatı yapılan bu deney düzeneği sayesinde yarı organik kompozit fren balatalarının farklı hız, basınç ve sıcaklık şartlarında sürtünme katsayısı- zaman ve sürtünme katsayısı- sıcaklık grafiklerini elde etmek mümkün hale getirmektedir. Bu deney düzeneğinde kullanılan cihazlar ve ölçü aletleri Şekil 7.1'de verildi. Tasarlanan deney setinde test sırasında gerekli gücü sağlayabilmesi için, yapılan hesaplamalar doğrultusunda 5.5kW ve gücünde 0-1400dev/dk arasında çalışan trifaz AGM 132 S 4 tipinde elektrik motoru kullanıldı. Motor ile mil arasındaki titreşimi ve belli miktardaki açısal eksenel kaçıklığı

önlemek amacıyla yıldız tipi elastik kaplin kullanıldı. Elektrik motorunun hareketini fren diskine aktarabilmek için 30mm çapında transmisyon mili ve bu mili yataklamak için diskin aksenal kaçıklığı da dikkate alınarak iki adet UCP206 kaymalı yatak kullanıldı. Deney sırasında diskin sıcaklığını istenilen değere ulaştırabilmek için diskin ön yüzeyine 5mm mesafede konumlandırılan iki adet 1kW gücünde tablet rezistanslar kullanıldı.

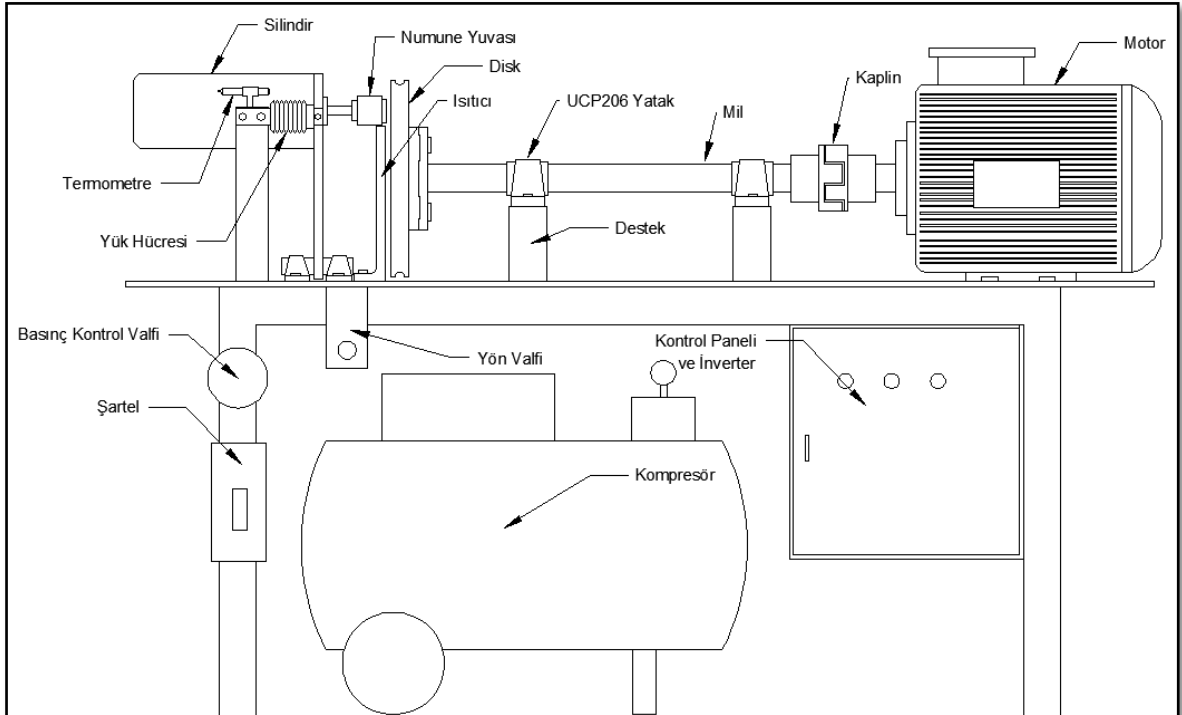


Şekil 7.1 Deney düzeneğinin önden görünüşü

Tasarlanan deney düzeneğinde pnömotik silindir bir lama ile döner mafsallı bağlantı ile tablaya sabitlendi. Bu şekilde silindirin disk ile beraber dönme isteği dikkate alınarak buradaki sürtünme kuvveti, zeminde döner mafsallı olduğu için, doğrudan yük hücresi tarafından algılanacaktır. Sürtünme kuvveti ve sıcaklık değerleri sırasıyla yük hücresinin ve termometrenin ilgili firma tarafından sağlanan ara yüz programları sayesinde deneyler süresince direk olarak kayıt edildi. Deney setinin izometrik görünüşü ve şematik görünüşü sırasıyla Şekil 7.2 ve 7.3’de verildi.



Şekil 7.2 Deney düzeneğinin izometrik görünüşü



Şekil 7.3 Deney düzeneğinin şematik görünüşü ve elemanları

7.1.2. Yük Hücresi

Deneyler sırasında sürtünme kuvvetini ölçmek için elektronikte strain gauge olarak tanımlanan Esit marka BB100 modeli olup 100kg kapasiteli yk hücresi (loadcell) kullanıldı. Yük hücresinin bir ucu sabit bir noktaya, diğr ucu ise zemine döner mafsall ile bağlı pnömatik pistonla sabitlendi (Şekil 7.4.a). Bu sayede diskin balata ile birlikte dönme kuvveti direk olarak yk hücresi tarafından ekrana yansıtıldı. Yük hücresi ile birlikte Esit Smart marka 1g hassasiyetindeki indikatör kullanıldı (Şekil 7.4.b). Deney sırasında yk hücresi 1, 2, 5 ve 10kg ağırlıklar kullanılarak kalibrasyonu yapıldı. Böylece meydana gelebilecek cihaz hataları nlendi.



Şekil 7.4 (a) Yük hücresi, (b) İndikatör

7.1.3. Termometre

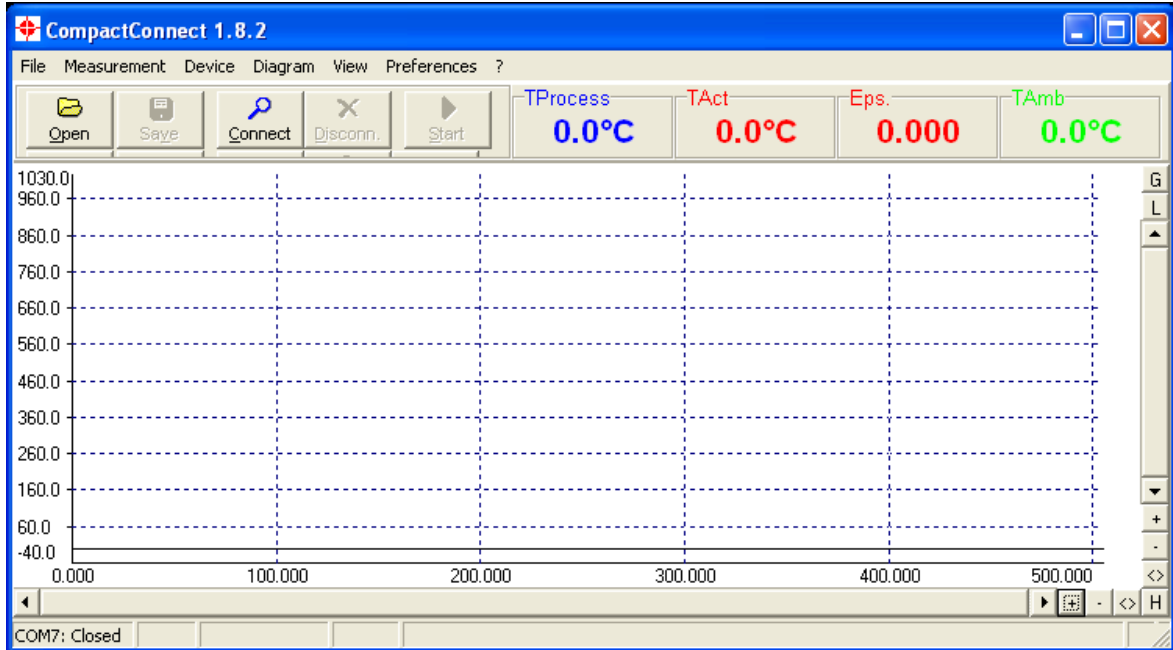
Balata deneyleri sırasında fren diskinde sürtünmeden dolayı yüksek miktarda ısı ortaya çıkmakta ve bunun sonucu olarak balatanın yüzey sıcaklığı artmaktadır. Oluşan bu sıcaklık sürtünme katsayısını önemli derecede etkilemektedir. Deneyler sırasında sıcaklığı ölçmek için Optris CS marka kızılötesi (infrared) termometre kullanıldı (Şekil 7.5). Termometre -40 ile 1030°C sıcaklık aralığında ölçüm yapabilen, $\pm 1,5\%$ hata oranına ve 15ms tepki süresine sahiptir. USB bağlantısı ile ara yüz programı ile sıcaklık verilerini deney süresince kaydedip grafik çizdirme özelliği mevcuttur. Termometre diskin yüzeyine 200mm uzaklığa sabitlenmiş olup, disk üzerinden 13mm çapındaki bir alan üzerinden sıcaklık değerlerinin alınması sağlandı. Deney başlangıcında termometreyi kalibre etmek

için disk üzerine bir termokupl yerleştirilerek, kızılötesi termometre için optimum emissivite değeri 2.25 olarak tespit edildi.



Şekil 7.5 Kızılötesi termometrenin görünüşü

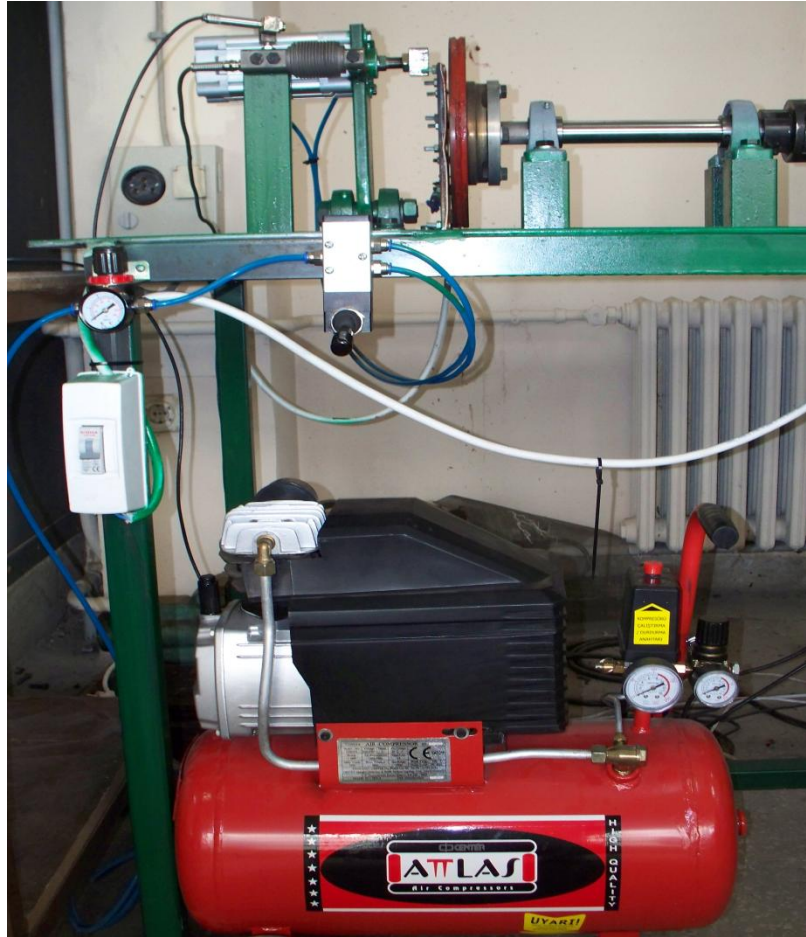
Kullanılan termometrenin, ara yüz programı ile alınan sıcaklık değerleriyle sıcaklık zaman grafiklerini çizdirmek ve bu verileri kaydetme özelliğine sahiptir. Termometre diskten 20cm uzaklığa yerleştirilerek diskin balata numunesine en yakın noktasından yaklaşık 10mm çapında bir alandan sıcaklık değerlerinin ölçmektedir. Bu termometrenin ara yüz programı Şekil 7.6’da görülmektedir.



Şekil 7.6 Termometre ara yüz programı

7.1.4. Pnömatik Sistem ve Elemanları

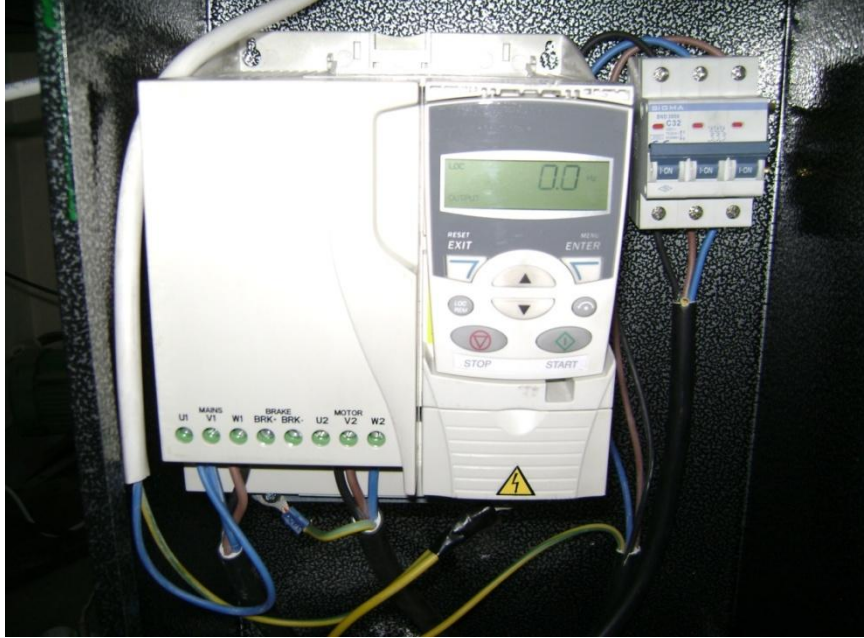
Deneyler sırasında sürtünme katsayısını tespit etmek için sürtünme kuvvetini ölçmek tek başına yeterli değildir. Bir balatanın sürtünme ve aşınma testi süresince sıcaklık artışından dolayı balata genleşmekte ve aşınma kaybından dolayı ise boyunda kısalma meydana gelmektedir. Deney süresince balataya uygulanan normal kuvveti sabit değerde tutmak için, deney setinde ayrıca pnömatik bir sistem kullanıldı. Bu sistem için kompresör olarak Atlas Air Compressor marka ZJ2025A modelinde 2 BG gücünde ve 192l lt/dk hava debisine sahip 6-8bar arası basınçta çalışan kompresör kullanıldı. Deney süresince basıncı sabit bir değerde tutmak için 0-10bar arası çalışan basınç kontrol valfi kullanıldı. Bununla birlikte silindirin ileri ve geri hareketini sağlamak için 63mm çapında pnömatik silindir ve HLPC marka 4H330-08 modelinde yön valfi kullanıldı (Şekil 7.7).



Şekil 7.7 Pnömatik devre elemanları

7.1.5. İnvörtör

Deneyler sırasında fren diskinin devrini istenilen değere göre ayarlanması için ABB marka ACS355 serisi 5.5kW gücünde 0-1400dev/dk arasında çalışabilen üç fazlı 380Volt hız ayarlayıcı invörtör kullanıldı (Şekil 7.8). İnvörtörün çalıştırılması için sisteme konulan şartel, 1 konumuna getirilerek önce dönüş yönü daha sonra kaç devirde dönmesi gerekiyorsa o değer ayarlanır ve sistem harekete geçirilir. Deneyler sırasında TS555 standartlarında balata çizgisel hızının 6 m/s olması gerektiğinden fren diskinin yarıçapı ölçülerek balata numunesinin yüzey alanının merkezine göre yapılan hesaplamada invörtörün hızının 850 dev/dk olması gerektiği tespit edildi.



Şekil 7.8 Kullanılan inverterin görünüşü

7.1.6. Yüzey Parlatma Cihazı

Üretimi yapılan balata numunelerinin yüzeyleri oldukça pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görüldü. Türk standartlarına göre belirtilen balatanın deney esnasında, sürtünen yüzeylerin herhangi bir çizik ya da düzensizliğin olmaması gerekmektedir. Bundan dolayı deneylerden önce üretilen balataların aşınmaya tabi tutulacak yüzeyleri Metasinx marka 180W gücündeki yüzey parlatma cihazı ile parlatılma işlemi yapıldı (Şekil 7.9). Böylece

deneylerden önce tüm numuneler TSE'nin belirttiği şartlara uygun hale getirilerek daha doğru ve hassas elde edilmesi sağlanmış oldu.



Şekil 7.9 Yüzey parlatma cihazı

7.1.7. Sertlik Ölçme Cihazı

Balata numunelerinin üretimi sırasında, mekanik özellikleri birbirinden farklı olan birçok farklı seramik, metal ve organik esaslı tozlar kullanıldığından dolayı yüzeylerdeki sertlik dağılımları da her noktada farklılık göstermesi kaçınılmazdır. Bu farklı sertlik değerlerini almak yerine 5mm çapında bilye ucu kullanılarak, balata yüzeylerinden 5 farklı sertlik ölçümü alınarak bu değerlerin aritmetik ortalaması alındı. Kompozit malzemelerde sertlik değerlerinin ölçmek için daha hassas sonuç veren Brinell sertlik testi kullanıldı. Sertlik testleri Emco marka Brinell sertlik cihazında gerçekleştirildi (Şekil 7.10).



Şekil 7.10 Brinell Sertlik ölçme cihazı

7.1.8. Basma Test Cihazı

Frenleme esnasında balatalar üzerine etki eden kuvvet basma kuvveti ile tanımlanır. Bu etki eden kuvvet balatada basma gerilmelerini oluşturmaktadır. Bundan dolayı üretilen yarı organik kompozit balata numuneleri ilk önce basma gerilmesi testine tabi tutularak dayanımı ölçüldü. Basma testleri için üretilen balataların boyutları 10mm olacak şekilde hazırlanarak yüzeyleri parlatılıp, 80ton basma kuvvetine sahip LOSENHAUSEN marka basma test cihazında 1mm/dk basma hızında yapıldı (Şekil 7.11).



Şekil 7.11 Üniversal basma-çekme test cihazının görünüşü

7.1.9. Toz Karıştırıcı Mikser

Fren balatası üretiminde toz haline getirilen malzemelerin homojen olarak karıştırılma işlemi oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Tozların tamamen homojen bir şekilde karıştırılması için iki farklı eksenle hareket edebilen yüksek devirli kullanıldı.

7.1.10. Hidrolik Pres

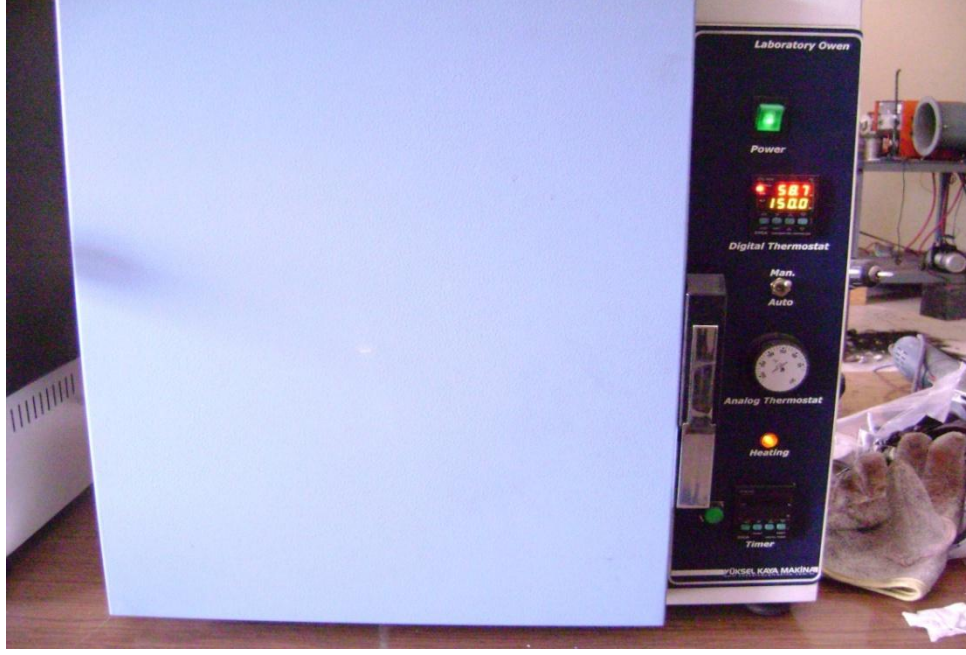
Üretilen numunelerin soğuk presleme işleminde WIKA marka 200 ton basma kapasiteli hidrolik pres kullanıldı (Şekil 7.12).



Şekil 7.12 Hidrolik pres

7.1.11. Isıl İşlem Fırını

Soğuk presleme işleminde elde edilen kompozit balata numunelerinin fırınlanması için dijital termostatlara sıcaklık kontrolü yapılan 50-300°C sıcaklık aralığında çalışabilen Laboratory Owen marka fırın kullanıldı. Kullanılan fırının resmi Şekil 7.13'te verildi.



Şekil 7.13 Dijital sıcaklık ayarlı fırın

7.1.12. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Aşınma deneyleri sonrasında aşınan yüzeylerin morfolojik yapısını incelemek ve yüzeylerde oluşan aşınmanın türünü ve oluşum mekanizmasını incelemek için ZEISS marka SUPRA 50 VP model Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) kullanıldı (Şekil 7.14). Üretilen numunelerin yapısı tamamen metal esaslı iletken toz içermediği için SEM analizleri yapılmasında numunelerin yüzeyleri mikron mertebesinde, yüzey kaplama cihazı ile altınla kaplandı.



Şekil 7.14 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

7.1.13. Optik Mikroskop

Balata numunelerinin üretiminde kullanılacak olan tozların tanecik boyutlarının belirlenmesinde PME Olympus Tokyo marka optik mikroskop kullanıldı (Şekil 7.15). Bu mikroskop sayesinde toz haldeki numuneleri 5, 10 ve 20 kat büyüterek mikron mertebesindeki görüntülerini almak mümkündür. Balata numunelerinden alınan görüntüler bilgisayar ortamına aktarılarak ara yüz programı sayesinde tanecik boyutlarının ölçümleri de yapıldı.



Şekil 7.15 Optik mikroskop

7.1.14. Bilyeli Değirmen

Organik malzeme katkılı kompozit fren balatalarında kullanılan tozların öğütülmesinde ve istenilen tane boyutuna getirilmesinde Union Process marka yüksek enerjili atritör cihazında ortalama 400 dev/dk hızla öğütülmeleri sağlandı. (Şekil 7.16). Tozların öğütülmesi için kullanılacak atritör cihazındaki tank içerisinde yer alan öğütme kabı ve öğütücü bilyeler (5/8 inç çapında) paslanmaz çelik malzemeler kullanıldı. Tozların öğütülmesi sırasında herhangi bir yanmanın önüne geçmek için öğütme tankının dışında

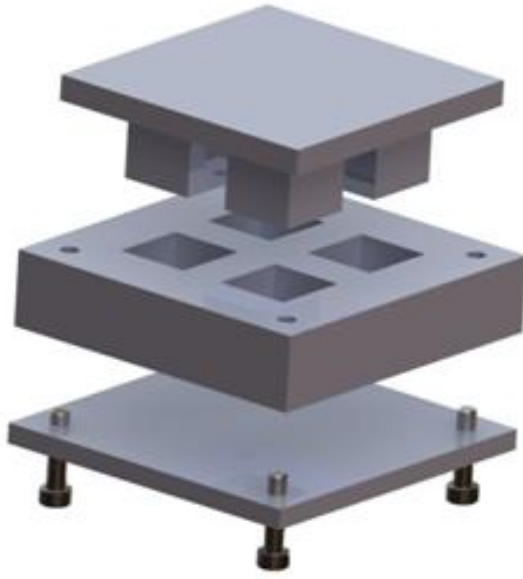
sürekli soğutucu akışkan gönderilmesi sağlandı. Ayrıca tozların tanecik boyutunun belirlenmesinde numaralı elekler kullanılarak istenilen tane boyutuna ulaşılması sağlandı. Öğütme sırasında öğütülecek toz ile bilye ağırlığı arasında 1/6 lık bir oran göz önüne alınarak gerçekleştirildi. Cihaz üzerindeki invertör sayesinde ise istenilen devirde öğütme yapmak mümkün olmaktadır.



Şekil 7.16 Bilyeli değirmen

7.1.15. Numune Kalıbı

Kompozit balata numunelerinin soğuk preste ön şekillendirme verilmesi ve tozların bütünlüğünün sağlanması için Şekil 7.17’de verilen soğuk pres kalıbı dört adet numunenin aynı anda preslenmesine imkânı verecek şekilde imalatı gerçekleştirildi. Kalıp alt tabla, dişi ve erkek kısım olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır. Kalıbın imalatında toleransların hassas bir şekilde verilebilmesi için bir program yazılarak üç eksenli CNC freze tezgâhı kullanılarak ölçüleri TS 555 ve TS 9076’da belirtilen standart balata ölçüleri dikkate alınarak 25,4x25,4mm boyutlarında imal edildi.



Şekil 7.17 Soğuk pres kalıbının şematik görünüşü

7.1.16. Hassas Terazi

Üretilen yarı organik kompozit malzemelerin üretiminde tozların oranları hesaplanırken kütlece oranları dikkate alındı. Hem üretim esnasındaki toz oranları belirlenirken hem de aşınma deneyleri sırasında numunelerdeki kütle kayıpları ölçülürken 0,0001 gram hassasiyetinde, AND marka GR-200 tipi hassas terazi cihazı kullanıldı (Şekil 7.18).



Şekil 7.18 Hassas terazi

7.2. Kullanılan Balata Malzemeleri

Frenlemenin yüksek bir verimle yapılabilmesi için en önemli kriterlerin başında disk-balata ara yüzeyinde minimum aşınmayı sağlayan yüksek ve kararlı sürtünme katsayısının değeridir. Bu kriteri sağlayan en önemli faktörler ise balata malzemesinin kompozisyonu ve mikro yapısıdır [91]. Asbeste alternatif olarak geliştirilen ve sağlık açısından bir problem teşkil etmeyen polimer esaslı fren balataları farklı çalışma koşulları altında güvenlik sınırlarını aşmadan çalışabilmelerinin yanı sıra, kararlı bir sürtünme katsayısına ve düşük aşınma oranlarına sahip olmaları nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen malzeme olmuştur. Polimer matrisli bir fren balata malzemesi genellikle seramik partikülleri ve lifleri, mineraller, metalik lifler, katı yağlayıcılar, elastomerler ve hepsini bağlayan fenolik reçine gibi çok sayıda farklı komponentler içermektedir. Polimer matrisli fren balata malzemeleri dışında metal içermeyen balata malzemeleri de günümüzdeki taşıtlarda kullanılan diğer bir balata çeşididir. Uçak sanayinde, yoğun olarak kullanılan seramik (C/C, C/Sic, C/BN, C/B₄C) fren balataları, günümüzde geliştirilen en son balata malzemeleridir [92].

Fren balataları istenen sürtünme kararlılığı, çalışma ömrü, minimum gürültü ve vibrasyonu karşılamak üzere tasarlanmalı ve imalatı yapılmalıdır. Sürtünme kararlılığı fren balatasında sıcak, soğuk, ıslak ve kuru çevre koşulları altındaki ve farklı frenleme hızlarındaki performansını ifade etmektedir. Bu bakımdan güvenliği etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Metalik balatalar, genellikle çok ağır frenleme şartlarında ve yüksek sıcaklıklarda kararlı sürtünme katsayısına sahip olma özelliği yanında daha fazla ısı iletirler. Frenleme basıncının artması ve olumsuz çevresel etkenler (soğuk, sıcak, yağ ve tuzlu su) sürtünme katsayılarında büyük değişimlere neden olmaz [93]. Ancak metalik balataların gürültü ve vibrasyona eğilimli olması diske hasar vermesi gibi dezavantajları vardır. Bu yüzden, büyük taşıtlarda ve kamyonlarda bu tür metalik balatalar tercih edilmektedir. Daha yüksek konforun tercih edildiği binek tipi hafif taşıtlarda ise genellikle daha az gürültü ve vibrasyonun meydana geldiği düşük metalik ve organik balatalar tercih edilmektedir. Ancak organik balataların çalışma ömürleri kısa olup yüksek sıcaklıklardan büyük oranda etkilenmektedir. Her iki tip balatanın avantajlarından faydalanıp dezavantajlarını en düşük seviyede tutabilmek amacıyla sürekli olarak polimer matrisli (yarı metalik) balatalar geliştirilmektedir. Polimer matrisli balatalar, metalik ve organik

balataların olumlu özelliklerinin taşınmasının yanı sıra, seramik balatalar ile karşılaştığında daha ucuz olmaları ve kolay üretilmeleridir. Ancak seramik balatalar kadar yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı değildirler [91,94].

Bu çalışmada, hayvansal ve bitkisel esaslı organik tozlar kullanılarak yarı metalik ve organik esaslı imal edilen tüm balataların aksine, daha ziyade kompozit fren balatası üretimi amaçlandı. Üretilen balatalarda metal, seramik ve bağlayıcı malzemelerin yanı sıra sürtünme katsayısını yüksek ve stabil hale getirebilmek, vibrasyon ve gürültülü frenlemeyi minimum seviyeye indirmek amacıyla organik tozlar kullanıldı. Bu tozların özellikleri ve balata içerisindeki oranları aşağıda verildi.

7.2.1. Bağlayıcı (Matris) Malzemeler

Bağlayıcı malzemeler genellikle balata üretiminde kullanılan seramik, organik ve metal esaslı tozları bir arada tutmak için kullanılmaktadır. Bu malzemelerin yüksek sıcaklığa dayanıklı olması gerektiğinden yapılan bu çalışmada termoset bağlayıcı olarak bilinen ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı (yaklaşık 350°C) toz halindeki fenolik reçine kullanıldı.

7.2.2. Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri fren balatasında mekaniksel dayanım, sertlik, termal stabilite, aşınma direnci ve kararlı bir sürtünme üretmelidir. Üretilen bu fren balatalarında takviye malzemesi olarak çelik yünü, bakır tozu ve hayvansal ürünlerden elde edilen organik tozlar kullanıldı. Çelik yünü yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda kararlı bir sürtünme katsayısı göstermesi nedeni ile kullanıldı. Buna karşılık çelik yünü miktarının belirli bir değerden fazla kullanılması balatada gürültülü ve titreşimli bir frenlemeye sebebiyet vereceğinden optimum bir oranın kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte yüksek oranda çelik yünü kullanıldığında karşı diskte istenmeyen aşınmalara neden olmaktadır. Bakır tozları ise genellikle balata yüzeyinde oluşan ısının düzgün bir şekilde homojen dağılmasını sağlamak ve yüksek sıcaklıklarda balata ara yüzeyinde bakır oksit oluşturmamasından dolayı kullanılması tercih edilmektedir. Bunların yanı sıra organik esaslı hayvansal tozların kullanımı sağlandı. Böylece kullanılan bu organik toz karşı diskte

aşınmayı azaltarak yüksek sıcaklığa dayanımını artırmak ve yanmama özelliği ile birlikte organik balata üretiminde bir avantaj sağlamak amacıyla kullanıldı.

7.2.3. Dolgu Malzemeleri

Genellikle, dolgu malzemeleri balatanın maliyetini düşürmek, üretim kolaylığı sağlamak ve yanmayı engellemek için kullanılmaktadır. Çok çeşitli dolgu malzemeleri olmasına rağmen bu çalışmada dolgu malzemesi olarak toz halde barit (BaSO_4) ve buna alternatif olarak geliştirilen hayvansal esaslı tozlar kullanıldı. Barit yüksek sıcaklığa dayanıklı olması ve aşınma direncinde önemli bir etkidir ancak bununla beraber üretimi oldukça kolay olan ve ham madde rezervi daha iyi olan hayvansal esaslı tozların balata üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılması, hiç şüphesiz ki kullanım ve maliyet açısından son derece önemlidir.

7.2.4. Sürtünme Ayarlayıcı Malzemeler (SAM)

Sürtünme ayarlayıcı malzemeler genellikle balata disk ara yüzeyinde yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı elde etmek için kullanılır. Bu çalışmada abrasive olarak aşınma direnci ve termal mukavemeti oldukça yüksek olan alüminyum oksit (Al_2O_3), katı yağlayıcı olarak da oldukça yaygın kullanılan ve kararlı bir sürtünme katsayısına sahip olan sentetik grafit (C) kullanıldı. Bunların yanı sıra ise yüksek sıcaklıklarda sürtünmeyi iyileştirmek ve soğuk aşınmayı önlemek amacıyla organik esaslı bir malzeme olan sürtünme tozu (Cashew split nut) ile bazı hayvansal ürünlerin tozları kullanıldı.

7.3. Numunelerin Üretimi

Fren balata malzemeleri çok ince tozlar halindeki metal veya metal dışı malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılması, istenilen formda preslenmesi ve kontrollü bir atmosfer altında belirlenen süre içerisinde sinterlenmesini kapsayan üretim süreçlerinden oluşmaktadır. Bu yöntem ile tek bir aşamada üretim yapmak mümkündür [95]. Fren balata üretiminde bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni farklı özelliklere sahip karışım malzemelerinin özelliklerini yitirmeden üretimin gerçekleştirilebilmesidir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı düşük olan polimer ve organik esaslı malzemelerin üretim

sırasında yanarak özelliklerini kaybetmeleri söz konusu olabilir. Toz metalürjisi yöntemiyle yapılan bir fren balatası üretiminde ise balatayı oluşturan tüm malzemeler üretim esansında özelliklerini korurlar, istenen boyutlara sahip gözenekli bir yapı elde edilebildiği gibi farklı boyut ve şekle sahip malzeme tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara da dönüştürülebilir. [91]. Fren balatası üretimi genellikle tozların öğütülmesi, karıştırılması, presleme ve ardından sinterleme işlemleri olarak birbirini takip eden bir süreçte gerçekleştirilir. (Şekil 7.19).



Şekil 7.19 Numunelerin üretim şeması

Kullanılacak organik tozların tek başına balata içerisindeki etkilerini ve oranlarının balatanın aşınma ve sürtünme karakteristiğinde nasıl bir özellik çıkaracağını belirlemek amacıyla her biri tek başına farklı oranlarda kullanıldı. Balata numunelerin üretilmesinde dolgu malzemesi olarak kullanılan midye, kemik, hayvan tırnağı ve boynuzu tozlarının yüzde kütle oranları sırasıyla Tablo 7.1,2,3 ve 4’te verildi.

Tablo 7.1 Mide tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.

Numune Kodu	Fenolik Reçine	Çelik Yünü	Bakır Tozu	Barit Tozu	Midye Tozu	Al ₂ O ₃	Sentetik Grafit	Sürtünme Tozu
N1	20	10	15	30	0	5	5	15
N2	20	10	15	25	5	5	5	15
N3	20	10	15	20	10	5	5	15
N4	20	10	15	10	20	5	5	15
N5	20	10	15	0	30	5	5	15

Tablo 7.2 Kemik tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.

Numune Kodu	Fenolik Reçine	Çelik Yünü	Kemik Tozu	Bakır Tozu	Barit Tozu	Al ₂ O ₃	Sentetik Grafit	Sürtünme Tozu
N6	20	7,5	2,5	15	30	5	5	15
N7	20	5	5	15	25	5	5	15
N8	20	2,5	7,5	15	20	5	5	15
N9	20	0	10	15	10	5	5	15

Tablo 7.3 Boynuz tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.

Numune Kodu	Fenolik Reçine	Çelik Yünü	Bakır Tozu	Barit Tozu	Al ₂ O ₃	Sentetik Grafit	Sürtünme Tozu	Boynuz Tozu
N10	20	10	15	30	5	5	11	4
N11	20	10	15	30	5	5	7	8
N12	20	10	15	30	5	5	3	12
N13	20	10	15	30	5	5	0	15

Tablo 7.4 Tırnak tozu kullanılan balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.

Numune Kodu	Fenolik Reçine	Çelik Yünü	Bakır Tozu	Barit	Al ₂ O ₃	Sentetik Grafit	Sürtünme Tozu	Tırnak Tozu
N14	20	10	15	30	5	5	11	4
N15	20	10	15	30	5	5	7	8
N16	20	10	15	30	5	5	3	12
N17	20	10	15	30	5	5	0	15

İkinci kısımda ise yarı metalik balata içerisindeki organik tozların yalnız başına etkilerinin araştırılmasının yanında, kendi aralarında oluşturduğu tamamen organik balata olarak tanımlanan balatalar üretildi. Bu kısımda üretilen tamamen organik esaslı balata numunelerinin kütlece yüzde bileşimleri Tablo 7.5’te verildi.

Tablo 7.5 Organik tozlardan üretilen balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.

Numune Kodu	Fenolik Reçine	Kemik Tozu	Barit	Midye Tozu	Boynuz Tozu	Tırnak Tozu
N18	20	25	0	30	25	0
N19	20	25	0	30	15	10
N20	20	25	0	30	5	20
N21	20	20	0	40	20	0
N22	20	15	0	45	20	0
N23	20	10	0	50	20	0
N24	20	25	10	20	25	0
N25	20	25	20	10	25	0
N26	20	25	30	0	25	0

Yapılan deneyler sonrasında tamamen organik balataların bazılarının sürtünme katsayıları istenen seviyede tutulmuş olsa da yüzeylerde aşınma miktarı istenen değerden fazla olması ve bazı lokal yanmaların meydana geldiğinden dolayı bu balatalara seramik ve metal esaslı malzeme takviyesi yapılarak organik bakımdan daha zengin yarı metalik fren balataları üretildi. Bilhassa üretilen esaslı malzemeler tırnak ve boynuz tozları yanmaya daha fazla

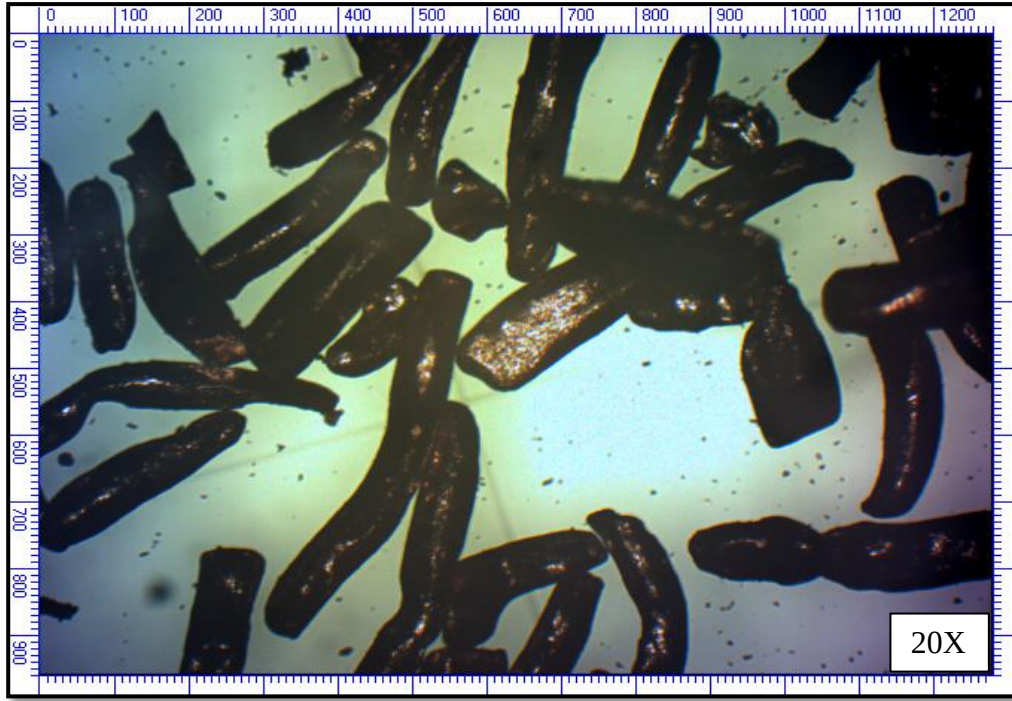
eğilimli olduğundan metal eklenmedi. Bu çalışmada kemik ile midye tozları daha ağırlıklı kullanıldı. Üretilen bu balataların kütlece yüzde bileşimleri Tablo 7.6’da verildi.

Tablo 7.6 Organik tozlardan üretilen balata numunelerinin kütlece yüzde içerikleri.

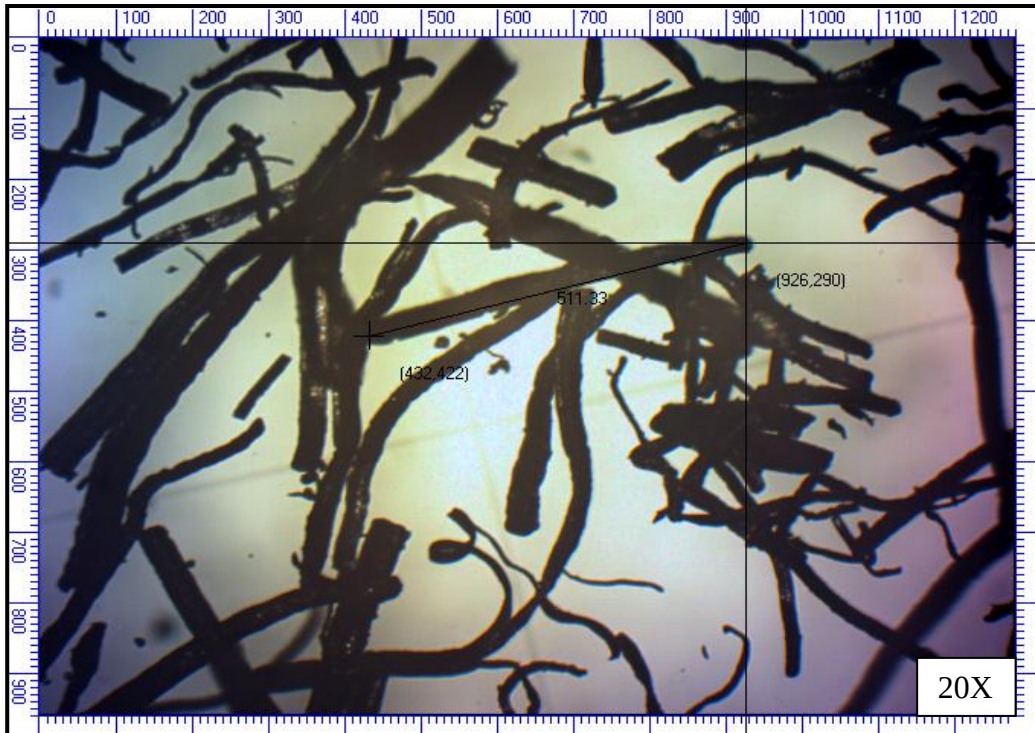
Numune Kodu	Fenolik Reçine	Çelik Yünü	Bakır Tozu	Kemik Tozu	Midye Tozu	Barit Tozu	Al ₂ O ₃ Tozu	Sentetik Grafit	Sürtünme Tozu
N27	20	0	0	25	0	30	5	5	15
N28	20	0	0	25	10	20	5	5	15
N29	20	0	0	25	20	10	5	5	15
N30	20	0	5	20	30	0	0	5	20
N31	20	0	10	15	30	0	0	5	20
N32	20	0	15	10	30	0	0	5	20
N33	20	5	0	20	15	15	5	5	15
N34	20	10	0	15	15	15	5	5	15
N35	20	15	0	10	15	15	5	5	15

7.3.1. Tozların Öğütülmesi

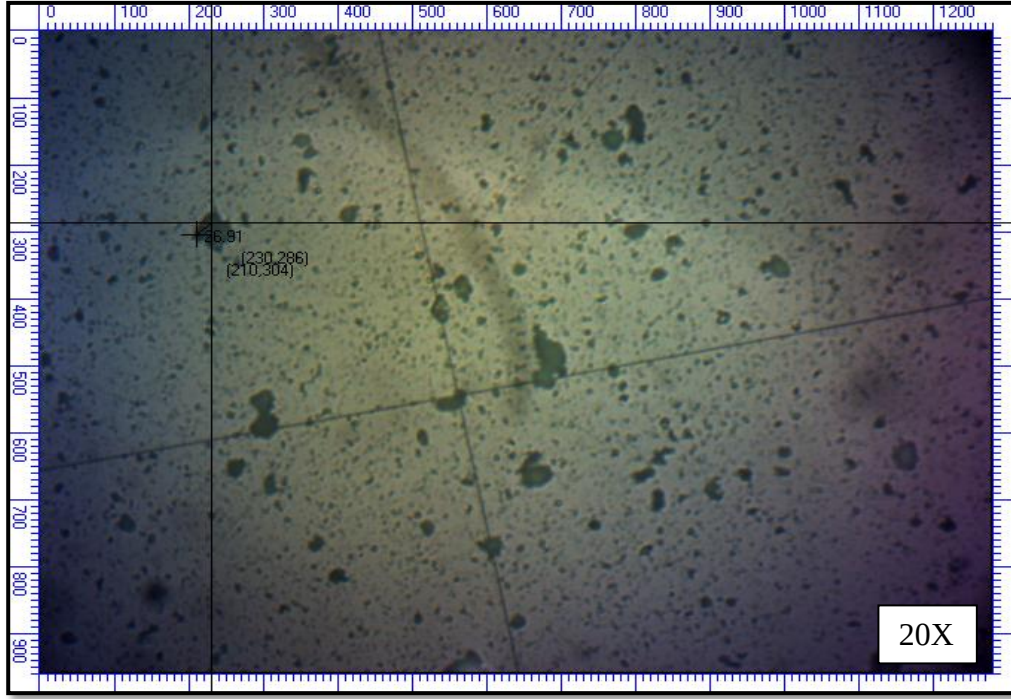
Fren balatalarının üretim aşamasının başında balata içerisinde yer alacak tozların öğütülüp istenilen tanecik boyutuna getirilmesi gelmektedir. Çalışmada kullanılan çelik yünü kırılmış halde takviye elemanı, bakır ise granül halde kullanacağından ön öğütme işlemlerine tabi tutuldular. Bu şekilde diğer tozları daha mukavemetli olarak bir arada tutacağından ve aşınma direncini düzenleyeceğinden önemlidir. Bunun yanı sıra hazır olarak alınan tozlar istenen tanecik boyutunda temin edildiğinden dolayı herhangi bir öğütme yapılmadı. Öğütme yapılan tozlar kırıcı değirmen ile belirli bir tane boyutuna getirilen organik esaslı tozlardır. Kullanılan bu organik esaslı malzemeler 200 mesh’lik elekler kullanılarak her öğütme sonrasında eleklerden geçirilerek eşit tane boyutuna getirildi. Kullanılan diğer balata kompozisyonlarının ortalama tanecik boyutu mikron olarak bölmelendirilmiş ve 20 kat büyütülmüş optik görüntülerde verildi. (Şekil 7.20, 21, 22, 23, 24, 25 ve 26).



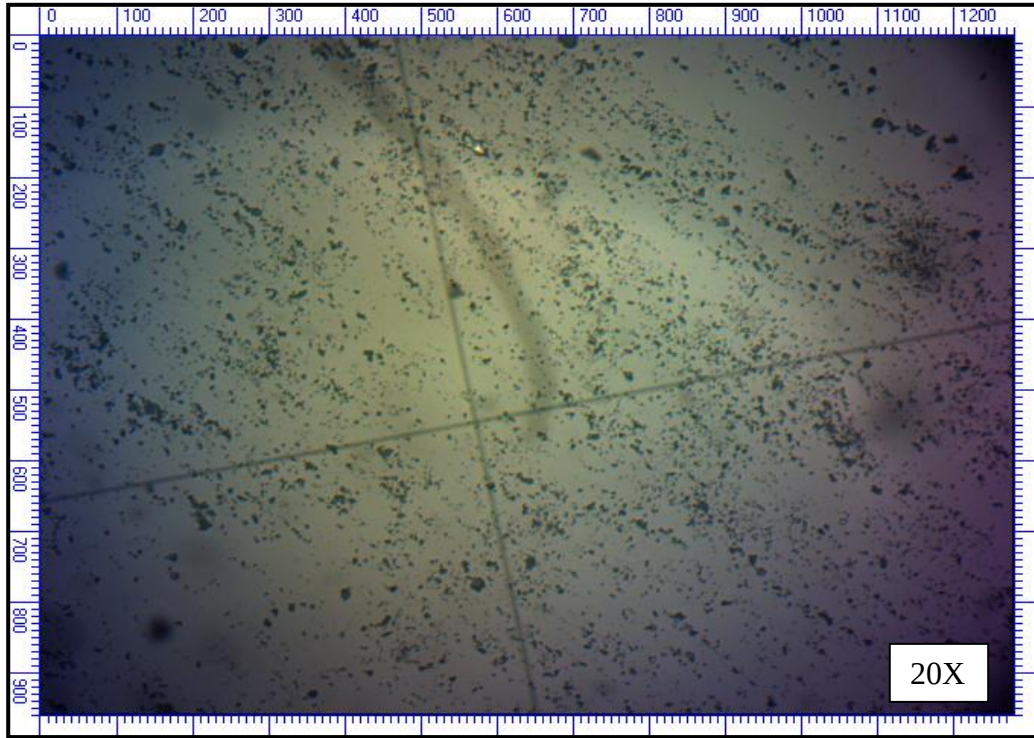
Şekil 7.20 Bakır tozlarının optik mikroskop görüntüsü



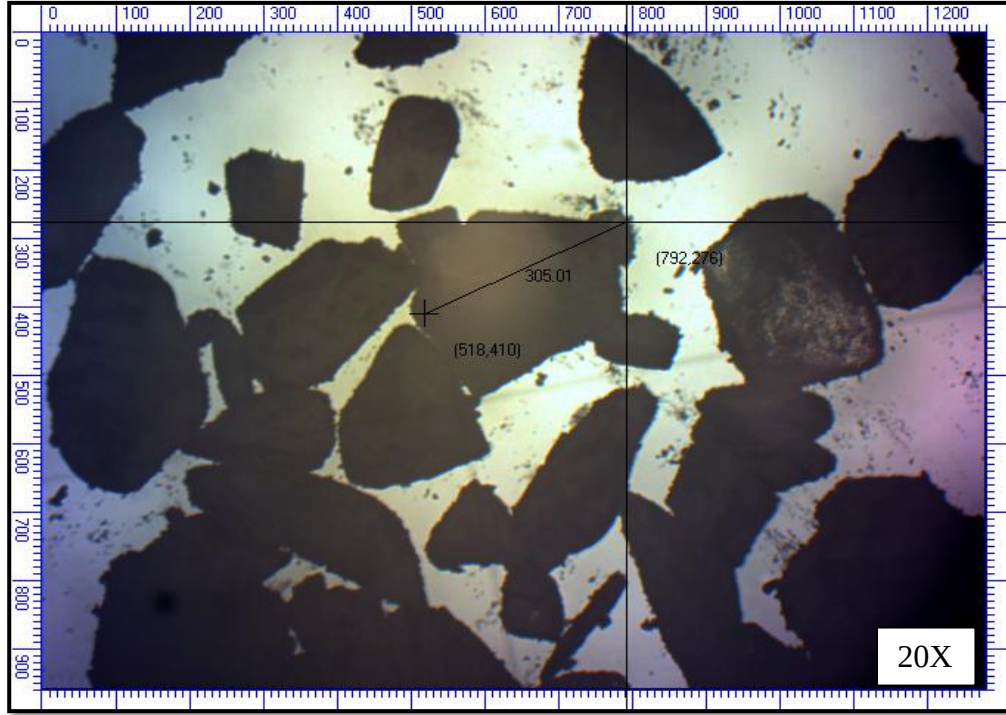
Şekil 7.21 Çelik yününün optik mikroskop görüntüsü



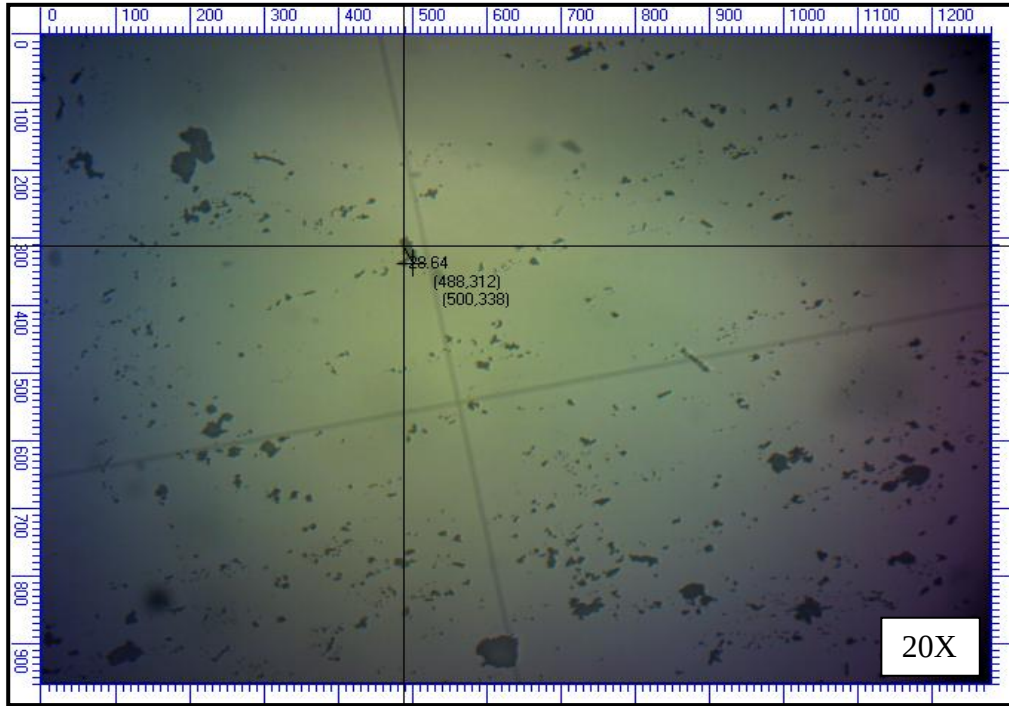
Şekil 7.22 Alüminyum oksit (Al_2O_3) tozlarının optik mikroskop görüntüsü



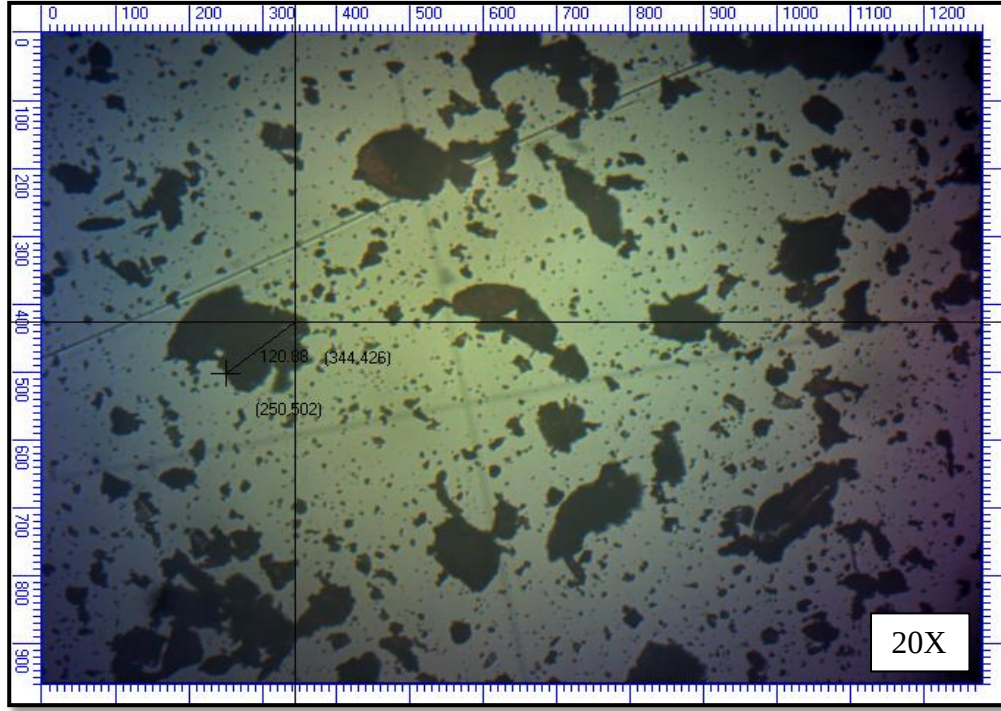
Şekil 7.23 Barit tozlarının optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.24 Kemik tozlarının optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.25 Midye tozlarının optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.26 Boynuz tozlarının optik mikroskop görüntüsü

7.3.2. Toz Karıştırma İşlemi

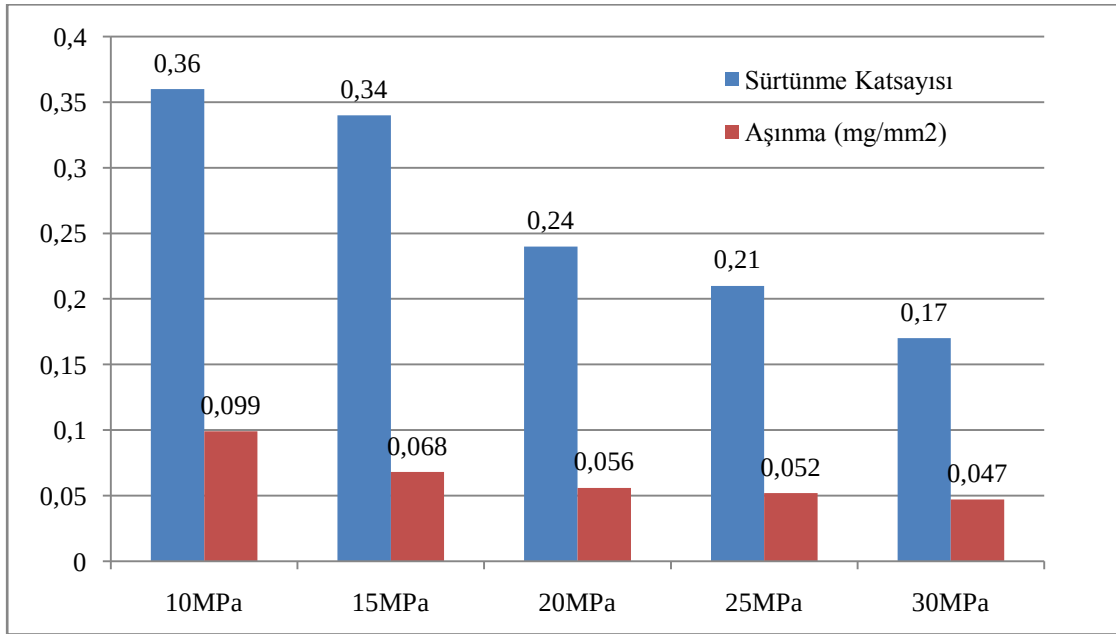
Karıştırma işleminin tipi çoğunlukla karışımı oluşturan malzemelerin türüne bağlıdır. Özellikle yoğunlukları, partikül boyutları ve bazen yüzey karakteristikleri ve şekilleri önemli farklılıklar gösteren toz bileşenlerde karıştırma işlemi zor olabilmektedir. Karıştırma işlemi segregasyonu önlemek açısından çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Segregasyonu önlemek için karışıma genellikle yağlayıcı (grafit) eklenir. Toz karıştırma işlemi için yapılan çalışmalar dikkate alınarak 10 dakikalık karıştırma süresi uygun görüldü. Toz karıştırma işlemi sonunda elde edilen ürün karışımı Şekil 7.27’de görülmektedir.



Şekil 7.27 Elde edilen toz karışımının görünüşü

7.3.3. Soğuk Presleme

Kalıplama işlemi, karıştırma işleminden sonra homojen olarak dağılmış olan toz partiküllerinin hidrolik veya mekanik preslerle bir kalıp içerisinde sıkıştırılması işlemidir. Kalıp içerisine tozlar konulduktan sonra, üst baskı plakası ile tek yönlü basma gerçekleşir. Uygulanan basınç miktarı arttıkça toz kütlesinin yoğunluğu da artar, ve böylece gözenek oranı da azalır. Bunun yanında porozite, tozların Young Modülü ve sönümlenme özelliği ile de doğrudan ilişkilidir. Üretilen balata numunelerindeki presleme basıncını optimum hale getirmek için 10MPa ile 30MPa arasında değişik basınçlar denendi. Elde edilen aşınma ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri Şekil 7.28’te görülmektedir.



Şekil 7.28 Farklı presleme basınçları altında elde edilen aşınma ve sürtünme katsayısı değerleri

Grafikte presleme basıncının artışı sürtünme katsayısında azalma gösterdiği, aşınma direncinde ise artış olduğu gözlemlendi. 10MPa basınç altında sürtünme katsayısı en yüksek değere ulaşmasına rağmen porozite oranı istenen seviyeden yüksek oldu ve yüksek miktarda aşınma meydana geldi. Diğer yandan basıncın artışı aşınma direncini iyileştirdiği ancak yüzeyde istenmeyen düzeyde sertlik ve bunun yanında titreşim ile gürültü meydana getirdiği için sürtünme katsayısını düşüğü gözlemlendi. Elde edilen bu veriler ışığında en uygun presleme basıncının 15MPa alınması uygun görüldü.

7.3.4. Numunelerin Fırınlanması

Fırınlama işlemi, sıcaklık kontrollü atmosfer altında toz partiküllerinin kimyasal bağlanmasını sağlayan işlemdir. Özellikle fren balatalarında fırınlama işlemi (sıcaklık ve süre) reçine üreticileri tarafından belirlenir ve reçinenin yapısına zarar vermeyecek üretim parametrelerinde gerçekleştirilir. Ayrıca fırınlama sıcaklığı, süresi ve atmosferi gözenekliliği de büyük ölçüde etkilemektedir. Çünkü sıcaklıkla bağlayıcı reçinenin akıcılığı dolayısıyla gözeneklilik de değişmektedir. Gözenekliliğin en büyük avantajı, ses ve vibrasyonu sönümleme özelliklerine sahip olmasıdır [91]. Numunelerin fırınlanmasında, balata bileşenlerinin özelliğini kaybetmemesi için reçine üreticisi tarafından önerilen 150°C sıcaklık altında fırınlama işlemi uygun görüldü. Bunun yanı sıra 180 ve 200°C sıcaklık altında yapılan fırınlama işlemlerinde balata içerisindeki bazı organik tozların kimyasal yapısının bozulduğu gözlemlendi. Daha sonra numuneler sıcaklık kontrollü fırında 2 saat boyunca fırınlama işlemine tabi tutuldu. Fırınlama işlemi sonrasında elde edilen organik ve yarı metalik numuneleri Şekil 7.29’da görülmektedir.



Şekil 7.29 (a) Yarı metalik balata (b) Organik balata

7.3.5. Yüzey İşlemleri ve Numunelerin Test İçin Hazır Hale Getirilmesi

Fırınlama işleminden sonra numuneleri sürtünme ve aşınma deneyine hazır hale getirebilmek için aşınacak yüzeylerin yüzey parlatma cihazı ile yüzeyleri parlatıldı. Kalıptan çıkan numunelerin yüksekliği her deney için eşit boyda olması gerektiğinden

bütün numunelerin boyları 10mm olacak şekilde ayarlandı. Parlatma işleminde ise balata numuneleri önce 1200 mesh SiC zımpara ile parlatılıp ardından çuhaya vuruldu. Kalıptan çıkan numunelerin yüzeyi istenen 25,4x25,4mm² olduğundan tekrar herhangi bir işleme tabi tutulmadı.

7.3.6. 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 [96].

Nisan 1991 tarihli TS9076'da, fren balataları için sürtünme katsayısının belirlenmesinde uygulanacak deney şartları açıklanmıştır. Bunlar;

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

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

Alıştırma aşamasında 700kPa 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 1050kPa basınç altında yapılmalıdır. Bununla birlikte, 700kPa basınç altında 100°C sıcaklıkta sürtünme katsayısı sabit oluncaya kadar ve yüzey teması en az %95 oluncaya kadar 310dev/dk döndürülür [97].

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 [97]. Asbest ihtiva etmeyen kompozit malzemeli demiryolu 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 [98].

Balatalarda sertlik deneylerinin TS139'da belirtilen şartlarda yapılması gerektiği TS555'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 [99].

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.

$$V = \frac{1}{2\pi R_d} \times \frac{\Delta m}{n f_m \rho} \quad (7.1)$$

V = Özgül aşınma (cm^3/Joule)

Δm = Deneyden önce ve sonra ölçülen balata kütlesi farkı (g)

ρ = Balata yoğunluğu (g/cm^3)

R_d = Disk yarıçapı (m)

f_m = Deneydeki ortalama sürtünme kuvveti (N)

n = Toplam devir sayısı (devir)

8. DENEYSEL SONUÇLAR

8.1 Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Test Sonuçları

Kompozit malzemeden yapılan fren balataları yapısında takviye malzemeleri, matris malzemeleri, dolgu malzemeleri ve sürtünme malzemeleri gibi birçok farklı malzeme barındırmaktadır. Sadece sürtünme ayarlayıcı malzeme için 20 den fazla değişik malzeme kullanılabildiğini ve bu malzemelerin fren balatası içinde yüzde olarak bileşimini düşünersek deneylerde çok fazla sayıda farklı malzeme kombinasyonları çıkmaktadır. Ve her bir malzeme çeşidi ve oranı için fren balatasının termal ve mekanik özellikleri önemli ölçülerde değişmektedir.

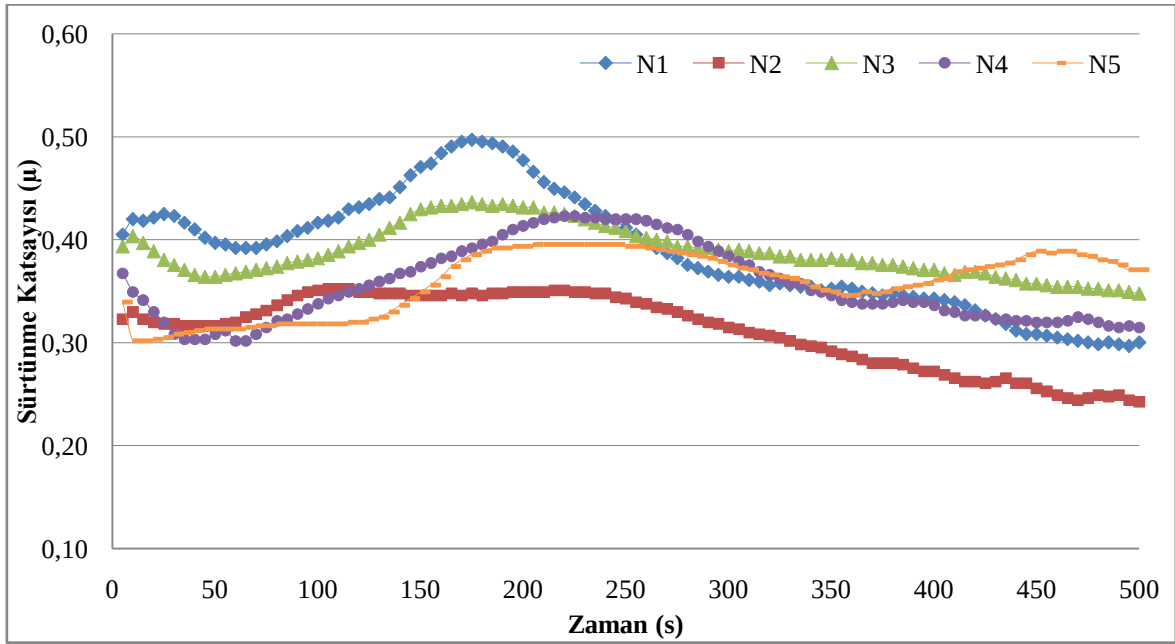
Bir malzemenin fren balatası olarak kullanılabilmesi için öncelikle standartlarda belirtilen ve stabil bir sürtünme katsayısına, yeterli görülen servis ömrünü tamamlayabilmesi için de iyi bir aşınma direncine sahip olması beklenir. Yapılan bu deneysel çalışmalarda yaklaşık olarak 150 adet balata numunesi üretildi. Üretilen balatalar bir önceki bölümde belirtildiği gibi gerekli imalat aşamalarından geçirilerek yüzeyleri sürtünme ve aşınma deneyleri için uygun hale getirildi. Deneyler sırasında öncelikli olarak balata disk temasını TS555 fren balatası standartlarında belirtildiği gibi yüzey teması %95 oluncaya kadar 700kPa basınç altında gerektiğinde fren diski soğutularak sürtünme deneyi için alıştırma işlemi yapıldı. Sürtünme ve aşınma deneylerinde deney başlangıç sıcaklığı 50°C alınarak deneyler başlatılmış olup, termometre ve yük hücresinden her 5 saniyede bir veri alınarak grafikler elde edildi. Üretilen numuneler TS555 ve TS 9076 standartları göz önünde bulundurularak 1050kPa basınç altında 6m/s bir çizgisel hız ile 3000m yol alması sağlandı. Deneylerde son sıcaklık genellikle 350°C olarak belirlenmiş olup gerektiğinde ısıtıcılar devreye girerek istenen sıcaklığa ulaşılmaya çalışıldı.

Aşınma değerleri için TS555 standartlarında aksi belirtilmedikçe özgül aşınma ifadesine gerek yoktur ifadesi göz önüne alınarak özgül aşınma değerleri hesaplanmadı. Aşınma miktarı numunelerin deney öncesi ve sonrası kütleleri hassas terazi ile ölçülerek kütle kaybı bulunmuş ve balatanın yüzey alanına bölünerek bir deney sırasında birim alana düşen aşınma miktarı hesaplandı. Sürtünme katsayısı değerleri hesaplanırken sürtünme kuvvetinin normal kuvvet oranı dikkate alındı. Fakat yük hücresi numune ile aynı yatay doğrultuda konumlanmadığından aradaki moment farkı hesap edilerek 1,14 değerinde bir cihaz sabiti belirlendi. Elde edilen bütün sürtünme katsayısı değerleri bu sabit sayı ile çarpıldı. Sürtünme ve aşınma testlerinde her deney üç defa tekrarlanarak olup elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları alındı.

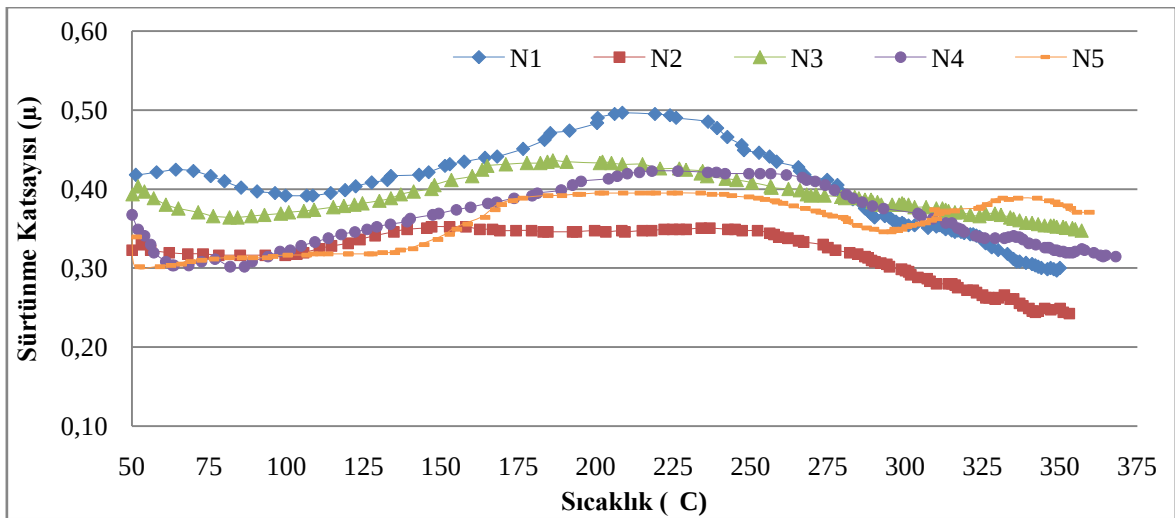
8.1.1 Midye Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları

Midye kabuğu elektron mikroskobu altında 300.000 kez büyütüldüğünde, tuğladan bir duvar görünümü ortaya çıkmaktadır. Bu duvar, harç niteliğindeki bir proteinden ve kalsiyum karbonattan yapılmış tuğlalardan oluşmaktadır. Kalsiyum karbonat kırılğan bir niteliğe sahip olmasına karşın, kabuk katmanlı yapısından dolayı olağanüstü sağlam ve insan yapımı seramikten daha az kırılğandır. Bir halatın sadece bir ipi koptuğunda bütün halat kopmuş olmaz. İşte buna benzer şekilde midye kabuğunun bu katmanlı yapısı çatlakların yayılmasına engel olmaktadır. Ayrıca midye kabukları sürekli olarak tuzlu suya maruz kaldığından korozyon dirençleri çok iyi olduklarından dolayı sıvı ortamında kütleli kayıp oldukça düşüktür. Bunun yanında yapısında seramik esaslı kalsiyum karbonat içerdiğinden yanmaya karşı direnci oldukça iyidir. Bütün bunlar bir araya gelerek midye kabuğu tozlarının fren balatası içerisinde dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği düşünülmüş olup midye tozu içeren numuneler üretilip testlere tabi tutulmuştur. Midye tozu katkılı numunelerin sürtünme zaman ve sürtünme sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de verilmektedir. Midye tozu kullanılmayan N1 numunesi için sürtünme katsayısı 200 saniyeye kadar bir artış gösterdiği tespit edildi. Bu noktada sıcaklık 200 ile 225°C arasında olup sürtünme filminin tam olarak diğer midye tozu katkılı numuneler için de bu sıcaklık arasında olduğu grafiklerde açıkça görülmektedir. %5 midye tozu katkılı numunede stabil bir sürtünme katsayısı elde edilmesine rağmen sıcaklıkla beraber ciddi bir azalma gözlemlendi. Sürtünme katsayısı-zaman ve sürtünme katsayısı-sıcaklık grafiklerine

bakıldığı zaman midye tozu miktarı arttıkça genel olarak önce sürtünme katsayısında bir azalma ve daha ise artışın devam ettiği görülmektedir. Bu numuneler arasından %10 midye tozu içeren N3 kodlu numune sıcaklıktan en az şekilde etkilenmekte olup stabil bir sürtünme katsayısı değişimi göstermektedir. %10 midye tozu oranının altında ve üstündeki değerlerde sürtünme katsayısındaki değişimin daha büyük olduğu gözlemlendi. Bunun sebebi ise midye tozlarının aşındırıcı tanecik olarak sürtünme tabakasında görev yapmasından kaynaklandığına bağlandı.

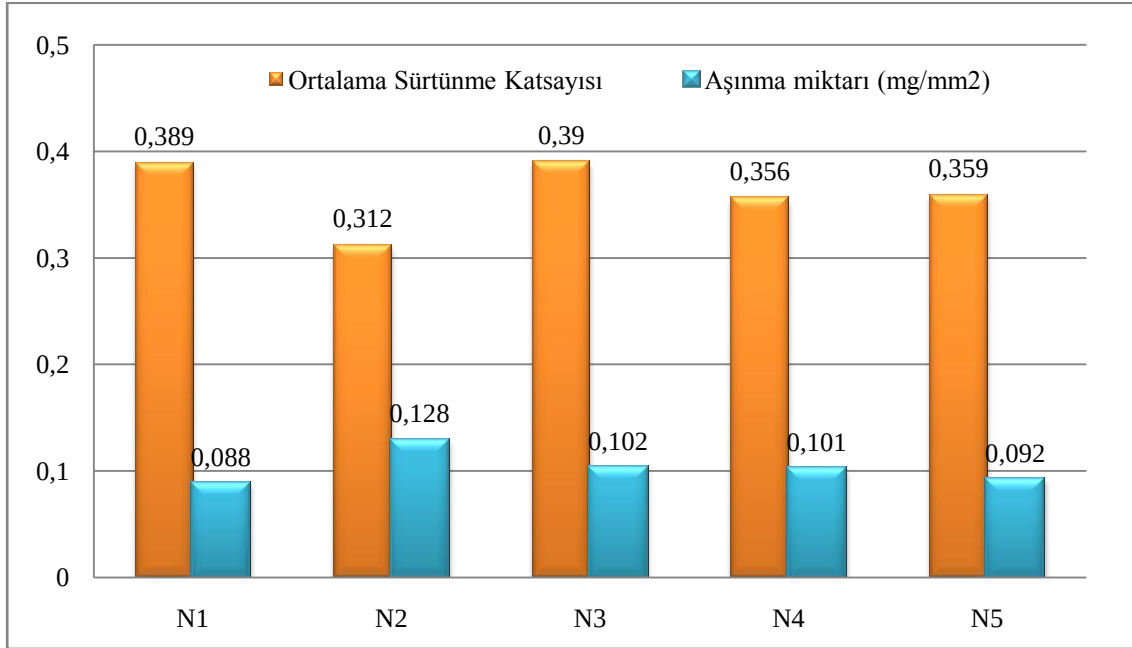


Şekil 8.1 Midye tozu katkılı numunelerin 1050kPa basınç altında sürtünme katsayısı zaman grafiği



Şekil 8.2 Midye tozu katkılı numunelerin 1050kPa basınç altında sürtünme katsayısı sıcaklık grafiği

Dolayısıyla midye tozu oranının belirli bir değerin üzerine çıkması, bu aşındırıcı taneciklerin yüzeyden koparak sürtünme tabakasında görev aldığı ve buna bağlı olarak da sürtünme katsayısındaki değişimleri arttırdığı düşünülmektedir. Bu durum literatürde de aynı şekilde ifade edildi. [41]. Sürtünme katsayısı sıcaklık değişiminde optimum midye tozu oranı %10 ile N3 kodlu numunede elde edildi. Midye tozu içeren numune ile midye tozu içermeyen N1 kodlu numuneyle kıyaslandığı zaman sıcaklık altında yanma meydana gelmemiş olup 350°C'ye kadar olan sıcaklıklara kadar yapısını bozmadığı görüldü. Midye tozu katkılı numunelerin deney süresince ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı değerleri Şekil 8.3'de görülmektedir. Grafikler incelendiği zaman ortalama sürtünme katsayısı değerleri bütün midye tozu katkılı numunelerde 0.25 değerinin üzerinde kaldığı görülmektedir. Bu da TS 555 standartlarında belirtilen minimum sürtünme katsayısı değerleri arasında kaldığı ve uygunluğu belirlendi karşılamaktadır. Grafikler incelendiğinde ise en büyük sürtünme katsayısı değeri %10 midye tozu katkılı N3 kodlu numunede elde edildi.



Şekil 8.3 Midye tozu katkılı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarının değişimi

Midye tozu katkılı numunelerin aşınma miktarları incelendiği zaman, midye tozu miktarı arttıkça aşınma miktarında ise bir azalış meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun sebebi midye tozlarının deney sırasında yüzeyden koparak abrasif malzeme olarak görev yapmasından kaynaklandığına bağlanmaktadır. En iyi aşınma direnci midye

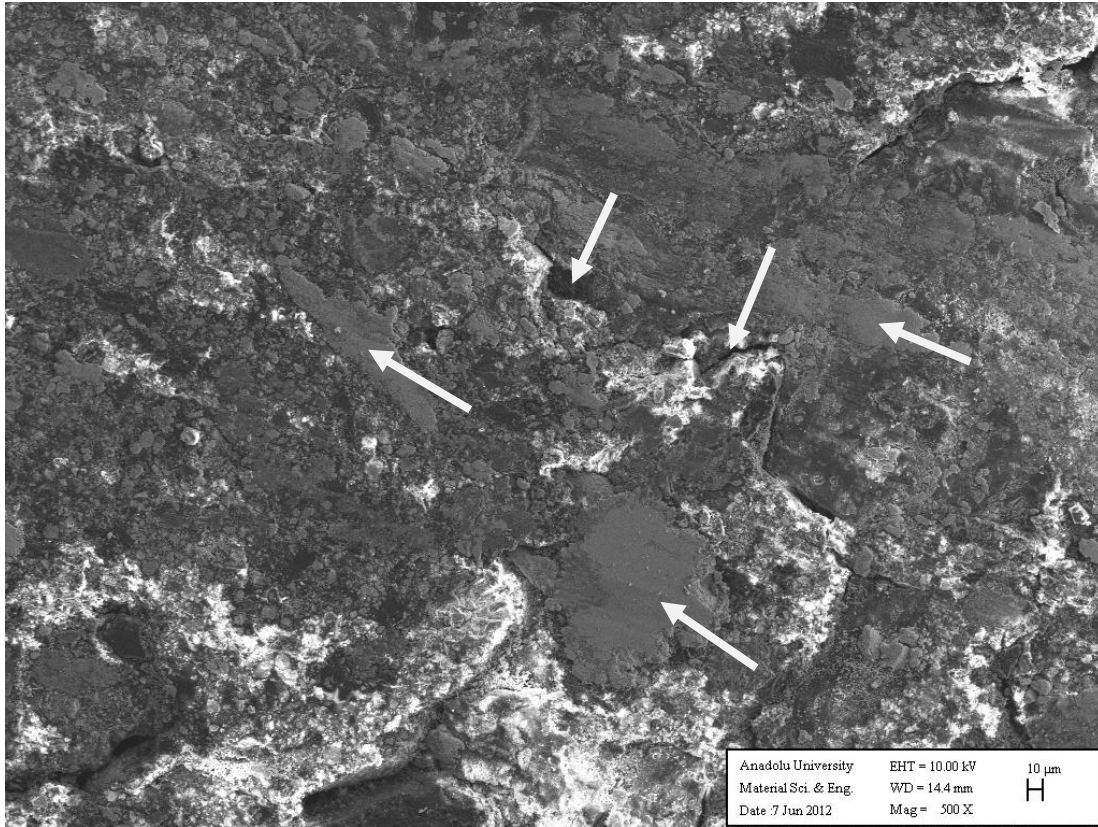
tozu içermeyen N1 kodlu numunede elde edilmesine rağmen genel olarak birbirine yakın aşınma değerleri ortaya çıktığı gözlemlendi. Midye tozu içermeyen numunede daha az aşınma elde edilmesinin sebebi yüzeyden malzeme kopmalarının az olmasından kaynaklanmaktadır. Sürtünme katsayısındaki değişimler bu durumun bir göstergesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüzeyden kopma az olduğu zaman diğer matris ve sürtünme tozları balata yüzeyine sıvama yaparak sürtünme filmini oluşturup daha kararlı bir sürtünme katsayısı sergilemektedir [94].

Tablo 8.1 Midye tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değerleri

Numune Kodu	Yoğunluk (kg/m³)	Brinell Sertlik (HB)	Korozyon Kaybı (%)
N1	1987	27,5	2,84
N2	1960	25,6	2,52
N3	1946	23,4	2,18
N4	1841	24,7	1,87
N5	1702	26,8	1,63

Midye tozu katkılı numunelerin yoğunluk, Brinell Sertlik ve kütlece korozyon kaybı değerleri Tablo 8.1’de verildi. Tablodaki değerlere bakıldığında zaman midye tozu oranı arttıkça yoğunluk miktarında azalma ve korozyon direncinde ise artışın meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bunun sebebi midye tozunun barit malzemeye oranla yoğunluğunun daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanında midye tuzlu su ortamında bulunduklarından ve kabuğundaki elementlerin tuğla şeklindeki dizilişinden dolayı daha yüksek korozyon direnci sergilediği görüldü. Midye tozu katkılı numunelerin Brinell Sertlik değerleri genellikle 25 ile 28 arasında değişiklik gösterdiği bunda fren balatası için standart değerler arasında kaldığı gözlemlendi. Balata yüzeyinde bir çok malzemenin sertlik değerini etkilemesi sonucu alınan değerlerde sertlik değeri ile midye tozu oranı arasında kesin bir ilişki kurulamamasına karşın genel olarak midye tozu miktarının artması sertlik değerlerini artırdığı Tablo 8.1’de açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen deney sonuçlarının daha iyi analizi için, özellikle sürtünme ve aşınma testlerinden sonra yüzey karakteristiğini ve sürtünme filmini incelemek amacıyla numunelerin SEM analizleri de

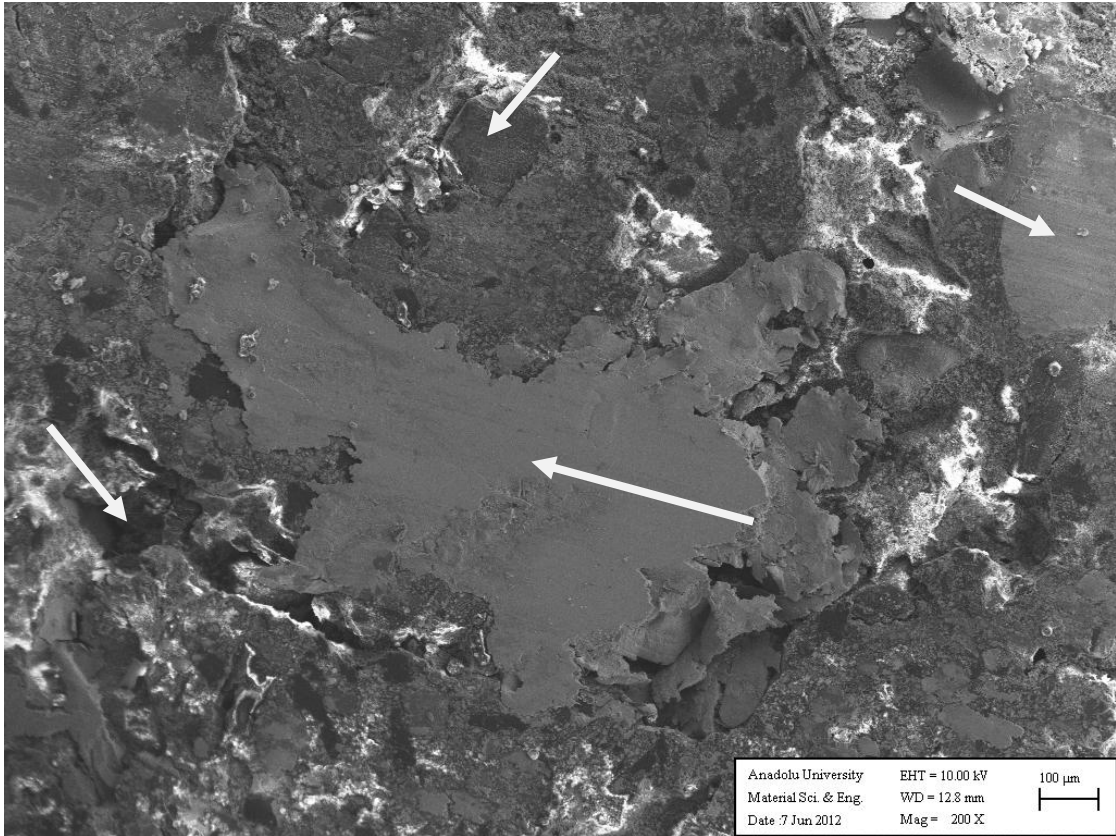
yapıldı. Midye tozu içermeyen N1 kodlu numune incelendiğinde (Şekil 8.4), beyaz parlak bölgelerin metal parçacıklar olup sürtünmeye aktif bir şekilde katıldığı görülmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak yüzeyde bakır oksitlenme yaparak sürtünme filminin oluşmasında aktif rol oynadığı gözlemlendi. Ayrıca bakır tozları sürtünme yüzeyinde sıvama yaparak aşınma izleri meydana getirdiği tespit edildi. SEM’den de görüleceği üzere toz taneciklerinin sınır bölgelerinde mikro düzeyde boşluklar görülmektedir. Bunun sebebi aşındırıcı malzemelerin yüzeyden koparak sürtünme yüzeyinde porozite meydana getirmesinden kaynaklanmaktadır. Sıcaklık artışına bağlı olarak termo-mekanik gerilmelerden dolayı yüzeylerde mikro çatlaklar oluşumu gözlemlendi. Bu durum sürtünme filminin oluşmasında yüzeylerde hem abrasif hem de yorulma aşınması meydana geldiğini göstermektedir. N1 kodlu numunenin sürtünme katsayısının tam bir kararlılık göstermemesinin sebebi yüzeyden kopan bu malzemelerin diske yapışarak sürtünme filminin iyi bir şekilde oluşmasını engellemesinden olduğu düşünülmektedir [96].



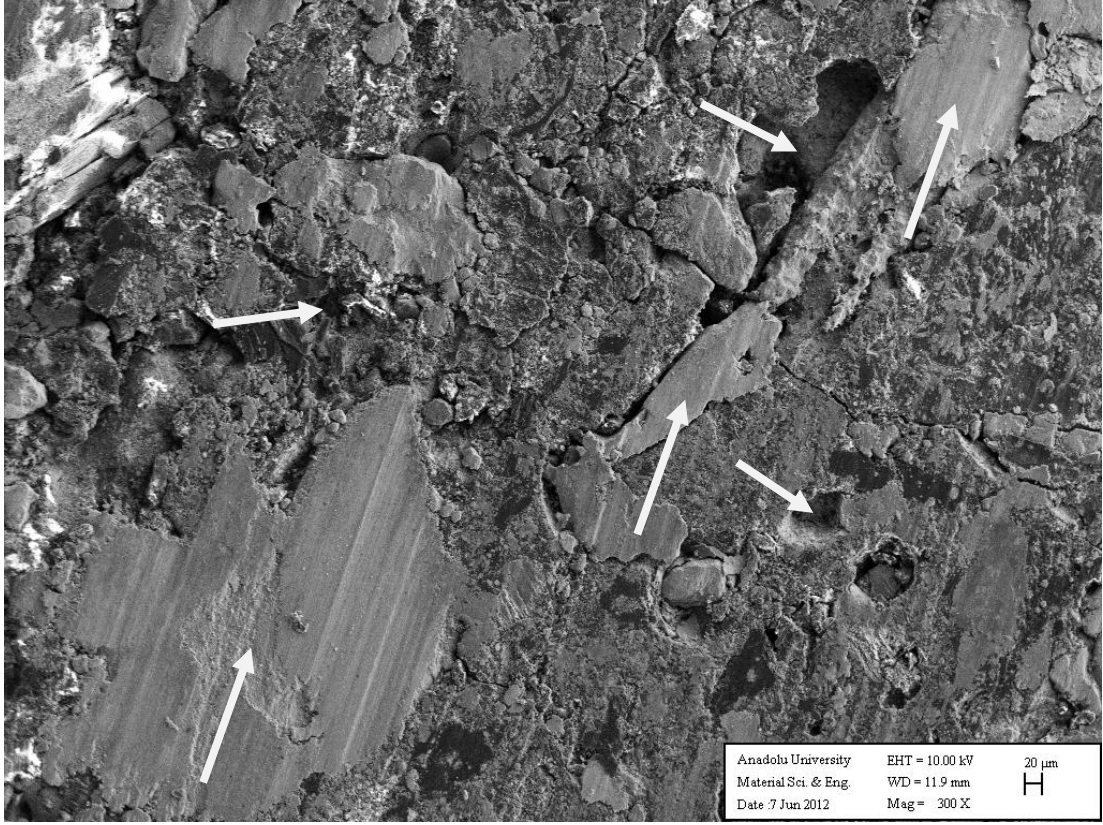
Şekil 8.4 Midye tozu içermeyen N1 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

%5 midye tozu içeren N2 kodlu numunenin sürtünme yüzeyinin SEM görüntüsü Şekil 8.5’te verildi. Sürtünme yüzeyinin SEM görüntüsü incelendiği zaman, genel olarak

sürtünme yüzeyi ve yüzeydeki abrasif çizikler bakır tozlarında görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi bakır tozları ve diğer beyaz renkte görülen çelik yünü sürtünme katsayısının değerinde önemli bir etki gösterdi. Bunun yanında sürtünme tabakası oluşuktan sonra yüzeylerde bazı boşluklar ve malzeme kopmaları görülmektedir. Fakat bu kopma bölgeleri sürtünme katsayısı değişiminde önemli bir etki göstermemektedir. N2 kodlu %5 midye tozu içeren numunenin sürtünme katsayısının değerinin düşük çıkmasının sebebi, sıcaklığa bağlı olarak fenolik reçinenin özelliğini kaybettiğini ve yüzeyde sıvama yaparak sürtünme filminin oluşumunu kötü etkilediğindendir. Bu durum sürtünme katsayısı sıcaklık grafiğine bakıldığında karşımıza stabil bir sürtünme katsayısı çıkmasından da anlaşılmaktadır. Ayrıca yüzeylerde herhangi bir mikro düzeyde çatlak olmaması bu durumu doğrular niteliktedir. Bunun yanında yüzeylerde karbon tozları siyah renkli olarak açık bir şekilde kendini göstermektedir. Karbonun katı yağlayıcı olmasından dolayı sürtünme katsayısında bir kararlılık ortaya koymaktadır.



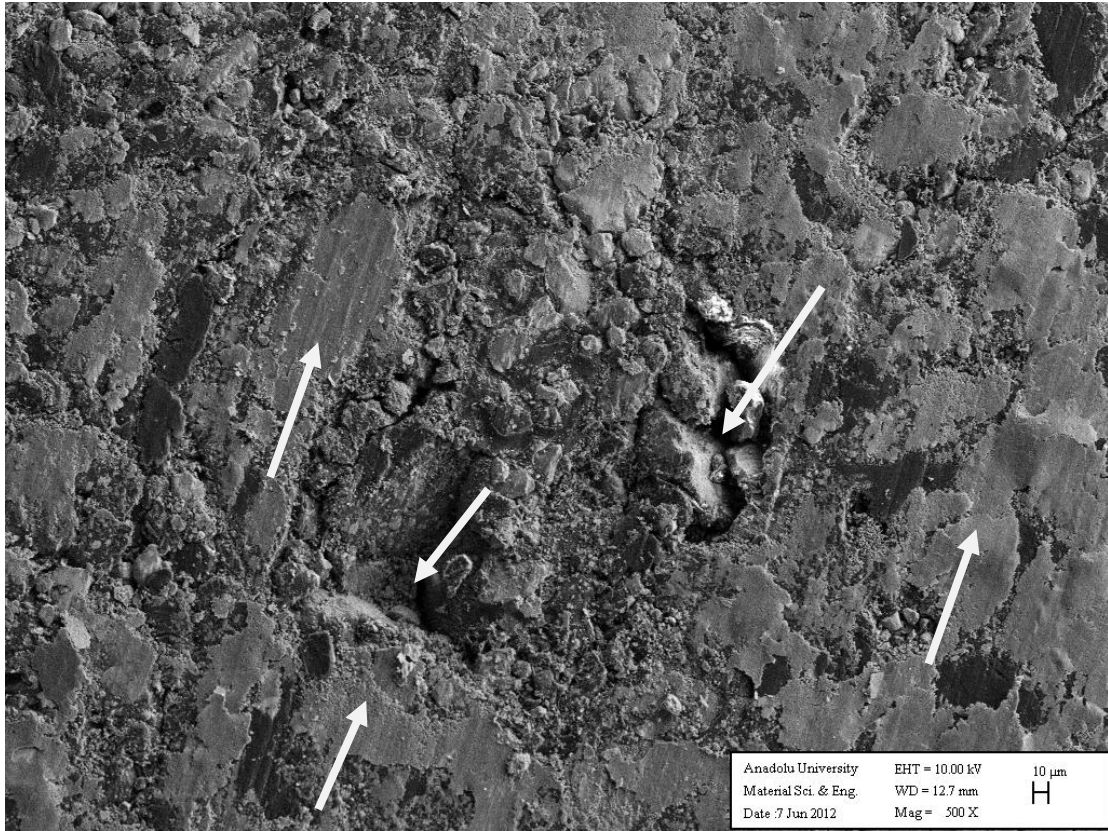
Şekil 8.5 %5 Midye tozu içeren N2 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



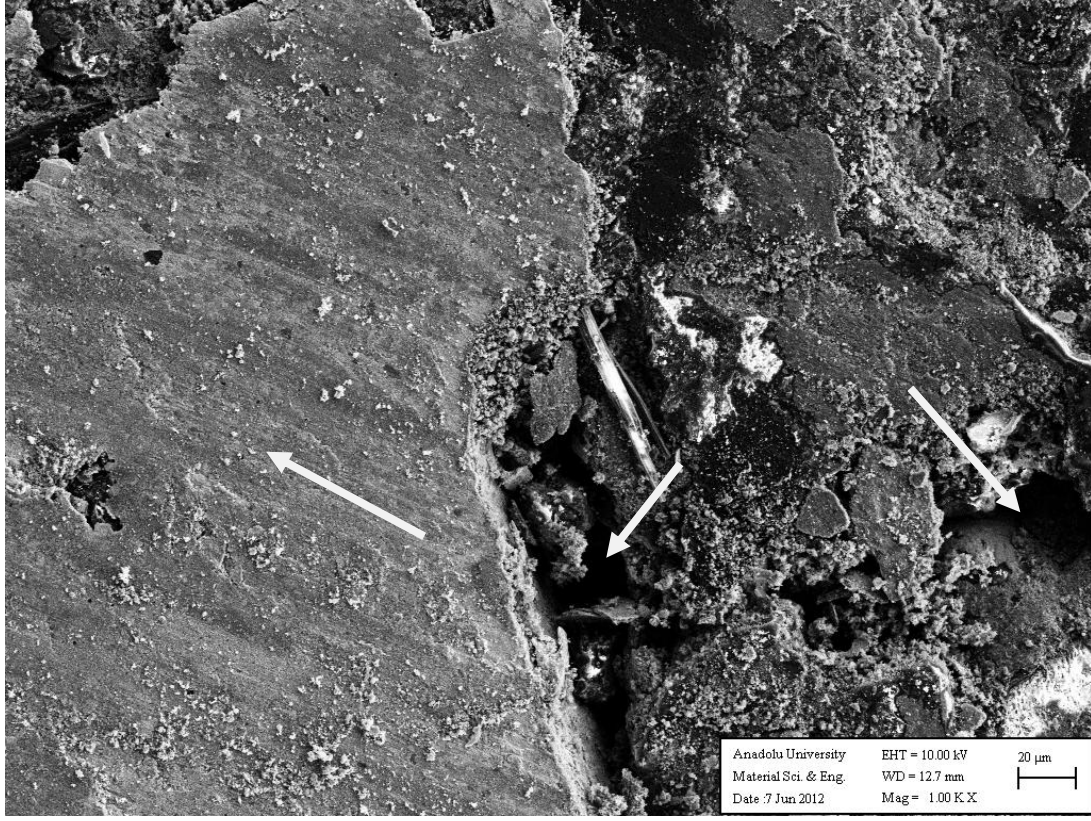
Şekil 8.6 %10 Midye tozu içeren N3 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

%10 midye tozu içeren N3 kodlu numunenin sürtünme yüzeyinin SEM görüntüsü Şekil 8.6’da verildi. Sürtünme yüzeyi incelendiğinde, yüzeyden mikro ve makro düzeyde kopmalar meydana geldiği gözükmemektedir. Bunun sebebi sıcaklık 300°C’yi geçtiğinde fenolik reçinenin mukavemeti düşerek balata içerisindeki toz taneciklerini tutma özelliğini yitirmesinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında bakır ve karbon tozlarının sürtünmeye aktif bir şekilde katılarak sürtünme katsayısının diğer numunelere göre daha yüksek çıkmasına sebep vermesidir. Ayrıca midye tozlarının yüzeyden koparak mikro yapıyı bozduğu görülmektedir. Yüzeylerde birden fazla aşınma mekanizmaları tespit edildi. Yüzeylerde bir miktar mikro düzeyde yorulma aşınmasından meydana gelen çatlaklar ve toz taneciklerinin kopmasından dolayı abrasif aşınmaların meydana geldiği görüldü. Bunun yanında bakır tozlarının sıvama yapmasından dolayı bir miktar da adhesive aşınma ortaya çıktığı tespit edildi. Mikro yapıda beklenen düzeyin üzerinde tanecik kopmaları ve boşluklar oluşmasının sebebi olarak tozların tam olarak homojen dağılamadığı ya da üretim sırasında homojen bir yapı elde edilemediğinden kaynaklandığı da dikkate alınması gereken diğer bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun en büyük kanıtı yüzeyde herhangi bir metal yoğunluğuna yani parlak yüzeylere rastlanmamasıdır. %20 midye tozu

içeren N4 kodlu numunenin sürtünme yüzeylerinin SEM görüntüsü Şekil 8.7’de görülmektedir. Sürtünme yüzeyi incelendiğinde yüzeyden kopan parçacıklar sürtünme filmine katılarak sürtünme katsayısını 200°C’den sonra kararlı bir hale getirmektedir. Midye tozu oranının artmasıyla yüzeylerden kopan toz taneciklerinde bir azalma görülmektedir. Bunun başlıca nedeni yüzeyden kopan midye tozlarının yüzeye sıvanarak sürtünme katsayısında etkin rol almasıdır. Ayrıca yüzeylerde termo-mekanik gerilmelere bağlı olarak ortaya çıkan yorulma aşınmasından kaynaklanan mikro ve makro çatlaklar oldukça azdır. Diğer yandan bakır tozlarının da yüzeyde aktif bir şekilde sürtünme katsayısına katkıda bulunduğu görülmektedir. Bunun yanında siyah renkte görülen karbon da sürtünmede aktif rol almaktadır. Sürtünme ve aşınma grafiklerine bakarak midye tozu miktarının artması aşınma direncini de arttırmaktadır. Bunun sebebi yüzeyden kopan parçacıkların balata ve disk ara yüzeyine sıvanmasından kaynaklanmaktadır. N4 kodlu numunede istenen düzeyde sürtünme katsayısı kararlılığı çıkmamasının sebebi yüzeyde parlak renkte olan aktif metal parçacıklarının görülmemesidir.



Şekil 8.7 %20 Midye tozu içeren N4 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



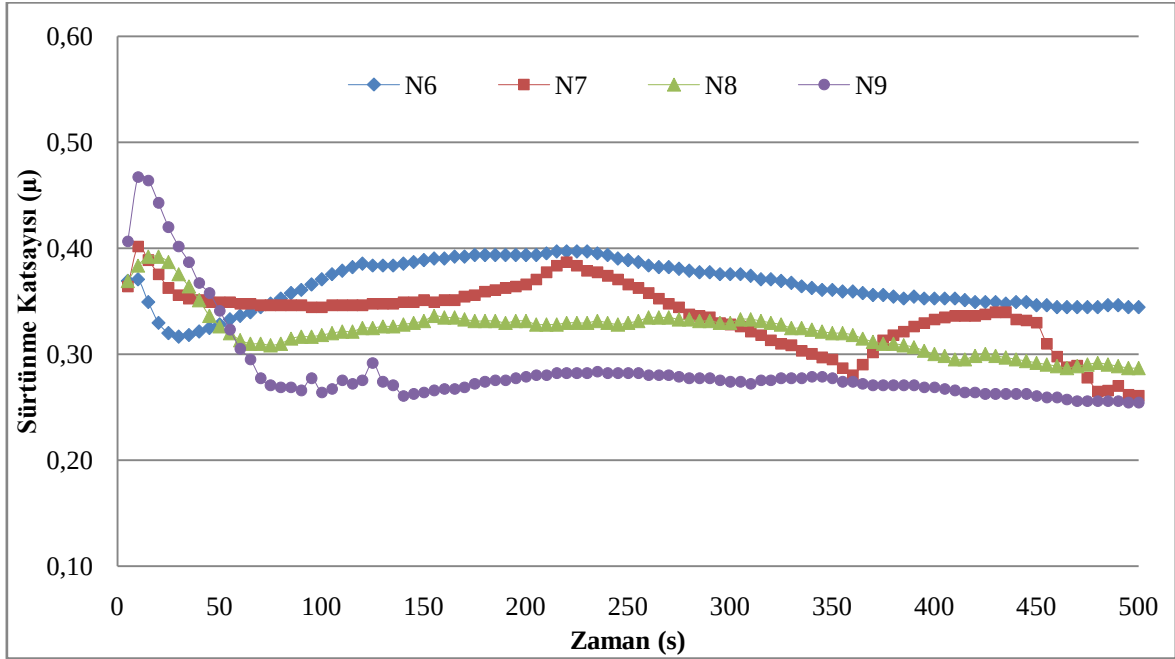
Şekil 8.8 %30 Midye tozu içeren N5 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

%30 midye tozu içeren N5 kodlu numunede meydana gelen sürtünme yüzeylerinin SEM görüntüsü Şekil 8.8’de görülmektedir. Burada midye tozu oranının artmasıyla yüzeylerde yüksek miktarda tanecik kopması meydana geldiği görülmektedir. Bunun sonucu olarak aşınma yüzeyinde sürtünme tabakası gelişimi tam olarak gerçekleşememiş olup sürtünme katsayısında dalgalanmaların meydana geldiğidir. Ayrıca bakır tozlarının sürtünme katsayısı üzerinde önemli bir katkıda bulunduğu saptanmıştır. Bunun gerekçesi olarak aşınma çizgilerinin genellikle bakır tozlarının yüzeye dağılmasından ve aşınma çizgilerinden açık bir şekilde görülmektedir.

8.1.2 Kemik Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları

Kemik tozu yapısı itibarı ile sürtünme ve aşınma direnci yüksek olan bir malzemedir. Kemik tozu üretilen numunelerde takviye malzeme olarak kullanıldı. Bunun yanında kemik tozu yanmaya karşı direncide balatanın yüksek sıcaklarda sürtünme ve aşınma özelliklerinin olumlu yönde etkilemesi düşünüldü. Kemik tozu kullanılan

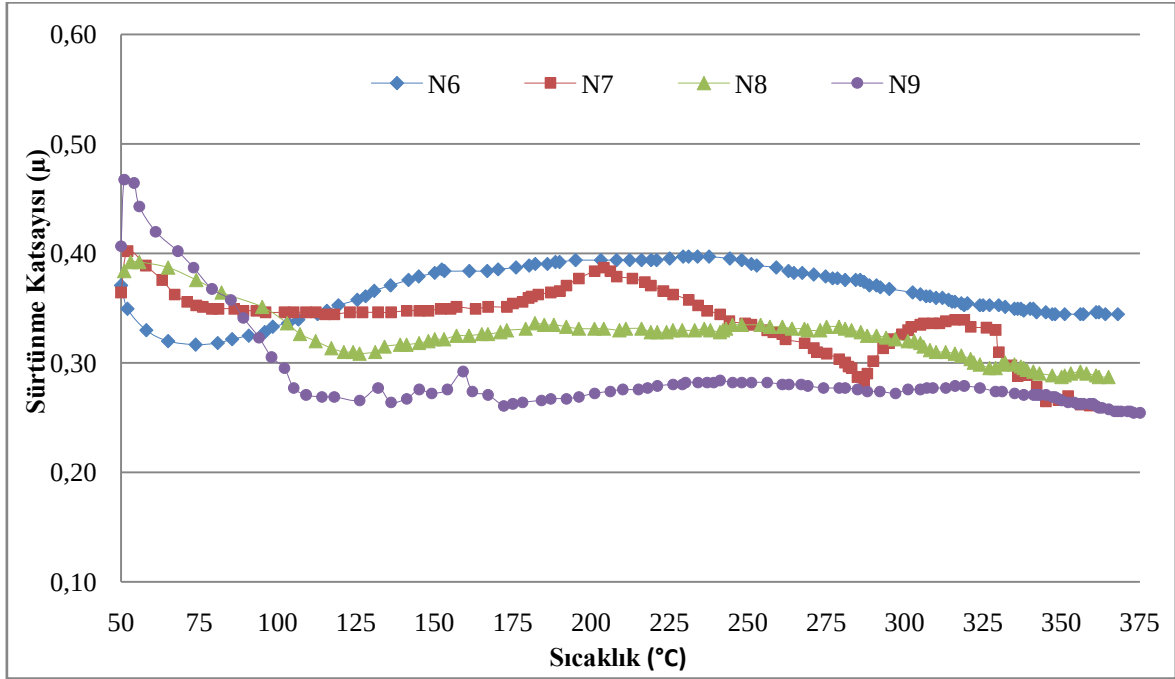
numunelerin sürtünme katsayısı-zaman ve sürtünme-katsayısı sıcaklık grafikleri sırasıyla Şekil 8.9 ve Şekil 8.10'da görülmektedir.



Şekil 8.9 Kemik tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi

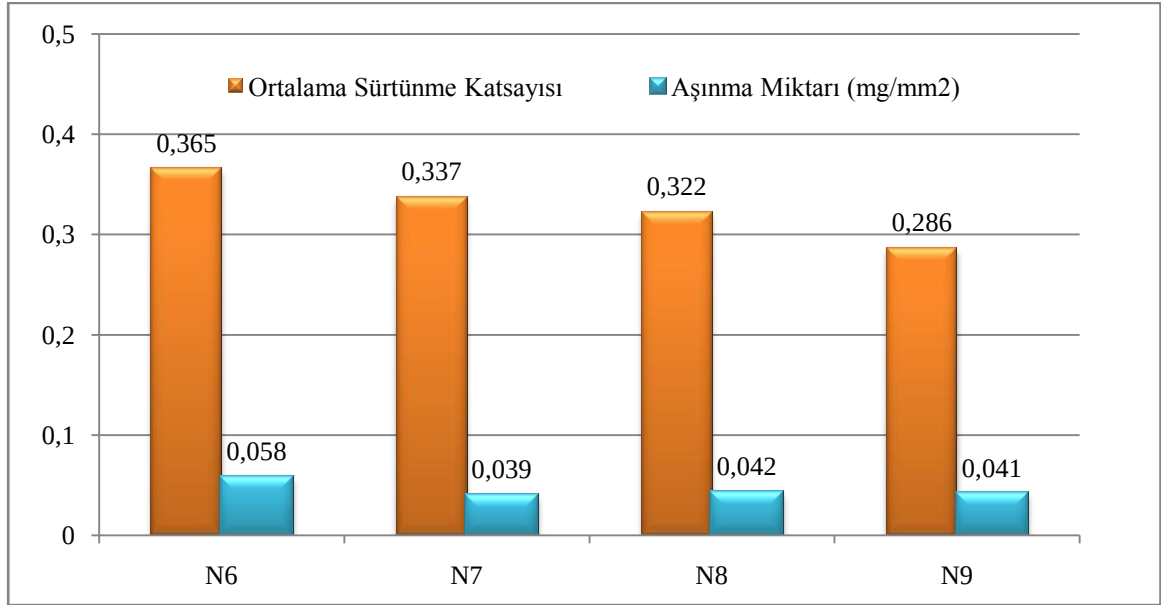
Grafikler incelendiğinde midye tozu içerikli numunelere göre daha kararlı bir sürtünme katsayısı ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi yüksek sıcaklıklarda kemik tozlarının daha iyi bir direnç ortaya koyarak sıcaklıktan daha az etkilenmesine yol açmasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerle bütün kemik tozu içeren numuneler için 50. saniyeye (100°C sıcaklıkta) kadar sürtünme katsayısında bir azalış ortaya çıkmaktadır. Fakat bu andan itibaren sürtünme tabakası oluşmakta ve diğer tozlar da sürtünme yüzeyine aktif olarak katılmaktadır. Grafiklerde kemik tozu oranının artmasıyla sürtünme katsayısında bir azalış meydana gelmektedir. Diğerlerinin aksine N7 kodlu %5 kemik tozu içeren numunede daha fazla dalgalanma görülmektedir. Bu numune için balata içeriklerinin yüzeyde homojen olarak dağılmadığından ya da fenolik reçinenin kemik tozlarını tutma kabiliyetinin azaldığından ortaya çıktığı düşünülmektedir. Yaklaşık 250°C'den sonra bütün numunelerin sürtünme katsayısında az da olsa bir azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç sürtünme katsayısının sıcaklıkla azalması beklenen bir durumdur [87]. %10 kemik tozu içeren N6 kodlu numunede 100 ile 150 saniyeleri arasında lokal maksimum ve minimum değerler ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum balata içerisinde çelik yünü olmadığından yüzeyden ayrılarak kopan parçacıklar yüzeyde boşluk

oluşturarak sürtünme yüzeyini olumsuz yönde etkileyerek dalgalanmaların meydana geldiği gözlemlendi.



Şekil 8.10 Kemik tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi

Kemik tozu içerikli numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri Şekil 8.11’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde balata içerisindeki kemik tozu miktarı arttıkça sürtünme katsayısında bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum kemik tozlarının balata içerisinde hem takviye hem de abrasif malzeme özelliği ortaya koymasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı %2,5 kemik tozu içeren N6 kodlu numunede meydana gelmektedir. Bu da kemik tozu ile çelik yünü oranının dengede tutulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak bütün numunelerin ortalama sürtünme katsayısı TS 555 balata standartlarında belirtilen minimum sürtünme katsayısı değerlerinin üzerindedir. Kemik tozu içerikli numunelerin aşınma dirençleri göz önüne alındığında, genel olarak kemik tozu oranının artmasıyla aşınma direncinde de buna paralel olarak bir artış olduğu görülmektedir. En düşük aşınma miktarı %5 kemik tozu içeren N7 kodlu numunede meydana gelmektedir. Bu durumun sebebi yüzeyden kopan malzemelerin sürtünme ara yüzeyine yapışarak yüzeyde tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde kemik tozu ilavesi sürtünme katsayısını daha kararlı bir hale getirip aşınma miktarında ise düşüşe sebep olmaktadır.



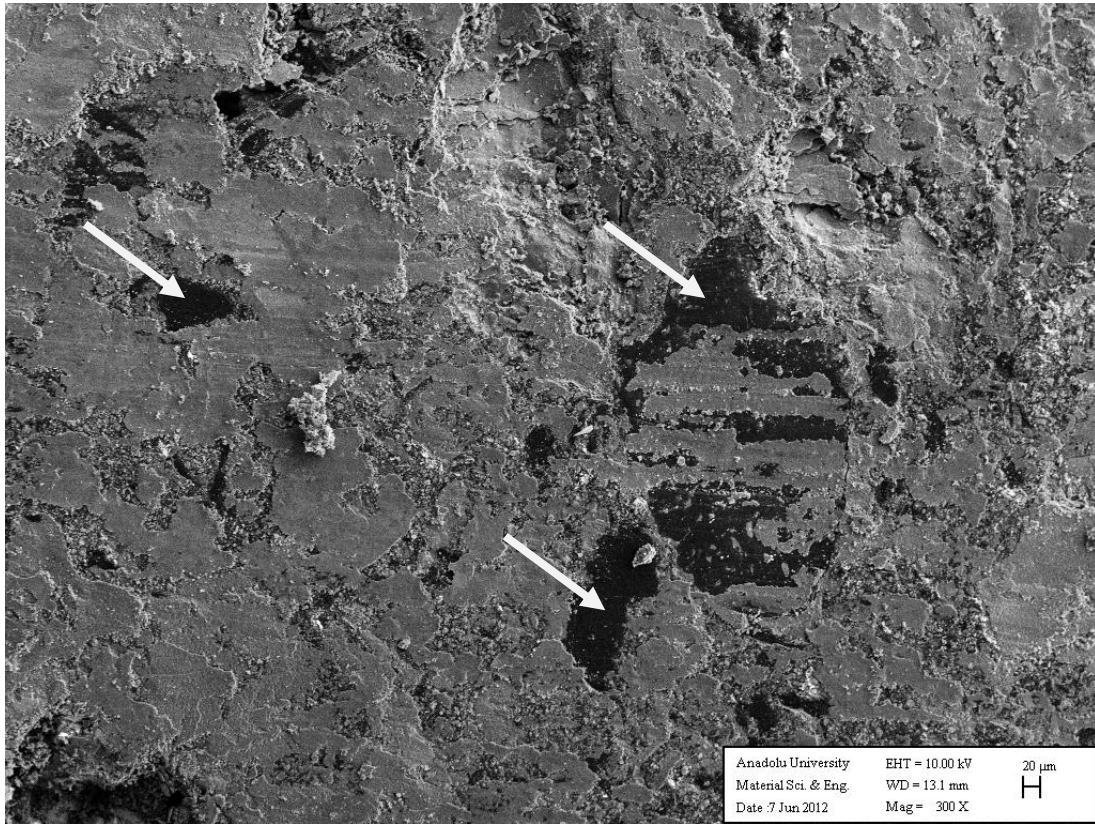
Şekil 8.11 Kemik tozu içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri

Kemik tozu katkılı numunelerin yoğunluk brinell sertlik ve kütleli korozyon kaybı değerleri Tablo 8.2’de görülmektedir. Tablo incelendiğinde yoğunluk değerleri kemik tozu miktarının artmasıyla bir azalma gösterdiği görüldü. Çelik yünü kemik tozuna göre daha yoğun bir malzeme olduğundan bu sonuçların ortaya çıkması sonuçları doğrular niteliktedir. Sertlik değerleri ise en yüksek %2,5 kemik tozu içeren N6 kodlu numunede en düşük ise %10 kemik tozu içeren N9 kodlu numunede görüldü. Sertlik değerleri malzemelerin yüzeyde homojen dağılmasından doğrudan etkilendiği için kemik tozuna bağlı olarak kesin bir sonuca gitmek mümkün olamamaktadır. Bununla beraber bütün numunelerin sertlik değerleri standartlara uygun olarak elde edildiği görüldü. Korozyon direnci ise en yüksek N7 kodlu %5 kemik tozu içeren numunede tespit edildi.

Tablo 8.2 Kemik tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değerleri

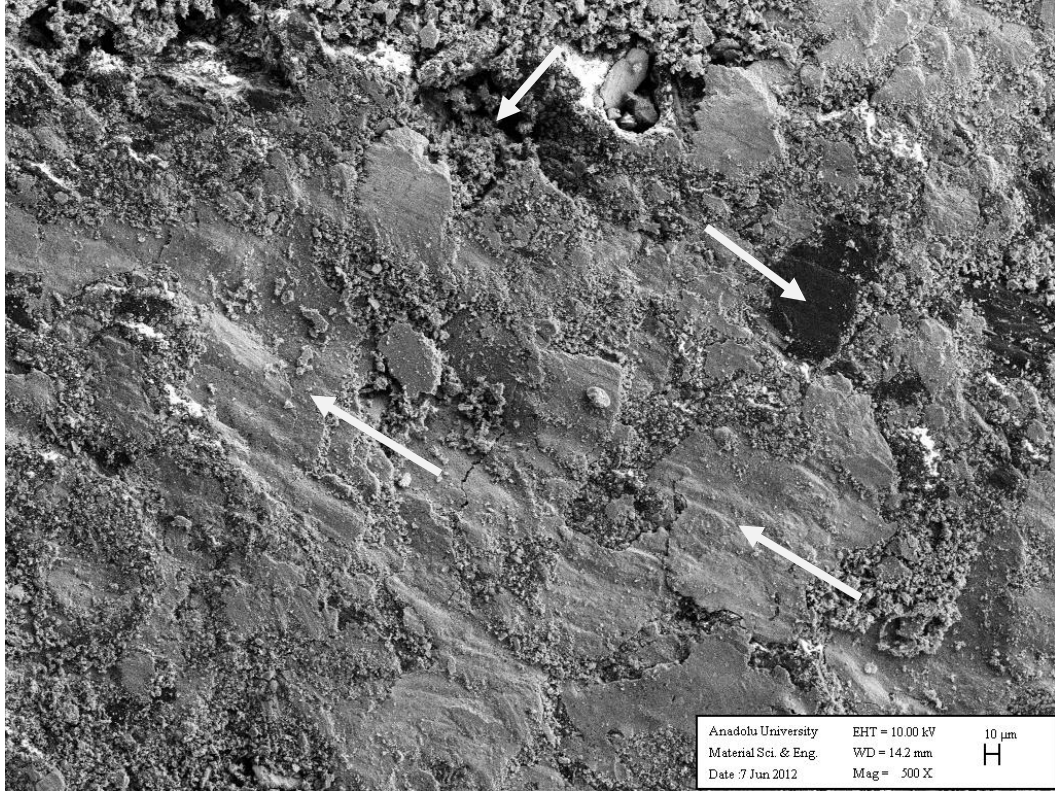
Numune Kodu	Yoğunluk (kg/m ³)	Brinell Sertlik (HB)	Korozyon Kaybı (%)
N6	2042	28,2	1,84
N7	1980	26,6	1,63
N8	1795	27,9	1,78
N9	1785	25,4	1,94

Kemik tozu ile çelik yünü korozyona karşı oldukça dayanıklı olduğundan değerler istenilen değerde olmasına rağmen kemik tozu oranı ile korozyon direnci arasında kesin bir ilişki kurulamamaktadır. Tüm aşınma, sertlik, korozyon ve sürtünme katsayısı değerleri göz önüne alındığında optimum olarak %2,5 kemik tozu içeren N6 kodlu numune en iyi sonuçlar ortaya koyduğu gözlemlendi.



Şekil 8.12 %2,5 Kemik tozu içeren N6 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

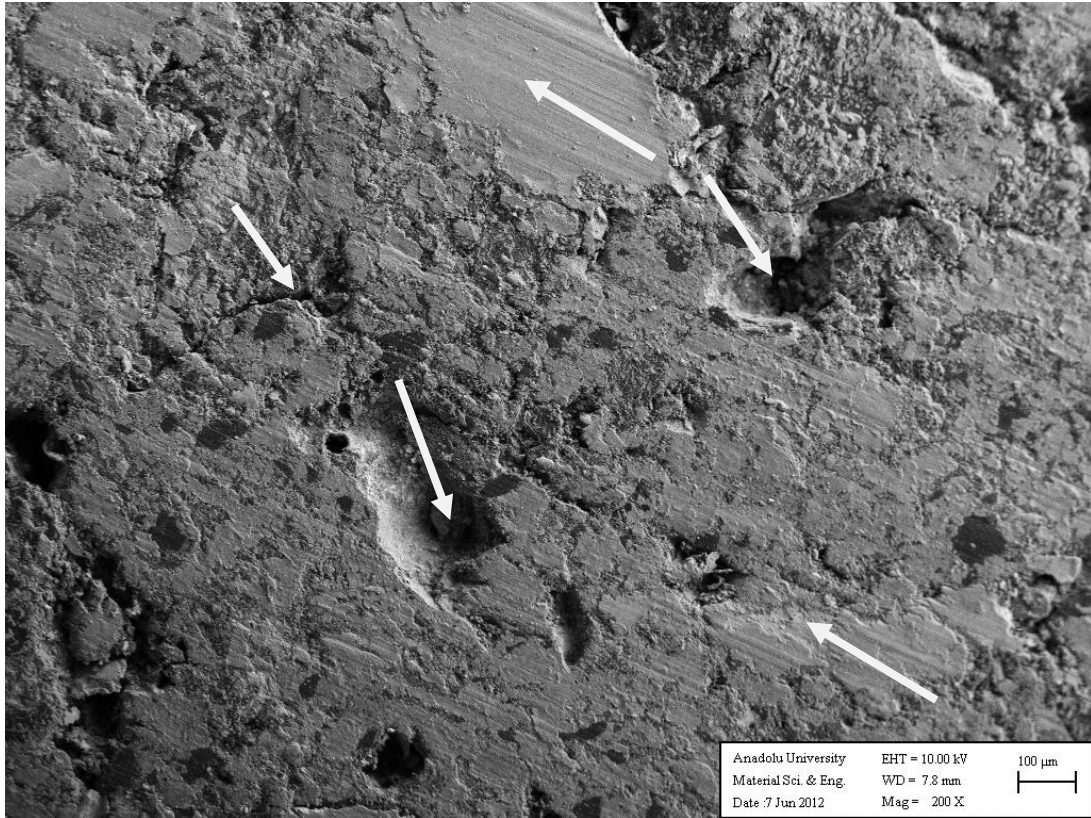
%2,5 kemik tozu içeren N6 kodlu numunenin sürtünme yüzeylerinin SEM görüntüsü Şekil 8.12’de verildi. Yüzeyler incelendiğinde, daha ziyade abrasif aşınmalar gözlemlenmektedir. Siyah renkli olan malzemeler karbon olup sürtünme tabakasının oluşumunda aktif olarak görev almaktadır. Bu durum da sürtünme katsayısında katı yağlayıcı olarak görev yapan kararlı bir yapı ortaya koymaktadır. Bunun yanında kemik oranı düşük olduğundan dolayı yüzeylerde önemli ölçüde malzeme kopması meydana gelmemektedir. Sürtünme katsayısının ve aşınma direncinin yüksek çıkması bu durumu açık bir şekilde ispatlamaktadır. Balata içerisindeki çelik yünü ve bakır tozları ise yüzeye homojen olarak dağılarak sürtünme katsayısını daha kararlı bir hale getirmiştir. Ayrıca SEM resmi incelendiğinde yüzeylerde makro ve mikro düzeyde çatlaklar ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 8.13 %5 Kemik tozu içeren N7 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

%5 kemik tozu içeren numunenin sürtünme yüzeyinin SEM resmi Şekil 8.13’de verildi. Sürtünme yüzeyi incelendiğinde kemik tozu oranının artmasıyla yüzeyden kopan parçacıklar metal tozların yüzeylerine yapışarak sürtünme filmini oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca bakır tozlarının sürtünme yüzeyinde aktif bir rol oynadığı açıkça görülmektedir. Bunun yanında az miktarda da olsa karbon abrasif aşınma sergileyerek

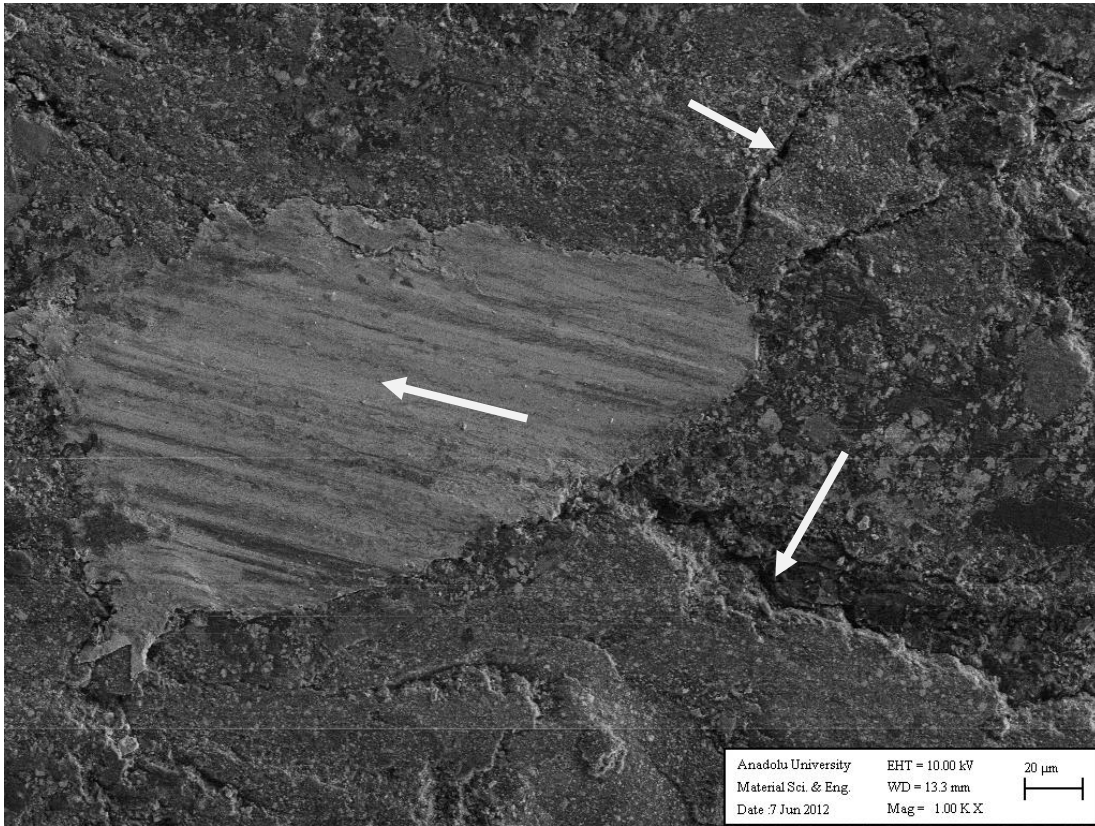
sürtünme katsayısına katkıda bulunmaktadır. Yüzeylerde özellikle metal tozlarında mikro düzeyde küçük çapta yorulma aşınmasından kaynaklı çatlakların meydana geldiği gözlemlendi. N7 kodlu numunede sürtünme katsayısı kararlılık göstermemektedir. Bunun sebebi yüzeyde homojen bir yapı elde edilmemesinden kaynaklıdır. Çünkü yüzey yapısı incelendiğinde bazı bölgelerde aşırı malzeme kopması ve porozite oluşmuş diğer yandan ise yüzeyde birikme yaparak sürtünme filmini bozduğu görülmektedir.



Şekil 8.14 %7,5 Kemik tozu içeren N8 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

%7,5 ve 10 kemik tozu içeren N8 ve N9 kodlu numunelerin sürtünme yüzeylerinin SEM resimleri sırasıyla Şekil 8.14 ve Şekil 8.15’de görülmektedir. N7 kodlu numunenin yüzeyleri incelendiğinde yüzeyden kopan parçacıklar ve bazı mikro düzeyde çatlaklar göze çarpmaktadır. Bunun yanında karbon ve bakır tozu parçacıklarının abrasif aşınma göstererek sürtünme filminin oluşmasında aktif olarak görev yaptığı gözlemlenmektedir. Benzer şekilde aynı durum N9 kodlu %10 kemik tozu içeren numune de görülmektedir. Bunun sonucu olarak kemik tozu miktarı arttıkça sürtünme katsayısının azalmasının diğer sebeplerinden biri de yüzeylerden ayrılan bu parçacıkların temas yüzeyini azaltarak

sürtünme filminin yapısını bozmasından kaynaklı olmasıdır [56]. N8 ve N9 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık grafikleri incelendiğinde N9 kodlu numunede daha düşük fakat daha kararlı bir sürtünme davranışı ortaya koyduğu gözlemlendi. Aynı şekilde N9 kodlu numunenin aşınma yüzeyi incelendiğinde daha az parçacık miktarının yüzeyden koptuğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak kemik tozunun %5'in üzerine çıkması balata komponentleri arasında bir uyumsuzluk sağladığı düşünülmektedir. Bununla beraber %5'in altında kemik tozu ilavesi daha iyi sürtünme ve aşınma sonuçları ortaya koyduğu anlaşılmaktadır.

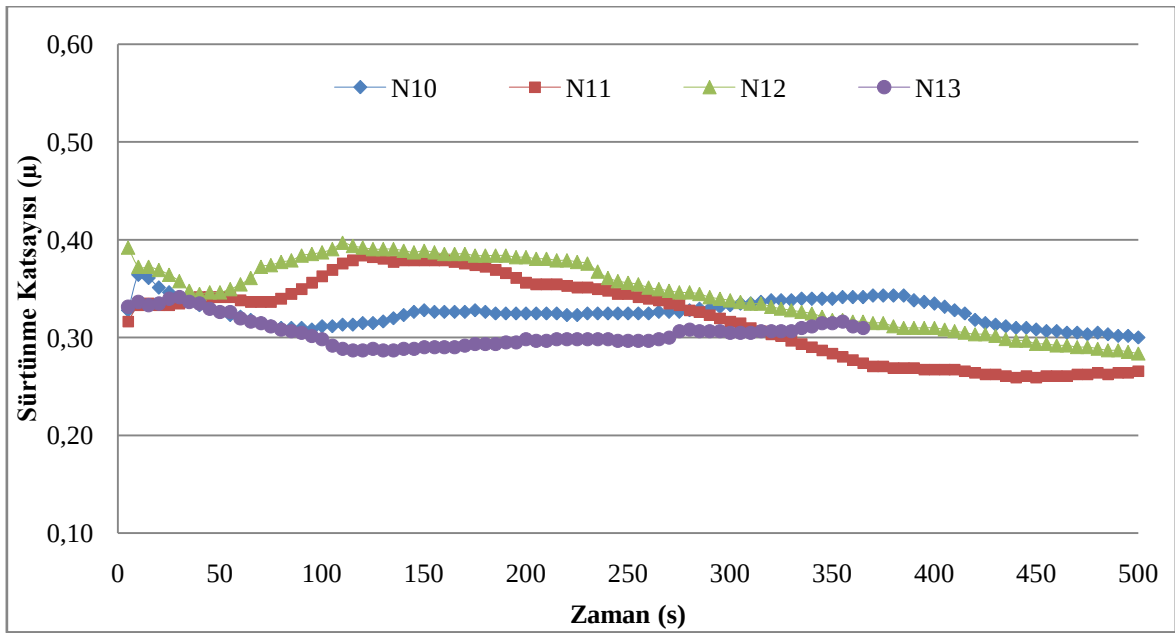


Şekil 8.15 %10 Kemik tozu içeren N9 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

8.1.3 Boynuz Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları

Fren balatası üretiminde sürtünme ayarlayıcı olarak birçok farklı organik ve anorganik malzemeler kullanılmaktadır. Sürtünme ayarlayıcı tozlar balata ara yüzeyinde sürtünme tabakasına aktif olarak katılarak yüksek sürtünme katsayısı elde etmek için kullanılmaktadır. Genellikle kaju fıstığı tozları kullanılan fren balatalarında buna alternatif

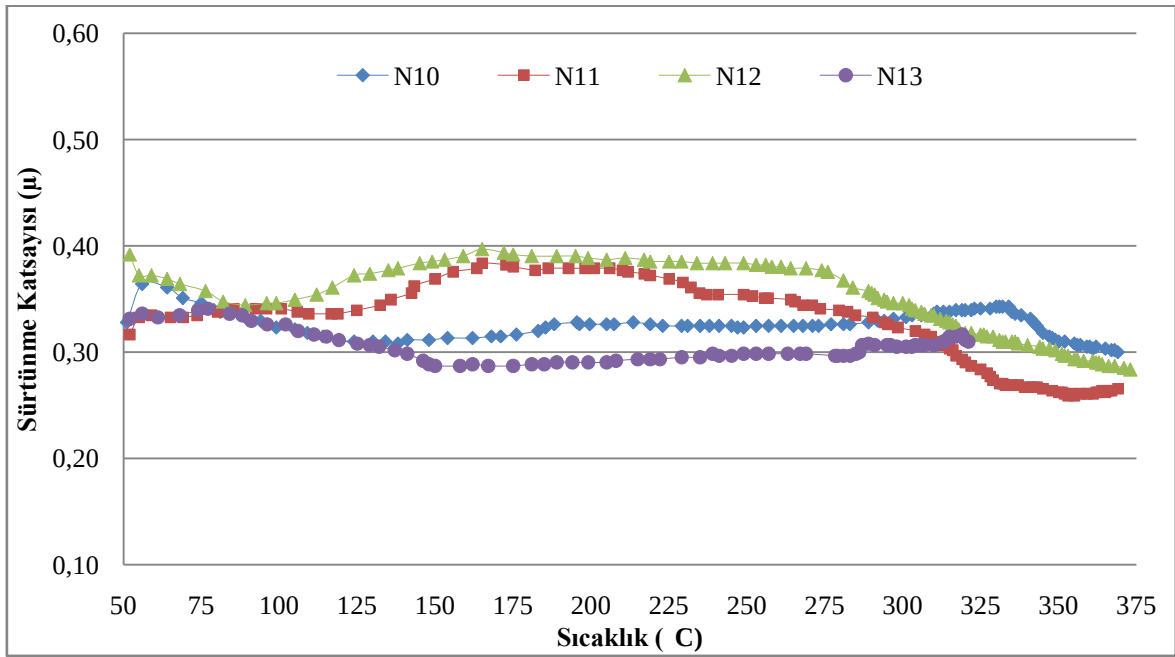
olarak boynuz tozları kullanıldı. Boynuz tozlarının yapısının yüksek elastik olduğu göz önüne alınırsa sürtünme filmi oluşumunda kontak alanını artırarak daha yüksek bir sürtünme katsayısı elde etmek mümkün olacaktır. Boynuz tozu içerikli balata numunelerinin sürtünme aşınma deneyleri sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık değişimleri Şekil 8.16 ve Şekil 8.17’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde bütün numuneler için sürtünme katsayısı yaklaşık olarak 0,3 ile 0,4 arasında değişim göstermektedir. Bunun yanı sıra boynuz tozu oranının artmasıyla beraber sürtünme katsayısında bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum boynuz tozunun sürtünme ayarlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliğini kısmen ortaya koymaktadır. Bunun aksine %15 boynuz tozu içeren N13 kodlu numune tam tersi bir sürtünme karakteristiği ortaya koymaktadır. Bu durumun sebebi boynuz tozu oranının belirli bir değerin üzerine çıkması sürtünme ara yüzeyinde elastikiyeti istenen düzeyden daha fazla artırmış olması ve yaklaşık 300°C sıcaklıkta yanma olayının başlamasından kaynaklıdır. Dolayısıyla %15 içerikli numune deneyi tamamlayamamış düşük sürtünme katsayısı sergilediği gözlemlendi.



Şekil 8.16 Boynuz tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi

Diğer numuneler göz önüne alındığında deneyin ilk 50 saniyesine kadar genel olarak bir düşüş gözlemlendi. Bu süre içerisinde sürtünme filmi oluşmaya başlamış olup yaklaşık olarak sıcaklık 150°C olduğunda sürtünme filminin oluşumu tamamlanmaktadır.

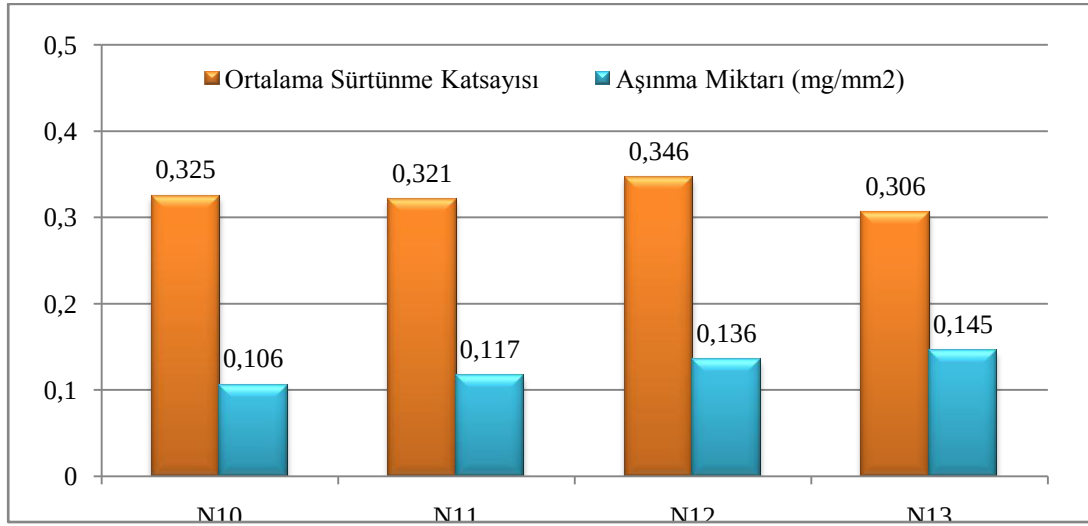
Bu sıcaklık değerinden sonra genel olarak sürtünme katsayısında bir azalış meydana gelmektedir ve bu durum literatürde açık olarak benzer şekilde vurgulanmıştır [12]. Boynuz tozu içerikli numunelerde en kararlı sürtünme katsayısı %4 boynuz tozu içeren N10 kodlu numunede, en yüksek sürtünme katsayısı ise %12 içerikli N12 kodlu numunede elde edildi. Grafiklerde boynuz tozu miktarının artması sıcaklığın 300°C'yi geçtiği bölgelerde sürtünme katsayısında daha fazla bir düşüş yani fren zayıflaması meydana getirmektedir. Dolayısıyla boynuz tozlarının termal kararlılık ve direnç gösteremediği balata içerisine kütlece %5 ile %12 arasında katılması gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 8.17 Boynuz tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi

Boynuz tozu içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri Şekil 8.18'de görülmektedir. Sürtünme ve aşınma grafiklerine paralel olarak en yüksek sürtünme katsayısı değeri %12 boynuz tozu içeren N12 kodlu numunede elde edildi. %4 ve %8 içerikli N10 ve N11 kodlu numunelerde ise yaklaşık olarak birbirine yakın bir sürtünme katsayısı elde edilmektedir. Bunun sebebi ise boynuz tozu miktarının artışı sürtünme katsayısını artırmakta fakat 300°C sıcaklığı aştığı zaman daha fazla bir düşüş göstermesinden kaynaklanmaktadır. Özgül aşınma değerleri göz önüne alındığında boynuz tozu miktarının artışı aşınma direncini olumsuz yönde etkilemektedir. Çünkü artan boynuz tozu miktarı ile sürtünme sırasında temas halinde olan yüzeylerden yanma sonucu

daha fazla tanecik ayrılmaktadır. Bu sonuç boynuz tozlarının elastik ve termal mukavemetinin düşük olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca aşınma miktarının artışı sürtünme katsayısının da artmasına sebep olduğu görüldü. Çünkü aşınma miktarının yüksek olması daha fazla yüzey alanının disk ile teması anlamına gelmektedir. Bu durum ise literatürde de belirtildiği gibi sürtünme katsayısı aşınan yüzeylerin temas alanına ile doğrudan ilişkilidir ifadesini de doğrulamaktadır [6]. Dolayısıyla boynuz tozları oranı sürtünme katsayısı ile doğru ve aşınma direnci ile ters orantılı olduğu sonucuna varıldı. Optimum değer olarak sürtünme tozu ile boynuz tozunun yaklaşık olarak eşit olması gerektiği düşünülmektedir.



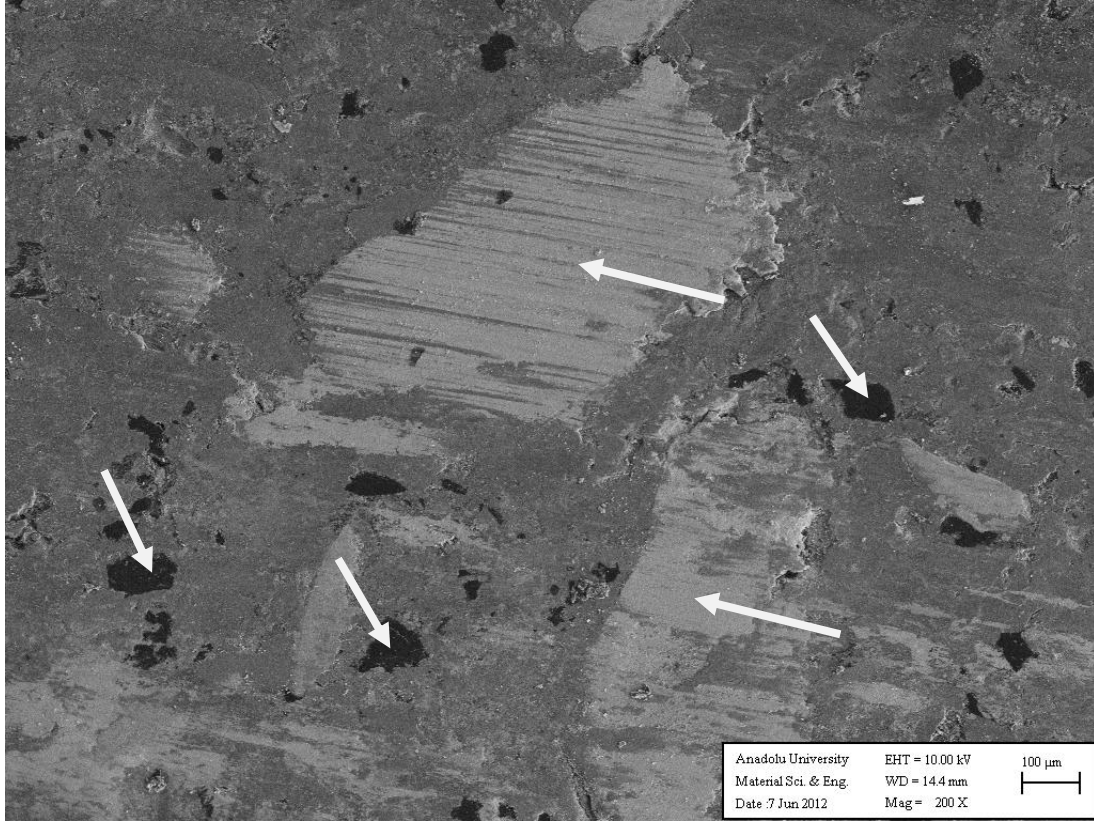
Şekil 8.18 Boynuz tozu içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerleri.

Üretilen boynuz tozu katkılı numunelerin yoğunluk, brinell sertlik ve kütlece korozyon kaybı değerleri Tablo 8.3'te verildi. Boynuz tozu hafif bir malzeme olduğu için genel olarak yoğunluk değerlerini azalttığı, elastisite modülü düşük olduğundan dolayı ise genellikle sertlik değerlerinde düşüş meydana getirmektedir. En yüksek sertlik değerine sahip numune %12 içerikli N12 kodlu numune iken korozyon direnci de aynı zamanda en yüksek olarak elde edildi. Bu durumun sebeplerinden biri olarak üretim esnasında tozların yüzeye homojen dağılmasından ve fenolik reçine ile daha iyi uyum sağlamasından olduğu düşünülmektedir. Tablo genel olarak incelendiğinde kemik tozu ve midye tozu katkılı numunelere göre tüm özelliklerde bir azalma meydana geldiği gözlemlendi. Ancak bu durum boynuz tozu katkılı numunelerde daha kararlı bir sürtünme katsayısı elde edilmesine sebep olmaktadır. Korozyon ve sertlik değerleri göz önüne alındığında bütün değerler TS 9075'de belirtilen standartlara uygun olduğu saptandı.

Tablo 8.3 Boynuz tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değerleri

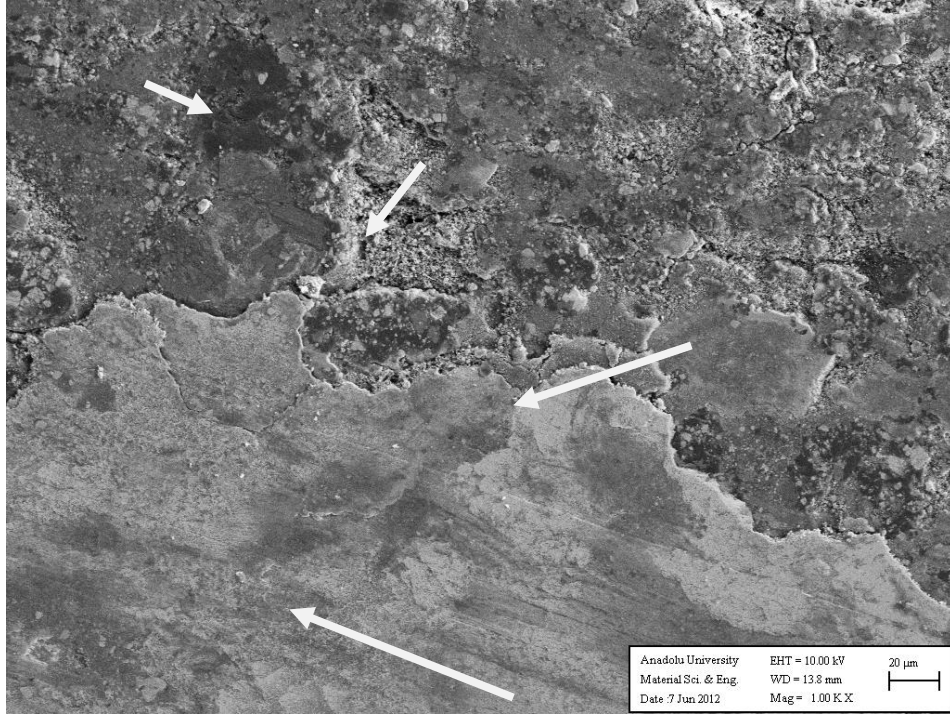
Numune Kodu	Yoğunluk (kg/m ³)	Brinell Sertlik (HB)	Korozyon Kaybı (%)
N10	1870	23,2	2,05
N11	1705	22,6	2,23
N12	1780	24,1	1,98
N13	1612	21,3	2,37

% 4 boynuz tozu içeren N10 kodlu numunenin sürtünme aşınma deneyinden sonra sürtünme yüzeyinin SEM resimleri Şekil 8.19’da görülmektedir. Sürtünme yüzeyleri incelendiğinde bakır tozlarının sıvanarak sürtünme yüzeyine aktif olarak katıldığı görülmektedir. Ayrıca resimde siyah renkte görülen karbon parçacıkları sürtünme filminin oluşmasında önemli bir katkıda bulunarak sürtünme katsayısını kararlı bir hale getirmektedir. Bunun yanı sıra yüzeylerde herhangi bir malzeme kopması ve mikro düzeyde çatlaklara rastlanmamaktadır. Bu durum ise boynuz tozlarının yüzeye sıvanması sonucu malzeme kopmasını engellediği ya da kopan boşlukları doldurduğu sonucuna varıldı. Sürtünme katsayısının bu numunede ortalama olarak 0,325 değerinde düşük olmasının nedeni ise yüzeyde herhangi parlak renkte gözüken metal parçacıklara rastlanmamış olmasından kaynaklıdır. Genel olarak sürtünme yüzeyinde bakır tozları üzerindeki çiziklerden dolayı abrasif aşınma, karbon ve boynuz tozlarının bakır parçacıkları üzerinde sıvanmasından dolayı ise adhesive aşınma meydana geldiği görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde çelik yünü hariç diğer komponentlerin balata yüzeyinde homojen dağıldığı sonucuna varılmaktadır.



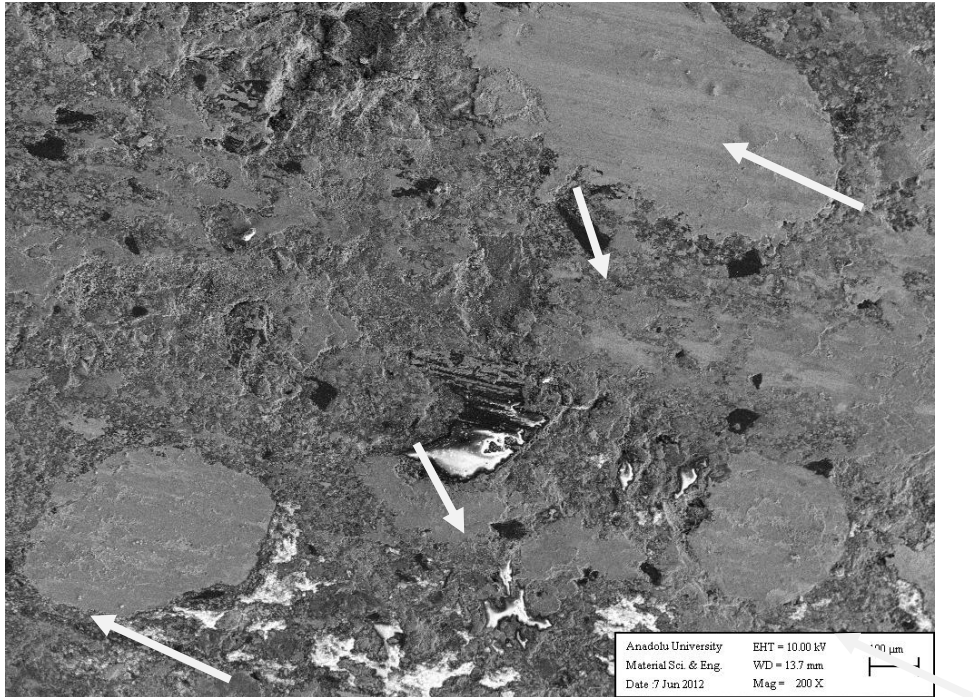
Şekil 8.19 %4 Boynuz tozu içeren N10 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

% 8 boynuz tozu içeren N11 kodlu numunenin sürtünme yüzeyinin SEM resmi Şekil 8.20’de verildi. Yüzeylerde artan boynuz tozu oranı ile tabaka kalkması meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi boynuz tozu oranı ile birlikte artan sürtünme katsayısının 300°C sıcaklıktan sonra yüzeylerde malzeme kopmalarına ve dolayısıyla sürtünme filminin bozulmasıyla sürtünme katsayısında da ani düşüş meydana getirmesidir. Bu sıcaklık değerinden sonra yanan boynuz tozları yüzeyden uzaklaştırılarak malzeme yüzeyinde mikro düzeyde çatlaklar ve boşluklar meydana getirmiştir. Bu durum sürtünme katsayısının düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca sürtünme filminin oluşmasında bakır tozları etkili olmaktadır. Diğer komponentlerin aktif bir şekilde sürtünme katsayısına etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Sadece yüzeylerin bazı bölgelerinde siyah renkte ortaya çıkan karbon izlerine rastlanmaktadır. Buna ek olarak boynuz tozlarının bakır ve diğer metal tozları üzerine sıvanarak sürtünme katsayısının kararlılığını bozmuş olup aşınma mekanizması olarak da tabaka aşınması ortaya çıkardığı görüldü. Yüzeylerde en küçük tanecik boyutu ile Al_2O_3 tozları karşımıza çıkmaktadır.



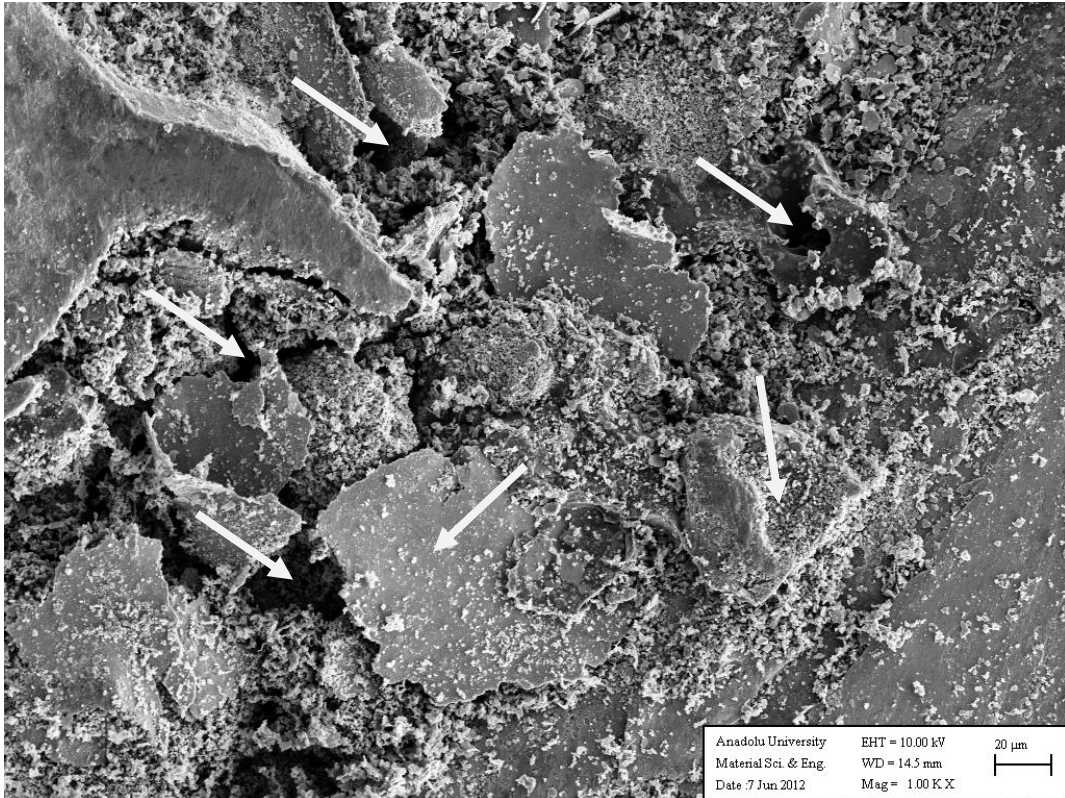
Şekil 8.20 %8 Boynuz tozu içeren N11 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Bu tozlar yüzeyde parlak renkte görülen ve diğer malzemelerin üzerine yapışan tozlardır. Bu durum numunenin aşınma direnci üzerinde önemli bir etkide bulunarak aşınma direncinin istenen değerlerde olmasına katkıda bulunduğu görüldü.



Şekil 8.21 %12 Boynuz tozu içeren N12 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

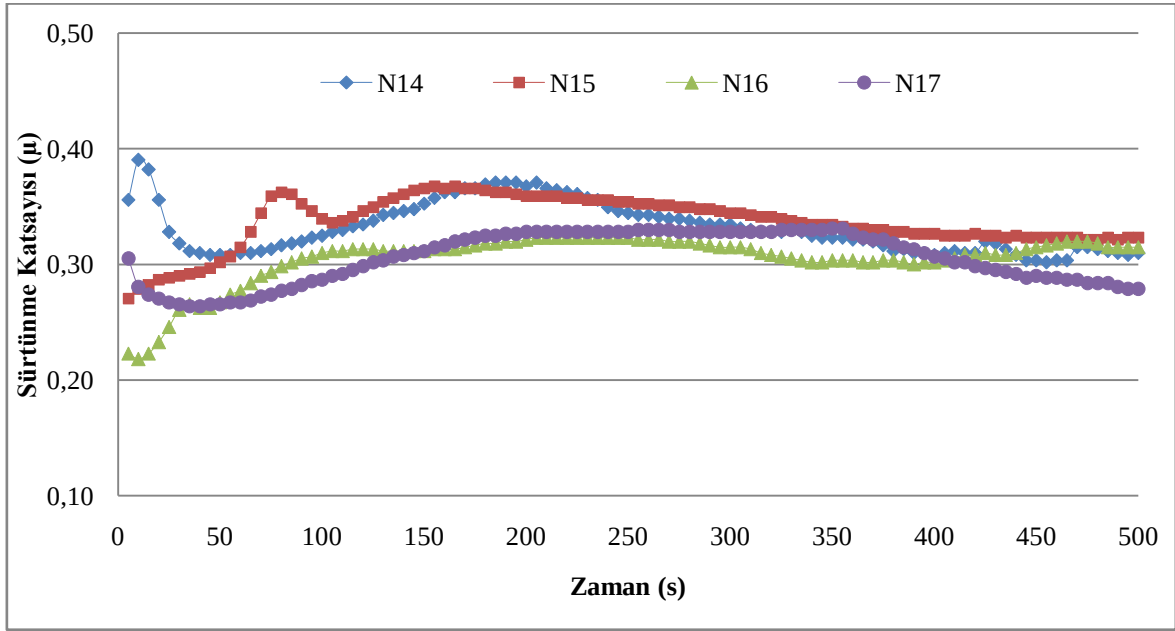
Sürtünme katsayısının ve aşınma direncinin en iyi elde edildiği % 8 içerikli N12 kodlu numunenin yüzeyleri incelendiğinde bakır ve çelik yünü parçacıklarının sürtünme tabakasına aktif olarak katıldığı görülmektedir (Şekil 8.21). Yüzeyde malzemelerin homojen bir şekilde dağıldığı ve, çelik yünleri ve bakır tozlarının sürtünme katsayısını yüksek tuttuğu, yüzeyde siyah renkte görülen karbon parçacıklarının ise sürtünme katsayısında kararlılık ortaya koyduğu görülmektedir. Ayrıca yüzeyde boynuz tozları elastik özelliğinden dolayı mikro çatlakların ve malzeme kopmalarının önüne geçmektedir. Boynuz tozu oranı %15 olduğunda ise yüzeylerde derin çatlaklar ve boşlukların yanı sıra önemli ölçüde tabaka kopmaları gözükmemektedir (Şekil 8.22). Yüzeyden ayrılan barit ve Al_2O_3 tozları aktif olarak sürtünme tabakasına katıldığı ve metal tozları ise sürtünme katsayısına katkıda bulunamadığı görüldü. Bu durum sürtünme yüzeyinin temas alanında önemli düşüşlere ve dolayısıyla sürtünme katsayısının düşüşüne sebep olmaktadır. Ayrıca kopan tabakalar sıcaklık $300^{\circ}C$ 'ye yaklaştığında oldukça artmakta ve numunenin deneyi tamamlamadan kopmasına sebep olmaktadır.



Şekil 8.22 %15 Boynuz tozu içeren N13 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

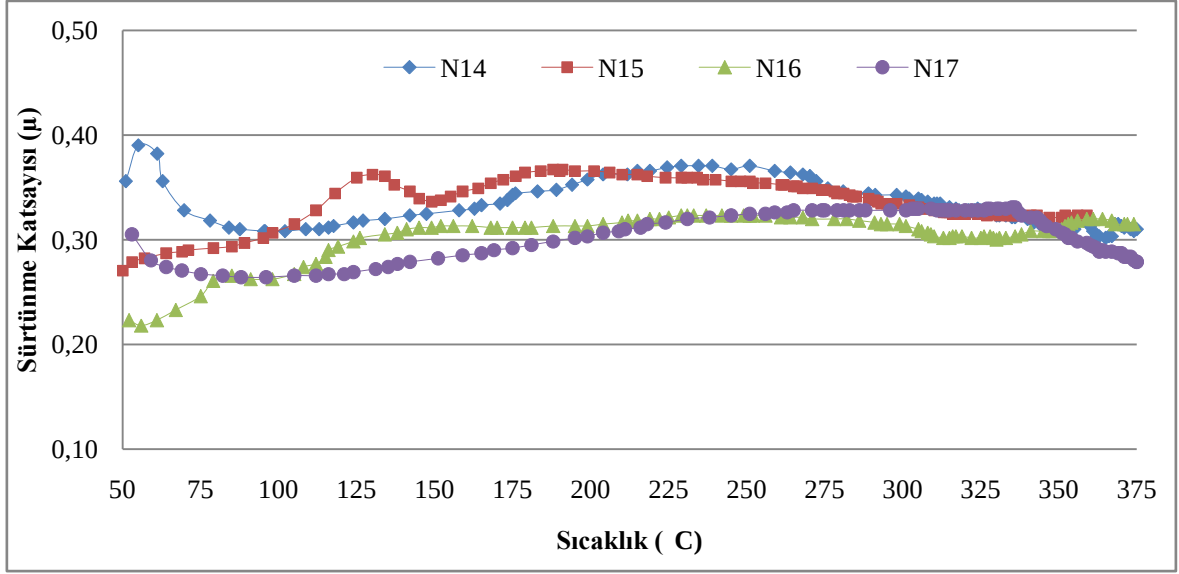
8.1.4 Tırnak Tozu Katkılı Numunelerin Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları

Sürtünme tozu olarak boynuz tozlarına alternatif olarak hayvansal ürünlerden elde edilen tırnak tozu kullanıldı. Tırnak tozu katkılı numunelerin sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık grafikleri sırasıyla Şekil 8.23 ve Şekil 8.24'te verildi. Grafikler incelendiğinde sürtünme film tabakasının 150. saniyede ve 200°C sıcaklık değerinde oluştuğu gözlemlenmektedir. Deney başlangıcında bütün numuneler için sürtünme katsayısında bir dalgalanma yani kararsızlık görülmektedir. Bunun temel nedeni sürtünme ara yüzeyinden kopan toz parçacıklarının 200°C sıcaklık değerinde tamamen elastik özellik kazanarak yüzeye sıvanmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum sürtünme temas yüzeyini artırarak hem sürtünme katsayısının artmasına hem de stabil bir özellik kazanmasına sebep olmaktadır.



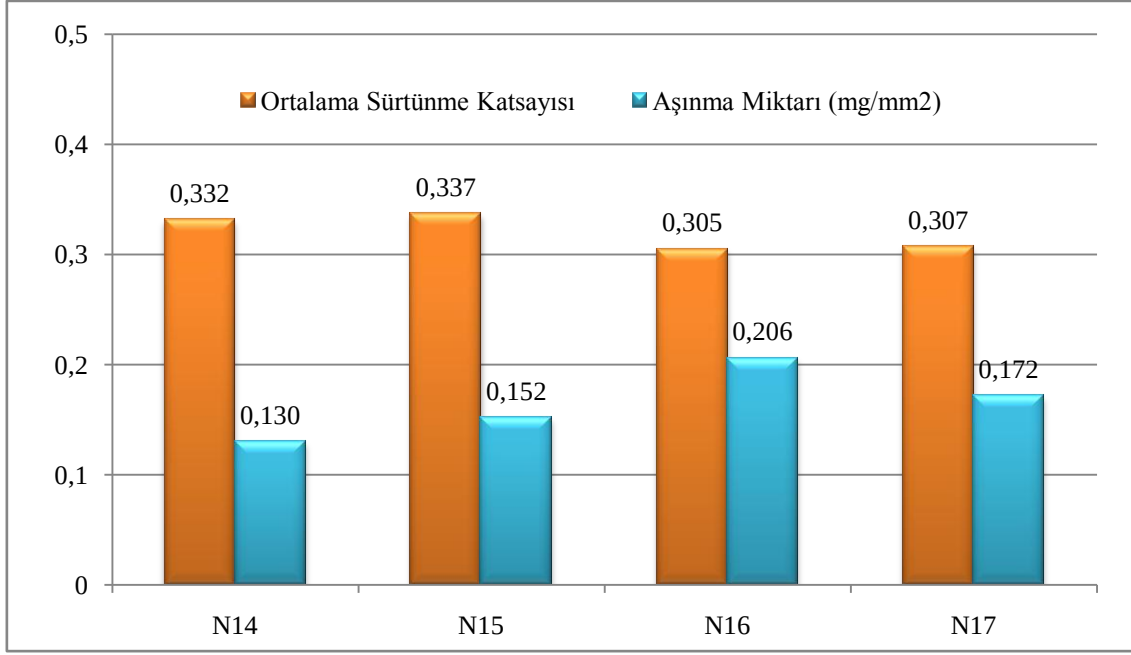
Şekil 8.23 Tırnak tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi.

Grafiklerde balata içerisindeki tırnak tozu oranının artması sürtünme katsayısının düşmesine sebep olmaktadır. Bunun başlıca nedenlerinden biri artan tırnak tozu miktarının balata yüzeyindeki diğer tozların üzerine sıvanarak sürtünme yüzeyinde kendi özelliğini baskın olarak ortaya çıkarmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 8.24 Tırnak tozu içeren numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi.

Tırnak tozu katkılı numunelerde en iyi sürtünme değişimi %8 tırnak tozu içeren N15 kodlu numune olarak belirlendi. Bu değerin üzerindeki ve altındaki tırnak tozu oranlarında sürtünme katsayısının düştüğü görülmektedir. Sonuç olarak tırnak tozu katkılı numuneler sürtünme film tabakasının oluşumundan sonra diğer deney numuneleri içerisinde en iyi kararlılık göstermektedir. 270°C sıcaklık değerinden sonra tırnak tozlarında yanmalar meydana geldiği için bütün numunelerin sürtünme katsayısı değerinde bir azalma meydana gelmektedir. Tırnak tozu katkılı balata numunelerinin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı değerleri Şekil 8.25'te verildi. Grafik incelendiğinde bütün numunelerin ortalama sürtünme katsayısı TS 555 balata standartlarına göre uygun olduğu görülmektedir. Bunun yanında tırnak tozu oranının artması sürtünme katsayısında düşüş meydana getirmektedir. Numuneler içerisinde en iyi sürtünme katsayısı 0,337 ile %8 tırnak tozu içeren N15 kodlu numune ortaya çıkmaktadır. Aşınma sonuçları dikkate alındığında genel olarak artan tırnak tozu miktarı aşınma direncini olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun temel sebebi tırnak tozlarının yüksek elastik özellikte olup yanma noktasının düşük olmasından kaynaklıdır. Dolayısıyla tırnak tozu oranının artışı sürtünme katsayısını artırdığı fakat aşınma direncini düşürmüştür. Optimum değer olarak en iyi sonuçlar %8 tırnak tozu içeren N15 kodlu numune elde edildi. N17 kodlu numunenin N16 kodlu numuneye göre daha iyi aşınma direnci sergilemesinin sebebi tozların yüzeyde homojen olarak dağılmadığından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.



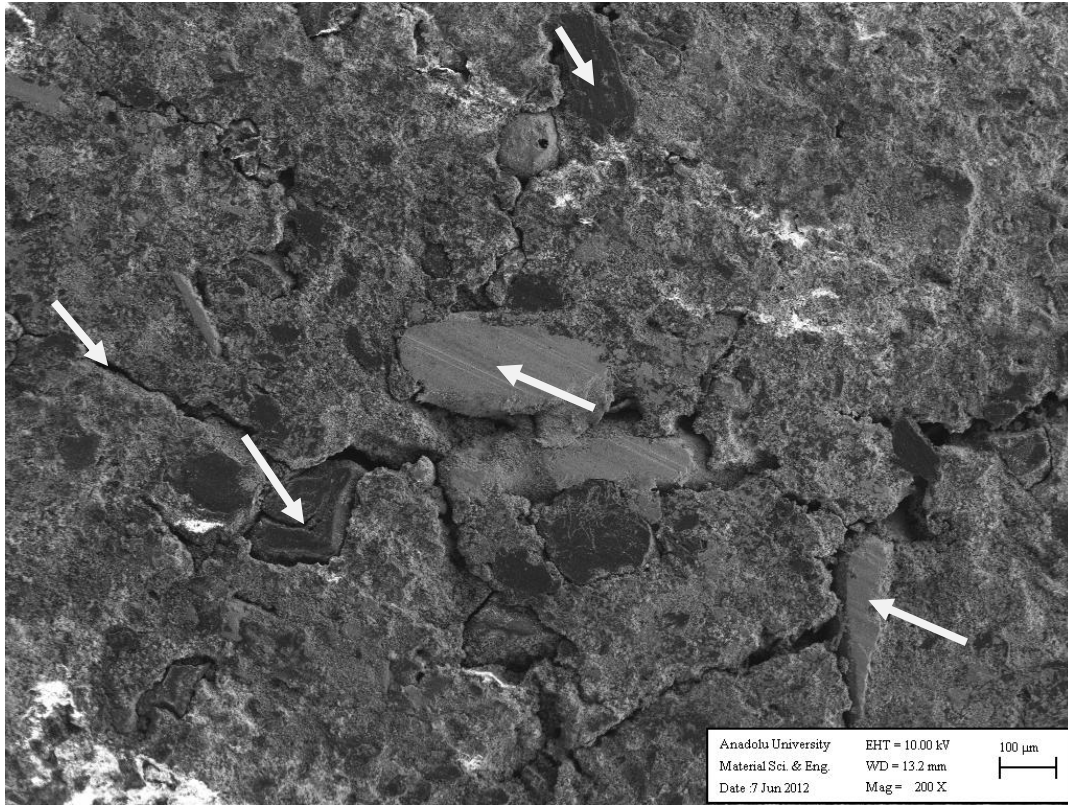
Şekil 8.24 Tırnak tozu içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı

Tırnak tozu içeren numunelerin yoğunluk sertlik ve kütlece korozyon kaybı değerleri Tablo 8.4'te verildi. Tırnak tozu oranının artması ile genel olarak numunelerin yoğunluğunun ve sertlik değerlerinin azaldığı sonucuna varılmaktadır. Tırnak tozu balata içerisindeki diğer malzemelere göre daha elastik olduğundan bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanında tırnak tozu oranının artması ile birlikte kütlece %12 ve %15 tırnak tozu içeren N16 ve N17 kodlu numuneler korozyon testinde daha iyi sonuç vermektedir. Bu durum tırnak tozlarının balatanın korozyon direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu sonucu ortaya çıkarmaktadır.

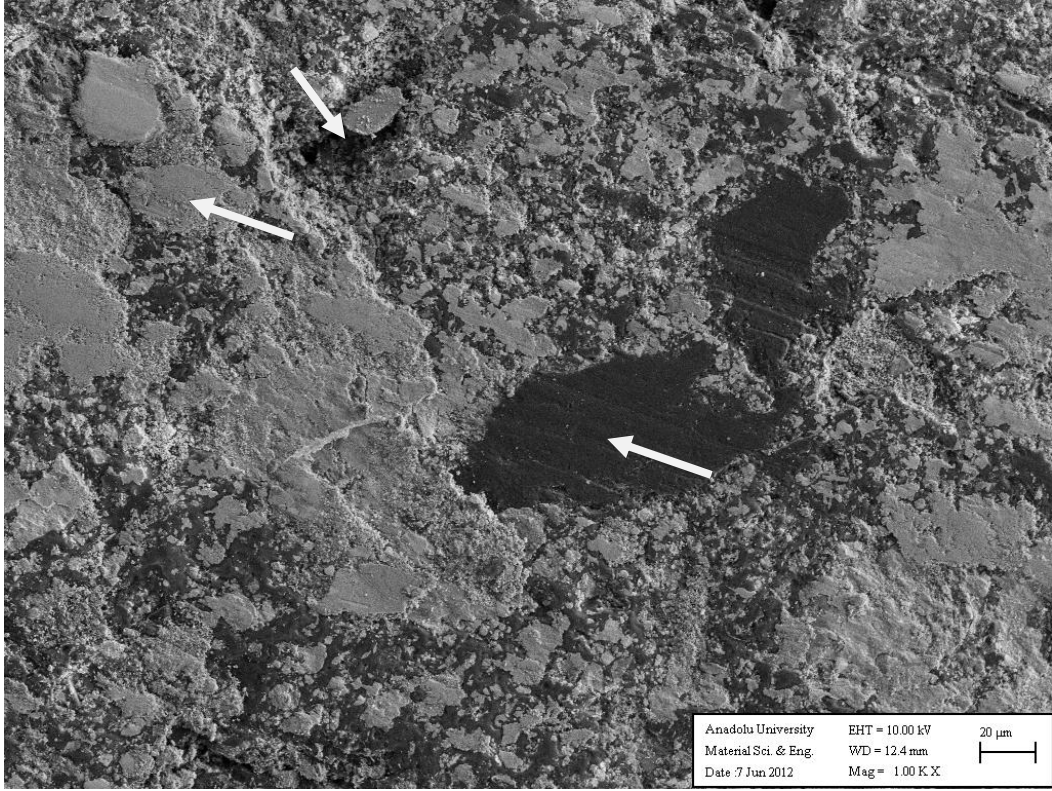
Tablo 8.4 Tırnak tozu katkılı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değerleri

Numune Kodu	Yoğunluk (kg/m ³)	Brinell Sertlik (HB)	Korozyon Kaybı (%)
N14	1850	25,6	2,14
N15	1669	23,9	2,23
N16	1758	24,1	1,98
N17	1810	22,8	2,09

Kütlece % 4 tırnak tozu içeren N14 kodlu numunenin sürtünme yüzeyinin SEM resmi Şekil 8.25'te verildi. Sürtünme yüzeyi incelendiğinde yüzeyde mikro düzeyde çatlaklar olduğu görülmektedir. Bununla beraber yüzeylerin bazı kısımların küçük çapta poroziteler olduğu ve bakır ve metal tozlarının sürtünme tabakasının oluşumunda kısmen rol aldığı görülmektedir. Bu durum temas yüzeyini azaltarak ve sürtünme malzemelerin sürtünme katsayısı oluşumunda kendi özelliklerini ortaya koyamadığını göstermektedir. Yüzeylerde karbon parçacıklarının da aktif olarak sürtünmeye katıldığı ve sürtünme katsayısında bir kararlılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Yüzeylerde parlak renkli olarak gözüken metal parçacıkları da kısmen sürtünme katsayısına katkıda bulunduğu söylenebilir. Aşınma mekanizmasının ise yüzeyde oluşan derin mikro çatlaklardan ve kopmalardan dolayı yorulma ve tabaka kopması şeklinde olduğu sonucuna varılmaktadır. Sonuç olarak %4 tırnak tozu içeren N14 kodlu numunede balata içerisindeki komponentlerin homojen dağılımı ve yüksek bir sürtünme katsayısı elde edilememektedir.

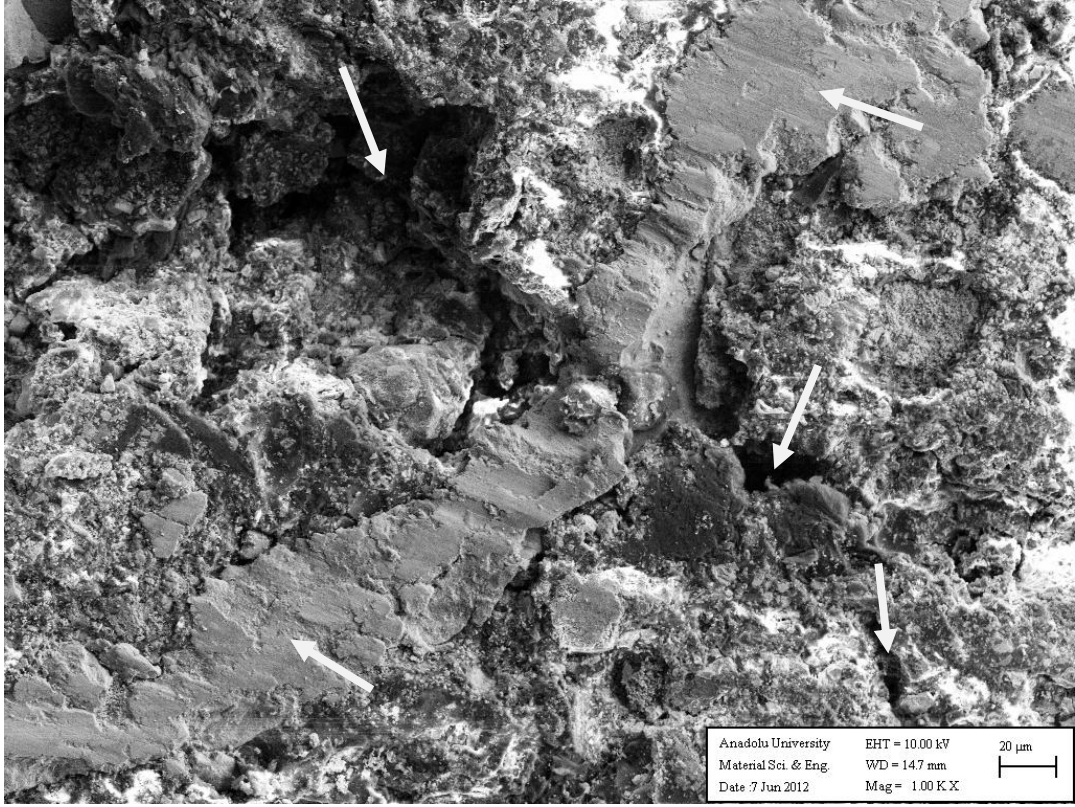


Şekil 8.25 %4 Tırnak tozu içeren N14 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



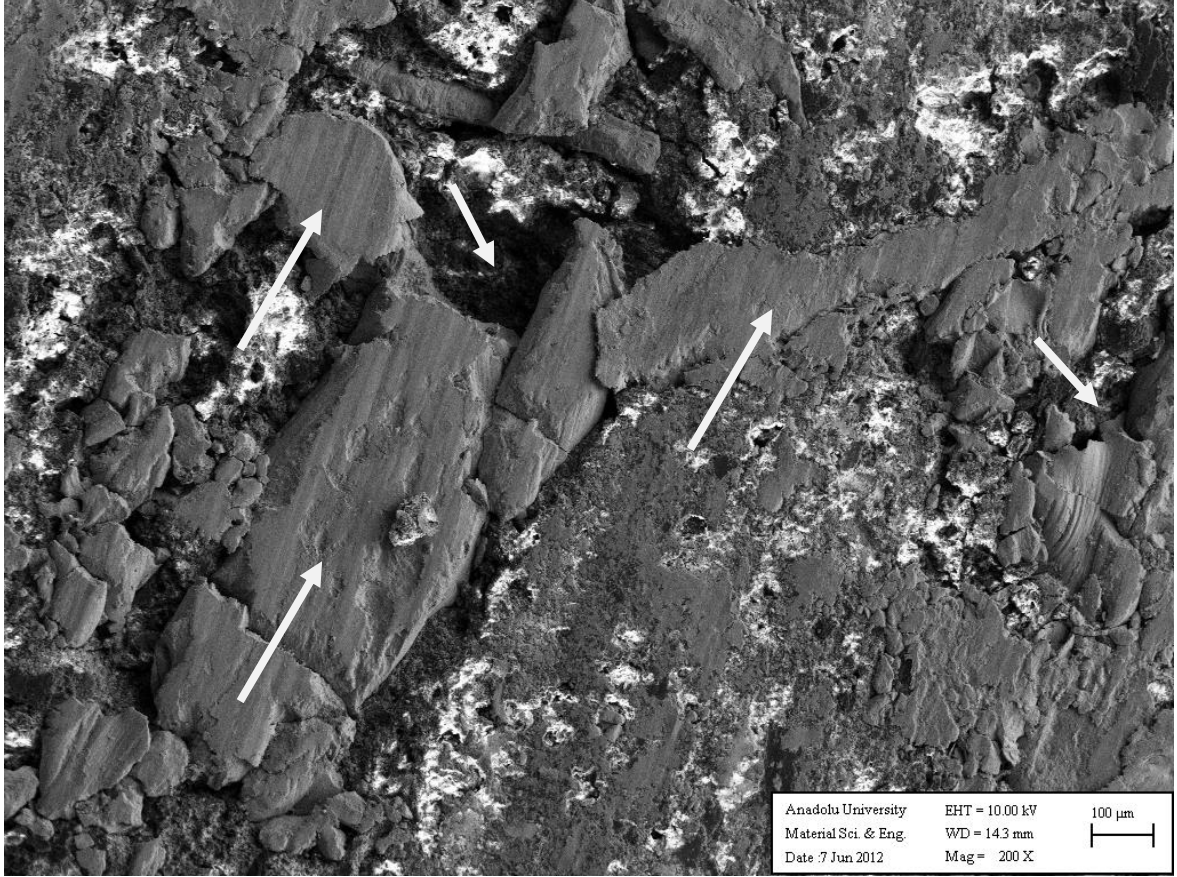
Şekil 8.26 %8 Tırnak tozu içeren N15 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Kütlece % 8 tırnak tozu içeren N15 kodlu numunenin sürtünme yüzeyinin SEM resmi Şekil 8.26'da verildi. Yüzeyler incelendiğinde mikro ve makro düzeyde herhangi bir çatlak ve poroziteye rastlanmamaktadır. Bunun yanında yüzeyde balata içerisindeki komponentlerin homojen bir şekilde dağıldığı ve karbon taneciklerinin sürtünmede aktif rol aldığı görülmektedir. Ayrıca parlak renkte ortaya çıkan bakır ve çelik yünü taneciklerinin de sürtünme üzerinde etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum yüzey temasını artırarak ve malzemelerin her birinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini ortaya koyarak yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı ortaya çıkarmaktadır. Yüzeylerdeki izlerden dolayı adhesiv aşınma diğer aşınma türlerine göre baskınlık göstermektedir.



Şekil 8.27 %12 Tırnak tozu içeren N16 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

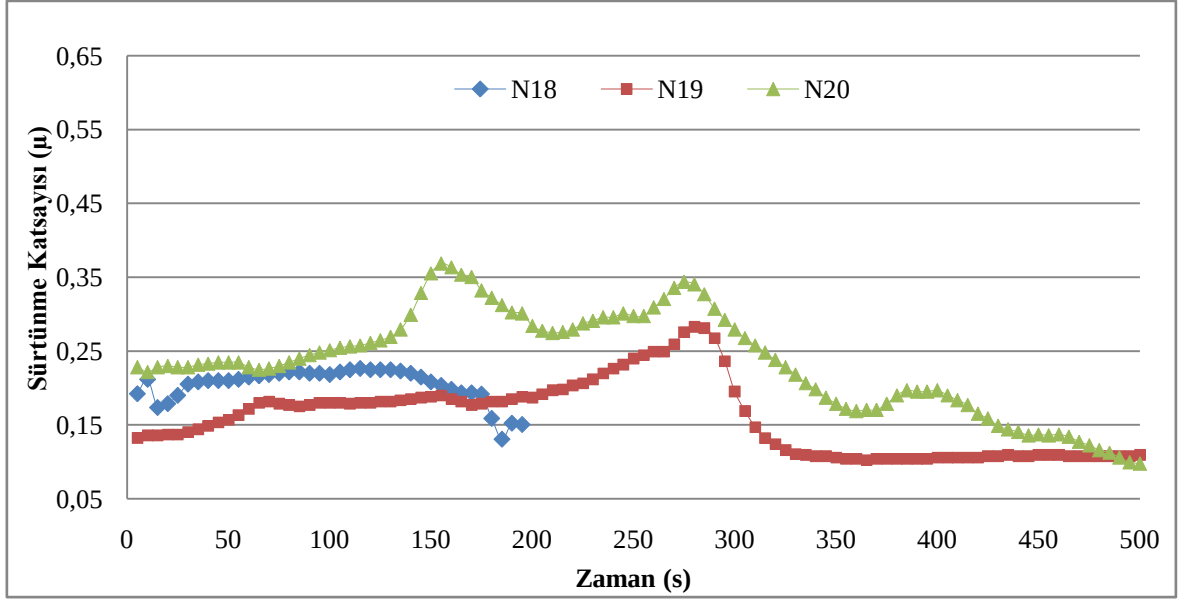
Kütlece % 12 ve % 15 tırnak tozu içeren N16 ve N17 kodlu numunelerin sürtünme yüzeylerinin SEM resimleri sırasıyla Şekil 8.27 ve Şekil 8.28’de verildi. Artan tırnak tozu oranı ile birlikte sürtünme yüzeylerinde ortak olarak derin çatlaklara ve malzeme kopmalarına rastlanmaktadır. Genel olarak bakır tozları sürtünme katsayısının oluşumunda aktif olarak rol aldığı gözlemlendi. Yüksek oranda tırnak tozu ilavesi yüksek sıcaklıklarda özelliğini kaybederek diğer malzemelerin üzerine sıvandığı görüldü. Bu durum sürtünme katsayısındaki düşüşün sebebini açık olarak ortaya koymaktadır. Bunun yanında tırnak tozu oranının artması diğer balata komponentleri ile bir uyumsuzluk ortaya çıkararak fenolik reçinenin balata komponentlerini bir arada tutma özelliğini kaybettirdiği düşünülmektedir. Sonuç olarak alınan mikro yapı resimlerinden tırnak tozu oranının % 8’in üzerine çıkması frenleme performansını ve balatanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varıldı.



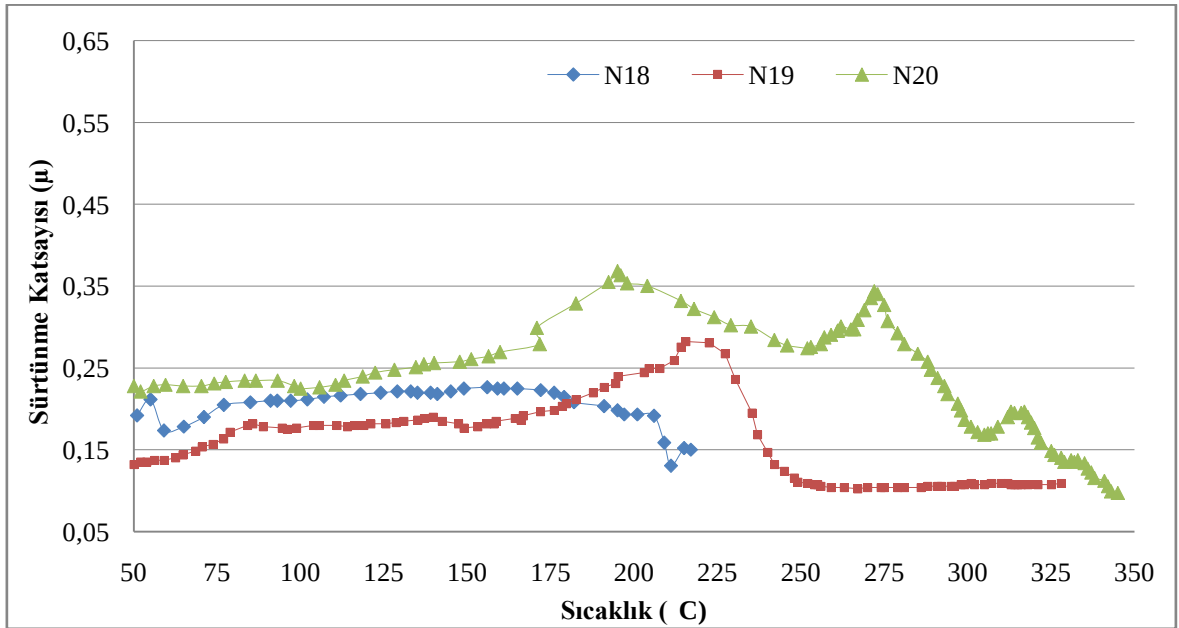
Şekil 8.28 %15 Tırnak tozu içeren N17 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

8.1.5 Organik Esaslı Balataların Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları

Deneylerde kullanılan hayvansal kaynaklı organik tozlar tek başına kullanılarak tamamen organik esaslı balatalar üretildi. Sadece tırnak ve boynuz tozları kendi içerisinde değiştirilerek üretilen organik esaslı balata numunelerinin sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık grafikleri Şekil 8.29’da verildi. Grafikler incelendiğinde % 25 boynuz tozu içeren numunede 200. saniye ve 225°C sıcaklık değerlerinde yüzeyde aşırı yanma ve kopmalardan dolayı deneyi tamamlayamadı. Numune içerisindeki boynuz tozunun azalması ve tırnak tozunun artmasıyla sürtünme katsayısında bir artış meydana gelmektedir. Bu durum tırnak tozlarının boynuz tozuna göre sürtünme katsayısının yüksek tutulmasında daha etkili olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.



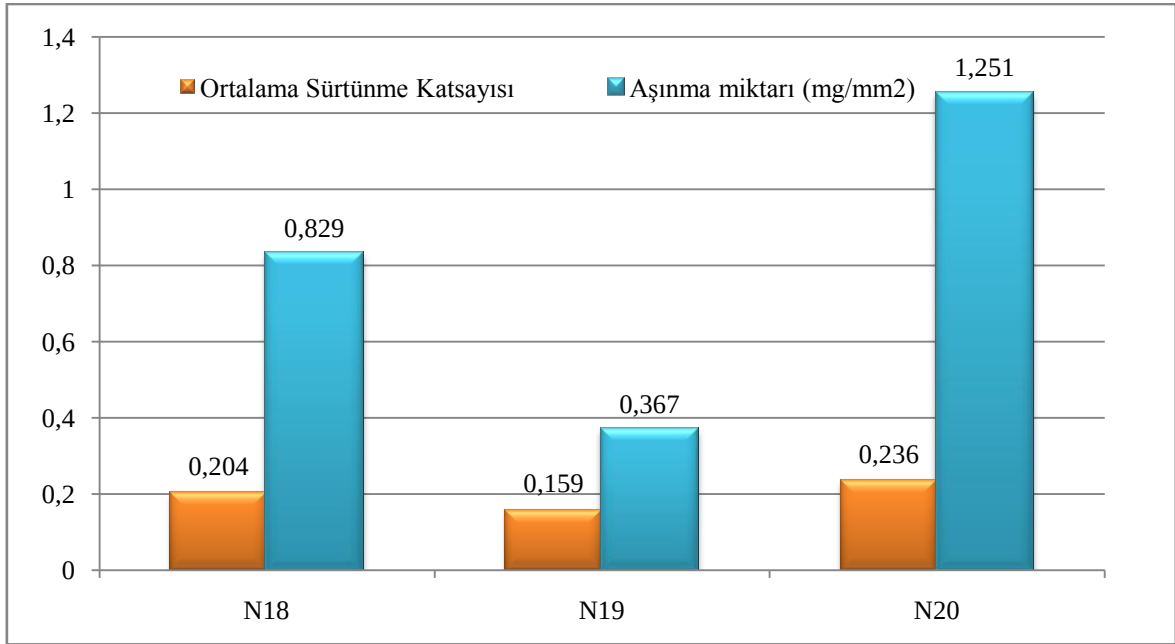
Şekil 8.29 Tırnak ve boynuz tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi.



Şekil 8.30 Tırnak ve boynuz tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi.

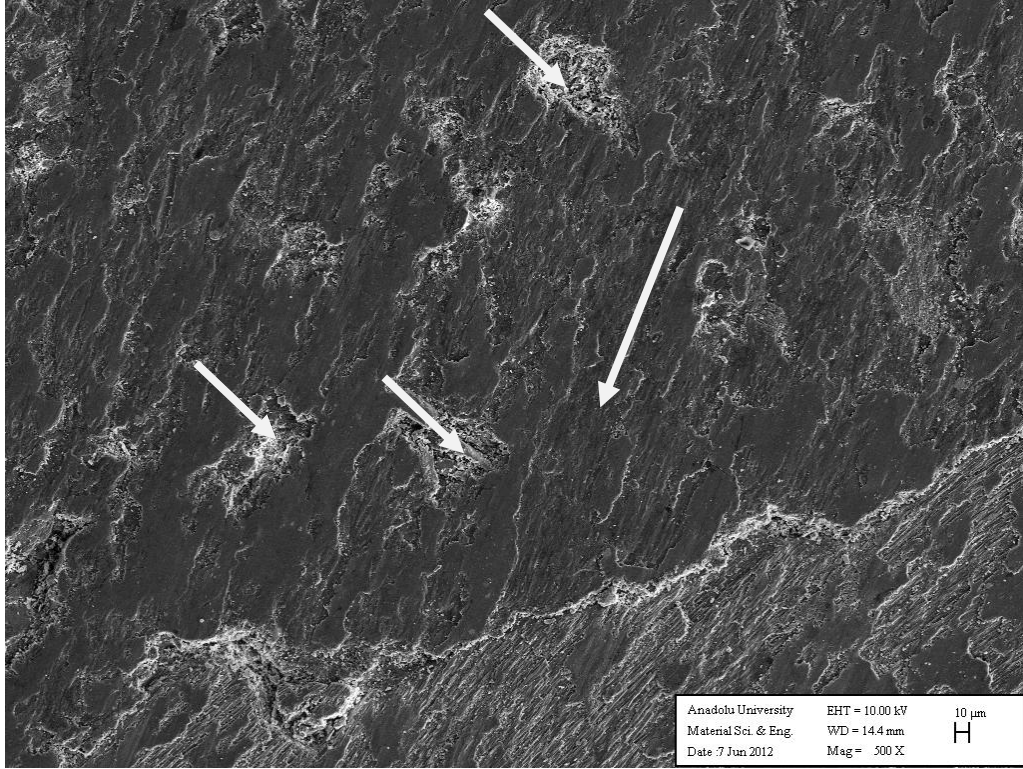
Diğer yandan % 15 boynuz ve % 10 tırnak tozu içeren N19 kodlu numunede sıcaklık 225°C oluncaya kadar sürtünme katsayısında bir artış daha sonra hızlı bir düşüş meydana geldi. N20 kodlu numunede de aynı sonucun ortaya çıkması bu sıcaklık değerinde balata içerisindeki organik tozların yanarak özelliğini kaybettiğini göstermektedir. Tırnak tozunun % 25 oranında kullanıldığı N20 kodlu numunede ise sürekli bir artış ve azalış eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bunun başlıca sebeplerinden biri

yüzeydeki organik tozların yanarak yüzeyden tamamen ayrıldığı ve bir sonraki tabakanın sürtünme katsayısını artırmasından kaynaklıdır. Organik esaslı balata numunelerinin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı değerlerine bakıldığında TS 555 ve TS 9075 standartlarında belirtilen minimum sürtünme katsayısı ve aşınma direnci değerlerini sağlayamadığından balata olarak kullanılması uygun değildir (Şekil 8.31).

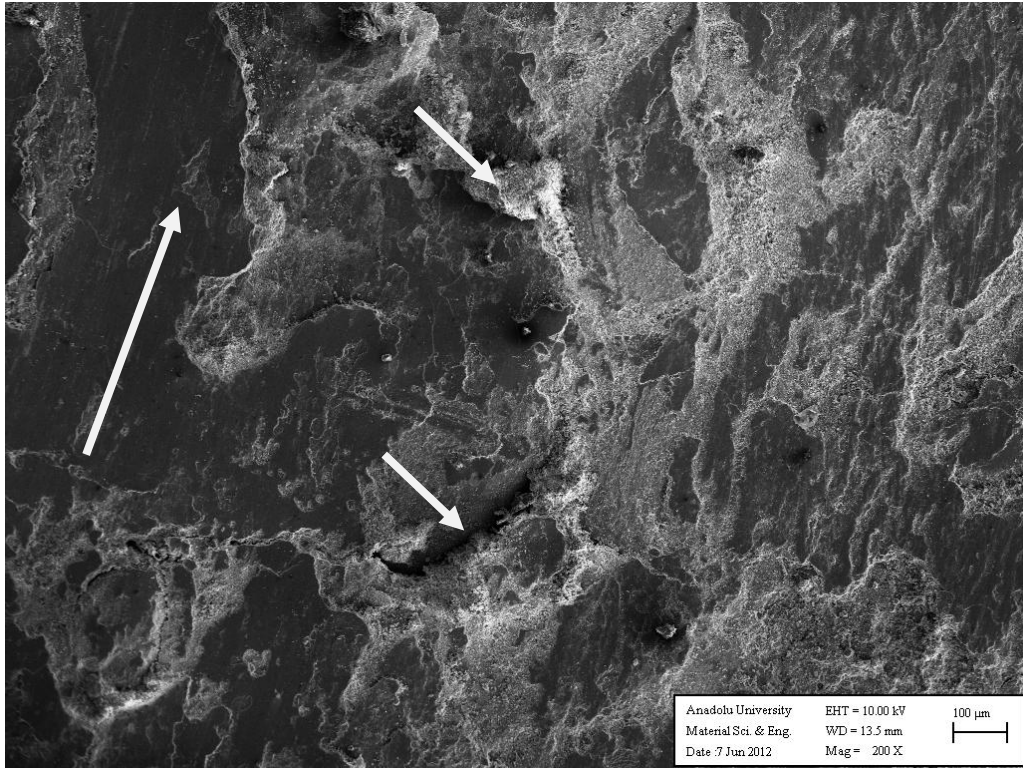


Şekil 8.31 Tırnak ve boynuz tozu içeren organik esaslı balata numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı.

Üretilen organik esaslı N18, N19 ve N20 kodlu balata numunelerinin sürtünme yüzeylerinin SEM resimleri sırasıyla Şekil 8.32, Şekil 8.33 ve Şekil 8.34’te verildi. Yüzeylerin mikro yapıları incelendiğinde siyah renkli olarak karşımıza çıkan yanmış karbon tanecikleri görülmektedir. Bunun yanında yüzeylerdeki ortak olarak gözükten aşınma çizgileri fren diskinin yanmış karbon taneciklerini aşındırmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Tırnak tozu oranının artması yüzeyin daha erken yanmasına ve tırnağın daha

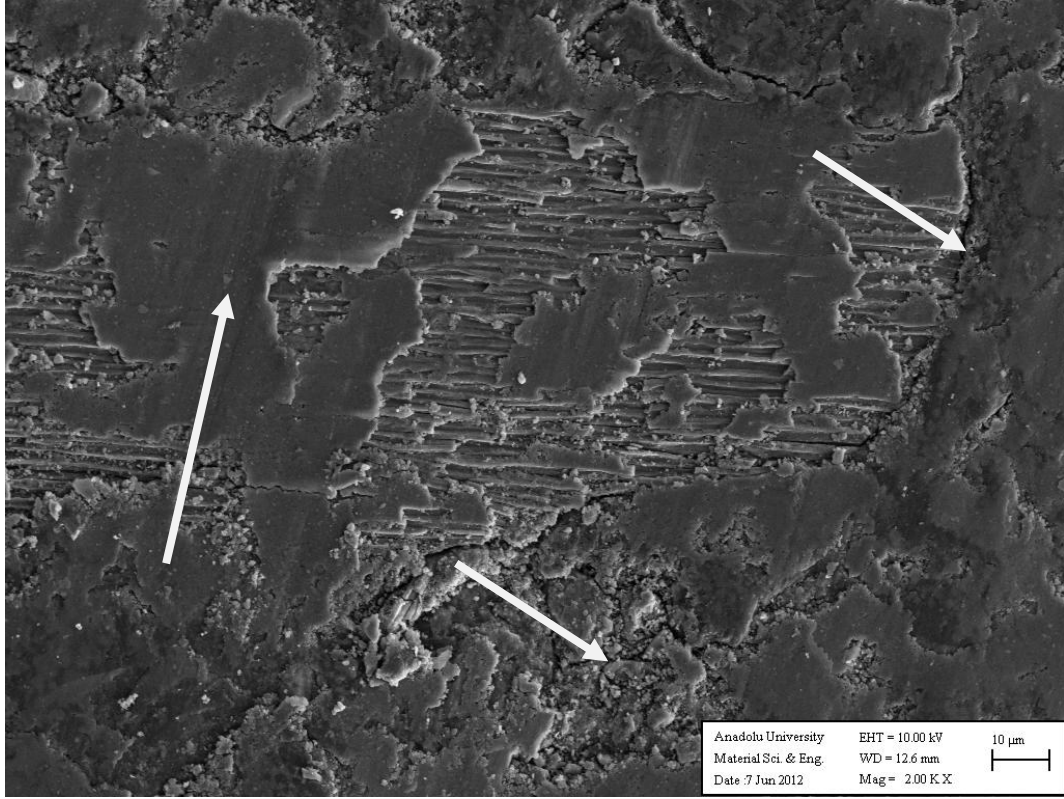


Şekil 8.32 %25 Boynuz tozu içeren N18 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



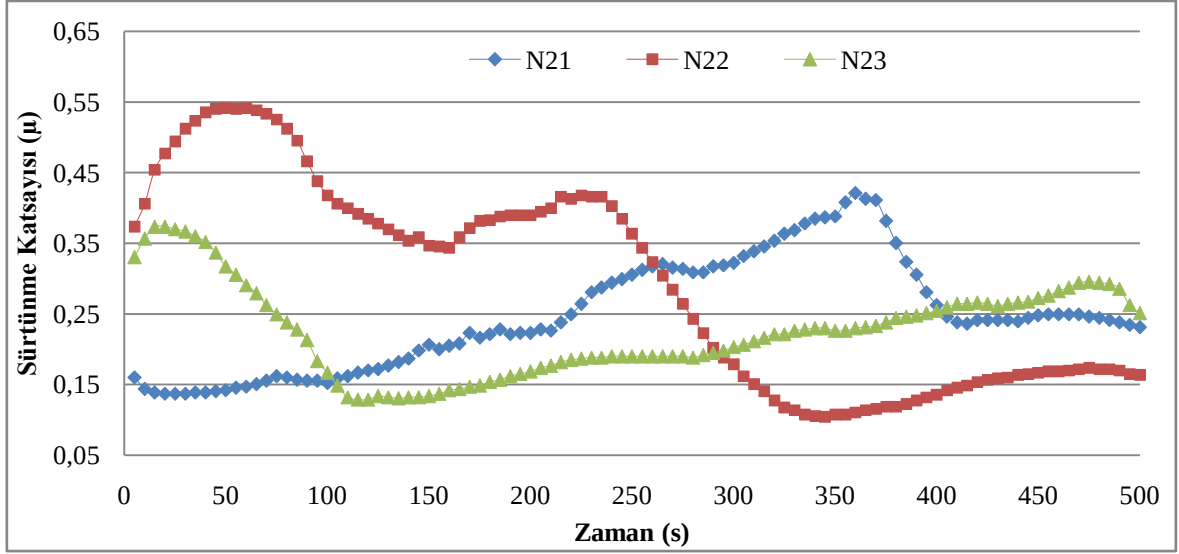
Şekil 8.33 %15 Boynuz ve %10 tırnak tozu içeren N19 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

elastik olmasından kaynaklı olarak yüzeyden malzeme kopmaları ve yüzey çatlakları daha yoğun olarak karşımıza çıkmaktadır.

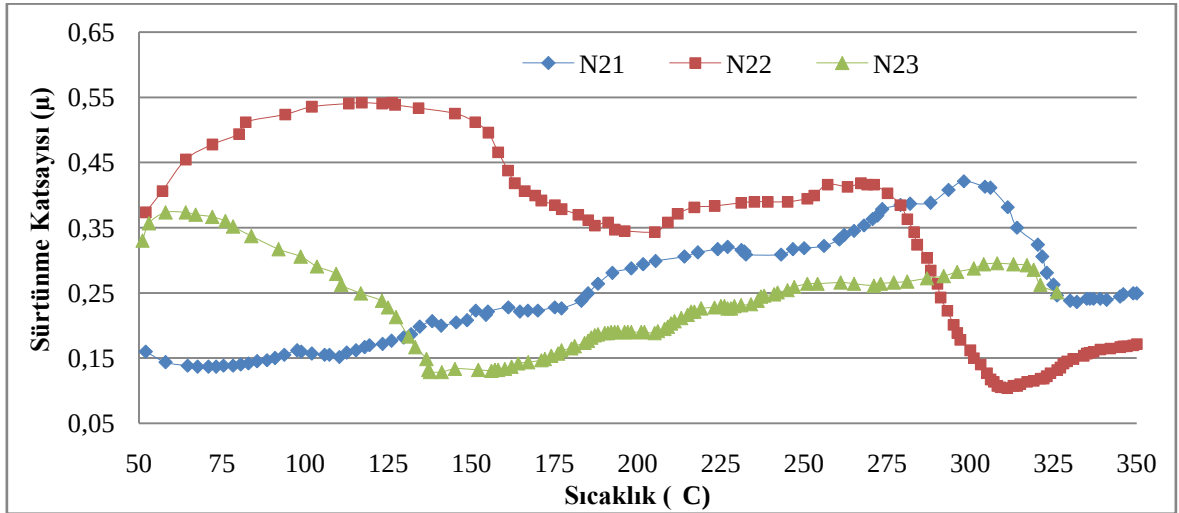


Şekil 8.34 %5 Boynuz ve %20 tırnak tozu içeren N20 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Tırnak tozunun organik esaslı balatanın sürtünme katsayısında ve aşınma direncinde olumsuz sonuçlar ortaya çıkardığından dolayı onun yerine sadece % 20 boynuz tozu kullanılarak midye ve kemik tozlarının kendi arasındaki değişiminin ortaya çıkardığı sonuçlar incelendi. Elde edilen sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık değişimleri Şekil 8.35'te verildi. Grafikler incelendiğinde tabaka kopmalarına ve yanmalara bağlı olarak sürtünme katsayılarında büyük değişimler meydana gelmektedir. N21 ve N23 kodlu numune için sürtünme tabakası 120°C civarında oluşurken N22 kodlu numunede bu değer 200°C civarında meydana gelmektedir. Dolayısıyla sürtünme katsayısını kararlı hale getiren karbon ve Al_2O_3 olmadığından grafiklerdeki sürtünme katsayısı değerlerinde büyük sapmalar meydana gelmektedir. Sonuç olarak kemik tozu ile midye tozlarının kendi içerisindeki sonuçlara bakılarak sürtünme katsayısı ile doğrudan bir ilişki kurulamamış olup istenen düzeyde kararlı bir sürtünme katsayısı elde edilememektedir.

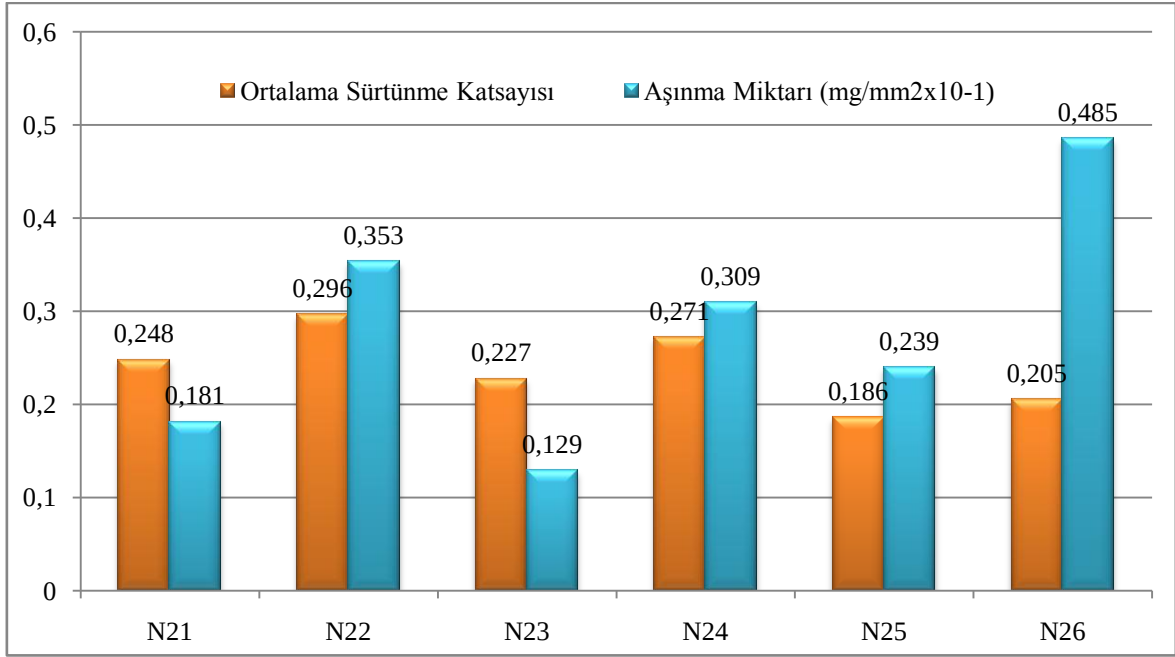


Şekil 8.35 Kemik ve midye tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi



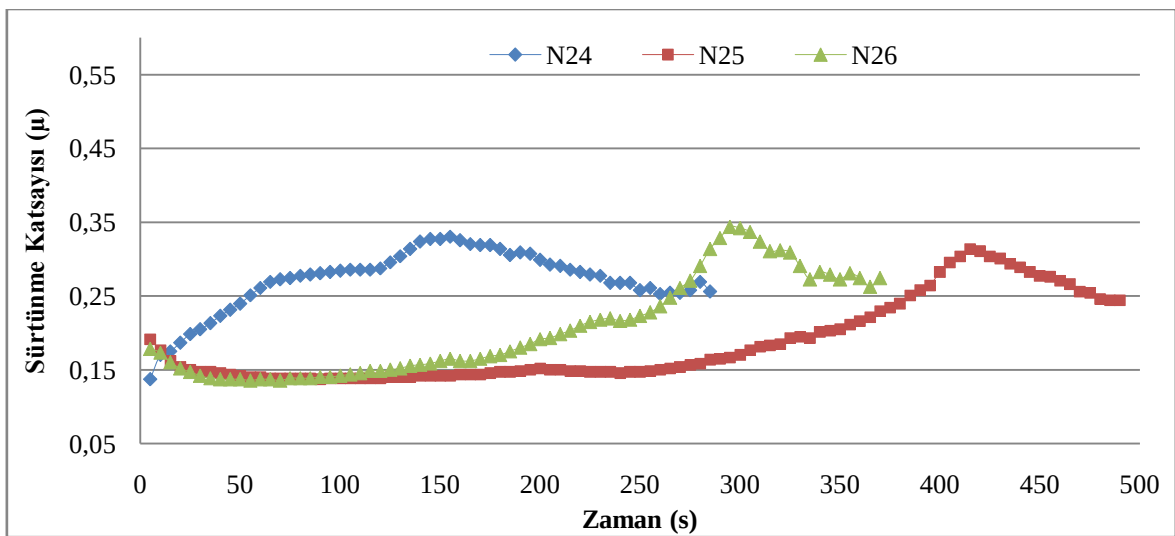
Şekil 8.36 Kemik ve midye tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi

Aynı şekilde sürtünme katsayılarının yüksek ve kararsız çıkması malzeme üzerindeki aşınma miktarından da anlaşılmaktadır (Şekil 8.37). Bu durumun sebebi sürtünme yüzeyinden yarak ayrılan tabakalar sürtünme katsayısında ani değişimler ve aşınma miktarında ise yüksek değerler karşımıza çıkarmaktadır. Bu numunelerin ortalama sürtünme katsayıları özellikle N22 numunede TS 555 standardına uymasına rağmen aşınma direnci çok düşük çıktığı saptanmaktadır (Şekil 8.37).

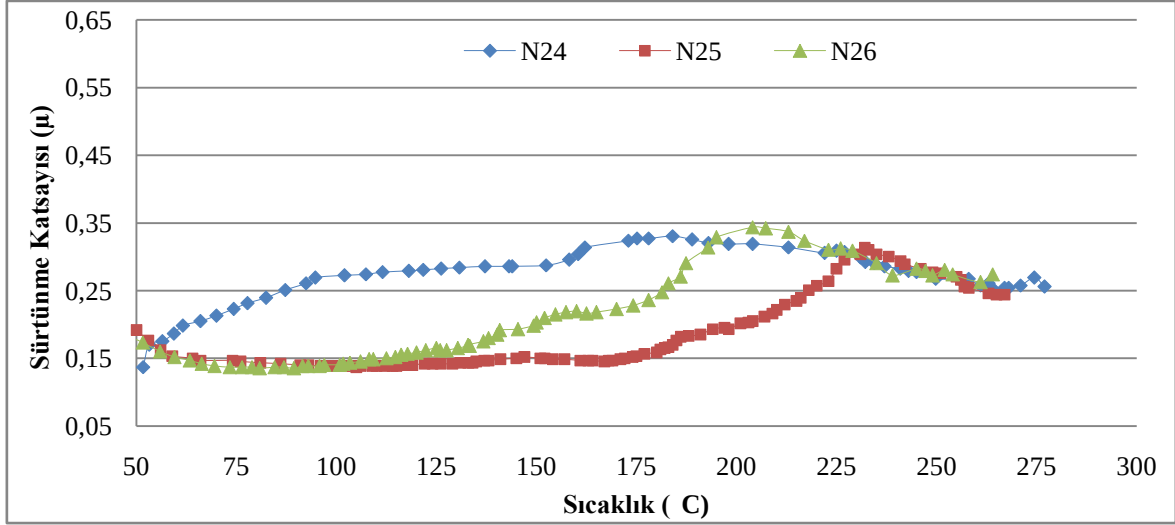


Şekil 8.37 Tırnak, boynuz, kemik ve midye tozu içeren organik esaslı balata numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı.

Organik esaslı balata numunelerinde genel olarak en büyük problemlerden bir tanesi yanma olayıdır. Bu sorunun önüne geçmek için balata içerisine yanmaya karşı direnç sağlayan barit tozları eklendi. Ve balata içerisinde barit ile kemik tozu arasında bir değişim yapıldı. Elde edilen sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık değişimleri Şekil 8.38 ve Şekil 8.39’da verildi.



Şekil 8.38 Kemik ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi

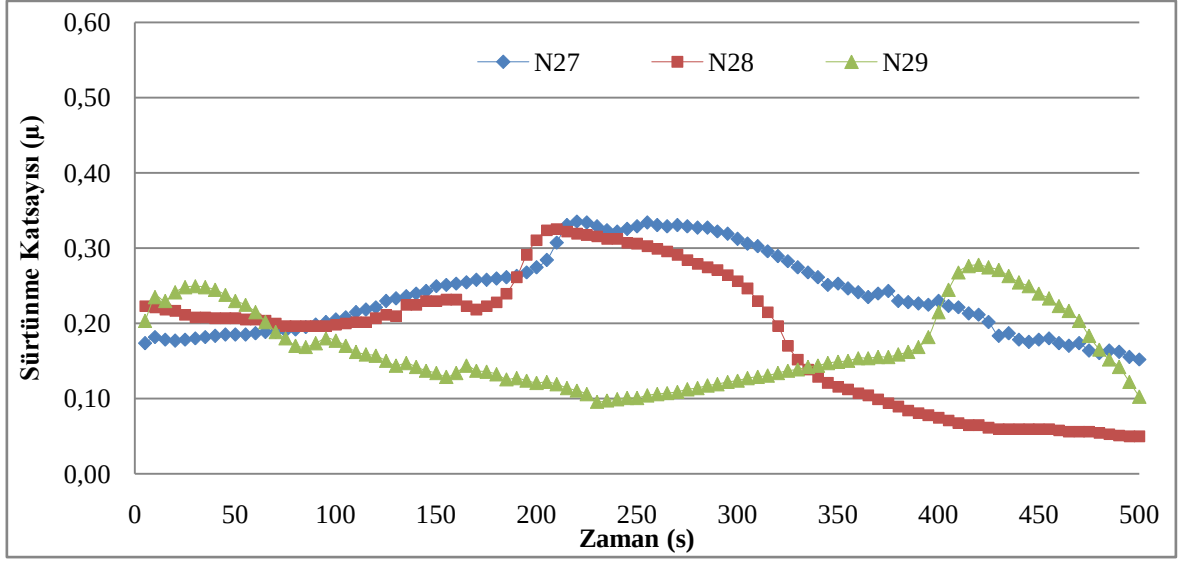


Şekil 8.39 Kemik ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi

Barit oranının artması ve kemik tozu oranının azalması ile sürtünme katsayısında bir azalma ve aynı anda bir kararlılık meydana gelmektedir. Bu durumun sebebi barit tozlarının yanmaya karşı dirençli olduğundan organik tozların daha kararlı bir sürtünme katsayısı sergilemesini sağlamaktadır. Fakat sıcaklık 275°C'ye ulaştığında yüzeylerden yüksek miktarda malzeme kopmaları meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak N24 ve N26 kodlu numuneler yüzeylerde yanma sonucu deneyi tamamlayamadan 400. saniyede kopmalar meydana geldiği görüldü. Kemik tozu miktarının azaltılması aşınma direncini düşürerek yüksek miktarda aşınma meydana gelmesine yol açmaktadır. Ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma değerlerine bakıldığında TS 555 ve TS 9075 standartlarına göre balata olarak kullanılamayacağı sonucuna varıldı (Şekil 8.37).

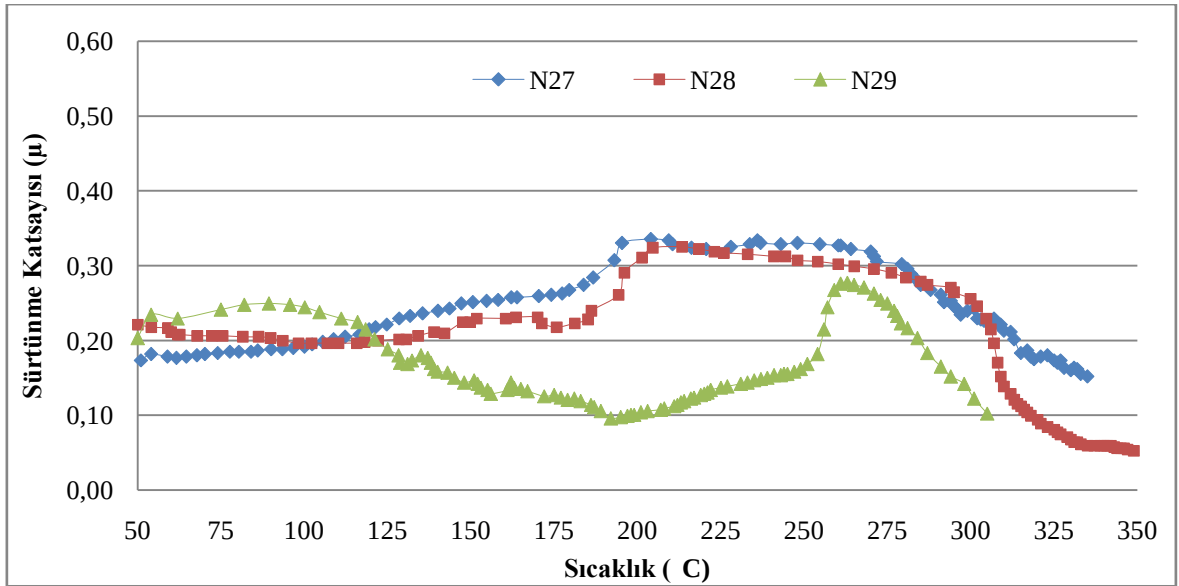
8.1.6 Midye ve Kemik Tozu İçeren Balataların Sürtünme-Aşınma Test Sonuçları

Üretilen organik esaslı balata numunelerinde bonuz ve tırnak tozları istenilen frenleme performansını tam olarak karşılayamadığından bu tozlar balata içerisinden kaldırıldı ve onun yerine sürtünme tozu kullanıldı. Üretilen bu numunelerde metal ilavesi olmadan barit ve midye tozlarının değişiminin frenleme karakteristiği ve aşınma direnci üzerindeki etkileri araştırıldı. Elde edilen sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi Şekil 8.40 ve Şekil 8.41'de verildi.



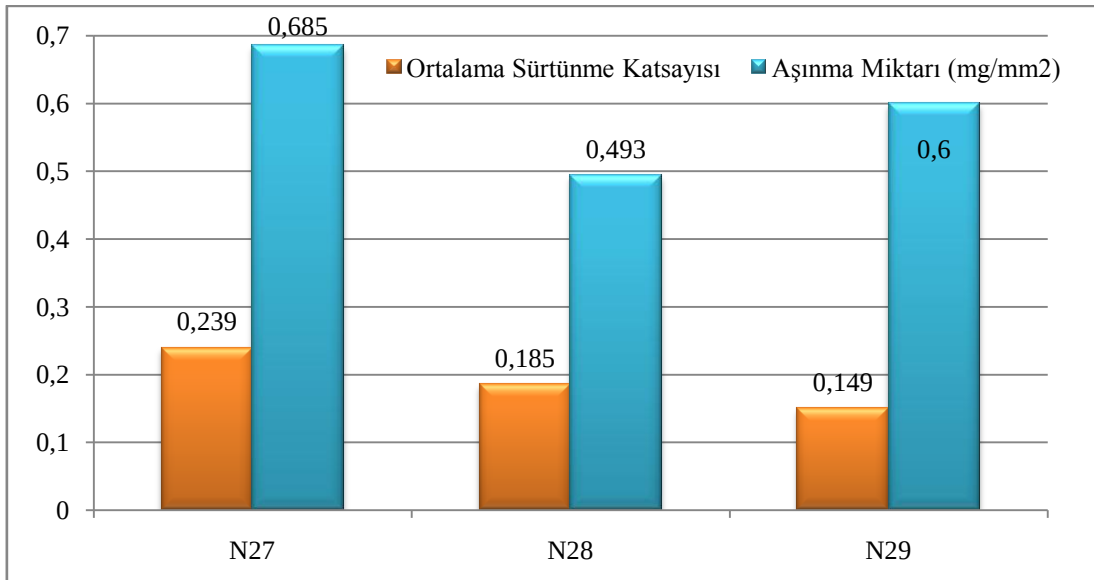
Şekil 8.40 Midye ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi

Sürtünme katsayısı değişimleri incelendiğinde midye tozu içermeyen ve %30 oranında barit tozu içeren N27 kodlu numunede 200°C sıcaklığa kadar sürtünme katsayısında bir artış görülmektedir. Aynı durum %10 midye tozu ve %20 barit tozu içeren N28 kodlu numunede de görülmektedir. Fakat barit tozunun olmadığı %30 midye tozu içeren N29 kodlu numunede bu durumun tam tersi ortaya çıkmaktadır. Bu sonucun başlıca sebeplerinden biri midye tozlarının sürtünme katsayısı üzerinde barite nazaran tam tersi bir etki yaptığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8.41 Midye ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi

Sıcaklık değeri 260°C'yi geçtikten sonra bütün numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde ani ve hızlı düşüşlerin meydana geldiği görüldü. Dolayısıyla kemik ve midye tozlarının tek başına takviye sağlayamadığı ve yüzeylerdeki tanecikleri tutma özelliğini bozduğu görülmüştür. Bu numuneler içerisinde en kararlı sürtünme katsayısı N27 kodlu numunede elde edildi. Ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı değerlerine bakıldığında (Şekil 8.42) en sürtünme katsayısı %30 barit içeren N27 kodlu numunede, en iyi aşınma direnci ise %10 midye tozu içeren N28 kodlu numunede ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlara bakılarak artan midye tozu oranının balatanın aşınma direncine olumlu bir etki yaptığı görülmektedir. Midye ve barit tozu katkılı organik esaslı balata numunelerinin TS 555 ve TS 9075 standartlarına göre balata için uygun olmadığı sonucuna varıldı.



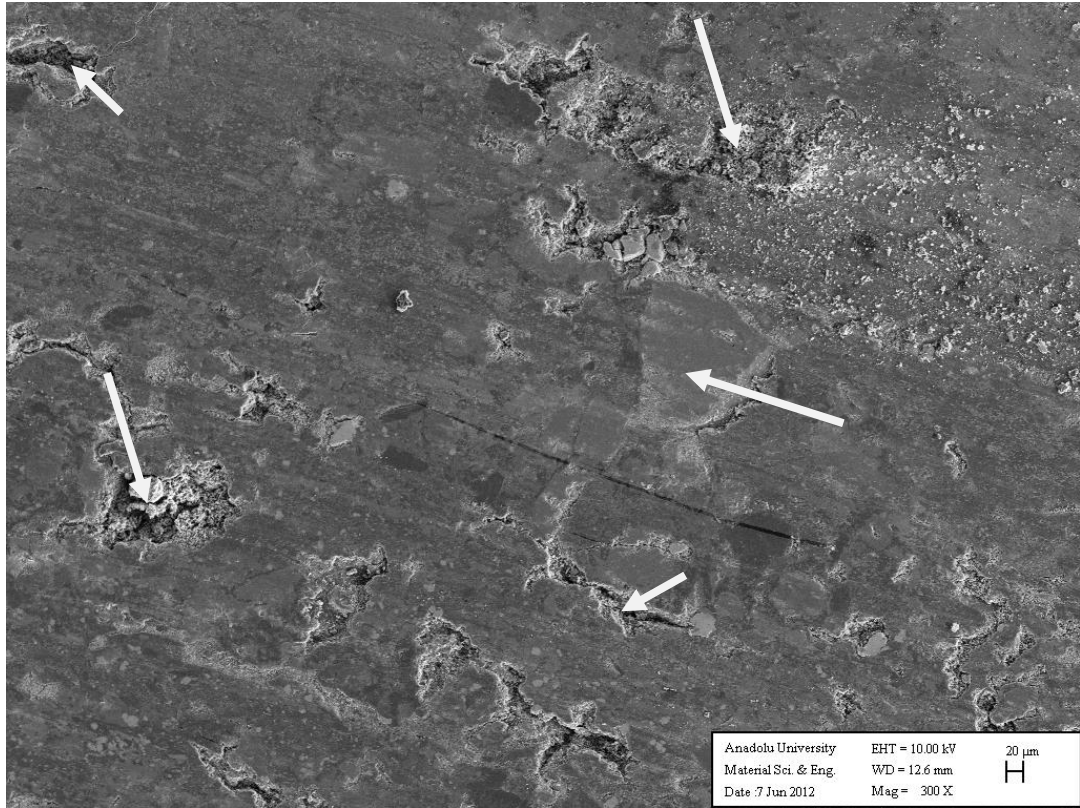
Şekil 8.42 Midye ve barit tozu içeren organik esaslı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı

Üretilen bu numunelerin yoğunluk, Brinell Sertlik ve korozyon kaybı değerleri Tablo 8.5’de verildi. Elde edilen değerlere göre organik esaslı balataların sertlik ve yoğunluk değerleri düşük, korozyon kaybının ise büyük olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısının düşük ve kararsız olmasının sebeplerinden biri de üretilen organik balata numunelerinin istenilen mekanik özellikleri tam olarak karşılayamamasıdır. Bunun yanında midye tozu oranının artması balatanın korozyon direncinde bir artış meydana getirdiği anlaşıldı.

Tablo 8.5 Midye ve barit tozu katkılı organik esaslı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değerleri

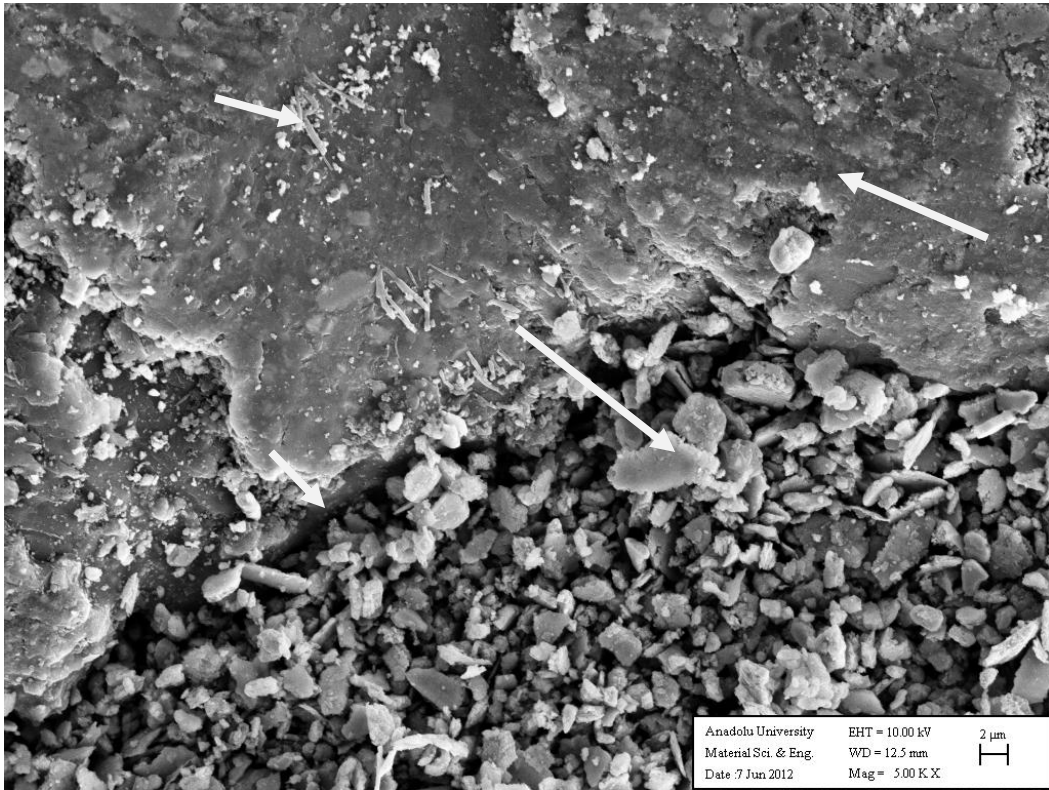
Numune Kodu	Yoğunluk (kg/m ³)	Brinell Sertlik (HB)	Korozyon Kaybı (%)
N27	1180	17,3	3,25
N28	1235	18,1	3,13
N29	1106	17,9	2,78

Barit ve midye tozu içeren organik esaslı balata numunelerinin sürtünme ve aşınma yüzeylerinin SEM resimleri sırasıyla N27, N28 ve N29 kodlu numuneler için Şekil 8.43, Şekil 8.44 ve Şekil 8.45'te verildi. Midye tozu içermeyen N27 kodlu numunenin yüzeyleri incelendiğinde malzeme kopmaları ve mikro çatlaklar karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında malzemelerin yüzeyde homojen dağıldığı ve karbon ve Al₂O₃ tozlarının sürtünme tabakasında aktif olarak görülmektedir.



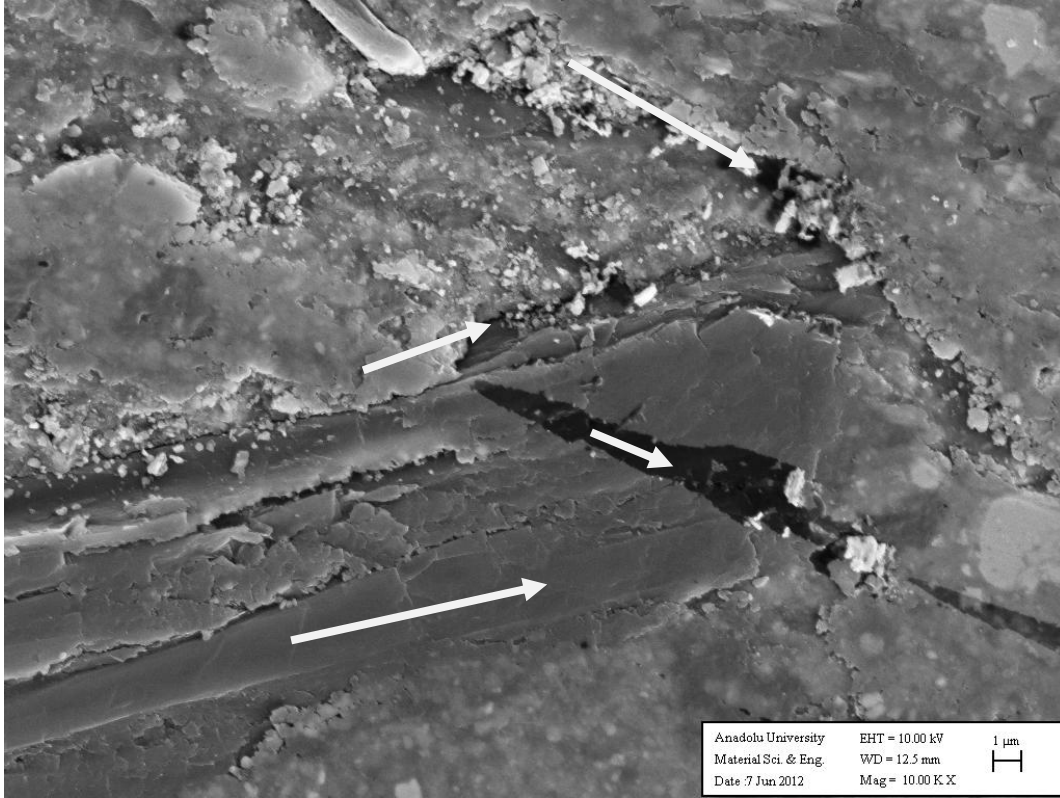
Şekil 8.43 %0 Midye ve %30 barit tozu içeren N27 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Metal tozları olmadığından yüzeydeki ısınn homojen olarak dağılamadığından dolayı malzeme kopmalarına sebep olmuş ve sürtünme katsayısında düşüş meydana getirmektedir. N28 kodlu kütlece %10 midye tozu içeren numunenin yüzeyinde ise yüksek oranda malzeme kopmalarının meydana geldiği görüldü. Burada fenolik reçine ile midye tozu arasında bir uyumsuzluk olabileceği düşünülmektedir. Aynı şekilde yüzeyden kopan parçacıkların sürtünme temas yüzeyini önemli ölçüde azaltarak sürtünme katsayısında ciddi düşüşlere ve kararsızlığa sebep olduğu görüldü. Bunun yanında yüzeylerden kopan malzemeler diğer balata komponentlerinin üzerinde bir tabaka oluşturarak bu malzemelerin sürtünme filmi oluşturmasını engellemiştir. Ayrıca malzemelerin sınır bölgelerinde büyük ölçüde taneciklerin birbirinden ayrılması söz konusudur. N28 kodlu numunede elde edilen sonuçlara paralel olarak N29 kodlu numunenin yüzeyi 10000 kat büyütüldüğünde yüzeylerdeki tabaka kopmaları ve taneciklerin sınır bölgelerinde ayrılmaları olduğu açıkça görülmektedir. Metal tozu olmadığından bu bölgelerde ısı yüzeyden uzaklaştırılamamış ve yeterli ölçüde aşınma direnci gösterememiş olup sürtünme katsayısını olumsuz yönde etkilediği sonucuna varıldı.



Şekil 8.44 %10 Midye ve %20 barit tozu içeren N28 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

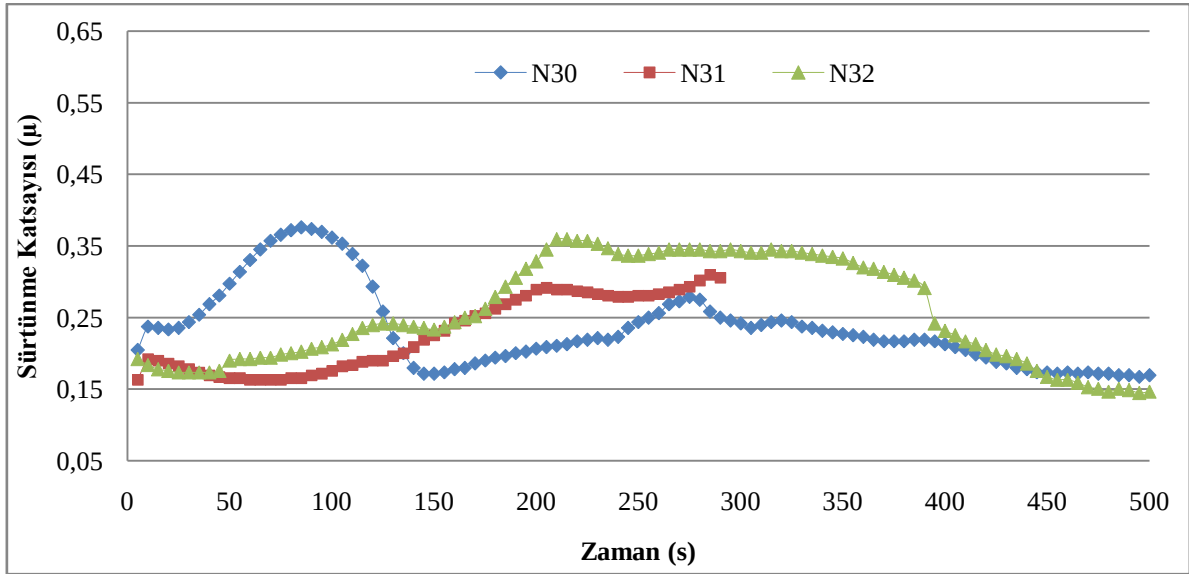
Yüzeylerde karbon ve diğer aşındırıcı tanecikler boyutları küçük olduğundan tam bir takviye elemanı olarak görev yapamamış ve yüksek sıcaklığın etkisiyle de matris elemanı olan fenolik reçine bu görevi üstlenememiştir.



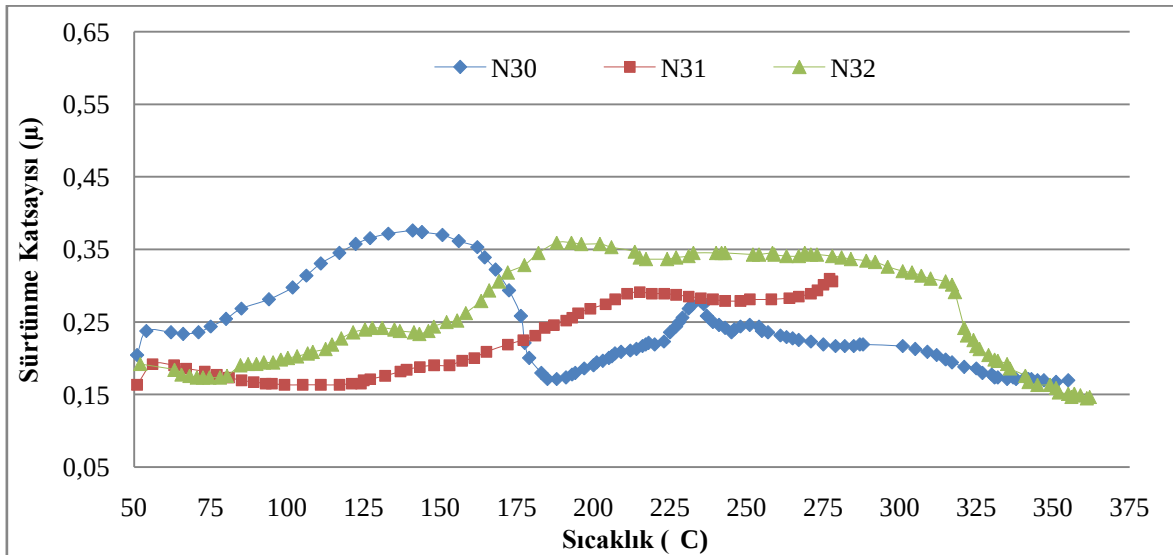
Şekil 8.45 %20 Midye ve %10 barit tozu içeren N29 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

Midye ve barit tozları kullanılan numunelerde yüksek bir aşınma direnci ve kararlı bir sürtünme katsayısı elde edilemediğinden dolayı bu numunelere düşük miktarda metal takviyesi yapılması uygun görülmüştür. Üretilen N30, N31 ve N32 kodlu numunelere sırasıyla %5, %10 ve %15 oranında bakır tozu ilavesi yapılan ve buna karşın kemik tozu oranı düşürülerek barit tozu da katılmadı. Bu numunelerde elde edilen sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık değişimleri Şekil 8.46 ve Şekil 8.47’de verildi. Grafiklere bakıldığında 150. Saniyeye kadar (175°C sıcaklıkta) sürtünme katsayısında N31 ve N32 kodlu numunelerin sürtünme katsayısında bir artış N30 kodlu numunede ise bir azalma meydana gelmektedir. Bu noktadan sonra bütün numunelerde aynı oranda artma ve azalmalar meydana gelmektedir. Artan bakır tozu miktarı ile sürtünme katsayısında bir artış ve kararlılık olduğu saptandı. Fakat kemik tozu oranının düşmesiyle birlikte N31 kodlu numunede 275°C civarında ciddi kopmalar meydana gelmekte ve aşırı

titreşim ve gürültüden dolayı deney tamamlanamamaktadır. Bu durum malzeme içerisindeki taneciklerin homojen dağılmadığı ya da bir uyumsuzluk olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. 300°C sıcaklık değerinden sonra sürtünme katsayısında ortak bir düşüş görülmektedir. En yüksek ve kararlı sürtünme katsayısı %15 bakır tozu içeren N32 kodlu numunede elde edildi.

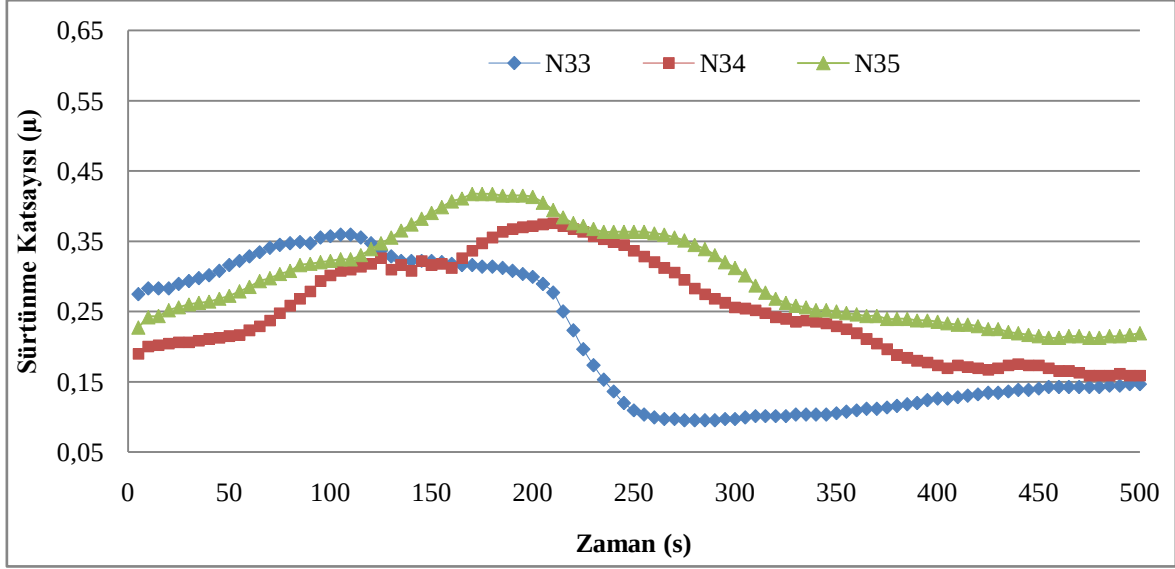


Şekil 8.46 Bakır ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi



Şekil 8.47 Bakır ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi

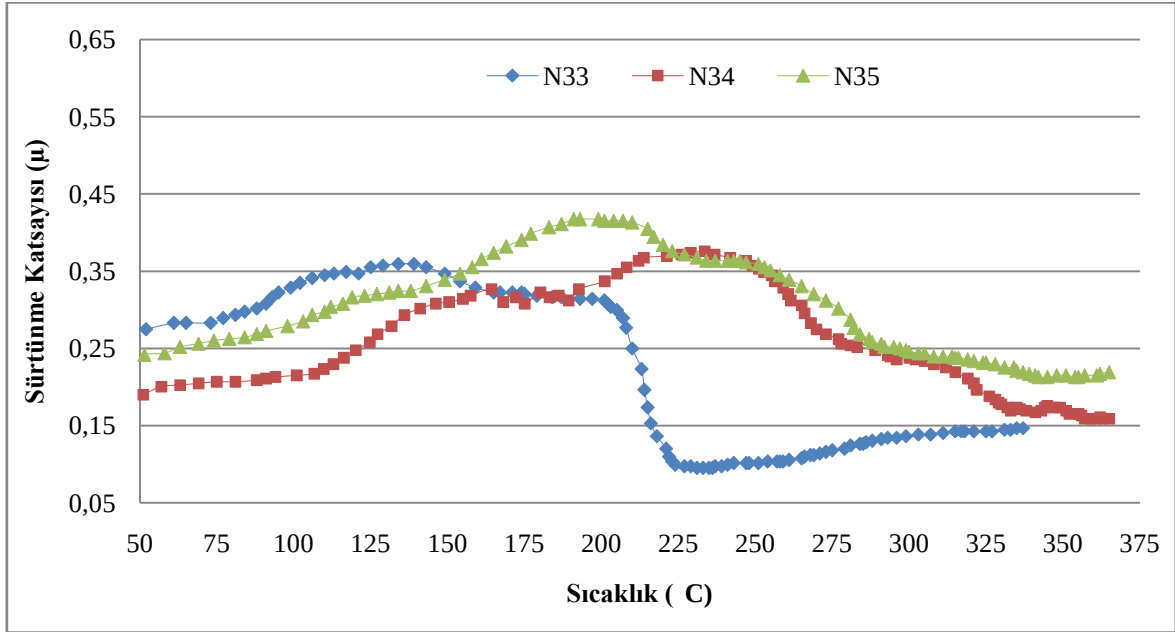
Bu kısımda takviye elemanı olarak bakır tozları yerine çelik yünü ile kemik tozu kullanıldı. Bir önceki kısımda midye tozlarının %30 oranında kullanılmasının da olumsuzluk oluşturabileceği göz önüne alınarak bu oran %15'e düşürülmüş ve ek olarak Al_2O_3 tozları %5 oranında numuneye katıldı. Bu şekilde üretilen organik esaslı balata numunelerinin sürtünme katsayısı zaman ve sürtünme katsayısı sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 8.48 ve Şekil 8.49'da verildi.



Şekil 8.48 Çelik yünü ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı zaman değişimi

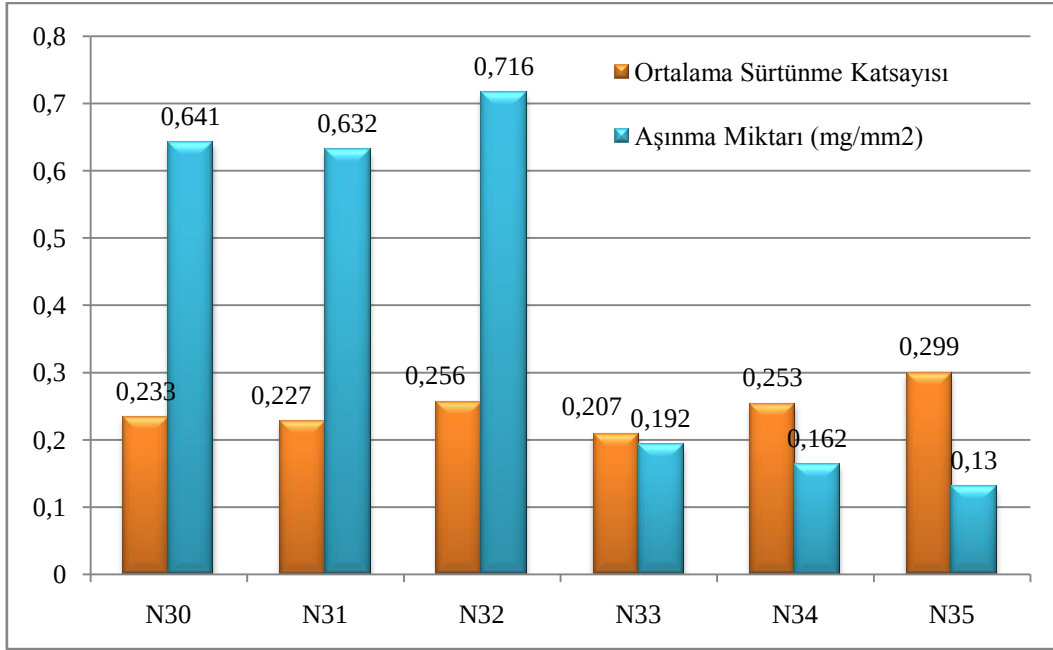
Grafikler incelendiğinde bütün numunelerde deneyin 125. Saniyesine kadar sürtünme katsayısında paralel bir artışın meydana geldiği görüldü. Bu noktadan sonra N34 ve N35 kodlu numunede 200°C sıcaklığa kadar bir artış N33 kodlu numunede ise bir miktar azalış meydana gelerek sürtünme filminin oluşumunun tamamlandığı görüldü. Sürtünme filmi oluşumundan sonra sıcaklığın artmasıyla bütün numunelerin sürtünme katsayısında sürekli olarak bir azalma görülmektedir. Balata numunesi içerisindeki çelik yünü miktarının artması sürtünme katsayısında bir artış ve kararlılık meydana getirmektedir. Bu numunelerde seramik tozu ilavesi ve kemik tozu oranının azaltılması olumlu bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun başlıca nedenlerinden bir tanesi çelik yününün aşınma direncini artırıp sürtünme katsayısını ise yüzeyden kopan malzeme miktarını azaltarak daha kararlı bir hale getirmesinden kaynaklandığı sonucuna varıldı. Dolayısıyla %15 çelik yünü içeren N35 kodlu numunede en iyi stabil ve yüksek bir sürtünme katsayısı elde edildi. N33 kodlu numunede ise taneciklerin yüzeyde homojen

dağılmadığından ve çelik yünü miktarının az olmasından kaynaklı olarak 200°C sıcaklıktan sonra ani düşüşler meydana gelmektedir.



Şekil 8.49 Çelik yünü ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin sürtünme katsayısı sıcaklık değişimi

Üretilen bakır tozu, çelik yünü ve kemik tozu takviyeli organik esaslı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarları Şekil 8.50'de verildi. Grafikteki değerlere bakıldığında en yüksek sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla N35 kodlu %15 çelik yünü içeren ve N32 kodlu %15 bakır tozu içeren numunelerde ortaya çıktığı görülmektedir. Üretilen bu numuneler TS 555 balata standartlarındaki minimum sürtünme katsayısı şartını sağlarken, çelik yünü ve Al_2O_3 tozu içermeyen N30, N31 ve N32 kodlu TS 9075 standartlarındaki minimum aşınma direncini sağlayamamaktadır. Bu durumun temel sebebi bu numunelerde çelik yünü ve Al_2O_3 tozu kullanılmamasından kaynaklıdır. Dolayısıyla bu tozların kullanıldığı N33, N34 ve N35 kodlu numunelerin aşınma dirençleri diğerlerine kıyasla oldukça iyi elde edildi. Ayrıca artan çelik yünü oranı balata numunelerinin aşınma direncini ve ortalama sürtünme katsayısını artırmıştır [91]. N30 kodlu numuneden itibaren N35 kodlu numuneye kadar olan organik esaslı balataların yoğunluk, Brinell Sertlik ve kütlece korozyon kaybı değerleri Tablo 8.6'da verildi. Grafiklere bakarak numunelere metal tozu ilavesi yoğunluk değerlerinde artış meydana getirmektedir. Bunun yanında metal tozu miktarının artması ile bütün numunelerin sertlik değerlerinde artış meydana gelmektedir.



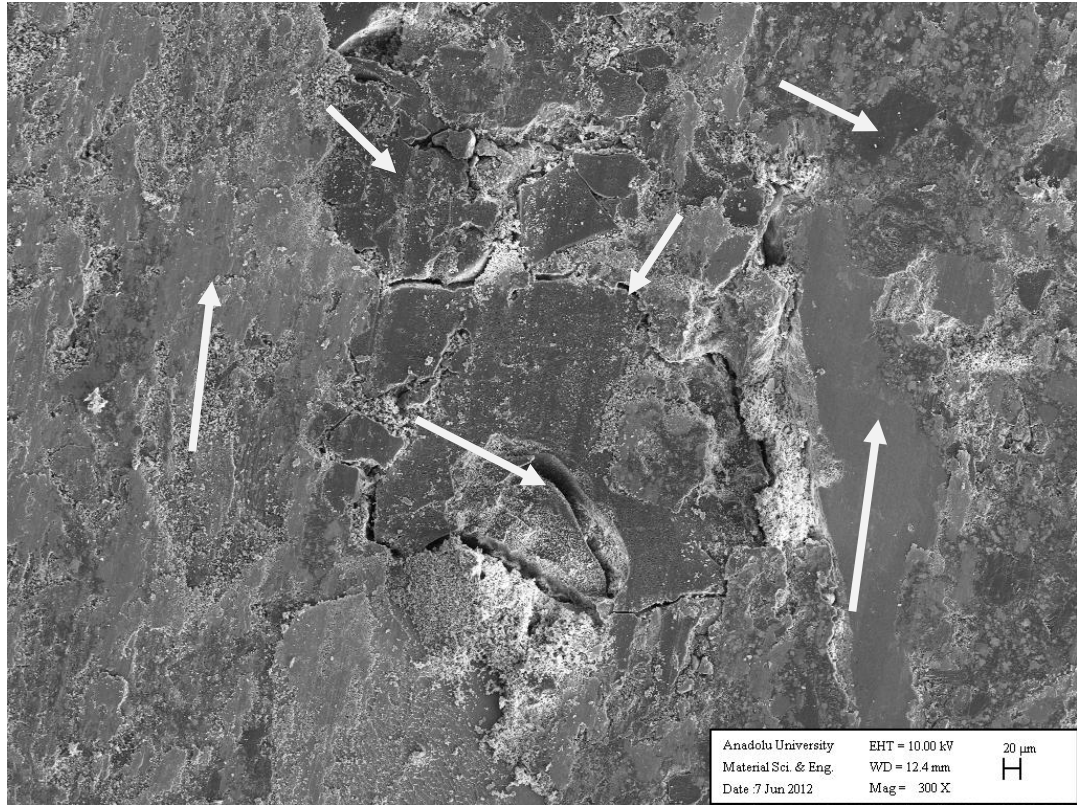
Şekil 8.50 Midye, bakır, çelik yünü ve kemik tozu içeren organik esaslı numunelerin ortalama sürtünme katsayısı ve özgül aşınma miktarı

En yüksek sertlik değerine sahip numune %15 çelik yünü içeren N35 kodlu balata olarak elde edildi. Korozyon kaybı değerleri ise TS 9075’te belirtilen minimum aşınma direncinin üzerinde çıktığı görüldü. N30, N31 ve N32 kodlu numunelerde bakır tozunun artışı ile birlikte korozyon direncinde bir artış meydana gelirken N33, N34 ve N35 kodlu numunelerde kemik tozu oranının azalması daha baskın bir etki göstererek kütleli korozyon kaybını artırmaktadır.

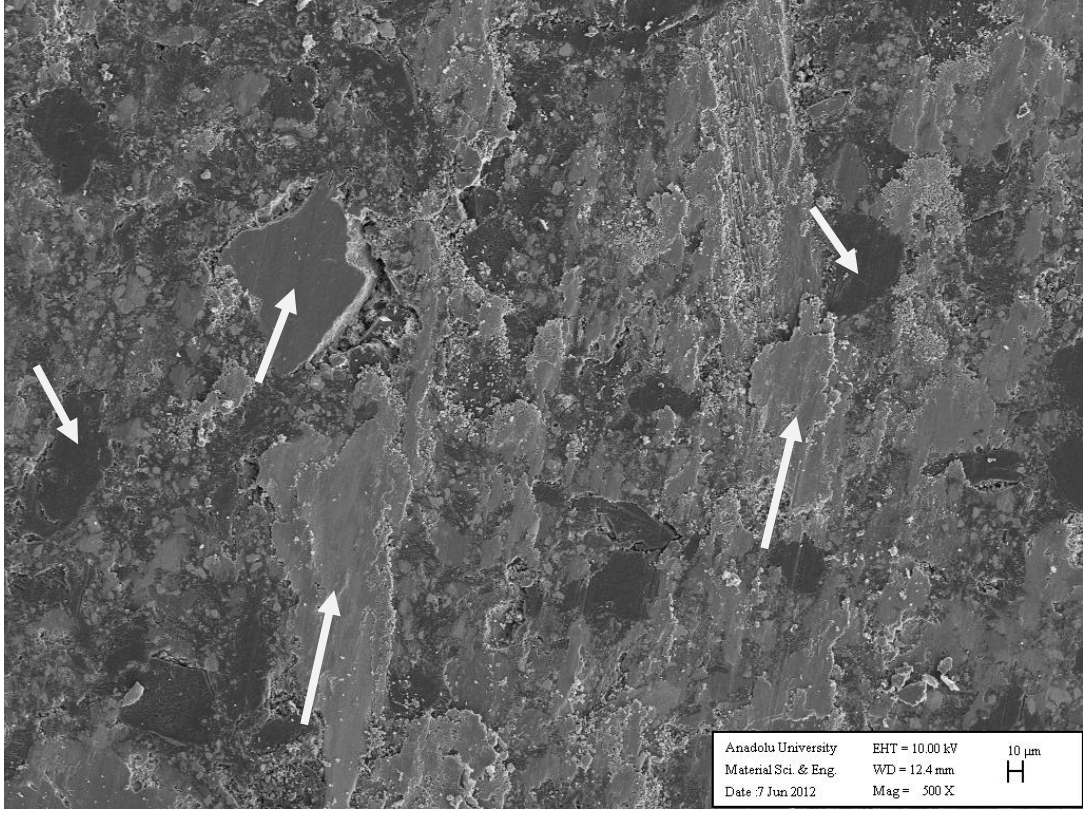
Tablo 8.6 Midye, bakır, çelik yünü ve kemik tozu katkılı organik esaslı numunelerin yoğunluk, sertlik ve korozyon kaybı değerleri

Numune Kodu	Yoğunluk (kg/m ³)	Brinell Sertlik (HB)	Korozyon Kaybı (%)
N30	1481	17,4	2,64
N31	1560	18,1	2,43
N32	1652	17,8	2,47
N33	1354	17,5	2,79
N34	1403	18,9	2,86
N35	1513	20,1	3,04

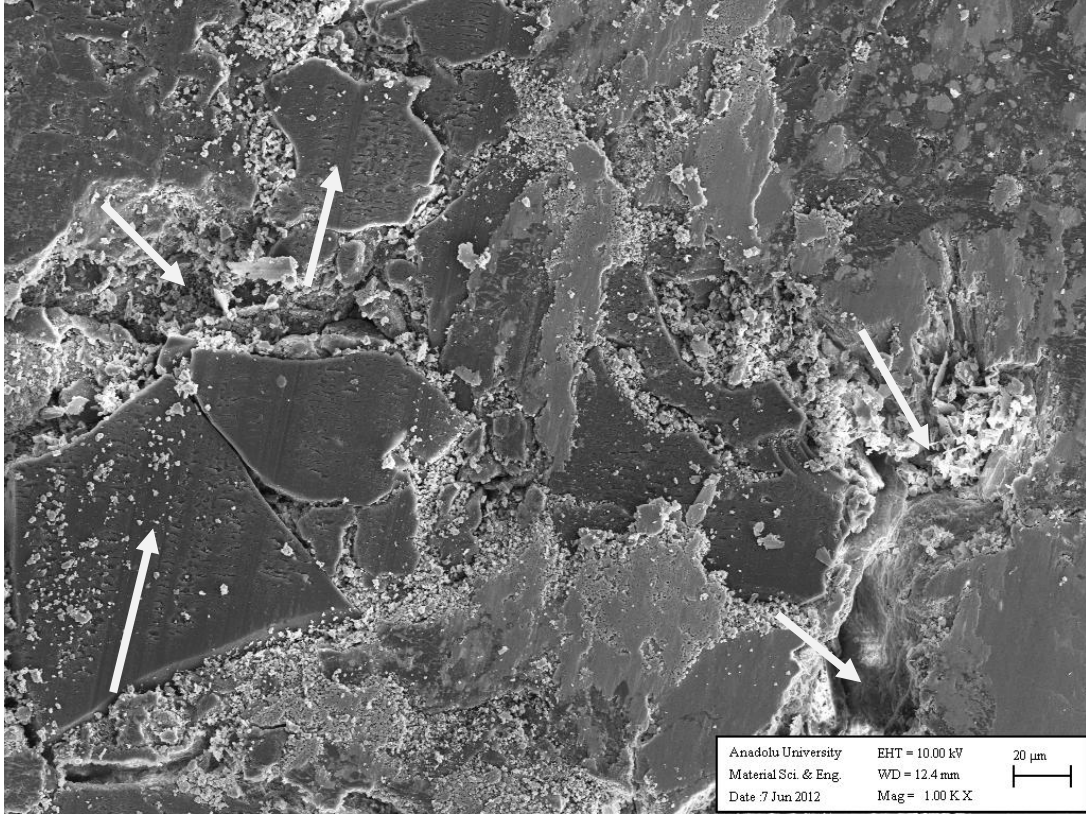
Üretilen organik esaslı balata numunelerinden %5 bakır içeren N30 kodlu numune, %5 çelik yünü içeren N33 kodlu numune ve %15 çelik yünü içeren N35 kodlu numunede meydana gelen mikro yapı görüntüleri sırasıyla Şekil 8.51, Şekil 8.52 ve Şekil 8.53'te verildi. Aşınan yüzeylere bakıldığında N30 kodlu numunede bakır tozlarının ve karbon parçacıklarının sürtünmeye aktif olarak katıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra taneciklerin sınır bölgelerinde ayrılmalar ve tabaka kopmalarının meydana geldiği gözlemlendi. Bu durum yüzey üzerinde homojen bir ısı dağılımının olmadığını göstergesidir. Kütlece %5 çelik yünü içeren N33 kodlu numunede ise yüzeylere sıvı organik tozlar çelik yünü işlevini bozmuş ve sürtünme katsayısının düşüşüne sebep olmuştur. Karbon parçacıklarının yüzeyde aktif olarak aşınmaya katılmasından dolayı sürtünme katsayısında 220°C'den sonra bir kararlılık olmaktadır. Aşınma mekanizması ise yüzeylerden kopan malzemeler ve çatlaklar nedeniyle ile abrasive ve yorulma aşınması olarak belirlendi. Kütlece %15 çelik yünü içeren numunede ise yüzeylerde parlak renkte görülen çelik yünü parçacıkları sürtünmede aktif rol oynamaktadır. Bununla beraber karbon parçacıklarının etrafında mikro düzeyde yorulma çatlakları ve diğer tozların toplanmaları gözlemlendi.



Şekil 8.51 %5 Bakır ve %20 kemik tozu içeren N30 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.52 %5 Çelik yünü ve %20 kemik tozu içeren N33 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi



Şekil 8.53 %15 Çelik yünü ve %10 kemik tozu içeren N35 kodlu numunenin sürtünme yüzeyi SEM resmi

9. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada hayvansal esaslı midye, boynuz, tırnak ve kemik tozlarının fren balatalarında kullanılabilirliği ve frenleme performansı incelendi. Elde edilen sürtünme, aşınma ve mikro yapı testleri ve analizleri sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda sıralandı.

1) Yarı organik kompozit fren balatalarında dolgu malzemesi olarak barit yerine midye tozu kullanılmış ve en yüksek sürtünme katsayısı N3 kodlu %10 midye tozu içeren numunede 0,39 olarak elde edildi. Diğer sürtünme katsayısı sonuçları ise TS 555 standartlarına uygun olduğu tespit edildi. Midye tozu katkılı numunelerde en yüksek korozyon direnci %1,23 kütleli değişim ile N5 kodlu % 30 midye tozu içeren numunede elde edildi. Bu durum midye tozlarının korozyon direncini artırdığı ve TS 9075'te belirtilen korozyon standart değerlerinde kaldığıdır. Bunun yanında midye tozu oranının artması ile sertlik değerinde düşüş meydana geldiği, fakat bu düşüş en fazla %2 civarında kaldığı gözlemlendi. Dolayısıyla büyük ölçüde bir düşüş meydana getirmediğinden dolayı midye tozunun fren balatalarında rahatlıkla kullanılabileceği ortaya koyuldu.

2) Üretilen yarı organik fren balatalarında takviye elemanı olarak çelik yününe alternatif olarak organik esaslı olan kemik tozunun kullanılmasıdır. Elde edilen sonuçlarda en yüksek sürtünme katsayısı kütlece %2,5 kemik tozu içeren numunede 0,365 olarak elde edildi. Bununla beraber kemik tozu oranının artması sürtünme katsayısını olumsuz yönde etkilediği gözlemlendi. Fakat kemik tozu ilavesi sürtünme katsayısında önemli ölçüde kararlılık meydana getirdiği tespit edildi. Kemik tozu oranının artması ile korozyon direnci de artarak en yüksek değer %1,34 olarak %10 kemik tozu içeren numunede elde edildi. Bununla birlikte diğer sürtünme katsayısı ve aşınma direnci değerleri TS 555 ve TS9075 standartlarına uygun olduğu ve belirlenen değerler arasında kaldığı tespit edildi. Dolayısıyla sertlik değerlerinin de 24,7 ile 27,5 arasında seyretmesi bu malzemenin düşük oranlarda fren balatalarında sürtünme katsayısını kararlı hale getirmek için rahatlıkla kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

3) Sürtünme katsayısını artırmak ve daha kararlı bir hale getirmek için sürtünme tozunun yanı sıra boynuz tozları da kullanıldı. Elde edilen deneysel sonuçlara göre boynuz tozu sürtünme katsayısında önemli ölçüde bir kararlılık meydana getirdiği gözlemlendi. Artan boynuz tozu oranı ile sürtünme katsayısının da arttığı gözlemlenmiş olup en yüksek sürtünme katsayısı N12 kodlu %12 içerikli numunede 0,346 olarak tespit edildi. Diğer sürtünme katsayısı değerleri de TS 555 standartları uygun olduğu gözlemlendi. Fakat artan boynuz tozu oranı ile aşınma ve sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür. Sonuç olarak aşınma ve mekanik özellik bakımından boynuz tozlarının balata içinde düşük oranlarda kullanılmasının daha iyi sonuçların vereceği kararına varıldı.

4) Tırnak tozu içeren numunelerde ise stabil bir sürtünme katsayısı elde edilmiş olup artan tırnak tozu miktarının sürtünme katsayısı olumsuz yönde etkilediği gözlemlendi. Elde edilen en yüksek sürtünme katsayısı değeri 0,34 en düşük değer ise 0,302 olmasına rağmen aşınma miktarındaki yüksek artıştan dolayı tırnak tozlarının fren balatalarında kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varıldı. Fakat düşük oranlarda yarı metalik balatanın yapısını çok fazla bozmadığı tespit edildi. Bunun yanında artan tırnak tozu miktarı korozyon ve sertlik değerlerini de olumsuz yönde etkilediği gözlemlendi.

5) Yarı metalik fren balataları içerisinde ayrı ayrı özellikleri incelenen organik tozların kendi içerisindeki karışımlarından tamamen organik esaslı fren balataları da üretildi. Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri N18, N19 ve N20 kodlu numunelerde düşük aşınma direnci ve sürtünme katsayısı sergileyerek TS 555 ve TS 9075 balata standartlarının altında kaldığı görüldü. Dolayısıyla bu malzemelerin organik balata üretiminde yeterli düzeyde fren performansını karşılayamadığı tespit edildi.

6) Aynı şekilde tırnak tozu kaldırılarak onun yerine sadece boynuz tozu kullanılan N21, N22 ve N23 kodlu numunelerde de istenilen sürtünme katsayısı ve aşınma direnci elde edilemediğidir. Tırnak tozunun kaldırılmasıyla yanma olayı kısmen düşmüş ve sürtünme katsayısını bir miktar artırmaya rağmen istenen kararlılıkta olmadığı tespit edildi.

7) Organik esaslı numunelere barit tozları katılarak elde edilen N24, N25 ve N26 kodlu numunelerde ise yanmanın yüksek oranda önlemlendiği ve kararlı bir sürtünme katsayısı elde edilmesine rağmen bütün sürtünme katsayısı değerleri 0,25'in altında kalarak istenilen düzeyi sağlamadığı gözlemlendi. Yüzeydeki ısının homojen dağılmamasından dolayı ise erken

kopma ve yüksek aşınmanın meydana gelmesidir. Dolayısıyla tamamen organik esaslı olarak üretilen balata numunelerinin kullanılmasının mümkün olmadığı tespit edildi.

8) Tamamen organik olan N27, N28 ve N29 kodlu numunelerde ise boynuz ve tırnak tozları kullanılmayıp onların yerine sürtünme tozu, grafit ve alüminyum oksit kullanıldı. Bu numunelerde ise ortalama sürtünme katsayısı 0,25 değerinin altında gözlemlendi. Aşınma miktarı ise yüksek olduğundan TS 555 ve TS 9075 standartlarına uygun olmadığı görüldü.

9) Tamamen organik esaslı toz içeren balatalar istenen özellikleri sağlamadığından bu balatalara bakır tozu takviyesi yapıldı. Sırasıyla %5, %10 ve %15 bakır tozu içeren organik esaslı N30, N31 ve N32 kodlu numunelerde ise stabil bir sürtünme katsayısı elde edilmesine rağmen, sürtünme katsayısı değerlerinin standartların altında kaldığı görüldü. Bununla birlikte, aşınma miktarlarının oldukça yüksek çıktığı gözlemlendi. Bu tip fren numunelerde kullanılmaya elverişli olmadığı görüldü.

10) Bakır tozu yerine çelik yünü katılan organik esaslı balata numunelerinde ise, N34 ve N35 kodlu numunelerde 0,25'in üzerinde sürtünme katsayısı elde edilerek TS 555'te verilen minimum sürtünme katsayısı şartını sağladığı gözlemlendi. Yine elde edilen aşınma miktarları da TS 9075'te verilen şartları sağlamaktadır. Dolayısıyla organik esaslı tozların çelik yünü ile birlikte kullanılması istenen verdiği anlaşıldı (Şekil 8.50). Ayrıca bu numunelerin sertlik ve korozyon direnci de belirtilen balata standartları içerisinde kaldığı ve rahatlıkla fren balatası olarak kullanılabilirliğinin ortaya çıkmasıdır.

10. KAYNAKLAR

- [1] D. Aleksendric, C. Duboka, (2006) Prediction of automotive friction material characteristics using artificial neural networks-cold performance, *Wear* 261 269–282.
- [2] J. Bijwe, Nidhi, N. Majumdar, B.K. Satapathy, (2005) Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials, *Wear* 259 1068–1078.
- [3] Chen Zhenhua, Teng Jie, Chen Gang, Fu Dingfa, Yan Hongge, (2007) Effect of the silicon content and thermomechanical treatment on the dry sliding wear behavior of spray-deposited Al–Si/SiCp composites, *Wear* 262 362–368.
- [4] Ji-Hoon Choi, In Lee, (2004) Finite element analysis of transient thermoelastic behaviors in disk brakes, *Wear* 257 47–58.
- [5] N.S.M. EL-Tayeb, K.W. Liew, (2009) On the dry and wet sliding performance of potentially new frictional brake pad materials for automotive industry, *Wear* 266 275–287.
- [6] Mikael Eriksson, John Lord and Staffan Jacobson, (2001) Wear and contact conditions of brake pads: dynamical in situ studies of pad on glass, *Wear* 249 272–278.
- [7] Rukiye Ertan, Nurettin Yavuz, (2010) An experimental study on the effects of manufacturing parameters on the tribological properties of brake lining materials, *Wear* 268 1524–1532.
- [8] Shangwu Fan, Litong Zhang, Yongdong Xu, Laifei Cheng, Jianjun Lou, Junzhan Zhang, Lin Yu, (2007) Microstructure and properties of 3D needle-punched carbon/silicon carbide brake materials, *Composites Science and Technology* 67 2390–2398.
- [9] Shangwu Fan, Litong Zhang, Yongdong Xu, Laifei Cheng, Guanglai Tian, Shaochang Ke, Fang Xu, Haiping Liu, (2008) Microstructure and tribological properties of advanced carbon/silicon carbide aircraft brake materials, *Composites Science and Technology* 68 3002–3009.
- [10] Shangwu Fan, Litong Zhang, Laifei Cheng, Guanglai Tian, Shangjie Yang, (2010) Effect of braking pressure and braking speed on the tribological properties of C/SiC aircraft brake materials, *Composites Science and Technology* 70 959–965.
- [11] Klaus Friedrich, Zhong Zhang, Alois K. Schlarb, (2005) Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites, *Composites Science and Technology* 65 2329–2343.

- [12] D. Gultekin, M.Uysal, S.Aslan, M.Alaf, M.O.Guler, H.Akbulut, (2010) The effects of applied load on the coefficient of friction in Cu-MMC brake pad/Al-SiCp MMC brake disc system, *Wear*, article in press.
- [13] P.V. Gurunath, J. Bijwe, (2007) Friction and wear studies on brake-pad materials based on newly developed resin, *Wear* 263 1212–1219.
- [14] Abdulhaqq A. Hamida, P.K. Ghosh, S.C. Jain, Subrata Ray, (2008) The influence of porosity and particles content on dry sliding wear of cast in situ Al(Ti)–Al₂O₃(TiO₂) composite, *Wear* 265 14–26.
- [15] K.W. Hee, P. Filip, (2005) Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings, *Wear* 259 1088–1096.
- [16] S.C. Ho, J.H. Chern Lin, C.P. Ju, (2005) Effect of fiber addition on mechanical and tribological properties of a copper/phenolic-based friction material, *Wear* 258 861–869.
- [17] U.S. Hong, S.L. Jung, K.H. Cho, M.H. Cho, S.J. Kim, H. Jang, (2009) Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices, *Wear* 266 739–744.
- [18] H.J. Hwang, S.L. Jung, K.H. Cho, Y.J. Kim, H. Jang, (2010) Tribological performance of brake friction materials containing carbon nanotubes, *Wear* 268 519–525.
- [19] Ho Jang, Seong Jin Kim, (2000) The effects of antimony trisulfide (Sb₂S₃) and zirconium silicate (ZrSiO₄) in the automotive brake friction material on friction characteristics, *Wear* 239 229–236.
- [20] H. Jang, K. Ko, S.J. Kim, R.H. Basch, J.W. Fash, (2004) The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials, *Wear* 256 406–414.
- [21] S.J. Kim, M.H. Cho, D.-S. Lim, H. Jang, (2001) Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material, *Wear* 251 1484–1491.
- [22] D.K. Kolluri, X. Boidin, Y. Desplanques, G. Degallaix, A.K. Ghosh, M. Kumar, J. Bijwe, (2010) Effect of Natural Graphite Particle size in friction materials on thermal localisation phenomenon during stop-braking, *Wear* 268 1472–1482.
- [23] Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu, William H. Peter, Craig A. Blue, (2007) Tribological investigation of titanium-based materials for brakes, *Wear* 263 1202–1211.
- [24] Mukesh Kumar, Jayashree Bijwe, (2010) NAO friction materials with various metal powders: Tribological evaluation on full-scale inertia dynamometer, *Wear* 269 826–837.
- [25] Do-Wan Lim, Tae-Hwan Kim, Jin-Ho Choi, Jin-Hwe Kweon, Hong-Sik Park, (2008) A study of the strength of carbon–carbon brake disks for automotive applications, *Composite Structures* 86 101–106.
- [26] Yafei Lu, (2006) A combinatorial approach for automotive friction materials: Effects of ingredients on friction performance, *Composites Science and Technology* 66 591–598.

- [27] W. Österle, I. Urban, (2004) Friction layers and friction films on PMC brake pads, Wear 257 215–226.
- [28] İlker SUGÖZÜ ve İbrahim MUTLU, (2009) Fren Balatası Üretiminde Toz Karıştırma Süresinin Frenleme Karakteristiğine Etkisinin Araştırılması, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
- [29] ARANA, Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler
- [30] Cam Elyaf Sanayi A.Ş Bültenleri Sayılar:1,2,3,4,5,6,7.
- [31] Cam Elyaf Sanayi A.Ş Yayınları Atölye Bilgileri Sayılar:1,2,3,4,5,6,7.
- [32] DAVIES G.J., KELLY A., The Principles of the Fibre Reinforcement.
- [33] Dr. Müh. AKSOY S., Dr. Müh. SAYMAN O.,Kompozit Malzemeler.
- [34] Gemalmayan, N., (1986), Asbestsiz Sürtünme Malzemelerinin (Balataların) Yapımı ve Uygulanması, 2. Ulusal Makine Tasarımı ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara.
- [35] Anderson, A.E., (1992) Friction and Wear of Automotive Brakes, Friction, Lubrication and Wear Technology ASM Handbook, Vol.18, 1st Ed.,USA,
- [36] Uygur, M. E., (1996), Balata üretim teknolojisi, I.Ulusal Toz metalurjisi kongresi, Bildiriler kitapçığı, Gazi Üniversitesi, sf. 17 , Ankara.
- [37] Demirsoy, M., (1973), Balatalar, Mühendis ve Makine, cilt.17, sayı.189, 157-170, Ankara.
- [38] Othmer, K., (1966), Phenolic Resin, Encyclopaedia of Chemical Technology, Vol. 15, 2nd Ed., John Wiley And Sons Inc., New York.
- [39] Othmer, K., (1966), Friction Materials, Encyclopedia of Chemical Technology, Vol.10, 2nd Ed., John Wiley and Sons Inc., New York.
- [40] Kurt, A., (1992), Toz metal bronz yatak malzemelerin özellikleri, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-55.
- [41] Fedorchesco, I. M., Kiryachek, V. M., 1970, New sintered friction materials, Friction and Antifricition Materials, 4:139-142.
- [42] Klar, E., (1983), Powder metallurgy, Metals Handbook 9th edition, by the American society for metals, Chapter 25, pp. 1-14, USA.
- [43] Gemalmayan, N., (1984), Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- [44] Ersümer, A., (1970), Toz metalürjisi sert metal sinterleme, İstanbul Üniversitesi matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.

- [45] Topbaş, M. A., 1993, Endüstri malzemeleri, Yıldız Üniversitesi Matbaası, Cilt. 2, 264 sf, İstanbul.
- [46] Dönmez, A. G., 2000, Asbest dışı elyaflarla üretilen balata malzemelerinin özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [47] Baker, R., 1992, Changes Caused By Legislation Against Asbestos, Powder Metallurgy, 35, 4, 255-256.
- [48] Pektaş, İ., 1995, 21. Yüzyıl Malzemeleri, Karbon-karbon Kompozit Malzemeler, Teknik Gelişim, Sayı 11-12-13.
- [49] Gibson, D. W. and Taccini, G. J., 1988, Carbon/Carbon Friction Materials for Dry and Wet Brake and Clutch Applications, Hitco, 890950 Gardena, CA.
- [50] Washabaugh, F. J., 1987, EMCOR 66 Ultra-Short Fibers for Asbestos-Free Friction Materials, SAE 860630.
- [51] Toplum ve Çevre Sağlığı Açısından Soru Cevaplarla Asbest, 1991, Türk Sağlık Ajansı Yayınları 1, Ankara.
- [52]İRkeç, T., 1990, Asbest, MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, Eğitim serisi no 31, Ankara.
- [53] Erdil, E., Sarıkaya, Y., 1984, Temel Üniversite Kimyası, Hacettepe Kitap LTD., Ankara.
- [54] Katalog, abex, 1983, Friction Products Division, Michigan USA.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] Katalog, 1993, Basarit Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri, Deutsche Basaltsteinwolle GmbH, Rodetal 40 D-3406 Bovenden, I, Germany.
- [58] Crosa, G., Baumvol, I. J. R., Friedrich, K., 1993, Advances In Composite Tribology, Composite Materials Series, Vol.8, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- [59] DPT, 1975, 6. Beş Yıllık Kalkınma Planı, ÖİK Raporu. Mica: Mineral Research Consultative Comitte, London, 22 p 2 Turner, D.C..

- [60] Othmer, K., 1967, Encyclopaedia of Chemical Technology, Vol.13, 2nd Ed, John Wiley And Sons Inc., NewYork.
- [61] Ayar. H. H., Disk Fren Balatalarında Bileşimin Performansa Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1991.
- [62] Tanaka, K., Ueda, S., Noguchi, N., 1973, Fundamental Studies on The Brake Friction of Resin-Based Friction Materials, Wear, Vol.23, pp. 349–365.
- [63] 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.
- [64] Dong, F., Blum, F. D., Drahani, L.R., 1996, Polimer-Polimer Composites, 4, pp. 155-159.
- [65] ANLAŞ,İ., Şasi Temel Ders Kitabı, M.E.B. Yayınları,İstanbul, 1988.
- [66] FİLİKÇİOĞLU. C., (1998) Taşıt Frenlerinde Balata Çeşidinin ve Çalışma Şartlarının Frenleme Performansına Etkisi,Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,.
- [67] GÖKTAN, A., G., GÜNEY, A., EREKE, M., Taşıt Frenleri, İstanbul, 1995.
- [68] ALTIPARMAK, D., Şasi Donanımları-Fren Sistemleri, Ders Notları, Ankara, 1998.
- [69] GEMALMAYAN, N., Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Müh. Mimar. Fak., Ankara, 1984.
- [70] GEDİKTAŞ, M., (1968) Sürtünme Malzemelerinin Deneysel Tayini, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
- [71] YU.A. GELLER., A.G. RAKHSHTADT, Science of Materials, Sayfa:487-488, 1977.
- [72] BOZ, M., (1999) Toz Metalurjisi İle Üretilmiş Bronz Esaslı Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,.
- [73] Bowden, F.P., Tabor, (1950), Frictional Lubrication of Solid. Part-I Oxford Un. Pres.
- [74] Akkurt, M., (1982), Makine Elemanları. II. Cilt.

- [75] Odabaş, D., (1991), Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Teorik ve Deneysel Araştırılması. E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [76] Raymond, A., H., (1968), The Intermetallic Compound. Engineering Metallurgy, 270-278
- [77] Pıhtılı H., (2012), Makine Elemanları Ders Notları, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [78] Zumgahr, K.H., (1987), Microstructure One and Wear of Materials. Tribology Series ,10, Elsevier Science Publisher.
- [79] Atamert, S., (1989) , Ph.D. Thesis, University of Cambridge
- [80] Buckley, D.H., (1968), Adhesion, Reibung und Verschleiss Von Cobalt und Cobaltlegierungen. Cobalt, 20-38
- [81] Uetz, A., Föhl, J., (1979), Tribologie- Stand der Erkenntnisse Undutzen. VDI-Berichte, 333, 1-5.
- [82] Soemantri, S., McGee, A.C., and Finnie, I., (1985), Some Aspect of Abrasive Wear at Elevated Temperatures. Wear, 104, 77-91.
- [83] Miyoshi, K., Buckley, D.H., (1979), Friction and Wear Behaviour of Simple-Crystal Silicon Carbide in Sliding Contact with Various Metals. Trans. ASLE, 22, 3, 245-256.
- [84] Ashok, K.V., (1978), Comparative Tendencies for Metal Loss by Abrasive Wear, Impact Erosion and Arc Erosion. Wear, 49, 305-314.
- [85] Robinowicz, E., Dunn, L.A., ve Russell, P.G., (1961), A Study of Abrasive Wear Under Three Body Condition. Wear, 245-225 Hard Facing Alloys. Welding Institute Report, 7856.02, 86, 4793.
- [86] Desai, V.M., (1984), Effect of Carbide Size on the Abrasion of Cobalt Base Powder Metallurgy Alloys. Wear, 94, 347-376.
- [87] Noble, D.N., (1986), The Effect of Flux Coat Arc Welding Conditions on Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Two Iron-Based Hard Facing Alloys. Welding Institute Report, 7856.02, 86, 4793.
- [88] Rakayby, A.M., Mills, B., (1986), The Role of Primary Carbides in the Wear of High Speed Steels. Wear, 112, 327-340.
- [89] Atik, E., (1987), Poliüretan Esaslı Elemanların Belirlenmiş Şartlar İçin İmal Edilen Bir Düzenekte Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, U.Ü. Fen Bilimleri Enst.
- [90] Keleştemur, M.H., (1989), Makine Yapı Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Direncine Yüzey Sertliğinin Etkisi ve Diğer Mekanik Özelliklerle İlişkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enst.

- [91] Ertan R., Yavuz N., Polimer Matrisli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon Ve Üretim Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi, Mühendis ve Makine, Cilt : 47 Sayı: 553.
- [92] Blau, P.J (2001), Compositions, Functions and Testing of Friction Mater. and Their Additives, U.S Department of Energy, Office of Transportation Technologies, USA,38.
- [93] Uygur, M.E., (1996), Balata Üretim Teknolojisi, I. Ulusal Toz Metalürjisi Kongresi, Bildiriler kitapçığı, Gazi Üniversitesi, Ankara, s.6-17.
- [94] Boz M., (2003), Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme Aşınma Özel. Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, s. 3-47.
- [95] Yavuz N., (2002), Toz Metalürjisi Ders Notları, Uludağ Üniversitesi Müh-Mim. Fakültesi Makine Müh. Bölümü, Bursa.
- [96] Mutlu, İ., Çevik, İ., Öner, C., (2002), Borik Asit Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Özelliklerinin Deneyisel incelenmesi, 3rd International Powder Metallurgy Conference September 4-8, Turkish Powder Metallurgy Association, pp.1307-1314, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [97] Pektaş, İ., (1995), 21. Yüzyıl Malzemeleri, Karbon-karbon Kompozit Malzemeler, Teknik Gelişim, Sayı 11-12-13.
- [98] TS 12464, (1998), Demiryolu Taşıtları-Fren pabucu-Kompozit Malzemeli-Asbest ihtiva etmeyen, T.S.E., 1. Baskı, Ankara, Nisan.
- [99] TS 139, (1992), Metalik Malzemelerin Brinell Sertlik Deneyi, T.S.E., 1. Baskı, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Samsun’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Samsun’da tamamladı. 2004 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. 2009 yılında mezun oldu. Eylül 2009’da İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim dalında yüksek lisansa başladı ve daha sonra Ocak 2010’da Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında Yüksek Lisans çalışmasına başladı ve halen devam etmektedir. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim dalına araştırma görevlisi olarak atandı ve 2012 yılında görevinden ayrılarak Anadolu Üniversitesinde aynı pozisyonda görevine devam etmektedir.

İbrahim KOCABAŞ