



**DOĞAL TAŞLARIN OTOMOTİV SÜRTÜNME
MALZEMESİ OLARAK KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Emin ÇENGELCİ

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

İkinci Danışman

Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

Bu tez çalışması 19.FEN. BİL.39 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

DOĞAL TAŞLARIN OTOMOTİV SÜRTÜNME MALZEMESİ
OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Emin ÇENGELCİ

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

İkinci Danışman

Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Temmuz 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Emin ÇENGELCİ tarafından hazırlanan “Doğal Taşların Otomotiv Sürtünme Malzemesi Olarak Kullanımının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 04 / 07 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

İkinci Danışman : Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER
Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Can HAŞIMOĞLU
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Recai KUŞ
Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. İbrahim YAVUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

..... /..... /..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

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.

04 / 07 / 2024

Emin ÇENGELCİ

ÖZET

Doktora Tezi

DOĞAL TAŞLARIN OTOMOTİV SÜRTÜNME MALZEMESİ OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Emin ÇENGELCİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

İkinci Danışman: Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

Taşıtlarda kullanılan en önemli sistemlerden birisi de fren sistemleridir. Sistem hidrolik sıvısı, pedallar, bağlantılar, fren üniteleri ve balatalardan meydana gelmektedir. Bir fren sisteminin içindeki frenleme bileşenleri güvenli ve verimli çalışması için çok önemlidir. Fren sistemi aracın hızını azaltmak veya durdurmak için kullanılan mekanizmaları içermektedir.

Otomotiv sektöründe taşıtların gelişmesi ile birlikte fren sistemlerinde de yeni araştırmalar ortaya çıkmıştır. Özellikle son yıllarda fren balatalarında tribolojik yöntemlerle maliyeti en aza indirebilmek amacıyla birçok farklı bileşenli kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Tez çalışması kapsamında ülkemizde bulunan doğal taşlardan pomza ve garnet içerikli kütlece farklı oranlarda sekiz adet kompozit fren balatası üretilmiş ve deneysel analizi yapılmıştır. Pomza ve garnet elek analizi yapılarak 75-125 µm arasındaki tane boyutundaki tozlar kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin içerisinde sürtünme

düzenleyici alümina, cashew, pirinç tozu, bağlayıcı reçine, yağlayıcı grafit, takviye edici çelik elyaf ve dolgu maddesi barit bulunmaktadır. Belirlenen reçeteye göre tozlar hassas tartım yapılmış olup kinetik karıştırıcı da karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Homojen olarak karışan tozlar numune üretim kalıbında sıcak presleme yöntemiyle birleştirilerek daha sonra kütleme işlemi yapılmıştır.

Üretilen numunelerin sertlik, yoğunluk, sürtünme katsayısı, aşınma oranı ayrıca deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülüğü deneysel olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonrasında aşınma yüzeylerinin mikroyapısı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), 3D profilometre ile yüzey pürüzlülükleri üç boyutlu olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak, otomobiller için pomza ve garnet içerikli fren balata kompozitlerinin balata standartlarına uygun olduğu ayrıca literatürdeki çalışmalara benzer sonuçlar sergilediği görülmüştür.

2024, xiii + 91 sayfa

Anahtar Kelimeler: Pomza, Garnet, Otomotiv, Fren balatası, Aşınma, Sürtünme.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE USE OF NATURAL STONES AS AUTOMOTIVE FRICTION MATERIALS

Emin ÇENGELCİ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

Co-Supervisor: Prof. Ahmet ALTUNCU

One of the most important systems used in vehicles is the brake systems. The system consists of hydraulic fluid, pedals, connections, brake units and pads. The braking components within a braking system are crucial to its safe and efficient operation. The braking system includes mechanisms used to reduce or stop the speed of the vehicle.

With the development of vehicles in the automotive industry, new research has emerged on braking systems. Especially in recent years, composite materials with many different components have been used in brake pads in order to minimize the cost using tribological methods.

Within the scope of the thesis study, eight composite brake pads containing pumice and garnet in different mass ratios were produced from natural stones found in our country and experimental analysis was carried out. Pumice and garnet sieve analysis was performed and powders with grain sizes between 75-125 μm were used. The composite materials produced include friction modifier alumina, brass powder, cashew, binder resin, lubricant graphite, reinforcing steel fiber and filler barite. According to the specified

recipe, the powders were weighed precisely and mixed in a kinetic mixer. The homogeneously mixed powders were combined by hot pressing method in the sample production mold and then the curing process was carried out.

Hardness, density, friction coefficient, wear rate and disc roughness of the produced samples were measured experimentally before and after the experiment. After the experiments, the microstructure of the wear surfaces was measured using a Scanning Electron Microscope (SEM) and their surface roughness was measured three-dimensionally using a 3D profilometer.

As a result, it has been observed that brake pad composites containing pumice and garnet for automobiles comply with the pad standards and show similar results to the studies in the literature.

2024, xiii + 91 pages

Keywords: Automotive, Brake pad, Pomza, Garnet, Wear, Friction.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN ve Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU' ya, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Hicri YAVUZ' a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmamı 19.FEN. BİL.39 numaralı proje ile maddi olarak desteklediği ve çalışmalarımın yürütülmesinde kolaylık sağladığı için Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)' ne teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme, eşim Sümeyra ÇENGELCİ' ye, kızlarım Gülsena ve Sevde' ye teşekkür ederim.

Emin ÇENGELCİ

Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİSİ	4
2.1 Fren Balata İmalatında Kullanılan Temel Bileşenler	5
2.1.1 Takviye malzemeleri	6
2.1.2 Dolgu malzemeleri	6
2.1.3 Bağlayıcı malzemeler	7
2.1.4 Yağlayıcılar	7
2.1.5 Sürtünme düzenleyici malzemeler	7
2.2 Toz Metalurjisi Yöntemi	8
2.2.1 Tozların Tane Boyut Ölçümü	9
2.2.2 Tozların Karıştırılması	9
2.2.3 Tozların Preslenmesi	10
2.2.4 Tozların Sinterlenmesi	10
2.3 Taşıtlarda Fren Sistemi	11
2.4 Triboloji	15
2.5 Sürtünme	16
2.6 Aşınma	16
2.6.1 Aşınma Tipleri	17
2.7 Aşınma Hesabı Yöntemleri	19
2.7.1 Ağırlık Farkı Metodu	19
2.7.2 Kalınlık Farkı Metodu	19
2.7.3 Özgül aşınma	20
2.8 Fren Balatası Üretim Yöntemleri	20
2.9 Fren Balatası Test Standartları	21

3. MATERYAL ve METOT	22
3.1. Numune Üretimi	23
3.2 Numune İçeriği	25
3.2.Numune Üretiminde Kullanılan Cihazlar	36
3.2.1 Hassas Terazî.....	36
3.2.2 Mekanik Karıştırıcı	36
3.2.3 Hidrolik Pres	37
3.2.4 Üretim Kalıbı.....	38
3.2.5 Isıl işlem fırını	40
3.3 Test İçin Kullanılan Cihazlar	41
3.3.1 Sertlik Ölçüm Cihazı.....	41
3.3.2 Fren Balata Test Cihazı	42
3.3.3 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı.....	46
3.3.4 Karbon Kaplama Cihazı	48
3.3.5 SEM Analiz Cihazı.....	48
3.3.6 Üç Boyutlu Profilometre	50
4. BULGULAR	51
4.1 Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerleri	51
4.2 Aşınma Oranı Değerleri.....	57
4.3 Pürüzlülük Değerleri.....	59
4.4 Ortalama Yoğunluk Değerleri	62
4.5 Ortalama Sertlik Değerleri.....	63
4.6 SEM görüntüleri	65
4.7 Profilometre Görüntüleri.....	70
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	74
6. KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	86
EKLER	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°	Derece
°C	Santigrat derece
F	Fahrenhayt
μ	Sürtünme katsayısı
μm	Mikrometre
Al_2O_3	Alümina
BaSO_4	Baryum sülfat
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
CaO	Kalsiyum oksit
Cr	Krom
d	Aşınan malzemenin yoğunluğu
d/dk	Devir/ Dakika
dk	Dakika
d_0	Numunenin çapı
Fe_2O_3	Demir oksit
fm	Deneydeki ortalama sürtünme kuvveti
gh	Fren balatasının havadaki ağırlığı
gs	Fren balatasının sudaki ağırlığı
H_2O	Su
kW	Kilowatt
M	Yükleme Ağırlığı (N)
m_1	Deneyden önce ölçülen fren balata kütlesi
m_2	Deneyden sonra ölçülen fren balata kütlesi
gr/cm^3	Gram/ Santimetreküp
K	Kelvin
m/s	Metre/ Saniye
mm	Milimetre
mm^3/Nm	Milimetreküp/ Newtonmetre
MgO	Magnezyum oksit
N	Newton
n	Toplam devir sayısı
Na_2O	Sodyum oksit
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri
Rd	Disk yarıçapı
Rz	Maksimum yüzey pürüzlülüğü değeri
s	Saniye
S	Kayma Mesafesi
SiO_2	Silisyum dioksit
Sp	En büyük tepe noktası pürüzlülüğü

Sv	En büyük çukur derinliği pürüzlülüğü
Sz	Profilin en büyük yükseklik değeri ortalamaları
TiO ₂	Titanyum dioksit
V	Özgül Aşınma
Wa	Aşınma Oranı
Zr	Zirkonyum
ΔG	Ağırlık kaybı
μ _M	Maksimum sürtünme katsayısı
μ _O	Ortalama sürtünme katsayısı
ρ _b	Balata numunesinin yoğunluğu
ρ _s	Saf suyun yoğunluğu

Kısaltmalar

3D	3 Boyutlu
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
EDX	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
G12	Ağırlıkça %12 garnet içeren kompozit fren balatası numunesi
G3	Ağırlıkça %3 garnet içeren kompozit fren balatası numunesi
G6	Ağırlıkça %6 garnet içeren kompozit fren balatası numunesi
G9	Ağırlıkça %9 garnet içeren kompozit fren balatası numunesi
LOI	Limit oksijen değeri
TB	Ticari Balata
TS	Türk Standardı
MTA	Maden Tetkik ve Arama
P12	Ağırlıkça %12 pomza içeren kompozit fren balatası numunesi
P3	Ağırlıkça %3 pomza içeren kompozit fren balatası numunesi
P6	Ağırlıkça %6 pomza içeren kompozit fren balatası numunesi
P9	Ağırlıkça %9 pomza içeren kompozit fren balatası numunesi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
MAPEG	Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü
TB	Ticari Balata
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Fren balatasını oluşturan temel bileşenler.....	5
Şekil 3.1 Tez işlem basamakları.....	23
Şekil 3.2. Fren balata reçetesi.....	24
Şekil 3.3 Disk pürüzlülüğü ölçüm noktaları.....	47
Şekil 4.1 G12 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.	51
Şekil 4.2 G9 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.	52
Şekil 4.3 G6 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.	52
Şekil 4.4 G3 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.	53
Şekil 4.5 P12 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.....	54
Şekil 4.6 P9 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.....	54
Şekil 4.7 P6 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.....	55
Şekil 4.8 P3 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.....	56
Şekil 4.9 TB sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.....	56
Şekil 4.10 Pomza numunesi ve ticari balata aşınma grafikleri.....	58
Şekil 4.11 Garnet numunesi ve ticari balata aşınma grafikleri.....	58
Şekil 4.12 Pomza deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Ra değerleri.	59
Şekil 4.13 Pomza deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Rz değerleri.	60
Şekil 4.14 Garnet deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Ra değerleri.	60
Şekil 4.15 Garnet deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Rz değerleri.	61
Şekil 4.16 Pomza numunesi ve ticari balata yoğunluk değerleri.	62
Şekil 4.17 Garnet numunesi ve ticari balata yoğunluk değerleri.	62
Şekil 4.18 Pomza içerikli numuneler ve ticari balata Shore D sertlik ölçüm sonuçları.	64
Şekil 4.19 Garnet içerikli numuneler ve ticari balata Shore D sertlik ölçüm sonuçları.	64
Şekil 4.20 Garnet üç boyutlu profilometre ortalama yüzey pürüzlülüğü Sa değerleri... ..	71
Şekil 4.21 Garnet üç boyutlu profilometre en büyük yükseklik değeri ortalama Sz değerleri.....	71
Şekil 4.22 Pomza üç boyutlu profilometre ortalama yüzey pürüzlülüğü Sa değerleri... ..	72
Şekil 4.23 Pomza üç boyutlu profilometre en büyük yükseklik değeri ortalama Sz değerleri.....	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Pomza Numune içeriği ve karışım oranları.....	25
Çizelge 3.2 Garnet Numune içeriği ve karışım oranları.....	25
Çizelge 3.3 Pomzanın Kimyasal Bileşimi % Değerleri	26
Çizelge 3.4 Türkiye Pomza Rezervleri.....	27
Çizelge 3.5 Garnet özellikleri.....	29
Çizelge 3.6 Alümina özellikleri.	30
Çizelge 3.7 Fenolik reçine özellikleri.....	32
Çizelge 3.8 Grafit özellikleri.	33
Çizelge 3.9 Barit özellikleri.....	34
Çizelge 3.10 Ticari balata EDX analiz değerleri.....	43
Çizelge 3.11 Fren balata test cihazı özellikleri.....	45
Çizelge 3.12 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı teknik özellikleri	47
Çizelge 4.1 Sürtünme katsayısı maksimum, minimum ve ortalama değerleri.	57
Çizelge 4.2 Ra ve Rz Disk Pürüzlülük değerleri farkı	61

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Örnek diskli fren balataları (a), Kampana fren balatası (b).	4
Resim 2.2 Kampanalı ve disk fren görünümü.....	12
Resim 3.1 Pomza ve özelliği.....	26
Resim 3.2 Garnet ve özelliği.....	28
Resim 3.3 Alümina ve özelliği.....	29
Resim 3.4 Pirinç tozu ve özelliği.	30
Resim 3.5 Cashew ve özelliği.	31
Resim 3.6 Reçine ve özelliği.....	31
Resim 3.7 Çelik elyaf ve özelliği.	32
Resim 3.8 Grafit ve özelliği.	32
Resim 3.9 Barit ve özelliği.....	33
Resim 3.10 Kullanılan fren balata kompozit malzemeleri.....	35
Resim 3.11 Hassas Terazî	36
Resim 3.12 Mekanik karıştırıcı ve karışım kabı.	37
Resim 3.13 Hidrolik pres.	38
Resim 3.14 Balata üretim kalıbı genel görünümü.....	39
Resim 3.15 Isıl işlem fırını.....	40
Resim 3.16 Shore D sertlik ölçüm cihazı ve standı.	42
Resim 3.17 Ticari balata numune resimleri.	43
Resim 3.18 Fren balata test cihazı.....	44
Resim 3.19 Numune tutucu (a), Zımpara aparatı (b).	45
Resim 3.20 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve probu.	46
Resim 3.21 Karbon Kaplama Cihazı.....	48
Resim 3.22 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz cihazı.....	49
Resim 3.23 Üç boyutlu profilometre cihazı.	50
Resim 4.1 Fren balata numunesi Shore D sertlik ölçüm noktaları.....	63
Resim 4.2 G3 ve G6 numunelerine ait SEM görüntüleri.	66
Resim 4.3 G9 ve G12 numunelerine ait SEM görüntüleri.	67
Resim 4.4 P3 ve P6 numunelerine ait SEM görüntüleri.	68
Resim 4.5 P9 ve P12 numunelerine ait SEM görüntüleri.	69

Resim 4.6 Garnet numuneleri Profilometre görüntüleri.	70
Resim 4.7 Pomza numuneleri Profilometre görüntüleri.	72



1. GİRİŞ

Taşıtlarda kullanılan en önemli sistemlerden birisi de fren sistemleridir. Sistem hidrolik sıvı, pedallar, bağlantılar, fren üniteleri ve balatalardan meydana gelmektedir. Bir fren sisteminin içindeki frenleme bileşenleri güvenli ve verimli çalışması için çok önemlidir.

Fren balataları çok bileşenli kompozit malzemelerden oluşmaktadır. Balatalarda kullanılan malzemeler dolgu malzemesi, takviye malzemesi, sürtünme düzenleyici, yağlayıcılar ve bağlayıcılar gibi 5 temel başlık altında toplanmaktadır. (Unal ve Demirdalmis 2024).

Ticari fren balatalarında 200' den fazla farklı malzeme ve türleri kullanılmaktadır (Hong vd. 2009).

Otomotiv sektöründe kullanılan fren balataları çok sert yapıldıklarında diskte (kampana), yumuşak olduklarında ise kısa sürede balatalarda aşınmalar yaşanabilmektedir. Ayrıca, fren balatalarının ani olarak sıvı birikintisi içerisine girmesi sonucu diskte eğilme, çatlama vb. hasarlar veya yokuş aşağı iniş sırasında aşırı ısınma gibi istenmeyen durumlar oluşabilmektedir.

Bir fren balatasının verimliliği, bileşimine bağlıdır. (Chan ve Stachowiak 2005). Fren balatalarında kullanılan malzemelerin belirlenmesi önemlidir. Otomotiv sektöründe taşıtların gelişmesi ile birlikte fren sistemlerinde de yeni araştırmalar ortaya çıkmıştır. Özellikle son yıllarda fren balatalarında tribolojik yöntemlerle maliyeti en aza indirebilmek amacıyla birçok farklı bileşenli kompozit malzemeler kullanılmıştır.

Asbest, fren balatalarında sürtünmeye dayanıklı olması ve ateşe karşı dayanıklı olmasından dolayı uzun yıllar kullanılmıştır. Fren balata içeriğinde kullanılan asbestin frenleme için gereken uygun şartlara sahip olmasına rağmen frenleme sırasında oluşturduğu tozların havaya karışması ve bu durumun canlıların akciğerlerinde kanser oluşturması nedeniyle kullanımına yasaklama getirilmiştir (Sugözü ve Mutlu 2008).

Asbest uzun yıllar fren sisteminde balata malzemesi olarak kullanılmasına rağmen insan sağlığına olumsuz etkileri nedeniyle alternatif malzeme arayışları son yıllarda artmıştır.

Fren balata malzemelerine alternatif olarak endüstriyel, hayvansal ve tarımsal atıkların kullanıldığı görülmektedir (Sayar 2022).

Frenleme malzemesinin yüksek sürtünme sağlama eğilimi, frenleme işleminin verimliliğini artırırken, ara yüzeydeki yüksek kinetik enerji aktarımı, fren balatalarının aşınmasını artırır ve sıcaklığa bağlı fren etkisinin azalmasına (fade) neden olmaktadır. (Sathickbasha vd. 2020).

Fren sistemlerinde temel eleman, sistemin fonksiyonu açısından en fazla aşınma tehlikesi gösteren balatadır. Karşı sürtünme elemanı diskli sistemlerde disk, kampanalı sistemlerde pabuçtur. Her iki eleman arasında frenleme esnasında meydana gelen sürtünme ve aşınma sonucunda bir tribofilm (sürtünme tabakası) meydana gelir. Bu film genellikle disk yüzeyinde yağlayıcı gibi bir koruma görevine sahiptir. Balatanın abrazif etkilerine karşı diski korur ve sürtünme olayının gelişiminde çok önemli bir yere sahiptir. Frenleme esnasında çevre şartları da önemlidir. Toz, kir, su, hava koşulları gibi etkenler tribolojik teması ve dolayısıyla frenleme performansını etkiler (Ertan 2008).

Yüksek performanslı bir fren balatası kompoziti, yüksek ısı kararlılığına, düşük titreşime, düşük aşınma oranına, kararlı/yeterli sürtünme katsayısına sahip olmalı ve çevre dostu olmalıdır (Zhao vd. 2020).

Pomza bol gözenekli bir yapıya sahiptir. Gözenekli bir yapıda olmasından dolayı ısı ve ses izolasyonu oldukça yüksek, geçirgenliği düşüktür (MTA 2020). Bu özelliklerinden dolayı pomza inşaat, tarım, tekstil, kimya vb. sektörlerde kullanılmaktadır.

Granat genellikle kum püskürtme işleminde, zımpara kağıdı yapımında ve su jeti ile kesme işleminde aşındırıcı olarak, ayrıca su arıtmada filtre malzemesi olarak kullanılmaktadır (Engin 2010).

Fren balata malzemelerine alternatif olarak Pomza ve Garnet endüstride birçok alanda kullanılıyor olmakla beraber sürtünme özelliklerinden dolayı fren balatalarında kullanılabileceği düşünülmüştür.

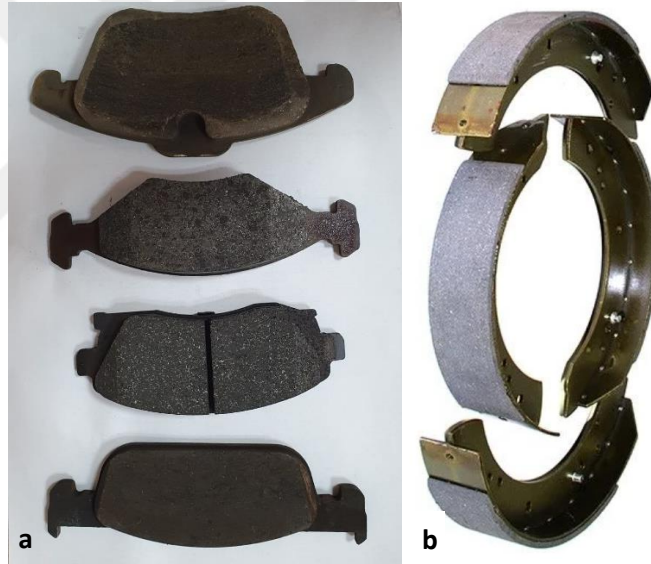
Bu çalışmada pomza ve garnet ilavesi ile yeni bir sürtünme kompozit formülasyonu oluşturulmuş ve aşınma-sürtünme özelliklerini incelemek için tüm testler deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda malzemelerin özellikleri, çeşitleri, frenleme verimleri, sıcaklıkları, mikroskobik görüntüleri, aşınmaları, sürtünme katsayıları ile fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir.

Tez çalışmasında giriş bölümünden sonra, ikinci bölüm literatür kısmında fren sistemleri, sürtünme ve aşınma, fren balataları ve balata imalatında kullanılan malzemeler, üretim yöntemleri ve fren balatası standartları ele alınmıştır. Üçüncü bölüm materyal metot kısmında numune üretimi, üretim ve testler için kullanılan cihazlar ile ölçüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde deney sonuçlarından elde edilen bulgular irdelenmiştir. Beşinci bölümde de tartışma ve sonuçlar kısmında yapılan çalışmanın sonuçları tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Dünyadaki araç sayısının 2040 yılına kadar iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir. Böyle bir durumda fren balataları gibi otomobil bileşenlerine olan ihtiyaçta önemli bir artış yaşanacaktır (İnt. Kyn. 1).

Balatalar ticari, binek, ağır taşıtlar gibi taşıtlarda farklı içeriklerde, boyutlarda, kanallı ve düz biçimlerde yapılmaktadır (Resim 2.1). Fren balataları yumuşak- sert fren kullanım durumuna göre, trafik yoğunluğuna göre ve içeriğini oluşturan reçeteye göre farklı ömre sahiptirler. Binek araçlar için ortalama balata ömrü 40-50 bin km civarındadır (İnt. Kyn. 2).



Resim 2.1 Örnek diskli fren balataları (a), Kampana fren balatası (b) (İnt. Kyn.3).

Fren balatalarında kullanılan malzemeler, genellikle yüksek sıcaklık dayanımı olan, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı gibi özelliklere sahip olması gereken özel bileşiklerden yapılmıştır.

Taşıtlarda kullanılan fren sürtünme malzemeleri bir araya gelen farklı boyutlardaki birçok tozun sıcak şekilde preslenmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Meydana gelen kompozit malzemelerin aşınma ve sürtünme değerleri kompoziti oluşturan malzemelerin

fiziksel özelliklerine bakılarak değerlendirilmesi mümkün olmamaktadır (Zaharudin vd. 2011).

Kompozit fren balatalarının gürültüyü azaltma ve düşük özgül ağırlık gibi avantajları bulunmaktadır (Unal ve Demirdalmis 2024). Literatürde fren balata malzemelerine alternatif olarak endüstriyel, hayvansal ve tarımsal atıkların kullanıldığı görülmektedir (Sayar 2022).

2.1 Fren Balata İmalatında Kullanılan Temel Bileşenler

Fren balata malzemeleri takviye edici, dolgu maddesi, bağlayıcı, yağlayıcı, sürtünme düzenleyici olarak 5 ana başlık altında toplanmaktadır (Eriksson ve Jacobson 2000). Şekil 2.1’ de fren balatasını oluşturan temel bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Fren balatasını oluşturan temel bileşenler.

Frenleme sırasında balataların aşınmış parçacıklarının bir kısmı havaya karışır. Havadaki bu parçacıkların uzun vadede olumsuz sağlık sorunlarına yol açtığı belirlenmiştir. Havadaki taneciklerin boyutunun, bunların insan solunum yollarındaki birikimini ve etkisini etkileyen önemli bir faktör olduğuna inanılmaktadır. İri partiküllerin çoğunluğu (çapı yaklaşık 2,5 μm) burun boşluğunda ve boğazda birikir ancak daha küçük partiküller

(çap: 0,1–2,5 μm) ve ultra ince partiküller (0,1 μm) tipik olarak akciğerlerin derinliklerine nüfuz eder ve oldukça negatif sonuçlar doğurmaktadır (Mulani vd. 2022).

2.1.1 Takviye malzemeleri

Takviye malzemesi, kompozitlere mukavemet ve sertlik gibi mekanik mukavemet özellikleri katarlar. Çevreye zararlı etkisi olan asbest, yıllardır takviye elemanı olarak kullanılmaktadır (Sugözü ve Sugözü 2020). Asbestin yasaklanması ile beraber alternatif olarak farklı elyaf takviye malzemeleri ortaya çıkmıştır. Balatalarda kullanılan malzemeler frenleme performansına ve balata aşınma miktarını önemli ölçüde etkilemektedir. Balata imalatında takviye malzemesi olarak literatürde çelik elyaf (Lertwassana vd. 2019), kevlar (Singh vd. 2020), cam elyaf (Ahlawat vd. 2019), şeker kamışı lifi (Bayram ve Topuz 2021), muz kabuğu lifi (Amirjan 2019), karbon fiber (Mutlu vd. 2016) gibi birçok farklı malzeme kullanılmaktadır.

2.1.2 Dolgu malzemeleri

Dolgular ısı iletkenliği, gözenekliliği ve aşınma direncini geliştirmek, gürültüyü azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak için kullanılır. Dolgu maddeleri, özelliklerden ödün vermeden fren balatasının maliyetini azaltmak için kullanılan daha ucuz malzemelerdir. (Vıderščak vd. 2022). En yaygın kullanılan dolgu maddeleri kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve baryum sülfattır (BaSO_4) (Xiao X vd. 2016). Ayrıca yapılan bazı çalışmalarda kil (Eriksson ve Jacobson 2020), kalsit (Ünaldı ve Kuş 2018), uçucu kül (Ahlawat vd. 2019), vermikülit (Liu vd. 2019), wollastonit (Saha ve Satapathy 2019), boraks (Başar vd. 2018) ve granit tozu (Ojha ve Biswal 2019) da kullanıldığı görülmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda fren balatasının temel özelliği, fren diskiyle yeterince yüksek bir sürtünme katsayısı sağlaması, ayrışmaması veya bozulmamasıdır.

2.1.3 Bağlayıcı malzemeler

Fren balatalarında kullanılan bağlayıcıların başlıca işlevleri, aşırı çalışma koşulları altında üretim ve kullanım sırasında frenin mekanik sağlamlığını ve bütünlüğünü sağlamaktır. Bağlayıcıların ek bir işlevi de titreşimleri azaltmak ve frenleme sırasında konforu arttırmaktır. Ayrıca bağlayıcının yüksek termal kararlılığa ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı dirence sahip olması gerekir (Hatam 2018, Arman 2018).

Bağlayıcı malzeme olarak genellikle fenolik reçineler kullanılmaktadır. Literatüre bakıldığında fenolik reçine (Ahmadijokani vd. 2020, Gurunath ve Bijwe 2007), kauçuk (Tavangar vd. 2020), epoksi reçine (Ikpambese vd. 2016) ve bor modifiyeli reçine (Cai vd. 2015) vb. malzemelerin bağlayıcı olarak kullanıldığı görülmektedir.

2.1.4 Yağlayıcılar

Yağlayıcılar fren balata malzemelerinin aşınmasını azaltma da kullanılmaktadır. Yağlayıcı malzeme olarak genellikle mükemmel bir yağlayıcı olan grafit, fren balatası yüzeyi ile disk arasındaki doğrudan teması azalttığı ve frenin aşınma oranını azalttığı için tercih edilmektedir (Viderščak vd. 2022). Sürtünme malzemeleri için kullanılan bazı katı yağlayıcılara bakıldığında grafit (Joo vd. 2019, Sun ve Zhou 2019), kalay disülfür (Antonyraj ve Singaravelu 2019), sentetik grafit (Jeganmohan vd. 2020), grafen (Rajan vd. 2019) kullanılmaktadır. Grafit yağlayıcı tercihen pullar halinde bulunur; bu grafit pullar en azından balata ile fren diski arasında yağlamanın sağlanmasına yardımcı olur (Taylor vd. 1998).

2.1.5 Sürtünme düzenleyici malzemeler

Sürtünme düzenleyici malzemelerin kullanım nedenlerine bakıldığında sürtünme katsayısını kararlı tutabilmektir. Bu malzemeler tercih edilirken tane boyutu ve sertlik derecesi etkilidir. (Öztürk vd. 2013). En yaygın kullanılan sürtünme düzenleyiciler alüminyum oksit (alümina- Al_2O_3) (Binda vd. 2020), cashew (kaju tozu) (Lertwassana vd. 2019), bakır tozu (Kumar ve Ghosh 2020), pirinç tozu (Saha ve Satapathy 2019),

demir oksit (Kumar ve Ghosh 2020), fındık kabuğu tozu (Akıncıoğlu vd. 2021), bronz tozu (Aranganathan vd. 2016) vb. maddeler kullanılmaktadır.

2.2 Toz Metalurjisi Yöntemi

Toz metalurjisi, toz halindeki metal ya da alaşımların işlenmesi ve kullanılmasını içeren bir metalurji dalıdır. Bu süreç, metal veya alaşımların toz haline getirilmesi, bu tozların şekillendirilmesi ve son olarak sinterleme veya metal enjeksiyonu gibi işlemlerle istenen parçaların üretilmesini kapsamaktadır. Toz metalurjisi, geleneksel metal işleme yöntemlerine göre bir dizi avantaj sunar, çünkü daha kompleks parçaların üretimi için daha esnek ve ekonomik bir yol sağlamaktadır. Ayrıca, farklı malzemelerin karıştırılmasıyla özel alaşımların elde edilmesine ve daha homojen yapıların oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu nedenle, otomotiv, havacılık, tıp, savunma ve diğer endüstrilerde çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Otomotiv sektörüne bakıldığında toz metalurjisi debriyaj ve fren balataları, buji, amortisör ve vites kutusu parçaları üretiminde kullanılmaktadır (Öveçoğlu 1997, Sugözü 2009).

Toz metalurjisi yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre üstünlükleri (German 1997);

- Talaş kaldırma işlemleri azaltılarak veya ortadan kaldırılarak hurda kayıpları azaltılır. Ergitme kayıpları yoktur.
- Daha hassas yüzeyli ve düşük toleranslı parçalar üretilebilir.
- Yoğunluk ve ergime noktasındaki farklılıklar nedeniyle başka yöntemlerle üretimi mümkün olmayan alaşım veya karışımlar (kompozitler) imal edilebilir.
- Aşınma dayanımını arttırmak için gözeneklere yağ emdirilebilir.
- Hızlı katılaştırılmış toz üretilebilir.
- Seri imalata uygundur.

Toz metalurjisi yönteminin diğer üretim yöntemlerine göre zayıflıkları (German 1997);

- Tozların kalıp içindeki akışı sınırlıdır. Bu nedenle üretilecek parça şekli kısıtlayıcı bir faktör olabilir.
- Yoğunluk karmaşık şekilli parçaların her yerinde aynı olmayabilir.
- Üretilen parçaların mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için ek işlemler gerekebilir.
- Ekonomik olması için seri üretim yapılması gerekmektedir.
- Boyut toleransları talaşlı işleme göre biraz daha kabadır.

2.2.1 Tozların Tane Boyut Ölçümü

Tozların taneciklerinin belirlenmesi için birçok farklı yöntem vardır. Tozun dağılımının her birinin boyutu aynı değildir. Parçacık boyutu, tane boyutunun ortalamasından yararlanılarak hesaplanır. Tozun geometrisinin iç içe geçmiş olması nedeniyle, parça boyutu ölçüm yöntemleri de farklı farklı olabilmektedir.

Toz taneciklerinin belirlenmesi için yaygın bir yöntem, bir dizi elek kullanılarak yapılan elek analizidir. Tozlar, farklı incelikteki eleklerden geçirilerek boyutlarına göre ayrılırlar. Elek analizi yönteminde toz parçasının gerçek boyutu kesin olarak belirlenemez, bu nedenle tozların tane boyutu genellikle iki meş aralığındadır.

2.2.2 Tozların Karıştırılması

Karıştırma işleminin temel amacı, tozlarının homojen olarak dağılmasıdır. Farklı boyut, yoğunluk ve formdaki toz parçacıklarının homojen olarak karıştırılması, üretilmek istenen parçaların performansını arttırdığından önemli bir işlemdir. Tozların homojen olması, sıkıştırma ve sinterleme de iyileştirmeler sağlamaktadır.

2.2.3 Tozların Preslenmesi

Homojen bir şekilde karıştırılan toz partiküllerine istediğimiz şekli vermek için presle sıkıştırma işlemi yapılmaktadır. Presleme iki şekilde gerçekleştirilmektedir.

Soğuk Presleme: Herhangi bir ısı işlem olmadan malzemeye ön şeklini vermek amacıyla belirli bir basınç altında, uygulanan presleme işlemidir.

Sıcak Presleme: Kompozit malzemenin yoğunluğunu ve dayanımını artırmak için sıcak presleme yapılır. Pres yapılmadan önce ilk olarak kalıp ısıtılır. Isı etkisiyle karışımı içerisindeki parçacıklar birbirine yapışır.

2.2.4 Tozların Sinterlenmesi

Toz metalurjisi için sinterleme önemli süreçlerden birisidir. Preslenmiş malzemeye yüksek ısı verilerek toz parçacıkların birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Sinterleme sonunda malzemenin sertliği ve mukavemeti artar ayrıca malzeme özelliklerinde de ısı işlem yardımıyla iyileşme sağlanmaktadır.

TS 555 (1992), karayolu taşıtlarının sürtünmeli frenlerinde kullanılan balataların tarifine, sınıflandırma ve özelliklerine, numune alma, muayene ve deneyleri ile piyasaya arz şekline dairdir. Bu standart balata konusunda ülkemizdeki en kapsamlı standarttır.

Bu standartta balata ile ilgili;

- Sürtünme katsayısı
- Yoğunluk
- Özgül aşınma
- Sertlik,
- Kesme kuvveti
- Eğilme
- Isı geçirgenliği
- Kalınlaşma

- İç kesme dayanımı,
- Esneklik
- Sıkıştırılabilirlik
- Yanma kaybı
- Yağ, fren sıvısı, su ve tuzlu suya dayanım
- Genleşme (kampana)
- Korozyon sebebiyle demir yüzeylere tutunma
- Boyut muayenesi
- Yüzey düzgünlüğü ve pürüzlülük
- Pah
- İşaretleme ve ambalajlama özellikleri ve bu özellikler için yapılacak deney şartları yer alır.

TS 9073 (1991), karayolu taşıtlarında kullanılan disk fren ve kampana fren balatalarının iç kesme kuvvetinin ölçülmesi metoduna dayanır. TS 9076 (1991), bu standart, fren balatalarının sürtünme özelliklerinin küçük deney parçaları kullanarak değerlendirilmesi ile ilgili deney metoduna dairdir.

2.3 Taşıtlarda Fren Sistemi

Fren sistemi, aracın hızını azaltmak veya durdurmak için kullanılan mekanizmaları içerir. Araçlarda kullanılan tipik bir fren sistemi, hidrolik fren sistemidir. Bu sistemde, fren pedalına basıldığında hidrolik basınç oluşturulur ve bu basınç, tekerleklerdeki fren balatalarına veya disklerine uygulanarak aracın durmasını sağlamaktadır.

Diğer bir fren sistemi ise disk fren sistemidir. Bu sistemde, tekerlekler üzerindeki disklerin etrafına bir fren kaliperi yerleştirilir. Fren pedalına basıldığında, kaliperin içindeki fren balataları diskleri sıkıştırarak aracı durdurmaktadırlar. Bunlar sadece iki yaygın fren sistemi örneğidir, farklı araçlarda ve makinelerde farklı fren sistemleri kullanılabilir.

Fren sistemlerinde kampana veya disk fren kullanımının birbirlerine göre bazı üstünlükleri vardır (Domaç 2006).



Resim 2.2 Kampanalı ve disk fren görünümü (İnt. Kyn. 4).

Kampanalı ve disk fren Resim 2.2’ de görülmektedir. Kampanalı ve disk frenlerin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (Domaç 2006).

Kampanalı frenlerin üstünlükleri:

- Kampanalı frenlerde baskı kuvveti daha küçük olduğundan fren elemanlarına dağılan yüklerde disk frenlere göre daha küçük olmaktadır. Bu nedenle kampanalı frenler küçük kesitlere sahip olarak ve daha ucuz imal edilebilirler.
- Kampanalı frenlerde balata basıncı düşük olduğundan aşınmalar daha azdır.
- Frenlemede, hafifliği nedeniyle kampanalı fren balataları, disk fren balatalarına göre daha az ısınmaktadır.

Disk frenlerin üstünlükleri:

- Disk frenlerde, balata disk arasındaki sürtünme katsayısının değişimlerinden kaynaklanan fren momenti değişimleri, kampanalı frenlerdekine oranla daha az olmaktadır.
- Frenlerin ıslanması halinde, disk frende su damlaları merkez kaç kuvveti ile çabucak savrulup atılabilirken kampanada daha uzun süre etki etmektedir.
- Artan sıcaklık sonucu kampana genişerek şekil değişimine uğramaktadır. Disk frenlerde ise ısı genleşme sonucu ortaya çıkan boyut büyümesi herhangi bir probleme neden olmamaktadır. Kalınlığı artan disk, balataları bir miktar geri iter ve yalnızca pedal hareketi azalır.

Disk frenin en büyük avantajı, 1073 ila 1173 K'ye (1500 ila 1600°F) varan yüksek sıcaklıklarda çok az zayıflamayla çalışabilme yeteneğidir. Fren diskinin ısıtılması kalınlığını artırır, böylece fren hidroliği hacminde herhangi bir kayba neden olmaz, yani pedal hareketinde artış veya yumuşak pedal hissi olmaz. Bununla birlikte, ABD kamyon hız sınırları olan 75 mil/saat dikkate alındığında, disk frenlerin soğutma kapasitesini hiçbir kullanım faktörünün (pas, kir) etkilemediği varsayıldığında, disk frenler çoğu açıdan kampanalı frenlerden daha üstündür (Limpert 2011).

Disk frenlerin bir diğer önemli faydası da fren torku ile balata/disk sürtünme katsayısı arasındaki doğrusal ilişkidir. Örneğin balata sürtünme katsayısındaki %10'luk bir artış, fren torkunu %10 artırır. Tipik bir çift servo fren için benzer bir sürtünme artışı, fren torkunu %30 ila %35 kadar artırır (Limpert 2011).

Kampanalı frenler sıcaklığa oldukça duyarlıdır. Maksimum 673 ila 700 K (750 ila 800°F) sıcaklık aşılmalıdır. Sadece sürtünme katsayıları etkilenmez, aynı zamanda artan sıcaklıklarla tambur çapı da artar. 648 K'de (700°F), tipik yolcu kampanalı fren çapları 1 ila 1,5 mm (0,05 ila 0,06 inç) kadar artabilir ve buna karşılık gelen daha uzun tekerlek silindiri piston hareketi, pedal hareketini frenler soğukken normal değer %30 ila 40'ı kadar artırabilir. Ek olarak, daha büyük tambur çapı, balata ile tambur arasında uygunsuz

temasa neden olur, bu da balata/tambur basıncında ani artışlara ve dolayısıyla daha yüksek bölgesel balata sıcaklıklarına ve fren tork çıkışında bir değişikliğe neden olabilir.

Isı üretim sürecinden kaynaklanan yüksek sıcaklıklar nedeniyle tüm balatalar sürtünme yüzeyinde parçalanmaya başlar. Balata ile tambur veya balata ile disk arasındaki eşit olmayan basınç dağılımları ve diğer yüzey düzensizlikleri nedeniyle, balata sürtünme yüzeyi sıcaklıkları, balata temas alanı üzerinde eşit olmayacaktır. Daha yüksek sıcaklıktaki alanlar, daha düşük sıcaklıktaki bölgelere göre daha düşük sürtünme seviyesine sahip olacaktır.

Fren sıcaklıklarının analizi, hem frenler tarafından emilen toplam enerjinin hem de bu enerjinin balata ile kampana veya balata ile disk arasında nasıl dağıtıldığının doğru bir şekilde belirlenmesini gerektirir. Frenlerdeki ısı iletimirulmanlar, yağlayıcılar veya contalar gibi diğer kritik bileşenleri güvenli olmayan bir şekilde etkileyebilir. Aşırı ısıtma ve soğutma, disk veya kampananın çatlamasına neden olabilir.

Balatalardan beklenen temel özellikler,

- Yüksek ısılara dayanıklı olmalıdır.
- Aşınmaya karşı dayanıklı olmalıdır, kullanım ömrü uzun olmalıdır.
- Sürtünme sırasında olumsuz ses çıkarmamalıdır.
- Su, toz, çevre kirliliği gibi hava şartlarına dayanıklı olmalıdır.
- Mukavemetin yüksek olması beklenmektedir.
- Korozyon direnci iyi olmalıdır.

Fren balataları 3 tipe ayrılır.

Bunlar:

- Metalik fren balatası
- Yarı metalik fren balatası
- Seramik fren balatası

Yarış araçlarında genellikle metalik fren balataları kullanılır. Sinterlenmiş çelikten yapılmış olup hiçbir katkı maddesi kullanılmadan üretilmiştir. Çok gürültülü olup fren uygulamak için diğer frenlerden çok daha büyük bir kuvvete ihtiyaç duyarlar. Yarı metalik fren balataları bir tür metalik olmayan balatalardır. Genellikle daha serttirler ve diğer balata türlerine göre daha çabuk aşınırlar. Bu nedenle daha hızlı aşınma ve değiştirme süresi açısından daha maliyetlidirler. Ayrıca frenleme torkunu üretmek için fazla miktarda kuvvet gerekir. Seramik fren balataları, bakır pullara ve filamentlere bağlanan porselen ve kilden yapılmıştır. En büyük dezavantajı, bu seramik fren balatalarının ısıyı iyi dağıtmaması ve dolayısıyla çok kolay bükülmesidir. Ancak diğer fren balatalarına göre frenleme sırasında çok daha az ses çıkarma avantajına sahiptirler (Karthikeyan vd. 2019).

2.4 Triboloji

Triboloji, yüzeylerin birbirleriyle temas halindeyken ortaya çıkan sürtünme, aşınma ve yağlama gibi süreçleri inceleyen bir bilim dalıdır. "Triboloji" terimi, Yunanca "tribos" (sürtünme) ve "logos" (prensipte veya mantık) kelimelerinden türetilmiştir (İnt. Kyn. 5).

Triboloji, endüstriyel sistemlerde, makinelerde, araçlarda ve doğal süreçlerde sürtünme ve aşınma olaylarını anlamak ve kontrol etmek için önemlidir. Bu alanda çalışanlar, malzeme seçimi, yüzey işleme teknikleri, yağlama stratejileri ve tribolojik performansı artırmak için diğer yöntemler gibi konularda araştırma yaparlar.

Triboloji, birçok alanda uygulama bulur:

- Endüstriyel Uygulamalarda; Makine parçaları, rulmanlar, dişliler ve sürtünmeli yüzeyler gibi endüstriyel sistemlerde,
- Biyomedikal Uygulamalarda; Protezler, eklemler, implantlar ve diğer tıbbi cihazlar gibi biyomedikal uygulamalarda da

- Otomotiv Endüstrisi; Motorlar, fren sistemleri, şanzımanlar ve lastikler gibi birçok bileşen, sürtünme ve aşınma ile ilgili tribolojik prensiplere tabidir. Triboloji, araçların verimliliğini artırmak ve güvenliği sağlamak için otomotiv endüstrisinde önemli bir rol oynar.

Triboloji, mühendislik, malzeme bilimi, fizik ve kimya gibi disiplinler arası bir alandır ve geniş bir uygulama alanına sahiptir.

2.5 Sürtünme

Sürtünme, DIN 50281'e göre: "Birbiri üzerinde çeşitli şekillerde (kayma, yuvarlanma) hareket eden elemanların göreceli hareketlerini yavaşlatan ya da engelleyen mekanik bir dirençtir". Bu mekanik direncin sebebi, birbirine temas eden hareket halindeki yüzeylerin kayması esnasındaki kafes hareketleridir.

Sürtünme; balata ile disk arasında, lastik ve yol arasında ayrıca kavramada görülmektedir. Sürtünme nedeniyle verim kaybı meydana gelmektedir.

Sürtünme katsayısı; TS 555'e göre, disk veya kampana ile disk veya kampana fren balatası arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı sürtünme katsayısı olarak tanımlanır. Sıcak sürtünme katsayısı 300, 350 ve 400 °C sıcaklıklarında ölçülen ortalama katsayılarının aritmetik ortalamaları, soğuk sürtünme katsayısı ise 100, 150 ve 200 °C' de ölçülen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Sürtünme katsayısı 0.001 ile 10 değerleri arasında değişmektedir (Sugözü 2009).

2.6 Aşınma

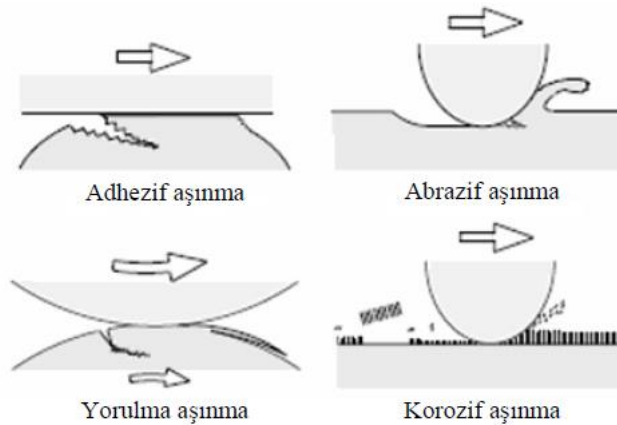
Aşınma, karşılıklı yüzeylerin birbirleri ile etkileşimleri sonucu mekanik harekete bağlı olarak malzemede istenmeyen parça kopmaları şeklinde tanımlanır (Sugözü 2009). Aşınma nedeniyle makineler dayanıklılıklarını ve güvenilirliklerini kaybetmektedir. Bu nedenle aşınma kontrolü, geleceğin ileri ve güvenilir teknolojisi için ihtiyaç haline gelmiştir (Bhushan 2001).

Genel olarak aşınma tek bir aşınma mekanizması yoluyla gerçekleşmez, dolayısıyla her aşınma modundaki her aşınma mekanizmasını anlamak önem kazanmaktadır. Dinamik, çevresel ve malzeme parametrelerinden oluşan tribosistemdeki küçük bir değişiklikte bile aşınma büyük ölçüde değişmektedir (Bhushan 2001).

Disk fren kaliperinin en önemli gereksinimlerinden biri, balataları diske mümkün olduğunca eşit bir şekilde bastırmaktır. Balata ve disk arasındaki eşit basınç, eşit balata aşınması ve fren sıcaklıkları ve daha kararlı balata/disk sürtünme katsayıları ile sonuçlanır. Düzgün olmayan basınç dağılımı, özellikle yüksek hızlarda şiddetli fren uygulamalarında fren balatalarını eşit olmayan şekilde aşındırır. Yaklaşık 573 ila 623 K (600°F) üzerindeki fren sıcaklıklarında balata aşınması hızla artar, bu da etkisiz kaliper tasarımları kullanıldığında konik balata aşınmasına neden olur. Balataların eşit olarak aşınması kaliteli kaliper tasarımının önemli bir göstergesidir (Limpert 2011).

2.6.1 Aşınma Tipleri

Aşınma türleri adhesif, abrasif, yorulma ve korozyon olmak üzere 4 gruba ayrılmaktadır (Takadoun 2008).



Şekil 2.2 Aşınmanın şematik gösterimi (Limpert 2011).

Adhesif aşınma: Adhesif aşınma aşınma türleri, arasında en çok görülen aşınma tipidir. Adhesif aşınma, iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sırasında yapışması ve

kayması sonucunda küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşmaktadır (Gnecco ve Meyer 2007).

Bir yüzeyden kopan parça diğer yüzeye yapışarak aşınmayı oluşturur. Bu aşınma çok düşük hızlarda da oluşabilmektedir. Temas halinde olan yüzeyler birbirlerine pürüzlü noktalarda etki ederler (Moore 1975).

Abrazif aşınma: Sert malzemenin yumuşak bir malzeme ile temas ettirildiğinde meydana gelen aşınma türüdür. Abrazif aşınma malzemede çiziklere, aşınma oluklarına ve malzeme kopartmaya neden olabilir. Disk ile balata arasında bir sürtünme alanı meydana getiren balata içerisinde bulunan, sertliği fazla olan malzemeler yani abrasifler frenleme esnasında çok az aşınırlar ya da hiç aşınmazlar. Disk veya balata yüzeyinden sürtünme sonucu kopan parçalar, sert partiküllerin etraflarında sıkışarak birikir. Sürtünmenin devam etmesi ile ortaya çıkan sıcaklığın etkisiyle meydana gelen sürtünme alanları büyür ve sürtünme tabakası denilen tabakaları oluşturmaktadır (Takadoum 2008, Sugözü vd. 2016).

Yorulma aşınması: Aşınma parçacıklarının oluşması için belirli sayıda tekrarlanan temasın gerekli olduğu başka aşınma durumları da vardır. Bu tür temas döngülerinden sonra oluşan aşınmaya yorulma aşınması denir. Yuvarlanan elemanlarda genel olarak gözlemlenen elastik temas durumunda ana aşınma mekanizması, temas bölgesindeki yüksek çevrimli yorulma kırılmasıdır (Limpert 2011).

Korozif aşınma: Birbirine temas eden katı yüzeylerden en az birinin çalışma ortamında korozyona uğraması ve bunun devamlı olarak tekrarı ile meydana gelen aşınma tipidir. Sert olan ve koparak sürtünme yüzeyleri arasına giren partiküller aşındırıcı bir etki yaparak aşınmayı artmasına sebep olurlar. Korozif aşınma, çevresel koşullarla meydana gelen çatlak büyümesi nedeniyle parçaların ömrünü de kısaltır (Akıncıoğlu 2018, Limpert 2011).

Aşınma kütle, şekil, sertlik, malzeme özellikleri ve çevre gibi çeşitli sistem parametrelerinin değişimine duyarlıdır. Aşınmanın bu kadar çok parametrelili olması

nedeniyle, pratikte aşınma oranının niceliksel tahmini zor olmaktadır. Bu nedenle ana aşınma tipini ve onun tipik aşınma mekanizmasını sistem parametreleriyle birlikte tanımak önem kazanmaktadır.

2.7 Aşınma Hesabı Yöntemleri

Aşınma dolaylı veya doğrudan olmak üzere birçok şekilde ölçülebilmektedir. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

2.7.1 Ağırlık Farkı Metodu

Ağırlık farkı metodu hassas terazi yardımıyla ölçülebilmesi ve ekonomik olmasından dolayı çok kullanılan bir aşınma hesabı yöntemidir. Deney numunelerinin her ölçüm için, yerinden çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune aşınma cihazının üzerindeyken ölçü alınamaması, bu yöntemin dezavantajıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr. hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Ağırlık kaybı metoduyla aşınma hesabını Eşitlik (2.1) ile hesaplanır (Akıncıoğlu 2018).

$$Wa = \frac{\Delta G}{d.M.S} \quad (2.1)$$

Ağırlık kaybı eşitliğinde;

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

ΔG = ağırlık kaybı (mg),

S = kayma mesafesi (m),

M = yükleme ağırlığı (N),

d = aşınan malzemenin yoğunluğu (gr/cm^3) olarak verilmiştir.

2.7.2 Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma sonrasında oluşan boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile kıyaslanması ile elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımı ile $\pm T_m$ duyarlılıkta ölçülmelidir.

2.7.3 Özgöl aşınma

TS 9076'da fren balatalarının sürtünme katsayısının belirlenmesinde uygulanan sabit basınç yardımıyla sürtünme katsayısı tespit edilir. Her balata numunesine ait deney sonunda balata hassas terazide tartılarak kütle kaybı bulunur. Bulunan kütle kaybı TS 9076'da verilen kütle kaybını esas alan Eşitlik (2.2) ile hesaplanarak özgöl aşınma değerleri elde edilir. TS 555 standardına göre, fren balatalarına özgöl aşınma testleri uygulanmalıdır. Fren balatası numunelerinin testlerinde aşındırıcı diskin kullanıldığı testlerde özgöl aşınma miktarı dikkate alınabilir. Numunelerin özgöl aşınma Eşitlik (2.2) ile hesaplanır (Akıncıoğlu 2018).

$$V = \frac{1}{2\pi R_d} \times \frac{(m_1 - m_2)}{n f_m d} \quad (2.2)$$

Eşitliğe göre;

V = Özgöl aşınma,

m₁ = Deneyden önce ölçülen fren balatası kütlesi (gr),

m₂ = Deneyden sonra ölçülen fren balatası kütlesi (gr),

d = Balata yoğunluğu (gr/cm³)

R_d = Disk yarıçapı (m),

f_m = Deneydeki ortalama sürtünme kuvveti (N),

n = Toplam devir sayısı (devir) olarak verilmiştir

2.8 Fren Balatası Üretim Yöntemleri

Fren balatası numunelerini oluşturan, hassas terazide tartılan malzemeler, ilk aşamada I tipi, V tipi, bıçaklı mikser, değirmen tipi, sanayi tipi karıştırıcı veya turbula tipi kinetik karıştırıcılarda homojen karışım sağlamak için karıştırılmaktadırlar. İkinci aşamada soğuk kalıplama sonrasında sıcak kalıplama ya da yalnızca sıcak kalıplama teknikleri ile

kalıplanmakta bazı çalışmalarda son işlem olarak ısıtma işlemi fırınında kütleme işlemine tabi tutulmaktadır (Yavuz ve Bayrakçeken 2022).

2.9 Fren Balatası Test Standartları

Fren balataları için standartlar, SAE J661, ECE R90 ve TSE tarafından belirlenen çeşitli standartlarla belirlenir.

Fren balataları konusunda Ülkemizde en kapsamlı standart olan TS555 (2019) standardında, bağlayıcı atıflar, sınıflandırma, özellikler (Mekanik karakteristikler, yüzey düzgünlüğü ve çatlaklık, eğilme dayanımı ve esneklik, yağ ve fren sıvısı, su ve tuzlu suya dayanım, korozyon sebebiyle demir yüzeylere tutunma), boyut ve toleranslar, numune alma, muayeneler (Gözle muayene, boyut muayenesi), deneyler (Sürtünme karakteristikleri deneyi, sertlik deneyi, kesme kuvvetine dayanım tayini, sıkıştırılabilirlik tayini, eğilme dayanımı ve esneklik tayini, yağ ve fren sıvısı, su ve tuzlu suya dayanım tayini, korozyon sebebiyle demir yüzeylere tutunma) ve sonuç olarak da değerlendirmeler içermektedir (TS555 2019).

TS7965 (1990)'de karayolu taşıtlarının disk ve kampana frenlerinde kullanılan balataların korozyon sebebiyle demir yüzeye tutunma özelliklerini tayin metodunu, TS9073 (1991)'de iç kesme mukavemeti tayini, TS9074 (1991)'de sürtünmeli disk fren balatalarının sıcaklığa bağlı olarak boyut değişikliğinin ve ısı transferine direncinin tayini, TS9075 (1991) karayolu taşıtlarında kullanılan sürtünmeli fren balatalarının su, tuzlu su, yağ ve fren sıvısına dayanımını tayin etme, TS9801 (1992)'de fren balatasının üretiminde kullanılan kaolenin tarifine, sınıflandırma ve özelliklerine, numune alma, muayene ve deneyleri ile piyasaya arz şekli tarif edilmektedir (Yavuz 2022).

3. MATERYAL ve METOT

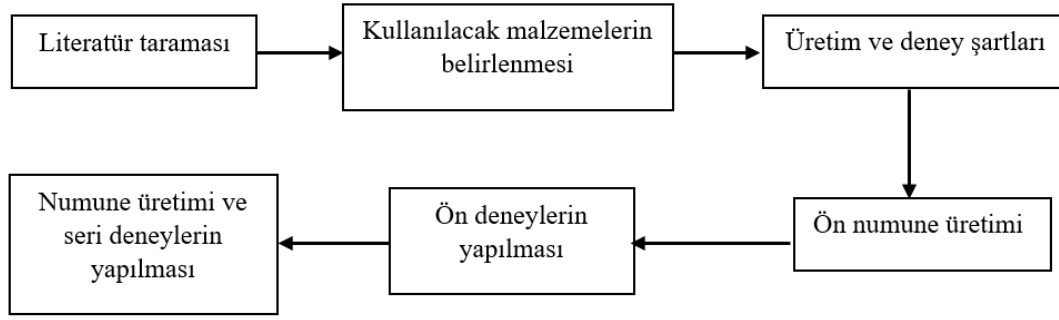
Fren balata malzemeleri kompozit bir yapıdadır ve üretim yönteminde toz metalurjisi kullanılmaktadır. Balata malzemeleri içerisinde farklı görevleri olan birçok malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemelerin belirlenmesi sonucunda kompozit fren balataları üretimi gerçekleştirilmektedir.

Fren balatası malzemesini seçerken dikkate alınması gereken önemli faktörler; Sürtünme katsayısı , daha düşük aşınma oranı, daha yüksek ısı dağılımı hızı, neme karşı daha iyi direnç, yüksek çekme, basınç ve kesme mukavemeti , düşük su ve yağ emiciliği, yüksek sıcaklıklarda geometrik stabilite ve çevreye ve sağlığa zararlı olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir (Mulani 2022).

Üretilen balataların istenilen performansı sergileyip sergilemediklerini belirlemek için çeşitli deney ve ölçümler (aşınma, sürtünme, yoğunluk, sıcaklık vb.) gerçekleştirilir. Fren balataları için oluşturulmuş standartlara göre deney sonuçları değerlendirilerek, balataların istenilen özellikleri sağlayıp sağlamadıklarına karar verilir. Deneylerden sonra balata veya disk yüzeyindeki aşınma mekanizmalarını değerlendirmek için SEM analizleri ve yüzey profilometresi ölçümleri gerçekleştirilir (Yavuz 2022).

Numune reçeteleri oluşturulurken ve üretim süreci belirlenirken literatürde yapılan çalışmalardan faydalanılmıştır. Tez işlem basamakları Şekil 3.1' de görülmektedir.

Literatür taramasından sonra tez de kullanılacak malzemeler belirlenmiştir. Farklı presleme basıncı, sıcaklık, presleme süresi ve kütlece farklı oranlarda fren balata numuneleri üretilmiştir. Ön deneyler sonucunda presleme sıcaklığı 150 °C, presleme süresi 15 dk, presleme basıncı 15 MPa olarak belirlenmiştir. Üretilen numuneler 5 saat boyunca 170 °C sıcaklığında ısıtılma işlemi fırınında kütleme işlemine tabi tutulmuştur. Fren balata numunelerine seri deneyler; sürtünme katsayısı, aşınma oranı, sertlik, yoğunluk, SEM analizi ve profilometre ile yüzey ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca deneyler sırasında fren diskinin yüzey hassasiyeti yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülmüştür.

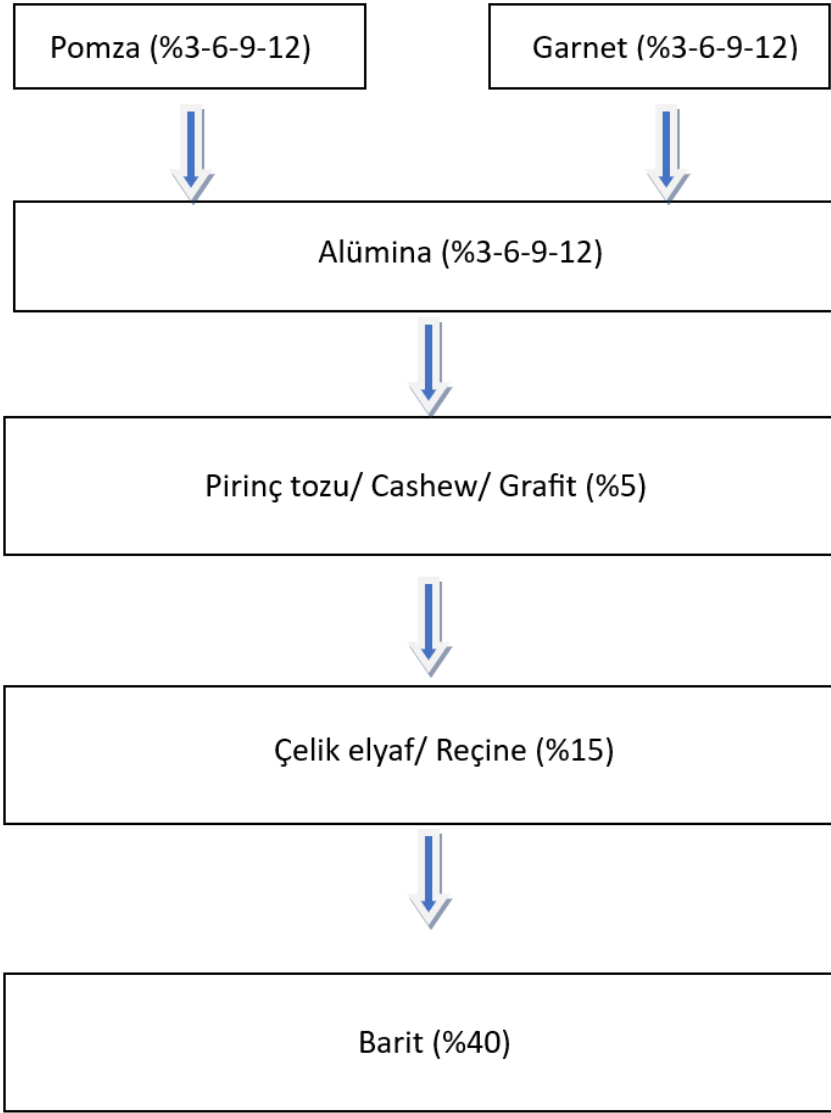


Şekil 3.1 Tez işlem basamakları.

3.1. Numune Üretimi

Numune üretiminde pomza ve garnet içeren balata kompozitleri üretilmiştir. Pomza ve garnet endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Atık malzemesi olarak da değerlendirildiğinde hem ekonomiye katkı sağlayacak hem de çevre kirliliğini azaltacaktır.

Fren balata kompozitleri reçine, pirinç tozu, cashew, çelik elyaf, grafit, barit ağırlıkça sabit tutulmuştur. Pomza, garnet ve alümina ağırlıkça değişik oranlarda kullanılmıştır. Pomza içeren numuneler P harfi, Garnet içerikli numuneler ise G harfi ile adlandırılmıştır. Ağırlıkça %3-6-9-12 Pomza ve ağırlıkça %3-6-9-12 Garnet içerikleri alümina ile ağırlıkça farklı oranlarda kullanılmıştır. 4 farklı pomza ve 4 farklı garnet içerikli toplamda sekiz adet fren balata numuneleri üretilmiştir. P ve G harfleri sonundaki rakam numune içerisinde ağırlıkça ne kadar pomza veya garnet içerdiğini göstermektedir. Örneğin P12 ağırlıkça %12 pomza içermektedir. Fren balata reçetesi şekil 3.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Fren balata reçetesi.

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’ de fren balata numune içerikleri ve ağırlıkça oranları verilmiştir. Numuneleri oluşturan maddeler hassas terazide (0.001 g) tartılarak daha sonra homojen bir şekilde karışabilmesi için karıştırıcıda 15 dakika boyunca 60 d/dk’ da karıştırılmıştır. Homojen bir şekilde karışan ürünler 25 mm çapında 6 adet göze sahip üretim kalıbına yine hassas terazide tartılarak eşit oranda konulmuştur.

3.2 Numune İçeriği

Numune içeriğinde kullanılan malzemeler ve zellikleri Şekil 3.1 ve izelge 3.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1 Pomza Numune içeriği ve karışım oranları *

Özellik	Malzeme	P3	P6	P9	P12
Sürtünme düzenleyici	Pomza	3	6	9	12
	Alümina	12	9	6	3
	Pirinç tozu	5	5	5	5
	Cashew	5	5	5	5
Bağlayıcı	Reçine	15	15	15	15
Takviye edici	elik elyaf	15	15	15	15
Yağlayıcı	Grafit	5	5	5	5
Dolgu	Barit	40	40	40	40
Toplam		100	100	100	100

* AĞırlıkça yüzdesel (%)

Çizelge 3.2 Garnet Numune içeriği ve karışım oranları *

Özellik	Malzeme	G3	G6	G9	G12
Sürtünme düzenleyici	Garnet	3	6	9	12
	Alümina	12	9	6	3
	Pirinç tozu	5	5	5	5
	Cashew	5	5	5	5
Bağlayıcı	Reçine	15	15	15	15
Takviye edici	elik elyaf	15	15	15	15
Yağlayıcı	Grafit	5	5	5	5
Dolgu	Barit	40	40	40	40
Toplam		100	100	100	100

* AĞırlıkça yüzdesel (%)

Malzeme	Resim	Özellik
Pomza		Sürtünme Düzenleyici

Resim 3.1 Pomza ve özelliği.

Numune içeriğinde kullanılan pomza yerel bir firmadan temin edilmiştir. Afyon Kocatepe Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarında toz halindeki pomza 75-125 μ arası elekten geçirildikten sonra kullanıma hazır hale getirilmiştir. Resim 3.1’de pomza resmi verilmiştir.

Çizelge 3.3 Pomzanın Kimyasal Bileşimi % Değerleri (Aksay vd. 2016).

Kimyasal	Asidik Pomza	Bazik Pomza
SiO ₂	70	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
Na ₂	9	8
TiO ₂	< 1	< 1
SO ₃	< 1	< 1
Ateş kaybı	3	1

TS 3234 standardına göre pomza; birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görünümlü silikat esashı, birim hacim ağırlığı genelde 1gr/cm³’den küçük, sertliği Mohs skalasına göre yaklaşık 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir madde olarak tanımlanmıştır. Oluşumu sırasında, bünyedeki gazların, ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuma nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası

genelde (özellikle mikro gözenekler) bağlantısız boşluklu olduğundan permeabilitesi (geçirgenlik) düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir (Pomza 2015). Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü'nden (MAPEG) alınan verilere göre; toplam 2,2 milyar ton pomza rezervimiz mevcuttur. Bu rezervin yaklaşık 1 milyar tonu Nevşehir bölgesinde yer alırken, Manisa, Kayseri, Osmaniye, İzmir, Konya, Bitlis, Van ve Ağrı illerinde önemli miktarlarda pomza yatakları bulunmaktadır (MTA 2020). Çizelge 3.4' de Türkiye' de bulunan pomza rezervleri verilmiştir.

Çizelge 3.4 Türkiye Pomza Rezervleri (MTA 2020).

İL	REZERV (Ton)
Nevşehir	1.069.115.572
Manisa	398.267.172
Kayseri	136.329.518
Osmaniye	110.172.625
İzmir	79.473.342
Konya	72.253.259
Bitlis	40.570.132
Diyarbakır	39.744.197
Erzurum	37.665.019
Isparta	32.557.558
Van	30.553.860
Burdur	25.282.904
Iğdır	20.354.889
Mardin	19.800.149
Hatay	19.264.565
Ağrı	17.761.140
Elazığ	14.417.717
Kars	12.225.478
Aksaray	9.218.516
Ankara	2.658.576
Gaziantep	1.100.000
Niğde	752.468
Erzincan	550.747
TOPLAM	2.190.089.403

Ülkemizde endüstriyel pomza üretimi ve iç-dış ticareti konusunda faaliyet gösteren pek çok firma bulunmaktadır. Her yıl 40'dan fazla ülkeye pomza ihracatı yapılmaktadır. 2019 yılında en fazla Bangladeş olmak üzere, Pakistan, Çin, Mısır, Vietnam, Birleşik Arap Emirlikleri, Tunus, Sri Lanka ve İsrail'e bims blok üretimi için kullanılan pomza ihracatı gerçekleşmiştir (MTA 2020). Pomza ısı ve ses izolasyonundaki verimliliği ayrıca hafif olması nedeniyle birçok sektörde kullanılmaktadır.

Malzeme	Resim	Özellik
Garnet		Sürtünme Düzenleyici

Resim 3.2 Garnet ve özelliği.

Garnet malzemesi Afyonkarahisar ili İscehisar ilçesinde bulunan Mermer Akademisi'nden temin edilmiştir. Resim 3.2' de garnet resmi verilmiştir. Afyon Kocatepe Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarında toz halindeki garnet elekten 75-125 μ arası elekten geçirildikten sonra deneylerde kullanıma hazır hale getirilmiştir. Resim 3.2'de garnet resmi verilmiştir. Literatürde garnet ve granat ismi de kullanılmaktadır.

Granatlar endüstriyel mineraller içerisinde en geniş renk yelpazesine sahip minerallerden birisidir. Mineral türüne göre sarı, gri, pembe, yeşil, kırmızı, kahverengi ve hatta siyah renkte olabilirler. Kimyasal bileşimine göre Mohs sertliği 6.5- 9 arasında ve yoğunluğu 3.2- 4.3 gr/cm^3 arasında değişmektedir (Engin 2000).

Çizelge 3.5 Garnet özellikleri (Engin 2016).

Bileşen	%
SiO ₂	39.49
CaO	34.28
Al ₂ O ₃	15.21
Fe ₂ O ₃	7.69
TiO ₂	0.97
MgO	0.67
MnO	0.18
K ₂ O	0.10
P ₂ O ₅	0.05
Na ₂ O	0.13
LOI	0.70
Cr	0.01
Zr	0.03
TOPLAM	99.20

Malzeme	Resim	Özellik
Alümina		Sürtünme Düzenleyici

Resim 3.3 Alümina ve özelliği.

Alümina (Alüminyum Oksit) fren balatalarında sürtünme düzenleyici ve yüzey parlaticı olarak kullanılmaktadır. Alümina frenlemede ısı etkisiyle performansının düşmesine neden olabilmektedir (Akıncıoğlu 2018). Alümina Türkiye’ de faaliyet gösteren yerel tedarikçi firmalardan temin edilmiştir. Alümina yüksek sertlik, korozyon ve aşınma direncine sahiptir.

Çizelge 3.6 Alümina özellikleri.

Kimyasal Bileşen	İçerik Oranı (%)
Al ₂ O ₃	99.32
SiO ₂	0.01
Fe ₂ O ₃	0.01
Na ₂ O	0.25
LOI	0.4
CaO	0.008

Malzeme	Resim	Özellik
Pirinç tozu		Sürtünme Düzenleyici

Resim 3.4 Pirinç tozu ve özelliği.

Pirinç tozu, iyi termal iletkenlik, fren zayıflaması ve aşınma direnci nedeniyle formülasyonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ahmed 2020). Pirinç tozu ıslak sürtünmeyi iyileştiren katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Blau 2001). Fren balatası malzemesinin formülasyonuna pirinç parçacıklarının eklenmesi termal özellikleri olumlu yönde etkilemektedir (Sellami vd. 2018).

Malzeme	Resim	Özellik
Cashew		Sürtünme Düzenleyici

Resim 3.5 Cashew ve özelliği.

Cashew, sürtünme düzenleyici, gürültü ve titreşimi azaltma özelliklerinden dolayı fren balatalarında kullanılmaktadır. Literatüre incelendiğinde cashew birçok çalışma da kullanılmakta ve sürtünme tozu olarak bilinmektedir.

Malzeme	Resim	Özellik
Reçine		Bağlayıcı

Resim 3.6 Reçine ve özelliği.

Fenolik reçineler balatalarda bağlayıcı olarak tercih edilmektedirler. Amacı termal ve mekanik gerilemeler altında balataların bütün bir yapıda kalmasını sağlamaktır. Reçineler yüksek ısı direncine sahiptirler. Fenolik reçineler, yüksek sertlik, basınç dayanımı, orta derecede termal direnç, sürtünme direnci gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra düşük maliyeti nedeniyle sürtünme malzemelerinde sürekli bağlayıcı olarak kullanılmaktadır (Grunuath ve Bijwe 2007).

Çizelge 3.7 Fenolik reçine özellikleri.

Parametre	Değer
Yumuşama noktası	94 °C
125 °C’ de akma mesafesi	35 mm
Hegzamin miktarı	%8.46
Serbest fenol	<%0.10
Elek (-63)	97 µm

Malzeme	Resim	Özellik
Çelik elyaf		Takviye Edici

Resim 3.7 Çelik elyaf ve özelliği.

Çelik elyaf fren balata numunelerinde dağılmaya karşı direncinden dolayı takviye edici malzeme olarak kullanılmaktadır. Isı, sürtünme kararlılığı ve ekonomik maliyetinden dolayı balata üretimlerinde takviye edici malzeme olarak tercih edilmektedir. Resim 3.7’de çelik elyaf resmi gösterilmiştir.

Malzeme	Resim	Özellik
Grafit		Yağlayıcı

Resim 3.8 Grafit ve özelliği.

Çizelge 3.8 Grafit özellikleri.

Kimyasal Bileşen	İçerik Oranı (%)
Kül	83 %
Uçuculuk	4.1 %
Nem	1-2 %
Karbon	87.6 %
Boyut	200 mesh

Fren balatalarında grafit sürtünme yüzeyinde hızlı bir şekilde yağlanmayı sağladığı için yaygın olarak kullanılan bir malzemedir (Parabhu 2015). Grafit siyah renkli yumuşak bir malzemedir ve maliyeti düşürme amacıyla yağlayıcı olarak kullanılmaktadır (Chen vd. 2008).

Malzeme	Resim	Özellik
Barit		Dolgu

Resim 3.9 Barit ve özelliği.

Barit baryum sülfattan oluşan genellikle beyaz renkli ya da renksiz dolgu maddesi olarak kullanılan bir mineraldir. Dolgu maddesi genellikle formülasyona hacim kazandırır, maliyeti düşürür, gürültüyü azaltır ve frenleme de ısı kararlılığı nedeniyle kullanılmaktadır (Komori 1990).

Çizelge 3.9 Barit özellikleri.

Parametre	Değer
Yoğunluk	83 %
75 mikron elek üstü kalıntı tayini	2.00 %
Nem	0.04 %
Tane boyutu analiz	D50:4.52 mikron- D98:15.63 mikron
Beyazlık L	95,45 %
Sarılık indeksi	Maksimum 4.26

Fren balataları üretiminde balata içeriği aynı olsa bile üretim parametreleri (sıcaklık, basınç, kütleme vb.) değiştiğinde balatalar farklı özellikler sergileyebilmektedir. Üretilen fren balata numuneleri 25mm çapında 10 mm kalınlığındadır. Resim 3.10’ da kullanılan malzemeler ve üretilen fren balata kompozit numunelerinin resimleri görülmektedir.



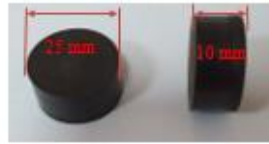
Hassas Tartım

Karıştırma

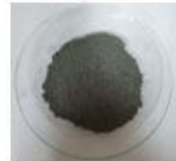


Sıcak Kalıplama

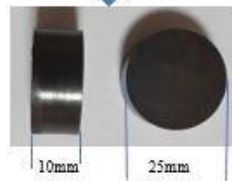
Kürleme



Hassas Tartım ve Karıştırma



Sıcak Kalıplama ve Kürleme



Resim 3.10 Kullanılan fren balata kompozit malzemeleri.

3.2. Numune Üretiminde Kullanılan Cihazlar

3.2.1 Hassas Terazi

Bu çalışmada, Resim 3.11’de bulunan SELES marka 0,001 hassasiyete sahip hassas terazi kullanılmıştır. Çizelge 3.1 ve 3.2’de belirtilen numune içeriğindeki malzeme miktarlarına göre ölçümler yapılmıştır. Aşınma oranının belirlenmesinde kullanmak üzere numunelere uygulanacak sürtünme-aşınma test öncesi ve sonrasında ağırlık ölçümleri not edilmiştir. Terazi kullanımında her ölçüm yapıldıktan sonra kalibrasyon yapılmıştır. Her kullanım aşamasından sonra sık sık temizleme işlemi uygulanmalıdır. Aksi durumda, 0,001 g ölçüm hassasiyetine sahip numunelerde hatalı içerik miktarına yol açabilmektedir.

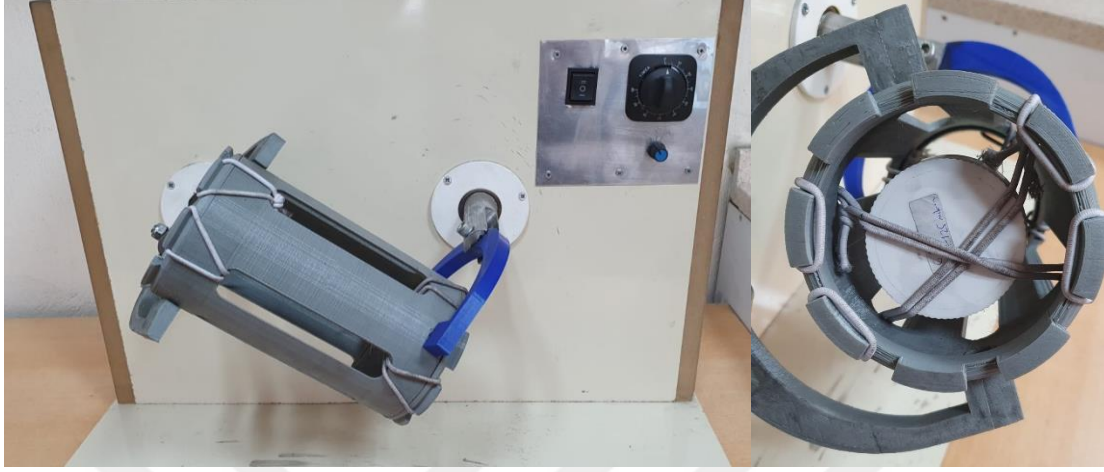


Resim 3.11 Hassas Terazi

3.2.2 Mekanik Karıştırıcı

Sıcak presleme öncesi hassas terazi ile ölçümü yapılmış toz haldeki malzemelerin homojen olarak karışabilmesi için mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Resim 3.12’de bulunan iki adet aynı yönlü ekseninde hareket eden iki mile sabitlenmiş sepet içerisine karışım kabı yerleştirilir. Üç yönlü hareket sağlayan kinetik tip karıştırıcı ile karışım

kabında bulunan tanecikler homojen olarak karışmaktadır. Mekanik karıştırıcı, homojen karışım elde etmek için 15 dakika boyunca 60 devir/dakika karışım işlemi uygulanmıştır.



Resim 3.12 Mekanik karıştırıcı ve karışım kabı.

Balata içeriğinde birçok farklı özelliğe sahip malzeme bulunduğu için homojen olarak karışması önemlidir. İki veya daha fazla malzemenin homojen olarak karıştırılması zordur. Geleneksel karıştırma yönteminde malzemeler tek yönlü karıştırma makinesinde karıştırılırlar. Bu tip karıştırıcılar yalnızca bir yönde döndüğü için parçacıklar merkezkaç kuvveti nedeniyle karıştırma kabının duvarına yapışma eğilimindedir. Malzemelerin çoğu, yüksek yoğunluktan dolayı kabın altına çökebilir (Yavuz 2022).

3.2.3 Hidrolik Pres

Numune balata üretiminde ihtiyaç olan numunenin üretilmesi için sıcak presleme işlemi yapılmaktadır. Üretimde Afyon Kocatepe Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Laboratuvarında bulunan 25 ton kapasiteye sahip pres kullanılmıştır. İki kalıp arasındaki hava boşluğu olmamasından dolayı sıcak presleme sonucunda numune üretimi gerçekleşmektedir.

Pres üzerinde bulunan hidrolik kol sayesinde hidrolik sıvı sıkıştırılarak basınç oluşturmaktadır. Oluşan basınç değerinin anlık olarak 0,25 MPa hassasiyete sahip

manometre göstergesi üzerinden takip edilebilmektedir. Resim 3.13’ de hidrolik pres görülmektedir.



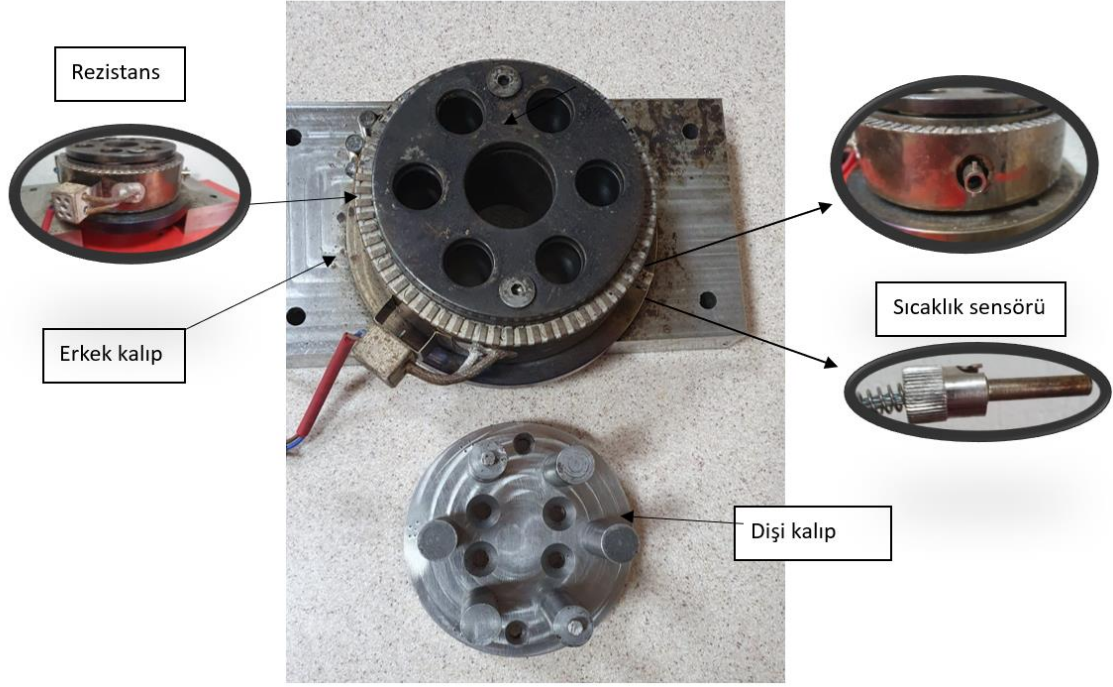
Resim 3.13 Hidrolik pres.

Sıcak presleme işleminde gerekli olan ısıtıcı faktörü kalıp çevresinde bulunan rezistanslar sayesinde sağlanmaktadır. Presleme esnasında rezistansa elektrik akımı verilerek sıcaklık yükseltilebilmektedir. Sıcaklık değeri göstergesi ve sınırlayıcı kontrol ünitesi pres cihazı üzerinde bulunmaktadır.

3.2.4 Üretim Kalıbı

Numune üretim kalıpları Resim 3.14’de gösterilmiştir. 75mm yüksekliğinde ve 25 mm çapında numune üretim kapasitesine sahiptir. Üretim kalıbında her seferinde 6 adet

numune üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Kalıp yüksek basınçlara dayanıklı, sıcaklığın anlık ölçülebilmesi için iç kısmında termokupl (sıcaklık sensörü) ve sıcaklığın kontrol edilebilmesi için dış kısmında elektrikli rezistans bulunmaktadır.

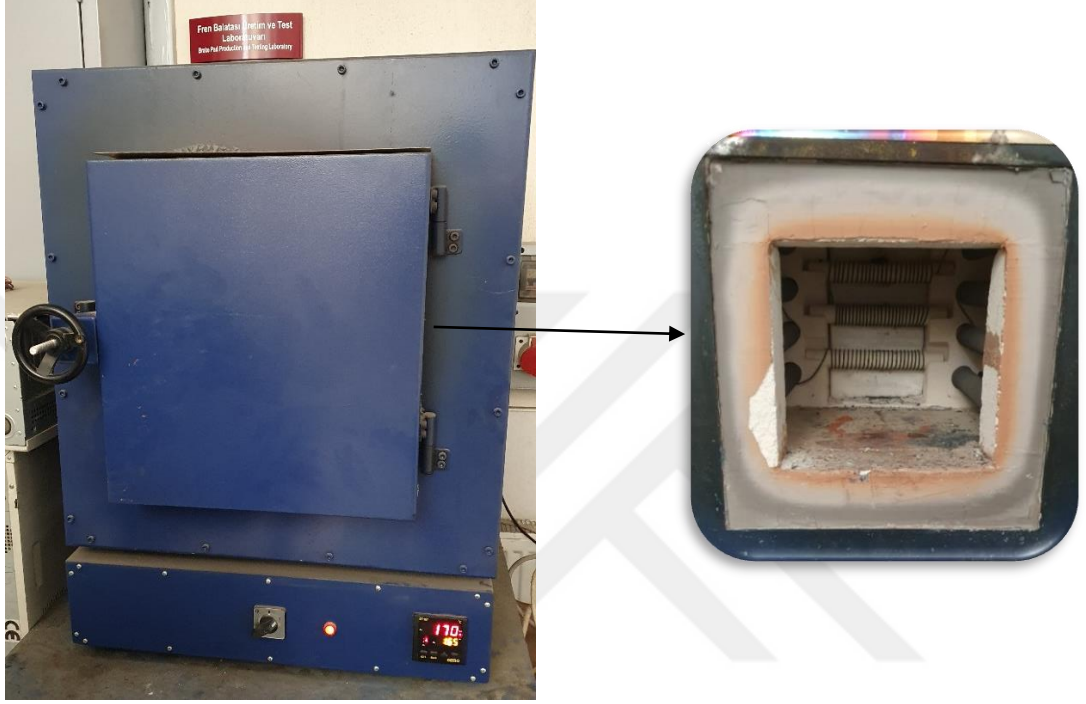


Resim 3.14 Balata üretim kalıbı genel görünümü.

Balata reçetesini oluşturan tozlar hassas bir şekilde tartıldıktan sonra kalıbın gözlerine dikkatli bir şekilde konulması gerekmektedir. Kalıplama işlemi toz metalurjisinde önemli bir işlemdir.

3.2.5 Isıl işlem fırını

Çalışmada kullanılan ısıl işlem fırınında 400 °C sıcaklığa kadar atmosfer ortamında kürlleme işlemi gerçekleştirilmektedir (Resim 3.15).



Resim 3.15 Isıl işlem fırını.

Preslenmiş numunelerde toz tanelerinin yüksek yüzey enerjilerinin minimuma indirilmesi ve tozlar arasında metalurjik bağlar oluşturulması amacı ile sinterleme işlemi uygulanmaktadır (Sugözü 2009). Presleme işlemi sonrası kalıptan çıkartılan numuneler, reçinenin tamamen kürlenmesi, homojenliğin tam olarak sağlanması, üretimde ortaya çıkabilecek ısıl hataları minimuma indirmek için ısıl işlem fırınında 170 °C sıcaklıkta 5 saat süreyle kürlleme işlemine tabi tutulmuştur.

3.3 Test İçin Kullanılan Cihazlar

Bu araştırmada, kütlege farklı oranlarda üretilen balata numunelerinin özelliklerini incelemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Tez çalışmasında üretim ve deney için Afyon Kocatepe Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Uygulama ve Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan ekipmanlar kullanılmıştır. Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknolojik Araştırmalar Merkezi (TUAM)' nde bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleme işlemi LEO 1430 VP model cihaz ve Profilometre görüntüleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bünyesindeki Nanovea marka ST400 model üç boyutlu profilometre cihazı kullanılmıştır.

3.3.1 Sertlik Ölçüm Cihazı

Çalışmada sertlik ölçüm yöntemlerinden biri olan Shore D kullanılmıştır. ASTM D2240 (2021) standardında kompozit, reçine ve plastik malzemelerinde Shore D sertlik ölçüm yöntemi tercih edilmiştir ASTM D2240 (2021). Akıncıoğlu, çalışmasında Shore D ölçüm cihazı kullanılarak fren balatalarının sertlik ölçümleri yapmıştır ve balata yüzeyindeki beş farklı noktadan alınan değerlerin ortalaması hesaplamıştır (Akıncıoğlu vd, 2018). Literatürde balatalar üzerine yapılmış çalışmalar incelendiğinde sertlik ölçümü için Shore D tercih edilmiştir. Bu çalışmada, 0-100 HD aralığına, 0,5 HD hassasiyetine, 0,1 mm çapında iğne ucu özelliklerine sahip Shore D sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Resim 3.16' da Shore D sertlik ölçüm cihazı ve standı verilmiştir.

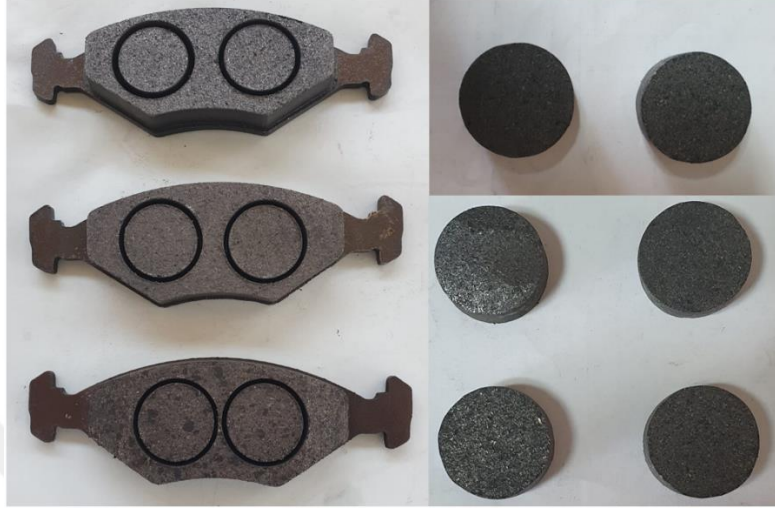


Resim 3.16 Shore D sertlik ölçüm cihazı ve standı.

3.3.2 Fren Balata Test Cihazı

TS555 (2019) standardına uygun olarak tasarlanan balata fren balata test cihazında üretilen numuneler test için hazırlanmıştır. Test öncesi 320 numaralı zımpara ile disk yüzeyi zımparalanarak test hazırlığı yapılmıştır. Sürtünme testi için hazırlanan balata numuneleri cihaz üzerinde bulunan numune tutuculara sabitlenmiştir. Test sonrasında balata numunelerinin sürtünme yönünü tespit edebilmek için test öncesi numune tutucular üzerinde işaretlemeler yapılmıştır. Hazırlıkların tamamlanmasının ardından test cihazında başlatma komutu verilmesi ile fren diski 6 m/s disk dönüş hızına ulaşmıştır. Diskin deney yüzeyinin deney numunesine karşı kayma hızı 6 m/s ila 8 m/s hız arasındaki sabit bir hızda olmalıdır. Deney numunesine baskı basıncı $1 \pm 0,02$ MPa olmalıdır (TSE 555, 2019). Döner disk yüzeyine karşılıklı pozisyonlandırılmış 1 Mpa pnömatik basınç uygulanarak sürtünme testi başlatılmıştır. Her bir numune için 3 grupta toplam 6 numuneye sürtünme testleri yapılmıştır. Ticari olarak piyasada bulunan fren balatası numuneleri (Resim 3.17) ile üretimi yapılan fren balatası kompozitlerinin kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı sonuçları bulgular bölümünde karşılaştırılmıştır.

Sürtünme test süresi, balata numunelerinin 1 Mpa basınç başlangıç anından itibaren 30 dakikadır. Cihaz üzerinde bulunan kontrol panelinde zamanlayıcı sayesinde test süresi tamamlandığında pnömatik basınç otomatik olarak durdurmaktadır.



Resim 3.17 Ticari balata numune resimleri.

Ticari olarak üretilen balataların içerikleri firmalar tarafından ticari sır olarak saklanmaktadır ve firma ve ürüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Aras (2019) tarafından yapılan çalışmada ticari balatalar için yaptırılan EDX analizindeki malzemeler ve bileşim oranları örnek olarak Çizelge 3.10’da verilmiştir.

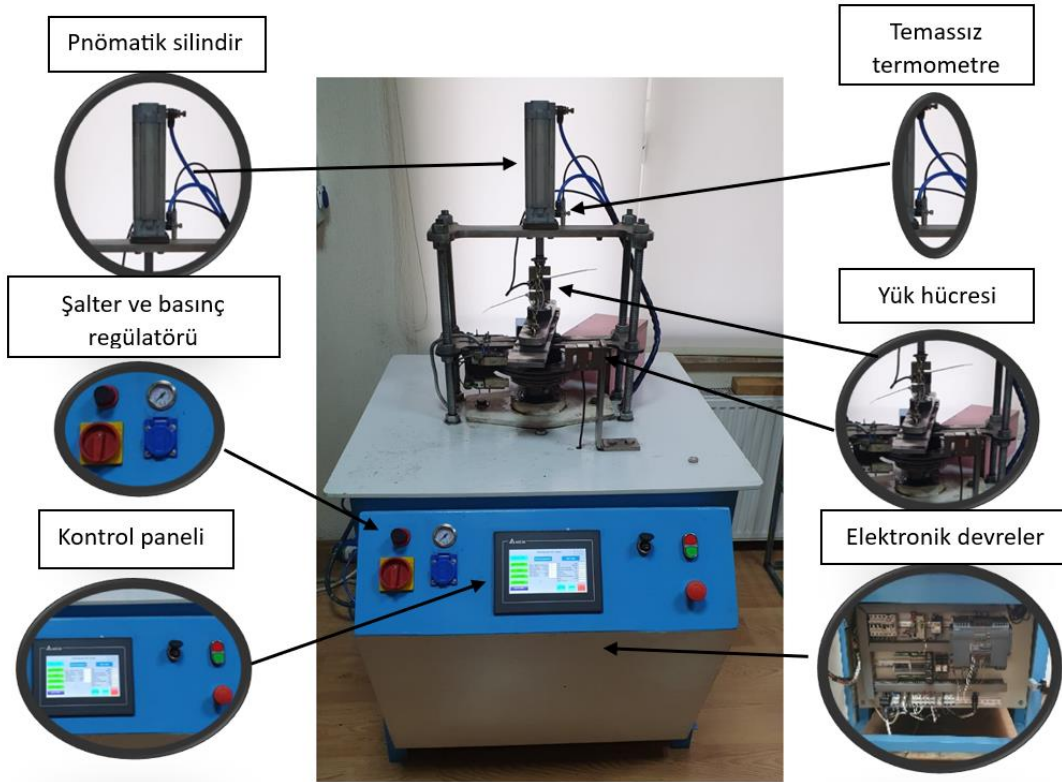
Çizelge 3.10 Ticari balata EDX analiz değerleri (Aras 2019).

Malzeme	C	O ₂	Fe	Al	S
Oran	39,54	37,39	7,33	2,97	2,68
Malzeme	Si	Ca	Ba	Mg	Ti
Oran	2,49	2,24	1,61	1,36	0,93
Malzeme	Cu	K	Mn	Cl	V
Oran	0,90	0,43	0,11	0,02	0,01

Bu çalışmada kullanılan fren balata test cihazında dikey olarak konumlandırılmış elektrikli motor kullanılmaktadır. Bu sayede test için ihtiyaç duyulan dönüş hızı kontrol panelinden takip edilebilmektedir. Sürtünme kuvveti ölçümü için yük hücreleri kullanılmıştır. Fren balataları sürtünme etkisi ile Resim 3.18’de belirtilen yük hücrelerine

yük uygulamaktadır. Yük hücreleri saniye başına veri üreterek kontrol panelinde kayıt altına alınmıştır. Pnömatik silindir ile balata numune arasında diğer yük hücresi bulunmaktadır. Bu sayede, balata numunelerinin düşey yönde uyguladığı basınç değerleri periyodik olarak elde edilebilmektedir. İkinci yük hücresi balata numune tutucularına yatay olarak pozisyonlandırılmıştır. Buradaki yük hücresinden elde edilen veriler ile sürtünme katsayısı değerleri bulunmuştur. Resim 3.18’de belirtilen temassız termometre sayesinde disk yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri periyodik olarak elde edilebilmektedir.

Tamamlanan test prosesinden elde edilen sürtünme katsayısı, sıcaklık, basınç ve kayma mesafesi değerleri cihaz kontrol panelinden bilgisayar ortamına aktarılarak sonuçlar incelenmiştir. Deney cihazında bulunan parçaların tanımını Resim 3.18’ de, cihaza ait teknik özellikler Çizelge 3.11’ de gösterilmiştir.



Resim 3.18 Fren balata test cihazı.

Çizelge 3.11 Fren balata test cihazı özellikleri (Yavuz 2022).

Parça Grubu	Özellik
Elektrik Motoru	Toplam gücü 11 kW
Disk Grubu	Yarıçapı 190-300 mm arasındaki diskler ile kullanılabilir.
Numune Tutucu	Numune geometrisine göre tutucu üretilerek kullanılabilir.
Sıcaklık Sensörü	Maksimum 500 °C
Yük Grubu	Pnömatik basınç sistemi ile 1200 N' a kadar yük uygulanabilir.
Yazılım ve Kontrol Ünitesi	Sıcaklık, sürtünme katsayısı ve devir değerlerini kayıt altına almak için kullanılmaktadır.

Resim 3.19' de üretilen fren balata numunelerini tutmak için numune tutucu (a), deney öncesi ve sonrası fren diskini zımparalamak için zımpara aparatı (b) görülmektedir.



Resim 3.19 Numune tutucu (a), Zımpara aparatı (b).

3.3.3 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

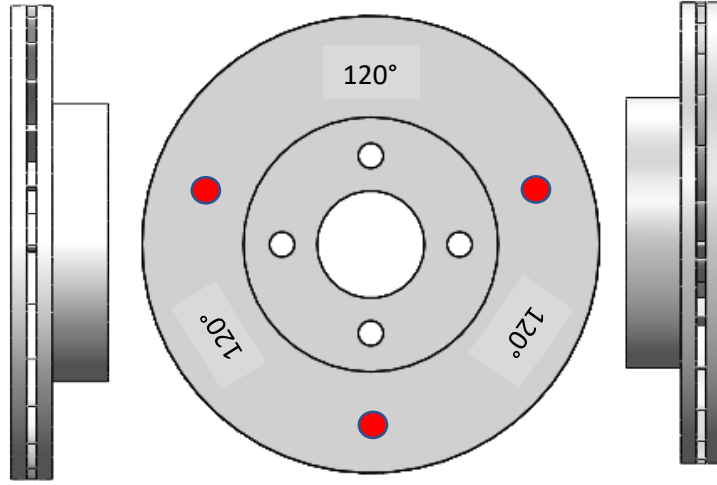
Time TR220 test cihazı (Resim 3.20) disk yüzeyinde pürüzlülük testi için kullanılmıştır. Cihaz teknik özellikleri Çizelge 3.12’de verilmiştir.



Resim 3.20 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve probu.

Balata numunelerinde, pürüzlülük ölçümünde kararlı bir değer elde edilemediği için disk üzerinden ölçüm yapılmasına karar verilmiştir. Pürüzlülük ölçüm cihazı ile disk yüzeyinden pürüzlülük değerleri alınmıştır. Deney öncesinde ve sonrasında disk üzerinde belirlenen 120 derecedeki aynı noktalardan Ra ve Rz değerleri elde edilmektedir. Hatalı sonuçların önüne geçmek için her kontrolde 3 kez değer alınmıştır.

Disk yüzeyinde oluşan Ra ve Rz pürüzlülük değerleri, 6 m/s disk hızında deney öncesi ve bir saatlik çalışmadaki deney sonrasında disk üzerindeki 120 ° açılı ile bölünmüş üç farklı ölçüm noktasından ölçülmüştür. Ölçümler 40 µm ölçüm aralığında ve 2.5 mm ölçüm uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre deney öncesi ve deney sonrasındaki üç ölçüm noktasından alınan ortalama disk pürüzlülük değerleri karşılaştırılmıştır (Yavuz ve Bayrakçeken 2022).



Şekil 3.3 Disk pürüzlülüğü ölçüm noktaları.

Çizelge 3.12 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı teknik özellikleri (İnt.Kyn.6).

Ölçüm Parametresi	Ra, Rz
Ölçüm Aralığı	Ra: 0.025-12.5µm Rz: 0,02-160 µm
Z Eksen Ölçüm aralığı	±20 µm, ±40 µm, ±60 µm
Ekran Çözünürlüğü	0,001 µm
Birim	µm
Ölçüm Uzunlukları	0.25mm (Ra: 0.02- 0.32 µm) 0.8 mm (Ra: 0.32- 2.50 µm)
Minimum / Maksimum Ölçme Boyu	1,3mm / 17,5 mm
Hassasiyet	≤ ± 10%

3.3.4 Karbon Kaplama Cihazı

SEM analizi yapılmadan önce numune yüzeyleri iletken bir malzeme ile kaplanması için Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait Bal-Tek marka SCD005 model karbon kaplama cihazı ile kaplama işlemi yapılmıştır (Resim 3.21).



Resim 3.21 Karbon Kaplama Cihazı (Yavuz ve Bayrakçeken 2022).

3.3.5 SEM Analiz Cihazı

AKU TUAM' a ait LEO marka 1430 VP (Resim 3.22) model taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında üretilen numunelerin incelemesi yapılmıştır.

LEO 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron (backscattered electron) ve RÖNTEC QX2 marka ve model Xflash tipi 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 (İnt. Kyn. 7).



Resim 3.22 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz cihazı (İnt. Kyn. 7).

SEM görüntülerinin alınabilmesi için numunelerin özenle hazırlanması gerekmektedir. Kaliteli SEM görüntülerinin elde edilebilmesi için fren balatasının iletkenliği yüksek olmalıdır. Aksi takdirde yeterli bir görüntü alınamayabilir. Özellikle elektrik iletkenliği düşük olan organik fren balatalarının iletkenliğinin arttırılıp daha iyi mikro yapı görüntüleri çekmek için numunelere kaplama yapılması gerekmektedir (Akıncıoğlu 2018). Bu nedenle hazırlanan numuneler SEM çekimleri öncesinde karbon kaplanmıştır. Fren balatalarının analizlerinde mikro yapı görüntülerinin yorumlanmasında EDX analizleri önemli yer tutmaktadır. SEM incelemeleri üretilen fren balata numunelerinde deney sonrasında 1000 kat büyültme yapılarak incelenmiştir.

3.3.6 Üç Boyutlu Profilometre

Bu çalışmada üç boyutlu olarak yüzey pürüzlülüğü ölçebilen Nanovea marka ST400 model üç boyutlu profilometre cihazı kullanılmıştır (Resim 3.23). Cihaz ile ISO25178 (2012) standardında ortalama pürüzlülük değerlerinin karekökü (S_q), en büyük tepe noktası pürüzlülüğü (S_p), en büyük çukur derinliği pürüzlülüğü (S_v), profilin en büyük yükseklik değeri ortalamaları (S_z) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (S_a) pürüzlülük değerleri ölçülebilmektedir. Aynı zamanda taranan alan içerisinde özel olarak alınan bölgelerden iki boyutlu yüzey pürüzlülükleri de ölçülebilmektedir. Ölçümler deney sonrası numunelerin sürtünen yüzeyinde $2 \times 2 \text{ mm}^2$ alanda, $5 \text{ }\mu\text{m}$ tarama adım aralığında ve 1000 Hz. Tarama frekansında gerçekleştirilmiştir.

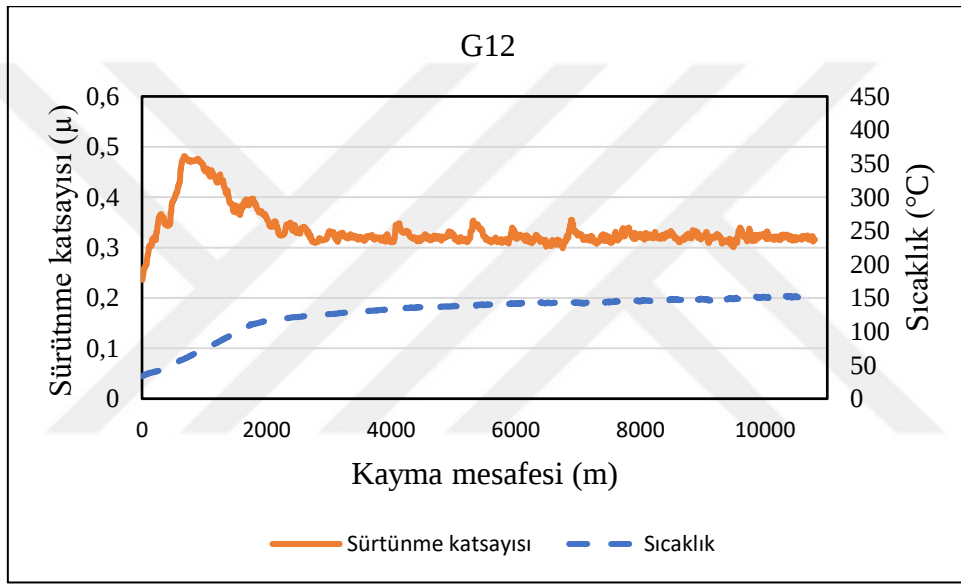


Resim 3. 23 Üç boyutlu profilometre cihazı.

4. BULGULAR

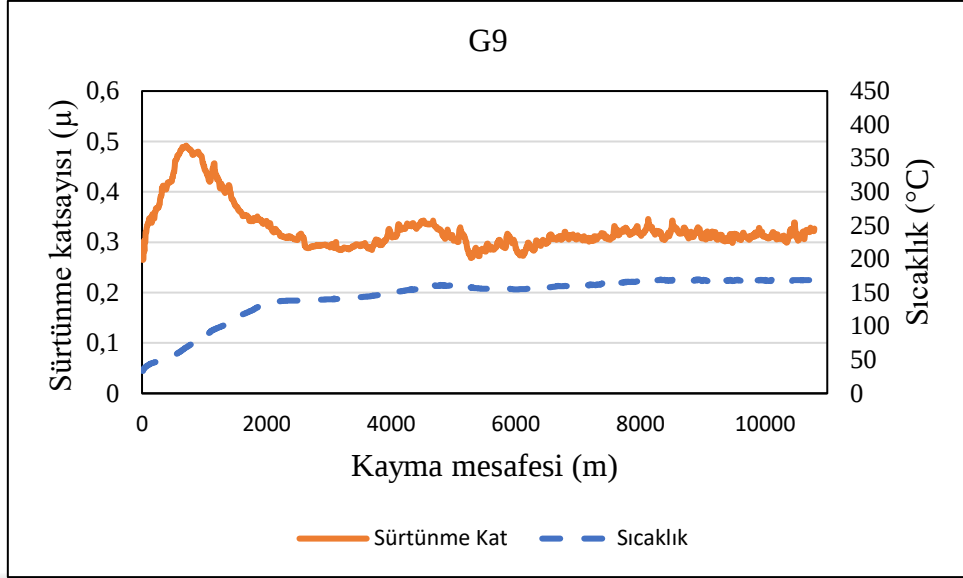
4.1 Sürtünme Katsayısı ve Sıcaklık Değerleri

Sürtünme katsayısı değerleri fren sistemi balata test cihazında 10800 m, 6 m/s hızda, 1 Mpa yükte deney şartlarında belirlenmiştir. Garnet içerikli numunelere ait kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği Şekil 4.1-4.2-4.3-4.4' de verilmiştir.



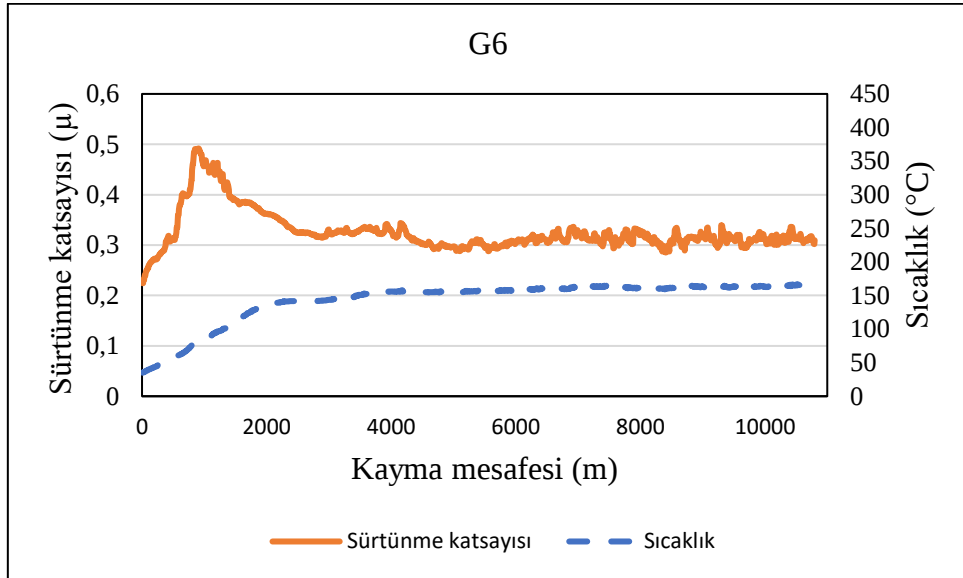
Şekil 4.1 G12 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

Şekil 4.1' de G12 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %12 garnetten oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,35, maksimum sıcaklık 153,2 °C olarak belirlenmiştir. G12 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %72,67'dir.



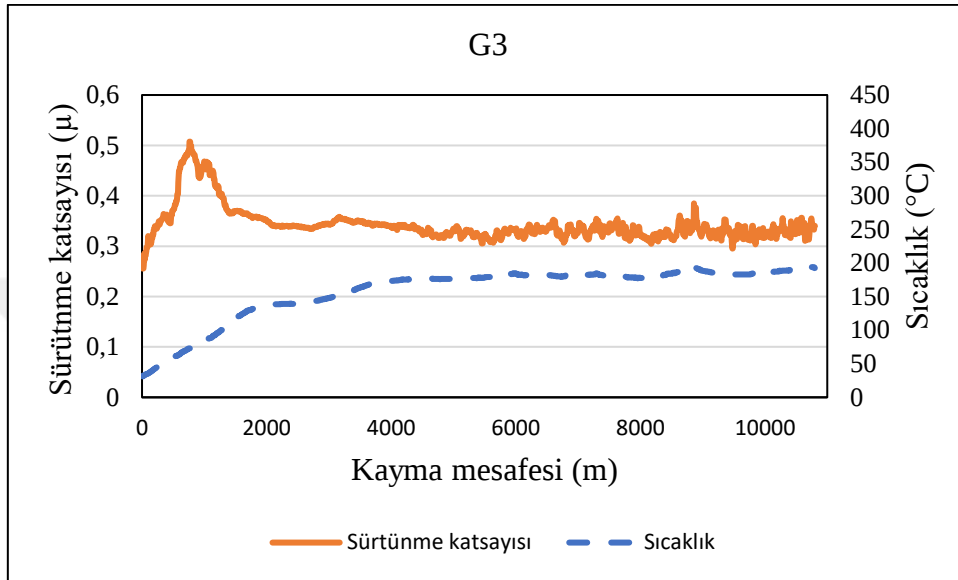
Şekil 4.2 G9 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

Şekil 4.2’ de G9 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %9 garnetten oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.34, maksimum sıcaklık 163.7 $^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. G9 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %66.37’dir.



Şekil 4.3 G6 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

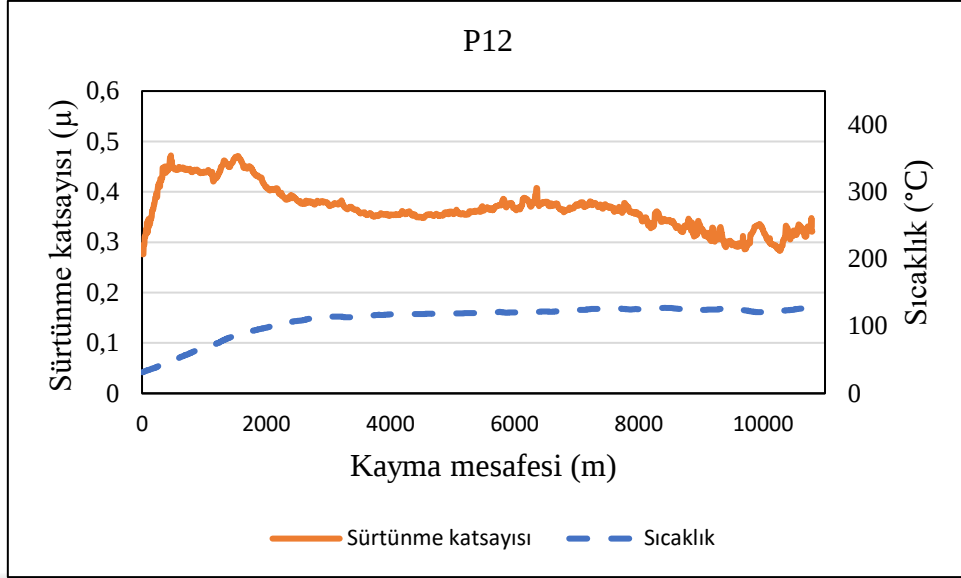
Şekil 4.3’ de G6 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %6 garnetten oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.33, maksimum sıcaklık 166.9 °C olarak belirlenmiştir. G6 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %66.35’ tir.



Şekil 4.4 G3 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

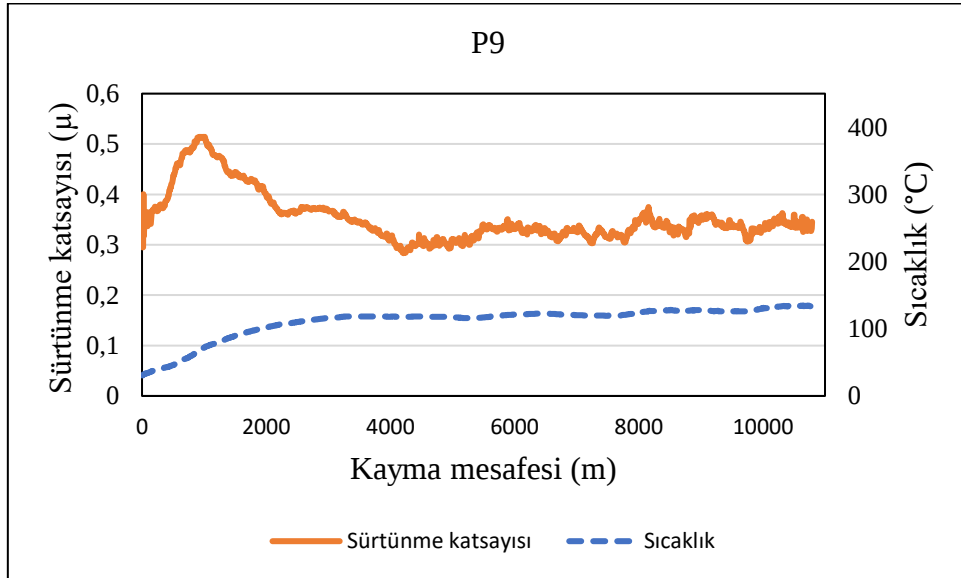
Şekil 4.4’ de G3 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %3 garnetten oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.34, maksimum sıcaklık 194.1 °C olarak belirlenmiştir. G3 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %67.52’ dir.

Pomza içerikli numunelere ait kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği Şekil 4.5-4.6-4.7-4.8’ de verilmiştir.



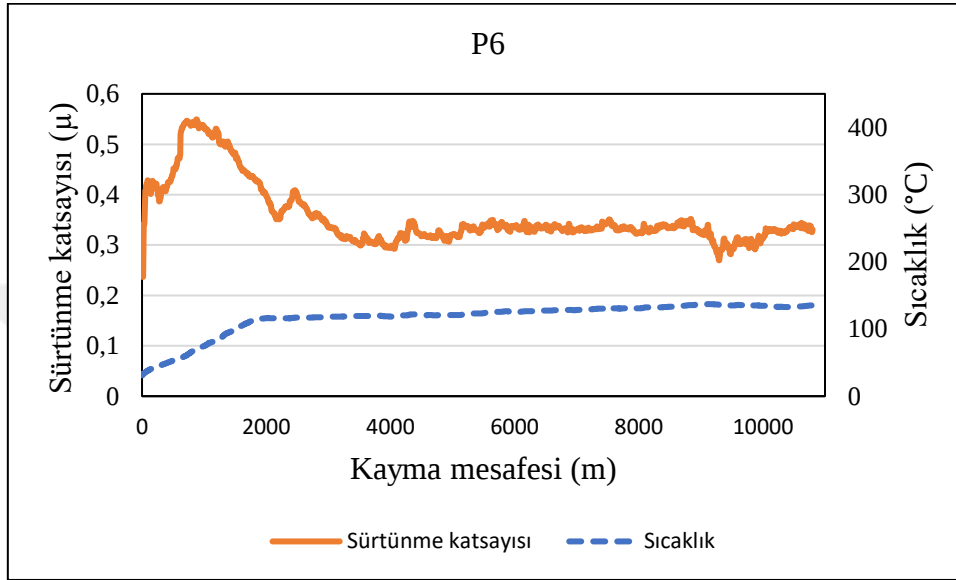
Şekil 4.5 P12 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

Şekil 4.5’ de P12 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %12 pomzadan oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.37, maksimum sıcaklık 127.3 °C olarak belirlenmiştir. P12 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %77.87’dir.



Şekil 4.6 P9 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

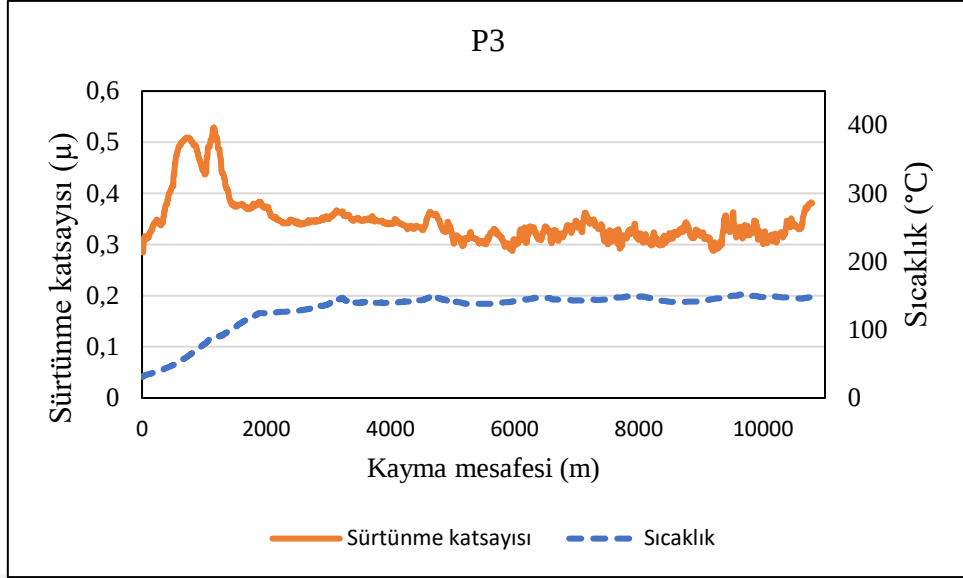
Şekil 4.' Da P9 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %9 pomzadan oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.35, maksimum sıcaklık 134.7 °C olarak belirlenmiştir. P9 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %68.62'dir.



Şekil 4.7 P6 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

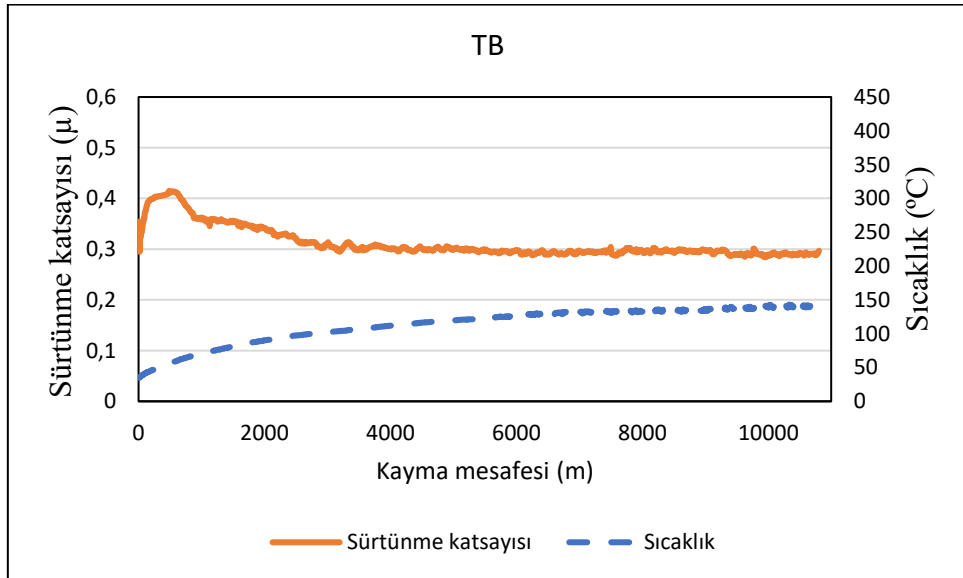
Şekil 4.7' de P6 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %6 pomzadan oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.36, maksimum sıcaklık 137.1 °C olarak belirlenmiştir. P6 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %64.77'dir.

Grafikler incelendiğinde sürtünme katsayısında az miktarda olsa da inişli çıkışlı sürekli bir değişim görülmektedir. Anderson yaptığı çalışmada sürtünme süresince disk yüzeyindeki temas bölgelerinin içine doğru ısının periyodik olarak sürekli değişmesinden kaynaklandığını belirtmiştir (Anderson 1992).



Şekil 4.8 P3 sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

Şekil 4.8’ de P3 kodlu fren sürtünme kompoziti ağırlıkça %3 pomzadan oluşmaktadır. 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.35, maksimum sıcaklık 151.7 $^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. P3 numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %65.30’dur.



Şekil 4.9 TB sürtünme katsayısı ve sıcaklık grafiği.

Şekil 4.9’ da TB kodlu ticari balatanın 30 dakika kayma mesafesi ölçülmüştür. Deney sonunda ortalama sürtünme katsayısı değeri 0.31, maksimum sıcaklık 143.7 °C olarak belirlenmiştir. TB numunesinin sürtünme katsayısı kararlılığı ise %75.17’dir.

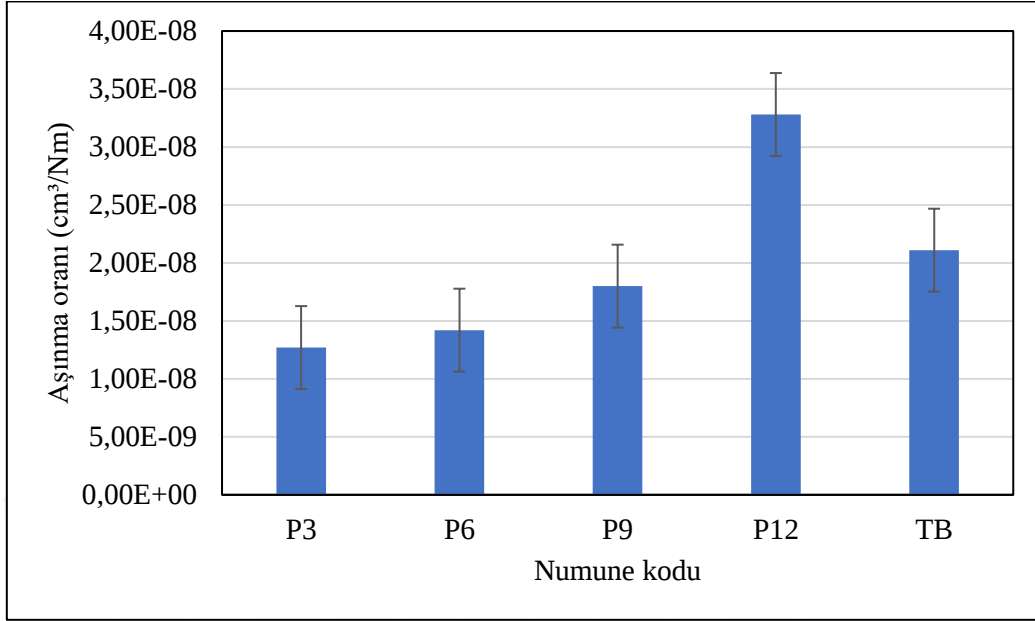
İlk olarak frene basıldığında disk ve balata arasında bir sürtünme oluşur ve alışma süreci başlar. Alışma sonucunda balata ile disk yüzeyi arasındaki temas artar böylece sürtünme katsayısında bir artış meydana gelmektedir (Kim vd. 2007). Grafiklere bakıldığında sürtünme katsayısı değeri sürekli değiştiği görülmektedir. Bu değişim adhezif aşınmadan kaynaklı kopan parçaların tekrar yapışması ve kopması sonucu temas yüzeyinin artması ya da azalmasından kaynaklanabilir (Stachowiak ve Batchelor 2014). Deneyden elde edilen sonuçlar ortalama olarak Çizelge 4.1’de belirtilmiştir. TS555 fren balatası standardına göre balataların sürtünme katsayısı değerleri standart sınırları içerisinde.

Çizelge 4.1 Sürtünme katsayısı maksimum, minimum ve ortalama değerleri.

Numune	Maks.	Min.	Ort.
G12	0.48	0.26	0.35
G9	0.49	0.22	0.33
G6	0.49	0.22	0.33
G3	0.51	0.26	0.34
P12	0.47	0.28	0.37
P9	0.51	0.28	0.35
P6	0.55	0.24	0.36
P3	0.53	0.28	0.35
TB	0.41	0.28	0.31

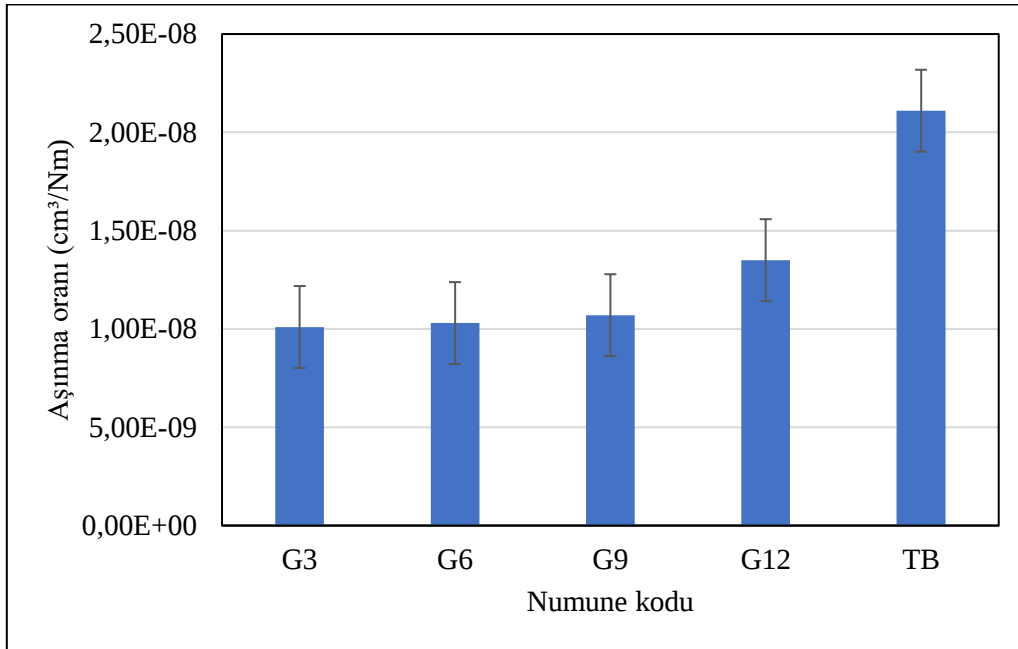
4.2 Aşınma Oranı Değerleri

Aşınma oranı değerleri fren sistemi balata test cihazında 10800 m, 6 m/s hızda, 1 Mpa yükteki çalışmada belirlenmiştir (Şekil 3. 17). Şekil 4.10 ve 4.11’de tüm numuneler için aşınma oranı değerleri gösterilmiştir. Yapılan deneylerde ortalama sıcaklık değeri 150 °C civarında olup, TS555 (2019) standardın da 150 °C için aşınma oranı değeri en fazla $0.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ olması gerekmektedir.



Şekil 4.10 Pomza numunesi ve ticari balata aşınma grafikleri.

Numunelerde pomza oranı arttıkça aşınma oranı artmıştır. En fazla aşınma oranı P12 numunesinde $3.28 \text{ E-}08 \text{ cm}^3/\text{Nm}$ olarak bulunmuştur. Ticari balata (TB) aşınma oranı $2.11 \text{ E-}08 \text{ cm}^3/\text{Nm}$ olarak ölçülmüştür.

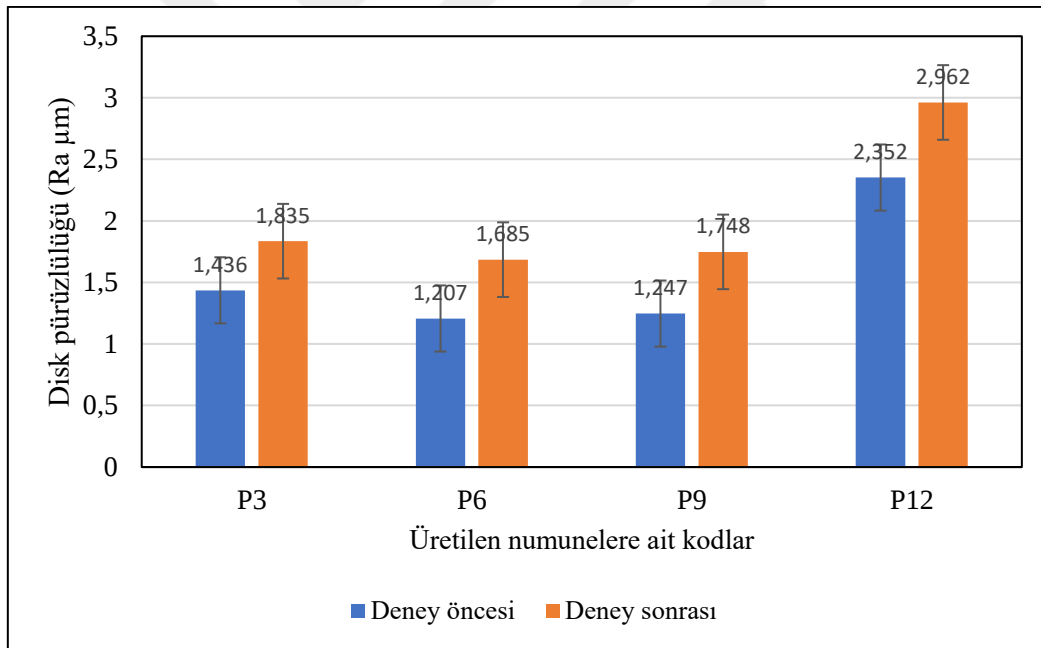


Şekil 4.11 Garnet numunesi ve ticari balata aşınma grafikleri.

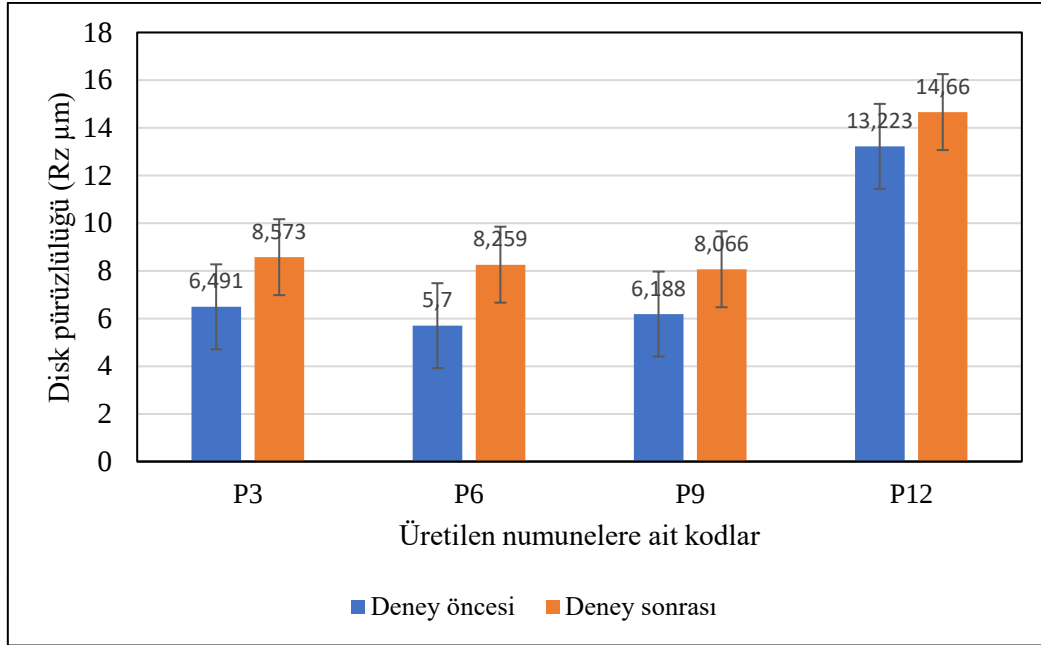
Ağırlıkça garnet miktarı arttıkça aşınma oranı artmıştır. G12 numunesinde en fazla aşınma oranı görülmüş olup $1.35 \text{ E-08 cm}^3/\text{Nm}$ çıkmıştır. Pomza ve garnet içerikli tüm numunelerde aşınma oranı standartlara uygun değerlerde bulunmuştur.

4.3 Pürüzlülük Değerleri

Pürüzlülük R_a değerleri deney başlamadan önce ve deney bittikten sonra disk üzerinde belirlenen sabit 3 noktadan üçer defa ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin ortalamaları alınarak R_a değerleri Çizelge 4.12 ve 4.14’de, R_z değerleri Şekil 4.13 ve 4.15’ de gösterilmiştir. Balata numunelerinin aşındırıcı etkisi nedeni ile deney sonrası öncesine göre disk pürüzlülük değerleri artmıştır.

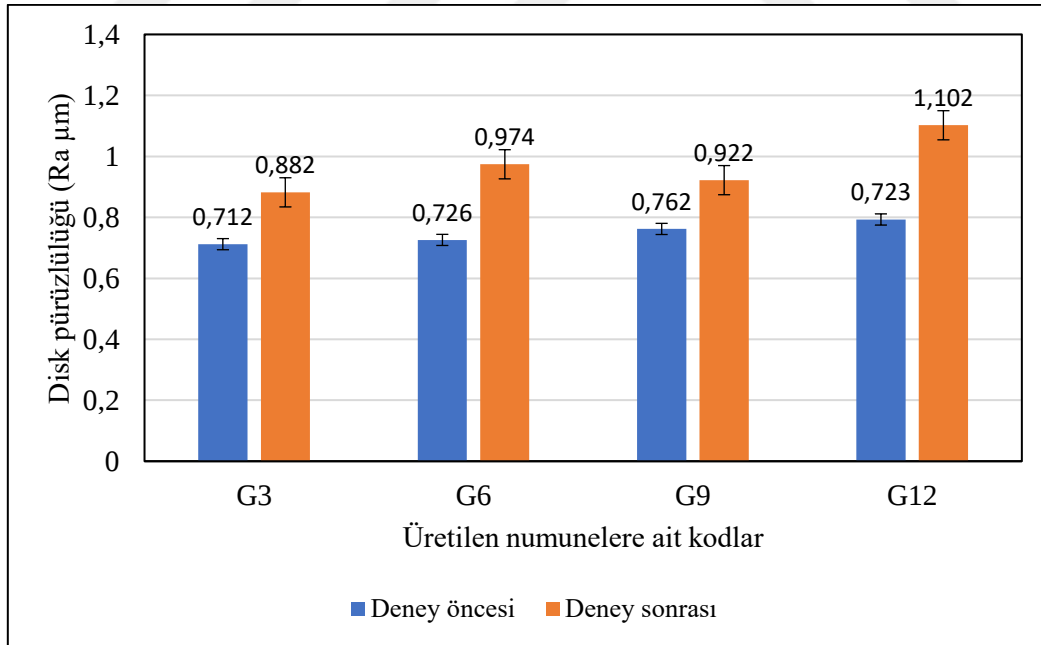


Şekil 4.12 Pomza deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük R_a değerleri.

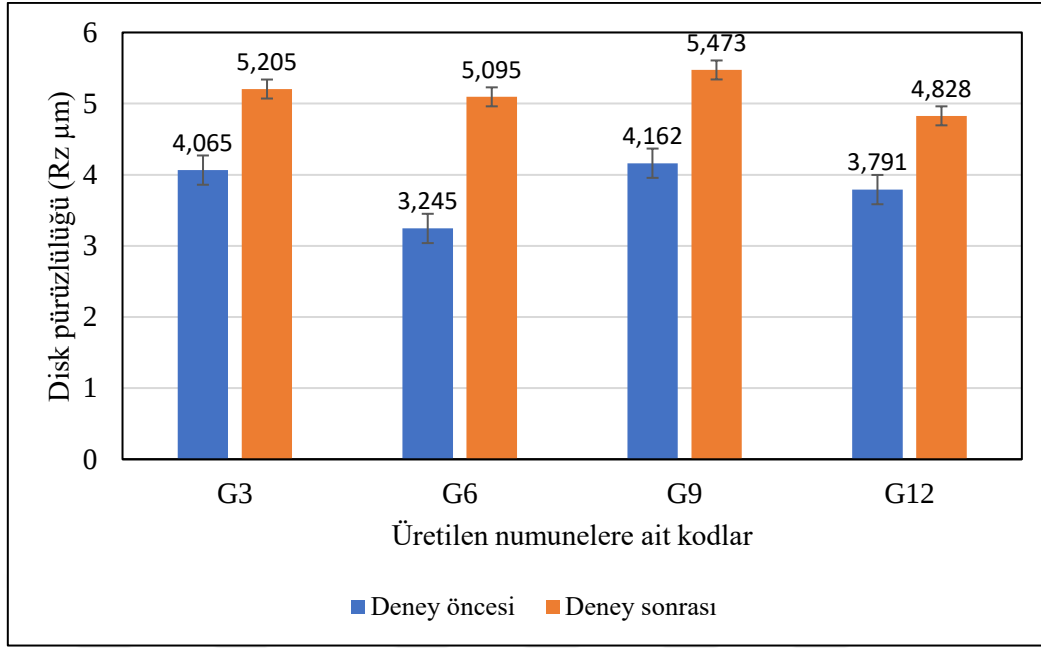


Şekil 4.13 Pomza deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Rz değerleri.

Pomza içerikli numunelerde Ra değeri % olarak en büyük fark P9 numunesinde %40.1, Rz değerinde ise en büyük fark P6 numunesinde % 44.8 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14 Garnet deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Ra değerleri.



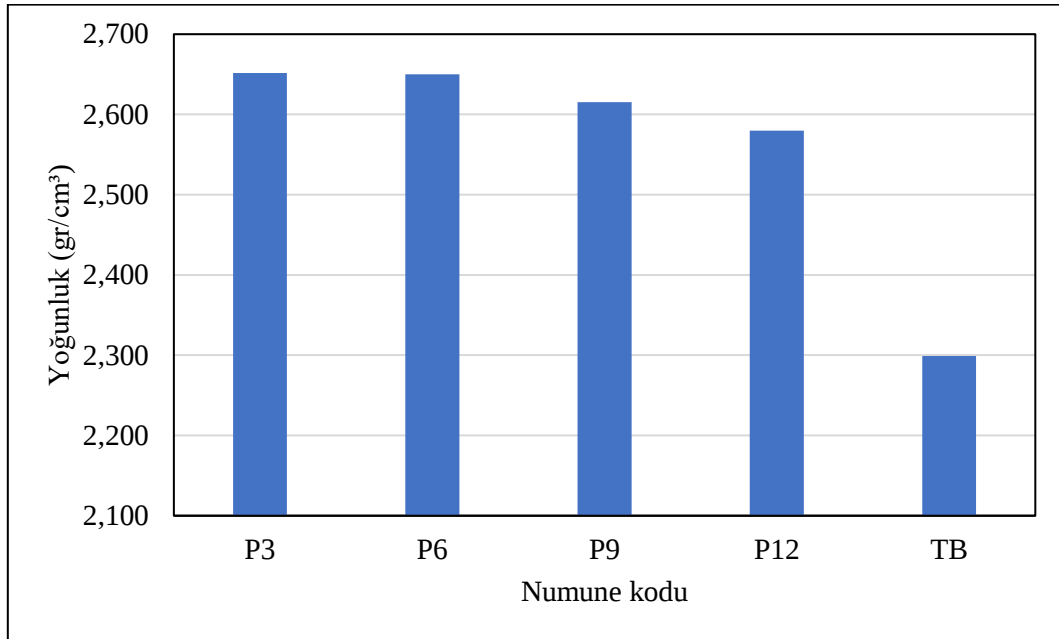
Şekil 4.15 Garnet deney öncesi ve sonrası disk pürüzlülük Rz değerleri.

Garnet içerikli numunelerde Ra değeri % olarak en büyük fark G12 numunesinde %52.4, Rz değerinde ise en büyük fark G6 numunesinde % 57.1 olarak ölçülmüştür. Literatürdeki çalışmalara benzer olarak Ra disk pürüzlülük farkı yüksek olan numunelerde aşınma oranı da yüksek olmuştur. Çizelge 4.2’de Ra ve Rz disk pürüzlülük değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 Ra ve Rz Disk Pürüzlülük değerleri farkı (μm)

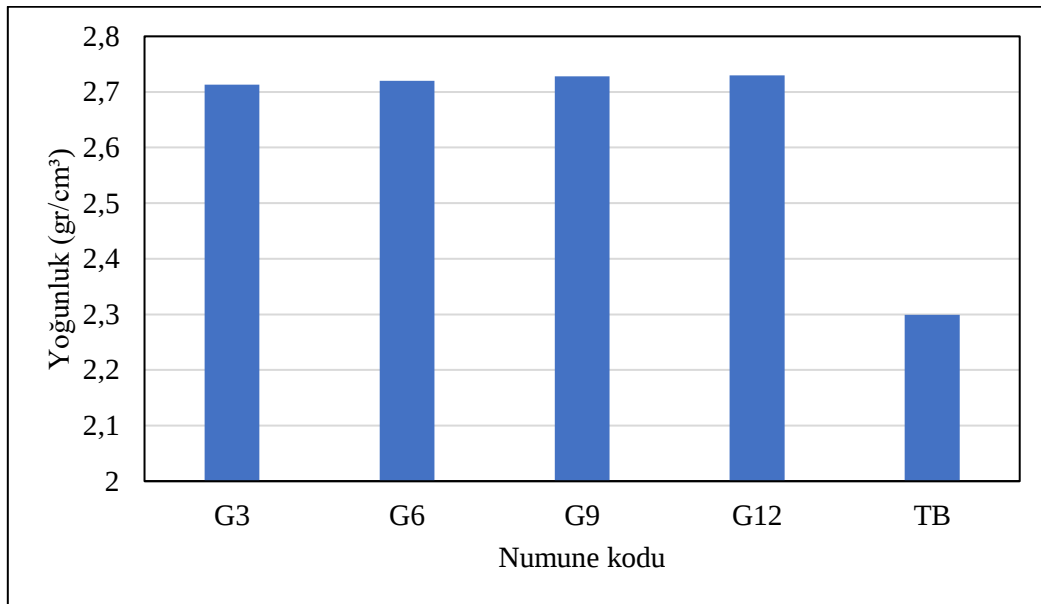
Numune	Fark (Ra)	Fark (Rz)
G12	0.379	1.037
G9	0.160	1.311
G6	0.248	1.850
G3	0.170	1.140
P12	0.610	1.437
P9	0.502	1.878
P6	0.478	2.559
P3	0.399	2.082

4.4 Ortalama Yoğunluk Değerleri



Şekil 4.16 Pomza numunesi ve ticari balata yoğunluk değerleri.

Numunelerde kütlece pomza arttıkça yoğunluk azalmıştır. Bunun nedeni pomzanın yoğunluğunun alüminaya göre düşük olmasıdır.



Şekil 4.17 Garnet numunesi ve ticari balata yoğunluk değerleri.

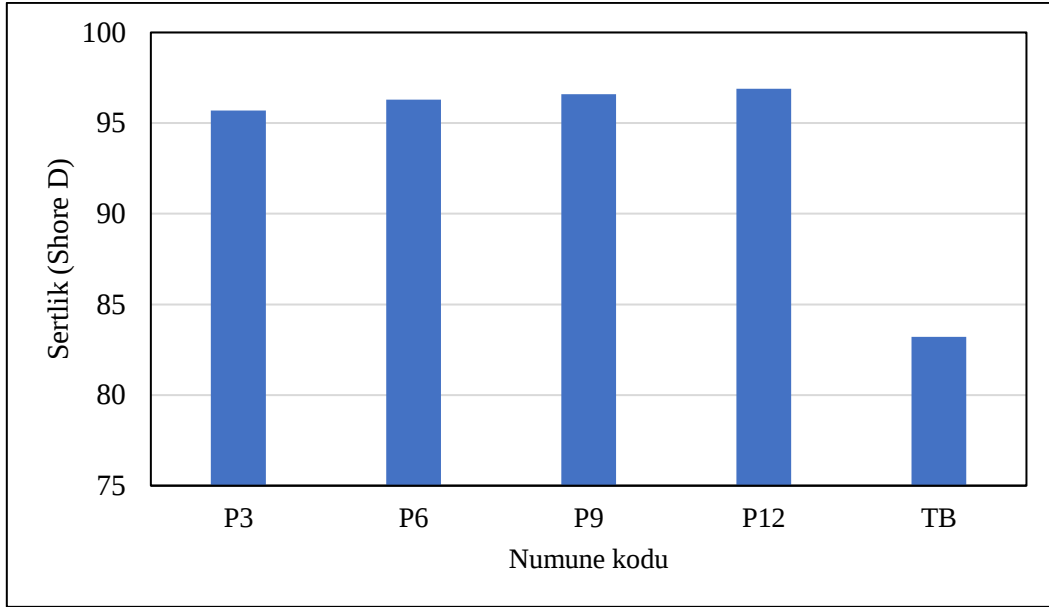
Numunelerde kütlege garnet arttıkça yoğunluk artmıştır. Bunun nedeni garnetin yoğunluğunun alüminaya göre yüksek olmasıdır. Ticari balatanın yoğunluğu 2.299 gr/cm³ olup üretilen numunelere göre yoğunluğu daha azdır.

4.5 Ortalama Sertlik Değerleri

Fren balataları sertlik değerleri ölçümünde farklı birçok cihaz kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerden biri de Shore D cihazı ile ölçümlerin yapılmasıdır (Akıncıoğlu vd. 2021). Sertlik ölçümü ASTM D2240 (2021) standardında cam, elyaf, kauçuk, plastik, reçine vb. sert malzemelerin sertlik ölçümünde kullanılan Shore D durometre sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 3.16). Dijital sertlik ölçüm cihazı 0-100 HD aralığında ölçüm yapabilen, 0.5 HD hassasiyetle, 0.1 mm çapında iğneye sahiptir. Aşınmış yüzeye sahip her numune için üç farklı numuneden, beş farklı ölçüm noktasından alınan değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.

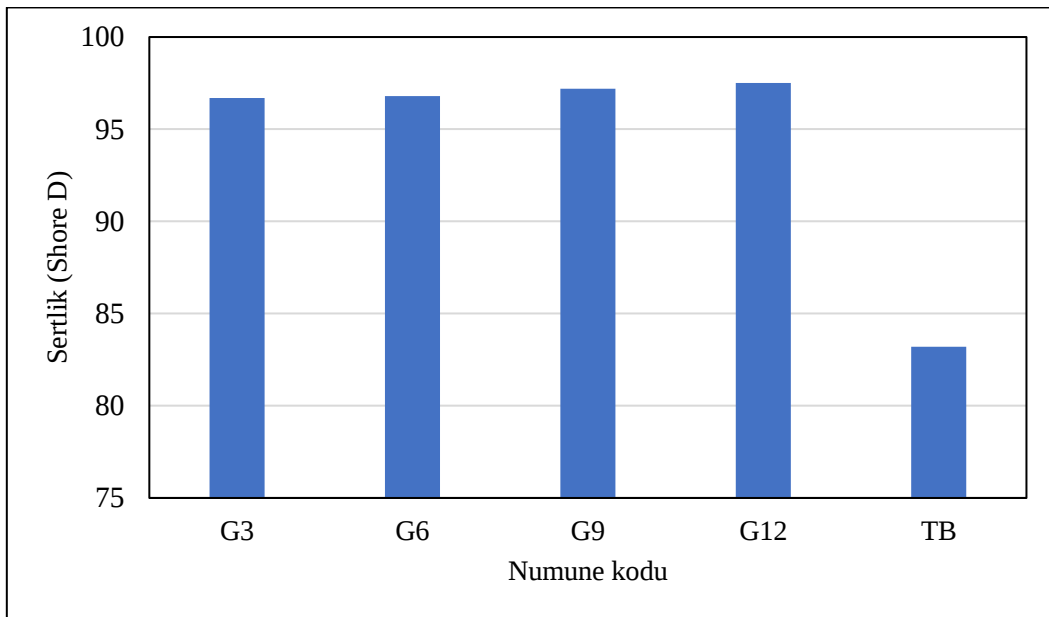


Resim 4.1 Fren balata numunesi Shore D sertlik ölçüm noktaları.



Şekil 4.18 Pomza içerikli numuneler ve ticari balata Shore D sertlik ölçüm sonuçları.

Maksimum sertlik P12 numunesinde 96.9 Shore D, minimum sertlik değeri P3 numunesinde 95.7 Shore D olarak ölçülmüştür. Değerlerin birbirine yakın olduğu görülmekte olup arada 0.8 Shore D sertliği kadar fark görülmüştür. Fren balata numunelerinde ağırlıkça pomza oranı arttıkça sertlik artmıştır.



Şekil 4.19 Garnet içerikli numuneler ve ticari balata Shore D sertlik ölçüm sonuçları.

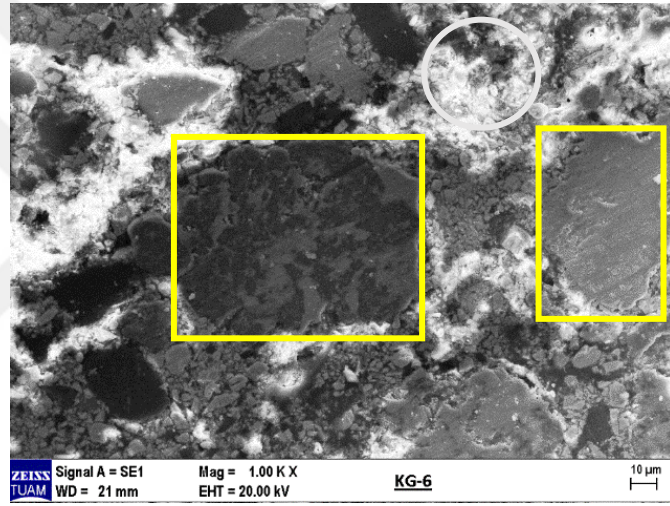
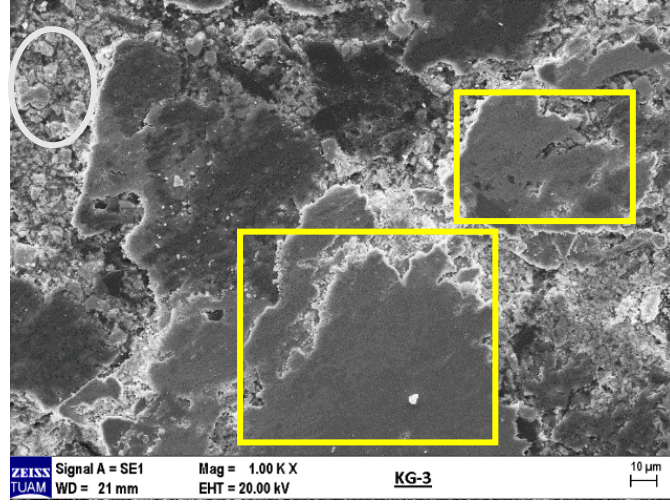
Maksimum sertlik G12 numunesinde 97.5 Shore D, minimum sertlik değeri G3 numunesinde 96.7 Shore D olarak ölçülmüştür. Değerlerin birbirine yakın olduğu görülmekte olup arada 0.8 Shore D sertliği kadar fark görülmüştür. Fren balata numunelerinde ağırlıkça garnet oranı arttıkça sertlik artmıştır. Ticari balatanın sertlik değeri 83.2 Shore D olarak bulunmuştur. Pomza içerikli ve garnet içerikli tüm numuneler ticari balataya (TB) göre daha sert olduğu görülmektedir. Sertlik ölçüm sonuçları literatüre bakıldığında Akıncıoğlu vd. (2021) benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır.

4.6 SEM görüntüleri

Pomza ve garnet içerikli numunelerin yüzeyi sürtünme testlerinden sonra SEM ile 1000x büyütme yapılarak incelenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde balata içerisinde kullanılan malzemeler numune yüzeyinde görülmüştür bu da homojen bir dağılım olduğunu göstermektedir.

Fren sürtünme malzemelerinin tribolojik performansını daha iyi görebilmek amacıyla aşınma yüzey görüntüleri incelenmektedir. SEM görüntülerinde birinci ve ikinci plato olarak adlandırılan yüzeyler görülmektedir. Birincil platolar termal olarak kararlı olan lif benzeri bileşenleri içerirler ve bu platolar daha ince yapıdaki aşınma parçacıklarının hareketini durdururlar. Polimerik bileşen ve termal olarak daha az kararlı bileşenleri oluşturan ikincil platolar ise daha az kararlı bileşikler oluştururlar. İkincil platolar sürtünme malzemesinin performansında olumsuz bir etkiye sahiptir. Eğer ikinci platolar yüksekse sürtünme daha az ve aşınma daha çok olacaktır. Bunun nedeni polimerik bileşenlerin CO₂ bırakarak piroliz reaksiyonu meydana getirmesi ve belirli aşamalardan sonra sürtünme performansını düşürmesidir (Bijve ve Kumar 2007).

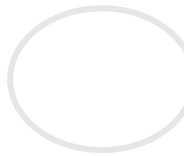
Fren balatası numunelerinde sürtünme performansı açısından daha sert ve uzun ömürlü bölge olan sürtünme tabakaları önemlidir. Sürtünme tabakaları arasına dışarıdan giren ya da sürtünme esnasında malzemeden kopan parçacıklar, balata yüzeyine yapışıp koparsa adezyon aşınması ya da fren balatasının bir bölgesini talaş kaldırma şeklinde kazırsa abrasif aşınma meydana gelir (Sugözü vd. 2016).



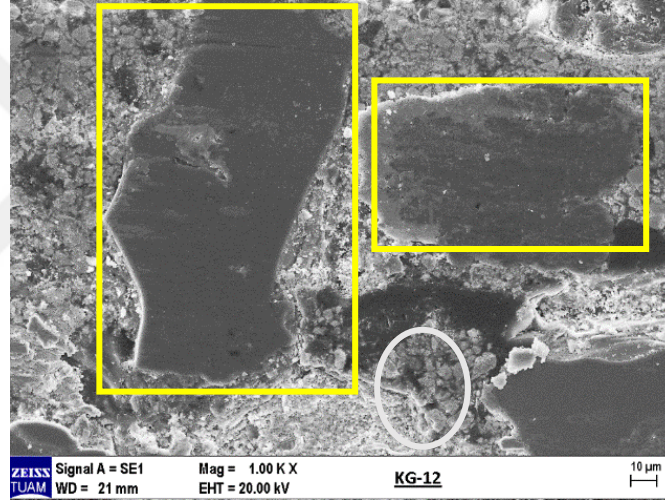
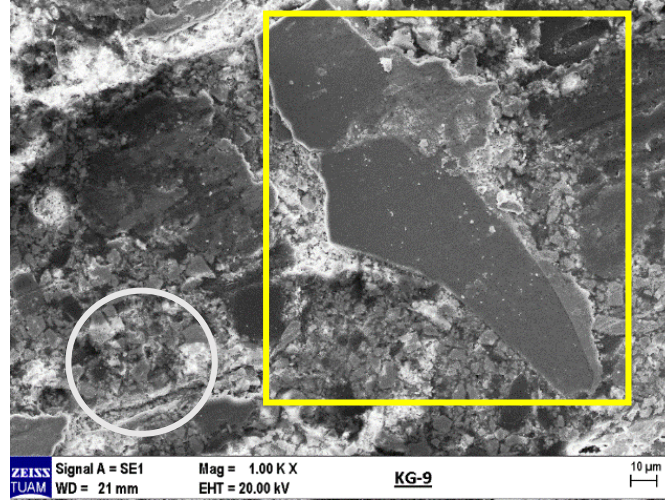
Resim 4.2 G3 ve G6 numunelerine ait SEM görüntüleri.



1. Plato bölgesi



2. Plato bölgesi



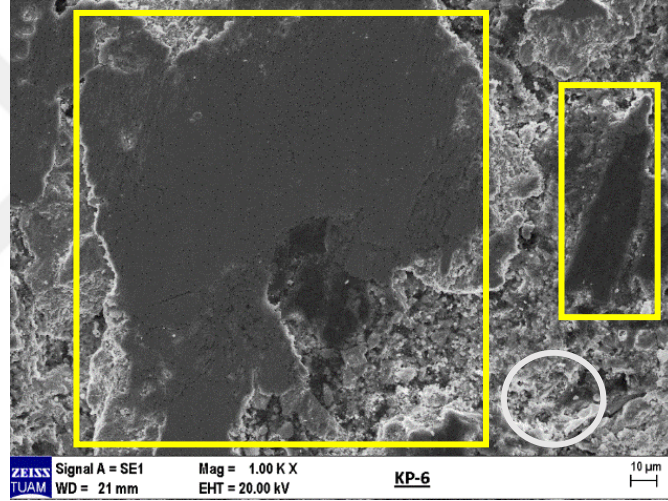
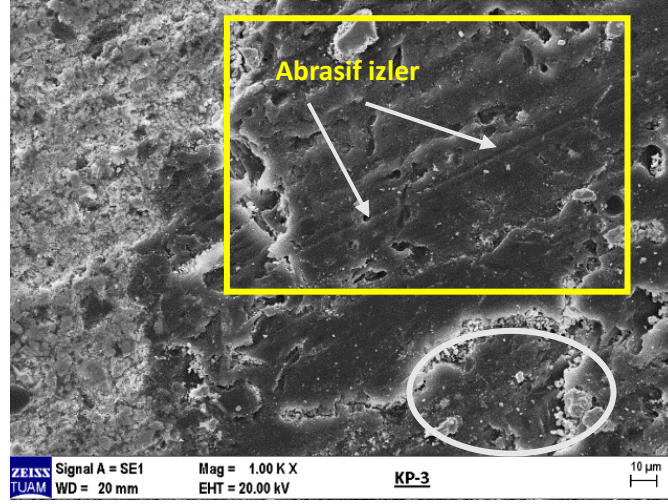
Resim 4.3 G9 ve G12 numunelerine ait SEM görüntüleri.



1. Plato bölgesi



2. Plato bölgesi



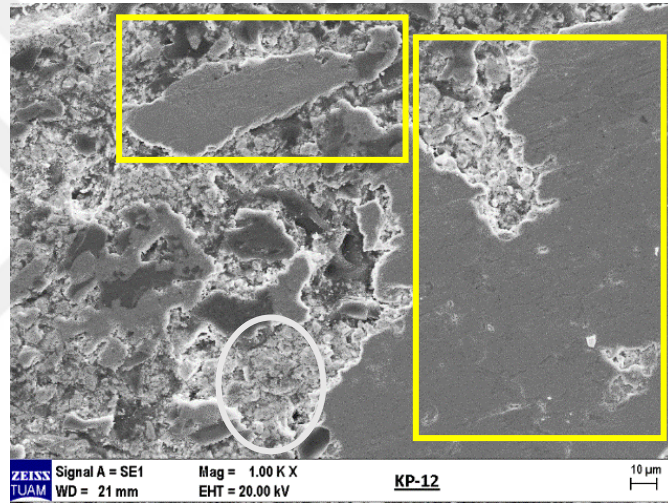
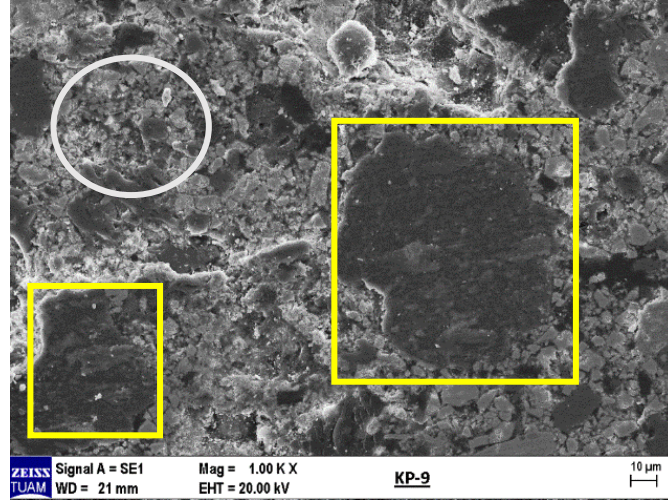
Resim 4.4 P3 ve P6 numunelerine ait SEM görüntüleri.



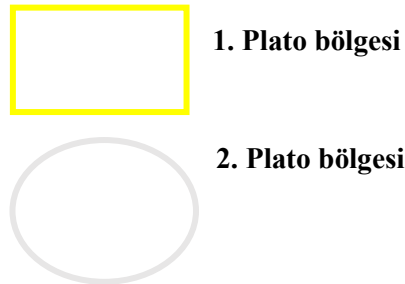
1. Plato bölgesi



2. Plato bölgesi



Resim 4.5 P9 ve P12 numunelerine ait SEM görüntüleri.

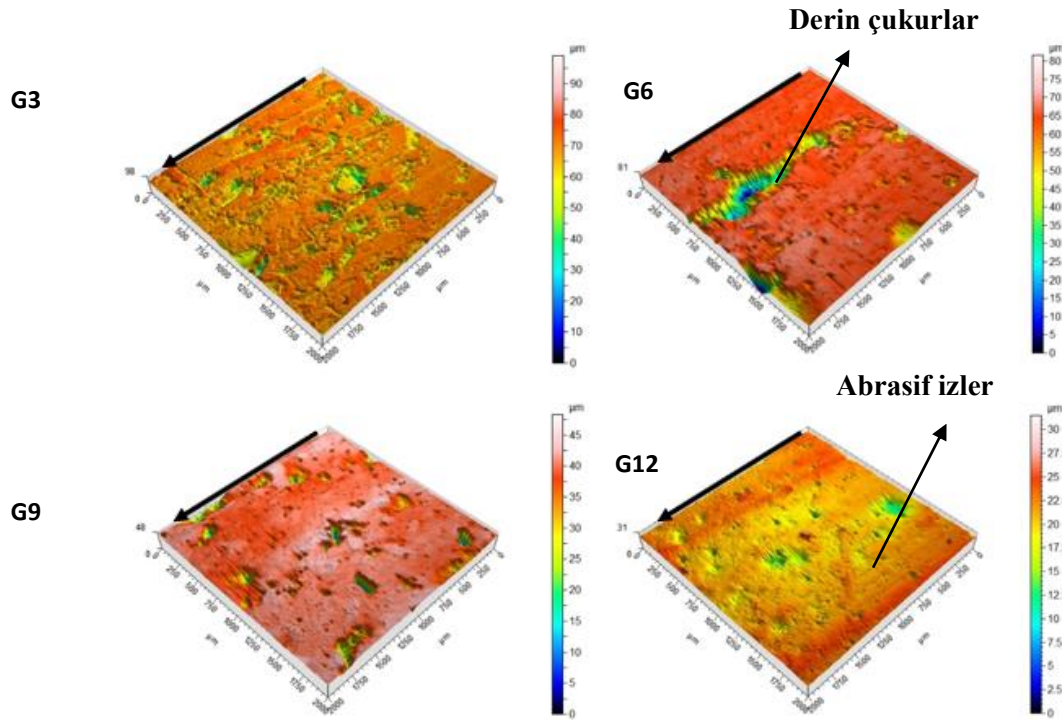


Frenleme esnasında sürtünmenin artması ile sürtünme yüzeyinden kopmalar meydana gelebilmekte ve sürtünme yüzeyinde düzgünsüzlük artabilmektedir. Bu kopmalar balata veya disk üzerindeki aşınmayı artırabilir (Akıncıoğlu vd. 2021). Sürtünme katsayısı sadece sıcaklığa bağlı olmayıp, sürtünme yüzeyindeki transfer filminin gelişimiyle ilgili sürtünmeye de bağlıdır (Chung vd. 2020).

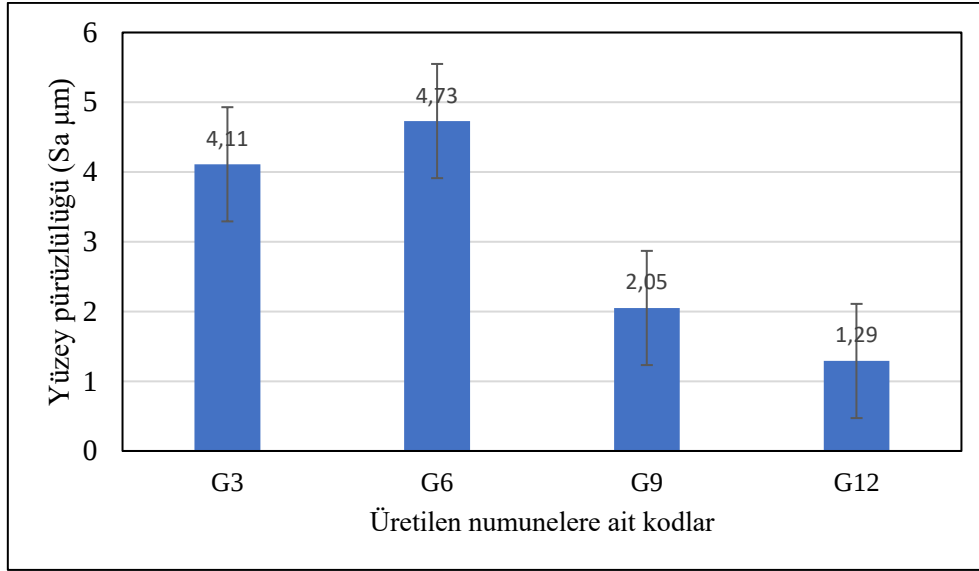
4.7 Profilometre Görüntüleri

Pomza ve garnet içerikli balata numunelerinin üç boyutlu yüzey profilometresi yüzey pürüzlülüğü değerleri Resim 4.6 ve Resim 4.7’ de verilmiştir. Üç boyutlu görüntüler sürtünme ve aşınma yüzeylerinin değerlendirilmesinde standart pürüzlülük ölçümüne göre daha fazla bilgi vermektedir (Betge ve Starcevic 2001). Sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak reçine içeriği azalmaktadır. Bu durum frenleme sırasında numune yüzeyinde oluşan temas yüzeylerinin azalmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olabilir (Yanar vd. 2020).

Resim 4.6 ve Resim 4.7’ de gösterilen ok işareti diskin dönüş yönünü göstermektedir. Resimler üzerinde abrasif aşınma ve derin çukurlar görülmektedir. Abrasif aşınma sonucunda oluşan çizikler yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Akıncıoğlu 2018).

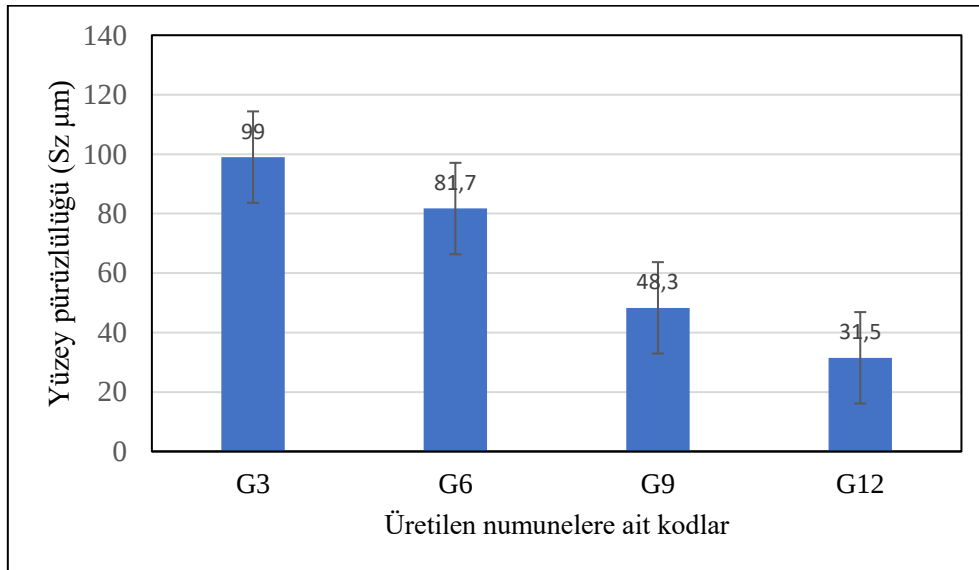


Resim 4.6 Garnet numuneleri Profilometre görüntüleri.

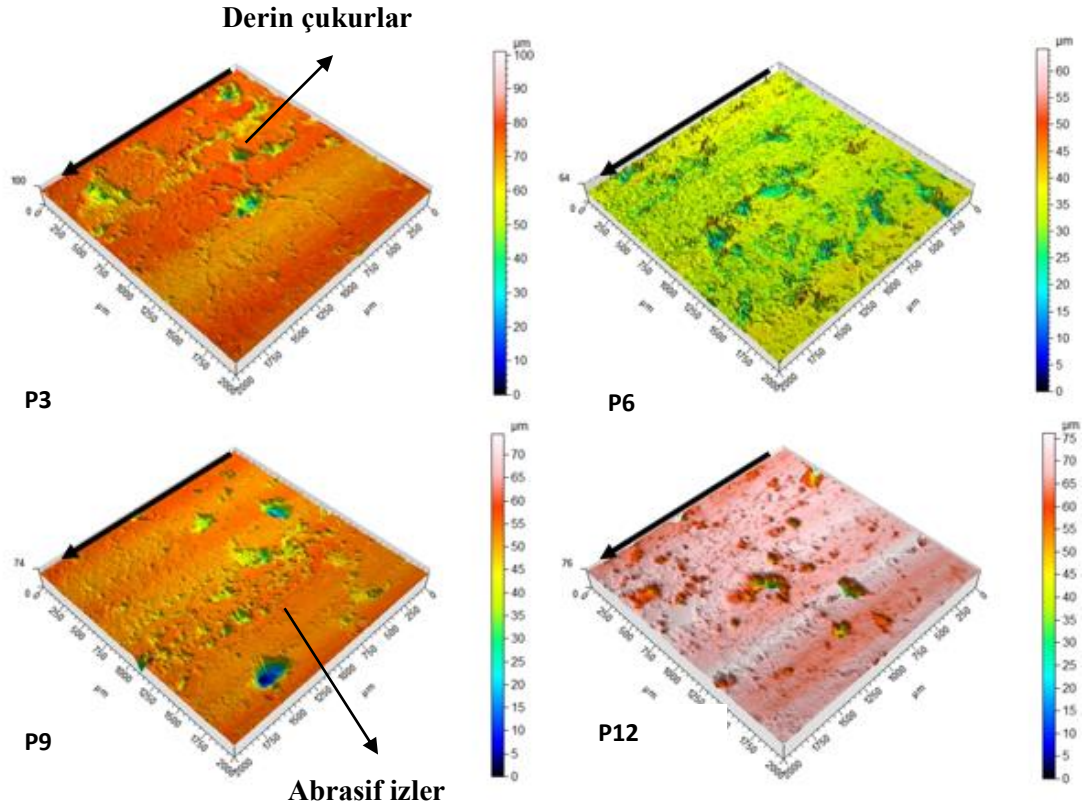


Şekil 4.20 Garnet üç boyutlu profilometre ortalama yüzey pürüzlülüğü Sa değerleri.

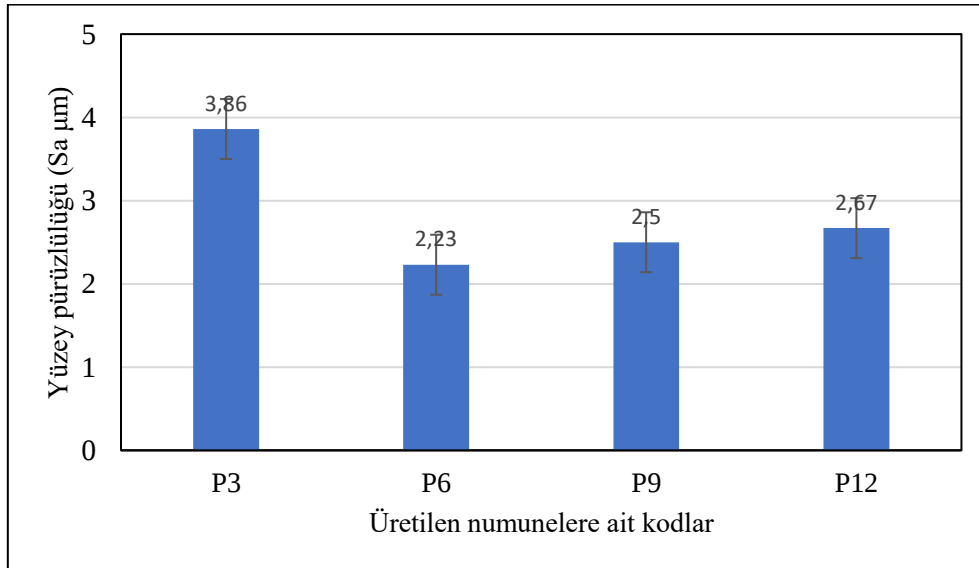
Garnet içerikli fren balata kompozitleri incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü Sa değeri en fazla G6 numunesinde, en az G12 numunesinde ölçülmüştür. G6 numunesinin Sa değeri G12 numunesinden 3.14 μm daha fazladır. En büyük yükseklik değeri ortalamaları Sz bakıldığında maksimum G3 numunesinde, minimum Sz değeri G12 numunesinde görülmektedir. G3 numunesindeki Sz değeri G12 numunesinden 67.50 μm daha fazladır.



Şekil 4.21 Garnet üç boyutlu profilometre en büyük yükseklik değeri ortalama Sz değerleri.

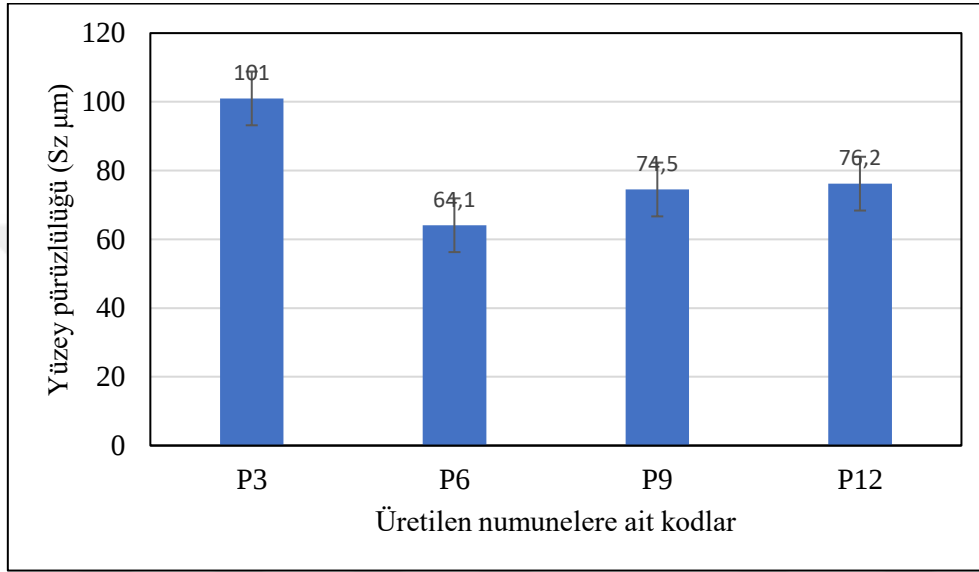


Resim 4.7 Pomza numuneleri Profilometre görüntüleri.



Şekil 4.22 Pomza üç boyutlu profilometre ortalama yüzey pürüzlülüğü Sa değerleri.

Pomza içerikli fren balata kompozitleri incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü S_a değeri en fazla P3 numunesinde, ez az P6 numunesinde ölçülmüştür. P3 numunesinin S_a değeri P6 numunesinden $1.63 \mu\text{m}$ daha fazladır. En büyük yükseklik değeri ortalamaları S_z bakıldığında maksimum P3 numunesinde, minimum S_z değeri P6 numunesinde görülmektedir. P3 numunesindeki S_z değeri P6 numunesinden $36.90 \mu\text{m}$ daha fazladır.



Şekil 4.23 Pomza üç boyutlu profilometre en büyük yükseklik değeri ortalama S_z değerleri.

S_a ve S_z değerlerine bakıldığında P3 numunesinde maksimum olduğu görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Otomobillerde fren balatası kompoziti olarak kullanılan, fren balataları farklı çalışma koşulları altında kusursuz bir performans sergilemelidir. Tez çalışmasında yapılan ön deneyler sonucunda optimum üretim yöntemi belirlenmiştir. 15 MPa presleme basıncında, 150 °C presleme sıcaklığında ve 170 °C'de 5 saat kürleme süresinde Pomza ve Garnet bazlı sekiz farklı ağırlık oranında kompozit fren balatası numuneleri üretilmiştir.

Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü raporlarında farklı sektörlerde kullanıldığı belirtilen, pomza ve garnet kullanımının, fren balataları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ülkemizde bulunan kaynaklardan balata üretiminin gerçekleştirilmesiyle, balataların maliyeti azalabilecektir. Pomza ve garnetin endüstri de birçok alanda kullanılmasının yanı sıra fren balata kompoziti olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada kütlece değişen oranlarda pomza, garnet (% 3, % 6, % 9 ve % 12) ve alüminadan oluşan 8 adet fren sürtünme kompozitlerinin tribolojik özellikleri deneysel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Yapılan deneyler sonucunda Pomza ve Garnet ile geliştirilen fren balatası örneklerinin bu sektörde istenilen özellikleri karşıladığı ve araçlarda kullanılabileceği belirlenmiştir.

Yoğunluk değerleri pomza numunelerinde 2.580-2.652 g/cm³, garnet numunelerinde 2.713-2.756 g/cm³ değerleri arasında çıkmıştır ve literatürde yapılan çalışmalara benzerlik göstermiştir. Yoğunluğun artması ile aşınma oranı ters orantı göstermektedir. Numunelerde presleme basıncı da yoğunluğu etkilemektedir (Sugözü 2016).

Sürtünme katsayısı ortalama değerleri dikkate alınmıştır. Ortalama sürtünme katsayısı değeri en fazla P12 kodlu numunede 0.37, G12 kodlu numunede 0.35, ticari balatanın ortalama sürtünme katsayısı 0.31 olarak ölçülmüştür. Sertliği yüksek olan malzemelerin

balata içerisinde yer alması sürtünme testi esnasında balata yüzeyinde sürtünme tabakası oluşturmakta ve balataların sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Sertliğin artması aşınma oranının artmasına neden olmuştur. Tüm numunelerin sürtünme katsayısı değerleri standart sınırları içerisinde olduğu görülmüştür. Üretilen tüm numunelerin sertlik değerleri ticari balataya göre daha yüksek çıkmıştır.

Aşınma oranı değerlerinde minimum aşınma oranı istenilmektedir. Minimum aşınma oranı P3 kodlu ve G3 kodlu numunelerde ölçülmüştür, tüm balata numuneleri fren balatası standartları içerisinde çıkmıştır. Fren balataları için sürtünme katsayısı değerlerinin yüksek olması aşınma oranı değerlerinin ise minimum olması istenilmekte dolayısı ile geliştirilen fren balatalarının bu özelliklere uygun olması gerekmektedir (Akagündüz vd. 2014).

Disk pürüzlülüğü diskin kullanım ömrü için önemli bir değerlendirme olup, en fazla disk pürüzlülük değişimi P9 numunesinde %40.1, G12 numunesinde %52.4 olarak ölçülmüştür. Malzemelerin sertliği arttıkça disk pürüzlülük değişimi de artmıştır.

Pomza içerikli fren balata kompozitleri incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü Sa değeri en fazla P3 numunesinde, ez az P6 numunesinde ölçülmüştür. P3 numunesinin Sa değeri P6 numunesinden 1.63 μm daha fazladır. En büyük yükseklik değeri ortalamaları Sz bakıldığında maksimum P3 numunesinde, minimum Sz değeri P6 numunesinde görülmektedir. P3 numunesindeki Sz değeri P6 numunesinden 36.90 μm daha fazladır.

Garnet içerikli fren balata kompozitleri incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü Sa değeri en fazla G6 numunesinde, ez az G12 numunesinde ölçülmüştür. G6 numunesinin Sa değeri G12 numunesinden 3.14 μm daha fazladır. En büyük yükseklik değeri ortalamaları Sz bakıldığında maksimum G3 numunesinde, minimum Sz değeri G12 numunesinde görülmektedir. G3 numunesindeki Sz değeri G12 numunesinden 67.50 μm daha fazladır.

Deney sırasında disk yüzeyindeki sıcaklık artışı en fazla P3 numunesinde 151.7 °C ve G3 numunesinde 194.1 °C olarak ölçülmüştür. Pomza ve garnet miktarı attıkça maksimum disk sıcaklığının azaldığı görülmüştür. Fren balatalarından istenen en önemli özelliklerden biri frenleme esnasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan ara yüzey sıcaklığındaki artışa bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimin minimum seviyede olmasıdır (Persson 1994, Tabor 1996).

Genel olarak, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri incelendiğinde üretimi yapılan numunelerde fren balatası standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir (TS555, 2019). Bu çalışmada pomza ve garnetten üretimi yapılan tüm karışım oranları için fren balatalarında kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Ticari amaçlı olarak dünya çapında otomobillerin yanı sıra kamyon, çekici, golf aracı ve yarış otomobilleri gibi araçlarda kullanılabilecektir.

Öneriler

Pomza ve garnetin fren sürtünme malzemesi olarak kullanılabilmesi için bazı öneriler geliştirilebilir.

- Bu çalışma da 75-125 mikron aralığında pomza ve garnet kullanılmıştır. Farklı tane boyutlu numuneler üretilerek tane boyutunun etkisi araştırılabilir.
- Farklı reçetelerle pomza ve garnet numuneleri denenerek balata numuneleri üretilip testler yapılabilir.
- Balata üreten firmalarla iş birliği yapılarak daha verimli balatalar üretilir.
- Balata emisyonları üzerine çalışmalar yapılabilir.
- Üretilen kompozitlerin maliyet hesabı yapılarak daha uygun maliyetli balatalar üretilir.

6. KAYNAKLAR

- Ahlawat V, Anuradha P, Kajal S, 2019, Preference Selection of Brake Friction Composite Using Entropy-VIKOR Technique, In Materials Today: Proceedings, 46, 9573–9579.
- Ahmadijokani F, Shojaei A, Dordanihaghighi S, Jafarpour E, Mohammadi S, Arjmand M, 2020, Effects of Hybrid Carbon-Aramid Fiber on Performance of Non-Asbestos Organic Brake Friction Composites, Wear, 452–453, 203280.
- Ahmed K A, Mohideen S, Balaji M, Rajan B, 2020, Tribological Performance of Brass Powder with Different Copper and Zinc Content in the Brake Pad, Tribology in Industry, 42-2, 177-190.
- Akagündüz E, Topuz A, Güneş M, 2014, Effects of Fly Ash Additive on The Properties of Railway Composite Disc Brake Linings, Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma, 32, 322–333.
- Akıncıoğlu G, 2018, Ticari Araç Balatalarına Ceviz ve Fındık Kabuğu Tozu Katkılarının Aşınma ve Sürtünme Davranışına Etkisinin İncelenmesi, Düzce Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 233s, Düzce.
- Akıncıoğlu G, Uygur İ, Akıncıoğlu S, Öktem H, 2021, Friction-Wear Performance in Environmentally Friendly Brake Composites: A Comparison of Two Different Test Methods, Polymer Composites, 42, 4461–4477.
- Aksay K E, Akar A, Cöcen İ, 2016, Pomza Cevherinin Hazırlanması ve Zenginleştirilmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 384-390.
- Amirjan M, 2019, Microstructure, Wear and Friction Behavior of Nanocomposite Materials with Natural Ingredients, Tribology International, 131, 184–190.
- Anderson A E, 1992, Friction and Wear of Automotive Brakes , Friction, Lubrication and Wear Technology ASM Handbook, USA.
- Antonyraj I J, Singaravelu D L, 2019, Tribological Characterization of Various Solid Lubricants Based Copper-Free Brake Friction Materials-A Comprehensive Study, In Materials Today: Proceedings, 27, 2650–2656.

- Aranganathan N, Mahale V, Bijwe J, 2016, Effects of Aramid Fiber Concentration on the Friction and Wear Characteristics of Non-Asbestos Organic Friction Composites Using Standardized Braking Tests, *Wear*, 354–355, 69–77.
- Aras S, 2019, Organik Malzeme Esaslı Hibrit Sürtünme Kompozitlerinin Balata Üretiminde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 116s, Konya.
- Arman M, Singhal S, Chopra P, Sarkar M A, 2018, Review on Material and Wear Analysis of Automotive Break Pad, *Materials Today: Proceedings*, 5, 28305–28312.
- ASTM D2240, 2021, Standard Test Method For Rubber Property–Durometer Hardness, West Conshohocken, Pensilvanya, ABD.
- Başar G, Buldum B, Sugözü İ, 2018, Kolemanit ve Boraks Takviyeli Fren Balatalarının Sürtünme Performansı, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5–2, 635-644.
- Bayram E, Topuz A, 2021, Friction and Wear Properties of Heavy Load Truck Composite Brake Linings, *Materials Testing*, 63–1, 79–84.
- Bettge D, Starcevic J, 2001, Quantitative Description of Wear Surfaces of Disc Brakes Using Interference Microscopy, *Wear*, 248, 121-127.
- Bhushan B, 2001, Principles of tribology, *Modern Tribology Handbook*, Volume I, CRC Press.
- Bijwe J, Kumar M, 2007, Optimization of Steel Wool Contents in Non-Asbestos Organic (Nao) Friction Composites for Best Combination of Thermal Conductivity and Triboperformance, *Wear*, 263–12, 1243–1248.
- Binda F, Oliveira V D A, Fortulan C A, Palhares L B, Santos C G, 2020, Friction Elements Based on Phenolic Resin and Slate Powder, *Journal of Materials Research and Technology*, 9–3, 3378–3383.
- Blau P J, 2001, Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives, Oak Ridge National Lab., Tennessee, United States.
- Cai P, Wang Y, Wang T, Wang Q, 2015, Effect of Resins on Thermal, Mechanical and Tribological Properties of Friction Materials, *Tribology International*, 87, 1–10.

- Chan D, Stachowiak G W, 2004, Review of Automotive Brake Friction Materials, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, 218, 953–966.
- Chen B, Bi Q, Yang J, Xia Y, Hao J, 2008, Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites, Tribology International, 41, 1145-1152.
- Chung J O, Go S R, Choi H B, Son T K, 2020, Temperature Dependence of Friction Coefficient and Transfer Film Formation in Organic Friction Materials Containing Different Abrasive Components, Industrial Lubrication and Tribology, 72-4, 483-489.
- Domaç G S, 2006, Disk Frenlerin Tasarım ve Tribolojik Açidan İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 107s, İstanbul.
- Engin İ C, 2000, Kırşehir-Kaman Granatlarının Aşındırıcı Olarak Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 124s, Ankara.
- Engin İ C, 2010, Kırşehir-Kaman Granatlarının Doğaltaş Sektöründe Aşındırıcı Malzeme Olarak Kullanımı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2, 29-36.
- Eriksson M, Jacobson S, 2000, Tribological Surfaces of Organic Brake Pads, Tribology International, 33, 817-827.
- Ertan R, 2008, Fren Balata Malzemelerinin Optimizasyonu ve Üretim Parametrelerinin Analizi, Uludağ Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 160s, Bursa.
- German R M, 1997, The fundamental principles of powder metallurgy, Powder metallurgy, papers/powder metallurgy.html, 1-7.
- Gnecco E, Meyer E, 2007, Fundamentals of Friction and Wear, 2, 32-85, London, England.
- Gurunath P V, Bijwe J, 2007, Friction and Wear Studies on Brake-Pad Materials Based on Newly Developed Resin, Wear, 263, 1212-1219.
- Hatam A, Khalkhali A, 2018, Simulation and Sensitivity Analysis of Wear on The Automotive Brake Pad, Simulation Modelling Practice and Theory, 84, 106–123.

- Hong U S, Jung S L, Cho K H, Cho M H, Kim S J, Jang H, 2009, Wear Mechanism of Multiphase Friction Materials with Different Phenolic Resin Matrices, *Wear*, 266, 739-744.
- Ikpambese K, Gundu D T, Tuleun L T, 2016, Evaluation of Palm Kernel Fibers (Pkfs) for Production of Asbestos-Free Automotive Brake Pads, *Journal of King Saud University–Engineering Sciences*, 28, 110–118.
- ISO25178, 2012, Geometrical Product Specifications (GPS), Surface Texture: Areal, Cenevre, İsviçre.
- Jeganmohan R S, Christy T V, Solomon D G, Sugözü B, 2020, Influence of Calcium Sulfate Whiskers on The Tribological Characteristics of Automotive Brake Friction Materials, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23–2, 445–451.
- Joo B S, Chang Y H, Seo H J, Jang H, 2019, Effects of Binder Resin on Tribological Properties and Particle Emission of Brake Linings, *Wear*, 434–435.
- Kartikeyan S, Balakrsihnan E, Meganathan S, Balachander M, Ponshanmugakumar A, 2019, Elemental Analysis of Brake Pad Using Natural Fibres, *Materials Today: Proceedings*, 16, 1067-1074.
- Kim S, J Cho, M H Cho, K H, Jang H, 2007, Complementary Effects of Solid Lubricants in The Automotive Brake Lining, *Tribology International*, 40–1, 15–20.
- Komori T, Miyake S, Senoo Y, 1990, Brake-friction material, Google Patents, US4954536A 09, 04.
- Kumar S, Ghosh S K, 2020, Porosity and Tribological Performance Analysis on New Developed Metal Matrix Composite for Brake Pad Materials, *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 186–204.
- Lertwassana W, Parnklang T, Mora P, Jubsilp C, Rimdusit S, 2019, High Performance Aramid Pulp/Carbon Fiber-Reinforced Polybenzoxazine Composites As Friction Materials, *Composites Part B: Engineering*, 107280, 177.
- Limpert R, 2011, Brake Design and Safety, Third Edition, SAE International, 434s, USA.

- Liu Y, Wang L, Liu D, Ma Y, Tian Y, Tong J vd, 2019, Evaluation of Wear Resistance of Corn Stalk Fiber Reinforced Brake Friction Materials Prepared By Wet Granulation, *Wear*, 102918, 432–433.
- Moore D F, 1975, Friction of Various Materials, in *Principles and Applications of Tribology*, ed: Pergamon, pp 86-104.
- MTA, 2020, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Dünyada ve Türkiye’de Pomza Raporu, Ankara.
- Mulani S M, Kumar A, Shaikh H N E A, Saurabh A, Singh P K, Verma P C, 2022, A Review on Recent Development and Challenges in Automotive Brake Pad-Disc System, *Materials Today: Proceedings*, 56, 447-454.
- Mutlu İ, Malak A, Bayrakçeken H, Aysal F E, Yavuz İ, 2016, The Investigation of Brake Linings Reinforced With Carbon Fiber, *Electronic Journal of Machine Technologies*, 13.
- Ojha A R, Biswal S K, 2019, Thermo Physico-Mechanical Behavior of Palm Stalk Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with Granite Powder, *Composites Communications*, 16, 158–161.
- Öveçoğlu, M L, 1997, Toz Metalürjisi Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğitimler, 9. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, 449-475, İstanbul.
- Öztürk B, Öztürk S, Adıgüzel A, 2013, Effect of Type and Relative Amount of Solid Lubricants and Abrasives on The Tribological Properties of Brake Friction Materials, *Tribology Transactions*, 56, 428-441.
- Prabhu T R, 2015, Effects of solid lubricants, load, and sliding speed on the tribological behavior of silica reinforced composites using design of experiments, *Materials & Design*, 77, 149-160.
- Persson B N J, 1994, Theory of Friction: The Role of Elasticity in Boundary Lubrication, *Physical Review B*, 50-7, 4771-4786.
- Pomza, 2015, Pomza Uygulama ve Araştırma Merkezi Fizibilite Raporu, Nevşehir.

- Rajan S, Balaji S, Noorani M A, 2019, Tribological Performance of Graphene/Graphite Filled Phenolic Composites- A Comparative Study, *Composites Communications*, 15, 34–39.
- Saha D, Satapathy B K, 2019, Friction Hysteresis and Subsequent Wear Mechanism of Clay-Based Phenolic Composites Under Cyclic Load, In *Materials Today: Proceedings*, 19, 196–204.
- Sathickbasha_K, Selvakumar_A S, Surya Rajan_Balachandran, Hariharasakthisudhan_P, 2020, Multi-Metal Sulfide Pre-Blend Combination on The Tribological Performance of The Brake Friction Material, *Industrial Lubrication and Tribology*, 73-2, 325-334.
- Sayar E, 2022, Organik Atık Ürünlerin Kompozit Fren Balatalarında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Tarsus Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Tarsus.
- Sellami A, Kchaou M, Kus R, Fajoui J, Elleuch R, Jacquemin F, 2018, Impact of brass contents on thermal, friction and wear properties of brake linings composites, *Mechanics & Industry*, 19-105, 1-9.
- Singh T, Pruncu C I, Gangil B, Singh V, Fekete G, 2020, Comparative Performance Assessment of Pineapple and Kevlar Fibers Based Friction Composites, *Journal of Materials Research and Technology*, 9–2, 1491–1499.
- Stachowiak G W, Batchelor A W, 2014, *Engineering Tribology*, Butterworth-Heinemann, 883s, USA.
- Sugözü İ, 2009, Bor Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 277s, Elazığ.
- Sugözü İ, Mutlu İ, 2008, Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme ve Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 33-40.
- Sugözü İ, Sugözü B, 2020, Powder Materials Used in Automotive Brake Pad, 4. Uluslararası Akdeniz Sempozyumu, 22-24 Ekim, Mersin, Türkiye.

- Sugözü K B, Dağhan B, Akdemir A, Ataberk N, 2016, Friction and Wear Properties of Friction Materials Containing Nano/Micro-Sized SiO₂ Particles, Industrial Lubrication and Tribology, 68-2, 259-266.
- Sun W, Zhou W, 2019, Effects of Friction Film Mechanical Properties on The Tribological Performance of Ceramic Enhanced Resin Matrix Friction Materials, Journal of Materials Research and Technology, 8-5, 4705-4712.
- Tabor D, 1996, Friction as a dissipated process, Friction of organic polymers in fundamentals of friction, Macroscopic and Microscopic Processes, 3, 220.
- Takadoun J, 2008, Materials and Surface Engineering in Tribology, Iste-Wiley, 242s, London-USA.
- Tavangar R, Moghadam H A, Khavandi A, Banaeifar S, 2020, Comparison of Dry Sliding Behavior and Wear Mechanism of Low Metallic and Copper-Free Brake Pads, Tribology International, 106416, 151.
- Taylor A J, Taylor S K, Hubbard D A, Lotfipour M, 1998, Friction Pads for Use in Disc Brakes, Google Patents, US5725077A.
- TS 555, 2019, Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Sürtünmeli Frenler İçin Balatalar, TSE, Ankara.
- TS 7965, 1990, Karayolu Taşıtları-Sürtünmeli Frenler-Balatalar-Deney Metotları-Korozyon Sebebiyle Demir Yüzeylere Tutunma, TSE, Ankara.
- TS 9073, 1991, Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Fren Balataları-İç Kesme Mukavemeti Deneyi, TSE, Ankara.
- TS 9074, 1991, Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Fren Balataları-Disk Balataların Biçim ve Boyutları Üzerindeki Isı Etkisinin Tayini Deneyi, TSE, Ankara.
- TS 9075, 1991, Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Fren Balataları-Su, Tuzlu Su, Yağ ve Fren Sıvısına Dayanım Deneyi, TSE, Ankara.
- TS 9801, 1992, Kaolen-Fren Balatası Kullanılan, TSE, Ankara.

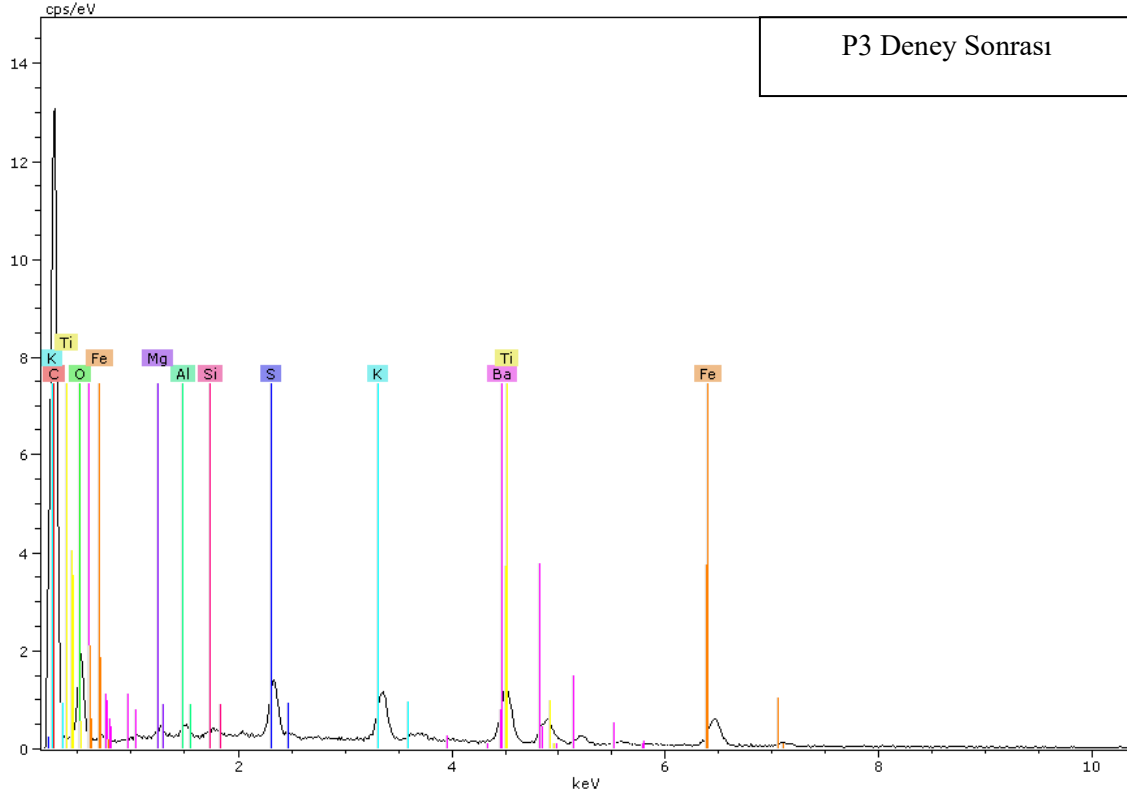
- Unal A, Demirdalmis O, 2024, The Effects of Using Apricot Kernel Shell an Environmentally Friendly Material in Composite Brake Pads on Friction Performance, *Tribology International*, 197, 1-9.
- Ünaldı M, Kuş R, 2018, The Determination of The Effect of Mixture Proportions and Production Parameters on Density and Porosity Features of Miscanthus Reinforced Brake Pads by Taguchi Method, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7-1, 48-57.
- Vidersčak D, Schauperl Z, Ormuž K, Šolić S, Nikšić M, Milčić D, vd., 2022, Influence of Brake Pad Properties to Braking Characteristics, *Promet-Traffic&Transportation*, 34-1, 91-102.
- Xiao X, Yin Y, Jiusheng B, Lu L, Feng X, 2016, Review on The Friction and Wear of Brake Materials, *Advances in Mechanical Engineering*, 8, 1-10.
- Yanar H, Ayar H, Demirtas M, Purcek G, 2020, Effect of Resin Content on Tribological Behavior of Brake Pad Composite Material, *Industrial Lubrication and Tribology*, 72-2, 195-202.
- Yavuz H, 2022, Huntit Katkılı Kompozit Fren Balatası Üretimi ve Tribolojik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 116s, Afyonkarahisar.
- Yavuz H, Bayrakçeken H, 2022, Investigation of Friction and Wear Behavior of Composite Brake Pads Produced with Huntite Mineral, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6, 9-16.
- Zaharudin A, Talib R, Berhan M, Budin S, Aziurah M, 2011, Taguchi Method for Optimising The Manufacturing Parameters of Friction Materials, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 7-1, 83-88.
- Zhao X, Ouyang J, Yang H, Tan Q, 2020, Effect of Basalt Fibers for Reinforcing Resin-Based Brake Composites, *Minerals*, 10-490, 1-13.

İnternet Kaynakları

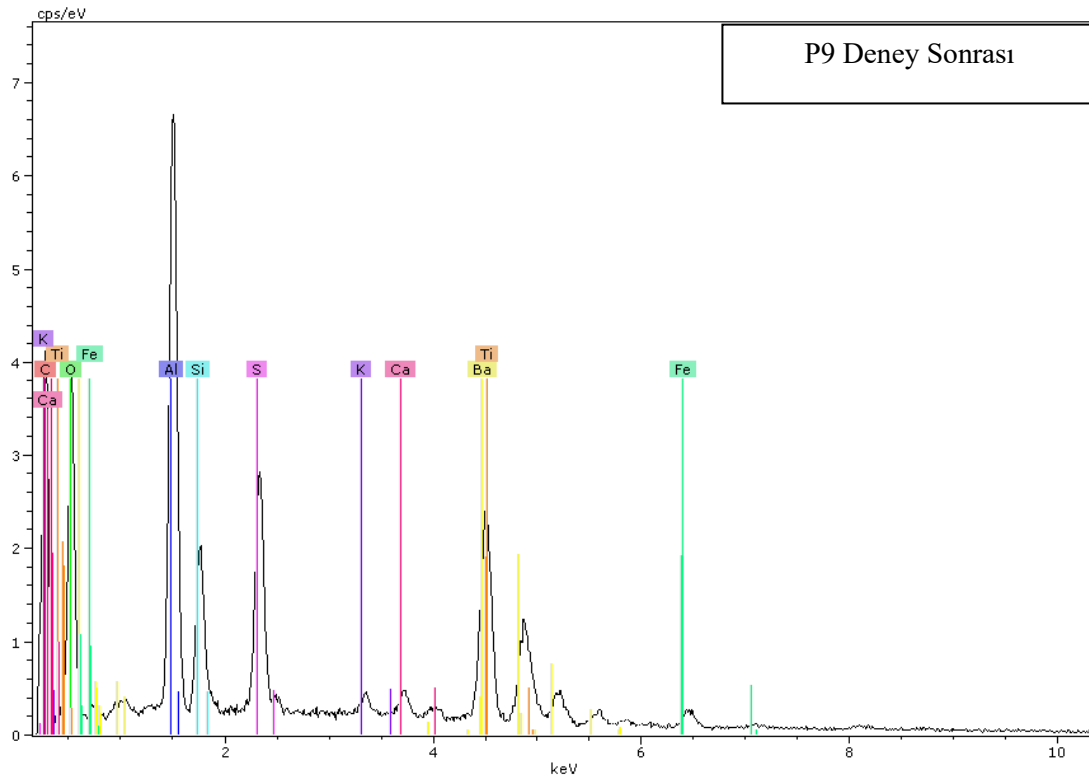
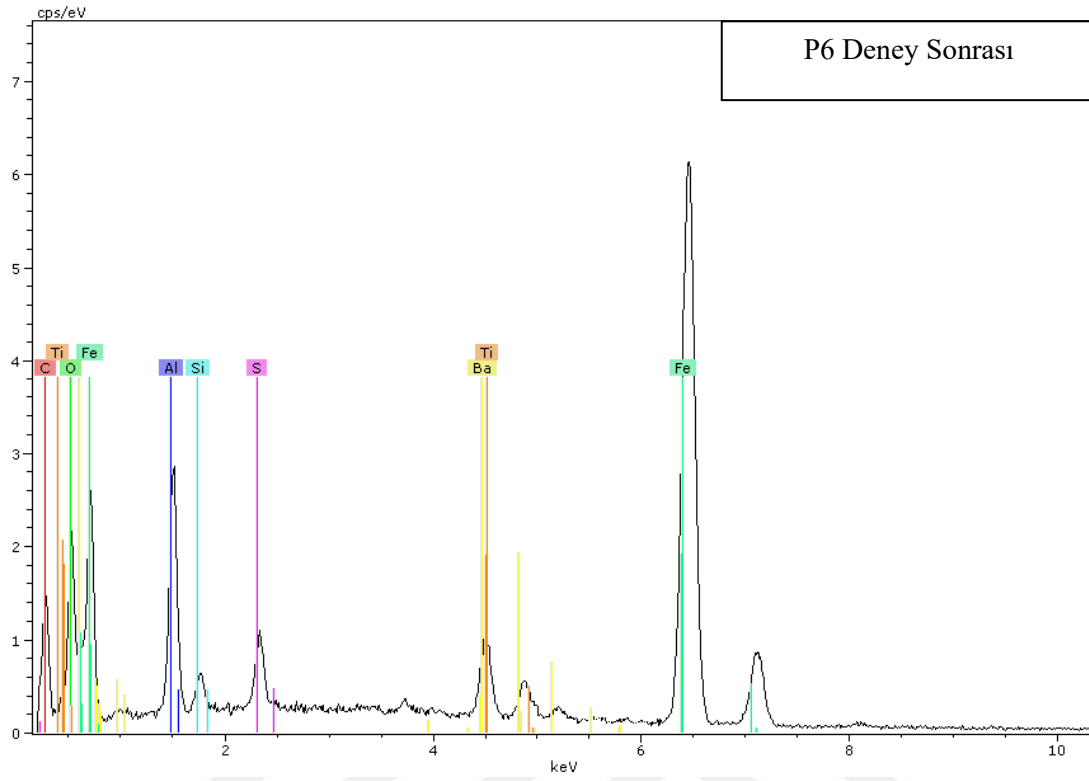
- 1-<https://www.weforum.org/agenda/2016/04/the-number-of-cars-worldwide-is-set-to-double-by-2040/>, 03.06.2024
- 2- <https://blog.toyota.com.tr/fren-balatasi-nedir-ne-zaman-degistirilir/>, 02.06.2024
- 3- <https://www.humaoto.com/urun/defender-pabuclu-balata-stc2797>, 09.06.2024
- 4-<https://indianauto.com/tips/10-things-to-remember-when-driving-long-distances-in-hot-weather-nid59>, 04.06.2024
- 5- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Triboloji>, 02.06.2024
- 6 -<http://www.digiwork.ca/product.html?title=TIME%20TR220>, 10.06.2024
- 7- <https://tuam.aku.edu.tr/2016/02/19/sem/>, 31.05.2024

EKLER

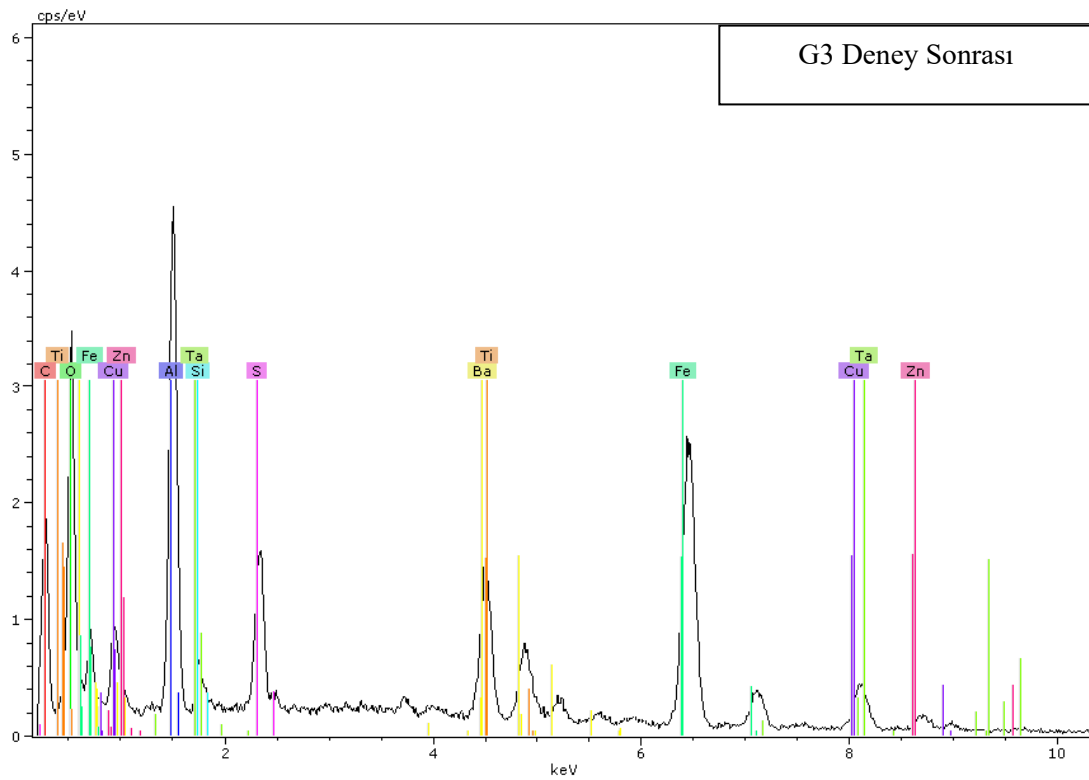
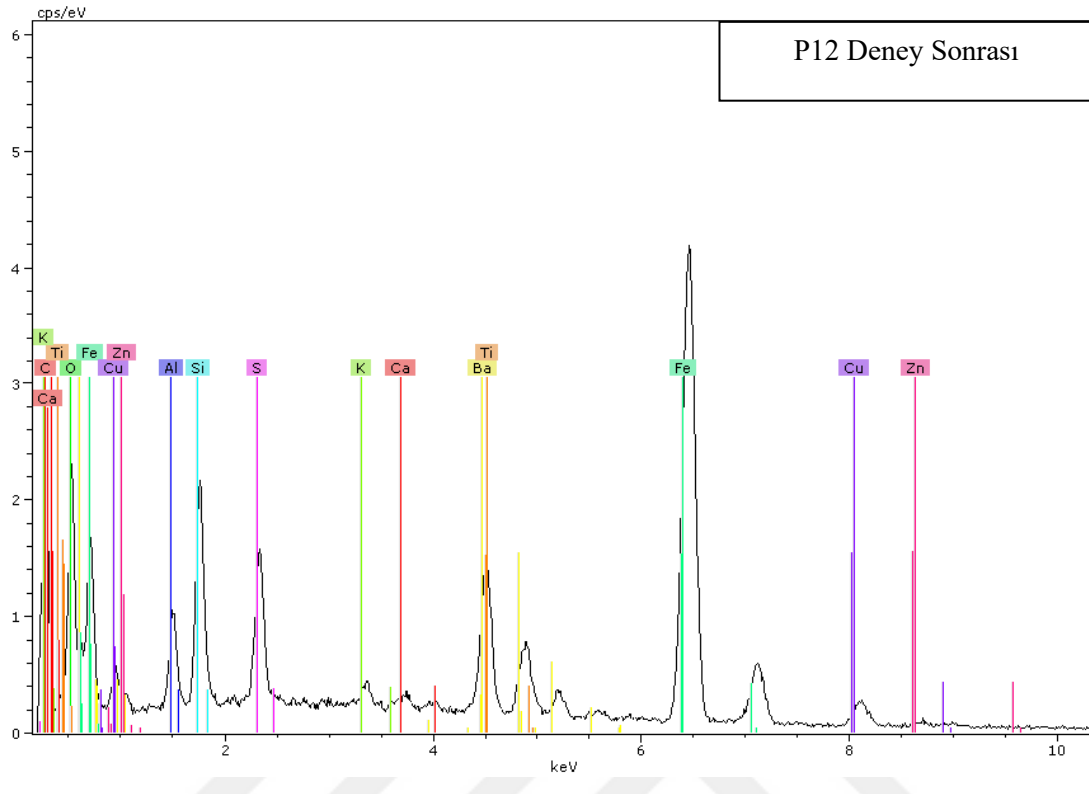
EK 1. Tüm numuneler için EDX analiz grafikleri



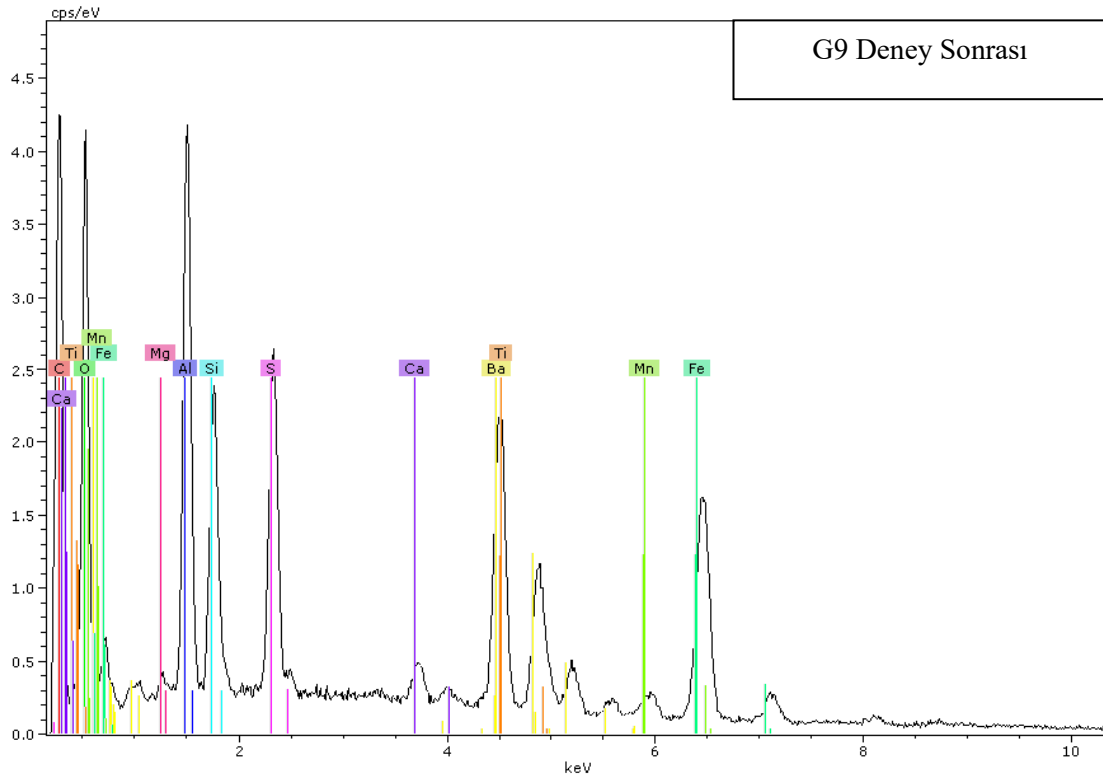
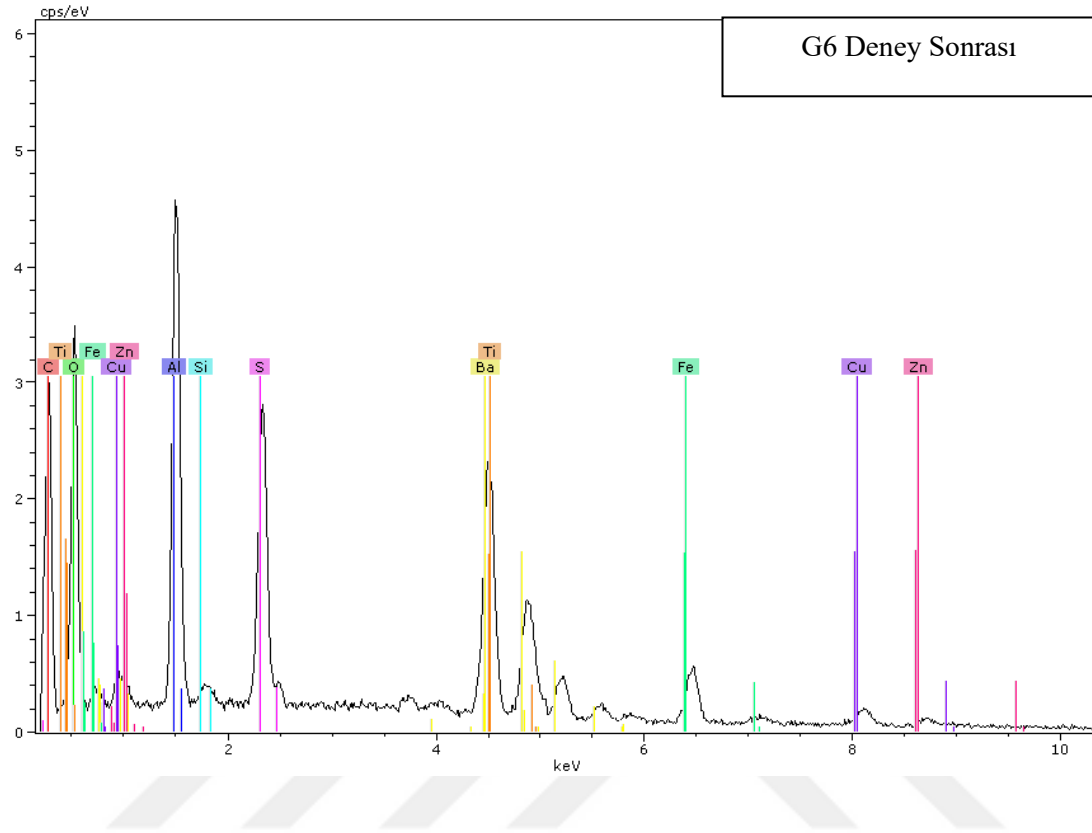
EK 1. Devam Tüm numuneler için EDX analiz grafikleri



EK 1. Devam Tüm numuneler için EDX analiz grafikleri



EK 1. Devam Tüm numuneler için EDX analiz grafikleri



EK 1. Devam Tüm numuneler için EDX analiz grafikleri

