

**FREN BALATALARINDA UZUN BOYUTLU
KARBON ELYAF KULLANIMININ
ARAşTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah MALAK

DANIşMAN

Doç. Dr. İbrahim MUTLU

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN, 2014

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FREN BALATALARINDA UZUN BOYUTLU
KARBON ELYAF KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI

Abdullah MALAK

DANIŞMAN
Doç. Dr. İbrahim MUTLU

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2014

TEZ ONAY SAYFASI

Abdullah MALAK tarafından hazırlanan “Fren Balatalarında Uzun Boyutlu Karbon Elyaf Kullanımının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 24/06/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. İbrahim MUTLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. İbrahim MUTLU İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../ 2014 tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

24 / 06 / 2014

İmza
Abdullah MALAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FREN BALATALARINDA UZUN BOYUTLU KARBON ELYAF KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Abdullah MALAK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim MUTLU

Bu çalışmada; takviye malzemesi olarak kullanılan karbon elyaf farklı boyutlarda ve farklı kütleli miktarlarda balata kompozisyonunda kullanılmış ve karbon elyaf katkı balatalar üretilmiştir. Üretilen balataların, disk fren test cihazında sürtünme testleri yapılmış ve elde edilen verilerle zamana bağlı sürtünme katsayısı-sıcaklık grafikleri oluşturularak sürtünme tarama belirleme testi (Friction Assessment and Screening Test-FAST) ile performansları değerlendirilmiştir. Üretilen numunelerin sürtünen yüzeylerinin mikro yapıları Scanning Electron Microscope (SEM) analiziyle incelenmiştir. Numunelerin sürtünme ve aşınma karakteristiklerini etkileyen faktörlerden yoğunluk, özgül aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri ölçülerek fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Testlerin sonuçlarına göre yüksek sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Üretilen balataların standartlara uygun olduğu ve karbon elyafın takviye malzemesi olarak balatada kullanılabileceği belirlenmiştir.

2014, xiv + 116 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Karbon elyaf, Fren balatası, Sürtünme, Aşınma.

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

INVESTIGATE OF LONG-DIMENSION-CARBON FIBER USAGE IN BRAKE LININGS

Abdullah MALAK

Afyon Kocatepe University

Institute for the Natural and Applied Sciences

Machine Education Department

Supervisor: Doç. Dr. İbrahim MUTLU

In this study, different size and mass amount of carbon fiber used as reinforcement material were added in brake lining compositions and brake linings mixed carbon fiber were produced. The friction tests of produced brake linings in disc brake test device were performed and their performance were determined with Friction Assessment and Screening Test-FAST by composing friction coefficient- temperature graphics with obtained data. Micro structures of frictional surface of manufacturing samples were investigated by Scanning Electron Microscope (SEM) analysis. Their physical and mechanical properties were determined by measuring the data of density, specific wear, surface roughness and hardness which are factors affect friction and wear characterizations. High friction coefficients were obtained according to the results of tests. It was determined that the brake linings were produced according to standards and carbon fiber could be used in brake lining as reinforcement material.

2014, xiv + 116 Pages

Key Words: Carbon fiber, Brake lining, Friction, Wear.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yapmış olduğu katkı ve yönlendirmeler ile büyük destek veren danışman hocam Sayın Doç. Dr. İbrahim MUTLU'ya ve AKÜ Teknoloji Fakültesi öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN'e, Yrd. Doç. Dr. İbrahim YAVUZ'a, Yrd. Doç. Dr. Muzaffer ERDOĞAN'a, Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ'e, AKÜ Veteriner Fakültesi öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Korhan ALTUNBAŞ'a, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Serdar YÜCESU'ya, Prof. Dr. Halil ARIK'a ve MEB' de yüksek teknik öğretmen Nail DUMANLAR'a ve bu çalışmanın yürütülmesinde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen AKÜ Teknoloji Fakültesi personel ve araştırma görevlilerine teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen çok kıymetli eşime ve çocuklarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah MALAK
AFYONKARAHİSAR, 2014

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Karayolu Taşıtlarındaki Fren Sistemleri	9
2.1.1 Kampanalı Fren Sistemleri	9
2.1.2 Diskli Fren Sistemleri	10
2.2 Kampana ve Disk Malzeme Özellikleri	12
2.3 Sürtünme Elemanları (Balatalar) ve Özellikleri	13
2.3.1 Balata Çeşitleri	16
2.3.1.1 Metalik Esaslı Fren Balataları	16
2.3.1.2 Karbon Esaslı Fren Balataları	16
2.3.1.3 Organik Polimer Esaslı Fren Balataları	17
2.4 Balata Oluşumunda Kullanılan Malzemeler ve Fonksiyonları	17
2.4.1 Takviye Malzemeleri (Elyaf)	18
2.4.1.1 Asbest Elyaf	18
2.4.1.2 Basarid ® Elyaf	19
2.4.1.3 Cam Elyaf (E-camı elyafı)	20
2.4.1.4 Taş Yünü Elyaf	20
2.4.1.5 Çelik Elyaf (Çelik Yünü)	21
2.4.1.6 Karbon Elyaf	21
2.4.1.7 Kevlar (Aramid)	22
2.4.1.8 Fiberfrax	22
2.4.1.9 Mika Grubu	23

	Sayfa
2.4.2 Bağlayıcı Malzemeler	23
2.4.3 Dolgu Malzemeleri	24
2.4.3.1 Barit	25
2.4.3.2 Cashew Dust	25
2.4.3.3 Kizelgur	26
2.4.3.4 Alçı	26
2.4.4 Sürtünme Ayarlayıcı Malzemeler	26
2.4.4.1 Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	26
2.4.4.2 Bronz Tozu	27
2.4.4.3 Grafit Tozu	27
2.4.5 Temizleyiciler	28
2.4.6 Renklendiriciler	28
2.4.7 Madeni Dolgu Malzemeleri	28
2.5 Fren Balatalarının Sürtünme Performansını Etkileyen Faktörler	28
2.5.1 Sürtünme Temas Yüzeyi	29
2.5.2 Feyd (Zayıflama) Dayanımı	30
2.5.3 Hıza ve Ortam Şartlarına Duyarlılık	32
2.5.4 Yaş Sürtünme	32
2.5.5 Nem Duyarlılığı	32
2.5.6 Oksit Etkisi	33
2.5.7 Etkinlik Değişimi	33
2.6 Sürtünme ve Aşınma	33
2.6.1 Sürtünmenin Önemi	33
2.6.1.1 Sürtünme Kuvveti ve Katsayısı (μ)	35
2.6.1.2 Balatalar İçin Sürtünme Katsayısı Standartları	38
2.6.1.3 Sürtünme ve Isı Oluşumu	39
2.6.2 Aşınmanın Önemi ve Türleri	40
2.7 Amaç ve Kapsam	43
3. MATERYAL ve METOT	44
3.1 Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi	44
3.2 Deney Numunelerinin Üretilmesi	45

	Sayfa
3.2.1 Numune İçeriğinin Belirlenmesi	46
3.2.2 Numunelerin Kodlanması	48
3.2.3 İçerik Karıştırma Süresinin Belirlenmesi	48
3.2.4 Komprime (Soğuk Presleme)	49
3.2.5 Pişirme (Sıcak Presleme)	51
3.3 Deney Numunelerinin Teste Hazırlanması	53
3.4 Deney Şartları	54
3.5 Deney Düzeneginin Tanıtılması	56
3.5.1 Bilgisayar Programı	58
3.5.2 İnvertör	61
3.5.3 Yük Hücresi	61
3.5.4 Sıcaklık Ölçme Cihazı	62
3.5.5 Hidrolik Ünite	63
3.5.6 Fren Diski	63
3.6 Mikro Yapı Analiz İşlemleri	64
3.6.1 Numune Parlatma Cihazı	64
3.6.2 Numune Kaplama Cihazı	65
3.6.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	66
3.7 Yüzey Pürüzlülük Testi	66
3.8 Yoğunluk Testi	67
3.9 Aşınma Direnci ve Özgül Aşınma Değerleri	68
3.10 Sertlik Testi	69
4. BULGULAR	71
4.1 Makro/Mikro Yapı Özelliklerinin Belirlenmesi	71
4.2 Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı-Sıcaklık Değişimi	72
4.2.1 20mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Performansı	73
4.2.2 20mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Yüzey Karakteristikleri	77
4.2.3 30mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Performansı	81
4.2.4 30mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Yüzey Karakteristikleri	85

	Sayfa
4.2.5 40mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Performansı	88
4.2.6 40mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Yüzey Karakteristikleri	92
4.3 Karbon Elyaf Boyutu ve % Oranı Değişiminin Sürtünme Katsayısına Etkileri	96
4.4 Yoğunluk Testi Sonuçları	98
4.5 Özgül Aşınma Değerleri	99
4.6 Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları	100
4.7 Sertlik Testi Sonuçları	100
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	103
5.1 Sonuçlar	103
5.2 Öneriler	105
6. KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ	116

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

F_m	Deneydeki ortalama sürtünme kuvveti (N)
m_1	Deneyden önce ölçülen balata kütlesi (g)
m_2	Deneyden sonra ölçülen balata kütlesi (g)
ρ	Balata yoğunluğu (g/cm^3)
R_d	Disk yarıçapı (m)
μ	Sürtünme katsayısı
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
μ_k	Kinetik sürtünme katsayısı
n	Toplam devir sayısı (devir)
v	Özgül aşınma (g/mm^2)
F	Deney yükü (N)
D	Batıcı bilye çapı (mm)
d	Bilye izi ortalama çapı (mm)
P	Basınç (kg/mm^2)
A	Balata alanı (mm^2)
F_s	Yük hücresinden alınan kol kuvveti (kg)
L	Kuvvet kolu mesafesi (m)
D_h	Numune yoğunluğu (g/cm^3)
G_k	Numune kuru ağırlığı (g)
G_{dh}	48 saat su içerisinde bekletildikten sonra numune ağırlığı (g)
G_{ds}	Numunenin saf su doldurulmuş kaptaki ağırlığı (g)
F_n	Normal (dik) kuvvet (N)
F_s	Sürtünme kuvveti (N)
W	Cismin ağırlığı (N)
θ	Yüzey pürüzünün taban açısı (°)
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
Pa	Pascal (N/m^2)
kPa	Kilopascal
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal

Al_2O_3	Alümina (alüminyum oksit)
$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	Fenolik reçine (fenol formaldehit)

Kısaltmalar

ASTM	American society for testing materials
CFRC	Carbon fiber-reinforced carbon
CNSL	Cashew nut shell liquit
DIN	Deutsches institut für normung
DPT	Devlet planlama teşkilatı
EDX	Energy dispersive x-ray spectroscopy
FAST	Friction assessment and screening test
HB	Brinell sertlik değeri
NAO	Non asbestos organic
PAN	Poly acrylo nitrile
SE	Secondary electron
SEM	Scanning electron microscope
TSE	Türk standartları enstitüsü
TUAM	Teknoloji uygulama ve araştırma merkezi (Afyon Kocatepe Üniversitesi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Kampanalı fren mekanizması	10
Şekil 2.2 Disk fren elemanları	11
Şekil 2.3 Diskli fren sistemi görünüşü	11
Şekil 2.4 Fren balatası, temas platoları ve anlık gerçek temas platoları	29
Şekil 2.5 Balata ve disk arasındaki temas durumunun şematik gösterimi	30
Şekil 2.6 Birbirlerine temas eden parçalarda sürtünme	34
Şekil 2.7 Kuru sürtünme modeli	35
Şekil 2.8 Statik ve dinamik sürtünme katsayısının farklılıkları	37
Şekil 2.9 Coulomb'un sürtünme modeli	37
Şekil 2.10 a) Statik sürtünme katsayısının zamana göre değişimi b) Kinetik sürtünme katsayısının hıza göre değişimi	38
Şekil 2.11 Sürtünme enerjisinin dağılımı	39
Şekil 2.12 Aşınmayı tanımlayıcı anahtar kelimeler ve birbirleri ile etkileşimleri	42
Şekil 2.13 Dört başlıkta incelenen aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi	43
Şekil 3.1 Deney numunelerinin üretimi, sürtünme testi ve mikro yapı analizi şeması.	44
Şekil 3.2 Fren balatası test cihazının şematik görünüşü.	57
Şekil 4.1 2005 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.	73
Şekil 4.2 2010 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.	74
Şekil 4.3 2015 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.	75
Şekil 4.4 2020 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.	76
Şekil 4.5 2025 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.	76
Şekil 4.6 3005 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.	81

Şekil 4.7	3010 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	82
Şekil 4.8	3015 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	83
Şekil 4.9	3020 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	84
Şekil 4.10	3025 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	84
Şekil 4.11	4005 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	89
Şekil 4.12	4010 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	90
Şekil 4.13	4015 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	90
Şekil 4.14	4020 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	91
Şekil 4.15	4025 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Sürtünme katsayısına göre balataların sınıflandırılması	39
Çizelge 3.1 Numunelerin üretimlerinde kullanılan bileşenler ve kompozisyondaki kütleli % miktarları	47
Çizelge 3.2 Sürtünme deneyi şartları	55
Çizelge 3.3 Disk malzemesinin içeriği	63
Çizelge 4.1 Üretilen numunelerin sürtünme testinden önce ortalama kütle, sürtünme testinden sonra ortalama kütle, ortalama kütle kaybı, sürtünme testi ortalama sıcaklığı, sürtünme testi maksimum sıcaklığı, ortalama sürtünme katsayısı ortalama yoğunluk, ortalama özgül aşınma, ortalama pürüzlülük ve ortalama brinell sertlik değerleri.....	101
Çizelge 4.2 Numune gruplarının ortalama sürtünme katsayısı, ortalama yoğunluk, ortalama özgül aşınma, ortalama yüzey pürüzlülüğü, ortalama brinell sertlik değerleri.....	102
Çizelge 4.3 Balataların fiziksel özelliklerinin karbon elyaf miktarı artışına bağlı değişimi.....	102

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Disk fren balatası	16
Resim 3.1 Karbon elyaf iplik	46
Resim 3.2 Toz karıştırma mikseri	49
Resim 3.3 Deney numunelerinin üretildiği soğuk presleme kalıbının görünüşü	50
Resim 3.4 Soğuk pres ile imal edilen balata resimleri	50
Resim 3.5 Deney numunelerinin üretildiği sıcak presleme kalıbı	51
Resim 3.6 Sıcak pres ile imal edilen balata resimleri	52
Resim 3.7 Soğuk/sıcak hidrolik pres cihazı	53
Resim 3.8 1 inç' lik balata tutucu piston	54
Resim 3.9 Fren balatası test cihazı	56
Resim 3.10 Fren balatası test cihazı otomatik kontrol paneli	59
Resim 3.11 Bilgisayar kontrol paneli grafik göstergesi	60
Resim 3.12 Fren balatası test cihazı manuel kontrol paneli	60
Resim 3.13 Devir ayarlayıcı invertör	61
Resim 3.14 Yük hücresi	62
Resim 3.15 Sıcaklık ölçme cihazı	62
Resim 3.16 Fren balatası test cihazında kullanılan özel olarak yapılmış kaliper pistonu.....	64
Resim 3.17 Numune parlatma cihazı	65
Resim 3.18 Numune kaplama cihazı	65
Resim 3.19 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	66
Resim 3.20 Yoğunluk testi düzeneği	67
Resim 3.21 Sertlik ölçme cihazı	69
Resim 3.22 Numune üzerindeki brinell sertlik izi	70
Resim 4.1 Sürtünme deneyi sonrasındaki numune yüzeylerindeki aşınma izleri	71
Resim 4.2 Karbon elyaf ipliklerin SEM resmi	72
Resim 4.3 2005 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	77

	Sayfa
Resim 4.4 2010 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	78
Resim 4.5 2015 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	79
Resim 4.6 2020 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	80
Resim 4.7 2025 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	81
Resim 4.8 3005 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	85
Resim 4.9 3010 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	86
Resim 4.10 3015 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	86
Resim 4.11 3020 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	87
Resim 4.12 3025 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	88
Resim 4.13 4005 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	93
Resim 4.14 4010 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	93
Resim 4.15 4015 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	94
Resim 4.16 4020 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	95
Resim 4.17 4025 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı	96

1. GİRİŞ

Gelişen otomotiv teknolojisi ile beraber taşıtların motor güçleri de artmıştır. Bu artış taşıtların hareket hızlarını ve ivmelenme yeteneklerini iyileştirmiştir. Bu gelişmeler taşıtların hareketlerinin güvenilir şekilde kontrol altına alınmasının önemini arttırmıştır. Fren sistemi bir taşıtın güvenli kullanılmasını sağlayan en önemli aktif güvenlik sistemidir.

Frenlerin fonksiyonu, taşıtın kinetik enerjisini termal (ısı) enerjiye dönüştürmek üzere; hareket enerjisini sürtünme yardımı ile ısıya çevirmek ve bu ısıyı da atmosfere yaymaktır. Eğer frenlerde dayanım sınırını aşacak bir ısı oluşursa, fren balatalarındaki sürtünme katsayısının düştüğü görülecektir ve frenlerin durdurma kabiliyetlerinin azalmasına neden olacaktır. Fren balatalarının olumsuz etkilendiği bu azalma için “balata aşınması” deyiimi kullanılır. Balatalar; çalışma sıcaklığı, aşınma noktası sıcaklığının altında bulunduğu sürece normal görevlerini yaparlar. Fren balatalarının sürekli veya uzun süreli olarak aşırı sıcaklıklara maruz kalmaları balataların zarar görmesine neden olacaktır. Bu zararlar, frenlerin performansındaki azalma, hatalı çalışma, hızlı balata aşınması, titreşim ve ses olarak kendini gösterir (Reinsch 1970).

Balataların bir süre hava ve yol şartlarında su, nem, yağ gibi olumsuz etkiler ile karşı karşıya kalmaları, sürtünme özelliklerinin kısmen bozulmasına sebep olur. Bu nedenle yeni balatalar yapım aşamasında ezilme, kesme, aşınma, ısı ve suya dayanıklılık gibi testlerden geçirilmekte ve kullanım esnasında, balataların yukarıda açıklanan olumsuzluklar nedeni ile sürüş esnasında meydana getireceği olumsuz etkilerin minimuma düşürülmesi amaçlanmaktadır (Gemalmayan 1984).

Fren balata malzemeleri çok ince tozlar halindeki metal veya metal dışı malzemelerin karıştırılması, istenilen formda preslenmesi ve kontrollü bir atmosfer altında belirlenen süre içerisinde sinterlenmesini kapsayan üretim prosesinden oluşmaktadır (Yavuz 2002). Fren balata üretiminde bu yöntemin tercih edilmesinin temel nedeni farklı özelliklere sahip karışım malzemelerinin özelliklerini yitirmeden üretimin gerçekleştirilebilmesidir (Ertan ve Yavuz 2005).

1980’li yıllara kadar balata üretiminde elyaf olarak asbest kullanılıyordu. Asbest, ucuz ve balatalara mükemmel dayanıklılık ve termal direnç sağlayan, 1908- 1980 yılları arasında kullanımı yaygın olan bir fiberdir. 1980 yılında asbestin kanserojen etkilerinin ortaya çıkmasıyla kullanımı yasaklanmış ve araştırmacılar, asbestin yerini tutabilecek elyaf çeşitleri üzerinde çalışmaya başlamışlardır.

Asbestin bu zararlarından dolayı, birçok ülkede 1980’lerden beri asbest içeren ürünler safha safha kaldırılmaya başlanmış ve asbest içeren sürtünme malzemelerinin bir kısmının kullanımı yasaklanmıştır. Bu durum birçok üreticiyi asbeste alternatif araştırmaya zorlamıştır. Fakat bu çalışmalarda kısmen başarılı olunmuştur. Bu araştırmalar, asbestin yerini alacak elyafı bulmak için hala devam etmektedir. Son yirmi yıldan fazla süredir çelik elyaf, kevlar, cam elyaf ve daha birçok mineral elyaflar deneysel çalışmalarda denenmektedir (Sampath 2006). İstenen özelliklerde sürtünme malzemesi elde etmek için çok sayıda farklı malzeme birlikte kullanılmaktadır. Günümüzde 2000'den fazla farklı malzemenin değişik orandaki karışımları otomotiv sektöründe sürtünme malzemesi imalinde kullanılmaktadır (Lekili 2002). Balata kompozisyonlarında ise 10–20 adet farklı malzeme mevcuttur. Kaliteli bir balata için bu malzemelerden hangi oranlarda kullanılacağını belirlemek oldukça zordur (Ayar 1991).

Tüketimi oldukça yüksek olan balataların piyasası da hareketlidir, balata üreticileri kalite, yüksek performans ve pazar açısından sürekli rekabet halindedir. Ülkemizde fren balata üreticisi olarak sadece birkaç firma mevcuttur. Bu firmalar kaliteli balata üretiminin gerçekleştirilmesinde gerekli mevcut bilgileri ve araştırma-geliştirme çalışmalarını son derece gizli tutmaktadırlar. Bu nedenle ülkemizde balatalarla ilgili araştırmaların sayısı oldukça sınırlıdır (Witaker and Wirth 1992). Bu firmalar ya kendi geliştirdikleri formülasyonu ya da yabancı marka tescilli altındaki formülasyonu üretimlerinde kullanmaktadırlar.

Konunun ekonomik boyutu dikkate alındığında, asbestsiz üretilen balataların maliyetlerinin asbestli ürünlere göre bir kaç kat fazla olduğu yapılan çalışmalarla ortaya çıkmıştır (Washabaugh 1986). Asbestli balatalarda kompozit içerisinde %50 dolaylarında yer tutan asbest, yurtdışından ithal edilmekte ve büyük miktarda döviz ödenmesine neden olmaktadır (Gemalmayan 1984). Asbeste alternatif olan pahalı takviye elyafları ve diğer bileşenlerin en iyi sonucu verecek miktarda kullanılması ile

maliyet azaltılabilir. Ancak asbeste alternatif olan endüstriyel elyaf malzemeler de yurtdışından ithal edilmektedir. Buna rağmen toplam maliyette önemli artışlar meydana gelmektedir. Bu maliyet artışı direk satış fiyatlarına yansıtılmayıp üretim yönteminin iyileştirilmesi, malzemelerin ve iş gücünün daha iyi kullanılması yoluyla düşürülmelidir (Dönmez 2000).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bir otomotiv fren sistemi için sürtünme elemanı (balata) kompozit malzemelerin en önemlilerinden birisidir ve genel olarak 10'dan fazla malzemeden oluşur (McLellan 1988, Anderson 1992).

Fren balatalarında gereç türleri ne olursa olsun yüksek bir sürtünme katsayısı, üzerine uygulanan frenleme kuvvetlerine karşı dayanıklılık, iyi aşınma direnci ve sürtünme yüzeyine iyi oturma ilk bakışta istenilen özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır (Anlaş 1988).

Balata üretimi ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda genellikle balata bir kompozit malzeme olarak ele alınmış ve bütün katkıları içeren balata bileşimi yerine çok çeşitli elyaf matris bileşimleri incelenmiştir. Bir balatanın bileşiminde bulunması gereken bütün katkılarla yapılan çalışmaların sonuçları ticari önem taşıdığından genellikle yayınlanmayıp patent alma yolu seçilmiştir (Dönmez 2000). Günümüzde kullanılan yüksek performanslı balataların üretiminde temel oluşturan bazı bilimsel ve teknolojik araştırmalar ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

Çalışma şartları göz önüne alındığında balataların ağır şartlarda çalıştığı söylenebilir. Özellikle ağır tonajlı yüksek hızlı taşıtlarda çalışma şartları daha da zorlaşmaktadır. Yüksek hızlarda taşıtın ani olarak durdurulmasında veya uzun süreli frenleme durumunda balata yüzeylerinde 700°C'ye kadar sıcaklık yükselmeleri mümkün olabilmektedir. Çalışma şartlarının ağır olması, balatalardan istenen özelliklerin daha üst seviyede olmasını gerekli kılmaktadır (Ayar 1991).

Uzun yıllar kullanılan asbest esaslı sürtünme elemanı malzemelerinin sağlık nedenleriyle kullanımının yasaklanması sonucu bunların yerine asbest içermeyen elyaf takviyeli yeni kompozit balatalar geliştirilmiştir. Böylece balataların sıcaklık dayanımı, sürtünme ve aşınma özellikleri iyileşmiştir (Domaç 2006).

Wollastonit, BaSO₄, maun cevizi tozu, toz fenolik reçine sabit bileşiminde değişik boyut ve şekillerde kevlar ile takviye edilmiş kompozit numuneler üzerine yapılan

Çalışmalarda elyaf şekli ve üretim parametrelerinin mekanik özelliklerle birlikte sürtünme ve aşınma özelliklerini de önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalı alışmalar kevlar'ın asbestin yerini alacak çok iyi bir alternatif olduğunu göstermiştir (Bijwe 1997).

Rhee, demir tozu ve grafit dolgulu fenolik reçinenin sürtünme özelliklerinin yk, hız ve sıcaklığa bağımlılığını araştırmıştır. Fren zayıflamasında yk zayıflaması, hız zayıflaması ve sıcaklık zayıflaması olarak üç mekanizmanın etkili olduğunu grmştir. Bu çalışmada sürtünme katsayısının kayma hızı ve ara yüzey sıcaklığına bağı olabileceği sonucuna varılmıştır. Sürtünme katsayısının sabit olmadığını, sabit sıcaklık ve sabit kayma hızında artan basınçla azaldığı, sabit basınçta ise artan hızla azaldığını tespit etmiştir. Ayrıca sürtünme katsayısının sıcaklığa bağı olduğu sonucuna varmıştır (Rhee 1971).

Mutlu ve arkadaşları, bakır tozu içerikli borik asit katkılı ve katkısız fren balatası komponenti oluşturarak bir kısım deneyler yapmışlardır. Borik asit katkılı ve katkısız üretilen numunelerin sürtünme katsayısı (μ), aşınma direnci ve belirli yk ve zamanlarda ısınma özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar, asbestsiz otomotiv fren balatası gelişiminde aşınmaya karşı direnç oluştırmada, sürtünme katsayısının dzgnleşmesinde bakır tozu ile birlikte borik asidin kullanılabileceğini göstermiştir (Mutlu ve Ark. 2002).

Mutlu ve arkadaşları, borik asidin fren balata özelliklerine etkisi üzerine araştırma yapmıştır. alışmasında disk balataları üzerinde 50°C den 400°C ye kadar sıcaklıkta ve 1050-3000KPa basınçlar altında aşınma ve sürtünme katsayısı testleri yapmış, disk malzemesi olarak dökme demir kullanmıştır. SEM çalışmasına ilave olarak balatanın su, tuzlu su, fren sıvısı ve motor yağına olan tepkilerini belirlemek için bir dizi deneyler yapmıştır. Balata numuneleri imalat sırasında ısıl işlemden geirilmıştır. Bu nedenle balataların sertlikleri artmış, yoğunlukları azalmış, aşınmaya karşı dayanımları artmıştır. Aynı zamanda borik asit ve boraks içeren balatalar evre ortamlarından daha az etkilenmektedir. Borik asit ve boraks içermeyen numunelerde ise ısıl işlem sonucunda

aşınma direnci negatif yönde etkilenmiş, borik asit ve boraks içeren numunelerde ise aşınma direnci artmıştır (Mutlu ve Öner 2005).

Akpınar, G., yaptığı çalışmada fren balata kompozit malzemesine karaçam kozalağı ilave etmiştir. Bu çalışma sonucunda Karaçam kozalağı katkılı fren balatalarının, piyasadaki balataların sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerlerinden çok fark göstermediği ve kullanıma uygun olabileceğini gözlemlemiştir (Akpınar 2008).

Kılıç, H., yaptığı çalışmada mermer atıklarını balata dolgu malzemesi olarak farklı oranlarda kullanmıştır. Elde edilen sonuçlarda mermer tozunun dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini ve frenleme performansında olumlu etki yaptığını gözlemlemiştir (Kılıç 2010).

Sugözü ve Mutlu yaptıkları çalışmada farklı özelliklere sahip karışım malzemelerinin özelliklerini yitirmeden üretiminin gerçekleştirilebilmesini amaçlamışlardır. Kompozit malzemelerde homojenliğin sağlanmasında karıştırma süresinin etkili olduğunu bulmuşlardır. Yaptıkları bu çalışmada, aynı oranlara sahip kompozisyonlar ayrı ayrı 5 -10 - 15 dakika karıştırma süresinde hazırlanarak, balataların frenleme performansları deneysel olarak incelenmiş ve karıştırma süresinin performansa etkileri belirlenmiştir. 5 dakika karıştırma süresinde sürtünme katsayısı düşük çıkmıştır. 15 dakika karıştırma süresi 10 dakika karıştırma süresi ile yakın değerler göstermiştir. En uygun karıştırma süresini 10 dakika olarak belirlemişlerdir (Sugözü ve Mutlu 2009) .

Handa ve Kato, Cu, BaSO₄ ve maun ağacı tozunun fren balatalarının sürtünme ve aşınma özelliklerine etkilerini araştırmak için beş türlü katkı maddesi içeren üç grup kompozit incelemiştir. Bir bileşenin oranı sabit tutularak diğer ikisi % 0-40 arasında değiştirilmiştir. Kompozitlerin tribolojik değerlendirilmesi pim-disk tipi deney düzeneği kullanılarak iki farklı şartta yapılmıştır. Birinci grup deneyler düz yolda hafif frenleme şartlarında, ikinci grup ise uzun yokuş aşağı iniş şartlarında (ağır frenleme) şartlarında yapılmıştır. Her bileşenin etkisini incelemek için birinin oranını artırıp diğerini azaltarak yapılan deneylerde aşınma oranı ve fren zayıflama dayanımları incelenmiştir. Bakır tozu katılması fren zayıflama dayanımını artırırken aşınma dayanımını azaltmıştır. BaSO₄

ilavesi ile fren zayıflama dayanımını azaltırken aşınma dayanımı ve mukavemet artmıştır. BaSO₄ katılmayan numunelerde kaymaların sonucu aşınan yüzeylerden bir tabaka koparak ayrılmış, bu olay yüzey pürüzlülüğünü ve aşınmayı artırmıştır. Bakır tozu maun ağacı tozu karışımı katılması durumunda özgül aşınma miktarı artan bakır oranıyla yaklaşık doğrusal olarak artmıştır. En üstün fren zayıflama dayanımı ve en iyi sürtünme özellikleri her iki madde %20 oranında katıldıkları zaman elde edilmiştir (Handa and Kato 1996)

Hee ve arkadaşları otomotiv fren balatalarındaki sürtünme mekanizması üzerine yapılan araştırma çalışmalarına rağmen, konunun tamamen anlaşılamamakta olduğunu ileri sürmektedirler. Onlara göre; kompozit bir sürtünme malzemesinin sürtünme ara yüzeyinde meydana gelen kompleks mekanik kimyasal süreçler, sürtünme performansı ile fren balata formülasyonu arasındaki korelasyonu anlamayı zorlaştırmaktadır. Yaptıkları çalışmada, yeni formüle edilen bir fren balata malzemesinin sürtünme ve aşınma karakteristikleri ile potasyum-titanın bunlar üzerindeki etkisi üzerine yoğunlaşmışlardır. İki farklı malzeme örneği formülüne ederek, bunları test ve analiz etmişlerdir. Bir yarı ölçekli tek sonlu ataletsel tip fren disk dinamometre testi (FAST) kullanarak sürtünme ve aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçların analizine dayanarak, potasyum-titan içeren fren balata malzemesinin önemli ölçüde sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve aşınma direncinin stabilitesini artırdığını ifade etmişlerdir (Hee ve Filip 2005).

Boz, M. ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada fren balatalarının sürtünme performansının geliştirilmesi amacı ile fren balata kompozisyonuna Al₂O₃ takviyesi yapmışlardır. Yapılan çalışmada %2 ve %4 Al₂O₃ takviyesi yapılan numunelerin sürtünme performansı açısından en iyi sonuçları verdiğini gözlemlemişlerdir (Boz ve Kurt 2007).

Koca, bazı mineral malzemelerin fren balatasında sürtünme özelliklerini araştırması üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada dolgu maddesi Baritin yerine kütleli olarak %5-%25 oranında uçucu kül, Diatomit ve Perlit kullanarak oluşturduğu numunelerin zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı-sıcaklık değişimlerini araştırmıştır.

Katkı oranları yüzdesel olarak arttıkça numunelerin yoğunluğu azalmıştır. Numunelerde Barit oranı arttıkça yoğunluk ve özgül aşınmada artmış, sertlik ise düşmüştür (Koca 2011).

Otomotiv frenlerinde sürtünme temasına, yüksek hızda kuru sürtünme ve yüksek temas kuvveti etkiler. Genellikle organik bağlayıcılı fren balatası sürtünme malzemesi tipleri yeterli homojen değildir ve çok düşük hacimsel dayanıklılık sergiler. Düşük dayanıma rağmen özel temas yüzeylerinin kullanımı çok iyi aşınma ve sürtünme karakteristiği vermiştir. Dökme demir disklerle karşı organik bağlayıcılı sürtünme malzemelerinin temas şartları, temas yüzeyi çeşitliliği ve birçok mekanizmadaki özellik ile sürtünme katsayısının çeşitliliği benzerlik göstermektedir (Erikson 2002).

Vishwanath ve arkadaşları, cam elyaf, karbon elyaf ve kevlar elyaf dokumaları, polivinilbütiral (PVB) ile modifiye edilerek üretilmiş fenolik reçine bağlı, kompozit numuneleriyle yapılan deneylerde ağırlıkça %80 elyaf, %20 reçine kullanmışlardır. Aşınma deneyleri sonunda en az özgül aşınmanın kevlar dokuma takviyeli, en fazla özgül aşınmanın ise cam elyaf dokuma takviyeli kompozitlerde olduğu bulunmuştur. Kevlar elyaf kullanıldığında karşı yüzey pürüzlülüğünün azalmasının aşınma parçacıklarının abrasif etkisinin az olmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bu durum aynı zamanda kevlar'ın karşı yüzey aşındırıcılığının cam elyaf ve karbon elyaftan daha düşük olduğunu da göstermektedir (Vishwanath 1993).

Kara, karbon elyaf takviyeli balata üzerinde yaptığı çalışmada farklı uzunluklarda karbon fiber kullanarak oluşturduğu numunelere dökme demir disk üzerinde sürtünme testi yapmıştır. Araştırma sonucu olarak; elyaf uzunluğu arttıkça karbon elyafın kompozisyon içindeki homojenliğinin azaldığını, en yüksek sürtünme katsayısının 5 mm uzunluktaki %25 oranındaki karbon elyaf katkılı numunede 0,44 ve en düşük sürtünme katsayısının %5 oranındaki karbon elyaf katkılı olan numunede 0,27 olarak belirlemiştir. Karbon elyafın belirgin bir şekilde sürtünme sürecine aktif olarak katıldığını belirlemiştir. Elyafın boyunun uzamasıyla numunelerdeki boşluğun daha çok olduğu, bununda sürtünme esnasında, numune yüzeyinden reçine ve matrisin sıcaklıkla

zayıflaması veya sürtünme kuvveti etkisi ile metalik takviyelerin boşalttığı kısımların oluşturduğunu tespit etmiştir (Kara 2011).

Karbon elyaflar temel olarak iki gruba ayrılır. Bunlar, petrol türevlerinden elde edilen zift esaslı elyaflar. Zift esaslı elyaflar büyük ölçüde dayanım dışı amaçlarla kullanılırlar.

Takviye malzemesi olarak genellikle polyacrylonitrile'den (PAN) üretilmiş karbon elyaflar kullanılır (Arıcasoy 2006).

Son derece yüksek katılık, yüksek çekme dayanımı, mükemmel korozyon direnci, mükemmel yorulma ve basma özellikleri, kimyasal kararlılık, kendini yağlama ve düşük genleşme katsayısı karbon elyafın dikkat çeken özelliklerdendir (İnt.Kyn.1).

2.1 Karayolu Taşıtlarındaki Fren Sistemleri

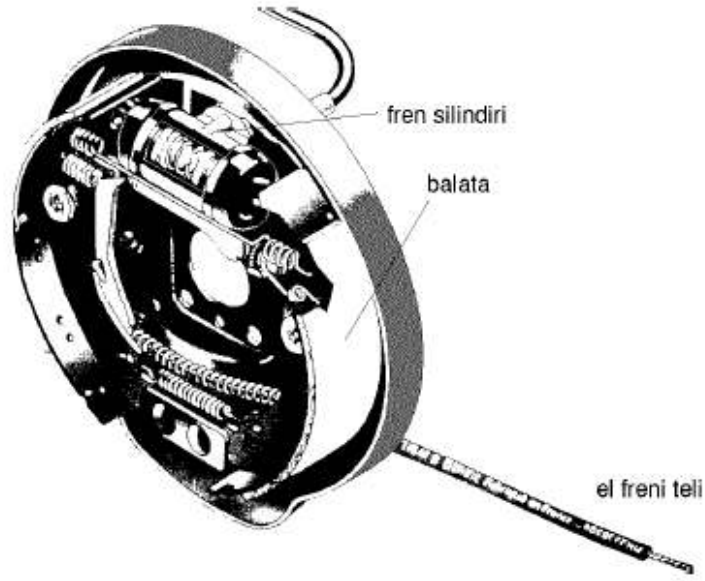
Frenler enerji değişim araçlarıdır, kinetik enerjiyi (momentum), termal (ısı) enerjiye çevirerek taşıtın hızını kontrol ederler.

Karayolu taşıtlarında tekerlek freni olarak sürtünmeli frenler kullanılmaktadır. Genel olarak doğrudan doğruya tekerleğe bağlı olan bu frenler iki ana fonksiyonu yerine getirirler:

- 1.Fren momentinin oluşturulması,
- 2.Enerji değişiminin gerçekleşmesi (kinetik veya potansiyel enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi ve bu ısının atılması) .

2.1.1 Kampanalı Fren Sistemleri

Kampanalı frenlerde fren yüzeyi silindiriktir. Çeşitli tipleri olmakla birlikte karayolu taşıtlarının tekerlek frenlerinde içten pabuçlu olanlar kullanılmaktadır. Kampanalı bir frenin ana parçaları kampana, pabuçlar, baskı düzeni ve taşıma düzenidir. Şekil 2.1' de kampanalı fren mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.1 Kampanalı fren mekanizması (Göktan 1995).

Baskı düzeni pabuçları kampanaya doğru sıkıştırma fonksiyonunu görmektedir. Taşıma düzenine ise pabuç mafsalları ve baskı düzeni bağlıdır. Aynı zamanda kampanayı çepeçevre sararak iç kısımları kirlenmeye karşı koruyan çerçeve de taşıma düzenine bağlıdır.

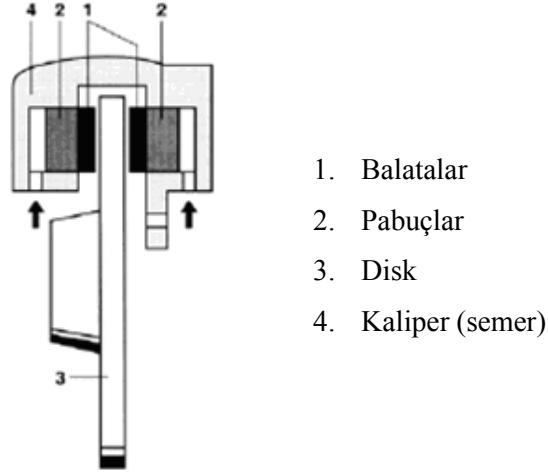
Kampanalı frenlerde fren momentinin oluşumunun incelenmesi disk frenlerdeki kadar basit olmaz. Pabuca bir ucundan uygulanan baskı kuvvetinin balataya dağılımı ile oluşan çevresel kuvvet ve bu kuvvetin kampana yüzeyine olan etkisi, dayanma yüzeyi boyunca alınacak integrallerle hesaplanabilmektedir.

2.1.2 Diskli Fren Sistemleri

Taşıtlarda prensip olarak tekerlekle eş eksenli olarak monte edilmiş olan metal bir disk bulunmaktadır. Semer (ya da kaliper) adı verilen ve tekerlek askı kollarına bağlı olan bir parça diski genel olarak bir köşesinden kavrar. Semerin iç kısımlarında diskin iki yüzeyine yaslanan balatalar frenleme sırasında hidrolik basınç ile diski her iki yönden eşit kuvvetle sıkıştırırlar. Diskin semer tarafından örtülü olmayan kısımları hava akımlarına açık bulunduğundan kolayca soğutulmaktadır. Çamur ve balata tozları

merkezkaç kuvvetle ya da hava akımı ile temizlenir. Fren cevap süresini uzatan nem oldukça hızlı buharlaştığından cevap çabuklaşır.

Taşıtlardaki diskli fren sistemleri temel olarak üç kısımdan oluşur. Bunlar; fren diski, fren balatası ve semerdir. Şekil 2.2’ de disk fren elamanları görülmektedir.



Şekil 2.2 Disk fren elemanları.

Disk kaba kirlenmelere karşı bir çamurluk sacı ile korunmaktadır. Disk performansını etkileyen en önemli faktörler aşınma, disk kalınlık değişimi, düzgün olmayan yüzey ve yüksek sıcaklıktır. Bu faktörler titreşime sebep olmakla birlikte frenleme etkinliğini de olumsuz yönden etkiler. Düzgün olmayan aşınma ve bunun sonucu frenleme yüzeyindeki farklı kalınlık değerleri titreşime sebep olur (Harper 1998). Şekil 2.3’te diskli fren sistemi görülmektedir.



Şekil 2.3 Diskli fren sistemi görünüşü.

Son yıllarda frenlerin tasarımı büyük değişikliğe uğramıştır. Yıllardır ön frenlerde kullanılan diskler, modern araçlarda arka kampanaların yerini almaya başlamıştır. Buradaki önemli etken basit tasarımları, hafiflikleri ve daha iyi performans sağlamaları olmuştur. Bunun sebebi ise tasarımları gereği kampanalara göre daha çabuk soğumaları ve böylece aşırı ısınma ortaya çıkaran zor fren şartlarında çok başarılı olmalarıdır. Çabuk soğumalarının sebebi ise havalandırma kanallarının olmasıdır. Kampanalarda ise havalandırma kanalları yoktur, eğer olsaydı içlerinde su toplanarak daha başka problemlere meydan verirdiler. Disk frenler ise tasarımları gereği suyu hemen savurup atarak daha iyi havalandırma sağlarlar (Stringham 2001).

2.2 Kampana ve Disk Malzeme Özellikleri

Karşı malzemenin, sürtünme özellikleri ile verimli bir şekilde çalışabilmesi için, sistemin mekanik ve ısıl zorlamalarına karşı dayanıklı olması gerekir. Balata ve karşı malzemede (disk veya kampana) sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının, bir an önce sistemden uzaklaştırılması istenir. Bunun için disk ve kampana malzemesinin yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması gerekmektedir. Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genleşme 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. Disk ve kampana üretiminde perlitik yapıli dökme demir kullanılır. Bu dökme demirin sertliği 170-255 HB (kg/mm²) arasında değişmektedir. Dökme demirde %3,4 civarında karbon bulunmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda diskli fren sistemlerinin daha yüksek frenleme kuvvetine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca oluşan sıcaklık diskli sistemde daha çabuk dışarı atılmaktadır ve su ile temasında da balataların ıslanmasını önleyerek suyu kolayca dışarı atabilmektedir. Yüksek frenleme performansı istenen araçlarda arka tekerleklerde de diskli fren sisteminin kullanılması yaygınlaşmaktadır (Erşan 1998).

Yüksek performanslı taşıtlarda disk malzemesi olarak dökme demir tercih edilmez. Mercedes tarafından imal edilen seramik fren diskleri, dökme demir diske oranla % 60

daha hafif olmaktadır. Bu hafiflik taşıtın daha dinamik bir hal almasına olanak vermektedir. Karbon fiber, karbon tozu ve reçineden oluşan bir karışım, yüksek basınçla sıkıştırılarak 1000°C sıcaklığındaki bir fırında disk şeklini almaktadır. Disk soğuduktan sonra üzerine püskürtülen sıvı haldeki silisyum, karbon alaşımlı disk tarafından tamamen emilmektedir. Bundan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon sayesinde disk seramiğe dönüşür. Ortaya çıkan yeni seramik fren diski, normal dökme demir fren disklerine oranla çok fazla avantaj sağlamaktadır. Seramiğin 1400 °C'ye kadar dayanıklı olması, sürekli frene basıldığında frenin fazla ısınıp şişmesi ve kaydırması gibi durumları ortadan kaldırır (Domaç 2006).

2.3 Sürtünme Elemanları (balatalar) ve Özellikleri

Balatalar, TS 555'e göre sürtünmeli frenler için uygulanan fren kuvvetinin, araçların tekerlekleri ile bağlantılı disk veya kampanalara sürtünme yolu ile aktarılmasını sağlayan elemanlar olarak tanımlanır (T.S.E. 1.baskı 1992).

Fren sistemlerinde sürtünmeyi sağlayan temel eleman fren balatasıdır. Dönen bir diske (veya kampanaya) balata tarafından uygulanan basınç ile disk-balata ara yüzeyinde temas sağlanır. Diskin hızını yavaşlatmak veya durdurmak için kinetik enerji sürtünme işi tarafından ısıya dönüştürülmektedir. Ara yüzeyde oluşan sürtünme kuvveti sürtünme katsayısına bağlı olarak değişir. Frenlemenin en yüksek verimle yapılabilmesi için en önemli kriterlerden biri de yüksek bir sürtünme katsayısıdır. Bunun için bir fren sisteminde sürtünme katsayısını etkileyen faktörler tasarımda önemli yer tutmaktadır. Bu faktörler; kayma hızı, frenleme basıncı, sıcaklık, frenleme süresi ve sayısı, disk ve balata malzemeleridir. Ancak temel olarak bir fren sisteminde sürtünme ve performans balata yapısına bağlı olarak değişir.

Balata malzemelerinde istenilen özellikleri belirtmek için çalışma şartlarının çok iyi bilinmesi gerekir. Özellikle balata yüzeyine etki eden basınç, aracın hızı ve sürtünmeden dolayı balata yüzeylerinde oluşan sıcaklık yükselmelerinin önemli olduğu görülür. Çalışma şartlarının hafif-orta-ağır olmasına göre balatadan istenen özellikler de değişmektedir. Balataların denenmesinde basınç-hız-sıcaklık değerlerinin birbiriyle olan

kombinasyonları göz önüne alınır ve basınç-hız değerleri birbiri ile paralel olarak arttırılır (Gemalmayan 1986).

Fren elemanlarının, sürtünme ve aşınma karakteristiklerini fren tasarımı, malzemeye ve balataya etkileyen şartlar belirler. 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/sn' 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 (Mutlu 2002).

Sürtünme esnasında yüzeylerin pürüzlülüğü ve enerji absorpsiyonu sonucu meydana gelen sıcaklık, sürtünme katsayısını önemli ölçüde etkiler, sıcaklığın artması malzemede sürtünme katsayısının düşmesine neden olur ve sistem görev yapamaz hale gelir (Uygur 1996).

Tüm bu kabullerin ışığında balatalar bütün frenleme durumlarında sabit kalan bir sürtünme katsayısına (μ) sahip olmalıdır. Ancak uygulamada frenleme süresi, taşıt hızı veya fren basıncı parametrelerinden herhangi biri ya da birkaçının aynı anda artmasıyla oluşacak sıcaklık yükselmesi sonucunda 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 (Demirsoy 1973). Balata özellikleri olumsuz şartlardan etkilenmemelidir.

Literatürde balatalardan istenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Her çalışma şartlarında sabit sürtünme performansı,
- Kolay ve ucuz üretililebilmeli,
- Sürtünme katsayısının sıcaklık, fren basıncı ve hızdan etkilenmemesi (veya sürtünme davranışındaki değişimin az olması),
- Aşınmaya karşı direnci yüksek olma,
- Yüksek sıcaklık direnci,

- Yüksek ısı iletkenliği,
- İyi korozyon direnci,
- Yüksek mekanik mukavemet,
- Düşük gürültü ve vibrasyon seviyesi,
- Hava koşullarından etkilenmeme,
- Çevreye ve insan sağlığına zarar vermeme,
- Yüksek aşınma mukavemeti ve disk malzemesini daha az aşındırma,
- Düşük sıkıştırılabilirliğe sahip olma,
- Beklenen kullanım ömrünü sağlayabilme.

Tekerleğe bağlı bulunan bir fren diski, semer içine yerleştirilmiş iki balata arasında her iki tarafından sıkıştırılmak suretiyle çalışmaktadır. Disk fren sistemlerinde sürtünme malzemesini (balata), dönen fren diskine her iki yönden bastırmak için bir piston kullanılmaktadır. Bu basınç etkisi ile tekerleklerin dönmesi yavaşlamakta, araç da tekerlekler ile yol yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı durmaktadır. Disk balatalarının avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Disk ve balata yüzeyi arasında kaymalar kaçınılmazdır. Aşınma, ısınma ve yıpranmalar bu aşamada olmaktadır. Sürtünmeden ötürü açığa çıkan ısı yüzey sıcaklığını yükseltmektedir. Disk frenler bu tür etkilere karşı daha dirençlidir. Çünkü fren sistemi çevresinde hava dolaşımı daha elverişlidir. Bazı disklerin içine hava sirkülasyonlarına imkân veren kanallar açılmıştır. Zaten fren diskinin % 80'i açıktadır.
- Islak durma mümkündür. Su merkezkaç kuvvet yardımı ile diskin dikey yüzeyinden kolayca akar ve balatalar disk yüzeyine sürekli değeri, bu durum su birikmesini ve frenlerin kaymasını etkili bir şekilde önler. Resim 2.1' de disk fren balatası görölmektedir.



Resim 2.1 Disk fren balatası.

2.3.1 Balata Çeşitleri

Sürtünme malzemeleri yaygın olarak metalik, karbon, organik (reçine bağlı) olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır.

2.3.1.1 Metalik Esaslı Fren Balataları

Metalik balatalar genellikle bakır veya demir esaslıdır ve aşırı derecede ısı kararlılık isteyen uygulamalarda kullanılır. Çoğunlukla performansı arttırmak için inorganik katkı maddeleri veya seramiklerle birlikte ve katı faz sinterlemesi uygulanarak üretilirler. İmalatları kolay ve bir dereceye kadar ucuzdurlar. Yüksek yoğunlukta olmaları fren sistemini diğerlerine göre biraz daha verimli yapar (Bijwe 1997).

2.3.1.2 Karbon Esaslı Fren Balataları

Karbon esaslı sürtünme malzemeleri ağırlığın kritik olduğu, yüksek performansın istendiği ve maliyetin ikinci derece olduğu uygulamalarda tercih edilir. Hacimlerinin yaklaşık %63 karbon-karbon olarak üretilen kompozitler uçak fren sistemlerinde kullanılırlar. Karbon sürtünme malzemeleri amorf karbonla bağlanan, karbon elyaflardan imal edilmektedir. Amorf karbon bağlayıcı oluşturmak için organik reçinelere yüksek sıcaklıklarda pişirme veya kimyasal buhar çöktürme işlemi uygulanır.

Hafifliği, ısı kararlılığı, uygun yüksek özgül ısı özellikleri olması nedeniyle fren malzemesi olarak mükemmel performans gösterirler (Bijwe 1997).

2.3.1.3 Organik Polimer Esaslı Fren Balataları

Frenlerde ve kavramalarda kullanılan en yaygın sürtünme malzemeleridir. Birçok değişik bileşimleri vardır ve genellikle bileşimleri patentlidir. Bağlayıcılar, dolgu maddeleri, sürtünme düzenleyiciler ve takviye ediciler olarak kategorize edilirler. Asbest esaslı ve asbestsiz olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar (Bijwe 1997).

2.4 Balata Oluşumunda Kullanılan Malzemeler ve Fonksiyonları

Fren malzemelerinin genel tribolojik özellikleri belirlenirken çalışma şartları göz önüne alınmaktadır. Frenlerde sürtünmenin önemi bilinmektedir. Bu nedenle sürtünme görevi yapan elemanların istenilen özelliklerde olmaları gerekmektedir. Sürtünme elemanları düşük sıcaklıklardan çok yüksek sıcaklıklara kadar sürekli değişebilen çalışma sıcaklıklarında ve yüksek hızlarda çalışmaktadır. Disk ve kampananın mekanik ve ısı zorlamalara karşı dayanıklı olması istenir. Fren sistemlerinde sürtünmeden dolayı kısa zamanda oluşan sıcaklık artışının, en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılabilmesi için karşı malzemenin yüksek ısı iletim katsayısı ile özgül ısıya sahip olması gerekmektedir. Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısı genleşme katsayısının küçük olması istenir. Frenleme sırasında kısa zamanda oluşan yüksek ısı miktarı, disk veya kampana tarafından alınıp, iletilerek dışarıya verileceğinden, disk malzemesinin yüksek ısı iletme kabiliyetine sahip olması gerekir (Fenton1996).

Fren balataları çok sıkıştırılmış halde, ısı dağılımı düzenleyen bakır, pirinç gibi metalleri de ihtiva eden çok çeşitli sürtünme malzemelerinden imal edilmektedir. Bu bileşenler su ve yağ kirlenmesinden asgari derecede etkilenmektedirler. Otomotiv disk ve kampana frenlerinde kullanılan fren balataları üretiminde aşağıda açıklanan malzemeler belirli oranlarda kompozisyon halinde kullanılırlar.

Balata kompozisyonunda kullanılan malzemeler temelde dört gruba ayrılır. Bunlar;

- Takviye edici elyaflar
- Bağlayıcılar
- Dolgu maddeleri
- Sürtünme düzenleyici katkılarıdır

Bağlayıcıların amacı balatanın yapı bütünlüğünü, mekanik ve termal gerilmeler altında sürdürmesini sağlamaktır (Ertan ve Yavuz 2006). Dolgu maddeleri; balatanın maliyetini azaltmak ve üretilebilirliğini arttırmak için balata içerisine katılan maddelerdir. Sürtünme düzenleyici katkıları; sürtünme katsayısını ve aşınma oranlarını modifiye etmek için kullanılırlar. Balatada içerisinde kullanılan takviye edici elyaflar, balatanın yapısını güçlendirerek balataya mekanik dayanım sağlarlar.

2.4.1 Takviye Malzemeleri (Elyaflar)

Bu malzemeler öncelikle sürtünme malzemesi içindeki diğer komponentleri kuvvetlendirmek (desteklemek) için kullanılırlar. Balatada mekaniksel dayanım, sertlik, termal kararlılık, aşınma direnci ve kararlı bir sürtünme üretirler. Genellikle çelik yünü, bakır tozları, karbon, cam yünü, kaya yünü ve aramid lifler kullanılır ve çok nadiren farklı mineraller ve seramik (mika) lifler de kullanılabilir. Metal malzeme olarak bakır, çelik, demir, pirinç, bronz ve alüminyum gibi malzemeler lifler veya partiküller şeklinde sürtünme malzemesi içerisinde kullanılmaktadır.

2.4.1.1 Asbest Elyaf

Asbestin teknolojik değeri başlıca üç özelliğinden kaynaklanmaktadır. Ateşe dayanıklıdır, elektrik ve ısı yalıtımı yüksektir, lifli yapısından dolayı fenolik kompozitlerde çelik kafeslere benzer şekilde özel bağlayıcılık özelliği gösterir. Bu yüzden, başka malzemelere karıştırılan asbest ileri derecede dayanıklılık sağlayabilmektedir (Türk Sağlık Ajansı Yayınları 1 1991).

Asbestin sıcaklığa dayanımına ilaveten balatalarda kullanımıyla ilgili faydalı özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

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

Son 80 yıldır dünyada tartışma konusu olan asbestin uluslararası sağlık örgütlerinin girişimleri ile son 10 yılda ulusal ve uluslar arası mahkemelerde kullanımını yasaklama kararları alınmıştır. Dolayısıyla asbestin özelliklerini karşılayacak asbeste alternatif malzeme araştırmaları hız kazanmıştır. Asbeste alternatif olacak elyaf malzemeler; kullanılan üretim yöntemine, ürünün kullanım şartlarına ve müşteri tarafından kabul edilebilecek fiyat göz önüne alınarak seçilmelidir (Anlaş1988).

Yapılan çalışmada kullanılan farklı elyaf türlerinin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.4.1.2 Basarid® Elyaf

Volkanik orijinli bazalt taşıdır. Basarid (tescilli ticari marka) Deutsche Basaltsteinwolle GmbH firması tarafından balata imali için üretildiği bildirilmektedir. Bazalt taşı 1400°C'de ergitilerek 1 m uzunluğa kadar elyaf yapılabilir. Sıcaklığa dayanıklı, ısı ve ses izolasyonuna uygun, korozyona dayanıklı, sert ve elastiktir. Asit çözeltileriyle kimyasal reaksiyona dayanımı orta, alkali çözeltilerle kimyasal reaksiyona dayanımı iyi, çözücülerle kimyasal reaksiyona dayanımı çok iyi, sıcaklığa dayanıklı, ısı ve ses izolasyonuna uygun, korozyona dayanıklı, sert ve elastiktir. Çevreye zararlı olan asbestin kullanıldığı alanların hemen hemen hepsinde kullanılabilir Kimyasal analizi: %42- 48 SiO₂, %9-14 Al₂O₃, %1-3 TiO₂, %11-14 Fe₂O₃, %10-14 MgO, %10-14 CaO, %2-4 Na₂O, %1-3 K₂O dir (Dönmez 2000).

2.4.1.3 Cam Elyaf (E-camı elyafı)

Cam elyafı, eritilmiş cam karışımının basınçlı hava ile sıkıştırılması sonucu özel olarak yapılmış bölmelerden aşağı akıtılarak elde edilir (Welch and A.F. 1953). Bu işlem sırasında erimiş cama, dolomit ve alümina katılarak istenilen fiziksel özelliklerde üretilen liflerin yoğunluğu 2,5-2,54 gr/cm³ arasında değişir (Gemalmayan 1984, Katalog 1983).

Asbestsiz sürtünme malzemelerinde ana yapının mukavemetini arttırmak amacı ile %10–15 oranında cam elyafına yer verilmiştir. Ayrıca cam elyafın ısı iletiminin az olması asbest liflerine iyi bir alternatif olması ve fleksibl özelliğinden dolayı sürtünme malzemelerinde kullanılabilir yapıya sahiptir (Gemalmayan 1984, Katalog “ABEX” 1983). Bağlayıcı genellikle bir organik silikon bileşiği veya silandır. Bu bağlayıcı, hem cam elyafın kullanım özelliğini belirler hem de liflerin birbirine sürterek aşınmasını engeller. E-camı polimer matrisli kompozitlerden yaygın takviye edici olarak kullanılır (Arkayın 1984, Hull 1992) .

2.4.1.4 Taş Yünü Elyaf

Özellikleri itibariyle Basarit elyafına benzer. Hammaddesi doğal volkanik kayadır. Sıcaklığa dayanıklı, ısı ve ses izolasyonuna uygun, korozyona dayanıklı bir malzemedir. Sıcağa ve rutubete maruz kalması halinde dahi, boyutlarında bir değişme olmaz. Zamanla bozulmaz, çürümez, küf tutmaz, korozyon ve paslanmaya neden olmaz (Dönmez 2000).

Taş yünü ülkemizde İzocam Ticaret ve Sanayi A.Ş. firması tarafından üretilmektedir. Taş yünü; volkanik bazal taşının öğütülüp toz haline getirilerek, çeşitli kimyasal maddeler ve geri dönüşümlü çöp maddelerinin bileşiminden oluşur. Taş yünü değişik boy elyaflardan oluşmakta, diğer malzemelerle birlikte karıştırıldığında parçalanarak içyapıya dağılmaktadır (Genel Ürün Kataloğu 1998).

2.4.1.5 Çelik Elyaf (Çelik Yünü)

Çelik elyaf uygun takviye etme özelliği, iyi ısı ve sürtünme kararlılığı, ekonomik oluşu ve karıştırma esnasında parçalanmaya karşı direnci sayesinde en çok kabul gören alternatif malzemelerden biridir. Uzun elyaflar daha iyi takviye sağlarken kısa elyaflarda kalıplamada daha kolaylık sağlar. Uzun elyaflar ticari araçlarda disk balata uygulamalarında başarı ile kullanılmaktadır Korozyon dezavantajına rağmen yumuşak çelik elyaf daha kolay işlenebilir ve ucuz olması sayesinde tercih edilmektedir (Baker 1992). Yoğunluğu $7,86 \text{ g/cm}^3$, elyaf uzunluğu 1-5mm, elyaf kalınlığı $16\mu\text{m}$, genişliği $50\mu\text{m}$, çekme dayanımı 2600MPa , elastiklik modülü 200GPa , Mohs sertliği 5'tir.

2.4.1.6 Karbon Elyaf

Karbon elyaf, tekstil malzemesi olarak bilinen akrilik reçinenin veya petrol/kömür ziftinin fibrilasyonu ve sonrasında belirli ısı verilmesiyle elde edilen mikro grafit yapılı malzemelerdir (İnt.Kyn.2).

Karbon fiber malzemeler genellikle CFRC (Carbon Fiber-Reinforced Carbon) olarak adlandırılır. Grafit fiber olarak da adlandırılan karbon fiberler içerisinde son derece küçük çapta ($0.005\text{-}0.010\text{mm}$) karbon atomlarından oluşan fiberler içeren materyallerdir. Bu yapılarda karbon atomları birbirine mikro kristal yapıda bağlıdır ve fiber ekseninde boyunca dizilidirler. Bu diziliş fiberin, yüksek özgül dayanım, sertlik, kendini yağlama özelliği, düşük termal genleşme katsayı ve göze çarpan derecede ısıya dayanım gibi özelliklere sahip olmasını sağlar (Çiftçi 2010).

Değişik çalışma sıcaklıklarında karbon fiber balatalar içerisindeki karbon fiber oranları arttıkça balata ile disk arasındaki sürtünme katsayısı ve aşınma değerleri artar (Guan *et al.* 2004).

Karbon fiberlerin en önemli dezavantajlarından biri 320°C 'de oksidasyona uğramalarıdır (Windhorst 1997). Yüksek sıcaklıklarda oksitleyici ortamdan

korunmalıdır. Bunun için ya inert (soy) bir ortamda kullanılmalı (balataların kullanım ortamı inert değildir) ya da yüzeyi oksitlenmeye karşı kaplanmalıdır.

Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava taşıtlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır (İnt.Kyn.3).

2.4.1.7 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'ye kadar, hatta kısa süre içinde 530 °C' ye kadar faydalı takviye sağlar. Kevların doğal tokluğu, önemli sayılabilecek kopma uzaması ve kolaylıkla eğilebilmesi (mineral ve suni inorganik elyafların gevreklik karakteristiğini önler) diğer önemli özellikleridir (Stocks et al.1985). Ayrıca pullaşma ve karıştırma gibi yüksek kayma gerektiren işlemler sırasında uzunluğunu muhafaza etmektedir. Bu özellikler ürünün sürtünme aşamasındaki özelliktir.

Kevlar fiberler ticari olarak kevlar 29 ve kevlar 49 olarak iki şekilde temin edilebilir. Kevlar 29 orta derecede elastisite modülüne ve yüksek mukavemete sahiptir. Kevlar 49 yüksek elastisite modülü ve yüksek mukavemete sahiptir. Kevlar 49 özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tavsiye edilmektedir (Hull 1987).

2.4.1.8 Fiberfrax

Çok yüksek sıcaklıklarda kararlı, çok düşük ısı genleşme katsayısı, düşük elektrik iletkenliği, mükemmel ısı şok dayanımı, iyi çekme dayanımı ve çok iyi korozyon dayanımına sahiptir. Takviye olarak fren balata karışımlarında oldukça yüksek sıcaklık (ısı fayd) dayanımı sağlar (Dönmez 2000).

2.4.1.9 Mika Grubu

Mika, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip levhamsı, kompleks bileşimli hidroalüminyumsilikat minerallerine verilen isimdir (DPT 1975).

Mika grubu mineraller silikat mineralleri olup pulsu yapıdadırlar. Mika, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip levhamsı, kompleks bileşimli hidroalüminyumsilikat minerallerine verilen isimdir. Elektriksel, kimyasal ve sünme direncini ayrıca elastiklik modülünü ve sertliği artırır. Termoset reçineler için dolgu maddesi olarak geniş uygulama alanları bulur. Mika, ısı, çatlama ve rutubet dayanımını yükseltir. Sıvı reçine sistemi içerisinde dibe çökmeme özelliği vardır. Termal iletkenliği, şekillenme süresini, termal genişleme katsayısını, nem absorpsiyonunu düşürür (Othmer 1967).

2.4.2 Bağlayıcı Malzemeler

Bağlayıcılar balata bileşenlerini kullanım öncesinde ve kullanım sırasında bir arada tutan yapıştırıcılardır. Bağlayıcı olarak birçok termoset reçineyi kullanmak mümkündür. Doğal veya sentetik kauçuk da bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bağlayıcılar tek tek kullanılabilir olmakla beraber birden fazla bağlayıcı birlikte de kullanılmaktadır (Vishwanath *et al.* 1993). Fakat bunlar arasında fenol formaldehit reçine adı verilen termoset reçineler otomotiv sektöründe kullanılan en yaygın bağlayıcıdır. Bu reçinelerin en büyük özelliği sıcaklıkta sertleşmeleridir. Termoset malzemelerin özelliği erime derecesi yanma derecesinin üzerindedir. Fenol (Phenol) (C_6H_6O) ve formaldehit (Formaldehyde) (CH_2O) kalıp pudrası halinde kullanılır, polimerleştirme reaksiyonu, polimerin normal sıcaklıklarda katı olduğu fakat ısı ve basınç etkisi altında akabileceği bir basınç etkisi altında durdurulur. Karışım basınç altında kalıplanır, sürtünmenin azaltılabilmesi için bir miktar grafitte yer verilir. Fenol formaldehitler yüksek sıcaklıklarda kullanışlıdırlar çünkü sürekli bir yapı kafesine sahip oldukları için moleküller arasında kayma olmaz. Böylece şekil değiştirme sıcaklığın yükselmesine bağlı değildir. Fenol formaldehit reçinenin içerisinde %40 fenol, %22 formaldehit, %4 kresol, %34 su, çözücü ve diğer dolgu maddeleri bulunmaktadır (Gemalman 1984).

Reçinelerde polimerizasyonun tamamlanarak sertleşmesine kürleşme denir. Kürleşme termoset bir reçinenin özelliklerinin geri dönülmez bir şekilde kimyasal bir reaksiyonla değişmesidir (Othmer 1966). Kürleşme, kürleştirici maddelerin katılması sıcaklık ve basınçla veya sıcaklık ve basınç olmadan meydana gelir. Fenolik reçinelerin kürleşme şartları 232°C'ye kadar sıcaklıklarda birkaç dakikadan birkaç saate kadar olabilir. Yüksek sıcaklık dayanımının elde edilebilmesi için fenoliğin kalıpta başlayan kürleşmesinin tamamlanması gerekmektedir. Bunun için kalıplanmış parçalar 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda hacmine bağlı olarak belli bir süre fırında tutularak kürleşmenin tamamlanması sağlanır (Neiman 1965). Son kürleme işlemi ısı işlemi olarak da adlandırılır ve dayanım özelliklerini iyileştirmek için uygulanır (Hao *et al.* 1998, Dönmez 2000).

2.4.3 Dolgu Malzemeleri

Dolgu malzemeleri, temelde maliyeti azaltmak ve üretilebilirliğini iyileştirmek için kullanılır. Dolgu maddeleri istenen sürtünme özelliklerini bozmadan balatayı geliştirmek, hacim doldurmak ve maliyeti düşürmek amacıyla katılır. Genellikle sürtünmeye etkisiz kabul edilirler fakat sürtünme ayarlayıcı bir madde de olabilirler. Dolgu maddesi olarak barit, kil veya kalsiyum karbonat gibi mineraller kullanılmaktadır. Doğal baryum sülfat yaygın bir dolgu maddesidir ve genellikle sürtünme katsayısına etkisiz kabul edilmektedir (Dönmez 2000, Tanaka *et al.* 1973).

Genelde ideal bir dolgu maddesinden istenen bazı özellikler aşağıda verilmiştir (Ayar 1991):

- 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 arttırmalıdır.
- Maliyeti düşürmelidir.

2.4.3.1 Barit

Barit minerali (BaSO_4) baryum (Ba) elementinin ve bileşiklerinin ana kaynağını teşkil eder. BaSO_4 (barit) miktarı azaltıldığında yüksek sıcaklıklarda dahi sürtünme katsayısı kararlılığını koruduğu, ancak aşınma oranının önemli derecede arttığı gözlenmiştir. Alternatifi olarak CaCO_3 kullanılır. Daha ucuzdur, ancak yüksek sıcaklıklarda dayanıksızdır (Nicholson 1995). Özgül ağırlığı $4,5 \text{ gr/cm}^3$, erime noktası 1580°C ve sertliği 2,5-3,5 mohs, renksiz, beyaz, bazen sarı ve gri olup, sürtünme malzemelerinde baritin daha dengeli olmasından dolayı %50-55 arasında yer verilmektedir (Gemalmayan 1986).

2.4.3.2 Cashew Dust

Hindistan'ın ünlü maun ağacından elde edilen Cashew fındığı bir takım işlemlerden geçtikten sonra otomotiv fren balatalarında kullanılmaktadır. Cashew fındığı kabuğu ünlü, son derece aşındırıcı CNSL (Cashew Nut Shell Liquit) gibi yapışkan ve koyu bir sıvı içerir. CNSL çok yönlü endüstriyel ham malzeme olmasından dolayı öneme sahiptir. Endüstriyel uygulamalar için 200 den fazla patent almıştır. Cashew özel olarak, fenolik reçine için ham malzeme olarak ve otomotiv endüstrisi için sürtünme tozu olarak kullanılır (fren balatası ve debriyaj balatası için). Kampanalı fren balatasında Cashew reçinesi dolgu olarak kullanılmakta ve ayrıca bağlayıcı madde olarak ta kullanılmaktadır (İnt.Kyn.4).

Cashew partikülleri (Sürtüne tozu) ayrıca, yüksek sıcaklıklarda sürtünme dayanımını ve soğuk aşınmayı iyileştirmek için de kullanılır. Jang ve ark.'nın (2001) buldukları sonuçlara göre cashew partikülleri miktarı arttırılarak kesikli sürtünme azaltılabilir. Bağlayıcı sistemin elastikiyetini arttırır ve fren gürültüsünü azaltır (Nicholson 1995). Oluşan ısıyı absorbe etme özelliğine sahip olduğu için frenleme performansını arttırır.

2.4.3.3 Kizelgur

Diatomit diye bilinen sedimanter kayalara Almanca ve Fransızca literatürde verilen addır. Diatomit minerali tatlı ve tuzlu göl sularında yaşayan diatome adı verilen mikroskobik canlıların fosilleşmiş silisli kabuklarından oluşmuştur (Mete 1985).

2.4.3.4 Alçı

İki sulu alçı, yarım sulu alçı ve susuz alçı olmak üzere üç farklı şekilde bulunabilir ve ticari adlandırmada her üçünün adı da alçıdır. Piyasada satılan ise yarım sulu alçıdır.

Yarım sulu alçı karıştırılan su ile reaksiyona girerek sertleşir. Katılaştıran kütle daha sonra ısıtılarak, tekrar yarım sulu alçı veya tamamen susuz alçı haline getirilebilir (Çavuşoğlu 1989).

2.4.4 Sürtünme Ayarlayıcı Malzemeler

Sürtünme düzenleyici katkıların abrazif olanlar ve abrazif olmayanlar olmak üzere iki tipi vardır. Bunların sürtünme ve mekanik özellikleri yükseltmede veya değiştirmede çeşitli görevleri vardır. Pirinç veya bakır parçacıkları/tozları ısı dağılımını iyileştirmek için katılırlar Alüminyum oksit veya krom oksit gibi abrazifler ise sürtünme katsayısını yükseltmek amacı ile kullanılmaktadır. Grafit gibi katı yağlayıcılar da sürtünme katsayısını azaltmak için kullanılır. Metalik tozların feydi azaltmada yararlı olduğu bulunmuştur (Bijwe 1997).

2.4.4.1 Alüminyum Oksit (Al_2O_3)

Doğada oksit, sülfat, florür ve silikat halinde çok değişik hallerde bulunabilirse de, kullanılan tek cevheri, boksit adı verilen, hidratlanmış halde olanıdır. Tabii şartlar altında korundum, zımpara, yakut veya göl yakutu şeklinde olanları vardır. Bunlardan yalnızca korundum (saf alüminyum oksit), doğada kendi kendine oluşabilir. Diğer polimorfik yapıların oluşumu ise kristalizasyon şartlarına ve boksitin (dolayısıyla hidratın), cinsine bağlıdır. En kararlı yapı olan kristal şekli;

- Alüminyum hidratların yaklaşık 1300 °C'de ısıtılması
- Ergitilmiş alüminyum oksidin donması
 - Bazı özel koşullar altında saf Al metalinin O₂ ile yakılması ile elde edilir.

Bu yapıdaki Alüminyum oksit hidroskopik olmadığından elektrikle indirgeme fırınları için en elverişli koşulları sağlayabilir.

Alüminyum oksit, kristallografik olarak, oksijen iyonlarının alüminyum iyonları tarafından sıkı hegzagonal olarak sarılması ile ifade edilebilir. Dış görünüş olarak beyaz bir tozdur. Alüminyum oksidin ergime noktası 2050°C' dir. Kaynama noktası ise 2080°C ' dir. Susuz Alüminyum oksit, yüksek ergime noktalı kararlı bir oksittir. Bazik ve asidik özellikleri aynı derecede etken olan tipik amfoter bir kimyasal bileşiktir. Bu nedenle asitlerde ve bazlarda çözünür. Alüminyum oksidin yoğunluğu 3,95 gr/cm³, Mohs sertliği 9, ergime ısısı 5100–6000 cal/mol.gr, buharlaşma ısısı 11790 cal/mol.gr olarak belirlenmiştir (Kara 1998).

2.4.4.2 Bronz Tozu

Bronz bir bakır-kalay alaşımıdır. Tozlar, bileşimi %80-83 Cu, %20–17 Sn olan bronzdan üretilmiştir. Reçine bağlı kompozitlerde sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılır (Öztürk 2004).

2.4.4.3 Grafit Tozu

Grafit, karbonun çok yapıları şekillerinden biri olup tabakalı bir yapıya sahiptir. Tabakalardaki karbon atomları hegzagonal düzendeki tabakalarda güçlü kovalent bağlarla bağlıdır. Tabakalar kendi aralarında zayıf ikincil bağlarla bağlı olduğundan birbirleri üzerinde kolayca kayar. Tabakaların kayma kolaylığı, grafitte yağlayıcılık özelliği verir (Smith 1996). Bu özelliğiyle grafit balatalarda sürtünme ayarlayıcı olarak kullanılır. Grafitin sürtünme katsayısı 0,10–0,15 civarındadır. Grafit sıcaklığa ve ısıl şoka dayanıklı, iyi bir ısıl iletken, kolayca talaşlı işlenebilir, kuvvetli oksitleyici

maddeler hariç hemen hemen tüm korozif maddelere dayanıklıdır. Grafitin özgün bir diğer özelliği de sıcaklık arttıkça dayanımının artmasıdır (Öztürk 2004).

2.4.5 Temizleyiciler

Temizleyiciler; balata bileşimine karşı malzemeye yapışıp katılaşmış olan bağlayıcıların kazınip sökülmesi amacıyla katılmaktadır. Bazı balata malzemeleri kendi kendine temizleyicidir. Temizleyiciye ihtiyaç duyulan bazı bileşim ve kullanım şartlarında pirinç tozu, bronz tozu, çinko tozu gibi metalik malzemeler kullanılmaktadır (Dong *et al.* 1996).

2.4.6 Renklendiriciler

Sürtünme malzemelerinde, malzemenin dış görünüş rengini değiştirerek göze daha iyi görünebilmesi ve konstrüksiyonda uyum sağlaması açısından renk verici maddeler kullanılır (Yamashita *et al.* 1993). Siyah demir oksit (Fe_3O_4), sarı demir oksit ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$), kırmızı demir oksit (Fe_2O_3) ve karbon siyahı sıkça kullanılan renk vericilerdir (Dong *et al.* 1996).

2.4.7 Madeni Dolgu Malzemeleri

Sürtünme malzemelerinde (balatalarda) yapıyı homojenleştiren, ısı iletim katsayısını düzenleyen, aşınma ile sürtünme katsayısının dağılımına etkisi olan bu malzemeleri, metal yünleri ve metal talaşları oluşturur. Genellikle metal yünü olarak demir ve alüminyum yünleri, talaş için de pirinç, bakır ve alüminyum metallerinin talaşları kullanılır. Bu malzemelerin kompozit içerisindeki oranları ve sertlikleri iyi seçilerek karşı malzemeye zarar vermemesi gerekir (Anderson 1992).

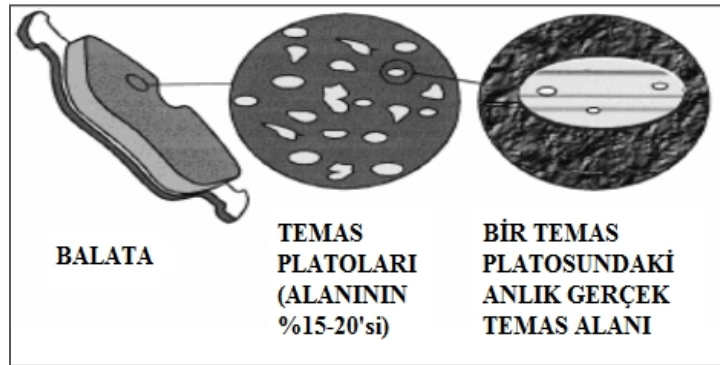
2.5 Fren Balatalarının Sürtünme Performansını Etkileyen Faktörler

Malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışlarını sürtünme yüzeyleri arasındaki doğal etkileşim belirler. Bu etkileşimin derecesi balata sürtünme ve aşınma özellikleri, bileşim,

yüzey geometrisi, yüzey enerjisi, kimyasal reaksiyonlar, yüzeyin fiziksel ve mekaniksel özellikleri, yağlı, yaş, kumlu ile aşınmadan dolayı kirlenen yüzey ve çalışma koşullarındaki basınç, hız, sıcaklık değişimi gibi birçok parametreye bağlıdır (Bijwe 1997).

2.5.1 Sürtünme Temas Yüzeyi

Balatalar genellikle farklı özelliğe sahip birçok bileşenden meydana gelir. Reçine ve katı yağlayıcılar en zayıf bileşenler olurken, abrazif parçacıklar ve elyaflar en sert bileşenler olmaktadır. Bu farklılıklar karmaşık bir temas durumu oluşturur. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’ de bu durum gösterilmiştir. Aşınma parçacıkları sıkıştırılmaları sonucunda balata yüzeyinde toplanarak “plato” adı verilen alanlar oluştururlar. Bu platolar, balatanın disk ile temas alanları olup gerçek alanın %15-20’si oluştururlar. Fren balatalarında temas bu platolar ile sınırlıdır. Sürtünme yüzeyinin sınırlı bir kısmı karşı yüzeyle gerçek temastadır. Gerçek temas alanı ise balata yüzeyi üzerindeki temas platoları içerisinde yer alan anlık alanlardır (gerçek temas alanı). Gerçek temas alanı platolarla karşılaştırıldığında çok küçüktür. Yükleme yüzeye dik olsa bile gerçek temas platoları disk/kampana yüzeyine teması engeller. Platonun boyutu ve bileşiminin balatanın sürtünmesinde çok önemli bir etkisi vardır (Eriksson and Jacobson 2000).

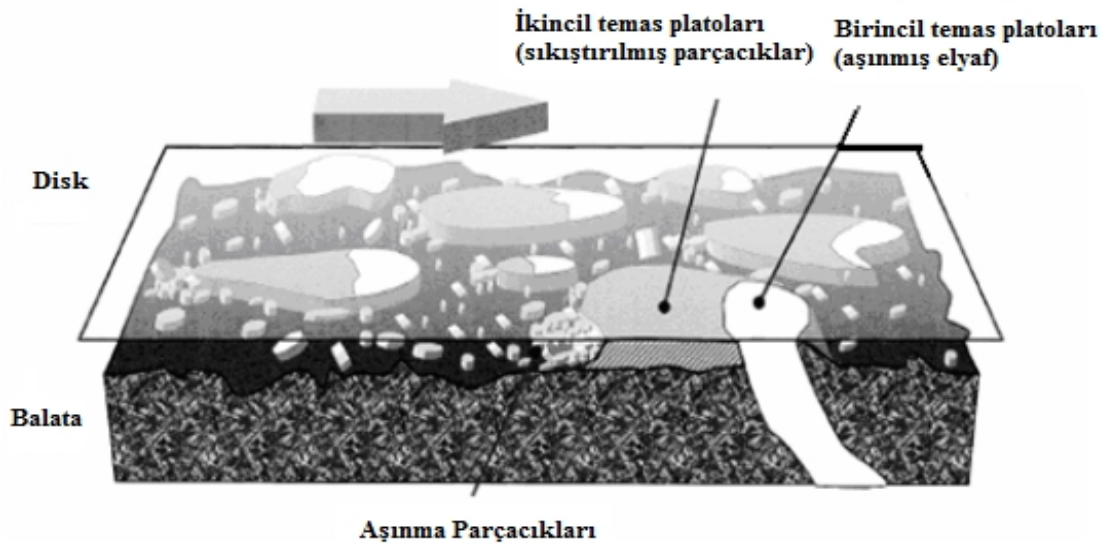


Şekil 2.4 Fren balatası, temas platoları ve anlık gerçek temas platoları (Eriksson and Jacobson 2000).

Ayrıca, temas durumu dinamiktir. Bir platonun yapısı bozulduğunda veya çöktüğünde değişimler çok hareketlidir. Aynı zamanda yüzeyden kopan parçanın büyük veya küçük olması da bu değişimlerde etkilidir (Eriksson *et al.* 2000).

Temas platoları birincil ve ikincil platolar olmak üzere iki kısımdan oluşur. Birincil platolar balatanın daha yüksek aşınma dayanımına sahip, mekanik olarak kararlı ve aşınmaya dirençli bileşenlerinden oluşur. Balata ve disk arasındaki kayma temasında aşınma parçacıkları bu iki yüzey arasındaki dar aralıkta yer alarak bu aralıkta hareket eder. Aşınma parçacıkları yer yer birincil platoların arkasına sıkışarak burada birikir ve ikincil platoları oluştururlar (Eriksson *et al.* 2000).

İkincil platoyu oluşturan aşınma parçacıkları normal kuvvet, kayma kuvveti ve sürtünme ısıyla sıkıştırılır. İkincil platolar, birincil platolardan sonra oluşurlar. İkincil platoların kopması veya aşınması nedeniyle bozulurlar. Ayrıca disk yüzeyindeki kirlenme ve düzensizlikler yoluyla ara malzemelerin aşındırmasıyla da ortadan kalkabilirler (Eriksson *et al.* 2000).



Şekil 2.5 Balata ve disk arasındaki temas durumunun şematik gösterimi (Eriksson *et al.* 2000).

2.5.2 Feyd (Zayıflama) Dayanımı

Fren feydi (fade) genellikle ağır frenleme şartlarında balatada meydana gelen yüksek sıcaklık sonucu fren etkinliğinin kaybolmasıdır. Bunun yanında beş tip fren feydi meydana gelebilir (Anderson 1992).

- Yükselen balata sıcaklığından dolayı (ısıl feyd)

- Soğuma sırasındaki reçine geçişi nedeniyle (gecikmiş feyd)
- Balatada yüzeye yakın gaz kabarcıklarının oluşması yüzünden (kabarcık feydi)
- Yüksek hız ve ağır yüklerde frenleme sonucu (flaş feydi)
- Yüzeye dışarıdan gelen su/yağ ile oluşan kısmi yağlama yüzünden (kirlenme feydi) meydana gelmektedir.

Sürtünme malzemesinin ısıl feydden sonra normal fren etkinliğini hızla yeniden kazanması yeteneğine feyd geri kazanımı denir. Fren diski/kampanası soğurken sürtünme seviyesi hızla feyd öncesi seviyesine dönmelidir. Gecikmiş feyd; bazı kampana fren balatalarında meydana gelebilecek bir olaydır. Feyd geri kazanımı sırasında fren etkinliği beklenmedik bir şekilde düşebilir. Bu durum geçici fakat dikkate değer bir fren pedal kuvveti artışı gerektirir. Gecikmiş feyd beklenmediği için tehlikeli bir olaydır. Genellikle herhangi bir ikaz işareti olmadan ağır bir fren kullanım periyodundan oldukça sonra meydana gelmektedir.

Yeni balatalar üretimden kalan uçucu maddeler ihtiva edebilirler. Bunlar alışma işlemi sonunda serbest kalmamışlarsa sert bir fren uygulaması sırasında oluşan hızlı ısınma sonucunda yüksek iç gaz basınçları meydana gelebilir. Bazı durumlarda yüzeye yakın kabarcıklaşma hızlı kısa bir fren etkinliği kaybı sonucunu doğurur. Kabarcık bölgelerinde yüksek temas basınçları ve çıkan gazlar yüzünden sürtünme kaybedilir. Kabarcık feydinin bir özelliği kısa süreli etkili olmasıdır. Fren etkinliği sert bir fren uygulaması sırasında birkaç saniye için kaybolur ve sonra hemen hemen normal seviyeye döner. Sert fren uygulamalarının tekrarı ikinci bir kabarcık feydi oluşturmayacaktır, çünkü uçucu maddeler yüzeye yakın bölgeden uzaklaşmıştır.

Flaş feydi kabarcık ve ham feyd ile ilgilidir. Genellikle sadece çok yüksek hızlarda ve çok yüksek fren güç seviyelerinde kabarcık feydi ve ham feyd ile ilgili olarak meydana gelen feyde flaş feydi denir.

Kirlenme feydinin oluşumunda balata veya disk/kampana yüzeyinde su, yağ veya bunların birlikte bulunması ara yüzeyde elastohidrodinamik sıvı filmi oluşturabilir ve bu durum, freni fiilen bir yatak haline getirir. Farklı sürtünme malzemeleri farklı

gözenekliliğe, uyum ve aşınma özelliklerine sahiptir. Bu yüzden yabancı maddelere karşı duyarlılık da oldukça farklı olabilir. Kampana frenleri gibi büyük sürtünme yüzey alanı olan frenler yabancı madde feydine daha eğilimlidirler (Arslan vd. 1997).

2.5.3 Hıza ve Ortam Şartlarına Duyarlılık

Balatanın sürtünme hızı değişimine karşı, balata malzemesinin tipi ve bileşimine bağlı olarak farklı sürtünme davranışı göstermesine hız duyarlılığı denir. Bunun yanında hız duyarlılığına sıcaklık, basınç ve daha önceki kullanım biçimi de etkili olmaktadır. Su, yağ, toz ve pas gibi kirleticiler fren etkinliğini değiştirirler. Düşük yağ toleransı ve yüksek duyarlılık sebebiyle hatta yağlı bir parmak izi bile önemli bir etkinlik değişmesine sebep olabilir (Arslan vd. 1997).

2.5.4 Yaş Sürtünme

Araç fren performansı ıslak olsa dahi emniyetli bir durum sergilemelidir. Disk ve kampana frenlerinin her ikisi de ıslak olduklarında büyük bir etkinlik kaybı gösterebilirler. Küçük bir parça yağ su ile beraber yağlama işlevini artırır. Islak olduğunda bazı sürtünme malzemeleri diğerlerinden daha büyük bir fren etkinliği kaybı verirler ve genellikle ıslandıktan sonra sürtünme yeteneğinin yeniden kazanılması için de epeyce uzun bir zaman gerekir. Nüfuz edilme, homojenlik ve basma rijitliği gibi bazı özellikler balatanın ıslak sürtünme davranışını tespit etmeye yardım eder (Arslan vd. 1997).

2.5.5 Nem Duyarlılığı

Sürtünme malzemesi özellik olarak gözenekli, elyaf takviyeli bir kompozittir. Bu yüzden bu malzemeler gece boyunca olduğu gibi araç uzun bir süre park edildiğinde atmosferdeki nemi emme yeteneğine sahiptirler. Emilen bu nemin bazı balatalarda fren etkinliğini geçici olarak değiştirdiği görülmüştür. Cam ve kevlar takviyeli balatalar nem etkisinde kaldığında sürtünme katsayısı artma eğiliminde, diğer malzemeler ise nemli ortamlarda sürtünmeyi azaltma eğilimindedir (Anderson 1992). Kampana balataları

yüksek nemli ortamlara açık kaldığında zamanla kalınlıkları değişmektedir (Arslan vd. 1997).

2.5.6 Oksit Etkisi

Nemden dolayı araç belli bir süre park ettiğinde dökme demir disk/kampana sürtünme yüzeyinin paslanarak balatanın tutunmasına sebep olmaktadır. Aksi çevresel şartlar altında da bazı sürtünme malzemelerinin dökme demirle pas bağı oluşturmaları mümkündür. Oluşan bu bağı koparmak için oldukça önemli büyüklükte bir moment gerekebilir. Pas bağından ayrı olarak disk/kampana paslanması da oluşabilir. Bu durumda fren etkinliği düşük hızlarda yüksek ve yüksek araç hızlarında düşüktür normale dönme eğilimindedir. Pasın etkili olup olmaması hem fren kullanım şartlarına hem de balata ve disk/kampana yüzeylerinin bağıl aşındırıcılığına bağlıdır. Balata içinde az bir aşındırıcı bileşen disk kampana yüzeyinde bölgesel olarak oluşmuş pasın uzaklaştırılmasında faydalı olabilir. Bu yüzden balata bileşeni içerisinde oluşan pasın kontrolü için katkılar bulunur (Arslan vd. 1997).

2.5.7 Etkinlik Değişimi

Bazı sürtünme malzemelerinin fren etkinliği geçmişteki kullanım şekli, kullanım süresi ve aşınma gibi etkilerin toplamıyla düşebilir. Bazı balataların yüzeyinde uzun süreli hafif şartlardaki kullanımı sırasında bir sır oluşması da etkinlik kaybı oluşturmaktadır. Aşınma ömrü iyi olan balatalar zayıf olan balatalardan daha kolay sır oluşturma eğilimindedirler (Arslan vd. 1997).

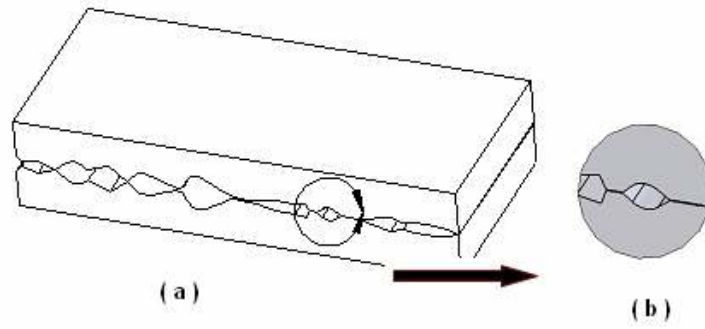
2.6 Sürtünme ve Aşınma

2.6.1 Sürtünmenin Önemi

DIN 50281'e göre sürtünme "Birbiri üzerinde kayan, yuvarlanan veya kaymalı yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan (Dinamik sürtünme) veya engelleyen (Statik Sürtünme) mekanik direnç" olarak tanımlanır.

Normal atmosfer şartlarında yüzeyler arasında toz, kir, oksit vb. gibi ara elemanların olması nedeniyle pratikte tam bir kuru sürtünme elde edilemez. Bundan dolayı yağlamasız olarak meydana gelen kuru sürtünme yerine “Teknik kuru sürtünme” terimini kullanmak daha doğrudur (Mutlu 2002). Birbirlerine temas eden parçalarda sürtünme, kinematik bakımdan kayma, yuvarlanma veya kayma+yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur.

Şekil 2.6’da (a)’da üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, diyagram büyütülerek gösterilen (b)’de ise yüzeysel yapışma noktaları görülmektedir.

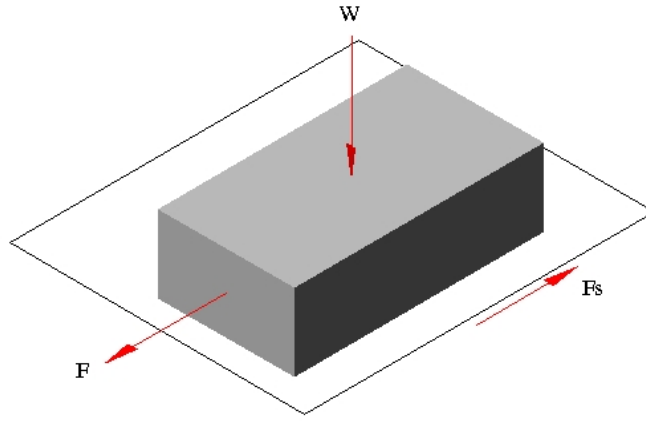


Şekil 2.6 Birbirlerine temas eden parçalarda sürtünme.

Sürtünmenin etkileri belirlendiğinden veya fonksiyonları kontrol edildiğinden beri her cihaz geliştirilirken sürtünme özellikleri dikkate alınarak cihazın ömrü ve verimliliği belirlenmektedir. Sürtünme olayı incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam madensel temiz yüzeye sahip olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi yüzeyler birbirleri ile pürüzlerinin tepelerinde temas etmektedirler. Böylece temas alanı çok küçük alanlardan meydana gelmektedir. Bu küçük temas alanlarının toplamı gerçek temas alanını oluşturur. Bu alan temas yüzeylerinin sınırlarını tayin eden geometrik alandan çok daha küçüktür. Sürtünme, faydalı iş enerjisinin büyük bir kısmını yutması ile birlikte günlük yaşamımızda sürtünme olmazsa birçok işin gerçekleştirilemeyeceği de bir gerçektir. Örneğin, yürüme olayından taşıtın hareket ettirilmesine, elimizle kalemi tutmamızdan gözümüzü kırpmamıza kadar temas halindeki yüzeylerin sürtünmesi söz konusudur (Halliday and Resnick 1999).

2.6.1.1 Sürtünme Kuvveti ve Katsayısı (μ)

TS 555'e göre, disk veya kampana ile disk veya kampana fren balatası arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı sürtünme katsayısı (μ) olarak tanımlanır. İki malzeme birbiri ile kuru temas edecek şekilde yerleştirilirse, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete ters yönde olacak şekilde bir sürtünme kuvveti (direnç) oluşur. Bu durum kuru sürtünme modeli olarak Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7 Kuru sürtünme modeli.

Şekil 2.7'de basit temas durumunda olan W ağırlığının düz ve yatay bir düzlem üzerinde hareketsiz bulunduğu varsayılabilir. Bu kütleye küçük bir F kuvveti uygulanırsa kayma olmadığı görülür, yani cisim hareketsiz halde kalır. Bu durum Newton kanununa göre temas alanında oluşan sürtünme kuvvetlerinin diğer anlamda statik sürtünmenin, uygulanan F kuvveti ile tamamen eşit ve bu kuvvete ters yönde olduğunu açıklar.

Sürtünme olayını açıklamaya çalışan birçok teori vardır. Bunlardan gerçeğe en yakın olanı Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisidir. Bu teoriye göre sürtünme iki temel faktörden kaynaklanmaktadır. Bunlardan birincisi kuvvetli adhezyondaki gerçek kontak bölgesinde oluşur. Bu bölgede kaynak bağlar meydana gelir ve bu bağların parçalanmasını sağlayan kuvvet F_s 'dir, diğeri ise sert yüzeydeki çıkıntıların yumuşak

olan yüzeyde sürtünme anında açtığı yol için harcadığı (S) kuvvetinin etkisidir (Bowden and Tabor, 1964).

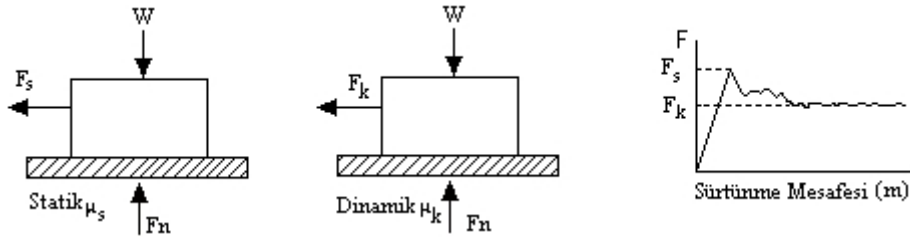
Toplam sürtünme kuvveti $F = F_s + S$ 'dir. Genellikle “S” kuvveti ihmal edilir ve böylece $F = F_s$ olarak yazılabilir. Sürtünme kuvvetleri uygulanan kuvvetlerin bileşkesine eşit ve ters yönde olur, böylece herhangi bir yatay hareket meydana gelmez. Buna göre bağlı hareket eden ve normal bir kuvvetin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

$$F_s = \mu \times W \quad (2.1)$$

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

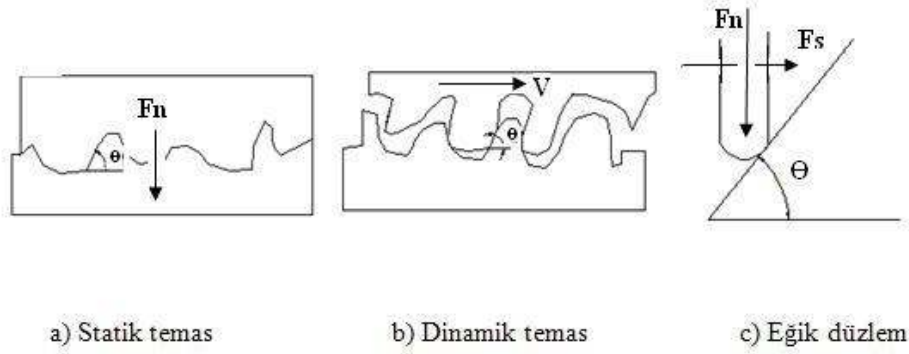
İlk mekanik sürtünme teorisini kuran Amontons Coulomb’un bulduğu temel sürtünme kuralları şunlardır (Halling 2000) :

- Sürtünme kuvveti, normal kuvvetle orantılıdır. Bu oran F_s / W 'nin sürtünme katsayısı (μ)' nı ifade ettiği ortaya çıkar $\mu = F_s / W$ olur.
- Sürtünme kuvveti, görünür nominal temas alanına bağlı değildir. Bu yüzden büyük ve küçük cisimlerin sürtünme katsayıları aynıdır ve sürtünme kuvveti kayma hızından (v) bağımsızdır;
- Üçüncü kuralda durum çok farklıdır, kaymayı başlatmak için gereken sürtünme kuvvetinin genellikle kaymayı sürdürmek için gereken kuvvetten büyük olduğu bilinir. Buradan iki sürtünme katsayısı olduğu teorisine varılır, bunlar statik sürtünme katsayısı (μ_s) ve kinetik sürtünme katsayısı (μ_k) dır. Statik ve dinamik sürtünme kuvveti ve katsayılarının oluşumu şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8 Statik ve Dinamik sürtünme katsayısının farklılıkları (Akkurt, 1999).

Sürtünmede en önemli faktör pürüzlerin etkileşmesidir. Buna göre sürtünme rijit yani deformasyona uğramayan pürüzlü noktaların teması sonucu meydana gelir. Şekil 2.9'da Coulomb'un sürtünme modeli görülmektedir.

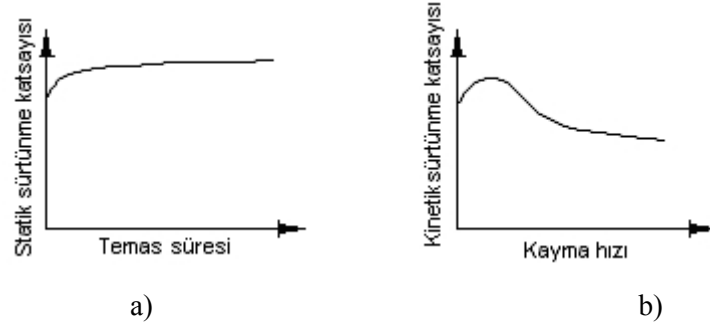


Şekil 2.9 Coulomb'un Sürtünme Modeli.

Burada F_s ; Sürtünme kuvvetini, F_n normal kuvveti ifade eder. Θ ise pürüzün taban açısıdır. Statik haldeki sürtünmenin dinamik sürtünmeden daha büyük olmasının sebebi temas başlangıcında yüzeylerdeki pürüzlerin birbirini tam kavramasına, dolayısıyla bu temasın bozulması için daha fazla sürtünme kuvveti gerektirmesine bağlanmaktadır. Dinamik sürtünme başladığında pürüzler birbiri üzerinden sıçrayarak hareket ettikleri için daha az sürtünme kuvveti gerektirir. Ayrıca yağlayıcı ara maddeler pürüz boşluklarını doldurarak, pürüzlülüğün etkisini, dolayısıyla sürtünmeyi azaltır (Tabor 2000).

Son araştırmalarda kinetik sürtünme katsayısının hız aralığının her noktasında hızın bir fonksiyonu olmasına karşılık, statik sürtünme katsayısının temas süresinin fonksiyonu

olduğu görülmüştür. Statik sürtünme katsayısı-zaman ve kinetik sürtünme katsayısı-hız bağıntısı Şekil 2.10' da grafik halinde görülmektedir (Karamış 1995).



Şekil 2.10 a) Statik sürtünme katsayısının zamana göre değişimi. b) Kinetik sürtünme katsayısının hıza göre değişimi.

Şekil 2.10' daki grafiklerde;

a- Statik sürtünme katsayısının zamana göre değişimi,

b- Kinetik sürtünme katsayısının hıza göre değişimi gösterilmektedir.

Kaymayı başlatan kuvvet F_s ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet F_n arasında $F_s = \mu_s \times F_n$ bağıntısı bulunur. Burada μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra sürtünme kuvvetinde bir azalma olur. Bu durumda $F_k = \mu_k \times F_n$ ilişkisi geçerlidir. Burada $\mu_k < \mu_s$ olur.

2.6.1.2 Balatalar İçin Sürtünme Katsayısı Standartları

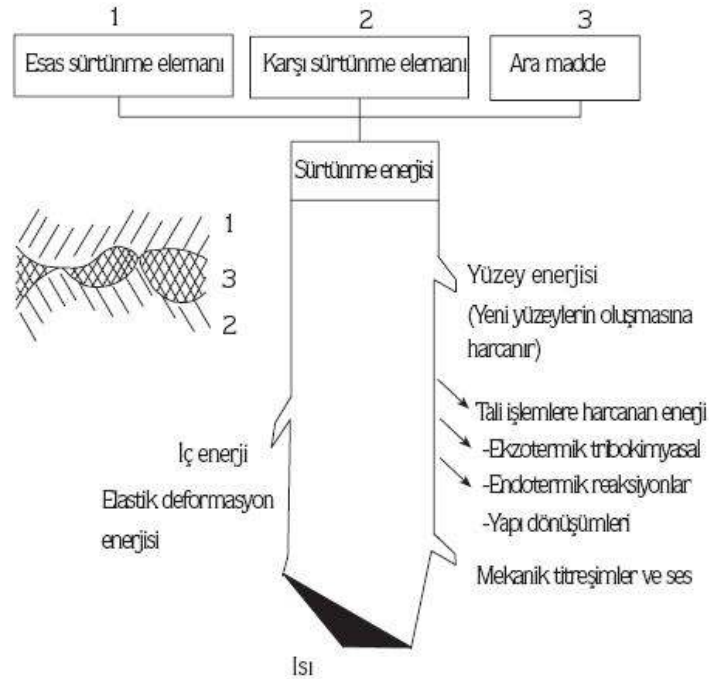
TS 555'e göre sürtünme katsayısı, soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Soğuk sürtünme katsayısı, 1050 kPa basınç altında aşınma deneyi esnasında 100, 150 ve 200 °C'de ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Sıcak sürtünme katsayısı ise, 300°C, 350°C ve 400 °C sıcaklıklarda ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Balata kalitesi TS 555 standartına göre sürtünme katsayısı aralıklarına göre belirlenmiş olup Çizelge 2.1'de sürtünme katsayısına göre balataların kalite sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 2.1 Sürtünme katsayısına göre balataların sınıflandırılması.

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

2.6.1.3 Sürtünme ve Isı Oluşumu

Tribolojik sistemler çevresi ile enerji ve kütle alışverişinde bulundukları için termodinamik bakımdan açık sistem olarak kabul edilirler (Czichos 1977). Tribolojik sisteme giren ve çıkan enerjiler arasındaki farka genel olarak "Enerji kaybı veya sürtünme enerjisi" adı verilmektedir. Bir tribolojik sistemde meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylara ait enerji dağılımı şekil 2.11' de görülmektedir (Uetz and Fölh, 1978).



Şekil 2.11 Sürtünme enerjisinin dağılımı.

Bu şekilden yaklaşık bir tahminle, sürtünme enerjisinin % 75-80'inin ısı enerjisine, % 4-5'inin kırılma enerjisine, % 4-5'inin mekanik titreşim ve ses enerjisine, % 7-8'inin iç enerji ve % 4-5'inin ise tribokimyasal reaksiyonlara, yapı dönüşümlerine, artık gerilmelere ve diğer bir takım tribolojik olaylara dönüştüğü anlaşılr. Sürtünme ısısı sürtünen elemanların temas yüzeylerinde sıcaklık artışı meydana getirerek malzemelerin mekanik ve metalurjik özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Quinn 1996).

2.6.2 Aşınmanın Önemi ve Türleri

Mekanik harekete bağlı olarak malzemede istenmeyen kopma şeklinde tanımlanan aşınma, sürtünme etkisinin de kaçınılmaz bir sonucudur. Aşınma sonucu birbiriyle çalışan yüzeyler arasında meydana gelen boşluklar çalışma sırasında istenilmeyen durumlara yol açarak o oranda da istenilen fonksiyonların yerine getirilmesini zorlaştırır (Gemalmayan 1984).

Birbirine göre bağıl hareket eden ve aynı zamanda temasta bulunan iki yüzeyden parçacıklar kopar. Kopan bu parçacıkların yüzeyden ayrılması ile aşınma oluşur. Mühendislik malzemelerinin ve makine elemanlarının ömürlerine bu aşınmanın büyük etkisi vardır. DIN 50320' de aşınma; cisimlerin yüzeylerinden mekanik etkenlerle mikro taneciklerin koparak ayrılması nedeniyle istenmeyen değişikliğin meydana gelmesidir şeklinde tanımlanmıştır (Kjeldsteen vd. 1995).

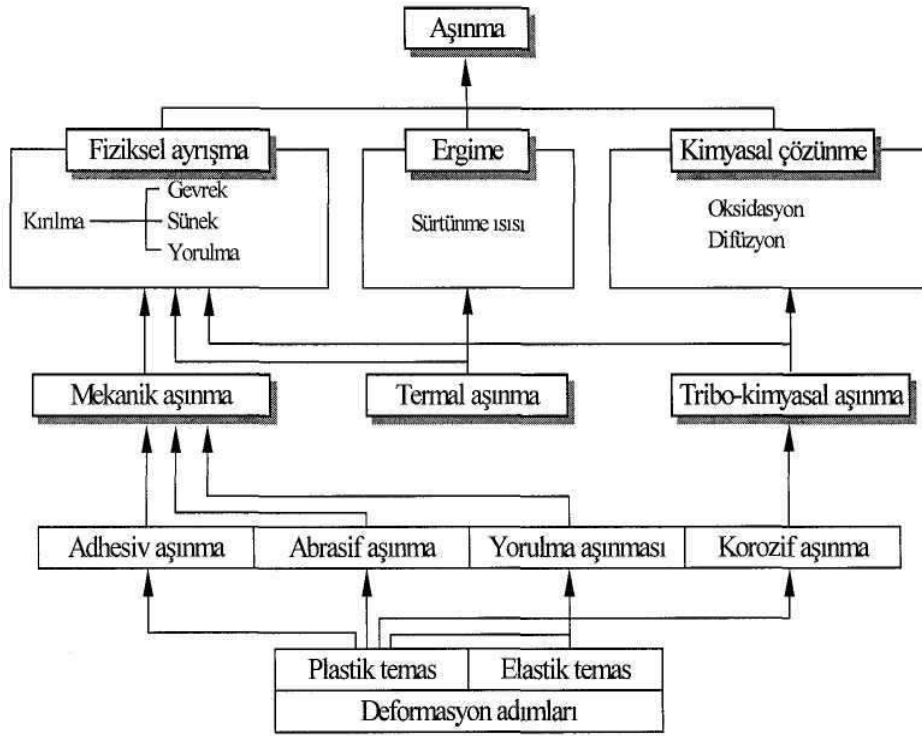
Aşınma mekanik, kimyasal veya elektro-kimyasal etkenlerin tribo-sistem içinde etkileşimleri ile meydana gelir. Aşınma sürtünme gerecinin sertleşmesi, oksitlenme, metal transferi, faz değişikliği, yağ ve kir filmleri gibi çok sayıda olaya bağlıdır. Pek çok malzeme çiftinin sürtünme katsayısı (μ), 0,1 ile 1 arasında değiştiği halde aşınma hızları farklılık göstermektedir. Mühendislik malzemelerindeki yıpranmanın aşınma sayılması için; a) Mekanik bir etkinin olması, b) Sürtünmenin olması, c) Yavaş fakat devamlı olması, d) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi, e) İsteğimiz dışında meydana gelmesi gerekir. Bu şartlardan biri sağlanmıyorsa oluşan yıpranma aşınma değildir (Tuç 2003).

Aşınmanın başlaması ve devam etmesi için sürtünmenin olması gerekeceğinden, Sürtünen iki yüzeyin temas alanına mekanik etkileşim alanı denir. Bu alanın aşınmaya etkisi büyüktür. Yüzeylerin gerçek temas alanı görünen temas alanından çok küçüktür. Çok hassas işlenen yüzeylerde dahi pürüz bulunur. Yüzeylerin etkileşimi bu pürüzlerin en üst noktalarındaki çıkıntılı kısımlarda oluşur. Pürüzlerin girintilerinde ise etkileşim yoktur ve temas alanı dışında kalır. Yükleme şekli ve değeri temas alanını, dolayısıyla aşınmayı etkileyen iki önemli unsurdur. Yükleme değeri arttıkça gerçek temas alanı da artar. İki cisim birbirine göre kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma veya çarpma hareketi yapabilir. Hareketin yönü ve miktarı aşınma miktarı ve cinsine etki eder. Ayrıca sıcaklığın da aşınma üzerinde büyük etkisi vardır (Halling 1983).

En yaygın bilinen aşınma durumu ‘kaymalı aşınma (sliding wear)’dır. Kaymalı aşınmada bir yüzey diğerinin üzerinde kayarken, tekrarlı kayma sonucu zaten malzeme yüzeyinin doğasından kaynaklanan pürüzlülükler dışında pürüzlü bir yüzey ya da malzeme yüzeyinde tepeler-çukurlar-yivler gibi oluşumlar görülür. Bu pürüzlülükler kaymanın devamı halinde yerlerinden ayrılarak ya sistemden uzaklaşır ya da kayma ara yüzeyine yerleşerek aşınma partikülleri olarak davranırlar (Staab 1999). Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerinin değiştirilmesinden etkilenmektedir (Mutlu 2002).

Aşınma türleri ve birbirleri arasındaki ilişki Şekil 2.12’de verilmiştir. Aşınma mekanizmaları genel olarak dört başlıkta incelenmektedir (Bhushan 2001).

1. Adhesiv aşınma
2. Abrasif aşınma
3. Yorulma aşınması
4. Korozyon aşınması



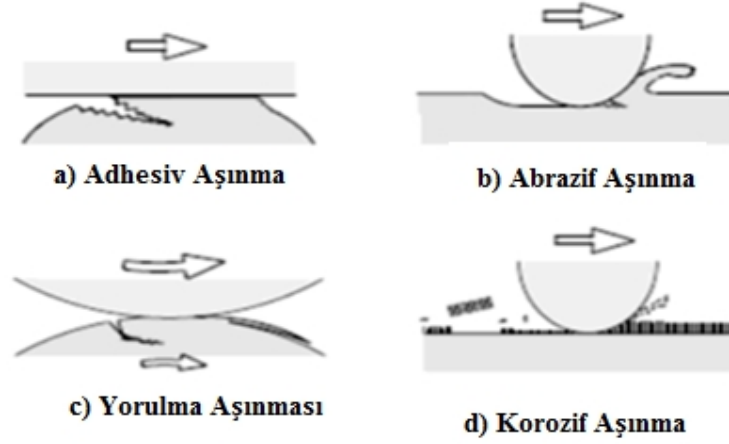
Şekil 2.12 Aşınmayı tanımlayıcı anahtar kelimeler ve birbirleri ile etkileşimleri (Bhushan 2001).

Adhesiv ve abrazif aşınma modları plastik temas altında oluşmaktadır. Benzer metaller arasında plastik temas durumunda, temas ara yüzeyi adhesiv bağlanma kuvvetine sahip olacaktır. Malzemenin temas ara yüzeyinde meydana gelecek hasar eğer ki güçlü adhezyon sonucu oluşuyorsa bu tür aşınma mekanizmasına adhesiv aşınma adı verilir.

Sert ve keskin malzeme ile ona göre daha yumuşak sayılabilecek bir malzeme arasında meydana gelen plastik temas durumunda, sert olan malzeme daha yumuşak olan malzemenin yüzeyine batacak ya da içine penetre olacaktır. Malzemede oluşacak çatlak ya da hasar gibi bu sert faz partiküllerinin karşı malzeme yüzeyinde oluşturacakları mikro-yarıklar ya da mikro-çatlaklar şeklindeki aşınmaya abrazif aşınma denir. Yorulma çatlağı oluşumu tekrarlı sürtünme çevriminde meydana gelmektedir. Aşınma yüzey hasarının yorulma mekanizması ile meydana geldiği bu aşınma türüne ise yorulma aşınması denmektedir.

Yorulma aşınması ve korozif aşınma hem plastik hem de elastik temas şartlarında meydana gelmektedir. Şekil 2.13' te gösterilen adhesiv, abrazif ya da yorulma

aşınmalarındaki malzeme kaybı, temastaki deformasyon ve kırılma ile meydana gelmektedir. Bu kırılmalar mekanik olarak meydana gelen gerilmelerle üretilir ki bu tür aşınmalar genel olarak mekanik aşınma başlığı altında toplanır (Bhushan 2001).



Şekil 2.13 Dört başlıkta incelenen aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Bhushan 2001).

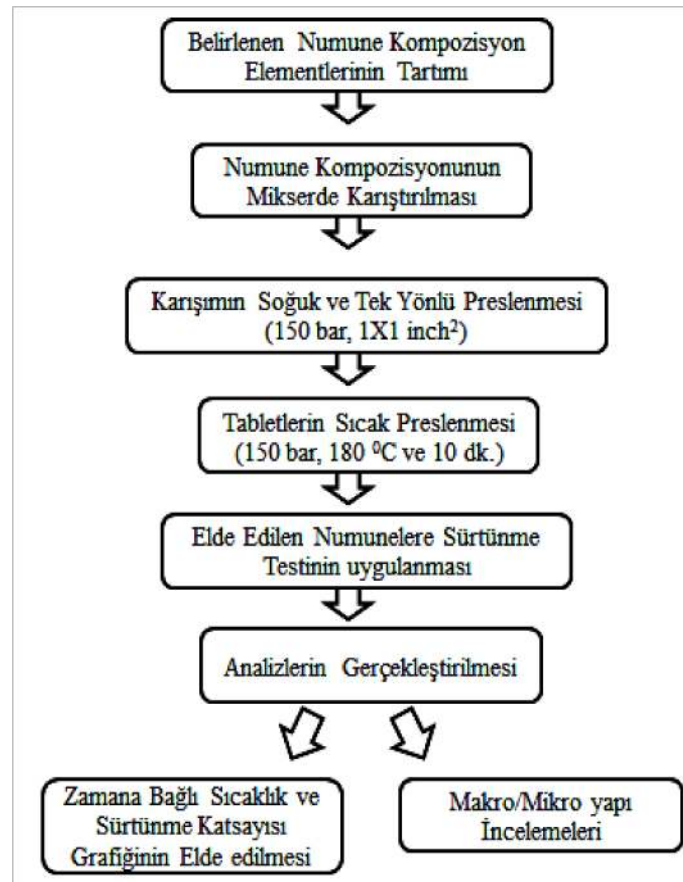
Korozif ortamlarda, temas ara yüzeyinde tribokimyasal reaksiyonlar hızlandırılır. Korozif bir ortamda tribokimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyden malzeme kaybı korozif aşınma ile tanımlanmaktadır. Korozif aşınmada yüzeyden malzeme uzaklaşması, aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyon filminin oluşumu ile gerçekleşir ki bu filmin oluşumu, sürtünmesel deformasyon, sürtünme ısı ve oluşan mikro çatlaklar ile aktive edilip hızlandırılır. Hava da baskın olan korozif madde oksijen ise böyle bir ortamda metallerde meydana gelen tribo kimyasal aşınma da oksidatif aşınma olarak adlandırılır (Bhushan 2001).

2.7 Amaç ve Kapsam

Frenler taşıtın hareketini güvenilir şekilde kontrol altında tutan sistemlerdir. Fren balatalarından asgari sürtünme ve aşınma değerlerini sağlaması, insan sağlığı ve çevre için zararlı olmaması, aynı zamanda ekonomik olması beklenmektedir. Bu çalışmada, balata kompozisyonu içine elyaf malzeme olarak farklı boyutlarda ve kütle oranlarında katılan karbon elyaf ile toz karbon katkılı fren balataları üretilerek sürtünme testleri uygulanmıştır, testler sonucunda elde edilen sürekli frenleme performanslarına göre karbon elyafın balata özelliklerini olumlu yönde değiştirmesi açısından etkileri incelenerek değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

Taşıt fren sisteminde kullanılmak üzere üretilen karbon elyaf katkılı balataların bileşim oranları, balata numunelerin üretiminde kullanılan cihaz ve tezgahlar, numunelerin üretim süreci ve performans karakteristiklerini belirlemede uygulanan analiz teknikleri aşağıda açıklanmıştır. Bir balata numunesinin üretimi, sürtünme testi ve mikro yapı analiz çalışmaları sırasındaki takip edilen iş sırası Şekil 3.1’ de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deney numunelerinin üretimi, sürtünme testi ve mikro yapı analizi şeması.

3.1 Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi

Kompozit üretiminde karşılaşılan en büyük problem, kompozisyonu oluşturan malzemelerin matris içerisindeki homojen dağılımını sağlamak ve takviye malzemesi ile matris ara yüzey bağına arttırmaktır (Şahin vd 2002). Karıştırma şekli ve süresi, bu

malzemelerin matris içerisindeki dağılımını, tozların boyutunu ve diğer bazı özelliklerini belirlemede etkili olmaktadır (Yetgin vd. 2005). Karıştırma işlemi heterojen karışım oluşumunu (segregasyonu) önlemek açısından çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Segregasyonu önlemek için karışıma genellikle yağlayıcı (grafit gibi) eklenir (Kuhn and Lawley 1978). Düşük viskoziteye sahip olan toz veya sıvı (sıvı reçine gibi) komponentlerin homojen karışması için karıştırıcı kollar ile kesici bıçakların birlikte karıştırma işlemini gerçekleştirmesi gerekir (Oehl and Paul 1990). Karıştırma işleminin tipi yoğunlukla karışımı oluşturan malzemelerin türüne bağlıdır. Özellikle yoğunlukları, partikül boyutları ve bazen yüzey karakteristikleri ve şekilleri önemli farklılıklar gösteren toz bileşenlerde karıştırma işlemi zor olabilmektedir (Mutlu 2002).

Kompozitlerin tribolojik özelliklerindeki iyileşme kompozit formülasyonu, üretim ve çalışma parametrelerine bağlıdır (Washabaugh 1987). Yapılan çalışmalarda yüksek performanslı sürtünme malzemesini güçlendirme işlemleri olarak, teorik yoğunluğun artırılması ve poroziteyi yok etmek için çeşitli sıcak yoğunlaştırma (densifikasyon) işlemleri yapılmaktadır (Youssef 1989). Balatanın bileşimindeki malzemelerin homojen dağılımı yapıldıktan sonra balatanın yoğunluğunu presleme basıncı belirleyeceği için sürtünme performansında önemli rol oynamaktadır. Sonuç olarak 15MPa (150 bar) sıcak presleme (pişirme) basıncı uygulamanın yapılacak çalışmalarda uygun bir değer olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda pişirme basıncı 15MPa alınmıştır.

3.2 Deney Numunelerinin Üretilmesi

Bu çalışmada otomobil fren sisteminde kullanılan balata malzemesinin sürtünme performansına karbon elyaf takviyelerin etkisi incelenmiştir. Farklı içeriğe sahip deney numunelerinin üretimi esnasında malzeme oranlarını belirlemede kütsel oran esas alınmıştır. Karbon elyaf takviyeler numune içerisine farklı uzunlukta ve farklı oranlarda katılmıştır. Kullanılan karbon elyaf uzunluğuna ve kompozisyonundaki oranına göre numuneler kodlanmıştır.

3.2.1 Numune İçeriğinin Belirlenmesi

Üretilen numune balatalar asbestsiz organik balatalar NAO (non asbestos organic) grubunda olup polimerik bağlayıcı ve üretim metoduna göre sıcak presleme yoluyla üretilmiştir.

Üretilen tüm balatalarda bağlayıcı olarak fenolik reçine, metalik katkı olarak bakır, pirinç talaşı ve çelik yünü, seramik katkı olarak alümina (Al_2O_3), katı yağlayıcı olarak grafit, takviye malzemesi olarak karbon elyaf, sürtünme düzenleyici olarak toz karbon, dolgu malzemesi olarak cashew dust kullanılmıştır. Karbon elyaf iplikler Resim 3.1’de görölmektedir.

Her numunede 100 gram kompozisyon için ortak sabit bileşen olarak 20g fenolik reçine, 10g çelik fiber, 7,5g cashew, 5g bakır, 3g alümina (Al_2O_3), 7g grafit, 2,5g pirinç talaşı, değışken bileşen olarak ta karbon fiber ve toz karbon kullanılmıştır. Karbon fiber ve toz karbonun içerik içinde toplam miktarı 45g’ dır. Ancak bu iki bileşen balata içeriğine toplam miktarı değıştirilmeden, değışik miktarlarda katıldığında, kompozisyon bileşiminin farklı olmasını sağlamaktadırlar.



Resim 3.1 Karbon elyaf iplik.

Numunelerin üretimi için belirlenmiş olan içerik listesi ve oranları Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Numunelerin üretimlerinde kullanılan bileşenler ve kompozisyonadaki gram olarak kütlese % miktarları.

BİLEŞEN	2005	2010	2015	2020	2025
Karbon elyaf (20mm)	5	10	15	20	25
Toz karbon	40	35	30	25	20
Çelik fiber	10	10	10	10	10
Bakır	5	5	5	5	5
Alümina (Al_2O_3)	3	3	3	3	3
Pirinç talaşı	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Grafit	7	7	7	7	7
Cashew dust	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Fenolik reçine	20	20	20	20	20
TOPLAM	100	100	100	100	100

BİLEŞEN	3005	3010	3015	3020	3025
Karbon elyaf (30mm)	5	10	15	20	25
Toz karbon	40	35	30	25	20
Çelik fiber	10	10	10	10	10
Bakır	5	5	5	5	5
Alümina (Al_2O_3)	3	3	3	3	3
Pirinç talaşı	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Grafit	7	7	7	7	7
Cashew dust	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Fenolik reçine	20	20	20	20	20
TOPLAM	100	100	100	100	100

BİLEŞEN	4005	4010	4015	4020	4025
Karbon elyaf (40mm)	5	10	15	20	25
Toz karbon	40	35	30	25	20
Çelik fiber	10	10	10	10	10
Bakır	5	5	5	5	5
Alümina (Al_2O_3)	3	3	3	3	3
Pirinç talaşı	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Grafit	7	7	7	7	7
Cashew dust	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Fenolik reçine	20	20	20	20	20
TOPLAM	100	100	100	100	100

Bu bileşenler hassas terazide tartılarak numunelerin kompozisyonları oluşturulmuştur. Numunelerin hem üretiminin hem de sürtünme deneylerinin ve diğer fiziksel testlerin sonuçlarının daha güvenilir ve doğru çıkması bakımından 15 adet balata numunesinin her birinden aynı bileşimde olacak şekilde 3'er adet üretilmiştir ($15 \times 3 = 45$ adet).

3.2.2 Numunelerin Kodlanması

Karbon elyaf katkısı 20 mm, 30 mm ve 40 mm'lik uzunluklarda kesilerek 3 grup içerik oluşturulmuş ve her bir grupta karbon elyafın kompozisyona kütleli % oranı olarak katılma miktarları %5, %10, %15, %20, %25 olacak şekilde 5'er adet alt kompozisyonlar oluşturulmuştur. Bu şekilde üç grupta farklı içerik oranlarına sahip toplam 15 adet farklı numune hazırlanmıştır. Numune balataların üretimi 3 farklı grup olarak düşünülmüştür. Birinci grupta 20 mm karbon elyaf ve toz karbonla birlikte belirlenen diğer bileşenler seçilmiştir. İkinci grupta 30 mm karbon elyaf ve toz karbonla birlikte belirlenen diğer bileşenler seçilmiştir. Üçüncü grupta ise 40 mm karbon elyaf ve toz karbonla birlikte belirlenen diğer bileşenler seçilmiştir.

20mm boyutundaki karbon fiber katkılı olan numuneler 20 başlangıç rakamıyla, 30mm boyutundaki karbon fiber katkılı numuneler 30 başlangıç rakamıyla, 40mm boyutundaki karbon fiber katkılı numuneler 40 başlangıç rakamıyla kodlanmış olup, karbon fiberin içerik içindeki kütleli miktarını belirten rakamlar da yukarıda açıklanan rakamların yanına eklenerek numunelerin isim kodları oluşturulmuştur. Çizelge 3.1' de görülen içeriklerle numuneler üretilmiştir.

3.2.3 İçerik Karıştırma Süresinin Belirlenmesi

Her bir formüldeki farklı balata içeriğini oluşturan malzemeler hassas terazi ile tartıldıktan sonra oluşturulan karışımın homojenliğini sağlamak için numune içeriği Resim 3.2'de gösterilen karıştırıcıda yeterli sürede karıştırılmıştır. İçeriği oluşturan bileşenler toz denilebilecek kadar küçük partiküller halindedirler. Fakat karbon elyaf toz olmayıp, şerit levha şeklinde olduğundan homojen karışım oluşturmada zorlukla karşılaşmıştır. 10 dakika olarak belirlenen standart karıştırma süresi içerikteki karbon

elyaf uzunluğunun ve oranının artmasıyla birlikte, kompozisyonun homojenliğini sağlamada yeterli olmamıştır ve bu yüzden kademeli olarak arttırılarak 25 dakikaya kadar çıkarılmıştır. 20 mm’lik karbon elyaflı içerik 15 dakika, 30 mm’lik karbon elyaflı içerik 20 dakika, 40 mm’lik karbon elyaflı içerik 25 dakikalık süreyle ve karbon elyaflar yün kıvamına gelinceye kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır.



Resim 3.2 Toz karıştırma mikseri.

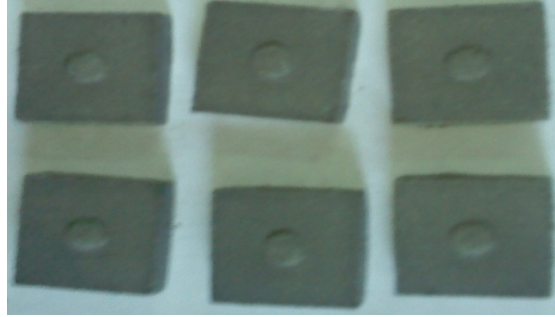
3.2.4 Komprime (Soğuk Presleme)

Belirlenen miktarlarda tartılarak hazırlanan karışım soğuk presleme için Resim 3.3’ de gösterilen komprime kalıbına doldurulmuştur. Hassas olarak tartılan ve homojen olarak karıştırılan numune karışımları 1 inch²’lik kare kalıpta 150 bar basınç altında 1 dakika süre ile hidrolik pres yardımıyla tek yönlü olarak soğuk preslenmiştir. Bu karışım, soğuk presleme (ön şekillendirme) kalıplarına balatanın üretimi tamamlandığındaki hacmi dikkate alınarak uygun miktarda doldurularak preslenir.



Resim 3.3 Deney numunelerinin üretildiği soğuk presleme kalıbının görünüşü.

Bu presleme sonrası kalıplardaki soğuk sıkıştırılmış malzemelerin çıkarılabilmesi için dişi kalıbın alt tablası çıkarılmış erkek kalıp ile dişi kalıbın üzerine düşük yük uygulanmış ve dişi kalıbın altından numune malzeme taşımak için hazırlanmış olan sac levhaların üzerine alınmıştır. Bu çıkarılan malzeme Resim 3.4’ de görüldüğü gibi tablet haldedir. Tablet haldeki malzeme soğuk presten çıkarılırken, taşınırken ve pişirme için sıcak pres kalıplarına konulması sırasında oldukça çabuk dağılma gösterir. Soğuk presleme kalıplarının kalıp derinliği 8-10 cm civarındadır.



Resim 3.4 Soğuk pres ile imal edilen balata resimleri.

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

3.2.5 Pişirme (Sıcak Presleme)

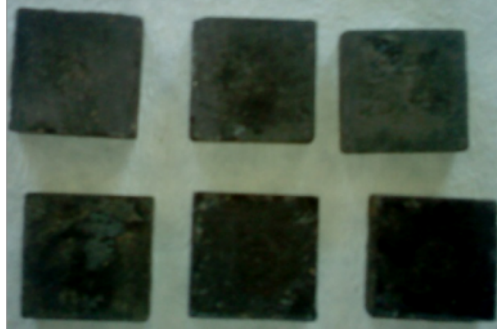
Soğuk presleme işleminden sonra tablet haldeki numuneler pişirme işlemi için sıcak presleme kalıplarına yerleştirilmişlerdir. Sıcak presleme kalıbı Resim 3.5'te verilmiştir. Numunelere sıcak presleme sırasında 14715 KPa (~150 bar) basınç uygulanmıştır. Pişirme presindeki kalıplar alt ve üst tablalardan elektrik enerjisi kullanılarak ısıtılmıştır. Pişirme presi 250°C' ye kadar ısıtma kapasitesine sahip olup sıcaklık kontrolü ± 5 °C toleransla termostat ile yapılmaktadır. Deney numuneleri ~180 °C sıcaklıkta 10 dakika pişirilmiştir. Her bir mm kalınlık için ~1 dakika pişirme süresi uygulanmıştır. Bu pişirme süresinin ilk % 60'lık kısmında her 30 saniyede bir, pres kalıpları açılarak havalandırma işlemi yapılmıştır. Bu sıcaklık neticesinde balata bileşenlerinin oluşturduğu reaksiyonlar sonucu meydana gelen buharların komponentten dışarı atılması sağlanmıştır. Böylece söz konusu buharların balatada oluşturabileceği kılcal çatlamlar, boşluklar ve bir takım olumsuz deformasyonlar önlenmiştir. Yine burada pişirme ve presleme sonrası balataların kalıptan parçalanmadan kolay bir şekilde çıkarılmasını sağlamak amacıyla sıcak kalıplara granül sabun sürülmüştür.



Resim 3.5 Deney numunelerinin üretildiği sıcak presleme kalıbı.

Sıcak presleme kalıpları soğuk presleme kalıplarından oldukça farklıdır. Numunelerin üretildiği pres tabla yüzey boyutu 50x50 cm olduğu için üretilmesi düşünülen balata

boyutuna göre birden çok balata pişirilebilmektedir. Ayrıca sıcak presleme kalıplarının derinliği, üretilecek olan numune balatanın kalınlığı dikkate alınarak belirlenmektedir.



Resim 3.6 Sıcak pres ile imal edilen balata resimleri.

Sıcak presleme sonucunda elde edilmiş numuneler sürtünme testi cihazına uygun boyutlara getirilmiştir. Resim 3.6’da sıcak presleme ürünü numuneler gösterilmiştir. Resim 3.7’de ise soğuk ve sıcak presleme özelliklerine sahip hidrolik pres cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.7 Soğuk/sıcak hidrolik pres cihazı.

3.3 Deney Numunelerinin Teste Hazırlanması

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

Tüm numuneler deney düzeneğindeki numune balata için açılmış olan balata yuvası ölçülerine getirilirken kesme ve zımparalama yöntemleri kullanılmıştır. TS 9076’da “deney numunelerinin boyutları en ve boy 25,4x25,4 mm, kalınlık 5-8 mm eşit kalınlıkta olacak şekilde hazırlanır ve sürtünen yüzeylerde hiçbir işaret bulunmamalıdır” ifadesi bulunmaktadır (TS 9076, 1991). Üretimi yapılan test cihazının numune yuvası da yukarıda belirtilen ölçülere uyumlu olarak boy ve en 25,4×25,4 mm olarak

yapılmıştır. Numunelerin kalınlığı ise 3 mm'si numune yuvasına gireceği ve 6 mm'si dışarıda kalacağı dikkate alınarak toplam 9 mm olarak hazırlanmıştır. Balataların, balata tutucu piston takılabilmesi için 1 inç² (25,4×25,4 mm) boyutlarına getirilen balata numuneleri kullanılmıştır. Resim 3.8'de balata tutucu piston görülmektedir. Balata malzemesi şekildeki parçanın orta kısmında bulunan 3mm derinliğindeki alana sıkı geçme yapılarak tutunma sağlanır.



Resim 3.8 1 inçlik balata tutucu piston.

Numunelerin Sürtünme testleri için Afyon Kocatepe Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği laboratuvarında bulunan fren balatası test cihazı kullanılmıştır. Deney öncesinde numunelerin üç ayrı noktadan kalınlık ölçüleri alınmış ve tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Sürtünme deneyi sonrasında da numunelerin kalınlıkları üç ayrı noktadan ölçülerek alınmış ve ağırlıkları tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Deney öncesi ve sonrasında alınan kalınlık ölçülerinin aritmetik ortalamaları alınmış ve kalınlık kayıpları belirlenmiştir. İşlem öncesinde üzerindeki yabancı maddelerden arındırılması için numuneler etil alkol ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Program vasıtasıyla sürtünme katsayısı ve sıcaklık değerleri oluşturulmuştur. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak her numune için sürtünme katsayısı-sıcaklık-zaman grafiği oluşturulmuştur.

3.4 Deney Şartları

TS 9076'da belirlenen şartlara uygun şekilde alıştırma aşamasında 0,7 MPa (7 bar) basınç altında, 15 dakika (900 s) süreyle, gerektiğinde soğutma yapılarak 200°C 'de

yüzey teması en az %95 oluncaya kadar sürekli olarak yapılmıştır. Sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimini belirleyebilmek için 0,551 MPa (5,51 bar) basınçta orta hız değeri olarak kabul edilen 7 m/s’ de 90 dakika (5400 s) süre ile deneyler yapılmıştır. Deneyler 3 kez tekrar edilmiş olup sıcaklık ve sürtünme katsayısı değerlerinin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Üretilen numunelerin frenleme karakteristiği, aşınma direnci ve sürtünme katsayısının belirlenmesi için deneyler aşağıdaki işlem sırasına göre gerçekleştirilmiştir;

Numunelerin deney şartları:

- 1.Tüm deneylerde deney başlangıç sıcaklığı 40°C olarak alınmıştır.
- 2.Bütün numuneler 15 dakika (900s) süresince, 0,7 MPa basınç altında ve 7 m/s hızda sürekli sürtünmeye tabi tutularak balata yüzeyinin %95’i fren diskine temas edinceye kadar alıştırma işlemi yapılmıştır. Bu işlemler esnasında TS 9076’da belirtildiği gibi zımparalama, temizleme ve soğutma işlemleri gerçekleştirilmiştir.
- 3.Sürtünme katsayısı-sıcaklık değişimi 0,551 MPa basınç altında ve 40 °C’den 400 °C sıcaklığa kadar 5400 saniye süresince her saniyedeki değerler bilgi kütüğüne kaydedilerek belirlenmiştir (FAST-Friction Assessment and Screening Test).
- 4.TS 555’te balataların aşınma dirençlerini belirlemek amacıyla özgül aşınma için aşınma deneyinde kütleli fark metodu seçilerek elde edilen değerler TS 555’te belirtilen hesaplama yolu ile hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.1 de verilmiştir.
- 5.Balataların aşınma miktarının belirlenmesinde deneyler 0,551 MPa basınç altında 7 m/s hızda yapılmıştır. Bu deney sonunda her bir numune balata hassas terazide tartılarak kütle kaybı tespit edilmiştir. Çizelge 3.2’ de sürtünme deneyi şartları verilmiştir.

Çizelge 3.2 Sürtünme deneyi şartları.

Test Türü	Motor Devri (dev/dak)	Basınç (bar)	Süre (saniye)	Alan (mm ²)	Sürtünme Hızı (m/s)
Ön Alıştırma Sürtünmesi	717	7 - 10,5	900	645,16	7
Sürtünme Testi	717	5,51	5400	645,16	7

3.5 Deney Düzenekinin Tanıtılması

TS 555 ve TS 9076’da belirtilen şartlara uygun olarak deneylerin yapılabilmesi için bir deney düzeneği üretilmiştir. Daha önce bu konuda yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak deney düzeneğine bir takım aparatlar ve ölçü aletleri konulmuştur. Balataların, farklı devir, sıcaklık, basınç vb. gibi faktörlerin etkisinde sürtünme katsayısı incelenebilmektedir. Fren balatası test cihazı ile sürtünme katsayısı-sıcaklık, sürtünme katsayısı-zaman, sıcaklık-zaman grafiklerini oluşturmak mümkündür (Sugözü, 2009).

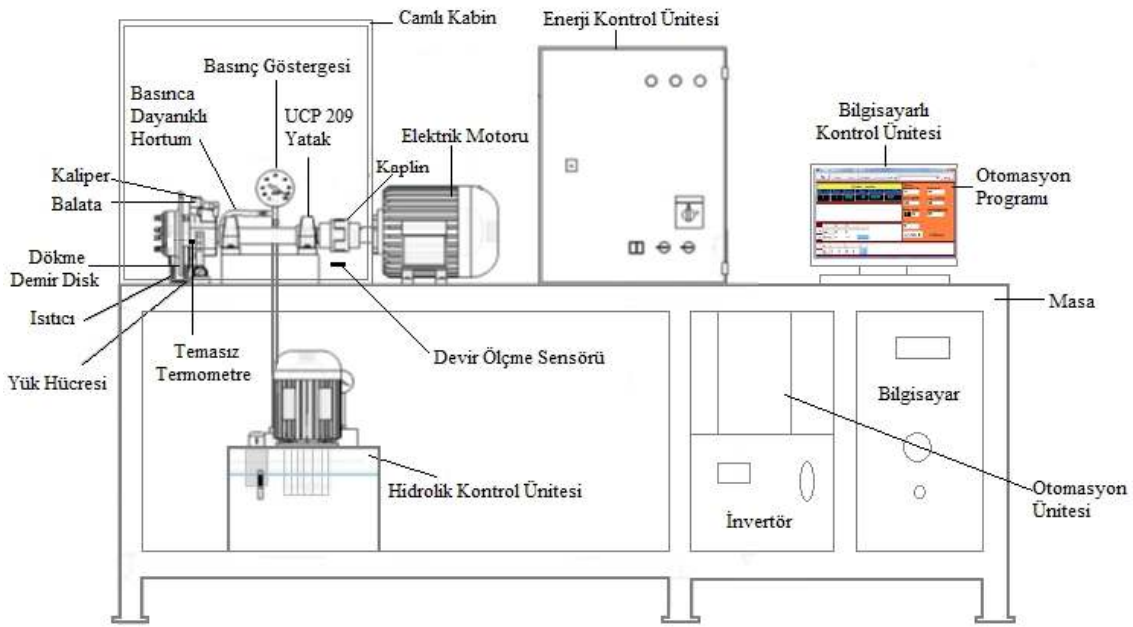
Resim 3.9’ da görülen sürtünme katsayısı test cihazında diski döndürmek için 5.5 kW gücünde 1400 dev/dak trifaze elektrik motoru seçilmiştir. Elektrik motorundan elde edilen hareketin iletilmesi için Ø 30 mm’lik transmisyon miline ihtiyaç duyulmuştur. Bu mil üzerine iki adet UCP 209 yatak yerleştirilerek milin salınımının engellenmesi amaçlanmıştır.



Resim 3.9 Fren balatası test cihazı.

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

Sistemde bulunan hidrolik ünite sayesinde fren diskine istenilen değerlerde basınç uygulanabilmektedir. Deneyler esnasında basınç düzensizliğini önlemek ve basıncı istenilen değerde sabit tutmak için piston ile hidrolik motor arasına basınç kontrol valfi yerleştirilmiştir. Kontrol paneli göstergesindeki kuvvet kısmına girilen değerler ile hidrolik ünite devreye girmekte üzerine üretilmiş balata takılı fren pabuçlarını diske doğru itmektedir. Fren balatası test cihazının şematik görünüşü ise Şekil 3.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Fren balatası test cihazının şematik görünüşü.

Disk dönmeye başladığında disk ile kaliper pistonunun uç kısmına takılan numune balata parçası diskin dönmesi sırasında fren balatasına uygulanan basınçtan doğan sürtünme kuvveti yüzünden balatanın da disk ile beraber dönme isteği dikkate alınarak bu döndürme kuvveti elektronik olarak yük hücresi vasıtasıyla ölçülmektedir. Disk ile balata yüzeyi arasındaki yüzey basıncına bağlı olarak sürtünme kuvveti dolayısıyla döndürme momenti de değişmektedir. Kaliper pistonunun ucuna takılı balata numunesi disk ile birlikte dairesel olarak dönmek isteyecektir. Numune balata ile diskin bu dairesel dönme hareketi, yük kolunun ucuna yerleştirilmiş olan bir mil ile yük hücresinin yük algılama ucuna baskı uygular. Algılanan bu baskı kuvveti değerleri fren balatası test cihazının bilgisayar kontrol paneline aktarılmaktadır. Böylece dönme

sırasında balata ile fren diski arasındaki sürtünme kuvveti F_s değeri elde edilmiş olmaktadır.

Farklı yüzey basınçlarında yük hücresi ekranından okunan değer ve moment kolu dikkate alınarak program tarafından otomatik olarak belirlenen sürtünme katsayısı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Timur 2007).

$$F = P \times A \quad (3.1)$$

P = Basınç (kg/mm^2)

A = Balata alanı (mm^2)

$$\mu = \frac{F_s \times L}{F} \quad (3.2)$$

μ = Sürtünme katsayısı

F_s = Yük hücresinden okunan kol kuvveti (kg)

L = 1,64 (Cihaz sabiti)

3.5.1 Bilgisayar Programı

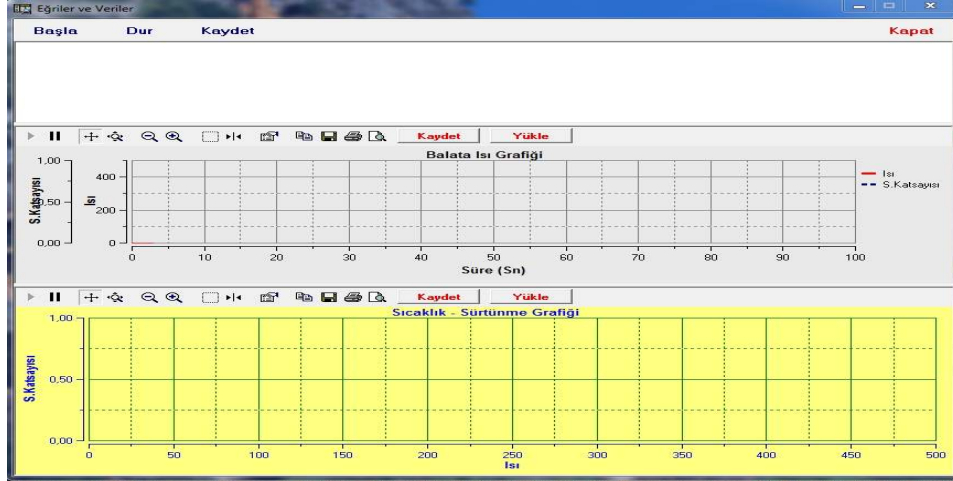
Fren balatası test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan süre, kuvvet, devir, moment farkı ve alan değerleri girildikten sonra kontrol paneli üzerinde bulunan başlat düğmesine basılarak sistem çalışmaktadır. Süre değeri dakika olarak işlemektedir.

Deneyin süresi, süre kısmına girilerek istenilen zaman dilimi içerisinde cihazın otomatik olarak durması sağlanmaktadır. Devir göstergesi kısmına girilen devir değeri ile istenilen devirlerde deneyler yapılabilmektedir. Resim 3.10'da fren balatası test cihazının bilgisayar kontrol paneli görülmektedir.



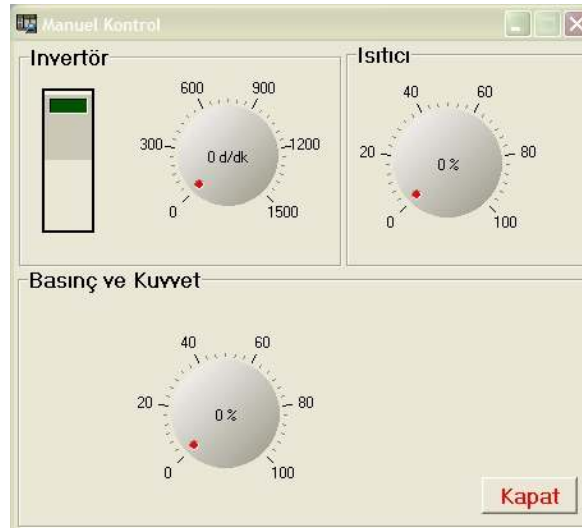
Resim 3.10 Fren balatası test cihazı otomatik kontrol paneli.

Fren balata test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan eğri başlat ikonu işaretlenmişse deney sırasında bilgisayar ortamına aktarılan verilerin grafikleri otomatik olarak çizilmektedir. Otomatik olarak çizilen grafiklere kontrol paneli üzerindeki eğriler kısmından ulaşılmaktadır. Programın, grafikleri otomatik olarak çizmesi istenmiyorsa deneyler esnasında elde edilen veriler metin dosyası olarak kaydedilmekte ve Excel programına aktarılmaktadır. İstenildiği zaman deneylerden elde edilen grafiklere, kontrol paneli eğriler kısmından yükle ikonu tıklanarak bir önceki grafikler tekrar çizdirilmekte ve grafik üzerinde değişiklikler yapılabilmektedir. Resim 3.11’ de program tarafından çizilen grafik göstergesi görülmektedir.



Resim 3.11 Bilgisayar kontrol paneli grafik göstergesi.

Deney seti tüm deney işlemlerini otomatik olarak yapmaktadır. Ayrıca fren balata test cihazının bilgisayar kontrol paneli üzerinde bulunan manuel kısmına girilip devir ve basınç el ile ayarlanarak deneyler manüel olarak yapılabilir. Resim 3.12’ de fren balatası test cihazı manuel kontrol paneli görülmektedir.



Resim 3.12 Fren balatası test cihazı manuel kontrol paneli.

Basınç bilgisayar programı tarafından 0-40 MPa arasında değiştirilebilmektedir. Hız, devir sayısı kontrolü sağlandığından devir sayısı 0-1400 dev/dak arasında

değiştirilebilmektedir. Bu değişken etkenlerin sürtünme performansına etkilerini belirleyebilmek için farklı deney şartlarının oluşturulması ve hassas sonuçlar alınması gerekmektedir. Bu nedenle verilerin kaydedilmesi, kullanılması ve istenildiğinde yeniden ulaşılabilmesi gerekmektedir. İstenilen deney şartlarının girilerek deneylerin güvenilir olarak yapılabilmesi amacıyla sürtünme katsayısı test cihazı için Delphi yazılımı dilinde program geliştirilmiştir.

3.5.2 İnvörtör

Telemecanique marka invertör 5.5 kW, 0-1400 dev/dak aralıklarında çalışmaktadır. Çalışma sistemi; elektrik panosundaki pako şalter 1 numaralı konuma getirilerek motora elektrik verilir. Bilgisayar programında invertör ayarları otomatik veya manuel olarak yapılarak istenilen devre ulaşılması sağlanır. İnvörtör Resim 3.13'te verilmiştir.



Resim 3.13 Devir ayarlayıcı invertör.

3.5.3 Yük Hücresi

Sürtünme kuvveti F_s ' yi belirlemek için kullanılan yük hücresi (loadcell) elektronikte strain gage (gerinim ölçer) olarak adlandırılan manyeto elastik cihazdır. Transducerin (kuvveti elektrik enerjisine çevirici eleman) kuvvet ölçmek için kullanılanına yük hücresi adı verilir (Parr 1997). Bu cihaz gelen yükü, milivolt cinsinden algılayarak ekrana yansıtmaktadır. Deney setinde kullanılan yük hücresi Eşit marka BB100 modeli olup 100kg kapasitelidir. Yük hücresinin bir ucu belirli bir noktaya sabitlenir. Diğer

ucuna bir noktadan kuvvet uygulandığında oluşan gerilim wheatstone köprüsü üzerinden 0-20 milivolt arasında algılanır ve değer ekrana yansıtılır. Yük hücresi Resim 3.14' te görülmektedir.



Resim 3.14 Yük hücresi.

3.5.4 Sıcaklık Ölçme Cihazı

Deneyler sırasında balatanın fren diskine sürtünmesi sonucunda sürtünme yüzeyi sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklık artışının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla balatanın diske sürtünme yüzeyinden 2cm ilerisinden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümünde her saniye veri alabilen, 0°C - +700°C aralıklarına kadar çalışabilen ve her saniyede disk üzerindeki sıcaklığı USB bağlantısı ile bilgisayar ortamına aktarabilen Resim 3.15'de görülen Infrared (kızılötesi-temassız) termometre kullanılmıştır.



Resim 3.15 Sıcaklık ölçme cihazı.

3.5.5 Hidrolik Ünite

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

3.5.6 Fren Diski

Fren diskinin mekanik ve ısıl zorlanmalara karşı mukavim olması istenir. Fren sistemlerinde, sürtünmeden dolayı kısa zamanda meydana gelen sıcaklık artışının, en kısa zamanda sistemden uzaklaştırılabilmesi için karşı malzemenin (kampana/disk) yüksek ısı iletim katsayısı ile yüksek özgül ısı kapasitesine sahip olması gerekir. Sürtünmeye bağlı sıcaklık artışı nedeniyle disk veya kampananın bozulmadan, minimum deformasyon göstermesi için ısıl genleşme katsayısının da büyük olması istenir. Genelde disk ve kampana üretiminde perlitik yapılı dökme demir kullanılır. Kullanılan dökme demirde % 3,4 civarında karbon bulunur. Diğer alaşım yüzdeleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Disk malzemesinin içeriği.

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

Perlitik dökme demir grafit yaprakçıkları bulundurduğundan iyi bir kayma özelliği gösterir. Yüksek işlenebilirlik, titreşimi soğurma, yüksek ısıl iletkenlik ve aşınma direnci en önemli özelliklerdendir. Bunun yanında kırılğan oluşu ve dinamik yüklere karşı hassas oluşu dikkati çeker (Mutlu 2002). Sürtünme testlerinde 280 mm çapında, soğutma kanallı, perlitik dökme demirden yapılmış fren diskisi kullanılmıştır.



Resim 3.16 Fren balatası test cihazında kullanılan özel olarak yapılmış kaliper pistonu.

Üretimi yapılan farklı içerikteki 15 çeşit (15 çeşit x 3= 45 adet) fren balatası Resim 3.16’da görülen fren test cihazındaki özel olarak yapılmış kaliper pistonuna yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Sürtünme deneyleri sonrasında test cihazının bilgisayarındaki fren test programı yardımı ile kaydedilen zaman, sıcaklık ve sürtünme kuvveti verileri ile zamana bağlı sürtünme katsayısı – sıcaklık grafikleri bilgisayar programı yardımıyla çizdirilerek ihtiyaç duyulan bulgular elde edilmiş ve balata numunelerinin sürekli frenleme performansları belirlenerek, gereken değerlendirmeler yapılmıştır.

3.6 Mikro Yapı Analiz İşlemleri

Numunelerin sürtünen yüzeylerindeki aşınma bölgesinin fiziki yapısını mikro düzeyde belirleyerek sürtünme ve aşınma karakteristiğini ortaya çıkarmak amacıyla SEM fotoğrafları alınmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) TUAM laboratuvarında bulunan LEO 1430 VP marka taramalı elektron mikroskobunda (*Liu et al.* 2002, *Duhamel et al.* 2008, *Vierke* 2008, *Fu et al.* 2001) gerçekleştirilmiştir.

3.6.1 Numune Parlatma Cihazı

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

yapıldıktan sonra keçe üzerinde temizlenerek parlatılmıştır. Numune parlatma cihazı Resim 3.17’de görülmektedir.



Resim 3.17 Numune parlatma cihazı.

3.6.2 Numune Kaplama Cihazı

Taramalı elektron mikroskobundan mikro yapı resimlerinin alınabilmesi için numunelerin iletken olması gerekmektedir. Numuneler yeterli iletkenliğe sahip olmadıklarından, iletkenlik kazandırmak amacıyla parlatma işleminden sonra numunelerin yüzeyi “BAL-TEC SCD 005 Sputter-Coater” marka kaplama cihazı ile karbon kaplanarak iletkenliği sağlanmıştır. Numune kaplama cihazı Resim 3.18’de görülmektedir.



Resim 3.18 Numune kaplama cihazı.

3.6.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Sürtünme ve aşınma deneyleri sonrasında numune balataların mikro yapısını incelemek amacıyla LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobunda (SEM) çalışması yapılmıştır. LEO 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve X ışınları (EDX- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak elementer analizleri yapabilmektedir. Cihaz işletim yazılımında görüntü işleme imkânı sağlamaktadır. Cihaz “değişken basınç” prensibi ile çalışma yeteneğine sahiptir. SEM cihazı Resim 3.19’da görülmektedir.



Resim 3.19 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

3.7 Yüzey Pürüzlülük Testi

Numunelerin sürtünme deneyi sonrasında aşınan yüzeylerinin pürüzlülük durumları Taylor Hobson – Tribotechnic Rugosimeter marka yüzey pürüzlülük ölçme cihazı ile ölçülerek belirlenmiştir. Bu cihazın pürüzlülük ölçme hassasiyeti $0,06\mu\text{m}$ 'dir. Pürüzlülük ölçme işlemleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü, Yüzey İşlemleri Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

3.8 Yoğunluk Testi

Numunelerin yoğunluğu, aynı içerikli üç adet numune “Sartorius MC 1” marka 0,001gr hassasiyetli Arşimet terazide belirlenmiştir. Bu numuneler saf su ile doldurulmuş dereceli silindir (mezür)'e daldırılmıştır. Saf suyun hacmindeki değişim numunenin hacmini verdiğinden dereceli silindirdeki fark miktar belirlenmiş ve cismin kütlesi cismin hacim farkına bölünmüş, üç numuneden çıkan değerlerin aritmetik ortalaması alınarak cismin yoğunluğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan yoğunluk testi düzeneği Resim 3.20’de gösterilmiştir.



Resim 3.20 Yoğunluk testi düzeneği.

Numunelerin yoğunluklarını belirlemede aşağıdaki formül kullanılmıştır;

$$D_h = \frac{G_k}{G_{dh} - G_{ds}} \quad (3.3)$$

D_h = Numune yoğunluğu (gr/cm³)

G_k = Numune kuru ağırlığı

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

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

3.9 Aşınma Direnci ve Özgül Aşınma Değerleri

Deneyler için farklı oranlarda toplam 45 adet (15çeşit x 3'er adet) numune üretilmiştir. Aynı içeriğe sahip her numuneden üçer defa deney yapılarak bu üç değer sonucunun aritmetik ortalaması alınmıştır. Numuneler deneye başlamadan önce ve deneyden sonra hassas terazide ölçülmüş ve deney sırasında ne kadar kütle kaybettiği hesaplanarak ortalama aşınma miktarları bulunmuştur ($m_1 - m_2$). Bu değerler Çizelge 4.1' de verilmiştir.

TS 555'te belirtilmiş olan kütle metoduna göre numunelerin sürtünme testinden elde edilen ortalama sürtünme katsayıları, ortalama yoğunlukları ve aşağıdaki hesaplama yöntemi kullanılarak aynı içeriğe sahip üç balata numunesinin özgül aşınma değerleri ayrı olarak hesaplanmış, çıkan üç değer aritmetik ortalaması alınarak özgül aşınma değeri belirlenmiştir. Bu hesaplama diğer numuneler için de uygulanmıştır.

$$V = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_d} \times \frac{(m_1 - m_2)}{n \cdot f_m \cdot \rho} \quad (3.4)$$

V = Özgül aşınma (g/mm^2)

m_1 = Deneyden önce ölçülen balata kütlesi (g)

m_2 = Deneyden sonra ölçülen balata kütlesi (g)

ρ = Balata yoğunluğu (g/cm^3)

R_d = Disk yarıçapı (m)

f_m = Deneydeki ortalama sürtünme kuvveti (N)

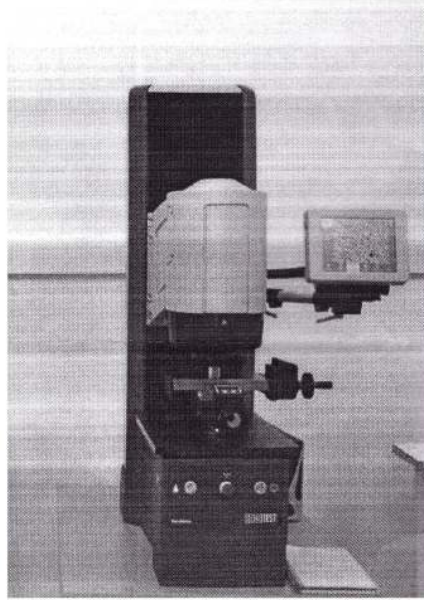
n = Toplam devir sayısı (devir)

3.10 Sertlik Testi

Sıcak presleme ile üretilen balatanın dayanımını ve sürtünme testi sonrasında sürtünme yüzeyi sertliğini belirlemek için numunelerin sürtünen yüzeyleri üzerinde sertlik testleri yapılmıştır.

Bu aşamada yapılan çalışmalarda statik sertlik ölçme yöntemlerinden olan Brinell sertlik ölçme yönteminin balataların ve fren diskinin sertliğini ölçmede uygun yöntem olduğu belirlenmiştir. Numune balataların sertliklerinin belirlenmesinde TS 139 (DIN ISO 6506 ve ASTM E-10) da belirtilen işlemler uygulanmıştır. Sertlik ölçme işlemlerinde “DuraVision 200” marka universal sertlik cihazı kullanılmıştır. Cihaz Resim 3.21’de görülmektedir.

Sertlik ölçme işlemleri, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü, Mekanik Testler Laboratuvarı’nda yapılmıştır.



Resim 3.21 Sertlik ölçme cihazı.

Sertlik ölçümünde batıcı uç olarak çapı 5mm olan çelik bilye uç kullanılmıştır. Uygulanan yük 62,5kgf (612,9 N) olarak alınmıştır. Yükleme sırasında 8 saniye

uygulama, 15 saniye sabit yükleme süresi olarak uygulanmıştır. Bu değerler çalışmış yüzeye sahip numuneler üzerinden alınmıştır. Bu numunelerin yüzey boyutları 25,4mm x 25,4mm olduğu için yüzey köşegenlerinin çakıştığı orta noktalarından değerler alınmıştır. Alınan iz çapı değerleri sertlik cihazının değer kısmına yazılarak Brinell sertlik değeri elde edilmiştir. Numunenin sürtünen yüzeyinin köşegenlerinden 3 noktadan alınan sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması bulunarak sertlik değeri belirlenmiştir. Numuneden alınan sertlik izi Resim 3.22’de görülmektedir.



Resim 3.22 Numune üzerindeki Brinell sertlik izi.

Deney sırasında kullanılan diskte numune balataların sürtüldüğü yüzeyden dört farklı noktadan sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm değerlerinin ortalaması alınmış ve diskin sertliği belirlenmiştir.

4. BULGULAR

15 farklı bileşime sahip numuneler üzerinde frenleme yüzeyi karakteristiği, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı gibi özellikleri belirlemek amacıyla bir dizi testler yapılmıştır. Numuneler içerisine miktarı sabit bileşenler dışında muhtelif oranlarda karbon fiber ve toz karbon katmak suretiyle farklı karakteristik özelliklere sahip yeni formüllü fren balatası numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler benzer deney şartlarından geçirilerek bu faktörlerin balata karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada her içerik için deneyler üçer kez tekrarlanarak elde edilen verilerin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

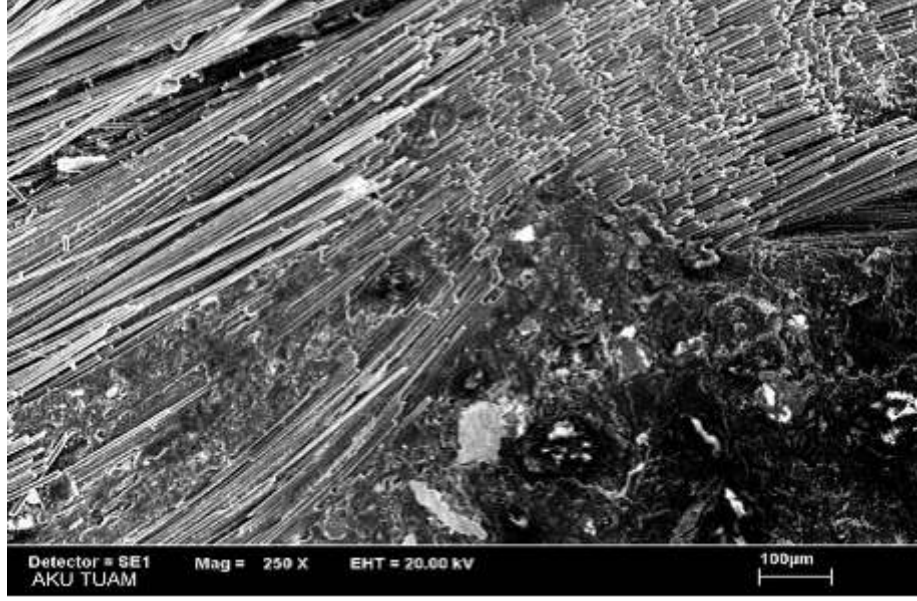
4.1 Makro/Mikro Yapı Özelliklerinin Belirlenmesi

Sıcak presleme sonrasında elde edilmiş numunelerin sürtünme testi sonucunda numunelerin sürtünme yüzeylerinin makro yapısı Resim 4.1’ de gösterilmiştir. Resimlerde numune yüzeyinde oluşan aşınma izleri açıkça görülebilmektedir.



Resim 4.1 Sürtünme deneyi sonrasındaki numune yüzeylerindeki aşınma izleri.

Numunelerin SEM görüntüleri alınarak aşınan yüzeylerde mikro yapı analizleri yapılmıştır. Resim 4.2’ de, 20mm’lik karbon elyaf katkılı numunenin sürtünme testi sonucunda taramalı elektron mikroskobunun (SEM), SE modunda, x250 büyütme ile çekilen aşınmış yüzey mikro yapı görüntüsü verilmiştir. Resimde numunenin içerisindeki karbon elyaf takviyeleri görülmektedir.



Resim 4.2 Karbon elyaf SEM resmi.

4.2 Zamana Bağlı Sürtünme Katsayısı-Sıcaklık Değişimi

Farklı kompozisyona sahip 15 adet numune üzerinde frenleme yüzeyi karakteristiği, sürtünme katsayısı, aşınma direnci, yoğunluk, sertlik, yüzey pürüzlülüğü gibi özellikleri belirlemek amacıyla testler yapılmıştır. Numuneler içerisine muhtelif oranlarda ve farklı uzunlukta karbon elyaf, toz karbon ve diğer balata malzemeleri katmak suretiyle farklı karakteristik özelliklere sahip farklı içeriklerde fren balatası numuneleri üretilmiştir. Numuneler 3 grup halinde ve her grupta 5 çeşit farklı içeriğe sahiptir. Bu numuneler benzer deney şartlarından geçirilerek yukarıda belirtilen özelliklerin balata karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada her numune için sürtünme deneyleri üç kez tekrarlanmıştır ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Sürtünme deneyi sonrasında 15 numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi grafikleri çıkarılarak aşağıda verilmiş ve bu grafikler üzerinden birbirleri arasında kıyaslamalar yapılmıştır.

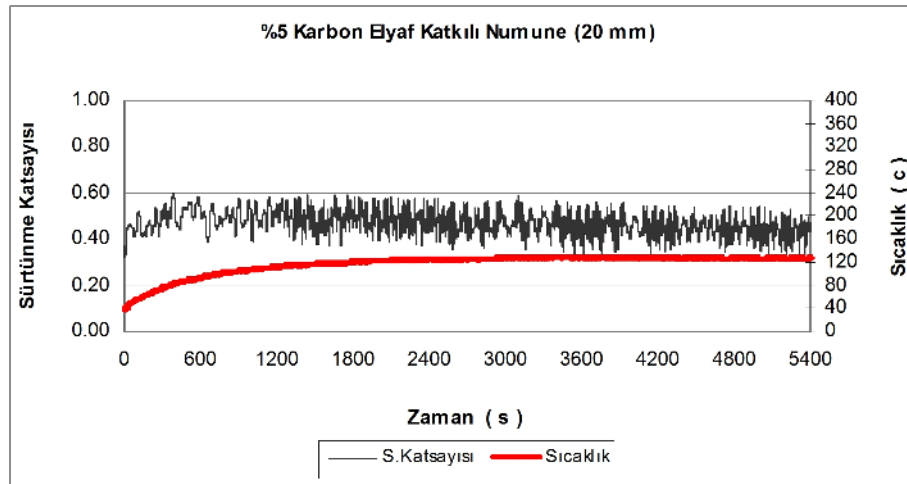
Balata numunelerinin sürtünme testi 5400 saniye süresince kesintisiz ve fren diski yüzeyine sürekli temas sağlanarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı-sıcaklık-zaman değişimini gösteren grafikler incelendiğinde,

literatürde verilen grafiklere benzer grafikler elde edilmiştir. Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri TS 555'te verilen değerlere uygundur.

Sürtünme katsayısı ve sürtünme yüzey sıcaklığı, sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin özelliklerine ve bu malzemelerin birbirleriyle etkileşimlerine bağlı olarak çok farklı özellikler göstermektedir. Testin başlangıç safhası, sürtünme katsayısının değişiminde önemli etkindir. Test başladığı andan itibaren sürtünme temas alanındaki artışla birlikte hem sürtünme katsayısı artar hem de yüzeyde sürtünme tabakası gelişir. Bu yüzden testin başlangıç safhasında, başlama anına göre sürtünme katsayısında hızlı bir artış görülür. Bu durum, sürtünme katsayısı-zaman-sıcaklık grafiklerinde sürtünme tabakasını oluşturan malzemelerin özelliğine göre testin ilk 50 ile 200 üncü saniyelerinde görülmüştür (Filip et al. 2001).

4.2.1 20 mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Performansı

2005 nolu numuneden elde edilen zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği Şekil 4.1' de gösterilmiştir.

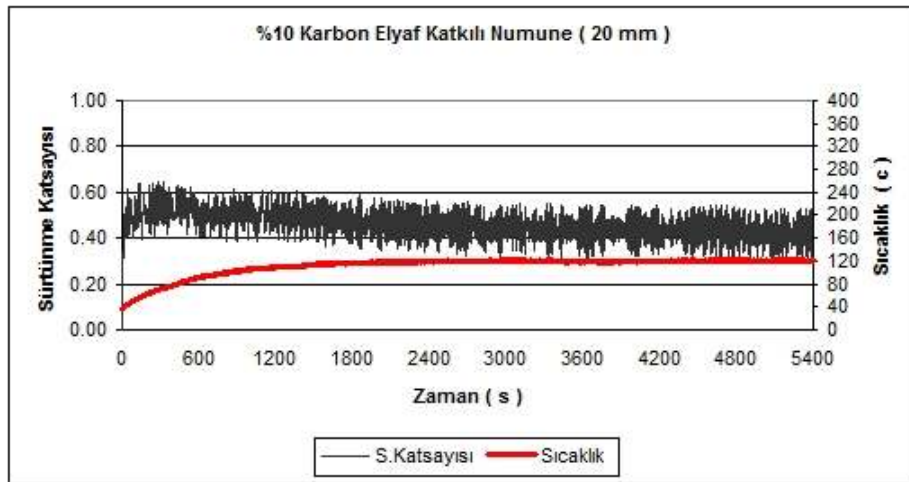


Şekil 4.1 2005 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

2005 nolu numunenin ortalama $\mu=0,47$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmenin başlangıcında dinamik sürtünmeye 300 saniye süresinde geçildiği ve sürtünme katsayısının 500-1200 saniyelik zaman aralığında dalgalı bir

yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Bu dalgalanma sürecinde $F_s = \mu_s \times F_n$ bağıntısı vardır yani, statik sürtünme söz konusudur. Kayma başladıktan sonra sürtünme kuvvetinde azalma ve tekrar yükselme olmaktadır (F_k). Bu durumda $F_k = \mu_k \times F_n$ ilişkisi geçerlidir. Burada $\mu_k < \mu_s$ şartı dikkate alınır. Sürtünme katsayısı; sürtünme hızı, basınç ve sıcaklık gibi değişkenlere bağlıdır (Uygur, 1996). İki yüzey arasındaki sürtünme hızının artmasıyla sürtünme katsayısı düşmektedir. Sürtünme deneyi boyunca maksimum 127°C sıcaklık elde edilmiştir. Sıcaklık ortalaması 117°C olmuştur.

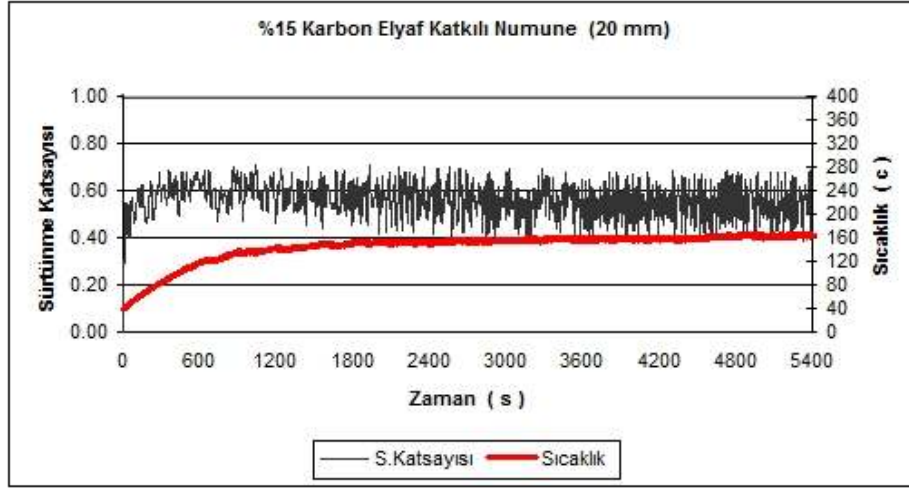
Sürtünme deneyi sonunda 2010 nolu numunenin ortalama $\mu = 0,46$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 111 °C olmuştur. Maksimum sıcaklık 121 °C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısında öncelikle bir yükselme ardından testin sonuna kadar giderek bir miktar azalan değer elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı %5 karbon elyafı numuneye göre çok az sayılabilecek bir miktarda düşük çıkmıştır. Şekil 4.2’de 2010 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 4.2 2010 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

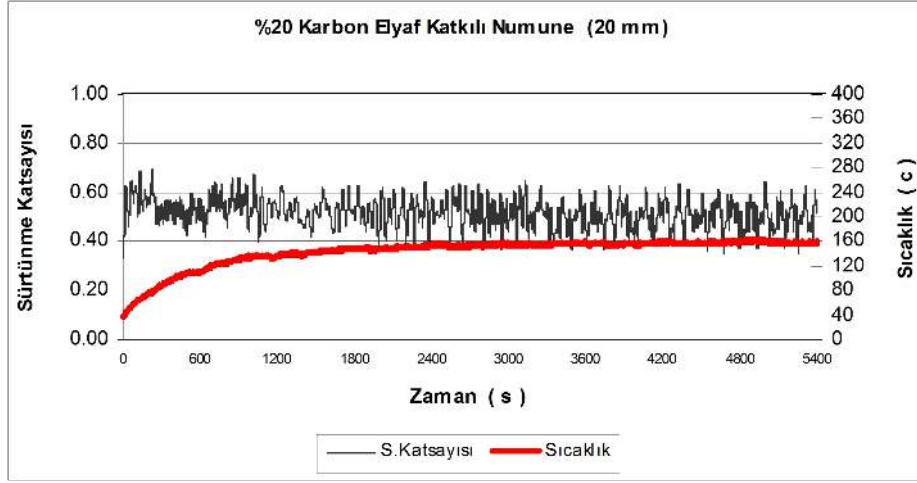
2015 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu = 0,56$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 144°C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 163°C olduğu gözlemlenmiştir. Numunenin sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde ilk 300 saniye sürede sürtünme katsayısı hızla en yüksek değerine ulaşarak sonrasında bir miktar düşmüş ve stabil halde dinamik sürtünme evresine geçilerek kararlı bir sürtünme gerçekleşmiştir. %5 ve %10 karbon elyafı numunelerden daha yüksek

sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Şekil 4.3'te 2015 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



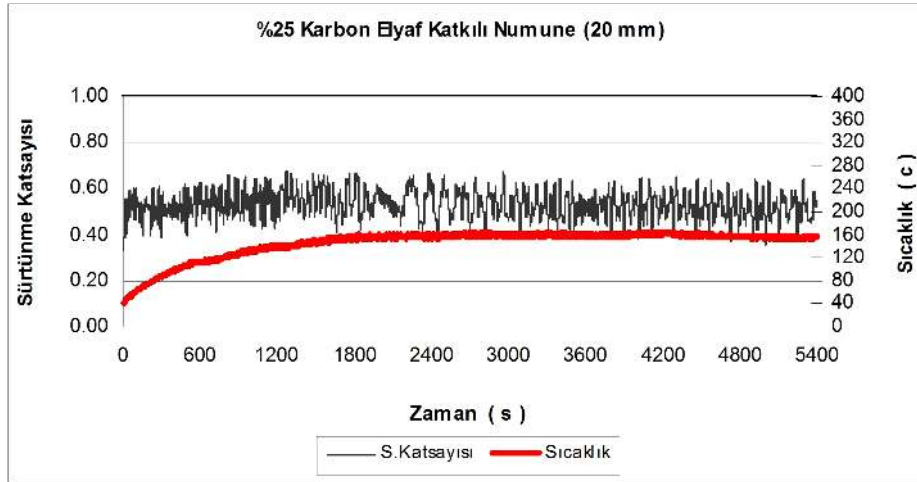
Şekil 4.3 2015 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

2020 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucu $\mu=0,52$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 143°C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 162°C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde ilk 50 saniye içinde doğal bir statikten dinamik sürtünmeye geçiş evresi görülmektedir. Dinamik sürtünmeye geçişten itibaren sürtünme katsayısında dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Buna sebep olarak abrazif ve adhesiv aşınmadan kaynaklanan sürtünme temas yüzeylerinin alanlarının değişmesi olduğu söylenebilir. Sürtünme katsayısı %15 karbon elyafı numuneden düşük fakat, %5 ve %10 karbon elyafı numunelerden yüksek bir değerde çıkmıştır. Şekil 4.4'te 2020 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 4.4 2020 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

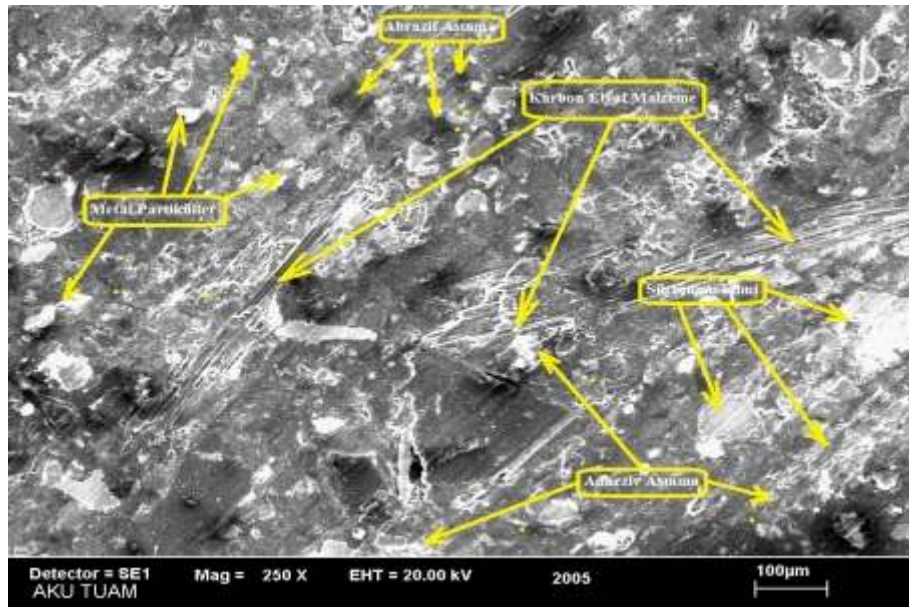
2025 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,53$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 146°C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 165°C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde dinamik sürtünme evresine geçildikten sonra genelde kararlı bir sürtünme katsayısı gerçekleştirdiği görülmektedir. %5, %10 ve %20 karbon elyaf katkılı numunelerden daha yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Şekil 4.5'te 2025 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 4.5 2025 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

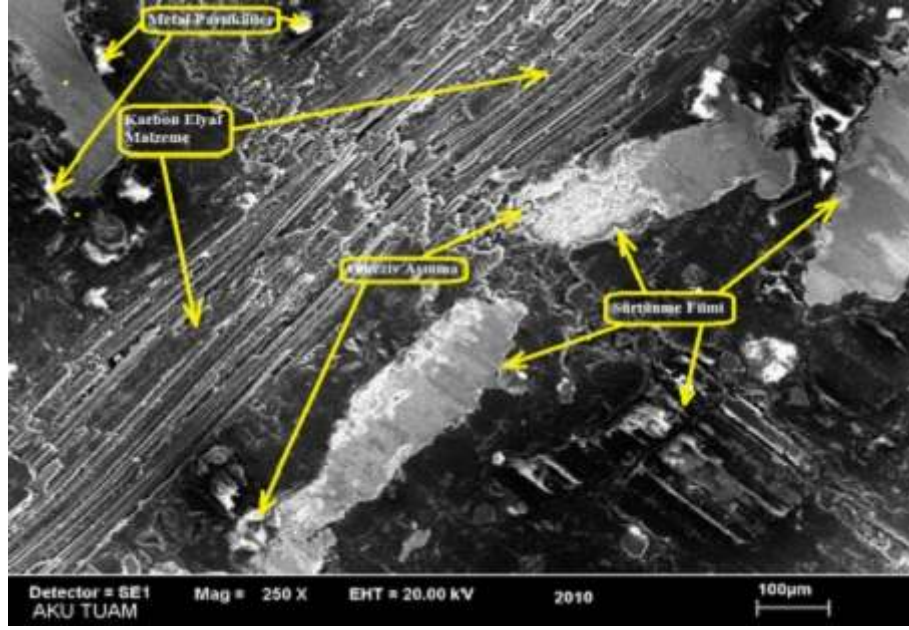
4.2.2 20mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Yüzey Karakteristikleri

2005 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.3'te verilmiştir. 2005 nolu numunenin sürtünme testi sonrasında aşınma yüzeyinin SEM resmi incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Genel olarak komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır. Abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği koyu gri renkli bölgeler ile dikkat çekmektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir.



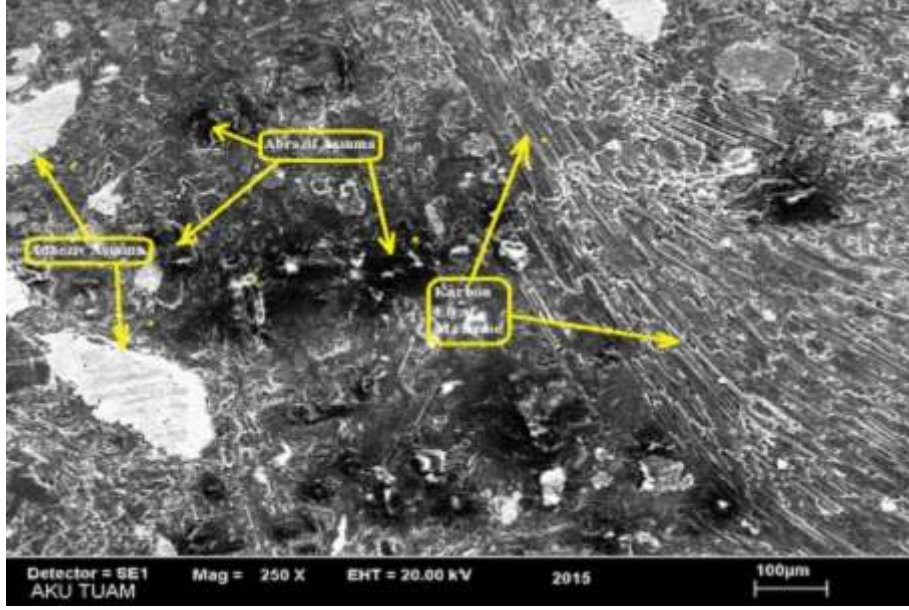
Resim 4.3 2005 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

2010 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.4'te verilmiştir. Resim 4.4 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Karbon elyaf parçacıklarının düzensiz şekilde dağıldığı görülmektedir. Bunun nedeni karıştırma sürecinde karbon elyaf malzemenin toplanması sebebiyle homojen bir karışım teşkil edilememesidir. Abrazif aşınma bölgelerinde metalik parçacıkların sürtünmeye iştirak ettiği koyu renkli bölgeler ile dikkat çekmektedir.



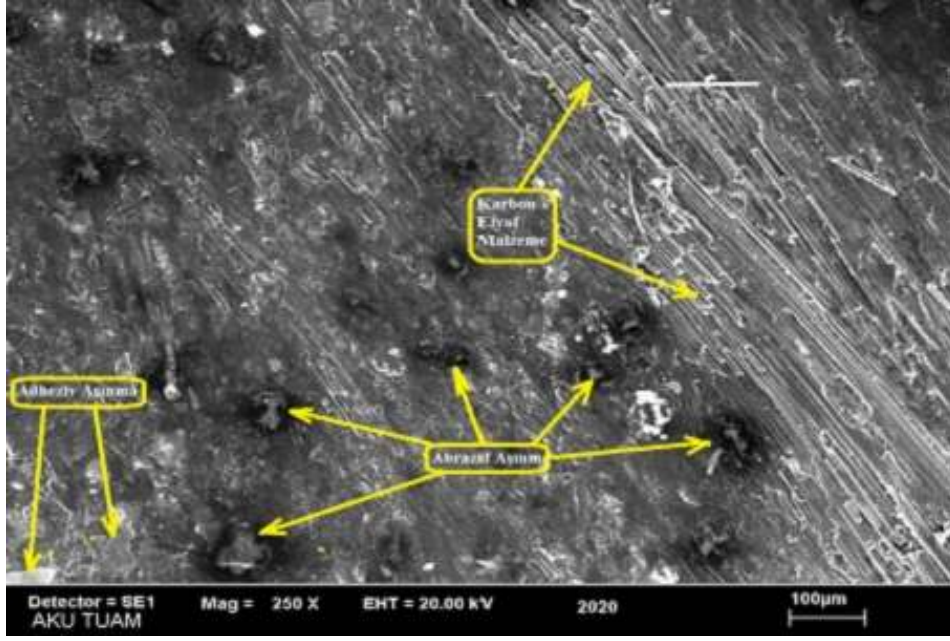
Resim 4.4 2010 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

2015 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.5'te verilmiştir. Resim 4.5 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Karbon elyaf parçacıklarının düzensiz şekilde dağıldığı, istenilen oranda homojen dağılmadığı görülmektedir. Buna sebep olan, karıştırma sürecinde karbon elyaf malzemenin toplanması nedeniyle homojen bir karışım teşkil edilememesidir.



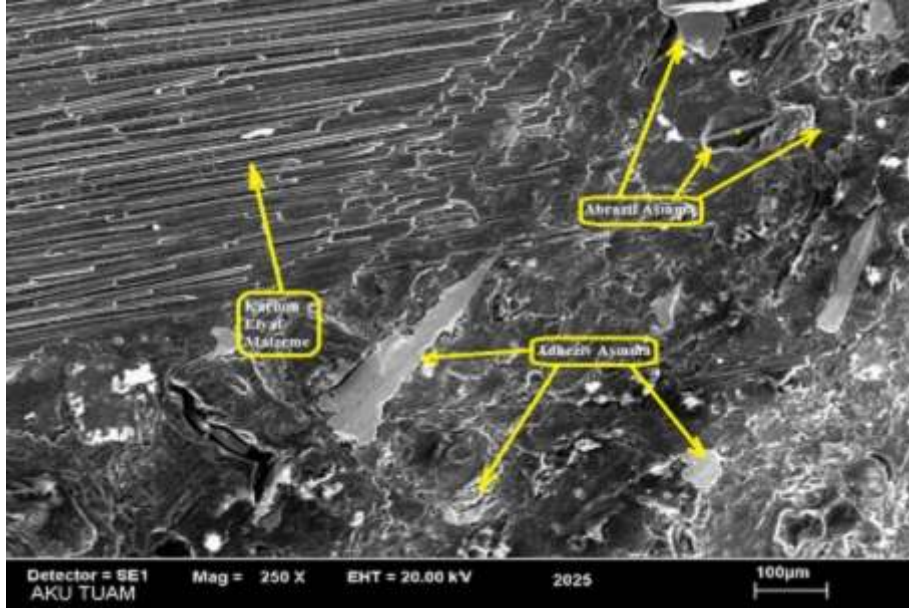
Resim 4.5 2015 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

2020 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.6’ da verilmiştir. Resim 4.6 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Karbon elyafın sürtünmede aktif rol aldığı ve dolayısıyla yüzeyden koparak aşınma miktarını biraz arttırdığı söylenebilir.



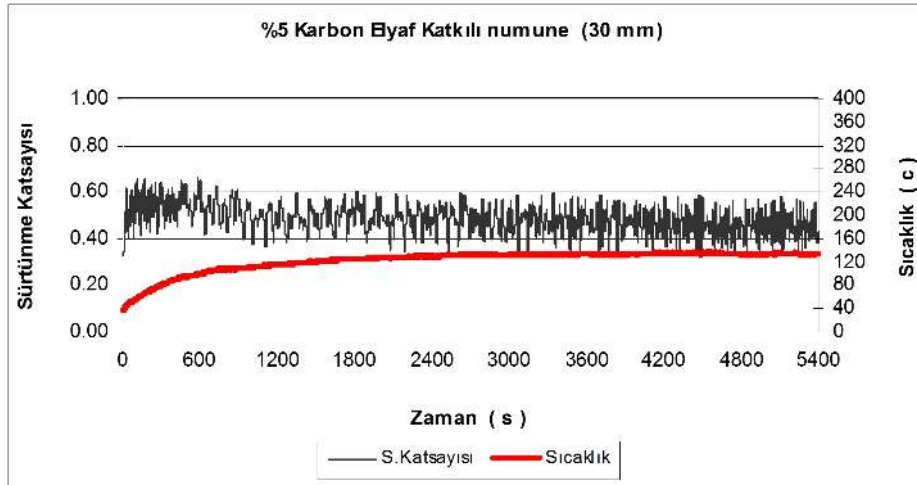
Resim 4.6 2020 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

2025 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.7’de verilmiştir. Resim 4.7 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. İri taneli katkı malzemelerinin sürtünmenin etkisiyle balata bünyesinden koparak yüzeyde delaminasyon aşınması oluşturdukları görülmektedir. Buna bağlı olarak aşınma miktarında da artış olduğu tespit edilmiştir.



Resim 4.7 2025 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

4.2.3 30 mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Performansı

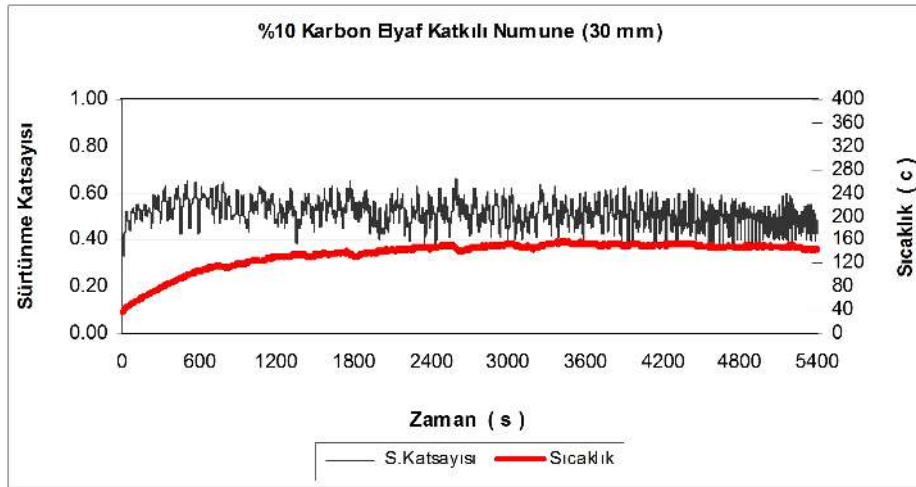


Şekil 4.6 3005 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

3005 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,49$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 122 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 136 °C olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği Şekil 4.6’ da gösterilmiştir. Grafikte statik ve dinamik sürtünmeye geçiş bölgesi belli bir şekilde görülmektedir. Testin ilk yarısında sayılabilecek sürede

sürtünme katsayısı eğrisinde görüldüğü gibi hafif dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu dalgalanma, sürtünme yüzeyinde meydana gelen adhesiv ve abrazif aşınmalardan kaynaklanan aşınma yüzeylerinin değişimi sebebiyle oluşmaktadır. Testin ikinci yarısında sürtünme yüzeyinin kısa zamanda oluşarak dengeli bir duruma geldiği ve sürtünme katsayısının sabit kalarak değerini koruduğu görülmektedir. Aşınmanın da kararlı olduğu bir sürtünme gerçekleşmiştir.

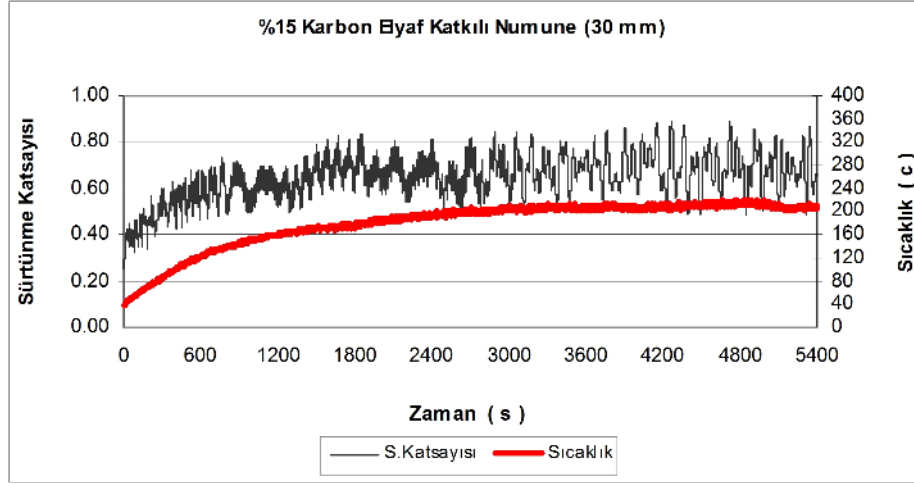
3010 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,52$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 136 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 158 °C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye yumuşak bir geçişin olduğu görülmektedir. Bu geçişten sonra sürtünme katsayısının kararlı halini koruyarak yaklaşık aynı değerde devam ettiği görülmektedir. Şekil 4.7’ de 3010 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 4.7 3010 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

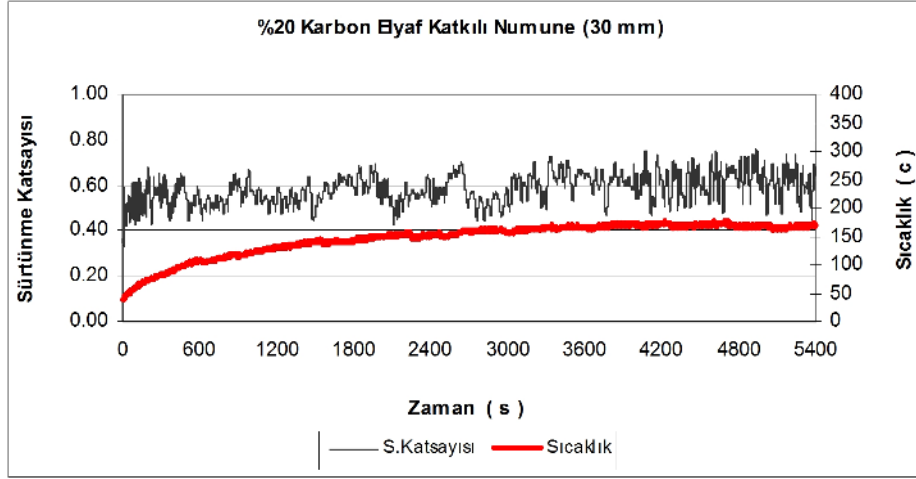
3015 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,65$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 180°C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 218°C olduğu belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak fakat uzun zaman süren bir durum olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısındaki dalgalanmanın sürtünme yüzeyinden kopan partiküllerin etkisi ile yeni sürtünme yüzeyinin meydana gelmesi sırasında

oluştugu söylenebilir. Şekil 4.8’de 3015 nolu numunenin zamana bağılı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görölmektedir.



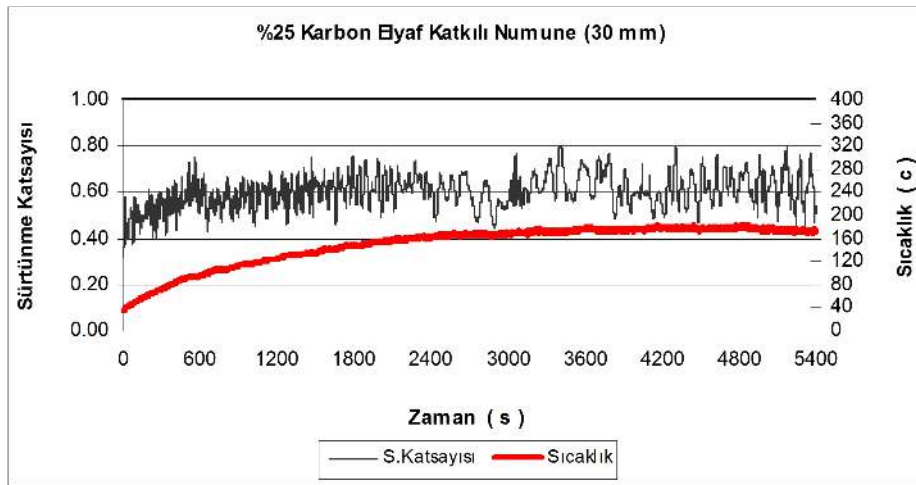
Şekil 4.8 3015 kodlu numunenin zamana bağılı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

3020 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,58$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalamasının 146°C ve maksimum sıcaklığın 174°C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiğı incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak ve kısa zaman süren bir durum olduğu görölmektedir. Sürtünme katsayısında aşırı ve düzensiz dalgalanmalar oluşmuştur. Bu dalgalanmaların nedeni olarak sürtünme yüzeyinde meydana gelen adhesiv ve abrazif aşınmalardan kaynaklanan aşınma yüzeylerinin değişiminden kaynaklandığı söylenebilir. Balata yüzeyindeki kopmalar aşınma miktarını arttırmıştır. Şekil 4.9’ da 3020 nolu numunenin zamana bağılı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görölmektedir.



Şekil 4.9 3020 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

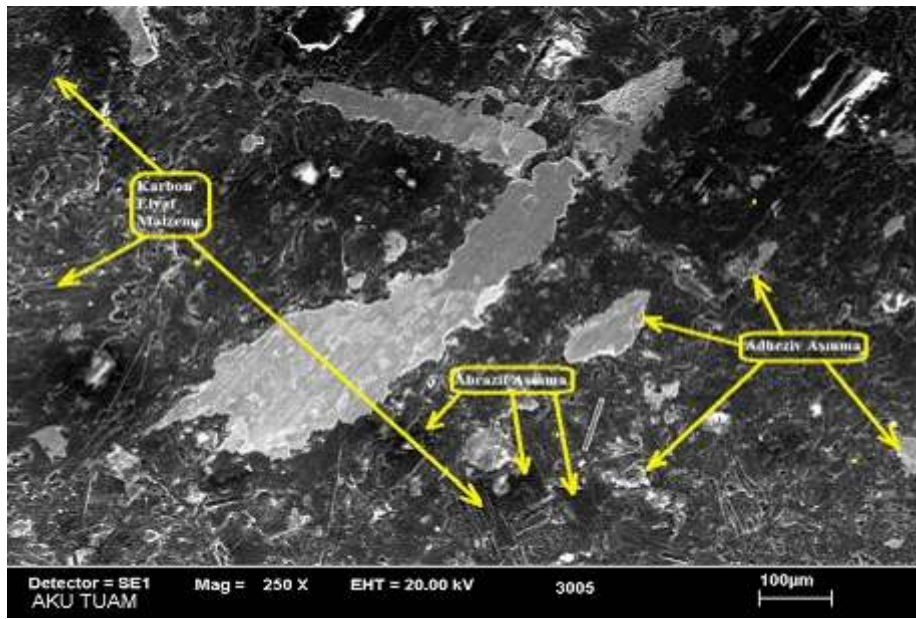
3025 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,61$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 149 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 181 °C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak ve kısa zaman süren bir durum olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısında aşırı ve düzensiz dalgalanmalar oluşmuştur. Bu dalgalanmaların, sürtünme yüzeyinden kopan partiküllerin etkisi ile yeni sürtünme yüzeyinin meydana gelmesi sırasında oluştuğu söylenebilir. Şekil 4.10’ da 3025 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 4.10 3025 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

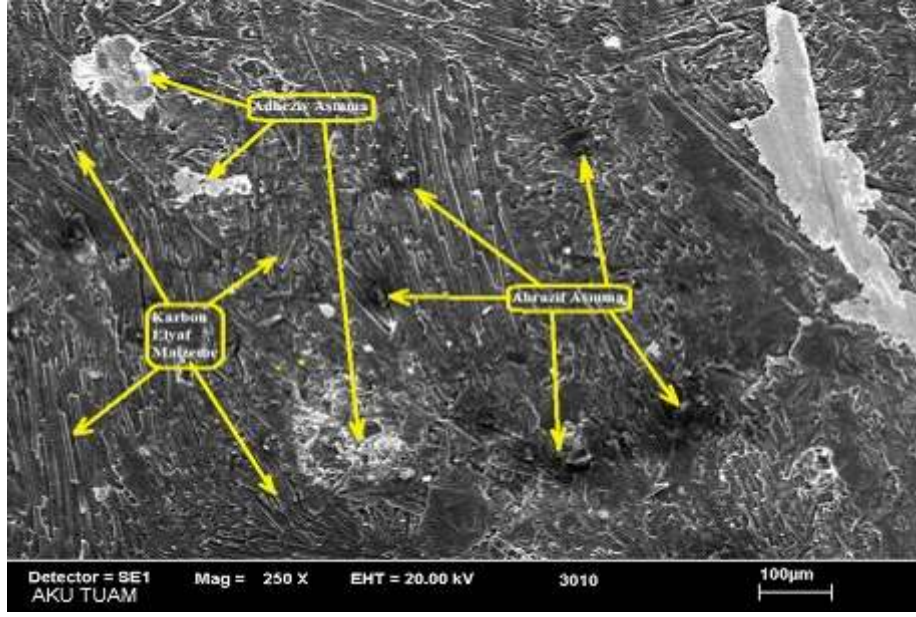
4.2.4 30mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Yüzey Karakteristikleri

3005 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.8’ de verilmiştir. Resim 4.8 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Karbon elyafın sürtünmede aktif rol aldığı söylenebilir.



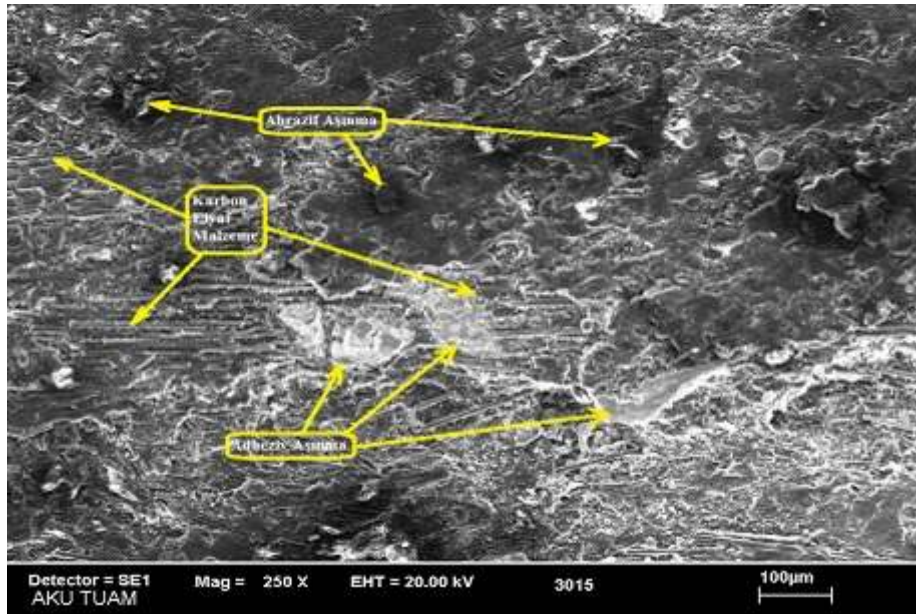
Resim 4.8 3005 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

3010 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.9’ da verilmiştir. Resim 4.9 incelendiğinde aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Homojen olarak karışması ve yönlerinin farklı olması nedeniyle karbon elyafın sürtünmede aktif rol aldığı ve sürtünme yüzeyinden koparak aşınma miktarını arttırdığı görülmektedir. Sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir.



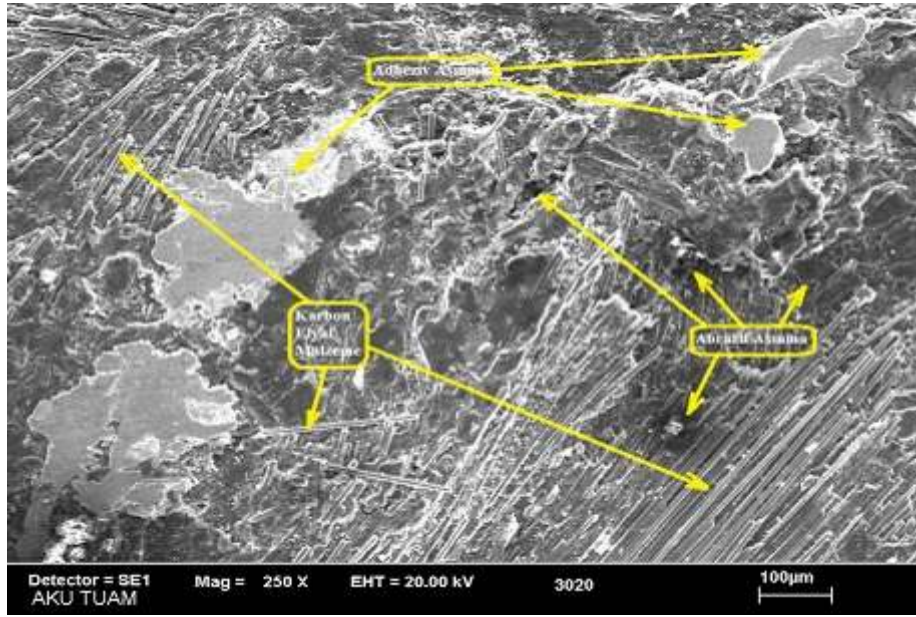
Resim 4.9 3010 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

3015 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.10’ da verilmiştir. Resim 4.10 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Adhesiv aşınma neticesinde artan sürtünme yüzeyi zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki artışla görülebilmektedir. Karbon elyafın sürtünme de aktif rol aldığı söylenebilir.



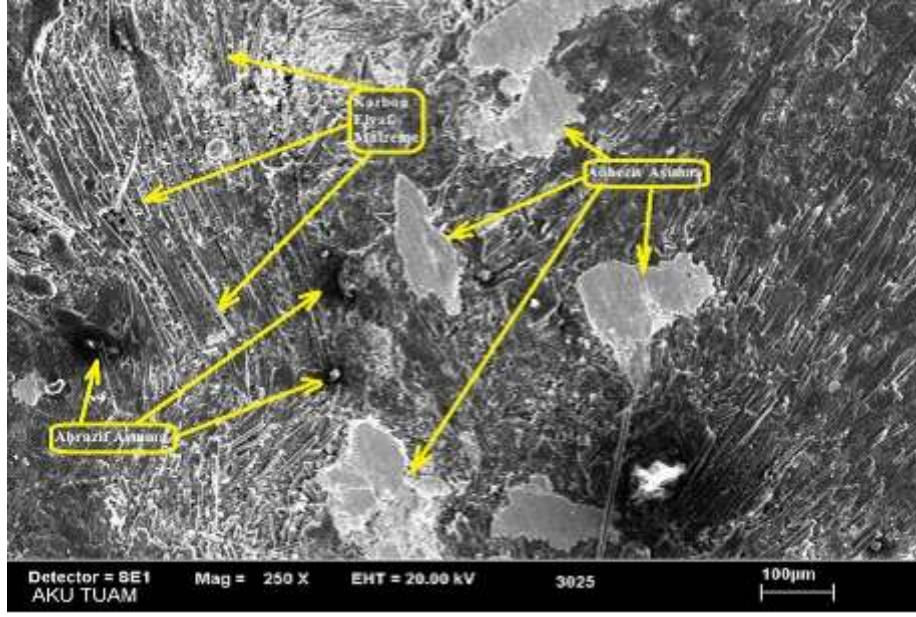
Resim 4.10 3015 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

3020 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.11’ de verilmiştir. Resim 4.11 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Adhesiv aşınma neticesinde artan sürtünme yüzeyi zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki artışla görülebilmektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Homojen olarak karışması nedeniyle karbon elyafın sürtünmede aktif rol aldığı ve sürtünme yüzeyinden koparak aşınma miktarını arttırdığı söylenebilir.



Resim 4.11 3020 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

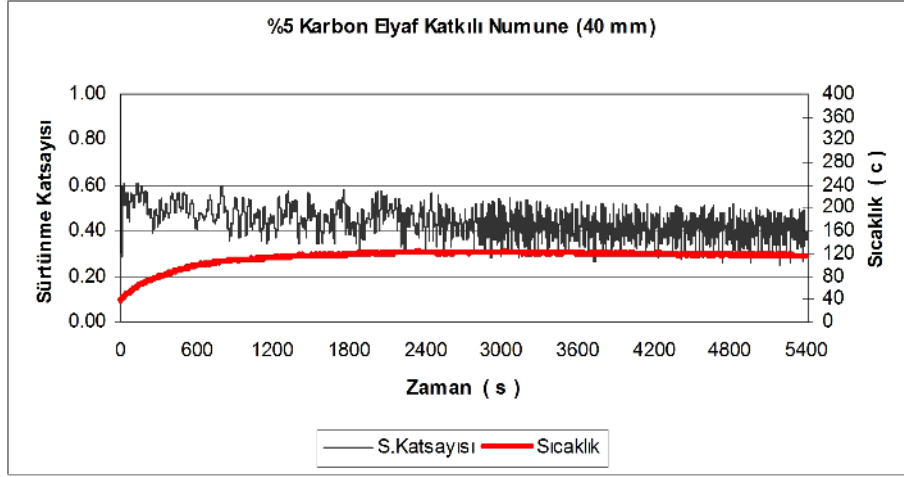
3025 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.12’ de verilmiştir. Resim 4.12 incelendiğinde 3020 nolu numune ile benzer özellikler göstermektedir. Sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Adhesiv aşınma neticesinde artan sürtünme yüzeyi zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki artışla görülebilmektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Homojen olarak karışması ve yönlerinin farklı olması nedeniyle karbon elyafın sürtünmede aktif rol aldığı ve sürtünme yüzeyinden koparak aşınma miktarını arttırdığı görülmektedir.



Resim 4.12 3025 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

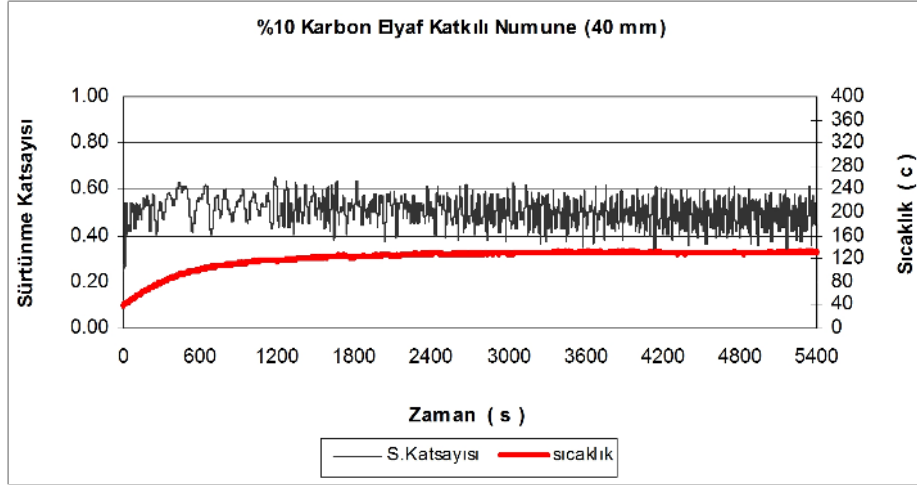
4.2.5 40 mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Performansı

4005 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,44$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 114 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 123 °C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak ve kısa zaman süren bir durum olduğu görülmektedir. Testin ilk yarısında sayılabilecek bir sürede sürtünme katsayısı eğrisinde görüldüğü gibi hafif dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bunun nedeni sürtünme yüzeyinde meydana gelen adhesiv ve abrazif aşınmaların sebep olduğu aşınma yüzeylerinin değişimidir. Testin ikinci yarısında sürtünme yüzeyinin kısa zamanda oluşarak dengeli bir duruma geldiği ve sürtünme katsayısının sabit kalarak değerini koruduğu görülmektedir. Aşınmanın da kararlı olduğu bir sürtünme gerçekleşmiştir. Şekil 4.11’ de 4005 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



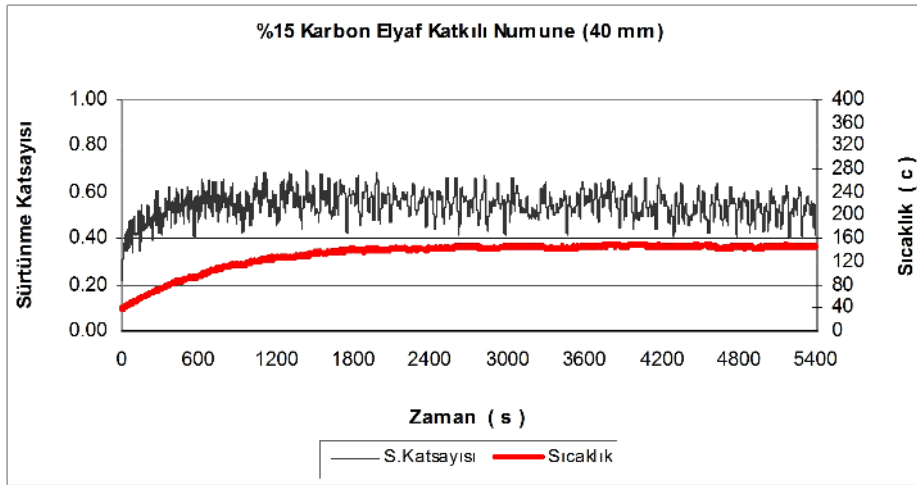
Şekil 4.11 4005 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

4010 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,51$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 121 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 133 °C olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.12’de 4010 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir. Sürtünme katsayısı grafiği 4005 nolu numune grafiği ile benzer özellikler göstermektedir. Grafik incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak ve kısa zaman süren bir durum olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısının dinamik sürtünmenin başlamasıyla ortalama değerine ulaştığı ve testin ilk yarısında sayılabilecek bir sürede sürtünme katsayısı eğrisinde görüldüğü gibi hafif dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bunun nedeni sürtünme yüzeyinde meydana gelen adhesiv ve abrazif aşınmaların sebep olduğu aşınma yüzeylerinin değişimidir. Testin ikinci yarısında sürtünme yüzeyinin kısa zamanda oluşarak dengeli bir duruma geldiği ve sürtünme katsayısının stabil kalarak değerini koruduğu görülmektedir. Aşınmanın da kararlı olduğu bir sürtünme gerçekleşmiştir.



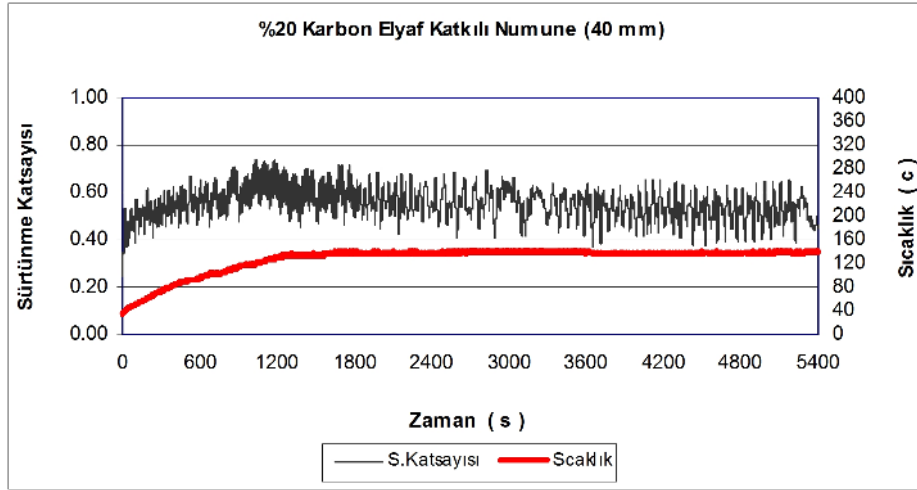
Şekil 4.12 4010 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

4015 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,55$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 132 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 150 °C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak fakat uzun zaman süren bir durum olduğu görülmektedir. Test süresince sürtünme katsayısı çok az miktarda giderek düşmüştür. Sürtünme katsayısındaki dalgalanmanın sürtünme yüzeyinden kopan partiküllerin etkisi ile yeni sürtünme yüzeyinin meydana gelmesi sırasında olduğu söylenebilir. Şekil 4.13’ te 4015 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



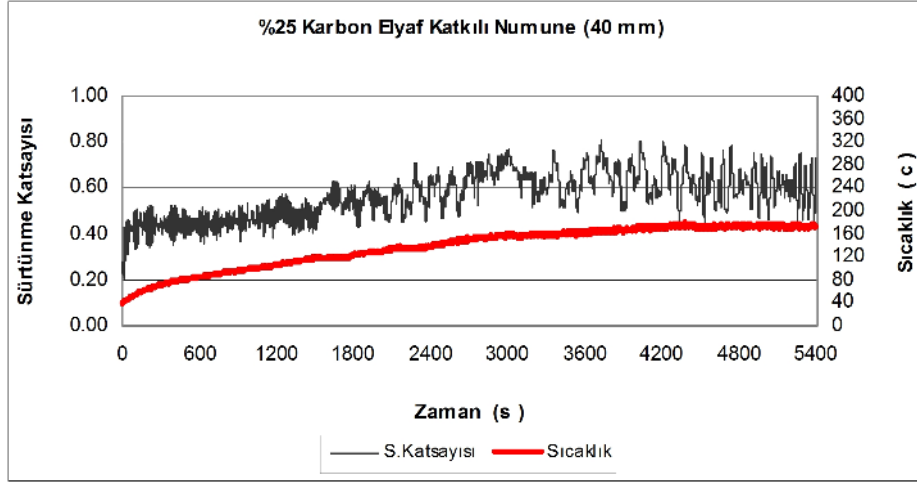
Şekil 4.13 4015 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

4020 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucu $\mu=0,55$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 128 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 141 °C olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.14’de 4020 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde 4015 nolu numune ile benzer özellikler göstermektedir. Statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak fakat uzun zaman süren bir durum olduğu görülmektedir. Test süresince sürtünme katsayısı çok az miktarda giderek düşmüştür. Sürtünme katsayısındaki dalgalanmanın sürtünme yüzeyinden kopan partiküllerin etkisi ile yeni sürtünme yüzeyinin meydana gelmesi sırasında olduğu söylenebilir.



Şekil 4.14 4020 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

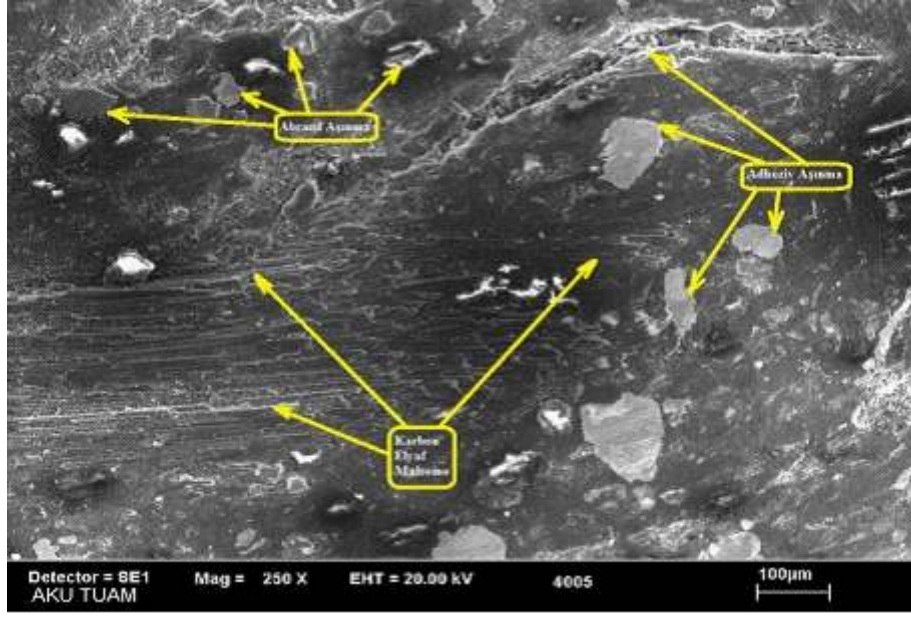
4025 nolu numunenin sürtünme deneyi sonucunda $\mu=0,57$ sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalaması 137 °C olmuştur. Maksimum sıcaklığın 180 °C olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçişin yumuşak ve kısa zaman süren bir durum olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısında aşırı ve düzensiz dalgalanmalar oluşmuştur. Bu dalgalanmalar sürtünme yüzeyinde meydana gelen adhesiv ve abrazif aşınmalar sebebiyle aşınma yüzeylerinin değişiminden kaynaklanmaktadır. Balata yüzeyinde oluşan kopmalar aşınma miktarını arttırmıştır. Şekil 4.15’te 4025 nolu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi görülmektedir.



Şekil 4.15 4025 kodlu numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi.

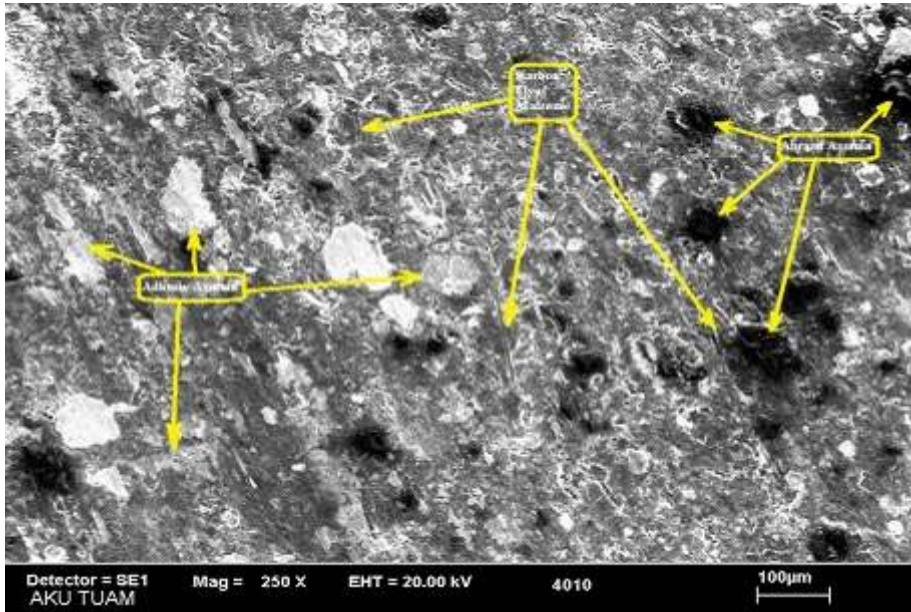
4.2.6 40mm Karbon Elyaf Katkılı Fren Balatalarının Sürtünme Yüzey Karakteristikleri

4005 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.13' te verilmiştir. Resim 4.13 incelendiğinde Sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv, hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde tekrar birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Resimde karbon elyaf parçacıklarının düzensiz şekilde dağıldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak karıştırma sürecinde karbon elyaf parçacıklarının toplanmaları nedeniyle karışımın homojen biçimde elde edilememesidir.



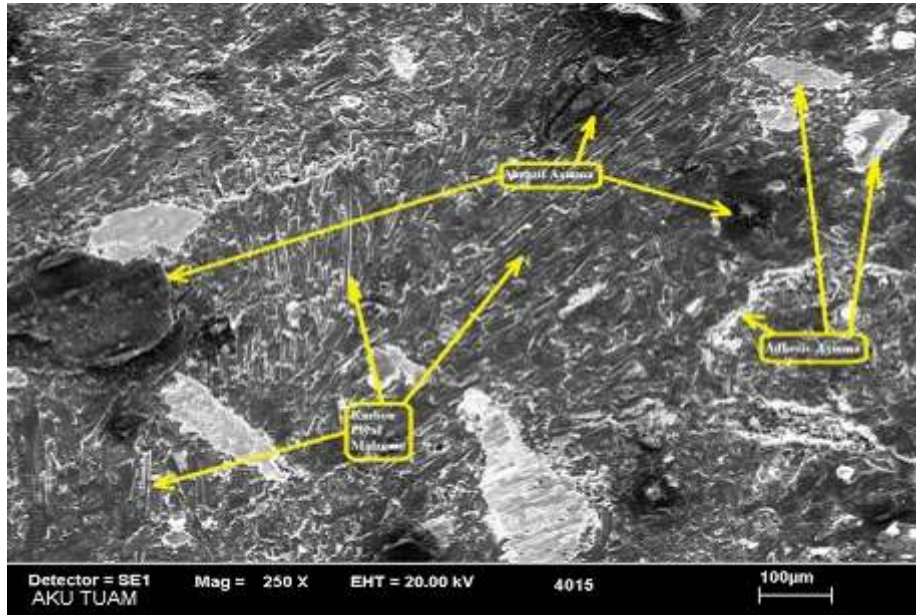
Resim 4.13 4005 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

4010 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.14’te verilmiştir. Resim 4.14 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Genel olarak komponenti oluşturan malzemelerin homojen dağıldığı ve sürtünmeye aktif olarak katıldığı anlaşılmaktadır.



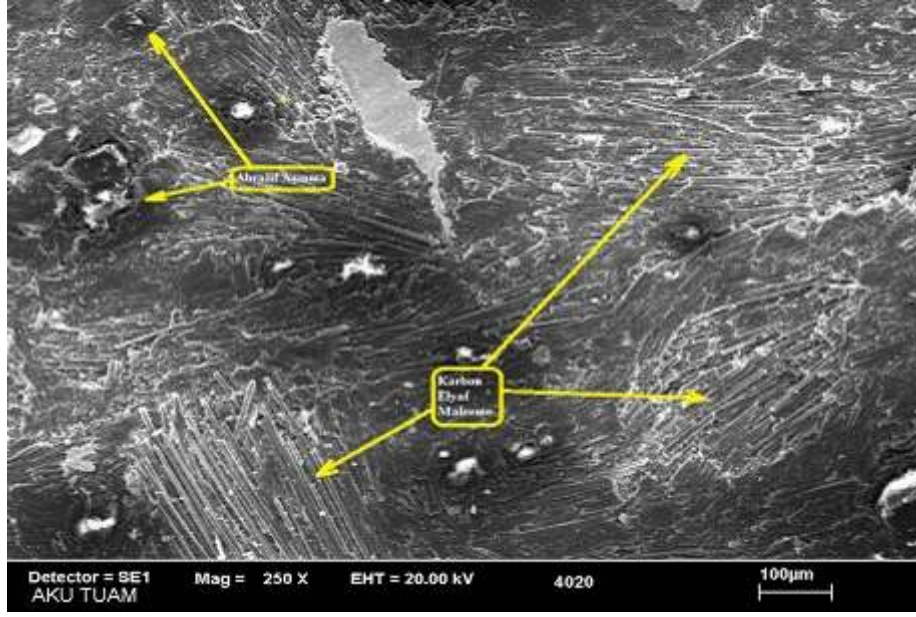
Resim 4.14 4010 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

4015 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.15’ te verilmiştir. Resim 4.15 incelendiğinde sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Adhesiv aşınmanın yüzeyden daha çok balata kütlesini uzaklaştırdığı ve bunun neticesinde aşınma miktarının artarak maksimum seviyelere çıktığı söylenebilir. Homojen olarak karışması ve yönlerinin farklı olması nedeniyle karbon elyafın sürtünmede aktif rol aldığı ve sürtünme yüzeyinden koparak aşınma miktarını arttırdığı görülmektedir.



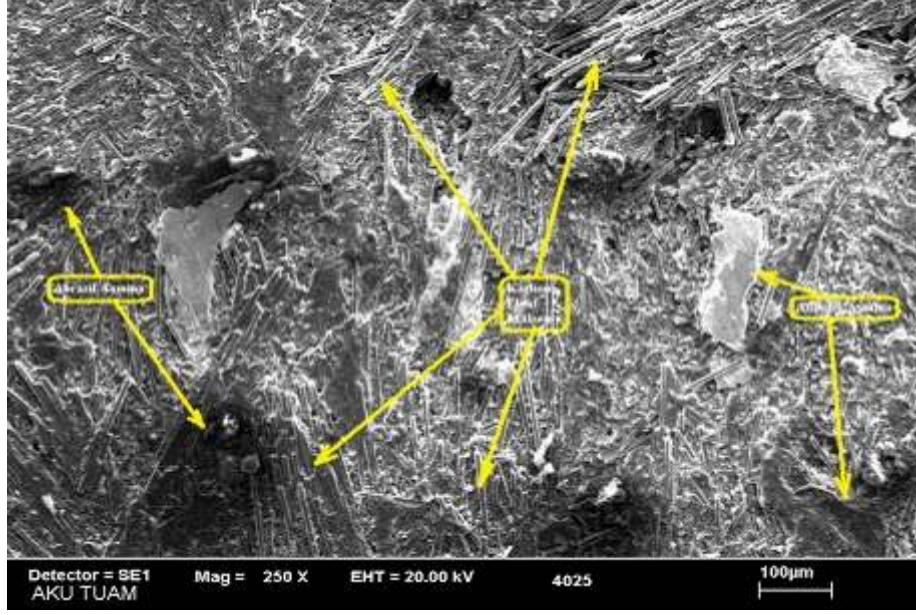
Resim 4.15 4015 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

4020 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.16’da verilmiştir. Resim 4.16 incelendiğinde aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Adhesiv aşınmanın yüzeyden daha çok balata kütlesini uzaklaştırdığı ve bunun neticesinde aşınma miktarının artarak maksimum seviyelere çıktığı söylenebilir. Homojen karıştığından dolayı karbon elyafın sürtünmede aktif rol aldığı, fakat karbon elyafın yüzeyden kopması sebebiyle aşınma miktarını biraz arttırdığı söylenebilir.



Resim 4.16 4020 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

4025 nolu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı Resim 4.17’ de verilmiştir. Resim 4.17 incelendiğinde aşınma neticesinde yüzeyde meydana gelen kopmalar sürtünme yüzeyinde birikerek sürtünmeye devam etmektedir. Karbon elyafın tam olarak homojen karışmasıyla yüzeyden koparak sürtünmede aktif rol aldığı söylenebilir. Sürtünme yüzeyinde oluşan çizikler ve renk farklılıkları hem adhesiv hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Adhesiv aşınma neticesinde artan sürtünme yüzeyi zamana bağlı olarak sürtünme katsayısındaki artışla görülebilmektedir.



Resim 4.17 4025 kodlu numunenin aşınma yüzeyi mikro yapısı.

4.3 Karbon Elyaf Boyutu ve % Oranı Değişiminin Sürtünme Katsayısına Etkileri

20 mm, 30 mm ve 40 mm’lik numune grupları ayrı olarak değerlendirildiğinde, gruplardaki numunelere katılan karbon elyaf miktarları arttığında (2015 ve 3015 kodlu numuneler hariç) sürtünme katsayılarının düzenli şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Karbon elyafın boyutuna göre yapılan değerlendirmede ise; 20 mm’lik numunelerin ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0,51$ ve 30 mm’lik numunelerin ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0,57$ çıkmış ve bir artış gözlemlenmiştir. Ancak 40 mm’lik numunelerin ortalama sürtünme katsayısı, diğer grupların değerlerindeki artış oranına göre $\mu=0,52$ olarak düşük değerde gerçekleşmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 4.1’de ve balata gruplarının sürtünme katsayısı ortalamaları da Çizelge 4.2’de verilmiştir.

En yüksek ortalama sürtünme katsayısı 30 mm uzunluktaki karbon elyaf katkılı numunelerden elde edilmiştir ($\mu=0,57$).

En düşük ortalama sürtünme katsayısı değerleri 20 mm’lik karbon elyaf katkılı numunelerden elde edilmiştir ($\mu=0,51$).

Tüm numuneler içerisinde en düşük sürtünme katsayısı 4005 nolu numuneden $\mu=0,44$ olarak ve en yüksek sürtünme katsayısı ise 3015 nolu numuneden $\mu=0,65$ olarak tespit edilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı elde edilen 3015 nolu numunenin içeriğine %15 oranında 30 mm'lik karbon elyaf katılmıştır. En düşük çıkan 4005 nolu numunenin içeriğine ise %5 oranında 40 mm'lik karbon elyaf katılmıştır.

20 mm'lik karbon elyafı balataların %15 oranda karbon elyaf katkılı 2015 nolu numunesinden $\mu=0,56$ değeri ile en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise %10 katkılı 2010 nolu numuneden $\mu=0,46$ değerinde elde edilmiştir.

30 mm'lik karbon elyafı balataların %15 oranda karbon elyaf katkılı 3015 nolu numunesinden $\mu=0,65$ değeriyle en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise %5 katkılı 3005 nolu numuneden $\mu=0,49$ değeriyle elde edilmiştir.

40 mm'lik karbon elyafı balataların %25 oranında karbon elyaf katkılı 4025 nolu numunesinden $\mu=0,57$ değeriyle en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ise %5 katkılı 4005 nolu numuneden $\mu=0,44$ değeriyle elde edilmiştir.

20 mm karbon elyaf uzunluğunda, %5 oranındaki numunenin sürtünme katsayısı $\mu=0,47$ iken, %10 oranındaki numunenin sürtünme katsayısı $\mu=0,46$ 'ya düşmüştür. %15 katkılı numunede ise $\mu=0,56$ değerine aşırı şekilde yükselmiştir. %15 oranının üzerinde ise azalma ve tekrar artış olmuştur.

Karbon elyaf uzunluğunun 30 mm olması durumunda %15 katkı oranına kadar sürtünme katsayısı değeri artarken bu oranın üzerinde sürtünme katsayısı değeri azalma ve tekrar artış göstermiştir. %15 katkı oranındaki numunenin sürtünme katsayısı $\mu=0,65$ olarak yüksek değerde çıkmıştır.

40 mm'lik karbon elyaf katkılı numuneler değerlendirildiğinde karbon elyaf oranı arttıkça sürtünme katsayılarının da giderek arttığı görülmüştür.

Numunelerde sürtünme katsayısı artışına bağlı olarak ara yüzey sıcaklıkları da artmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı elde edilen 3015 nolu balatanın ara yüzey sıcaklık ortalaması da en yüksek olmuştur. Numunelerin ara yüzey ortalama sıcaklıkları ve ara yüzey maksimum sıcaklıkları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

4.4 Yoğunluk Testi Sonuçları

Numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemi ile tespit edilmiştir. 20 mm, 30 mm ve 40 mm'lik karbon elyaf grupları göz önüne alındığında, numunelere katılan karbon elyafın kütesel miktarı arttıkça numunelerin yoğunluklarının genelde giderek azaldığı belirlenmiştir. Yoğunluklardaki bu düşüş içeriğe katılan elyaf oranının artması ile ilişkilendirilebilir. Oranın artması soğuk ve sıcak presleme işlemlerinde numunelerdeki kompozisyon elementlerinin bağlanmasını zayıflatmakta, bu durum içerikteki elementlerin arasında kısmen boşluklar oluşturmaktadır. Elde edilen değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

20 mm, 30 mm ve 40 mm'lik karbon elyaf katkılı numune gruplarının yoğunluk ortalamaları ise sırasıyla 1,864 g/cm³, 1,835 g/cm³, 1,867 g/cm³ olarak bulunmuştur. Sonuçlara göre; 20 mm'lik ve 30 mm'lik karbon elyaf katkılı numunelerin ortalama yoğunlukları giderek azalma yönünde, fakat 40 mm'lik karbon elyaf katkılı numune grubunun ortalama yoğunluğu ise, her ikisinden de yüksek çıkmıştır. Kompozisyona katılan karbon elyaf boyutunun artmasıyla içeriğin homojen şekilde karıştırılmasında karşılaşılan zorluğun buna sebep olduğu düşünülmektedir.

4.5 Özgül Aşınma Değerleri

Arşimet terazisiyle ölçülen yoğunluk değerleri ve sürtünme testinden çıkan ortalama sürtünme katsayısı değerleri kullanılarak ortalama özgül aşınma değerleri hesaplanmıştır.

Numunelerin aşınmış yüzey mikro yapı resimlerinden hem adhesiv, hem de abrazif aşınmanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

20 mm, 30 mm ve 40 mm karbon elyaf katkılı numune gruplarının özgül aşınma değerlerinin ortalamaları alındığında, sırasıyla $1,593 \times 10^{-6}$, $1,729 \times 10^{-6}$, $1,440 \times 10^{-6}$ g/mm² değerleri elde edilmiştir. Sonuçlara göre 30 mm'lik karbon elyaf katkılı numunenin özgül aşınma değeri en yüksek, 20 mm'lik numunenin daha az ve 40 mm'lik karbon elyaf katkılı numunenin en az çıkmıştır. 20 mm'lik karbon elyaf katkılı balata grubunun ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0,51$, 30 mm'lik karbon elyaf katkılı balata grubunun ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0,57$ ve 40 mm'lik karbon elyaf katkılı balata grubunun ortalama sürtünme katsayısı $\mu=0,52$ 'dir. Böylece balataların özgül aşınma miktarları arttıkça, sürtünme katsayıları da artmıştır. Özgül aşınma değerleri Çizelge 4.1'de ve balata gruplarının özgül aşınma ortalamaları da Çizelge 4.2'de verilmiştir.

4.6 Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları

Yüzey pürüzlülük değeri ölçümleri, balata numunesinin aşınmış yüzeyinde aşınma izlerine dik yönde ve 2,5 mm'lik kurs mesafesinden yapılmıştır. Her numuneden 3'er adet üretildiğinden ve her numuneden 3'er adet ölçüm yapıldığından toplam 9 adet ölçümün aritmetik ortalaması ile pürüzlülük değeri belirlenmiştir. Ölçümlere göre 20 mm, 30 mm ve 40 mm'lik numune grupları ayrı olarak değerlendirildiğinde, karbon elyaf oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri de artmıştır. En yüksek değer 3025 nolu numuneden 4,79 μ m ve en düşük değer ise 4005 nolu numuneden 2,12 μ m ölçülmüştür.

Balataların pürüzlülük değerleri Çizelge 4.1'de ve balata gruplarının ortalama pürüzlülük değerleri de Çizelge 4.2'de verilmiştir.

4.7 Sertlik Testi Sonuçları

Numunelere Brinell sertlik testi (HB) uygulanmıştır. Numunelerin sürtünen yüzeylerinden 3 ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır. Balataların sertlik değerleri Çizelge 4.1’de ve balata gruplarının ortalama sertlik değerleri de Çizelge 4.2’de verilmiştir. Test sonuçlarına göre numunelerin sertlik değerleri arasında farklılıkların olduğu ancak, karbon elyaf miktarı arttıkça sertlik miktarının da genelde arttığı belirlenmiştir. Kullanılan numunelerde en düşük sertlik 2010 nolu numunede 10,7 HB ölçülmüştür ve sürtünme katsayısı $\mu=0,46$ ’dır. En yüksek sertlik değeri ise 4025 nolu numunede 21,4 HB ölçülmüştür ve sürtünme katsayısı $\mu=0,57$ ’dir. Balata gruplarının ortalama sertlikleri ise karbon elyaf boyutu arttıkça giderek artmıştır.

Deney sırasında kullanılan diskin sertliği, numune balataların sürtündüğü yüzeyden alınan ölçümlerle 225 HB olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.1 Üretilen numunelerin sürtünme testinden önce ortalama kütle, sürtünme testinden sonra ortalama kütle, ortalama kütle kaybı, sürtünme testi ortalama sıcaklığı, sürtünme testi maksimum sıcaklığı, ortalama sürtünme sıcaklığı, ortalama sürtünme katsayısı, ortalama yoğunluk, ortalama özgül aşınma, ortalama pürüzlülük ve ortalama brinell sertlik değerleri.

NUMUNE KODU	Sürtünme Testinden Önce Ort. Kütle (g , m ₁)	Sürtünme Testinden Sonra Ort. Kütle (g , m ₂)	Ortalama Kütle Kaybı (g , m ₁ – m ₂)	Sürtünme Testi Ortalama Sıcaklığı (°C)	Sürtünme Testi Max. Sıcaklığı (°C)	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	Ortalama Yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama Özgül Aşınma (v) (g/mm ³)x10 ⁻⁶	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	Ortalama Brinell Sertlik Değeri (HB)
2005	11,255	10,995	0,260	117	127	0,47	1,976	1,249	2,13	13,1
2010	10,354	10,045	0,309	111	121	0,46	1,896	1,581	2,33	10,7
2015	10,731	10,331	0,400	144	163	0,56	1,865	1,709	2,35	13,4
2020	9,943	9,557	0,386	143	162	0,52	1,848	1,792	2,64	16,8
2025	10,289	9,952	0,337	146	165	0,53	1,737	1,633	2,82	19,6
3005	11,407	11,071	0,336	122	136	0,49	1,939	1,578	2,62	11,9
3010	10,966	10,560	0,406	136	158	0,52	1,874	1,859	3,04	16,1
3015	9,563	9,206	0,357	180	218	0,65	1,783	1,374	3,99	16,7
3020	10,062	9,611	0,451	146	174	0,58	1,783	1,913	4,53	13,8
3025	10,121	9,650	0,471	149	181	0,61	1,795	1,919	4,79	17,3
4005	10,832	10,571	0,261	114	123	0,44	1,923	1,376	2,12	15,5
4010	10,536	10,237	0,299	121	133	0,51	1,953	1,339	2,5	13,7
4015	10,315	10,010	0,305	132	150	0,55	1,878	1,317	2,55	17,2
4020	10,368	10,001	0,367	128	141	0,55	1,798	1,656	3,72	17,7
4025	9,442	9,098	0,344	137	180	0,57	1,784	1,509	4,3	21,4

Çizelge 4.2 Numune gruplarının ortalama sürtünme katsayısı, ortalama yoğunluk, ortalama özgül aşınma, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve ortalama brinell sertlik değerleri.

NUMUNE BALATA GRUBU	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)	Ortalama Yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama Özgöl Aşınma (v) (g/mm ²)x10 ⁻⁶	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μ m)	Ortalama Brinell Sertlik (HB)
20mm	0,51	1,864	1,593	2,45	14,7
30mm	0,57	1,835	1,729	3,79	15,2
40mm	0,52	1,867	1,440	3,04	17,1

Karbon elyaf katkısının balata içeriğindeki kütleli miktarının artışına bağlı olarak; sürtünme katsayısı, özgül aşınma, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve sıcaklık değerlerinde genel anlamda artış oluşmuştur. Ancak balata yoğunluklarında azalma gerçekleşmiştir. Balataların fiziksel ve mekanik özelliklerinin karbon elyaf miktarındaki artışa bağlı değişimi Çizelge 4.3’ te toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.3 Balataların fiziksel ve mekanik özelliklerinin karbon elyaf miktarı artışına bağlı değişimi.

ANA BİLEŞEN		FİZİKSEL ÖZELLİKLER				
Karbon Elyaf	↑	Sürtünme Katsayısı ↑	Yoğunluk ↓	Özgöl Aşınma ↑	Yüzey Pürüzlülüğü ↑	Sertlik ↑
						Sıcaklık ↑

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

15 farklı formüle sahip numunenin frenleme karakteristiğini belirlemek için yapılan deneylerde, sürtünme katsayısı-sıcaklık-zaman grafikleri oluşturulmuş ve sürekli frenleme performansını etkileyen aşınma direnci, sertlik, yoğunluk, yüzey pürüzlülük özelliklerini belirlemek amacıyla bir dizi testler yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir:

1. Karbon elyafın hem şerit levha biçiminde ve hem de uzun boyutta olması, toz haldeki diğer bileşenlerle homojen olarak karıştırılmasında zorluklara neden olmuştur. Bu nedenle 10 dakika olarak belirlenen teknik standart süre 20 mm'lik karbon elyafı içerik için 15 dakikaya, 30 mm'lik karbon elyafı içerik için 20 dakikaya ve 40 mm'lik karbon elyafı içerik için 25 dakikaya çıkartılmıştır.

2. Numunelerin tümünden TSE 555 standardına uygun ve 0,44–0,65 arasında yüksek sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

3. Üç farklı boyutta karbon elyaf katkılı numunelerde en yüksek sürtünme katsayısı ortalaması %25 katkılı numunelerde elde edilmiştir($\mu=0,57$). Üç farklı boyutta karbon elyaf katkılı numunelerde en düşük sürtünme katsayısı ortalaması %5 katkılı numunelerde elde edilmiştir($\mu=0,47$). Dolayısıyla karbon elyaf katkı oranındaki artışın ortalama sürtünme katsayısında genel anlamda olumlu etkisi olmuştur.

4. Numunelerde sürtünme katsayısı artışına bağlı olarak ara yüzey sıcaklıkları da artmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı elde edilen 3015 nolu balatanın ara yüzey sıcaklık ortalaması da en yüksek olmuştur.

5. Sürtünme deneyleri sonucunda, aşınma yüzeylerinin mikro yapısında çoğu numunede karbon elyafların belirgin bir şekilde sürtünme sürecine aktif şekilde katıldığı belirlenmiştir. Ancak karbon elyaf uzunluğunun arttığı durumlarda mikro yapıda farklı

ve büyük boyutlarda boşluklar gözlemlenmiştir. Bu boşlukların sürtünme esnasında numune yüzeyinden fenolik reçinenin bağlayıcılığının sıcaklıkla zayıflaması sebebiyle veya sürtünme kuvveti etkisi ile metalik takviyelerin koparak boşalttığı kısımlar olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle 40 mm'lik karbon elyaf katkılı numunelerin sürtünme katsayıları diğerlerine göre düşük çıkmıştır.

6. 20 mm, 30 mm ve 40 mm'lik karbon elyaf grupları göz önüne alındığında, numunelere katılan karbon elyafın kütleli miktarı arttıkça numunelerin yoğunluklarının genelde giderek azaldığı belirlenmiştir. Yoğunluklardaki bu düşüş içeriğe katılan elyaf oranının artması ile ilişkilendirilebilir. Oranın artması soğuk ve sıcak presleme işlemlerinde numunelerdeki kompozisyon elementlerinin bağlanmasını zayıflatmakta ve bu durum içerikteki elementlerin arasında kısmen boşluklar oluşturmaktadır.

7. Balataların özgül aşınma miktarları arttıkça, sürtünme katsayıları da artmıştır. Ayrıca en fazla aşınan balatalar sırayla 3025, 3020 ve 3010 nolu numunelerdir. Bu numunelerin yoğunluklarındaki düşüklüğün aşınma davranışlarına olumsuz etkisi olduğu belirtilebilir. En az aşınma gösteren numuneler sırayla 2005, 4015 ve 4010 nolu numunelerdir. Bu numunelerin yoğunluklarındaki yüksekliğin aşınma davranışlarına olumlu etkisi olduğu belirtilebilir.

8. Aşınmış yüzeylerin pürüzlülük ölçümlerine göre, 20 mm, 30 mm ve 40 mm'lik numune grupları ayrı olarak değerlendirildiğinde, karbon elyaf oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri de artmıştır.

9. Gerçekleştirilen sertlik testi sonuçlarına göre; numunelerin sertlikleri arasında farklı değerlerin olduğu görülmüştür. Ancak, karbon elyaf miktarı arttıkça sertlik miktarının da genelde arttığı belirlenmiştir. Karbon elyaf miktarı arttıkça sürtünme katsayısı performanslarında iyileşmeler olduğundan, sertlik artışıyla beraber, balataların aşınma miktarları da giderek artmıştır.

10. Daha önceki çalışmalara ve bu araştırmadan elde edilen bulgulara dayanarak; karbon elyaf boyutunun ve oranının artmasıyla balatanın sürtünme performansı genelde olumlu etkilendiğinden, yüksek frenleme kuvveti üretebileceği belirtilebilir, fakat aşınma davranışları olumsuz etkilendiğinden aşınma miktarı artmaktadır.

5.2 Öneriler

1. Yapılan çalışmalarda fren balatası numuneleri standartlara uygun sonuçlar vermişlerdir. Bu bakımdan, kullanılan balata içeriğinde karbon elyaf miktarının artırılmasıyla ve/veya elyafın boylamasına daha küçük parçalara ayrılarak, aynı % miktarlarında içeriğe katılmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

2. Balata yoğunluğu düştükçe aşınma miktarı yükseldiğinden, aşınma deneyi sonuçlarının iyileştirilebilmesi bakımından, soğuk ve sıcak presleme basınçlarının ve/veya sürelerinin artırılarak numune yoğunluğuna etkisi incelenebilir.

3. Ürünün taşıt frenlerinde kullanılabilirliği için bileşenler arasındaki etkileşimin tam olarak belirlenmesi gerekmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akpınar, G. (2008). Modifiye Edilmiş Karaçam Kozalaklarının Otomotiv Fren Balatalarında Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Anderson, A.E. (1992). ASM handbook, Friction, Lubrication, and Wear Technology vol, 18 ASM International, pp.569-577.
- Anlaş, İ. (1988). Şasi temel ders kitabı, M. E. B. yayınları, İstanbul.
- Aran, A. (1990). Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler. İ.T.Ü. Rektörlük Ofset Atölyesi, İstanbul.
- Arıcasoy, O. (2006). Kompozit sektör raporu, İstanbul Ticaret Odası.
- Arkayın, H. (1984). CTP Teknolojisi-Cam Elyaf Takviyeli Reçine Sistemleri, Cam Elyaf Sanayii A.Ş. İstanbul, Türkiye.
- Arslan, F., Dönmez, A.G., Ayar, H.H., Yaşar, İ. ve Çuvalcı, H. (1997). Asbestsiz Fren Balatalarının Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, KTÜ, Trabzon.
- Ayar, H. H. (1991). Disk Fren Balatalarında Bileşimin Performansa Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Baker R. (1992). Changes Caused By Legislation Against Asbestos, Powder Metallurgy, 4, 35, 255-256.
- Bhushan, B. (2001). Principles of tribology. Modern Tribology Handbook, Volume I, CRC Press.

- 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.
- Bowden, F. P. and Tabor, D. (1994). The friction and lubrication of solids, pp. 12-16, 29-31, 52-55, 78-79, 187-191.
- Boz, M., Kurt, A. (2007). The effect of Al₂O₃ on the friction performance of automotive brake friction materials. Tribology International 40, 1161–1169.
- Cho M.H. Kim S.J., Bash R.H., Fash J.W., Jang H. (2003). Tribological study of graycast iron with automotive brake linings: The effect of rotor microstructure, Pp 537-545, Tribology International 36
- Cruse, G., Baumvol, I. J. R. (1993). Advances in Composite Tribology, Composite
- Crouse, W. H., Çev: Anlaş, İ. (1979). ‘Otomobil Şasisi’, E.T.Y.Ö.O. Matbaası, Ankara.
- Czichos H. (1997). “Towards a General Theory of Tribological Systems”, Wear, , 247-264, 44 pp, 1977.
- Çavuşoğlu, E. N. (1989). Döküm Teknolojisi I, İTÜ, İstanbul.
- Çetinkaya, S. (1999). Taşıt Mekaniği, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Çiftçi, B. (2010). Fren Balatalarında Cam Elyaf Kullanımının Sürtünme Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Demirsoy, M. (1973). Balatalar, *Mühendis ve Makine Dergisi*, Cilt 17, 194.157-170, Ankara.

- Domaç, G.S. (2006). Disk frenlerin tasarım ve tribolojik açıdan incelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dong, F., Blum, F. D., Drahani, L. R. (1996). Polimer-Polimer Composites, 4, pp. 155-159.
- Dönmez, A.G. (2000). Asbest Dışı Elyafarla Üretilen Balata Malzemelerinin Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- DPT, (1975). 6. Beş Yıllık Kalkınma Planı, ÖİK Raporu. Mica: Mineral Research Consultative Comitte, London, 22 p 2 Turner, D.C.
- DPT, (1996). Asbest, Bentonit, Fluorit, Diatomit, (Kizelgur) Kalsit, Kıymetli ve Yarı Kıymetli Taşlar (Süs Taşları), Lityum, Titanyum, Zirkonyum ve Hafniyum. DPT/2421, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- Eriksson, M., Jacobson, S. (2000). Triboligcal Surfaces of Organic Brake Pads. Tribology International, 33, 817–827.
- Eriksson, M., Bergman, F., Jacobson, S. (2002). On The Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes, Wear 252, pp. 26-36.
- Erşan, K. (1998). Mevcut eski, yeni ve farklı balataların frenleme kuvvetine etkisinin pedal kuvvetinin fonksiyonu olarak tanımlanması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. cilt13, sayı 1, sayfa 75.
- Ertan, R. ve Yavuz, N. (2005). Polimer Matriksli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon ve Üretim Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi, Mühendis ve Makina, 47,553 24-30.

- Filip, P., Weiss, Z., Rafaja, D. (2001). "On Friction Layer Formation in Polymer Matrix Composite Materials for Brake Applications", Wear 9028, 1-10.
- Gemalmayan, N. (1984). Sürtünme malzemelerinin özelliklerinin deneysel incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Müh. Mimar. Fak., Ankara.
- Gemalmayan, N. (1986). Asbestsiz Sürtünme Malzemelerinin (Balataların) Yapımı ve Uygulanması, 2. Ulusal Makine Tasarımı ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara.
- Genel Ürün Kataloğu (1998). İzocam Ticaret ve Sanayi A.S., Dilovası Mevkii, 41810 Gebze/Kocaeli.
- Göktan, A.G., Güney, A. ve Ereke, M. (1995). Taşıt Frenleri, İTÜ, İstanbul.
- Guan Q.F., Li, G.Y., Wang, H.Y. ve An, J. (2004). Friction-wear characteristics of carbon fiber reinforced friction material, Pp 641-643, Journal of Material Science 39.
- Halliday, D., Resnick, R. (1999). "Fiziğin temelleri", Ayrım Yayınları, Ankara, 1999
- Halling, J. (1983). 'Principles of Tribology', *The Macmillian Press Ltd.* America, 83-98.
- Halling J. (2000). "Principles of tribology", The Macmillan Process. Ltd. 72-92. pp.
- Handa Y., Kato T. (1996). Trib.Trans. 39 346-353.
- Hao Ko, T., Sheng Ma, T. (1998). Effect of Post Curing on The Mechanical Properties Of Carbonized Phenolic Resins, Polymer Composites, 19, 4, pp. 456-462.
- Harper G.A. (1998). "Brakes and Friction Materials: The History and Development of Tech.", Mec. Eng. Publications Limited, London, England.

- Hee, K. W., Filip, P. (2005). Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings. Pp 1088-1096, Wear 259.
- Hull, D. (1987). An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, New York.
- Hull, D. (1992). An Introduction to Composite Materials, 6th Edition, Cambridge University Press, England.
- Jang, H., Lee, J. S. Fash, J. W. (2001). Compositional Effects of the Brake Friction Material on Creep Groan Phenomena. Wear, 251, 1477-1483.
- Kara, F. (2011). Karbon Elyaf Takviyeli Otomotiv Fren Balata Özelliklerinin Araştırılması Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Katalog, ABEX. (1983). Friction Products Division, Michigan USA.
- Katalog 1 (1998). Basarit fiziksel ve kimyasal özellikleri, Deutsche Basaltsteinwolle GmbH, Rodetal 40 D-3406 Boveden, 1, Germany.
- Katalog 2 (1998). Carborundum Resistant Materials GmbH, Postfach 160260, Deutschland.
- Kılıç, H. (2010). Mermer Atıklarının Otomotiv Fren Balata Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Kjeldsteen, P., Trilk, N. (1995). 'Wear map production on P/M materials and the defination of transition', *The Danishfor Powder Metallurgy*, Nordborg, Denmark, 50-110.

- Koca, M. (2011). Bazı Mineral Malzemelerin Fren Balatalarında Sürtünme Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Kuhn, H. A., Lawley, A. (1978). Powder Metallurgy Processing New Techniques and Analyses, Academic Press, New York, San Francisco.
- McLellan R.G. (1988). IMechE C451 (88) 9-13.
- Mete, Z. (1985). Kütahya Alayunt Yöresi Diatomit Yataklarının İzole Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Seramik Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, 253-260, Ankara.
- Mutlu, İ. (2002). Seramik katkılı asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Mutlu, İ., Çevik, İ., Öner, C. (2002). Borik Asit Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, 3rd International Powder Metallurgy Conference September 4-8, Turkish Powder Metallurgy Association, pp.1307-1314, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Mutlu İ., Öner C., Fındık F. (2005). Boric Acid Effect In Phenolic Composites On Tribological Properties in Brake Linings, Materials & Design, 39, 317-325.
- Neiman, M. B. (1965). Aging And Stabilization of Polimers, 1st Ed., Consultant Bureau, New York.
- Nicholson, G. (1995). Facts About Friction, P&W Price Enterprises, Inc Croydon, PA.
- Oehl, K. H. and Paul, H. G. (1990). Brake Linings for Road Vehicles. Verlag Moderne Industry AG&Co, D- 8910, Box 1751, Germany.p. 4-44.

- Othmer, K. (1966). Phenolic Resin, Encyclopaedia of Chemical Technology, Vol. 15, 2nd Ed., John Wiley And Sons Inc., New York.
- Othmer, K. (1967). ‘Encyclopaedia of Chemical Technology’, Vol.13, 2nd Ed, John Wiley And Sons Inc., NewYork.
- Öztürk, B. (2004). Hibrid Kompozit Kavrama Balatası Üretimi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Parr, E. A. (1997). Endüstriyel Kontrol El Kitabı, MEB, İstanbul.
- Quinn, T.F.J. (1996). “Computational Methods Applied to Oxidational Wear”, Wear, 169-180, 199.
- Reinsch, E. W. (1970). Sintered metal brake linings for automotive applications, Delco-Moraine division, General motors corp. Dayton, Chapter 2, 9-21, Ohio.
- Rhee, S. K. (1971). “Wear of Metal Reinforced Phenolic Resin”, Wear, 18, pp. 471-477.
- SAE J2430/B.E.E.P. (2002). How to read and understand the aftermarket standart SAE J2430/Brake Effectiveness Evaluation Procedure Link Testing Laboratories, Inc. 13840 Elmira Ave. Detroit, Michigan 48227-3017.
- Smith, W.F. (1996). Principles of Materials Science And Engineering, McGraw-Hill, USA.
- Sophie, K. T. and Mason, E. (2002). “Asbestos: Mineral and Fibers”, Division of Chemical Health and Safety of the American Chemical Society.
- Staab, G. H. (1999). Laminar Composites. Butterworth-Heinemann, Chapter 1.

- Stocks, A. I., Gezendanner, H., Van-Der-Hurk, H. (1985). "Asbestost-Free Clutches and Brakes Reinforced with Kevlar-Aramid Fibres", *Int. J. of Vehicle Design*, 6, 4/5, 483-87.
- Stringham, W. (2001). "Bosch braking systems, bendix drive, south bend", IN 46634-4001, pp. 34-36.
- Sugözü İ. ve Mutlu, İ. (2009). "Fren Balatası Üretiminde Toz Karıştırma Süresinin Frenleme Karakteristiğine Etkisinin Araştırılması", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye 1052-1056, 4pp.
- Şahin S., Özdemir İ., Ünlü B. S. (2002). T/M Yöntemi ile Üretilmiş Al-SiCp Kompozitlerde Üretim Parametrelerinin Aşınma Davranışına Etkisi, 3rd International Powder Metallurgy Conference, Ankara, Türkiye, pp. 951-957.
- Tanaka, K., Ueda, S., Noguchi, N. (1973). "Fundamental Studies On The Brake Friction of Resin-Based Friction Materials", *Wear*, 23, 349-365.
- TS 139 (1992). Metalik Malzemelerin Brinell Sertlik Deneyi, T.S.E., 1. Baskı, Ankara.
- TS 555 (1992). Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Balatalar-Sürtünmeli Frenler İçin, T.S.E., 1. Baskı, Ankara.
- TS 9076 (1991). Fren Balataları-Malzeme Sürtünme Özelliklerinin Küçük Deney Parçaları İle Değerlendirilmesi, T.S.E., 1. Baskı, Nisan, Ankara.
- Tuç, B. (2003). 'Tribology', *Basılmamış Ders Notları, Gazi Üniversitesi*, Ankara.
- Türk Sağlık Ajansı Yayınları (1991). Toplum ve Çevre Sağlığı Açısından Soru Cevaplarla Asbest, 1, Ankara.

- Uetz, H. and Föhl, J. (1978). “Wear As An Energy Transformation Process” Wear 9, 253-264.
- Uygur, M, E. (1996). Balata Üretim Teknolojisi, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Kongresi, Bildiriler Kitapçığı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Vishwanath, B., Verma, A. P., Kameswaro Rao, C. V. S. (1993). Effect of Reinforcement on Friction and Wear of Fabric Reinforced Polymer Composites, Wear, 167, pp. 93-99.
- Washabaugh, F. J. (1986). ‘Ultra-Short Fibers Aid Brake Lining Materials’, Automotive Engineering, 94, 9, pp. 51-57.
- Washabaugh, F.J. (1987). “EMCOR 66 Ultra-Short Fibers for Asbestos-Free Friction Materials”, SAE 860630.
- Welch, P.A. and A.F. (1953). “The Development of Mineral Wool From Florida Minerals”, Greaves-Walker, Fla. Eng. and Ind. Exp. Sta. Bull. 59.
- Windhorst, T. , Blount, G. (1997). Carbon-Carbon composites: A summary of recent developments and applications, Pp 11-15, Material & Design Vol 18 No 1.
- Yamashita, Y., Hiroshi, A., Kawase, M., Iwata, K. (1993). High Performance Asbestos Free Friction Material for Disk Brake Pads with The Controlled Grain Structure, Sumitomo Electric Industries, Ltd., SAE 890861.
- Yavuz, N. (2002). Toz Metalürjisi Ders Notları. Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Yetgin, S. H., Aydın, M., Aksoy, A., Ünal R. (2005). The Effect of the Mixer Type and Ratio of Reinforcement Particle on the Mechanical Properties of Nbc Reinforced Al Composite Material Produced Via Powder Metallurgy, EURO PM2005 Congress And Exhibition, Prague, Czech Republic, p:721-725.

Youssef, H., Comte, C. (1989). Consolidation of High Performance Friction Materials, Alliage Frittes Metafram, Beauchamp, France, MPR, March. Materials Series, vol. 8, Friedrich, K., Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.

İnternet Kaynakları

1. <http://www.corecomposites.com/media/aboutCarbon.pdf>, 26.06.2013
2. <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/index.html>, 26.06.2013
3. <http://www.turkcadcaml.net/>, 26.06.2013
4. <http://goldenproducts.org/html/dust.html>, 08.09.2013

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdullah MALAK
Doğum Yeri : Afyonkarahisar
Doğum Tarihi : 18.07.1968
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (e-posta) : abdullah.malak@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl) :

Lise : Afyonkarahisar Teknik ve Endüstri Meslek
Lisesi(1986)
Lisans : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Otomotiv Öğretmenliği (1991)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi
Makine Eğitimi ABD (2014)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

Kayseri Melikgazi Merkez EML : 1991-1992
Ankara Altındağ MEM : 1992-1994
Afyonkarahisar Merkez EML : 1994-1997
Van Merkez EML : 1997-2001
Kırıkkale Merkez EML : 2001-2009
Afyonkarahisar Emirdağ METEM : 2009-2012
Afyonkarahisar Çay EML : 2012-2013
Afyonkarahisar Merkez EML : 2013- Halen