



**METALİK CÜRUFLARIN OTOMOTİV
SÜRTÜNME MALZEMESİNDE DOLGU
MADDESİ OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Furkan AKBULUT

**Danışman
Prof. Dr. İbrahim MUTLU**

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2024

Bu tez çalışması 21.FEN.BİL.06 numaralı proje ile BAP tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

METALİK CÜRUFLLARIN OTOMOTİV SÜRTÜNME
MALZEMESİNDE DOLGU MADDESİ OLARAK KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI

Furkan AKBULUT

Danışman
Prof. Dr. İbrahim MUTLU

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Furkan AKBULUT tarafından hazırlanan “Metalik Cürufların Otomotiv Sürtünme Malzemesinde Dolgu Maddesi Olarak Kullanımının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 12/02/2024 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. İbrahim MUTLU

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

Üye : Prof. Dr. İbrahim MUTLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Bekir GÜNEY
Karamanoğlu Mehmet Bey Ün., Tek. Bil. MYO

Üye : Dr. Öğr. Üyesi 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.

12/02/2024

İmza

Furkan AKBULUT

ÖZET

Doktora Tezi

METALİK CÜRUFLARIN OTOMOTİV SÜRTÜNME MALZEMESİNDE DOLGU MADDESİ OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Furkan AKBULUT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İbrahim MUTLU

Bu araştırmada, otomotiv fren balatalarının üretiminde dolgu maddesi olarak metalik cürufların kullanımı araştırılmıştır. Birinci aşamada içerik optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İçerik optimizasyonu aşamasında kütleli farklı oranlarda; fenolik reçine, bronz tozu, pirinç talaşı, cam elyaf, çelik yünü, barit, grafit ve alümina kullanılmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan 46 içeriğin ortalama sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk, sertlik ve bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada, üretilen 46 numune kullanılarak ortalama sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı ve sürtünme stabilitesi değerleri modellenmiştir. Modelleme için genetik programlama yöntemlerinden biri olan çok genli genetik programlama kullanılmıştır. 46 deney numunesinin 39 tanesi eğitim için, kalan 7 tanesi ise validasyon için kullanılmıştır. Bütün model veri sonuçlarına göre ortalama sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı ve sürtünme stabilitesi R^2 değerleri sırasıyla %95, %93 ve %86 olarak elde edilmiştir. Üçüncü aşamada üretim parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Soğuk presleme süresi ve basıncı, sıcak presleme süresi-basıncı ve sıcaklığı, kütleme sıcaklığı ve süresi değerleri optimize edilmiştir. Üretim optimizasyonuna göre soğuk presleme süresi 3 dk., soğuk presleme basıncı 12 MPa, sıcak presleme süresi 15 dk., sıcak presleme basıncı 12 MPa, sıcak presleme sıcaklığı 150 °C, kütleme süresi 8 s ve kütleme sıcaklığı 150 °C olarak belirlenmiştir. Son aşamada içeriği ve üretim parametresi optimize edilmiş fren balatalarının içerisine dolgu malzemesi olarak yüksek fırın, bakır ve alüminyum cüruf malzemelerinin kullanımı

araştırılmıştır. Numune içerisinde %40 oranında barit kullanılırken, her bir curuf malzeme için bu oran %10 oranında azaltılmış ve curuf malzemesinin oranı %10 arttırılmıştır. Elde edilen sonuçlara gre fren balatası kompozisyonunda yüksek fırın curufu oranının %10, bakır curufu oranının %30 ve alüminyum curufu oranının %20 değerine kadar kullanımının uygun olduğu çalışma sonucunda önerilmiştir.

2024, xiv + 113 sayfa

Anahtar Kelimeler: Fren balatası, Sürtünme, Aşınma, Genetik Programlama, Optimizasyon



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE USE OF METALLIC SLAGS AS FILLER IN AUTOMOTIVE FRICTION MATERIAL

Furkan AKBULUT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. İbrahim MUTLU

In this research, the use of metallic slags as fillers in the production of automotive brake lining was investigated. In the first stage, content optimization was performed. In the content optimization stage, at different mass rates; phenolic resin, bronze powder, brass shavings, glass fiber, steel wool, barite, graphite and alumina were used. The average coefficient of friction, specific wear rate, friction stability, density, hardness and some physical properties of 46 ingredients prepared in different proportions were determined. In the second stage, the average coefficient of friction, specific wear rate and friction stability values were modeled using the 46 samples produced. Multigene genetic programming, one of the genetic programming methods, was used for modeling. 39 of the 46 test samples were used for training and the remaining 7 were used for validation. According to all model data results, the R^2 values of average friction coefficient, specific wear rate and friction stability were obtained as 95%, 93% and 86% respectively. In the third stage, optimization of the production parameters was carried out. Cold pressing and pressure, hot pressing time-pressure and temperature, curing temperature and time were optimized. According to the production optimization, 3 min for pre-forming time, 12 MPa for pre-forming pressure; 15 min for hot pressing time, 12 MPa for hot pressing pressure, and 150°C for hot pressing temperature; and a curing time of 8 h and curing temperature of 150 °C has been determined. In the last stage, the use of blast furnace, copper and aluminum slag materials as filler materials in brake linings with optimized content and production parameters was investigated. While 40%

barite was used in the sample, this ratio was reduced by 10% for each slag material and the proportion of slag material was increased by 10%. According to the results obtained, it was suggested that it is appropriate to use blast furnace slag up to 10%, copper slag up to 30% and aluminum slag up to 20% in the brake lining composition.

2024, xiv + 113 pages

Keywords: Brake lining, Friction, Wear, Genetic programming, Optimization,



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İbrahim MUTLU, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Seyfi POLAT, Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ, Dr. Öğr. Üyesi Halil KILIÇ, Doç. Dr. Bekir GÜNEY, Doç. Dr. Özgür ÖZDİLLİ, Dr. Öğr. Üyesi Ercan ŞİMŞİR, Dr. Öğr. Üyesi Hüsnü YALDUZ, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa SEYREK'e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma, tecrübeleri ve fikirleriyle desteklerini esirgemeyen Tekniker Mehmet AKTÜRK'e, Cebir Enerji ve Kontrol Sistemleri işletme sahibi Hilmi YANMAZ'a, Özer CNC Makine işletme sahibi Özgür KABASAKAL'a, Ece Banyo A.Ş. Arge Mühendisi Dr. Eray ÇAŞIN'a, Ekmekçioğulları Metal Kimya San. Tic. A.Ş., Eti Alüminyum A.Ş., İskenderun Demir Çelik A.Ş., Ece Banyo A.Ş. ve 4D Makine ve Teknoloji firmalarına teşekkür ederim.

Tez çalışmamı 21.FEN.BİL.06 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 eşim Ayşegül Kübra'ya ve aileme teşekkür ederim.

Furkan AKBULUT
Afyonkarahisar, 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Triboloji	3
1.1.1 Sürtünme	3
1.1.2 Aşınma	4
1.2 Fren Balataları.....	5
1.2.1 Balata Çeşitleri	8
1.2.1.1 Metal Esaslı Sürtünme Malzemeleri	9
1.2.1.2 Organik Esaslı Sürtünme Malzemeleri.....	10
1.2.1.3 C/C Kompozitler	12
1.2.2 Balatalarda Kullanılan Malzemeler.....	12
1.3 Cüruf Malzemeleri.....	15
1.3.1 Yüksek Fırın Cürufu	15
1.3.2 Bakır Cürufu	16
1.3.3 Alüminyum Cürufu	16
1.4 Genetik Programlama	17
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	22
3. MATERYAL ve METOT	28
3.1 Optimizasyon Süreçleri.....	28
3.1.1 İçerik Optimizasyonu	28
3.1.2 Üretim Parametresi Optimizasyonu	30
3.1.3 Atık Malzemelerin Kullanımı	31
3.2 Üretim ve Deney Aşamalarında Kullanılan Cihazlar	32
3.2.1 Test Cihazı	32
3.2.2 Yük Hücresi	34

3.2.3 İnvörtör.....	34
3.2.4 Temassız Sıcaklık Ölçer.....	35
3.2.5 Basınç Sensörü.....	35
3.2.6 Hassas Terazı	36
3.2.7 Karıştırma Cihazı	36
3.2.8 Presleme Kalıpları.....	36
3.2.9 Etüv Fırını	37
3.3 Numunelerin Üretilmesi	38
3.4 Ölçüm Yöntemleri	39
3.4.1 Yoğunluk Ölçümü.....	40
3.4.2 Sertlik Ölçümü	40
3.4.3 Taramalı Elektron Mikroskopu	41
3.4.4 Üç Boyutlu Profilometre	41
3.4.5 Özgöl Aşınma Oranının Belirlenmesi.....	42
3.4.6 Sürtünme Stabilitesi	42
3.4.7 Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi.....	43
3.5 Çok Genli Genetik Programlama Parametreleri	43
4. BULGULAR	47
4.1 İçerik Optimizasyonu Sonuçları	47
4.1.1 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	48
4.1.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	49
4.1.3 Sürtünme Performansı Sonuçları	50
4.1.4 Özgöl Aşınma Oranı Sonuçları	52
4.2 İçerik Optimizasyonunun Modellenmesi.....	53
4.2.1 Sürtünme Katsayısı Modeli ve Performans Göstergeleri.....	53
4.2.2 Özgöl Aşınma Oranı Modeli ve Performans Göstergeleri.....	55
4.2.3 Sürtünme Stabilitesi Modeli ve Performans Göstergeleri.....	57
4.2.4 Geliştirilen Modeller Tarafından Ara Değerlerin Bulunması	59
4.2.5 Duyarlılık Analizi.....	61
4.3 Üretim Parametresi Optimizasyonu Sonuçları	63
4.3.1 Soğuk Presleme Süresi ve Basıncının Etkisi.....	64
4.3.2 Sıcak Presleme Süresi, Basıncı ve Sıcaklığının Etkisi.....	67
4.3.3 Kırleme Süresi ve Sıcaklığının Etkisi	72
4.4 Atık Malzemelerin Kullanımı	74

4.4.1 Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı	76
4.4.2 Bakır Cürufu Kullanımı	78
4.4.3 Alüminyum Cürufu Kullanımı	80
4.5 Numunelerin SEM Görüntüleri	82
4.6 Numunelerin Üç Boyutlu Profilometre Görüntüleri	92
4.7 Diğer Fiziksel Özellikler	94
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	99
6. KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	111



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°	Derece
°C	Santigrat derece
μ	Sürtünme katsayısı
μm	Mikrometre
μm^2	Mikrometrekare
μ_{max}	Maksimum sürtünme katsayısı
μ_{ort}	Ortalama sürtünme katsayısı
Al_2O_3	Alümina
Ca	Kalsiyum
CaO	Kalsiyum oksit
CH_4	Metan
cm	Santimetre
cm^3/Nm	Santimetreküp/Newtonmetre
Cu	Bakır
d/dk	Devir/dakika
dk.	Dakika
Fe	Demir
Fe_2O_3	Demir (III) Oksit
f_m	Deney sonucu ortalama sürtünme kuvveti
F_s	Yük hücresinde okunan değer
gr	Gram
gr/cm^3	Gram/santimetreküp
H_2S	Hidrojen sülfür
inch^2	Inchkare
kg	Kilogram
kJ/m^2	Kilojoule/metrekare
kW	Kilowatt
L	Litre
m	Metre
m/s	Metre/saniye
m^2/s	Metrekare/saniye
$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Asbest
mm^2	Milimetrekare
MoS_2	Molibden disülfid
MPa	Megapaskal
N	Newton
n	Toplam devir sayısı
N/mm^2	Newton/milimetrekare
NH_3	Amonyak
PH_3	Fosfin
R_d	Disk yarıçapı
s	Saat
Sa	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Sb_2S_3	Antimon trisülfür

Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum dioksit
sn	Saniye
Sp	En yüksek tepe noktası pürüzlülüğü
Sq	Ortalama pürüzlülük değerinin karekökü
Sv	En büyük çukur derinliği pürüzlülüğü
Sz	Profilin maksimum yükseklik değeri ortalamaları
V	Özgül aşınma oranı
Zn	Çinko
ZnO	Çinko oksit
ρ	Numune yoğunluğu

Kısaltmalar

AC10	%10 oranında alüminyum cürufu içeren numune
AC20	%20 oranında alüminyum cürufu içeren numune
AC30	%30 oranında alüminyum cürufu içeren numune
AC40	%40 oranında alüminyum cürufu içeren numune
BC10	%10 oranında bakır cürufu içeren numune
BC20	%20 oranında bakır cürufu içeren numune
BC30	%30 oranında bakır cürufu içeren numune
BC40	%40 oranında bakır cürufu içeren numune
C/C	Karbon/Karbon
ÇGGP	Çok genli genetik programlama
EDX	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
FAST	Friction Assessment and Screening Test
HD	Shore D durometer sertlik ölçüm birimi
HRL	Rockwell skalasında sertlik ölçüm birimi
KS	Kürleme süresi
KS ₁	Kürleme sıcaklığı
MAE	Ortalama mutlak hata
MSE	Ortalama karesel hata
R ²	Belirleme katsayısı
RMSE	Ortalama karekök hatası
RN	Referans numune
S/N	Sinyal/gürültü oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
S ₁ PS ₁	Sıcak presleme sıcaklığı
S ₁ PB	Sıcak presleme basıncı
S ₁ PS	Sıcak presleme süresi
SK	Sürtünme katsayısı
SoPB	Soğuk presleme basıncı
SoPS	Soğuk presleme süresi
SS	Sürtünme stabilitesi
SSE	Karesel hatanın toplamı
YFC10	%10 oranında yüksek fırın cürufu içeren numune
YFC20	%20 oranında yüksek fırın cürufu içeren numune
YFC30	%30 oranında yüksek fırın cürufu içeren numune
YFC40	%40 oranında yüksek fırın cürufu içeren numune

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Fren balatası çeşitleri	9
Şekil 1.2. Fren balatalarında kullanılan malzemelerin sınıflandırılması.....	13
Şekil 1.3 Basit bir matematiksel denklemi temsil eden seyrek bir ağaç	19
Şekil 1.4 Genetik programlamada fonksiyon ve düğüm mutasyonu.	19
Şekil 1.5 Genetik programlamada alt ağaç mutasyonu.	20
Şekil 1.6 Genetik programlamada çaprazlama.....	20
Şekil 1.7 Potansiyel bir çözümün çok genli genetik programlamada örneği.	21
Şekil 3.1 Fren test cihazının şematik gösterimi.....	32
Şekil 3.2 Fren balatası üretim aşamaları	38
Şekil 3.3 Shore D durometer sertlik ölçüm cihazı	40
Şekil 4.1 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçları...	48
Şekil 4.2 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin sertlik sonuçları.....	49
Şekil 4.3 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin ortalama SK değerleri	50
Şekil 4.4 Numunelerin kütlece değişim oranlarına bağlı ortalama SK değerleri.....	51
Şekil 4.5 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin sürtünme stabilitesi değerleri.....	52
Şekil 4.6 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin özgül aşınma oranı değerleri.....	52
Şekil 4.7 Deneysel ve tahmin edilen ortalama SK noktasal grafiği	54
Şekil 4.8 Deneysel ve tahmin edilen ortalama SK çizgisel grafiği	55
Şekil 4.9 Deneysel ve tahmin edilen özgül aşınma oranı noktasal grafiği.....	56
Şekil 4.10 Deneysel ve tahmin edilen özgül aşınma oranı çizgisel grafiği.....	57
Şekil 4.11 Deneysel ve tahmin edilen sürtünme stabilitesi noktasal grafiği	58
Şekil 4.12 Deneysel ve tahmin edilen sürtünme stabilitesi çizgisel grafiği	59
Şekil 4.13 Deneysel ve tahmin edilen verilerin 3 boyutlu noktasal grafiği	59
Şekil 4.14 Modeller kullanılarak elde edilen sonuçların 3 boyutlu yüzey grafiği	61
Şekil 4.15 SoPS-1, SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları	64
Şekil 4.16 SoPS-1, SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	65
Şekil 4.17 SoPB-8, SoPB-10 ve SoPB-12 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları.....	66

Şekil 4.18 SoPB-8, SoPB-10 ve SoPB-12 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	67
Şekil 4.19 SıPS-5, SıPS-10 ve SıPS-15 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları	68
Şekil 4.20 SıPS-5, SıPS-10 ve SıPS-15 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	69
Şekil 4.21 SıPB-8, SıPB-10 ve SıPB-12 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları	69
Şekil 4.22 SıPB-8, SıPB-10 ve SıPB-12 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	70
Şekil 4.23 SıPS-125, SıPS-150 ve SıPS-175 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları.....	71
Şekil 4.24 SıPS-125, SıPS-150 ve SıPS-175 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	71
Şekil 4.25 KS-4, KS-8 ve KS-12 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları	72
Şekil 4.26 KS-4, KS-8 ve KS-12 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi...	73
Şekil 4.27 KS1-120, KS1-150 ve KS1-180 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları	73
Şekil 4.28 KS1-120, KS1-150 ve KS1-180 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	74
Şekil 4.29 RN, YFC10, YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları.....	77
Şekil 4.30 RN, YFC10, YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi	77
Şekil 4.31 RN, BC10, BC20, BC30 ve BC40 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları.....	79
Şekil 4.32 RN, BC10, BC20, BC30 ve BC40 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	80
Şekil 4.33 RN, AC10, AC20, AC30 ve AC40 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları.....	81
Şekil 4.34 RN, AC10, AC20, AC30 ve AC40 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi.....	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Aşınma mekanizmasının çeşitleri	4
Çizelge 1.2 Binek otomobiller ve hafif kamyonlar için frenlerin, fren balatalarının ve fren performansı standartlarının geliştirilmesine ilişkin önemli olayların zaman çizelgesi	6
Çizelge 3.1 Başlangıç numunesi üretimi için belirlenen malzemeler ve kütleli yüzdeleri	29
Çizelge 3.2 İçerik optimizasyonu için belirlenen malzemeler ve kütleli yüzdeleri	29
Çizelge 3.3 Üretim parametresi optimizasyonu için belirlenen parametreler ve değerleri	30
Çizelge 3.4 Metalik cüruflar kullanılarak üretilecek numuneler ve kütleli yüzdeleri..	31
Çizelge 3.5 Genetik programlama giriş parametreleri	46
Çizelge 4.1 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin deney sonuçları	47
Çizelge 4.2 Sürtünme katsayısı modelinin performans göstergeleri	53
Çizelge 4.3 Özgül aşınma oranı modelinin performans göstergeleri	56
Çizelge 4.4 Sürtünme stabilitesi modelinin performans göstergeleri.....	58
Çizelge 4.5 Model tarafından belirlenen optimum içeriğin kütleli yüzdeleri	60
Çizelge 4.6 Model tarafından belirlenen içeriğin deneysel karşılaştırılması	61
Çizelge 4.7 Malzemelerin modeller tarafından tahmin edilen a) ortalama SK b) özgül aşınma oranı c) sürtünme stabilitesi üzerinde etkisi.....	62
Çizelge 4.8 Üretim parametresi için üretilen numunelerin deney sonuçları	63
Çizelge 4.9 İçeriği ve üretim parametreleri optimize edilmiş numunenin deney sonuçları	75
Çizelge 4.10 Balata üretiminde kullanılan metalik cürufların kimyasal analiz sonuçları (%)	75
Çizelge 4.11 RN ve YFC numunelerinin deney sonuçları	76
Çizelge 4.12 RN ve BC numunelerinin deney sonuçları	78
Çizelge 4.13 RN ve AC numunelerinin deney sonuçları	80
Çizelge 4.14 Numunelerin su ve tuzlu sudaki kütle ve boyut değişim değerleri	95
Çizelge 4.15 Numunelerin yağ ve hidrolik yağındaki kütle ve boyut değişim değerleri	97

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Yük hücresi	34
Resim 3.2 Alternatif akım motor sürücüsü	35
Resim 3.3 Temassız sıcaklık ölçer	35
Resim 3.4 Basınç sensörü	35
Resim 3.5 Hassas terazi.....	36
Resim 3.6 V-Shape karıştırma cihazı.....	36
Resim 3.7 (a) Soğuk presleme kalıbı, (b) Sıcak presleme kalıbı	37
Resim 3.8 Etüv fırını	37
Resim 3.9 Taramalı elektron mikroskobu.....	41
Resim 3.10 3 Boyutlu profilometre.....	42
Resim 4.1 Referans numuneye ait SEM ve EDX analiz sonuçları	84
Resim 4.2 YFC10 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	85
Resim 4.3 YFC20 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	85
Resim 4.4 YFC30 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	86
Resim 4.5 YFC40 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	86
Resim 4.6 BC10 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	87
Resim 4.7 BC20 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	88
Resim 4.8 BC30 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	88
Resim 4.9 BC40 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	89
Resim 4.10 AC10 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	90
Resim 4.11 AC20 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	90
Resim 4.12 AC30 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	91
Resim 4.13 AC40 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları	91
Resim 4.14 YFC numunelerinin 3 boyutlu profilometre görüntüleri	93
Resim 4.15 BC numunelerinin 3 boyutlu profilometre görüntüleri.....	93
Resim 4.16 AC numunelerinin 3 boyutlu profilometre görüntüleri.....	94

1. GİRİŞ

Otomotiv fren sistemleri hareket halindeki bir aracın hareketini yavaşlatmak veya tamamen durdurmak için tasarlanmış taşıtlardaki önemli güvenlik sistemlerden biridir. Fren sisteminin temel amacı, kinetik enerjiyi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürerek aracı kontrollü bir şekilde durdurmaktır. Fren sisteminin en önemli parçalarından biri fren balatalarıdır. Fren balataları, fren diski veya kampanasına temas ederek aracı yavaşlatmak veya durdurmak için gerekli sürtünmeyi oluşturmada doğrudan rol oynarlar (Chandradass vd. 2021).

Fren balatalarıyla ilgili yapılan çalışmalar uzun yıllardan beri devam etmekte ve gelişen malzeme teknolojisiyle birlikte fren balataları yeniliğini kaybetmeyen çalışma alanlarından biri olmuştur. Artan taşıt sayısı, geliştirilen yüksek hızlı trenler fren balatalarının uzun bir süre fren sisteminin vazgeçilmez parçalarından biri olacağını göstermektedir. Belirli periyodik bakımlarda kullanım sonucu fren balatalarının değiştirilmesi gerektiğinden fren balatalarına olan ihtiyaç sürekli olacaktır. Bu ihtiyacın karşılanması için üretim kapasitesinin artırılması ve ileri malzeme teknolojileri kullanılarak daha uzun ömürlü fren balatalarının geliştirilmesi gerekmektedir (Mutlu 2002, Toros 2011).

Geliştirilen yeni fren balatalarının bazı temel özellikleri sağlaması gerekmektedir. Bu özellikler; yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklıklarda bile stabil sürtünme katsayısı, hafiflik, düşük gürültü, her türlü çalışma ortamına uygunluk ve yüksek ısı dayanımıdır. Bunların tümünü sağlayabilmesi için fren balatalarının içerisine çeşitli bileşenler katılır. Bu bileşenler; bağlayıcılar, dolgu maddeleri, sürtünme düzenleyiciler, yağlayıcılar ve takviye edici elyaflardır (Akbulut ve Mutlu, 2023).

Sanayi alanında meydana gelen hızlı gelişmeler, kentleşme, insanların yaşam standartlarının yükselmesi çevre kirliliğini de beraberinde getirmektedir. Gelişen dünyada sanayi alanında gelişmeler bir zorunluluktur fakat bu gelişmelerden kaynaklı oluşan çevre kirliliğinin de azaltılması gerekmektedir. Bunun yanı sıra endüstriyel üretim için hammadde talebinin artmasıyla yenilenemeyen kaynaklar her geçen gün

azalmaktadır. Bu nedenle, istenmeyen atıkların çeşitli faydalı kullanımlar için kullanılabilir hammaddeye dönüştürülerek kontrol altına alınması konusunda çalışmalar gün geçtikçe önem kazanmaktadır (İnt. Kay. 1). Son zamanlarda, Avrupa Birliği, malzemeleri olabildiğince uzun süre döngüde tutarak ve 3R (reduce, reuse and recycle) yaklaşımını izleyerek, doğrusal ekonomiden döngüsel ekonomiye yoğun bir şekilde geçmektedir. 3R yaklaşımı kısaca; azaltmak, yeniden kullanmak ve geri döndürmektir. 11 Mart 2020'de Avrupa Komisyonu, “atıkları tamamen önlemek veya bu atıkları hammadde olarak kullanarak yüksek kaliteli ikincil kaynaklara dönüştürmek” olan yeni bir Döngüsel Ekonomi Eylem Planı kabul etmiştir. Bu yüzden tarımsal, endüstriyel veya tüketim sonrası atık malzemelerin kullanımıyla, bu tür malzemelerin geri dönüştürülmesine yönelik çalışmalar son yıllarda büyük önem kazanmıştır (Contreras vd. 2020, Sydow vd. 2021).

Bu amaçla günümüzde endüstriyel faaliyetler sonucunda ortaya çıkan atık malzemeler belirlenmiştir. Belirlenen atık malzemelerin fren balatalarında dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanmıştır. Bu atık malzemeler; yüksek fırın cürufu, alüminyum cürufu ve bakır cürufudur. Bu atık malzemeler belirlenirken geniş kapsamlı literatür taraması yapılmış, firmalarla görüşmeler gerçekleştirilmiş ve bu malzemelerin fren balatalarında kullanılabilirliği detaylı olarak araştırılmıştır.

Yapılan tez çalışması 4 adımda yürütülmüştür. İlk adımda içerik optimizasyonu yapılmıştır. Fren balatası üretiminde kullanılan malzemelerden bir kompozisyon oluşturulmuştur. Bu malzemelerin oranları değiştirilerek fren balatalarının sürtünme performansları izlenmiştir. İkinci adımda yapılan deneylerin sonucu, genetik programlama yöntemi kullanılarak ortalama sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı ve sürtünme stabilitesi değerleri modellenmiş ve performans göstergeleri incelenmiştir. Üçüncü adımda içeriği optimize edilen fren balatalarının üretim parametreleri (soğuk presleme süresi ve basıncı; sıcak presleme süresi, sıcaklığı ve basıncı; kütleme süresi ve sıcaklığı) optimize edilmiştir. Son adımda ise belirlenen atık malzemelerin fren balatalarında dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

1.1. Triboloji

Triboloji, etkileşimli yüzeylerdeki sürtünme, aşınma ve yağlamanın incelenmesini kapsayan multidisipliner bir alandır. Bu bilim ve mühendislik dalı, çeşitli mekanik sistemlerde yüzey etkileşimlerini yöneten mekanizmaların anlaşılmasında ve kontrol edilmesinde çok önemli bir rol oynar. "Triboloji" terimi, Yunanca "tribos" (sürtünme anlamına gelir) ve "logos" (çalışma anlamına gelir) kelimelerinden türetilmiştir ve yüzeylerin sürtünme bilimine odaklandığını vurgulamaktadır. Tribolojinin önemi, otomotiv, havacılık, imalat ve biyomedikal alanlar da dâhil olmak üzere çeşitli endüstrilerdeki geniş uygulamasıyla vurgulanmaktadır (Stachowiak ve Batchelor 2005, Affatato ve Grillini 2013) .

Tribolojinin temel ilkesi, temas halindeki iki yüzey arasındaki göreceli hareketi engelleyen direnç olgusu olan sürtünme kuvvetlerinin incelenmesinde yatmaktadır. Bu husus, enerji verimliliği ve mekanik bileşenlerdeki aşınmanın azaltılması üzerindeki doğrudan etkileri nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Sürtünme davranışının derinlemesine anlaşılması, mühendislerin ve araştırmacıların mekanik sistemleri optimize etmelerini, aynı zamanda aşınmanın neden olduğu malzeme kaybını en aza indirmelerini sağlar (Stachowiak ve Batchelor 2005).

1.1.1 Sürtünme

Sürtünme, birbirine karşı kayan veya yuvarlanan katı yüzeyler arasındaki harekete karşı oluşan direnç kuvveti olarak tanımlanan triboloji biliminin bir bileşenidir. Temas eden yüzeyler birbirine göre hareket ettiğinde, iki yüzey arasındaki sürtünme kinetik enerjiyi termal enerjiye veya ısı enerjisine dönüştürür. Sürtünmeyi karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan bir parametre sürtünme katsayısıdır. İki yüzey arasındaki sürtünme kuvvetinin yüzeye uygulanan kuvvete oranını açıklayan boyutsuz bir skaler değerdir (μ). Makine elemanlarının hareketli temas yüzeylerinin enerji kaybı ve aşınmasının kaynağıdır. İki temel sürtünme türü vardır. Bunlar; birbiriyle temas halindeki iki kuru yüzey arasında var olan kuru sürtünme ve hareket halindeki iki yüzey arasında sıvının mevcut olduğu sıvı sürtünmesidir (Yan 2010, Rebai 2014).

1.1.2 Aşınma

Aşınma, bir yüzeyin başka bir maddeye göre göreceli hareketinin neden olduğu ilerleyici hasardır. Önemli noktalardan biri aşınmanın hasar olduğu ve yüzeydeki malzeme kaybıyla sınırlı olmadığıdır. Bazen bu, geometride veya boyuttaki değişiklik veya bir yüzeydeki çatlaklar oluşabilir. Ana aşınma türleri Çizelge 1.1'de gösterilmiştir. Aşınma mekanizmaları, aşınmış yüzeyin görünümüne ve uygulamanın doğasına göre belirlenebilir. Belirli bir uygulamada birden fazla aşınma mekanizması olabilir (Yan 2010).

Çizelge 1.1 Aşınma mekanizmasının çeşitleri

Aşınma Mekanizmasının Çeşitleri	Sebebi ve Aşınma davranışı
Abrasiv Aşınma	Abrasiv aşınma, hareketli yüzeyler arasında sıkışan sert parçacıklardan kaynaklanır. Sonucunda yüzeyde oyuklar, çizikler ve girintiler oluşur.
Adhesiv Aşınma	İki yüzey temas ettiğinde belirli bölgelerde birbirlerine yapışırlar. Göreceli olarak hareket ettikçe, bir yüzeyin bu bölgelerdeki diğer yüzeylerden malzemeyi çekmesiyle aşınma meydana gelir. Aktarılan malzemeler yüzeylerde görülebilir.
Titreşimli Aşınma	İki yüzey arasında küçük salınım hareketleri olduğunda meydana gelir.
Erozyon	Erozyon, bir sıvının veya sert parçacık akışının etkisiyle malzemenin yüzeyden uzaklaştırılmasını içerir.
Kavitasyon	Kavitasyon bir tür erozyon olarak görülebilir. Ancak buhar kabarcıklarının yüzeye çökmesinin yoğun etkisinden kaynaklanır.
Korozif aşınma	Tribolojik temaslar aşındırıcı bir ortamda olduğunda, hem kimyasal/elektrokimyasal hem de triboloji kontrol faktörleridir. Oksit tabakalarının/tribofilmin büyümesi ve ortadan kalkması aşınma oranını kontrol eder.
Termal aşınma	Yerel oluşan sıcaklığın veya yeniden oluşturulan yüzey sıcaklığının etkisiyle malzemedan meydana gelen kopmalar sonucu oluşur.
Yorulma	Yorulma, malzeme kaybına ve ardından yüzeydeki çatlakların bir araya gelmesiyle arızaya neden olabilir. Yüksek yerel temas gerilimi nedeniyle çatlaklar meydana gelebilir.

Abrasif aşınması, yorulma aşınması ve sürtünme aşınmasının (erozyon ve kauçuk benzeri malzemeler gibi yüksek elastikiyete sahip malzemelere özgü bir tür aşınma) tümü, büyük ölçüde sert matris yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlı olan, göreceli hareket halindeki sert matris yüzeylerinde üretilir. Ancak abrasif aşınması ve yorulma aşınması

genellikle pürüzlü yüzeylerde ortaya çıkarken, sürtünme aşınması sıklıkla sürtünme katsayısı yüksek olan pürüzsüz yüzeylerde meydana gelir. Aşınmanın büyüklüğü açısından bakıldığında, Abrasif aşınma ve sürtünme aşınması en etkili olanlarıdır (Zhang 2004).

1.2 Fren Balataları

Fren balataları; fren diski veya kampanasına monte edilmiş fren sisteminin en önemli parçalarından biridir. Kampanalı fren tipinde fren pabuçları bir kampananın içine yerleştirilmiştir, böylece fren uygulandığında fren pabucu dışarı doğru zorlanır ve kampanaya doğru bastırılır. Diskli fren sisteminde ise fren balataları dönen diske karşı sürtünme oluşturur. Frenleme esnasında aracın kinetik enerjisini sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürür (Zhang 2004, Abhik vd. 2014, Akıncıoğlu 2022).

Herbert Froot, 1897'de ilk fren balata malzemelerini icat etmiştir. Pamuk esaslı bir malzemeyi bitum çözeltisi içerisinde çeşitli kimyasal malzemeler kullanarak emdirme işlemi yapmıştır. Bu fren balatası ilk üretilen otomobillerin yanı sıra vagonlar içinde kullanılmıştır. Dokuma yöntemiyle üretilen ilk fren balataları, 1920'lerden sonra bol miktarda mineral olan krizotil asbest lifleri içeren kalıplanmış malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Reçine esaslı metalik içerikler eklenerek üretilen fren balataları 1950'li yıllarda piyasaya sürülmüştür. 1960'lı yıllardan sonra daha yüksek miktarda metal katkı maddesi içeren yarı metalik olarak adlandırılan fren balataları geliştirilmiştir (Zhang 2004). Çizelge 1.2'de Binek otomobiller ve hafif kamyonlar için frenlerin, fren balatalarının ve fren performansı standartlarının geliştirilmesine ilişkin önemli olayların zaman çizelgesi gösterilmiştir (Paustenbach vd. 2004).

Fren balataları, metaller, seramikler ve polimerler gibi üç ana farklı malzeme türünü içerdiklerinden şimdiye kadar üretilmiş en karmaşık kompozit malzemeler arasında yer almaktadır. Bu çeşitlilik fren balatalarında istenilen bileşimi ve karışımı bulmayı oldukça zorlaştırmaktadır. Genel olarak fren balataları kullanıldıkları süre boyunca yüksek basınç ve sıcaklık koşullarına dayanıklı olmalıdırlar. Bunun yanı sıra aracı güvenli bir şekilde durdurmalıdır. Fren balatalarında istenilen özellikler; yüksek aşınma

direnci, frenleme sırasında oluşan kesme ve sıkıştırmaya karşı direnç, termal kararlılık ve oksidasyon, frenleme esnasında düşük titreşim ve gürültü, su ve yağ gibi çevresel koşullardan etkilenmemesidir (Zhang 2004, Lawal vd. 2016).

Çizelge 1.2 Binek otomobiller ve hafif kamyonlar için frenlerin, fren balatalarının ve fren performansı standartlarının geliştirilmesine ilişkin önemli olayların zaman çizelgesi

Dokuma Pamuktan Üretilen Asbest Fren Balataları	
1901	Herbert Frood, pamuk esaslı tekstil malzeme fren balatası geliştirmiş ve patentini almıştır.
1902	Disk fren sistemi patentlenmiştir.
1903	Dâhili genişleyen fren mekanizmasının tanıtılmıştır.
1906	Raybestos dokuma asbest ve pirinç tel fren balatası geliştirilmiştir.
1908	Herbert Frood bileşimli fren balataları geliştirmiştir.
1920'ler	Kampanalı frenlere sahip kalıplanmış fren balataları popüler hale gelmiştir.
1922	ABD Standartlar Bürosu, ağır hizmet koşulları ve fren balatalarının uzun süre aşınması/dayanıklılığı için test standardı geliştirmişlerdir.
Sürtünme Malzemesi ve Balata Endüstrisinde Yenilik	
1930'lar	Kampanalı fren sistemleri yaygın kullanılmıştır.
1946	İlk asbest zorunluluk limiti belirlenmiştir (5 mppcf).
1948	Fren pabucuna yapışan frenlerin tanıtılması
1950'ler	Sinterlenmiş metal fren balatalarının tanıtılması
1950'lerin ortası	Doğrudan otomobil fabrikasından temin edilebilen konik, yapıştırılmış, perçinlenmiş balataların tanıtılması
1960'lar	Yarı metalik fren balatası formülasyonlarının tanıtılması
1965	ABD binek araçlarında disk frenin tanıtılması
1966	Ulusal Karayolu Güvenliği Bürosu'nu kuran Ulusal Motorlu Taşıt Güvenliği Yasası kabul edilmiştir.
1968	Disk frenler, otomobillerin ön frenleri için zorunlu hale gelmiştir.
Fren Balatalarında Asbest Yerine Kullanılan Malzemelere Geçiş	
1970'ler	Asbestsiz organik fren balataları için araştırma başlatılmıştır.
1975	Durma mesafesini tanımlayan ilk federal standart (FMVSS 105) geliştirilmiştir.
1986	ABD EPA sürtünme malzemeleri de dâhil olmak üzere asbest içeren ürünlerin üretiminin yasaklanmasını önermiştir.
1989	ABD EPA, Asbest içeren ürünleri yasaklama ve aşama azaltma kuralını kabul etmiştir.
1991	ABD Temyiz Mahkemesi, ABD EPA yasağını iptal etti, ancak şirketler asbest içeren fren balatalarını aşamalı olarak kaldırmaya devam etmiştir.
1993	Orijinal ABD EPA yasağına göre, binek otomobil ve hafif kamyonların orijinal ekipman üreticileri için aşamalı olarak kullanımdan kaldırma başlamıştır.
2000	Neredeyse tüm ABD binek otomobilleri ve hafif kamyonları asbestsiz fren balataları kullanılmıştır.

Sık frenlemede, büyük miktarda ısı üretilir, ancak bu ısıyı fren diskine ve çevreye dağıtmak için yeterli zaman oluşmayabilir. Bu ısı fren balatasında birikir ve maksimum sıcaklığa ulaşır. Daha yüksek sıcaklıklarda, sürtünme katsayısı düzensiz bir şekilde değişir ve aşınma katlanarak artar. Sürtünme performansının yüksek sıcaklıklarda kararlı olması kritik öneme sahiptir (Verma 2016).

Ayrıca farklı koşullar ve süreler altında sabit bir sürtünme katsayısı sağlamalıdır. Yukarıda bahsedilen özelliklerle birlikte fren balatalarında ele alınan ve açıklanan diğer çok önemli iki özellik “solma (fade)” ve “geri kazanım (recovery)”dır. Solma, sürtünme katsayısındaki (μ) azalma nedeniyle yüksek sıcaklıklarda (tipik olarak 300 °C – 400 °C aralığında) frenleme etkinliğinin kaybını belirtmek için kullanılan terimdir. Solma, frenleme sırasında disk ve balata arasındaki sürtünmeyi azaltan ısı artışına bağlı olarak frenleme etkinliğinde oluşan geçici bir kayıptır. Bazı durumlarda, fren balata malzemesinin temas yüzeyindeki anlık sıcaklığı 800 °C'ye kadar çıkmaktadır. Geri kazanım ise yüksek sıcaklık kırıldıktan sonra sürtünme kapasitesini (katsayısı) geri kazanma yeteneğidir (Verma 2016, Kosbe vd. 2022). Sürtünme katsayısındaki önemli düşüş, özellikle yüksek sıcaklıklarda sürtünme bileşenlerinin termal ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle solma, herhangi bir sürtünme malzemesinin en önemli özelliklerinden biridir, bu nedenle bu malzemelerin performansı genellikle solma performanslarına göre derecelendirilir. Malzemelerin performans özelliklerini iyileştirmek için solma önlenmelidir, bu nedenle ticari fren sürtünme malzemeleri için yüksek sıcaklıklarda solmaya karşı direnç kritik bir gerekliliktir. Fren balatalarında aşırı solma istenmez. Aşırı solma, özellikle tekrarlayan frenleme ve uzun süre yokuş aşağı sürüş gibi durumlarda sürücüyü tehlikeye atabilir (Kosbe vd. 2022).

Solma, büyük ölçüde malzemenin tribolojik özelliklerine bağlıdır. Asbest olmayan organik (NAO) sürtünme malzemelerinde, bağlayıcı malzeme olarak fenolik reçine ve kauçuk kullanılır. Yüksek sıcaklıkta, fenolik reçine, termo oksidatif oluşturan organik bileşiklerin yapısını bozar. Fenolik reçine, aramid hamuru ve kaju gibi organik bileşenler, 350 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda ayrıştıkları için büyük miktarda solma göstermiştir. Bu nedenle fenolik reçine, fren basıncı, hız ve sıcaklık gibi çeşitli çalışma koşulları altında termo oksidatif bozunmaya daha az eğilimli olmalıdır. Bu

amaçla reçineler alkil benzen, kaju fıstığı kabuğu sıvısı ve keten tohumu yağı ile modifiye edilir. Alkil benzen modifiye reçine kompozitin sürtünme performansında iyi, aşınma performansında ise kötü olduğu gözlenmiştir. Sürtünmeli kompozitlerde bağlayıcı olarak kauçuk kullanıldığında; kauçuktan cama geçiş, solma davranışını önemli ölçüde etkiler. Modifiye edilmiş fenolik reçineler ve kauçuk, yüksek sıcaklıklarda sürtünme stabilitesini geliştirir (Kosbe vd. 2022).

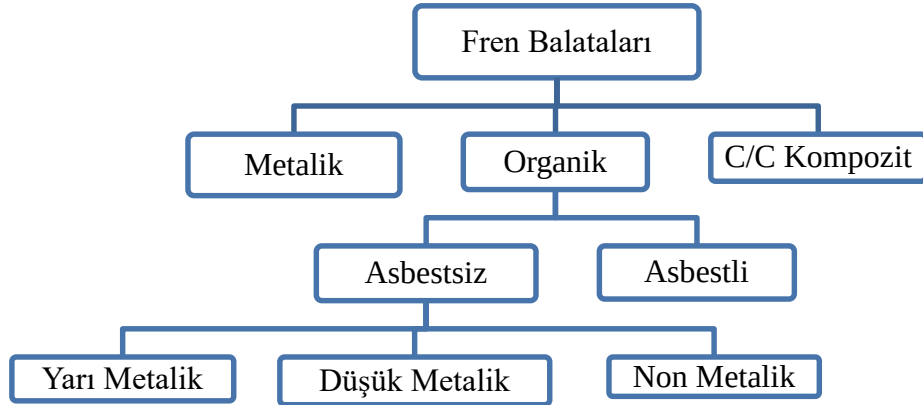
Katı yağlayıcıların yüksek sıcaklıkta termal ayrışması, fren sisteminin sürtünme performansını etkiler. Grafit ve antimon trisülfid, sürtünme malzemelerinde yaygın olarak kullanılan katı yağlayıcılardır, ancak bu iki katı yağlayıcının daha yüksek bir miktarı, solma olayını yoğunlaştırır. Bunun nedeni, grafitin gazlara oksitlenmesi ve Sb_2S_3 'ün yüksek sıcaklıklarda oksitlere ayrışarak yağlama özelliklerini kaybetmesidir. Seramik ve aramid elyafın uygun oranı geri kazanım performansını artırır (Kosbe vd. 2022).

Sürtünme değiştiricilerin solmaya etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu sürtünme değiştiriciler, toz veya elyaf formunda olabilir. Sürtünme performansını, aşınma direncini ve termal özellikleri iyileştirmek için sürtünme malzemelerinde bakır, çelik, alüminyum gibi metalik bileşenler de kullanılır. Bakır ve alaşımları, sürtünme kompozitlerinde yaygın olarak kullanılan sürtünme düzenleyicilerdir. Organik sürtünme malzemesinde pirinç ve bakırın kullanılması solmaya karşı direnci artırırken, çelik lifli sürtünme malzemesi yüksek sıcaklıkta değişken sürtünme davranışı gösterir. Alüminyum, çinko tozu ve aramid elyaf içeren sürtünme malzemelerinin geri kazanım özelliklerini arttırdığı gözlenmiştir. Potasyum titanat lifleri, daha yüksek sıcaklıklarda termal kararlılığı koruyarak sürtünme süreçleri sırasında kritik bir rol oynar, ancak bunlar çevre için tehlikelidir (Kosbe vd. 2022).

1.2.1 Balata Çeşitleri

Otomotiv fren balataları kullanılan malzeme çeşitliliğine göre seramik, asbestsiz organik, yarı metal, düşük metal, hibrit vb. çeşitlere ayrılmaktadır. Şekil 1.1'de fren balatası çeşitleri gösterilmiştir (Bijwe 2015). Asbest malzemesi fiber malzeme olarak balatalarda uygun bir malzeme olarak geçmişte çok fazla kullanılmaktaydı. Bununla

birlikte, tıbbi araştırmalar asbest liflerinin akciğerlere yerleşebileceğini ve olumsuz solunum koşullarına neden olabileceğini kanıtlamıştır. Bunun bir sonucu olarak, ABD Çevre Koruma Dairesi 1986, asbest için önerilen bir yasağı açıklamıştır. Asbest malzemesinin fren balatalarında kademeli olarak azaltılması yerine kullanılacak malzemelerin gelişmesine yol açmıştır. Üreticiler asbest malzemenin yerini doldurabilecek elyaf bir malzeme arayışına girmişlerdir. Asbest malzemesinin fren balatalarında yaygınlaşmasını sağlayan özellikleri, lifli yapısı, dūřuk yoğunluğu, ısı yalıtımı, hafif aşınması ve kararlı sūrtūnme katsayısıdır. Organik lifler genel olarak yalıtkan ve mekanik dayanımları iyi olmalarına rağmen ayrışma ve stabil bir sūrtūnme katsayısı sergilememe gibi problemler oluşturmaktadır. Ayrıca bu liflerin ayrışması malzeme yapısını zayıflatarak aşınma artışına neden olmaktadır. Bakır (toz ve elyaf olarak) ve elik lifler, sūrtūnme malzemeleri için iki önemli bileşen haline gelmiştir. elik lif gibi metalik lifler, mekanik mukavemete katkıda bulunmakla birlikte, sūrtūnme katsayısını artırır, yūksək yoğunluğa sahiptir ve iyi ısı iletkenleridir. Kaliforniya'da satılan fren balatalarında kullanılan bakır miktarına 2021 yılına kadar ağrılıka %5'lik bir sınır konulmuş ve bu oranın 2032 yılına kadar %0,5'e dūřūrūlmesi hedeflenmiştir. Fren balata malzemelerinde gelişen mevcut eğilim ağır metallerin içeriğini azaltmak olarak belirlenmiştir (Amaren vd. 2013, Dante 2016)



şekil 1.1 Fren balatası eşitleri

1.2.1.1 Metal Esaslı Sūrtūnme Malzemeleri

Metal katkılı sūrtūnme malzemeleri, kolay řekillendirme sūreci, iyi ařınma direnci ve mekanik özellikleri nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir. Genel olarak metal

katkılı sürtünme malzemeleri Cu, Fe ve Cu-Fe esaslı sürtünme malzemelerine ayrılır. Cu esaslı sürtünme malzemeleri mükemmel termal iletkenliğe, aşınma direncine ve yüksek yoğunluğa sahiptir. Bununla birlikte, sıcaklık yükseldiğinde bakır matris yumuşar ve bu da kullanım ömrünü kısaltır. Buna karşılık, Fe esaslı sürtünme malzemeleri yüksek mukavemete ve ısı direncine sahiptir, ancak frenleme işlemi sırasında yüksek sıcaklık ve normal stres altında karşı tarafa yapışması kolay olabilmektedir. Bakır matrise uygun miktarda demir ekleyerek, oluşan Cu-Fe-esaslı kompozitler kullanıldığında oluşan dezavantajlar giderebilir ve kararlı sürtünme katsayıları ve daha iyi aşınma direnci, mukavemet ve ısı direnci oluşur (Zheng vd. 2019).

Bir organik matris ile metal sinterlenmiş bir matris arasındaki temel fark, bağlayıcının ayrışmasıdır. Fenol formaldehit reçineleri 350 ila 400 °C'de ayrışmaya başlarken, Cu matrisi 1085 °C'de ve Fe matrisi 1538 °C'de erir. Metal sinterlenmiş malzemelerin ısı kararlılığı, organik bağlayıcılarındakinden oldukça yüksektir. Metal sinterlenmiş sürtünme malzemelerinin üretim süreci genellikle; bileşenlerin karıştırılması, yüksek basınçta kalıplama (100–200 MPa), nitrojen akışında sinterleme (Cu matrisi için 600–700 °C; Fe matrisi için 1000–1200 °C) olarak uygulanır. Metal sinterlenmiş sürtünme malzemeleri, araç ağırlığını azaltmak için mevcut eğilimin aksine yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Fazla metal içeriği, frenleme esnasında oluşan gürültüden dolayı binek araçlarda pek tercih edilmemektedir (Dante 2016).

1.2.1.2 Organik Esaslı Sürtünme Malzemeleri

Organik sürtünme malzemeleri, reçine ile birbirine bağlanmış farklı organik malzemelerden oluşur. Günümüz binek araçlarında en çok kullanılan sürtünme malzemeleridir. Organik polimerik sürtünme bileşenlerini üretmek için kullanılan malzemeler, frenleme sürecinde oynadıkları role bağlı olarak takviye malzemeleri, bağlayıcılar, dolgu maddeleri ve sürtünme düzenleyiciler olarak sınıflandırılır (Ekpruke vd. 2022).

Asbest Esaslı Sürtünme Malzemeleri: Asbest malzemesi ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) doğal olarak maddeleşmiş altı silikat mineralinden oluşur. Bu minerallerin tümü asbeste benzer

özellikler sergilemekte ve ince masküler kristallere sahiptirler. Fren balatalarında ağırlıkça %30-70 arasında kullanılmıştır. Asbest esaslı organik sürtünme malzemeleri; 500 °C'ye kadar termal olarak kararlı olmaları, yüzeyin temizlenmesine yardımcı olmaları, kolay işlenebilmeleri ve makul fiyata bulunabilir olduğundan dolayı 1970'lerin ortalarından önce yaygın olarak kullanılmıştır. Asbest esaslı sürtünme malzemeleri, asbestin kanserojen olarak ilan edilmesinin ardından 1989 yılında yasaklanmıştır. Şu anda ABD, AB ve gelişmiş ülkelerin çoğunda asbestin otomotiv bileşenlerinde kullanılmasına izin verilmemektedir (Blau 2001, Wang ve Chung 2013, Shinde ve Mistry 2017).

Asbestsiz Sürtünme Malzemeleri: Asbestsiz sürtünme malzemeleri 1960'ların sonlarında tanıtılmış ve 1970'lerin ortalarında geniş kullanım kazanmıştır. Asbest ithalindeki zorluklar nedeniyle 2. Dünya Savaşı sırasında Avrupa'da geliştirilmiş ve 1950'lerin başında İngiltere'de Girling tarafından yapılan bir fren balatasında kullanılmıştır. Asbestsiz sürtünme malzemeleri öncelikle disk fren sistemlerinde, daha yüksek sıcaklıklarda iyileştirilmiş sürtünme özellikleri gerektiren daha küçük frenlere sahip küçük boyutlu ve orta boyutlu otomobillerde ve ağır hizmet operasyonlarında kullanılır. Stabil bir sürtünme katsayısı, 0,35-0,45 (düşük sıcaklıkta), 0,3-0,35 (yüksek sıcaklıkta), düşük aşınma, rotorla uyumlu çalışma, daha yüksek ısı kapasitesi ve sessiz çalışma sergilerler (Bijwe vd. 2012).

Yarı Metalik: Yarı metalik formüller, genellikle ağırlık olarak %50'yi aşan yüksek bir metal içeriği ile karakterize edilir. Metaller, bol miktarda çelik lifler, bakır, bakır alaşımları (bronz ve pirinç) ve bazı durumlarda kalay ve çinkodur. Diğer bileşenler, güçlü aşındırıcılar ve yağlayıcıların bir karışımıdır. Bu formüllerde kullanılan aşındırıcılar kalsine alümina, kromit, hafif aşındırıcılardan magnezyum oksit ve kaolin ailesinden kildir. Kullanılan yağlayıcılar, kükürtlerle desteklenen doğal grafit ve sentetik grafittir. 1990'larda, Molibden disülfid (MoS_2) ve Antimon trisülfür (Sb_2S_3) çok yaygın olarak kullanılmıştır (Dante 2016).

Düşük Metalik: Düşük metal formülleri, metalik durumdaki tüm bileşenlerin düşük içeriği ile karakterize edilir. Tutma-kayma ve gürültü metallerin varlığına bağlı

olduğundan, bu formüllerin temel amacı konforu arttırmaktır. Ortalama sürtünme katsayıları genellikle metalik formüllerden daha düşüktür. Nitekim sürtünme katsayıları 0,35-0,38 civarındayken, yarı metalik formüller 0,4 civarındadır (Dante 2016).

1.2.1.3 C/C Kompozitler

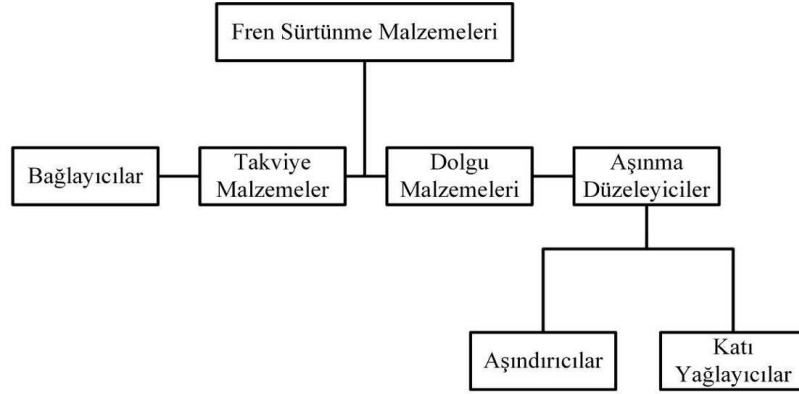
C/C malzemeleri frenlerde ağır hizmet uygulamaları için kullanılmaktadır. Bu seçim, 1500 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda karbon malzemelerin yüksek mukavemetine dayanmaktadır. Metalik veya seramik bir matrise dayanan çoğu malzemenin aksine, mekanik dayanımları sıcaklıkla artar. Ayrıca, demir esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında, bir uçakta birkaç yüz kilogramağırlık tasarrufu sağlarlar. Termal şoka ve mekanik yorgunluğa karşı neredeyse duyarsızdırlar. C/C malzemeleri, fren disklerinin ömrünü ve değiştirme aralıklarını uzatarak dayanıklılık sağlarlar. C/C malzemeleri yavaş bir üretim süreciyle üretilir ve bu nedenle oldukça pahalıdır (Dante 2016).

1.2.2 Balatalarda Kullanılan Malzemeler

Fren balatası için kullanılacak malzemelerin kapsamlı tribolojik ve mekanik gereksinimleri karşılayacak şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Bunlar yirmiden fazla farklı bileşenin karışımıdır. Bir otomotiv fren sistemindeki sürtünme malzemesi, motorlu taşıt frenlerinin genel fonksiyonel özelliklerine etki eden temel bileşenlerden biri olarak düşünülebilir. Bunun nedeni fren performansının durma mesafesi, pedal hissi, aşınma ve fren kaynaklı titreşim gibi çeşitli yönlerinde önemli bir rol oynamasıdır (Aleksendrić ve Carlone 2015).

Sürtünme malzemesinin sürtünme ve aşınma özellikleri, geliştirilen yeni formülasyonların hangilerinin fren sistemine uygun olduğuna karar verilmesinde önemli rol oynamaktadır. Otomotiv fren balatalarının sürtünme ve aşınma davranışlarının, balatanın mikrokimyasal yapısı ve metalik karşı yüzey, dönme hızı, basınç ve temas yüzeyi sıcaklığı gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak tahmin edilmesi çok karmaşıktır. Fren balatalarının bileşimi ve formülasyonu da sürtünme davranışı üzerinde büyük rol

oynamaktadır (Che Mohd Ruzaidi 2014). Şekil 1.2’de fren balatalarında kullanılan malzemelerin sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Fren balatalarında kullanılan malzemelerin sınıflandırılması

Bağlayıcı malzeme; toz formundaki bir fren balatası formülasyonundaki matris malzemelerinden biridir ve bu da genellikle bir Fenol-Formaldehittir. Bu bağlayıcı, sıcaklık ve basınç varlığında kopolimerizasyon reaksiyonu prensibiyle çoklu bileşenleri bir arada tutar. Bağlayıcı malzemenin formülasyona eklenme oranı çok önemlidir. Aşırı ekleme, fren balatasının yüksek oranda solmasına ve aşınmasına yol açacağından, bir formülasyona daha fazla bağlayıcı eklenemez. Bağlayıcının zayıf konsantrasyonu, fiber malzemenin matristen ayrılmasına yol açacak, bu da aşınma oranını artıracak ve aynı zamanda matris malzemelerini de etkileyecektir. Fenolik reçineler, daha yüksek sıcaklık seviyelerinde kararlı performans elde etmek için fiziksel veya kimyasal yöntemlerle değiştirilmiş versiyonlara dönüştürülebilir. Fren sürtünme malzemesinde çeşitli modifiye fenolik reçineler kullanılmıştır. Bunlar; yoğunlaştırılmış Polinükleer Aromatik reçine, Silikon Modifiye, Siyanat ester reçine, Epoksi modifiye reçine, Kaju Fındığı Kabuğu Sıvısı modifiye reçine, Kauçuk modifiye reçine, Akrilik modifiye reçine, Fosfor değiştirilmiş reçine ve Ketten tohumu yağı ile değiştirilmiş reçinedir (Chan ve Stachowiak 2004, Kumar ve Kumaran 2019).

Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü, lif boyutunu 5 µm ve en boy oranını en az 1/3 olarak tanımlamıştır. Fiber malzemeler, fren balatalarında takviye edici malzemeler olarak görev yapar. Ayrıca uygun oranlarda kullanıldığında yapısal bütünlük ve sürtünme stabilitesi sağlar. Fiber malzemeler doğal organik veya kimyasallar tarafından

sentetik olarak geliştirilmiş inorganik olabilir. Fiber ve matris malzemeleri arasında yeterli bir ara yüzey bağlantısının olmaması durumunda sürtünme malzemesinde çok fazla aşınma olacağından, fiber seçimi ve optimum oranın aşınma üzerinde çok etkili olduğu düşünülmektedir. Takviye malzemeleri olarak başlıca karbon elyaf, bazalt, taşıyünü, aramid, lapinus, asbest, akrilik, selüloz, kıyılmış çelik yünü, tapulgut vb. fiber malzemeler kullanılmaktadır (Kumar ve Kumaran 2019).

Dolgu malzemeleri, genel olarak fren balatalarının üretim maliyetini azaltmak için kullanılmaktadır. Dolgu maddeleri, fren balatalarında kullanılan diğer bileşenler kadar kritik olmasa da, fren sürtünme malzemesinin belirli özelliklerinin değiştirilmesinde önemli bir rol oynar. Tipik inorganik dolgu maddeleri arasında baryum sülfat, mika, vermikülit ve kalsiyum karbonat bulunur. Bu dolgu maddelerinin ortak özelliği nispeten yüksek bir erime noktasına sahip olmalarıdır. Örneğin, baryum sülfatın erime noktası 1350 °C, vermikülitin ise yaklaşık 800 °C'dir. Mika yaygın olarak kullanılan başka bir dolgu maddesidir. Düzlem ağ benzeri bir yapıya sahip olması nedeniyle düşük frekanslı fren gürültüsünü bastırabilmektedir. Ancak katmanlı yapısından dolayı katmanlar arası dayanımı düşüktür. Bu nedenle mika, özellikle yüksek frenleme yüklerinde sürtünme balatasının katmanlar arası bölünmesine neden olur. Mikanın katmanlar arası bölünmesini önlemek için mika tozu üzerine kaplama olarak alüminyum fosfat kullanılabilir. Kaju tozu ve toz halindeki kauçuk, organik dolgu maddelerinin yaygın olarak kullanılan örnekleridir. Her ikisi de, üstün viskoelastik özelliklerinden dolayı fren gürültüsünü azaltmak amacıyla fren balatalarına eklenir (Chan ve Stachowiak 2004).

Sürtünme katkı maddeleri, sürtünme katsayılarını ve aşınma oranlarını değiştirmek amacıyla ürün malzemelerinin sürtünmesine yardımcı olur. Katkı maddeleri iki ana kategoriye ayrılır; sürtünme katsayılarını ve aşınma oranlarını azaltan yağlayıcılar ve sürtünme katsayılarını ve aşınma oranlarını artıran aşındırıcılardır (Venkatesh ve Murugapoopathiraja 2019).

Sürtünme malzemelerindeki yağlayıcının amacı, özellikle yüksek sıcaklıklarda frenleme sırasında geliştirilen sürtünme katsayısını stabilize etmektir. Yaygın olarak kullanılan yağlayıcılar arasında grafit ve çeşitli metal sülfürler yer alır. Grafit, karşı sürtünme

malzemesi üzerinde hızla bir yağlayıcı tabaka oluşturabildiği için yaygın olarak kullanılır. Fren sürtünme malzemelerinde kullanılan grafit, doğal veya sentetik grafit olabilir. Grafit pul (flake) veya toz halinde bulunabilir. Pul formundaki grafit gelişmiş yağlama özelliklerine sahiptir, toz formundaki grafit ise frenleme sırasında oluşan ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtabilmektedir. Bununla birlikte, grafit ve fenolik reçine arasındaki bağlanma kuvveti çok zayıftır, bu nedenle grafit, fenolik reçinelerde çok fazla serbestçe kullanılamaz ve bu da düşük kesme mukavemetlerine yol açar (Venkatesh ve Murugapoopathiraja 2019).

Sürtünme malzemesindeki aşındırıcılar sürtünme katsayısını artırırken aynı zamanda karşı yüzey malzemesinin aşınma oranını da artırır. Karşı sürtünme malzemesinden demir oksitleri ve ayrıca frenleme sırasında oluşan diğer istenmeyen yüzey filmlerini temizlerler. Bununla birlikte, daha yüksek aşındırıcı içeriğe sahip sürtünme malzemeleri, sürtünme katsayısında daha büyük bir değişiklik sergiler ve bu da frenleme torkunda dengesizliğe neden olur. Aşındırıcılara örnek olarak metal oksitlerin ve silikatların sert parçacıkları verilebilir. Aşındırıcıların, tipik olarak dökme demir olan karşı sürtünme malzemesini en azından aşındıracak kadar sert olması gerekir. Aşındırıcılar tipik olarak 7-8 civarında Mohs sertlik değerlerine sahiptir ve yaygın olarak kullanılan aşındırıcıların birkaç örneği zirkonyum oksit, zirkonyum silikat, alüminyum oksit ve krom oksiti içerir (Chan ve Stachowiak 2004).

1.3 Cüruf Malzemeleri

1.3.1 Yüksek Fırın Cürufu

Demir cevheri istenmeyen safsızlıkları ortadan kaldırmak ve oksijeni demirden uzaklaştırmak için yüksek fırında eritilir. Yüksek fırın cürufları demir ve cevherlerinin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yan ürünlerdir. Sıcak cüruf, dolana kadar periyodik olarak özel ocağa akar. Suda söndürülen erimiş cüruf çok hızlı soğumaya neden olur. Katılaşmış cüruf, toz olarak bilinen bir öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu halinde öğütülen kum benzeri camsı parçacık granülünden oluşur (Alaud 2019).

Granül cüruf, hidratlanmış yüksek fırın cürufudur. Daha sonra kurutulur ve ince toz

halinde öğütülür. Hammadde demir-çelik endüstrisinin bir yan ürünüdür ve yüksek fırından elde edilir. Demir cevheri, kireçtaşı ve kömür, yaklaşık 1500 °C sıcaklığa ulaşacakları yüksek fırına yüklenir. Ham maddeler erimiş demire ve yüksek fırın cürufuna dönüştürülür. Bu iki ürün doğal yollarla ayrılır; cüruf yüzer ve demir üzerinde dağılırken, demir yüksek fırının dibine batar. Böylece iki ayrı ürün elde edilmiş olur (EN 197-1).

Yüksek fırın cüruflarının bağlayıcılık özelliği eskiden beri bilinmektedir. Yüksek fırın cürufları 1889 tarihinde Paris metrosu inşaatında, 1892 tarihinde Almanya'da çimento üretiminde ve 1896 yılında ABD'de çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. 1950'lerden günümüze kadar gelen süreçte bu cüruflar betona katkı maddesi olarak katılmaktadır (Uysal ve Bahar 2018).

1.3.2 Bakır Cürufu

Pyro metalürjik proses, saf bakır metalini sülfid cevherlerinden çıkarmak için kullanılır. Eritme aşamasında, bakır cürufu olarak adlandırılan bir yan ürün üretilir. Dünya çapında her yıl yaklaşık 40 milyon ton bakır cürufu üretilmektedir ve büyük ölçüde kesici aletler, aşındırıcılar, asfalt kaplamalar, yol yapımında ve kum ve çimento yerine beton üretiminde kullanılmaktadır. Oluşan cüruftan sadece yaklaşık %15-20'si yukarıda bahsedilen uygulamalar için kullanılmaktadır. Kullanılmayan cüruf bertaraf edilir, bu durum ise çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bakır cürufu soğuma hızına bağlı olarak amorf granül cüruf ve kristal hava soğutmalı cüruf iki kategoriye ayrılabilir. Amorf granül cüruf, erimiş cüruf anında suya döküldüğünde oluşur. Ancak, kristal hava soğutmalı cüruf yavaş soğutmadan sonra oluşur ve Amorf granül cürufa göre daha yoğun olduğu bulunmuştur. (Sridharan ve Madhavi 2020).

1.3.3 Alüminyum Cürufu

Alüminyum cürufu birincil ve ikincil alüminyumdan üretiminden ortaya çıkan bir endüstriyel atık malzemedir. Birincil alüminyum ilk üretimi sırasında alüminyumun yüzeyinden sıyırılmasıyla elde edilen bir tozdur. İkincil alüminyum ise alüminyumun geri dönüşümü sırasında ortaya çıkar. Cüruflar metal içeriklerine göre beyaz ve siyah

cüruf olarak sınıflandırılır. Beyaz cüruf daha yüksek metal alüminyum içeriğine sahiptir. Beyaz cüruf %15 ila %70 oranında geri kazanılabilir metalik alüminyum içerebilir ve erimiş alüminyumun yüzeyden sıyrılmasıyla elde edilen ince bir toz içerir. Siyah cüruf daha düşük metal içeriğine sahiptir ve alüminyum geri dönüşümü sırasında (ikincil endüstri sektörü) üretilir. Siyah cüruf tipik olarak, %12 ila %18 arasında değişen geri kazanılabilir alüminyum içeriğine ve beyaz cüruftan çok daha yüksek tuz içeriğine (%40'dan fazla) sahip alüminyum oksit ve cüruf karışımı içerir. Yaklaşık olarak, her yıl dünya çapında 4 milyon tona kadar beyaz cüruf ve bir milyon tondan fazla siyah cüruf ortaya çıkmaktadır. Bu materyalin yaklaşık %95'i çöp sahasına atılmaktadır (Wilson vd. 2007).

Her 1000 kg erimiş alüminyum için ortalama 15-25 kg alüminyum cürufu üretilir. Alüminyum eritme sürecinde oluşan ikincil cürufun yok edilmesi, küresel bir sorundur. Ekolojik sorunlar açısından alüminyum üreticileri için ciddi bir zorluk oluşturmaktadır. Üretilen ikincil cürufun büyük bir kısmı fabrikaların yakınlarında atılmakta, bu durum zehirli metal iyonlarının yüzeye ve yer altı sularına girmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak alüminyum cüruflarının bu şekilde yok edilmeye çalışılması ciddi su kirliliği endişelerine neden olmaktadır. Ek olarak, alüminyum cüruf nem veya su buharı ile temas ettiğinde NH_3 , CH_4 , PH_3 ve H_2S gibi toksik ve yanıcı gazlar oluşturabilir. Yukarıda belirtilen sorunlar nedeniyle, uygun bir geri dönüşüm çözümünün benimsenmesi özellikle önemlidir (Mahinroosta ve Allahverdi 2018). Literatürde yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde alüminyum cüruflarının yapının içerisine belli oranlarda katılarak dolgu malzemesi olarak kullanıldığı görülmüştür (Reddy ve Neeraja 2016).

1.4 Genetik Programlama

Genetik programlama, Darwin'in doğal seçim ilkesini kullanarak bir sorunu çözmek için bilgisayar programları oluşturan sembolik bir optimizasyon tekniğidir. Genetik programdaki atılım 1980'lerin sonunda Koza'nın sembolik regresyon üzerine yaptığı deneylerle başlamıştır. Genetik programlama, genetik algoritmaların bir uzantısıdır. Bu geleneksel genetik programlama tekniği aynı zamanda ağaç tabanlı genetik

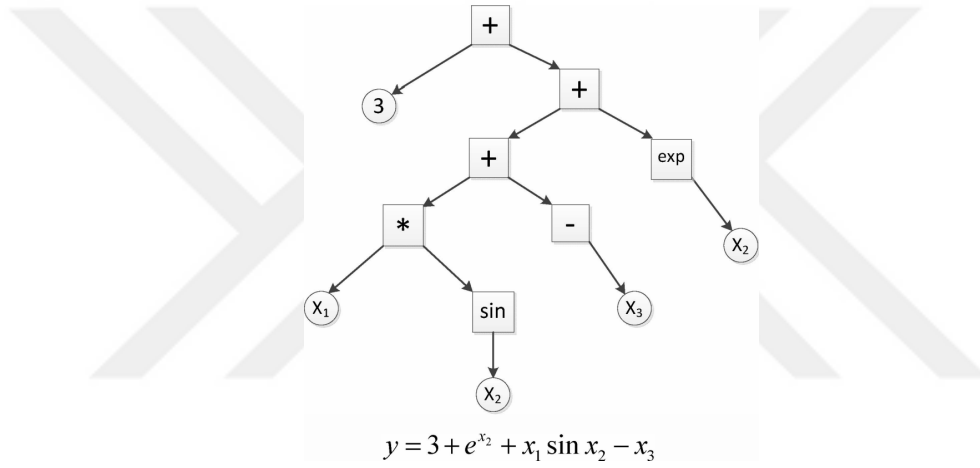
programlama olarak da adlandırılır. Genetik programlama ve genetik algoritma arasındaki fark çözümün temsiliyle ilgilidir. Çözümü temsil etmek için genetik algoritma tarafından bir dizi sayı oluşturulurken, genetik programlama çözümleri genellikle ağaç yapıları olarak temsil edilen bilgisayar programlarıdır. Genetik programlama, genetik algoritmanın aksine nispeten yeni bir örüntü tanıma yöntemleri alanıdır. Literatür taraması, araştırma topluluğunun genetik programlamaya artan ilgisini ortaya koymaktadır (Gandomi ve Alavi 2012, Khafagy vd. 2022).

Genetik programlamanın temel versiyonu için beş ana hazırlık adımı uygulanır (Fonlupt 2005). Bu adımlar;

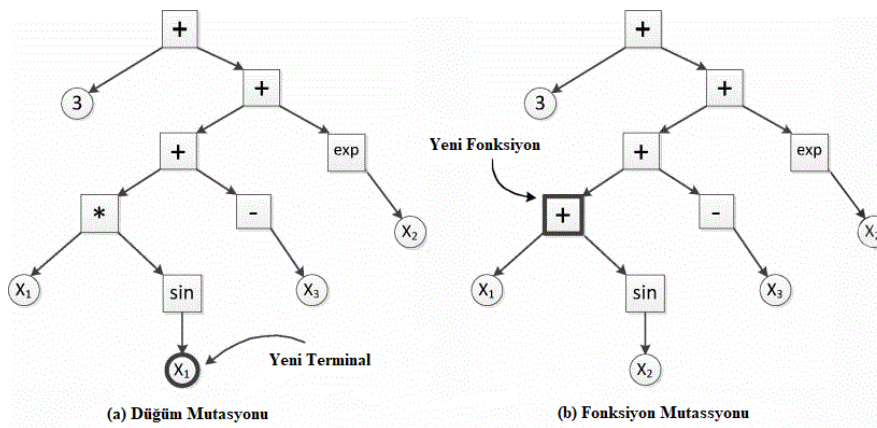
- (1) Geliştirilecek programın her bir dalı için terminal seti (örneğin problemin bağımsız değişkenleri, sıfır bağımsız değişken fonksiyonları ve rastgele sabitler),
- (2) Geliştirilecek programın her bir dalı için ilkel işlevler kümesi,
- (3) Uygunluk ölçüsü (popülasyondaki bireylerin uygunluğunu açık veya örtülü olarak ölçmek için),
- (4) Çalışmayı kontrol etmek için belirli parametreler ve
- (5) Çalışmanın sonucunun belirlenmesine yönelik sonlandırma kriteri ve yöntemidir.

Başlangıç popülasyonunun oluşturulması, olası çözümlerin bulunduğu geniş uzayda körü körüne rastgele bir çözüm arayışıdır. Rastgele bir model popülasyonu oluşturulduktan sonra, genetik programlama algoritması bireyleri değerlendirir, üreme için bireyleri seçer, mutasyon, çaprazlama ve doğrudan üreme yoluyla yeni bireyler üretir ve son olarak tüm yinelemelerde yeni nesil oluşturur. Çaprazlama prosedürü sırasında, her çözümün (programın) dalındaki bir nokta rastgele seçilir ve her programdaki terminal seti ve/veya işlevler daha sonra iki yeni program oluşturmak için değiştirilir. Evrimsel süreç, yeni popülasyonun uygunluğunu değerlendirerek ve yeni bir üreme ve çaprazlama turu başlatarak devam eder. Bu işlem sırasında genetik programlama algoritması ara sıra bir modelden rastgele bir işlev veya terminal seçer ve onu mutasyona uğratar. Herhangi bir nesilde ortaya çıkan en iyi program, şimdiye kadarki en iyi çözüm, genetik programlama algoritmasının çıktısını tanımlar (Khafagy vd. 2022). Şekil 1.3'de basit bir matematiksel denklemi temsil eden seyrek bir ağaç örneği verilmektedir. Şekil 1.3'de kareler fonksiyon düğümlerini, daireler ise terminal

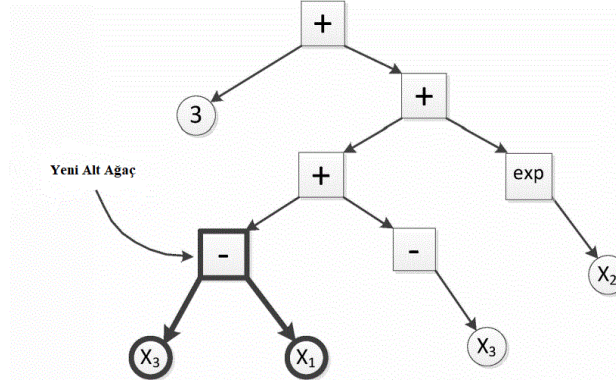
düğümlemlerini temsil etmektedir. Genetik programlama algoritması popülasyonun başlatılmasıyla başlar. Bu başlatmanın ardından çaprazlama olasılığı ve mutasyon olasılığına dayalı olarak bu popülasyona mutasyon operatörü veya çaprazlama operatörü uygulanır. Genetik programlamada iki ana mutasyon türü vardır. İlk tür, belirli bir işlevi veya terminal düğümünü rastgele seçmek ve onu rastgele oluşturulmuş bir işlevle değiştirmektir. İkinci mutasyon türü, rastgele bir alt ağaç seçmek ve daha sonra onu rastgele oluşturulmuş başka bir alt ağaçla değiştirmektir. Şekil 1.4 birinci mutasyon tipini, Şekil 1.5 ise ikinci mutasyon tipini göstermektedir (Ghareeb ve El Saadany 2013).



Şekil 1.3 Basit bir matematiksel denklemleri temsil eden seyrek bir ağaç

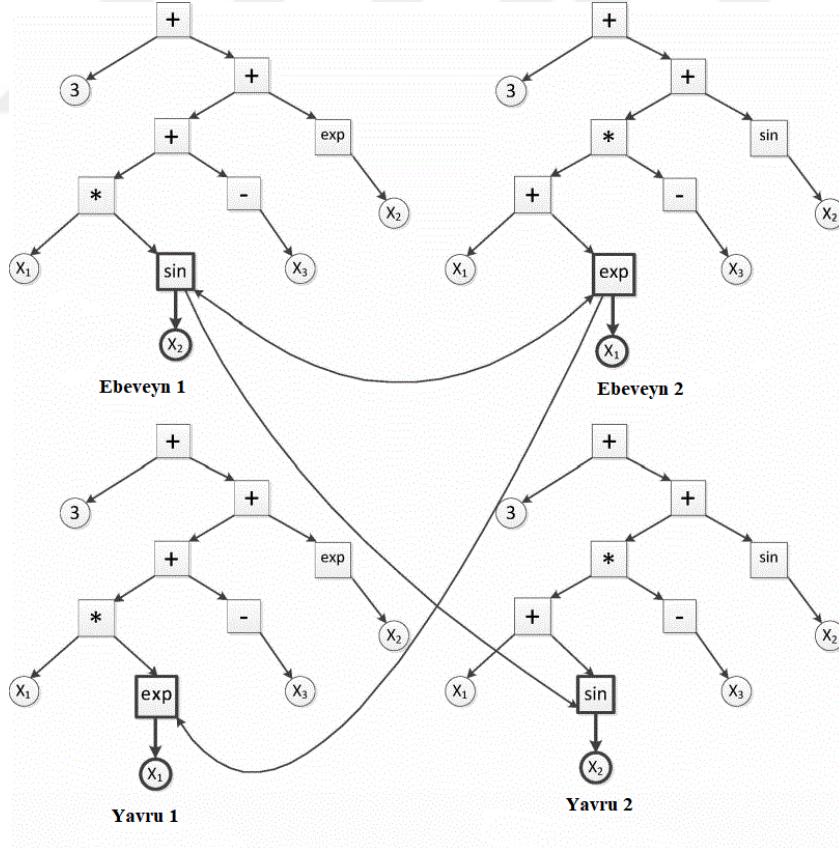


Şekil 1.4 Genetik Programlamada fonksiyon ve düğüm mutasyonu.



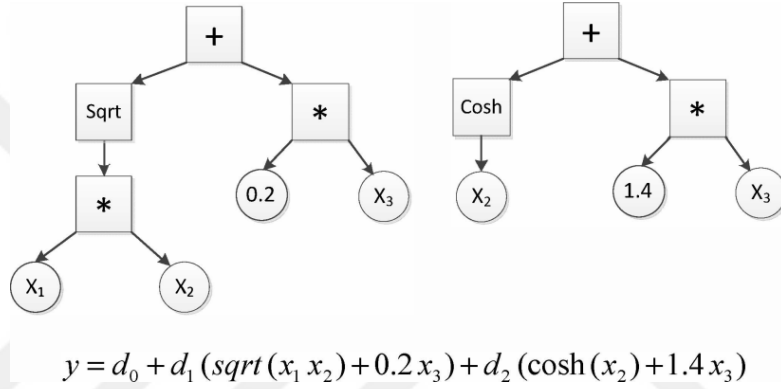
Şekil 1.5 Genetik Programlamada alt ağaç mutasyonu.

Çaprazlama görevinde, iki ebeveyn uygunluk değerlerine göre olasılığa dayalı olarak seçilir. Daha sonra birinci ebeveynden rastgele bir alt ağaç seçilir ve ikinci ebeveynden rastgele bir başka ağaç seçilir ve daha sonra bu alt ağaçlar iki yavru oluşturmak için iki ebeveyn arasında değiştirilir. Genetik programlamadaki çaprazlama görevi Şekil 1.6'da gösterilmektedir (Ghareeb ve El Saadany 2013).



Şekil 1.6 Genetik Programlamada çaprazlama

Çok Genli Genetik Programlama (ÇGGP), genetik programlamanın yeni bir çeşididir. Şekil 1.3-1.6 arasında gösterildiği gibi, geleneksel Genetik programlama gösterimi tek bir ağaç (model) üzerine dayanmaktadır. ÇGGP’de popülasyonun her bir bireyi, seyrek ağaçların ağırlıklı doğrusal bir kombinasyonundan oluşur. Bu kombinasyondaki her ağaç bir gen olarak düşünülebilir. Potansiyel bir çözümün ÇGGP gösteriminin bir örneği Şekil 1.7’de gösterilmektedir; burada x_1 , x_2 ve x_3 girdi değişkenleridir ve d_0 , d_1 ve d_2 ağırlıklı katsayılarıdır. Bu katsayılar, sıradan en küçük kareler teknikleri kullanılarak eğitim verilerine dayanarak belirlenebilir (Ghareeb ve El Saadany 2013, Bayazidi vd. 2014).



Şekil 1.7 Potansiyel bir çözümün çok genli genetik programlamada örneği.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Fren balataları, fren balataları üretiminde kullanılan atık malzemeler, fren balatası üretim süreci ve testlerinde yapılan optimizasyon yöntemleri incelenmiştir. İncelenen çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Wang vd. (2016)'nin yaptıkları çalışmada sürtünme malzemelerinin içerisinde yüksek fırın cürufunu %0, 13, 23, 33, 43 oranlarında katarak 5 farklı numune üretmişler ve bu numunelerin mekanik, termal ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Numunelerin sürtünme-aşınma testi 0,98 MPa basınç altında ve 480 d/dk dönüş hızında test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, cüruf içeriğinin ağırlıkça %0'dan %43'e artmasıyla sertliğin 63,6 HRL'den 57,0 HRL'ye düştüğü, darbe dayanımı kademeli olarak 3,59 kJ/m²'den 3,70 kJ/m²'ye yükseldiği görülmüştür. Yüksek fırın cürufu içeriğinin artmasıyla sürtünme katsayısı değerleri artmış; aşınma oranı ve kütle kaybı azalmıştır.

Kanagaraj vd. (2022)'nin yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufunu %5, 10, 15 oranlarında fren balatalarının içerisine dolgu malzemesi olarak kullanarak 3 farklı numune elde etmişler ve bu elde edilen numunelerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Tribolojik özellikler SAE J661 standardına göre Chase test cihazı kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %5 yüksek fırın cürufuna sahip numunenin yüksek sıcaklıklarda bile düşük dalgalanmalara sahip sürtünme performansı ve diğer numunelere göre daha iyi fiziksel, kimyasal özellikler sergilediğini ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, ağırlıkça %15 yüksek fırın cürufuna sahip numunenin, sürtünme ara yüzünde tribo yağlayıcı tabaka oluşumu nedeniyle diğer iki numuneyle karşılaştırıldığında daha iyi bir aşınma direnci özelliği ortaya çıkardığını göstermiştir.

Sağiroğlu ve Akdoğan (2023) yaptıkları çalışmada yüksek fırın cürufu kullanarak asbest içermeyen fren balataları geliştirmişlerdir. Yüksek fırın cürufu %0'dan %50'ye kadar farklı oranlarda katılarak 5 farklı numune elde etmişlerdir. Elde edilen numunelerin tribolojik davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %50 cüruf içeren numunenin en düşük aşınma oranına ve en yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu

tespit edilmiştir. Fakat bu numunenin en yüksek sürtünme düzensizliğine sahip numune olduğu belirlenmiştir. Numuneler içerisinde en iyi sürtünme stabilitesine sahip olan numunenin %7,5 yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen numune olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın bulgularına dayanarak fren balatalarında cüruf kullanımının sürtünme katsayısını artırdığı, aşınmayı azalttığı ve çalışma sıcaklığını düşürdüğü tespit edilmiştir. Fakat çalışmada %7,5 oranına kadar yüksek fırın cürufunun kullanımı önerilmiştir.

Matějka vd. (2022)'nin yaptıkları çalışmada granüle yüksek fırın cürufu, yüksek fırın cürufu, çelik cürufunu %20 Alümina malzemesinin yerine kullanarak 4 farklı numune elde etmişlerdir. Elde edilen numunelerin tribolojik özellikleri 1 MPa basınç altında, 1,51 m/s kayma hızında ve 90 dk. süresince bir pin-on-disk test cihazı kullanılarak test edilmiştir. Cüruf içeren numuneler, alümina içeren referans numune ile karşılaştırıldığında daha düşük kararlı sürtünme katsayısı değerleri sergilemişlerdir. Üç tip cüruf karşılaştırıldığında, çelik cürufunun daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir.

Sundarrajan vd. (2020)'nin tarafından yapılan çalışmada fren sürtünme malzemelerinde, çelik cürufu ve molibden disülfür (MoS_2) parçacıklarının kullanımının etkisi araştırılmıştır. Geliştirilen fren balatalarının fiziksel, mekanik ve termal özellikleri endüstriyel standartlara göre test edilmiştir. Tribolojik özellikler IS2742-Part-4'e göre Chase testi kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada çelik cürufu aşındırıcı ve MoS_2 yağlayıcı olarak kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre molibden disülfür içeren fren balataları daha yüksek sertlik, çelik cüruf içeren fren balataları daha yüksek gözeneklilik ve kesme mukavemeti göstermiştir. Molibden disülfür-çelik cüruf içeren fren balataları daha kararlı bir sürtünme katsayısı, solmaya karşı direnç sergilemiştir. Ayrıca Molibden disülfür içeren fren balataları, gelişmiş yağlama yapısı nedeniyle daha iyi aşınma direnci sergilediği belirtilmiştir.

Rajan vd. (2022)'nin yaptıkları çalışmada cüruf atığı ve fenolik reçine kombinasyonuna dayalı 4 farklı fren balata numunesi üretmişler ve bu üretilen numunelerin çeşitli fiziksel, kimyasal, mekanik ve sıcaklığa bağlı tribolojik özelliklerini araştırmışlardır.

Cüruf içeriği %65'ten %50'ye kadar azaltılırken, reçine oranı %5'ten %20'ye kadar %5 oranında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; cüruf atık içeriğindeki artış yoğunluk, gözeneklilik, kül içeriği ve sıkıştırılabilirlik gibi fiziksel özelliklerin artmasına neden olmuş, fenolik reçine içeriğinin artmasıyla sertlik ve kayma mukavemetini arttırmıştır. Özellikle, ağırlıkça %65 cüruf atığı ve ağırlıkça %5 fenolik reçine içeren numuneler en yüksek sürtünme katsayısı, en düşük solma ve sürtünme dalgalanması sergilemiştir. Fakat aşınma ve disk sıcaklık artışı en yüksek değerde olmuştur. Ağırlıkça %50'lik en düşük cüruf atık içeriğine ve ağırlıkça %20'lik en yüksek fenolik reçineye sahip numune, daha yüksek geri kazanım performansı, en düşük aşınma ve disk sıcaklığı artışı sergilemiştir. Fakat sürtünme katsayısı ve Stabilitesi en düşük değerde olmuştur.

Sathyamoorthy vd. (2022)'nin yaptıkları çalışmada farklı aşındırıcıların (kırmızı çamur, çelik cürufu ve uçucu kül) asbestsiz fren sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sabit bileşenlerin oranları korunurken kırmızı çamur, çelik cürufu ve uçucu kül malzemelerinin oranları değiştirilerek üç farklı fren sürtünme malzemesi üretilmiştir. Tribolojik özellikler Chase sürtünme test ekipmanı kullanılarak IS2742 Part-4'e uygun olarak test edilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, fren balatalarında uçucu kül parçacıkları kullanımıyla, daha düşük aşınma oranı, kararlı solma ve geri kazanım davranışları sergilediğini göstermiştir. Uçucu kül esaslı fren balatalarının sertliği, özgül ağırlığı ve kesme mukavemeti daha yüksek iken, çelik cüruf esaslı fren balataları ateşleme kaybı ve gözeneklilik açısından iyi performans sergilemiştir. Çelik cürufu esaslı fren balataları daha iyi bir geri kazanım davranışı sergilemiştir. Son olarak çalışmada uçucu külün hafif ticari araçlar ve otomobiller için en iyi performansı gösterdiği ifade edilmiştir.

Khazaei ve Shojaei (2015) yaptıkları çalışmada fren sürtünme malzemelerindeki spesifik aşınma oranını ve sürtünme katsayısını tahmin etmek için ampirik modeller geliştirmek amacıyla bir genetik programlama tekniği kullanmışlardır. Modeller, kullanılan tozların hacim oranını temsil eden bağımsız değişkenlerden oluşmuştur. Toplamda 31 tane numunenin 26 tanesi eğitim için, 5 tanesi valide etmek için kullanılmıştır. Spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı için ortalama mutlak bağıl

hata sırasıyla %1,93 ve %1,92 olarak bulunmuştur. Modeller ayrıca formülasyonun daha ileri kontrolü için kullanılan deneysel verilerle de doğrulanmıştır. Tornado grafikleri kullanılarak modellerin, bileşenlerin fren sürtünme malzemelerinin genel tribolojik performansı üzerindeki rolünü doğru bir şekilde gösterebildiği görülmüştür. Çalışmada son olarak Genetik programlama gibi tahmine dayalı modellerin, malzeme maliyetleri ve tribolojik performans açısından fren sürtünme malzemelerinin formülasyonunun tasarlanması ve optimize edilmesinde çok yardımcı olacağı önerilmiştir.

Aras ve Tarakçıoğlu (2021) yaptıkları çalışmada otomobil fren sisteminin genel tribolojik performansını arttırmak için organik bir fren balatası içeriği oluşturulmuşlardır. En ideal üretim koşullarını ve içerik oranlarını belirlemek amacıyla yoğunluk, sertlik, aşınma oranı, sürtünme katsayısı amaç fonksiyonlarına göre L18(21 × 35) Taguchi ortogonal indeksine dayalı parametre kombinasyonları kullanılmıştır. Ortogonal tasarıma göre üretilen numunelerin yoğunluğu ve sertliği ölçülmüştür. Pin-on-disk tipi tribometre üzerinde aşınma testi yapılmış ve elde edilen değerlere göre aşınma oranı ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. En ideal tribolojik özelliklere sahip fren balatası bileşimini belirlemek için sinyal gürültü (S/N) oranı ve ANOVA analizi yapılmıştır. Sonuçlara göre karıştırma süresi 15 dk., kalıplama sıcaklığı 160 °C, kalıplama basıncı 100 MPa ve kalıplama süresi 15 dk. olarak optimum üretim koşulları belirlenmiştir. Ayrıca juniperus drupacea koni tozu miktarı arttıkça yoğunluğun ve sertliğin azaldığı gözlenmiştir. Bu nedenle fren balatası bileşiminde ilk kez kullanılan ardıç drupacea koni tozunun ağırlıkça %25'e kadar, tercihen %10'a kadar balata içeriğinde kullanılabileceği görülmüştür.

Saurabh vd. (2022)'nin yaptıkları çalışmada bakır içermeyen yarı metalik fren balata numunelerinin yüke bağlı aşınma davranışını araştırmışlardır. Deneyler, değişen kayma hızları (3,141 m/s, 2,09 m/s ve 1,047 m/s), yükleri (60 N, 50 N ve 40 N) ve kayma mesafelerinde (4500 m, 3000 m ve 1500 m) gerçekleştirilmiştir. Sonuçları bir L9 ortogonal dizisi aracılığıyla incelemek için deneylerin tasarlanmasında Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Yükün aşınma sürecine etkisi maksimum (%71,02) olduğu, bunu kayma hızı (%27,84) ve kayma mesafesinin (%1,14) izlediği görülmüştür. Minimum aşınma

oranı için optimum koşul 40 N normal yükte, 1500 m kayma mesafesinde ve 3,14 m/s kayma hızında bulunmuştur. Yapılan çalışmanın sonucunda aşınma oranı tahmini regresyon modeli etkili bir şekilde test edilmiştir.

Aleksendrić ve Senatore (2012) yaptıkları çalışmada Hibrit (nörogenetik) optimizasyon modeli geliştirerek, üretim parametrelerinin fren sürtünme malzemesi aşınması üzerine etkilerini araştırmışlardır. En önemli üretim parametrelerinin (presleme basıncı, presleme sıcaklığı, presleme süresi, ısıl işlem sıcaklığı ve ısıl işlem süresi) farklı türdeki sürtünme malzemelerinin (farklı formülasyon ve üretim koşulları) aşınmasını nasıl etkilediği belirlenmiştir. Üretim sürecinin seçilen sürtünme malzemesi türlerinin aşınmasını güçlü bir şekilde etkilediği kanıtlanmıştır. Ayrıca üretim sürecinin sürtünme malzemelerinin formülasyonuna göre uyarlanması gerektiği de kanıtlanmıştır. Üretim süreçleriyle fren sürtünme malzemesi aşınmasının akıllı optimizasyon modelinin geliştirilebileceği ve optimizasyon amacıyla kullanılabileceği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; Kalıplama basıncı, sürtünme malzemelerinin aşınmasını en çok etkileyen faktör olduğu tespit edilmiştir.

Abutu vd. (2018)'nin yaptıkları çalışmada gri ilişkisel analiz yöntemiyle zararsız hammadde (deniz kabuğu) kullanarak fren balata numuneleri geliştirmişlerdir. Üretimde kullanılan malzemeler arasında deniz kabuğu, epoksi reçine, grafit ve alüminyum oksit yer almıştır. Üretim parametreleri değiştirilerek 27 farklı numune üretilmiştir. Çoklu yanıt performansını tek bir yanıtla ölçeklendirmek için gri ilişkisel analiz yapılmıştır. Sonuçlar, 14 MPa kalıplama basıncı, 160 °C kalıplama sıcaklığı, 12 dk. kürlleme süresi ve 1 s ısıl işlem süresi ile optimum performansın elde edilebileceğini göstermiştir. Varyans analizi, kürlleme süresinin mekanik özellikler üzerinde en az etkiye sahip olduğunu, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde ise sırasıyla %24,26 ve %55,23 ile en önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Şeker (2013); yaptığı çalışmada 18 farklı formülle karakterize edilen numunelerin frenleme özelliklerini incelemiş, sürtünme katsayısı-sıcaklık-zaman grafiklerini oluşturmuş ve numunelerin aşınma dirençleri, sertlik ve yoğunluk özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımı

yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada numunelerin sürtünme performanslarını etkileyen faktörler ve alt seviyeleri belirlenmiştir. L18 ortogonal indeksine dayalı parametre kombinasyonları kullanılmıştır. Deneyler yapılarak ortalama S/N oranı hesaplanmıştır. Sonrasında, performans karakteristiği üzerinde belirleyici faktörleri tanımlamak amacıyla varyans analizi yapılmış ve her bir faktör için katkı yüzdeleri hesaplanmıştır. Bu adımların sonucunda, Cashew ve Grafit faktörlerinin performans karakteristiği üzerinde etkili olduğu bulunmuştur.

Mutlu (2009); yaptığı çalışmada, yapay sinir ağları kullanarak fren balatalarının ortalama sürtünme katsayısı ve sürtünme katsayısı standart sapma değerleri gibi tribolojik özelliklerini belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar sinir ağı programlarını eğitmek için kullanılmış ve eğitim için kullanılmayan farklı numunelerle test edilmiştir. Sürtünme katsayılarının hesaplanan ortalama ve standart sapma değerleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, sinir ağlarının farklı bileşen oranlarında sürtünme katsayılarının ortalama ve standart sapma değerlerini daha az deneysel çalışma ile tahmin edebildiği önerilmiştir.

Mutlu vd. (2015)'nin yaptıkları çalışmada gözenekliliğin otomotiv fren balatalarının sürtünme-aşınma özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Atık lastik tozu fren balatalarında yeni bir sürtünme malzemesi olarak kullanılmıştır. Beş farklı bileşene sahip yeni formüle edilmiş fren balatası malzemeleri geleneksel tekniklerle üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda, sürtünme katsayısının değişimi, sürtünme yüzeyinin sıcaklığı, özgül aşınma oranı ve sertlik, yoğunluk ve gözeneklilik ölçülmüştür. Ayrıca, fren balatalarının mikro yapısal karakterizasyonları Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak belirlenmiştir. Atık lastik tozu oranı arttıkça ortalama sürtünme katsayısı, porozite ve spesifik aşınma oranı artmış, diğer yandan sertlik ve yoğunluk değerleri azalmıştır. Sonuç olarak, bu tür atık ürünlerin otomotiv fren balatalarında alternatif bir malzeme olarak kullanılabileceği önerilmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Optimizasyon Süreçleri

Bu araştırmada oluşturulan iş planında ilk olarak fren balatalarında kullanılacak toz malzeme içerikleri belirlenmiştir. Bu malzemelerin fren balatalarında hangi oranda kullanılacağı ile ilgili optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu bölüm sunulan tez çalışmasında “İçerik Optimizasyonu” olarak adlandırılmıştır. İçerik optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar bir genetik algoritma çeşidi olan genetik programlama yöntemi kullanılarak ortalama sürtünme katsayısı (SK), özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi modellenmiş ve doğruluğu test edilmiştir. Doğruluğu test edilen modeller için farklı oranlarda toz içerikleri oluşturularak ortalama sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı ve sürtünme stabilitesi değerleri tahmin edilmiştir. Bu bölüm sunulan tez çalışmasında “İçerik Optimizasyonunun Modellenmesi” olarak adlandırılmıştır. Üretilcek fren balatasında kullanılacak sabit reçete belirlendikten sonra üretim parametreleri optimize edilmiştir. Bu bölüm tez çalışmasında “Üretim Parametresi Optimizasyonu” olarak adlandırılmıştır. Son olarak içeriği ve üretim parametresi optimize edilen fren balatası numunelerine atık cüruf malzemeler dolgu malzemesi olarak eklenmiş, bu malzemelerin fren balatasına fiziksel, kimyasal ve tribolojik etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu bölüm tez çalışmasında “Atık Malzemelerin Kullanımı” olarak adlandırılmıştır.

3.1.1 İçerik Optimizasyonu

Üretilcek fren balatalarında bağlayıcı malzeme fenolik reçine, metal içerik bronz tozu ve pirinç talaşı, fiber malzeme cam elyaf ve çelik yünü, dolgu malzemesi barit, yağlayıcı malzeme grafit ve sürtünme düzenleyici malzeme Alümina (Al_2O_3) olarak belirlenmiştir. Çizelge 3.1’de ilk olarak belirlenen içerikler yüzdeleriyle birlikte verilmiştir. İçeriklerin optimize edilmesi için kullanılan toz malzemeler kendi içinde ikili olarak %5 oranında arttırılmış ve azaltılmıştır. İçerik optimizasyonu için oluşturulmuş deney planı Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Deney planında toplamda 46 adet farklı içeriğe sahip numune üretilmiştir.

Çizelge 3.1 Başlangıç numunesi üretimi için belirlenen malzemeler ve kütleli yüzdeleri

Sınıflandırma	Malzemeler	Kütleli %
Bağlayıcı	Fenolik Reçine	15
Metal İçerik	Bronz Tozu	5
	Pirinç Talaşı	5
Fiber	Cam Elyaf	15
	Çelik Yünü	5
Dolgu	Barit	40
Yağlayıcı	Grafit	10
Sürtünme	Alümina (Al ₂ O ₃)	5
Düzenleyici		
Toplam		100

Çizelge 3.2 İçerik optimizasyonu için belirlenen malzemeler ve kütleli yüzdeleri

No	Fenolik Reçine	Bronz Tozu	Pirinç Talaşı	Cam Elyaf	Çelik Yünü	Barit	Grafit	Alümina	Toplam
1	15	5	5	15	5	40	10	5	100
2	15	10	0	15	5	40	10	5	100
3	15	5	5	10	10	40	10	5	100
4	15	5	5	5	15	40	10	5	100
5	15	5	5	0	20	40	10	5	100
6	15	5	5	20	0	40	10	5	100
7	20	5	0	15	5	40	10	5	100
8	20	0	5	15	5	40	10	5	100
9	10	10	5	15	5	40	10	5	100
10	10	5	10	15	5	40	10	5	100
11	20	5	5	10	5	40	10	5	100
12	25	5	5	5	5	40	10	5	100
13	30	5	5	0	5	40	10	5	100
14	20	5	5	15	0	40	10	5	100
15	10	5	5	15	10	40	10	5	100
16	20	5	5	15	5	40	5	5	100
17	25	5	5	15	5	40	0	5	100
18	10	5	5	15	5	40	15	5	100
19	20	5	5	15	5	40	10	0	100
20	10	5	5	15	5	40	10	10	100
21	15	0	5	20	5	40	10	5	100
22	15	5	0	20	5	40	10	5	100
23	15	0	5	15	10	40	10	5	100
24	15	5	0	15	10	40	10	5	100
25	15	10	5	10	5	40	10	5	100
26	15	5	10	10	5	40	10	5	100
27	15	10	5	15	0	40	10	5	100
28	15	5	10	15	0	40	10	5	100
29	15	0	5	15	5	40	15	5	100
30	15	5	0	15	5	40	15	5	100
31	15	10	5	15	5	40	5	5	100

Çizelge 3.2 (Devam) İçerik optimizasyonu için belirlenen malzemeler ve kütsel yüzdeleri

32	15	5	10	15	5	40	5	5	100
33	15	10	5	15	5	40	10	0	100
34	15	5	10	15	5	40	10	0	100
35	15	0	5	15	5	40	10	10	100
36	15	5	0	15	5	40	10	10	100
37	15	5	5	25	5	40	0	5	100
38	15	5	5	15	10	40	5	5	100
39	15	5	5	10	5	40	15	5	100
40	15	5	5	15	0	40	15	5	100
41	15	5	5	15	5	40	15	0	100
42	15	5	5	15	5	40	5	10	100
43	15	5	5	15	5	40	0	15	100
44	15	0	10	15	5	40	10	5	100
45	10	5	5	20	5	40	10	5	100
46	15	5	5	15	15	40	0	5	100

3.1.2 Üretim Parametresi Optimizasyonu

İçerik optimizasyonu yapıldıktan sonra üretim parametresi optimizasyonu aşamasına geçilmiştir. Üretim parametresi optimizasyonunda; soğuk presleme süresi ve basıncı, sıcak presleme süresi-basıncı ve sıcaklığı, kürlleme süresi ve sıcaklığı parametreleri belirlenmiştir. Çizelge 3.3’de üretim parametre değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Üretim parametresi optimizasyonu için belirlenen parametreler ve değerleri

Parametre	Numune Kodu	Değer		
Soğuk Presleme Süresi (dk)	SoPS	1	3	5
Soğuk Presleme Basıncı (MPa)	SoPB	8	10	12
Sıcak Presleme Süresi (dk)	SıPS	5	10	15
Sıcak Presleme Basıncı (MPa)	SıPB	8	10	12
Sıcak Presleme Sıcaklığı (°C)	SıPS ₁	125	150	175
Kürleme Süresi (s)	KS	4	8	12
Kürleme Sıcaklığı (°C)	KS ₁	120	150	180

Çizelge 3.3 incelendiğinde soğuk presleme süresi için 1, 3 ve 5 dk., soğuk presleme basıncı için 8, 10 ve 12 MPa; Sıcak presleme süresi için 5, 10 ve 15 dk., sıcak presleme basıncı için 8, 10 ve 12 MPa, sıcak presleme sıcaklığı için 125, 150 ve 175 °C; kürlleme süresi 4, 8 ve 12 s, kürlleme sıcaklığı 120, 150 ve 180 °C değerleri belirlenmiştir. Üretim optimizasyonunda parametre değerlerinden biri değiştirilerek diğerleri sabit tutulmuş ve

bu şekilde bütün parametrelerin etkisi kaydedilmiştir. Üretim optimizasyonu için üretilen numuneler, numune kodunun arkasına parametre değeri eklenerek adlandırılmıştır. Örneğin; Soğuk presleme süresi için SoPS-1, Sıcak presleme sıcaklığı SıPSı-150 vb.

3.1.3 Atık Malzemelerin Kullanımı

Tez çalışmasının bu kısmında içeriği ve üretim parametreleri optimize edilmiş fren balatalarında dolgu malzemesi olarak metalürjik atıkların kullanılması araştırılmıştır. Bunun için 3 farklı metalürjik atık; yüksek fırın cürufu, bakır cürufu ve alüminyum cürufu belirlenmiş ve bunlar temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufu İskenderun Demir ve Çelik A.Ş., bakır cürufu Ekmekçioğulları Metal ve Kimya Sanayi ve alüminyum cürufu ise Eti Maden işletmelerinden temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufu ve bakır cürufu <50 µm altında toz halinde temin edilirken, alüminyum cürufu ise öğütülmemiş halde temin edilmiştir. Halkalı değirmen kullanılarak alüminyum cürufu <50 µm altına indirilmiştir. Metalürji cüruf malzemeleri dolgu malzemesi olarak baritin yerine %10 oranında artırılarak numuneler elde edilmiştir. İçeriği ve üretim parametreleri optimize edilmiş numune Referans numune (RN) olarak adlandırılmıştır. Metalürjik cüruf malzemeleriyle oluşturulan deney planı Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

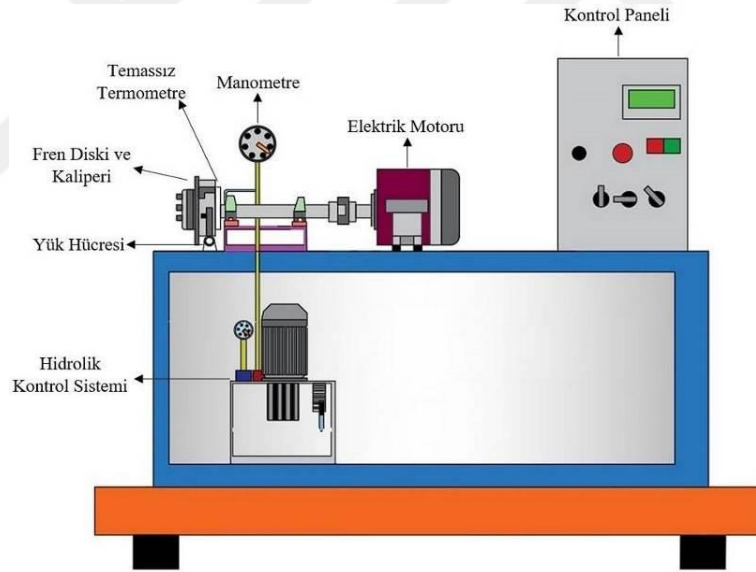
Çizelge 3.4 Metalik cüruflar kullanılarak üretilcek numuneler ve kütleli yüzdeleri

Dolgu Malzemesi	Numune Kodu	Barit	Cüruf
Barit (Referans Numune)	RN	40	0
Yüksek Fırın Cürufu	YFC10	30	10
	YFC20	20	20
	YFC30	10	30
	YFC40	0	40
Bakır Cürufu	BC10	30	10
	BC20	20	20
	BC30	10	30
	BC40	0	40
Alüminyum Cürufu	AC10	30	10
	AC20	20	20
	AC30	10	30
	AC40	0	40

3.2 Üretim ve Deney Aşamalarında Kullanılan Cihazlar

3.2.1 Test Cihazı

Deneyisel çalışmalar Afyon Kocatepe Üniversitesi Fren Balata Üretim ve Test Merkezinde gerçekleştirilmiştir. J2430, TS 555 ve TS 9076 test standartlarına göre deneyisel çalışmalar yapılan test cihazının şematik görünümü Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Test cihazının kontrol paneli üzerinde bulunan ekran sayesinde motor devri, hidrolik basıncı ve balata yüzey alanı değerleri bilgisi girilebilmektedir. Test cihazı çalışmaya başladığı andan itibaren data kayıt sekmesine aktif edildiğinde tüm veriler anlık olarak kaydedilmektedir. Balata ve disk arasında oluşan sıcaklık, yük hücresinde oluşan yük, uygulanan kuvvet anlık olarak ekranda izlenmekte ve değerler kaydedilmektedir. Deney sonunda ise bir taşınabilir hafıza ile tüm veriler alınmaktadır.



Şekil 3.1 Fren test cihazının şematik gösterimi

Şekil 3.1’de gösterilen test cihazı, otomobil fren sisteminin mekanik kısmını içermektedir. Bu mekanik sistemde disk döndürmek için 5,5 kW gücünde 1400 d/dk trifaze elektrik motoru bulunmaktadır. Ayrıca disk üzerinde kaliper, kaliperde fren balatalarının yerleştirileceği balata sacı bulunmaktadır. Test cihazının deneyler esnasında oluşan titreşimi sönmölemek için 6 farklı noktadan titreşim sönmöleme takozları monte edilmiş ve sabitlenmiştir. Test cihazının güç ünitesinde hidrolik sistem

bulunmaktadır. Hidrolik sistem sayesinde pedal kuvvetini oluşturan hidrolik basınç oluşmakta ve frenleme sağlanabilmektedir. Hidrolik basınç istenilen değerde kontrol edilebilmektedir. Sistemde ayrıca basınç kontrol valfi bulunmaktadır. Bu basınç kontrol valfi deneyler yapılırken sistemde oluşabilecek basınç düzensizliğini önlemek amacıyla kaliper ile hidrolik motor arasına yerleştirilmiştir. Hidrolik basınç, kaliper pistonuna ulaşmadan önce bir manometreden geçerek oluşan basıncın manuel olarak da anlık kontrolü sağlanmaktadır.

Deneyler esnasında belirlenen basınç değerleriyle balata diske doğru itilmektedir. Diskin dönmesi sırasında fren balatasına uygulanan basınçtan doğan sürtünme kuvveti tesiriyle balatanın da disk ile beraber dönme hareketi dikkate alınarak bu döndürme kuvveti elektronik olarak yük hücresi vasıtasıyla ölçülmektedir. Disk ile balata arasındaki yüzey karakteristiğine bağlı olarak döndürme momenti dolayısıyla sürtünme kuvveti de değişmektedir. Bu değer anlık olarak yük hücresinde ölçülmekte ve kontrol ünitesine aktarılmaktadır. Bu sayede fren balatası ve diski arasında oluşan sürtünme kuvveti elde edilmektedir.

Otomasyon programı, yük hücresi ekranından okunan değer ve moment kolu göz önüne alınarak farklı yüzey basınçlarında otomatik olarak belirlenen sürtünme katsayısını Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak hesaplamıştır.

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

F = Kuvvet (N)

P = Basınç(N/mm²)

A = Balata alanı (mm²)

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

μ = Sürtünme katsayısı

F_s = Yük hücresinde okunan değer (kg)

L = Cihaz sabiti (1,64)

Deneylerin başlangıç sıcaklığı 40 °C olarak ayarlanmıştır. Tüm numuneler, 0,7 MPa basınç ve 7 m/s hızda sürekli sürtünme koşullarına tabi tutularak, balata yüzeyinin %95'i fren diskiyle temas edene kadar 15 dk. (900 sn) boyunca alıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu süreçte, TS 9076 standartlarına uygun olarak zımparalama, temizleme ve soğutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısı-sıcaklık değişimi, 0,551 MPa basınç altında ve 40 °C'den 400 °C'ye kadar olan 5400 sn boyunca her saniyede bir ölçülerek FAST (Friction Assessment and Screening Test) yöntemiyle belirlenmiştir. Balataların aşınma direnci, TS 555 standartlarına göre özgül aşınma deneyi kullanılarak belirlenen kütleli fark metoduyla hesaplanmıştır. Ayrıca, balataların aşınma miktarının belirlenmesi için 0,551 MPa basınç altında ve 7 m/s hızda gerçekleştirilen deneyler sonucunda her bir numune hassas terazide tartılarak kütle kaybı ölçülmüştür.

3.2.2 Yük Hücresi

Elektronikte "strain gage" olarak bilinen manyetoelastik cihazlar, sürtünme kuvvetini belirlemek için kullanılan yük hücreleri olarak adlandırılır. Yük hücreleri veya transdüserler, gelen kuvveti milivolt cinsinden algılar ve bu değerleri ekrana yansıtırlar. Deney düzeneğinde, Resim 3.1'de gösterilen Esit marka BB100 modeli, 100 kg kapasiteli yük hücresi tercih edilmiştir.



Resim 3.1 Yük hücresi

3.2.3 İnvörtör

Diske hareket veren 5,5 kW gücündeki elektrik motorunu sürmek için Resim 3.2'de gösterilen alternatif akım motor sürücüsü kullanılmıştır. Bu motor sürücüsüyle sistemdeki motorun çalışma frekansı değiştirilerek motor hızı 0-1400 dev/dk aralığında kontrol edilebilmektedir.



Resim 3.2 Alternatif akım motor sürücüsü

3.2.4 Temassız Sıcaklık Ölçer

Deneyler sırasında, balatanın fren diski ile temas ettiği sürtünme yüzeyindeki sıcaklık artışını incelemek amacıyla, balatanın diske sürtünme yüzeyinden 2 cm uzaklıkta sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için her saniye veri alabilen, -40 ile +700 °C aralığında çalışabilen, 2 °C hassasiyetle infrared ölçüm yapabilen ve taşınabilir hafıza ile bilgisayardan veri toplama özelliğine sahip olan Optris marka temassız sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Sıcaklık ölçer Resim 3.3’de gösterilmiştir.



Resim 3.3 Temassız sıcaklık ölçer

3.2.5 Basınç Sensörü

Hidrolik üniteden oransal valf kanalı aracılığıyla kaliper pistonuna iletilen hidrolik yağın basınç seviyesi, Resim 3.4’de görülen 0-60 bar aralığında ölçüm yapabilen basınç sensörü ile ölçülmektedir.



Resim 3.4 Basınç sensörü

3.2.6 Hassas Terazî

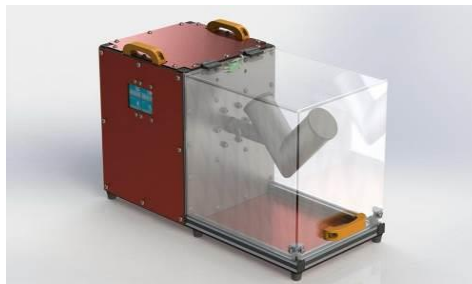
Her deney öncesi ve sonrası balatalardaki kütle kaybını belirlemek için 0,001 gr hassasiyetinde 300 gr kapasitesinde hassas terazi kullanılmıştır. WL 303L model dijital hassas terazinin etrafı hava akışından etkilenmemesi için camekân ile kapatılmıştır.



Resim 3.5 Hassas terazi

3.2.7 Karıştırma Cihazı

Fren balatası üretiminde kullanılacak toz malzemelerin homojen bir şekilde karışabilmesi için Resim 3.6’da gösterilen toz karıştırma cihazı kullanılmıştır. V-Shape toz karıştırma cihazı üzerinde LCD ekrandan karıştırma süresi, yönü ve devir kontrolü yapılabilmektedir.

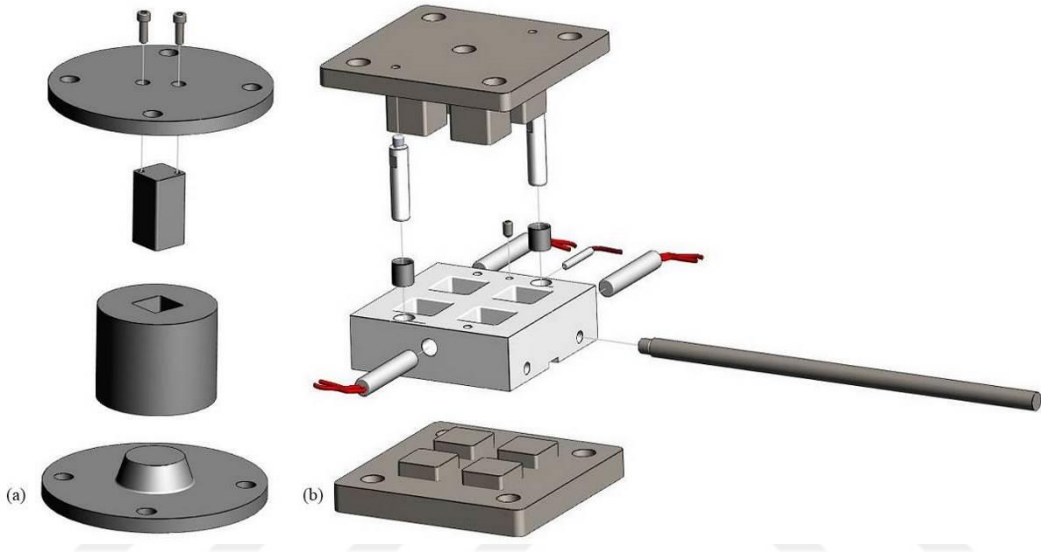


Resim 3.6 V-Shape karıştırma cihazı

3.2.8 Presleme Kalıpları

Karıştırılan tozlar için ön şekillendirme ve pişirme işlemlerinin yapılması için kalıp tasarımları yapılmıştır. 3 parçadan oluşan soğuk presleme kalıbı Resim 3.7 (a)’da

gösterilmiştir. Karıştırma cihazında homojen olarak karıştırılan toz malzemeler 1 inch² alanın içerisine yerleştirilerek, hidrolik pres yardımıyla ön şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Ön şekillendirmeden sonra pişirme işlemi için sıcak presleme kalıbı kullanılmıştır. Resim 3.7 (b)'de sıcak presleme kalıbı gösterilmiştir. Sıcak presleme kalıbı içerisinde 1 inch² boyutunda 4 ayrı bölme bulunmakta ve aynı anda 4 adet numune preslenebilmektedir.



Resim 3.7. (a) Soğuk presleme kalıbı, (b) Sıcak presleme kalıbı

3.2.9 Etüv Fırını

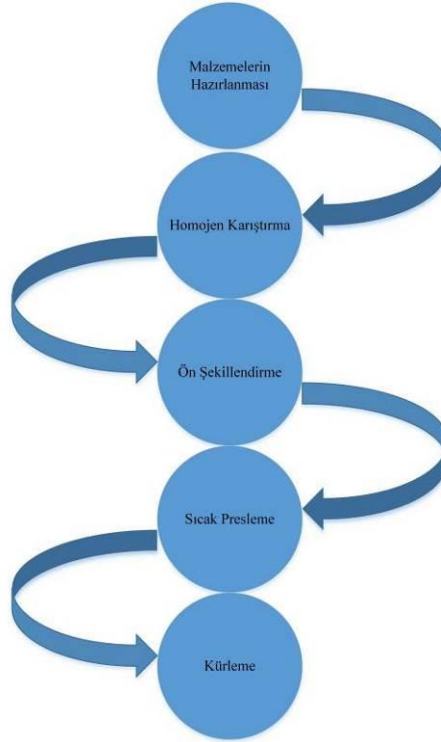
Sıcak preslemeden sonra numunelerin kürlenmesi için Resim 3.8'de gösterilen mikrotest marka etüv fırını kullanılmıştır. 250 °C sıcaklığa çıkabilen fırın 2 bölmeli ve 250 L hacme sahiptir.



Resim 3.8 Etüv fırını

3.3 Numunelerin Üretilmesi

Toz halinde hazırlanan numunelere ilk olarak karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma, fren balatası üretiminde ilk adımdır. Bu işlem malzemelerin eklenme sırası, karıştırma süresi, hızı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Her parametre, sürtünme malzemesinin mikro yapısını ve özelliklerini tanımlayan karışımın kalitesini etkiler (Makni vd. 2022; Rupiyawet vd. 2019). İyi karıştırma koşulları altında, iyice karıştırılmış bir karışım sağlamak için 10 ila 15 dk. karıştırma süreleri yeterli olmaktadır (Rupiyawet vd. 2019). Numuneler sırasıyla homojen karıştırma, Ön şekillendirme, sıcak presleme ve kütleme adımları uygulanarak üretilmiştir. Şekil 3.2’de üretim adımları gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Fren balatası üretim aşamaları

Üretimde kullanılacak toz malzemelerin homojen bir şekilde karışabilmesi için karıştırma aşaması iki adımda uygulanmıştır. İlk adım hazırlanan tozların V-shape karıştırıcı da karıştırılması, daha sonra rondo karıştırıcı da karıştırılmasıdır. Numuneler yüzdesel olarak belirtilen oranlarda 0,001 g hassasiyetindeki terazi ile tartılarak karıştırma cihazına eklenmiştir. Eklenen karışım, V-shape karıştırma cihazında 30 dk.

boyunca 15 d/dk dönüş hızında karıştırılmıştır. Daha sonra rondo karıştırıcı da 1 dk. boyunca 1200 d/dk dönüş hızında karıştırılmıştır. Bazı numunelerin ön şekillendirme işlemi sonrası kalıptan çıkarılma ve taşınma sırasında dağıldığı görülmüştür. Malzemenin ön şekillendirme aşamasında dağılmadan elde edilebilmesi için hazırlanan toz karışımlar soğuk kalıbın içerisine alınmadan önce karışımın üzerine %3 alkollü su pülverize olarak püskürtülmüştür.

Karıştırılan tozlar cihazdan alınarak soğuk presleme için hazırlanmıştır. İçerik optimizasyonu yapmak için numuneler üretilirken soğuk presleme süresi 3 dk. ve presleme basıncı 10 MPa olarak seçilmiştir. Her presleme de tek numune üretecek şekilde presleme işlemi yapılmıştır. Ön şekillendirme sonucu ortaya çıkan malzemeler tablet halindedir. Soğuk presleme işleminden sonra tablet halini alan malzemeler, pişirme işlemi için sıcak kalıbın içerisine yerleştirilir. Pres üzerinde alt ve üst tabla elektrik enerjisi ile ısıtılmaktadır. Ayrıca ısınma aşamasında zaman kaybının olmaması ve her noktada homojen sıcaklık elde edilebilmesi için sıcak kalıp 3 adet ısıtıcı rezistans ile ısıtılmaktadır. Sıcak presleme işlemi uygulanmadan önce presin alt ve üst tablası eşit sıcaklığa gelene kadar beklenir. Daha sonra içerisine tablet malzemeler yerleştirilerek presleme işlemine başlanır. İçerik optimizasyonu yapılan numuneler için sıcak presleme süresi 10 dk., basıncı 10 MPa ve sıcaklığı 150 °C olarak belirlenmiştir. Pişirme işlemi sırasında ilk %60'lık kısımda her 2 dakikada bir pres kalıpları açılarak gaz çıkışına müsaade edilmiş, bu sayede püskürtülen alkollü suyun ve sıcaklık sebebiyle balata bileşenlerinin oluşturduğu reaksiyonlar sonucu oluşan gazların dışarı atılması sağlanmıştır. Sıcak presleme işleminden sonra numunelere son olarak kürlendirme işlemi uygulanmıştır. Kürlendirme işlemi sonrası malzemenin mukavemeti arttığı için sürtünme performansını da olumlu etkilediği literatürdeki çalışmalarla desteklenmektedir (Hentati vd. 2014, Song vd. 2023). Bu yüzden içerik optimizasyonu yapılırken üretilen numuneler 8 s boyunca 150 °C sıcaklıkta etüv fırınında kürlenmiştir.

3.4 Ölçüm Yöntemleri

Kürlendirme işleminden sonra üretilen numunelerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin belirlenmesi için testler ve hesaplamalar yapılmıştır. Bu

işlemler; sürtünme katsayısı, yoğunluk, sertlik, taramalı elektron mikroskobu (SEM), 3 boyutlu profilometre, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesidir. Bu ölçüm ve hesaplama yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

3.4.1 Yoğunluk Ölçümü

Üretilen numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre çalışan bir deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.3’de yoğunluk ölçümü için kullanılan formül gösterilmiştir. Her numune için üç farklı yoğunluk değeri alınmış ve bu değerlerin ortalamaları alınarak her numunenin yoğunluğu belirlenmiştir.

$$Yoğunluk = \frac{m_h}{m_h - m_s} \times \rho_s \quad (3.3)$$

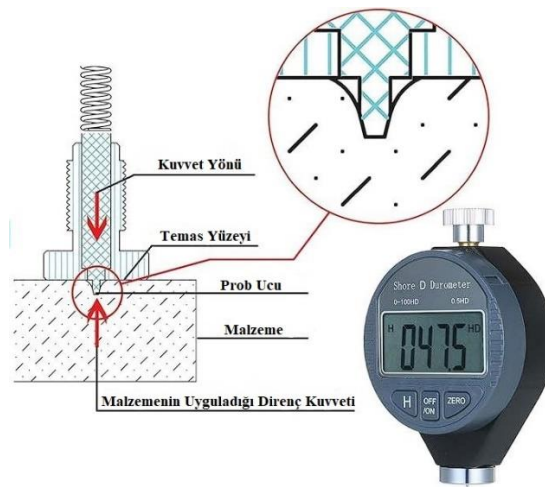
m_h = Numunenin havadaki kütlesi

m_s = Numunenin su içindeki kütlesi

ρ_s = Suyun yoğunluğu (saf su kullanıldığı için 1 g/cm³ olarak alınmıştır)

3.4.2 Sertlik Ölçümü

0-100 HD ölçüm aralığına sahip cihazın görseli ve çalışma mekanizması Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Shore D durometer sertlik ölçüm cihazı

Numunelerin sertlik ölçümleri Shore D durometer sertlik ölçüm cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler ASTM D2240 (2021) standartında malzemenin 3 farklı noktasından ölçüm yapıp ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

3.4.3 Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) kaydedilmiştir. Tungsten filaman ile çalışan LEO 1430 VP model SEM cihazı, ikincil elektron, geri yansıyan elektron ve RÖNTEC QX2 marka ve model X Flash tipi X ışınları detektörüne sahiptir. Cihaz, görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile karbon ve daha büyük çaplı atomları tespit ederek kalitatif ve yarı kantitatif olarak elementer analizler yapabilmektedir. Resim 3.9’da LEO 1430 VP SEM cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.9 Taramalı elektron mikroskobu

3.4.4 Üç Boyutlu Profilometre

Numunelerin deney sonrası yüzey pürüzlülüklerini ölçmek için Nanovea marka ST400 üç boyutlu optik profilometre kullanılmıştır. Cihaz, ISO25178 (2012) standardına uygun olarak, yüzey pürüzlülüğü değerlerini ölçebilmektedir. Bu değerler arasında ortalama pürüzlülük değerinin karekökü (S_q), en yüksek tepe noktası pürüzlülüğü (S_p), en büyük çukur derinliği pürüzlülüğü (S_v), profilin maksimum yükseklik değeri ortalamaları (S_z) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (S_a) bulunmaktadır. Ölçümler, deney sonrası numunelerin sürtünmüş yüzeyinde $100 \times 100 \mu m^2$ ’lik bir alanda, $5 \mu m$ tarama adım

aralığında ve 2000 Hertz tarama frekansı ile gerçekleştirilmiştir. Resim 3.10'da 3 boyutlu yüze profilometre cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.10 3 Boyutlu profilometre

3.4.5 Özgül Aşınma Oranının Belirlenmesi

Özgül aşınma oranı TS 555'te belirtildiği üzere kütle kaybı metoduna göre hesaplanmıştır. Numuneler sürtünme deneyine başlamadan önce ve deney sonrasında 0,001 g hassasiyetinde hassas terazide kütleleri tartılmış kaydedilmiştir. Aradaki fark kütle kaybı olarak belirlenmiştir. Özgül aşınma oranı hesaplanması için kullanılan Denklem 3.4'de gösterilmiştir.

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

V= Özgül aşınma oranı (cm³/Nm)

m₁= Deney öncesi ölçülen balata kütlesi (g)

m₂= Deney sonrası ölçülen balata kütlesi (g)

ρ= Balata yoğunluğu (gr/cm³)

R_d= Disk yarıçapı (m)

f_m= Deney sonucu ortalama sürtünme kuvveti (N)

n= Toplam devir sayısı (devir)

3.4.6 Sürtünme Stabilitesi

Sürtünme stabilitesi frenleme basıncı ve kayma hızının bir fonksiyonu olarak belirlenir. Sürtünme stabilitesinin büyüklüğü mümkün olduğu kadar yüksek ve 100'e yakın

olmalıdır. Ayrıca sürtünme eğrisindeki eğim ve dalgalanmalar minimum düzeyde olmalıdır. Sürtünme stabilitesi ortalama sürtünme katsayısının maksimum sürtünme katsayısına oranı ile belirlenir ve yüzdesel olarak ifade edilir. Denklem 3.5’de sürtünme stabilitesinin hesaplanması gösterilmiştir.

$$SS = \frac{\mu_{ort}}{\mu_{max}} \times 100 \quad (3.5)$$

SS= Sürtünme Stabilitesi

μ_{ort} = Deney boyunca oluşan ortalama sürtünme katsayısı

μ_{max} = Deney boyunca oluşan maksimum sürtünme katsayısı

3.4.7 Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Numunelerin su, tuzlu su, yağ ve fren sıvısına dayanımını belirlemek için TS 9075’te belirtilen deney şartları uygulanmıştır. Numuneler sıvıya konulmadan önce her noktadan kalınlık ölçümü yapılmıştır. Su deneyleri için saf su kullanılmıştır. Tuzlu su deneyleri için 1 L suya 100 gr sodyum klorür katılmıştır. Yağ ve fren sıvısı deneyi için numuneler 48 s sıvı içerisinde tutulmuş ve TS 3563’te belirtilen yağ özelliklerini taşıyan 2 numaralı yağ kullanılmıştır. 2 numaralı yağın özellikleri kinematik viskozitesi 20 m²/s ve parlama noktası 240 °C’dir. Bu yağ sıvısı piyasadan temin edilerek deneyler yapılmıştır. Numuneler sıvıların içerisinde çıkarıldıktan sonra kurutma kâğıdı ile kurutulmuş ve ilk 10 dakika içerisinde ölçümler yapılmış ve değerler kaydedilmiştir.

3.5 Çok Genli Genetik Programlama Parametreleri

Çok Genli Genetik Programlama (ÇGGP) tahmin algoritmasında çeşitli parametreler yer almaktadır. Parametre seçimi ÇGGP’nin model genelleme yeteneğini etkiler. Bu parametreler daha önce önerilen bazı değerlere dayalı olarak ve deneme-yanılma yaklaşımından sonra seçilir. Bu çalışmada, optimum ÇGGP modellerini elde etmek için temel aritmetik operatörler ve matematiksel fonksiyonlardan yararlanılmıştır. Programdaki popülasyonların sayısı popülasyon büyüklüğüne göre belirlenir. Nesil sayısı, algoritmanın çalıştırma sonlandırılmadan önce kullandığı düzey sayısını belirler.

Uygun popülasyon ve nesil sayısı genellikle sorunların karmaşıklığına ve olası çözümlerin sayısına bağlıdır. Minimum hataya sahip modelleri bulmak için oldukça fazla sayıda popülasyon ve nesil test edilir. Programlar, çalıştırmalar otomatik olarak sonlandırılana kadar çalıştırılır. Bir bireyde izin verilen maksimum gen sayısı ve maksimum ağaç derinliği, arama alanının boyutunu ve arama alanı içinde keşfedilen çözümlerin sayısını doğrudan etkiler. ÇGGP algoritmasının başarısı genellikle bu parametrelerin artmasıyla artar. Bu durumda geliştirilen fonksiyonun karmaşıklığı artmakta ve algoritmanın hızı azalmaktadır. GPTIPS araç kutusu, MATLAB 2018a'da kodlanmış alt rutinlerle birlikte ÇGGP'yi uygulamak için kullanılır. Uygunluk işlevi (fitness function), en iyi kodlanmış ifadeleri belirlemek için geliştirilmiş ifadeleri değerlendirir. Varsayılan GPTIPS çoklu gen sembolik regresyon fonksiyonu, ölçülen ve tahmin edilen çıktı arasındaki ortalama karekök hatasını (RMSE) en aza indirmek için kullanılır (Gandomi ve Alavi 2012).

Analizler için mevcut veri setleri rastgele eğitim ve doğrulama alt kümelerine bölünür. Eğitim verileri öğrenme (genetik evrim) için kullanılır. Doğrulama verileri, ÇGGP tarafından geliştirilen programların, modellerin oluşturulmasında hiçbir rol oynamayan veriler üzerindeki performansını ölçmek için kullanılır. Tutarlı bir veri bölümü elde etmek için eğitim ve test setlerinin çeşitli kombinasyonları dikkate alınır. Seçim, parametrelerin maksimum, minimum, ortalama ve standart sapmasının eğitim ve test veri setlerinde tutarlı olmasını sağlayacak şekilde yapılır. En iyi modeller aşağıdaki gibi çok amaçlı bir strateji temelinde seçilir:

- Modelin basitliği.
- Eğitim veri seti üzerinde en iyi uygunluk değerinin sağlanması.

İlk hedef, parametre ayarları (örneğin, maksimum ağaç derinliği veya gen sayısı) aracılığıyla kullanıcı tarafından kontrol edilebilir. Ortalama karekök hata (RMSE), belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), karesel hatanın toplamı (SSE) ve ortalama karesel hata (MSE) önerilen korelasyonların yeteneklerini değerlendirmek için kullanılır. RMSE, R^2 , MAE, SSE, MSE formüller halinde şu şekilde verilmiştir:

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^d - x_i^t)^2}{N} \right]} \quad (3.6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i^d - x_i^t)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i^d - \text{ortlama}(x_i^d))^2} \quad (3.7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i^d - x_i^t|}{N} \quad (3.8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N (x_i^d - x_i^t)^2 \quad (3.9)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i^d - x_i^t)^2}{N} \quad (3.10)$$

N= Numunelerin sayısı

x^d = Deneysel sonuç

x^t = Tahmin sonucu

olarak ifade edilmiştir.

Genetik programlama yönteminde sonuçları modellemek için 8 adet giriş değişkeni belirlenmiştir. Bu giriş değişkenleri deneysel çalışmada kullanılan toz malzemeleridir. Çıkış değerleri ise sürtünme katsayısı, sürtünme stabilitesi ve özgül aşınma oranıdır. Genetik programlama rastgele matematik fonksiyonlarını ve giriş parametrelerini kullanarak her seferinde farklı modeller oluşturduğundan dolayı en yüksek doğruluk oranını yakalayabilmek için 100'den fazla deneme yapılmıştır. Bu denemelerde sürtünme katsayısı için popülasyon büyüklüğü 100, nesil sayısı 3000, sürtünme stabilitesi için popülasyon büyüklüğü 300, nesil sayısı 300, özgül aşınma oranı için popülasyon büyüklüğü 200, nesil sayısı 300 olarak belirlenmiştir. Numuneler %85 oranında eğitim için ayrılmıştır. Kalan %15'si test için kullanılmıştır. Toplamda 46 adet numunenin 39 tanesi eğitim kalan 7 tanesi ise test için seçilmiştir. Genetik Programlama tabanlı modeli oluşturmak için MATLAB 2018a'da yazılmış alt rutinlerle birleştirilmiş açık kaynaklı GPTIPS araç seti kullanılmıştır (Searson vd. 2010). Çizelge 3.5'de genetik programlama giriş parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 Genetik programlama giriş parametreleri

Parametre	Ayarlar		
	Ortalama SK	Sürtünme Stabilitesi	Özgül Aşınma Oranı
Popülasyon büyüklüğü	100	300	200
Nesil sayısı	3000	300	300
Turnuva büyüklüğü	15	2	2
Maksimum genler	20	20	20
Matematiksel işlemler	$+, -, \times, /, \sqrt{}, ()^2, \text{add3}, \text{mult3}$	$+, -, \times, /, \sqrt{}, ()^2, \text{add3}, \text{mult3}$	$+, -, \times, /, \sqrt{}, ()^2, \text{add3}, \text{mult3}$
Ağaç derinliği	4	4	4
Çaprazlama olasılığı	0,84	0,84	0,84
Mutasyon olasılığı	0,14	0,14	0,14
Uygunluk fonksiyonu	RMSE	RMSE	RMSE
Giriş değişken sayısı	8	8	8

4. BULGULAR

4.1 İçerik Optimizasyonu Sonuçları

İçerik optimizasyonu sonucunda 46 adet numunenin yoğunluk, sertlik, sürtünme performansı, zgl aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, SEM, 3 boyutlu yüzey profilometre ve bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların bazıları izelge 4.1’de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.1 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin deney sonuçları

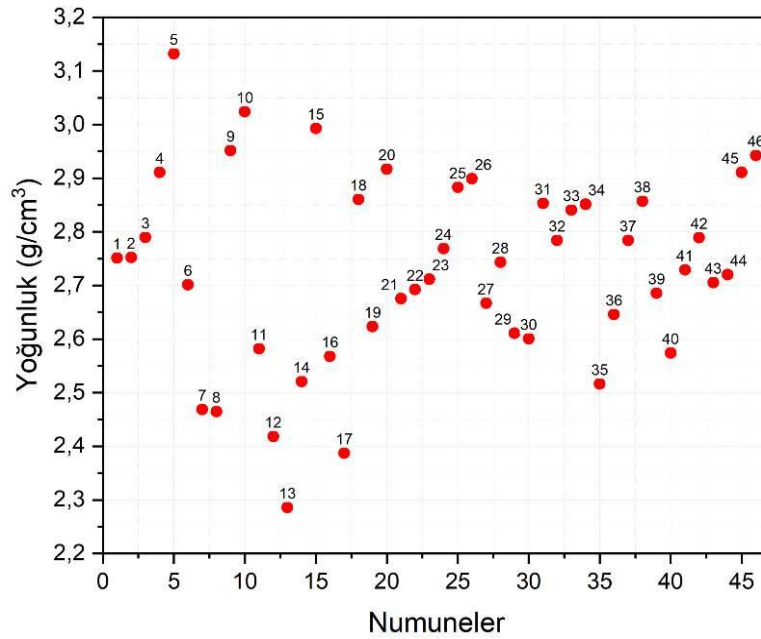
No	Ortalama SK	Sürtünme Stabilitesi (%)	zgl Aşınma Oranı ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Yoğunluk (g/cm^3)	Sertlik (Shore D)
1	0,438	77,95	5,9027	2,751	90,17
2	0,439	69,75	6,0250	2,752	91,00
3	0,405	82,48	7,1189	2,790	89,67
4	0,397	77,39	5,5545	2,911	91,33
5	0,445	76,46	4,9803	3,132	89,33
6	0,493	75,73	5,9803	2,702	90,67
7	0,444	65,49	5,0272	2,469	92,17
8	0,398	68,38	5,9253	2,465	88,83
9	0,431	76,01	7,0731	2,952	92,83
10	0,483	81,59	7,1059	3,024	91,67
11	0,418	65,62	15,5023	2,582	91,83
12	0,445	83,80	4,2052	2,419	91,50
13	0,386	65,87	2,9205	2,286	89,17
14	0,452	68,59	6,9391	2,521	91,67
15	0,438	77,39	8,0338	2,993	88,83
16	0,446	71,25	4,9666	2,568	94,33
17	0,437	62,07	6,8751	2,387	93,33
18	0,476	73,57	6,8149	2,861	90,50
19	0,398	74,53	6,3873	2,623	92,33
20	0,497	78,64	6,5586	2,917	90,67
21	0,497	72,87	7,7478	2,675	92,00
22	0,498	75,58	13,9101	2,692	94,17
23	0,473	74,50	6,6366	2,711	91,33
24	0,445	74,39	5,5316	2,769	92,67
25	0,454	75,89	4,4255	2,883	91,83
26	0,441	81,71	5,9110	2,899	92,17
27	0,418	79,75	6,9496	2,667	91,00
28	0,454	77,17	6,6589	2,743	91,50
29	0,426	71,06	5,2850	2,611	90,83

Çizelge 4.1 (Devam) İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin deney sonuçları

30	0,450	76,03	6,5579	2,600	89,83
31	0,457	82,45	8,6097	2,853	93,17
32	0,446	75,31	7,1340	2,784	93,67
33	0,374	76,34	7,4971	2,841	90,67
34	0,381	74,31	7,2345	2,851	93,17
35	0,474	71,64	6,4223	2,516	91,33
36	0,491	76,30	8,0201	2,646	91,00
37	0,490	76,10	13,1774	2,784	95,50
38	0,467	76,23	8,3526	2,857	93,83
39	0,449	78,26	5,6549	2,686	90,33
40	0,482	72,78	5,1461	2,574	90,00
41	0,371	75,10	5,5260	2,729	90,33
42	0,467	77,47	7,1677	2,789	93,17
43	0,519	77,53	9,9592	2,706	95,67
44	0,418	77,84	6,8735	2,720	92,00
45	0,443	67,84	7,1866	2,911	91,00
46	0,466	82,29	11,9583	2,942	94,50

4.1.1 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

İçerik optimizasyonu yapılan 46 numunenin yoğunluk ölçüm sonuçları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

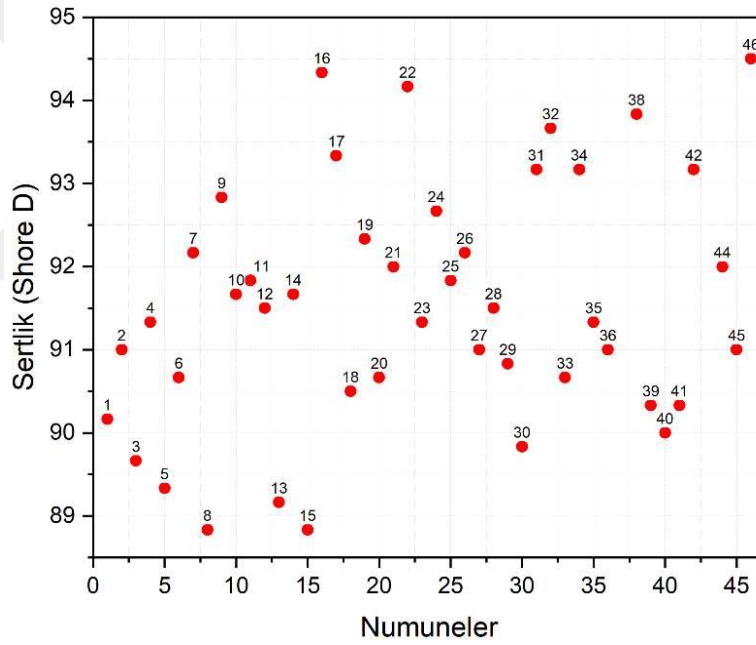


Şekil 4.1 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin yoğunluk ölçüm sonuçları

Elde edilen sonuçlara göre 5 numaralı numunede $3,132 \text{ g/cm}^3$ değeri ile en yüksek yoğunluk elde edilmiştir. En düşük yoğunluk ise $2,286 \text{ g/cm}^3$ ile 13 numaralı numunede ölçülmüştür. 46 numunenin ortalama yoğunluk değeri $2,729 \text{ g/cm}^3$ olmuştur.

4.1.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Numunelerin sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. En düşük sertliğe sahip numune 88,83 Shore D değeriyle %10 fenolik reçine kullanılan 15 numaralı numunede elde edilmiştir. En yüksek sertliğe sahip numune ise 95,57 Shore D sertlik değeriyle %15 alümina kullanılan 46 numaralı numunede ölçülmüştür. Numunelerin ortalama sertlik değerleri 91,71 Shore D olarak ölçülmüştür.



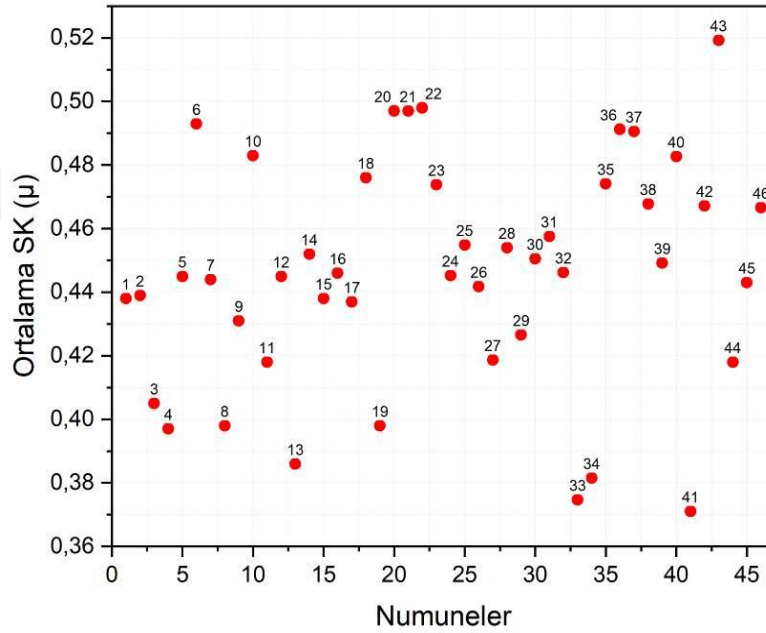
Şekil 4.2 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin sertlik sonuçları

Alümina nispeten diğer numunelere göre yüksek sertlikte bir malzeme olduğu için en yüksek sertlik kütlece en çok kullanıldığı numune de elde edilmiştir. Fenolik reçinenin kütlece %15-25 arasında kullanıldığı numunelerde yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. Fenolik reçine kütle oranının artması kürlleme işlemi sırasında çapraz bağlanma miktarını arttıracak ve numunenin sertlik değeri artacaktır (Nawangarsi vd. 2019). Literatürde yapılan birçok çalışmada fenolik reçine oranının artması sonucu numunenin

sertlik değerinin artış gösterdiği ifade edilmiştir (Kim vd. 2008, Nawangsari vd. 2019). Akıncıoğlu vd. (2021) numunelerin sertliğini Shore D sertlik ölçüm cihazıyla ölçmüşler ve sonuçlar 86-88 Shore D aralığında ölçülmüştür.

4.1.3 Sürtünme Performansı Sonuçları

İçerik optimizasyonu deneyleri sonucunda elde edilen numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sonuçları Şekil 4.3’de gösterilmiştir. En düşük ortalama SK değerine sahip numune 0,371 ile kütleli olarak %15 grafit içerip, Al_2O_3 içermeyen 41 numaralı deney numunesinde olmuştur. En yüksek ortalama SK değerine sahip numune ise 0,519 ile kütleli olarak %15 Al_2O_3 içerip, grafit içermeyen 43 numaralı deney numunesinde gerçekleşmiştir. Numunelerin ortalama SK değeri 0,446 olarak belirlenmiştir.

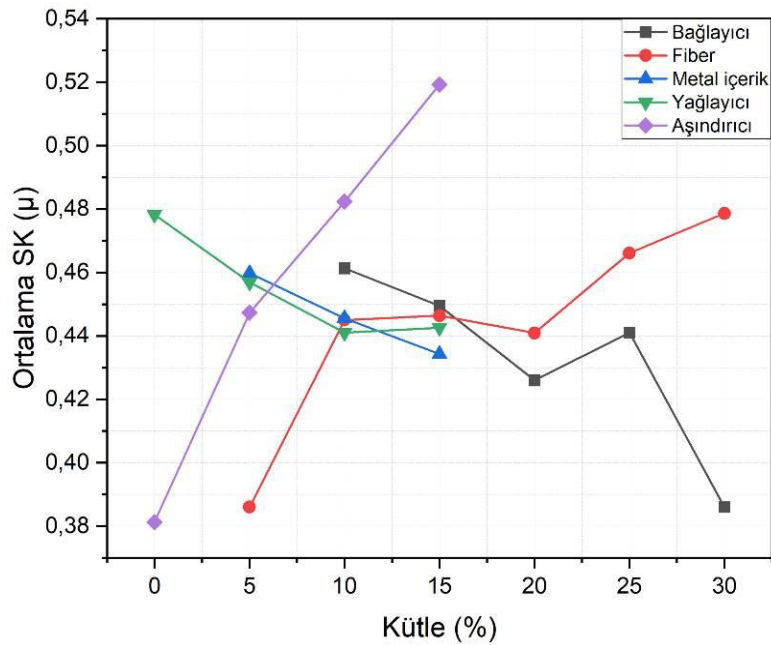


Şekil 4.3 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin ortalama SK değerleri

Grafit, numune ile disk arasında doğrudan temas noktalarını azaltarak sürtünme katsayısının azalmasına neden olur. Grafit altıgen yapıya sahip olup bazal düzlemler arasında zayıf olan Van der Waals atomik bağlarına sahiptir. Bu zayıf bağlar düşük yük ile kolayca kırılır. Başka bir deyişle grafitin kesme dayanımının çok düşük olması düzlemlerin birbiri üzerinde kaymasına ve sürtünme katsayısının azalmasına neden olur.

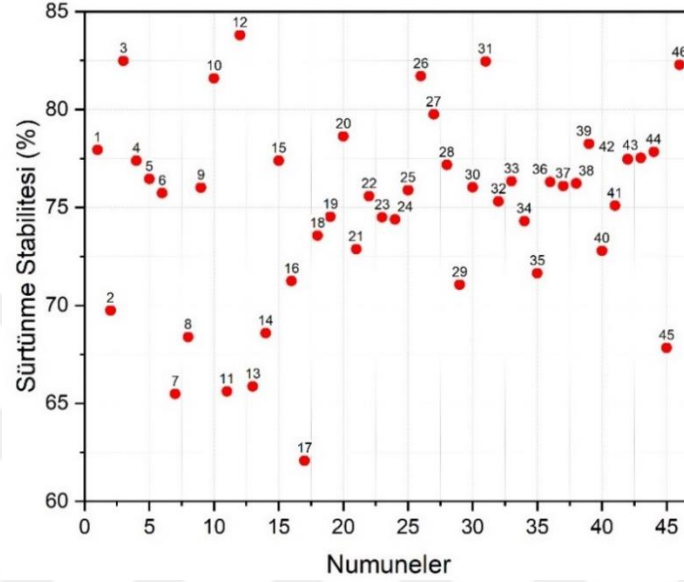
Grafitin sürtünme katsayısının azalmasına yol açan bir diğer özelliği de grafit parçacıklarının kayan yüzeylere yapışmasıdır; bu nedenle kayma, grafit parçacıklarının iç katmanları içinde gerçekleşir, böylece balata ve diskin birbirleri üzerinde kayması kolaylaşır (Sarmadi vd. 2013).

Şekil 4.4’de fren balatası içerisinde kullanılan bağlayıcı, metal içerik, fiber, yağlayıcı ve sürtünme düzenleyici malzemelerin farklı kütlelerde kullanımı sonucu ortalama sürtünme katsayılarındaki değişimi gösterilmiştir. Bağlayıcı malzemenin (fenolik reçine) yapı içerisindeki artışı ortalama SK’nın düşüş eğilimi göstermesiyle sonuçlanmıştır. Fei vd. (2010), Zhang vd. (2021), Nawangsari vd. (2018), Talib vd. (2015) yaptıkları çalışmalarda artan fenolik reçine hacmiyle fren balatalarında sürtünme katsayısının azaldığını belirlemişlerdir. Fiber içeriğinin yapı içerisindeki hacminin artmasıyla ortalama SK değerinde genel olarak bir artış gerçekleşmiştir. Yağlayıcı oranının bileşim içerisinde %10’a kadar eklenmesi ortalama SK değerinin azalmasına neden olmuştur. Aşındırıcı miktarının artması ortalama SK değerini önemli ölçüde arttırmıştır. Kütlece %0 aşındırıcı içeren numunelerin ortalama SK değeri 0,38 seviyelerinde iken, aşındırıcı oranının %15’e çıkarılmasıyla ortalama SK değeri 0,52 seviyelerine ulaşmıştır.



Şekil 4.4 Numunelerin kütlece değişim oranlarına bağlı ortalama SK değerleri

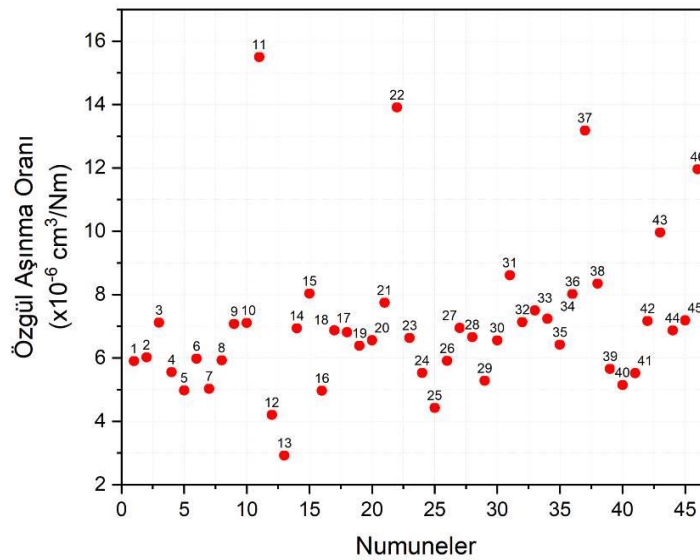
Numunelerin sürtünme performansları Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Sürtünme stabilitesi en düşük olan numune %62,07 ile 17 numaralı deney numunesi olmuştur. Sürtünme stabilitesi en yüksek olan numune ise %83,80 ile 12 numaralı deney numunesi olmuştur. Numunelerin ortalama sürtünme stabiliteği %74,98 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.5 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin sürtünme stabilitesi değerleri

4.1.4 Özgül Aşınma Oranı Sonuçları

Numunelerin özgül aşınma sonuçları Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 İçerik optimizasyonu için üretilen numunelerin özgül aşınma oranı değerleri

Elde edilen sonuçlara göre en düşük özgül aşınma oranı $2,9204 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ ile 13 numaralı deney numunesi olmuştur. En yüksek özgül aşınma oranı ise $1,5502 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ ile 11 numaralı deney numunesinde elde edilmiştir. Numunelerin ortalama özgül aşınma oranları $7,0745 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ olarak hesaplanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde fren balatalarının sertliği arttıkça aşınma oranının da artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, sert balataların disk üzerinde daha fazla aşındırıcı etkiye sahip olmasıdır. Bu etki, frenleme sırasında daha fazla sürtünme ve ısı oluşmasına yol açarak balatanın daha hızlı aşınmasına neden olur.

4.2 İçerik Optimizasyonunun Modellenmesi

İçerik optimizasyonu sonucunda 46 numunenin deneyleri yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. İçerik optimizasyonu sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı, sürtünme stabilitesi ve özgül aşınma oranı verileri kullanılarak genetik programlama algoritması geliştirilmiş ve bu çıktılar için modeller oluşturulmuştur.

4.2.1 Sürtünme Katsayısı Modeli ve Performans Göstergeleri

Deneyleri tamamlanmış ve sonuçları kaydedilmiş 46 deney içerisinde 39 tanesi eğitim, kalan 7 tanesi ise test için ayrılmıştır. Geliştirilen model doğrultusunda ortalama SK modeli Denklem 4.1’de gösterilmiştir. Burada 8 adet giriş parametresi; fenolik reçine (x_1), bronz tozu (x_2), pirinç talaşı (x_3), cam elyaf (x_4), çelik yünü (x_5), barit (x_6), grafit (x_7) ve alümina (x_8) olarak ifade edilmiştir. Sürtünme katsayısı performans göstergeleri belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karekök hata (RMSE), ortalama karesel hata (MSE) ve karesel hatanın toplamı (SSE) eğitim, test ve tüm veriler için Çizelge 4.2’de verilmiştir.

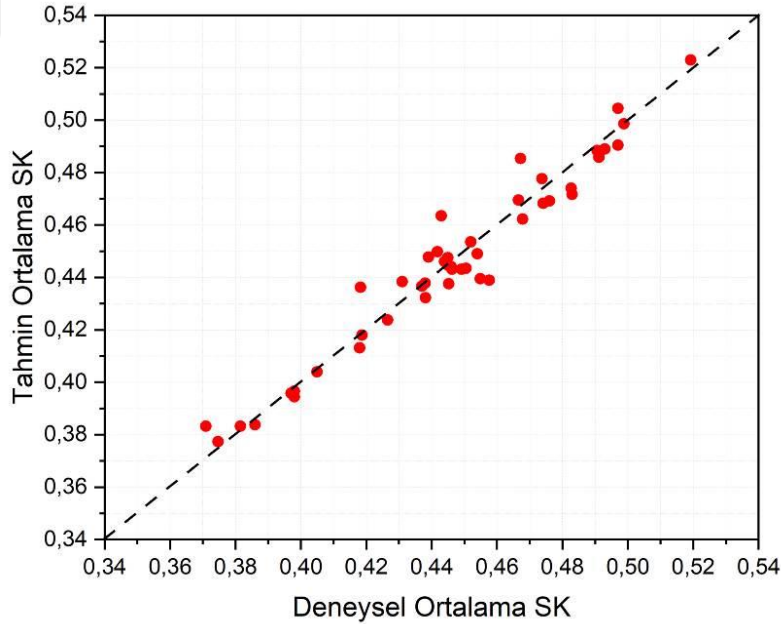
Çizelge 4.2 Sürtünme katsayısı modelinin performans göstergeleri

Parametre	Eğitim Verileri	Test Verileri	Tüm Veriler
R^2	0,96	0,90	0,95
MAE	0,004707	0,01198	0,005814
RMSE	0,006165	0,01368	0,007792
MSE	$3,80 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-4}$	$6,07 \times 10^{-5}$
SSE	0,001482	0,001311	0,002793

$$\begin{aligned}
SK = & 1,14.10^{-5}x_1x_5 - 0,0171x_2 - 0,0987x_4 - 4,96.10^{-4}x_7 - 0,0218x_1 - 0,0218x_5 - 0,0437x_8 + \\
& 0,0113x_2 / x_6 + 8,82.10^{-5}x_8x_4^2 + 3,26.10^{-5}x_4^2x_7 + 7,25.10^{-5}x_8^2x_1 - 4,96.10^{-4}x_3 / x_1 - 0,0218x_5 / x_6 + \\
& 8,82.10^{-5}x_4^2x_1 - 7,35.10^{-5}x_4x_5^2 + 1,21.10^{-4}x_5x_4^2 - 1,86.10^{-5}x_5x_4^{5/2} + 6,03.10^{-6}x_1x_5^2 + 0,0332x_8^{1/2} - \\
& 7,25.10^{-5}x_3^2 + 0,00213x_3^{1/2} - 8,19.10^{-4}x_2^2 - (6,07.10^{-4}x_2^2) / x_6^{3/2} + 0,203x_4^{1/2} - 1,83.10^{-5}x_4^{1/2} + \\
& 0,0472x_7^{1/2} - 4,96.10^{-4}x_7^{1/4} + 3,26.10^{-5}x_4^2x_7^{1/2} + 1,61.10^{-4}x_1^2 - 2,36x_1^{1/8} - 0,0842(2x_2 + x_7)^{1/2} - \\
& 7,08.10^{-4}x_3x_7 - 3.10^{-4}x_4x_7 + 1,14.10^{-5}x_6x_1 + 2,29.10^{-5}x_2x_1 + 1,14.10^{-5}x_7x_1 - 7,3.10^{-5}x_2x_4x_5 - \\
& 7,3.10^{-5}x_4x_7x_5 + 6,03.10^{-6}x_6x_1x_5 + 1,21.10^{-5}x_2x_1x_5 + 6,03.10^{-6}x_7x_1x_5 + (0,0171x_4^2x_5^2) / x_6^2 + \\
& 1,76.10^{-4}x_8x_6^{1/2}x_2 + (0,0332x_2x_4) / x_6 + 8,82.10^{-5}x_2x_6^{1/2}x_5 + (0,00252x_2x_1^2) / x_6 - (7,3.10^{-5}x_2x_7^2) / x_1 + \\
& (6,07.10^{-4}x_2^2x_4x_5) / x_6 - (2,17.10^{-6}x_2^2x_4x_5^2) / x_1 - (1,94.10^{-6}x_2^2x_4x_5^3) / x_1 - (1,94.10^{-6}x_2^2x_4x_5^3) / x_1^2 - \\
& (7,3.10^{-5}x_6x_4x_5) / x_1 + 4,67
\end{aligned} \tag{4.1}$$

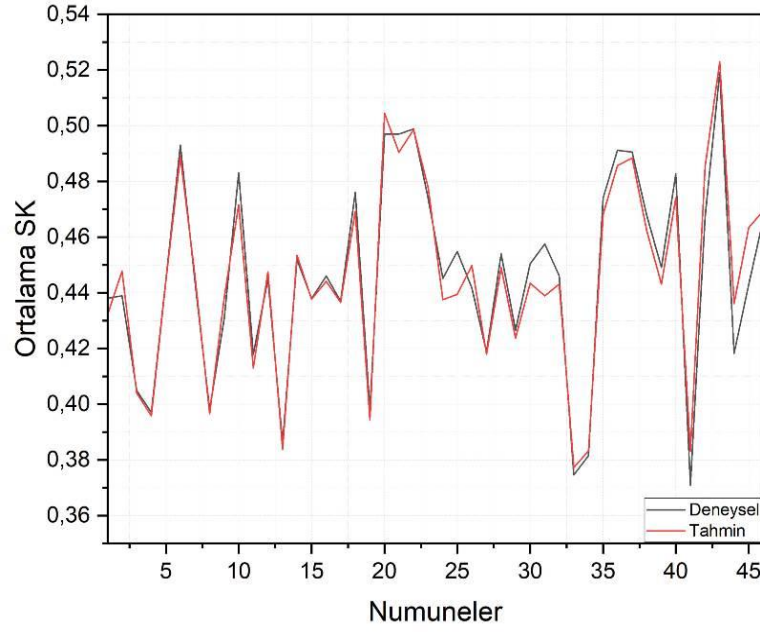
Çizelge 4.2 incelendiğinde belirleme katsayısı eğitim veri seti için 0,96; test verileri için 0,90 ve tüm veriler için 0,95 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.7’de deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ve model tarafından tahmin edilen tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayılarının noktasal dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Deneysel ve tahmin edilen ortalama SK noktasal grafiği

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen tüm numunelerin, model tarafından tahmin edilen değerlerle birlikte oluşturulan çizgi grafiği Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Deneysel ve tahmin edilen ortalama SK çizgisel grafiği

4.2.2 Özgül Aşınma Oranı Modeli ve Performans Göstergeleri

Geliştirilen model doğrultusunda özgül aşınma oranı modeli Denklem 4.2’de gösterilmiştir. Burada 8 adet giriş parametresi; fenolik reçine (x_1), bronz tozu (x_2), pirinç talaşı (x_3), cam elyaf (x_4), çelik yünü (x_5), barit (x_6), grafit (x_7) ve alümina (x_8) olarak ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \text{ÖAO} = & 7,95 \cdot 10^{-6} x_3 - 5,05 \cdot 10^{-9} x_6 + 2,04 \cdot 10^{-7} x_2 + 7,7 \cdot 10^{-7} x_4 - 1,64 \cdot 10^{-8} x_7 + 9,53 \cdot 10^{-8} x_1 - 8,96 \cdot 10^{-8} x_5 + \\
 & (3,99 \cdot 10^{15} x_1) / (3,78 \cdot 10^{22} x_3 - 3,78 \cdot 10^{22} x_4 + (3,78 \cdot 10^{22} x_6) / x_1 + 3,78 \cdot 10^{22} x_4^{1/2}) - 5,8 \cdot 10^{-10} x_6 x_3^3 - \\
 & 8,71 \cdot 10^{-8} x_3^2 x_4 + 7,87 \cdot 10^{-9} x_3^3 x_4 - (6,25 \cdot 10^{14} x_1) / ((2,36 \cdot 10^{21} x_6) / x_1 + 4,72 \cdot 10^{21} x_4^{1/2}) + (1,64 \cdot 10^{-8} x_6) / x_1 + \\
 & (1,64 \cdot 10^{-8} x_1) / x_6 + 1,64 \cdot 10^{-8} x_8^2 - 1,74 \cdot 10^{-7} x_3^3 + 1,46 \cdot 10^{-8} x_3^4 + 3,72 \cdot 10^{-10} x_4^{1/2} - (3,95 \cdot 10^{-9} x_6^2) / x_1 - \\
 & (4,29 \cdot 10^{15} x_1) / (1,89 \cdot 10^{22} x_3 - 1,89 \cdot 10^{22} x_4 + 1,89 \cdot 10^{22} x_7^{1/2} + 1,89 \cdot 10^{22} x_1^{1/2}) + 3,59 \cdot 10^{-9} x_6 x_7 - 2,98 \cdot 10^{-8} x_3 x_1 - \\
 & 2,51 \cdot 10^{-10} x_6 x_3 x_7 - 6,06 \cdot 10^{-10} x_6 x_4 x_7 + 3,72 \cdot 10^{-10} x_6 x_3 x_1 + 1,1 \cdot 10^{-10} x_6 x_7 x_1 + 2,51 \cdot 10^{-10} x_6 x_5 x_7 + \\
 & 6,06 \cdot 10^{-10} x_4 x_5 x_7 - 1,1 \cdot 10^{-10} x_5 x_7 x_1 - (1,95 \cdot 10^{-7} x_3 x_4) / x_1 + 3,72 \cdot 10^{-10} x_3 x_4 x_5^2 + (2,24 \cdot 10^{15} x_6 x_4^2) / \\
 & (7,56 \cdot 10^{22} x_4 + 3,78 \cdot 10^{22} x_1) + (3,95 \cdot 10^{-9} x_6^2 x_3) / x_1^2 + (3,95 \cdot 10^{-9} x_7^2 x_6) / x_1 - (3,95 \cdot 10^{-9} x_6^2 x_7) / x_1^2 - \\
 & (2,24 \cdot 10^{15} x_6 x_3 x_4) / (7,56 \cdot 10^{22} x_4 + 3,78 \cdot 10^{22} x_1) - (3,95 \cdot 10^{-9} x_3 x_6 x_7) / x_1 - 1,89 \cdot 10^{-5}
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

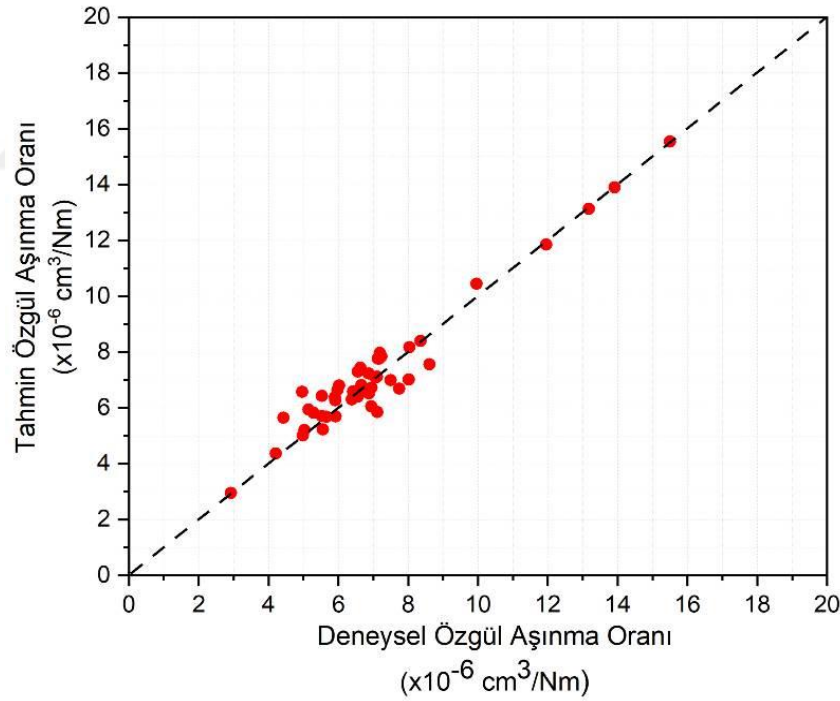
Özgül aşınma oranı performans göstergeleri belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karekök hata (RMSE), ortalama karesel hata (MSE) ve karesel hatanın toplamı (SSE) eğitim ve test verileri için Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Özgöl aşınma oranı modelinin performans göstergeleri

Parametre	Eğitim Verileri	Test Verileri	Tüm Veriler
R^2	0,93	0,92	0,93
MAE	$4,3779 \times 10^{-7}$	$5,7664 \times 10^{-7}$	$4,5892 \times 10^{-7}$
RMSE	$6,0356 \times 10^{-7}$	$6,3286 \times 10^{-7}$	$6,0811 \times 10^{-7}$
MSE	$3,6428 \times 10^{-13}$	$4,0051 \times 10^{-13}$	$3,6979 \times 10^{-13}$
SSE	$1,4207 \times 10^{-11}$	$2,8036 \times 10^{-12}$	$1,7010 \times 10^{-11}$

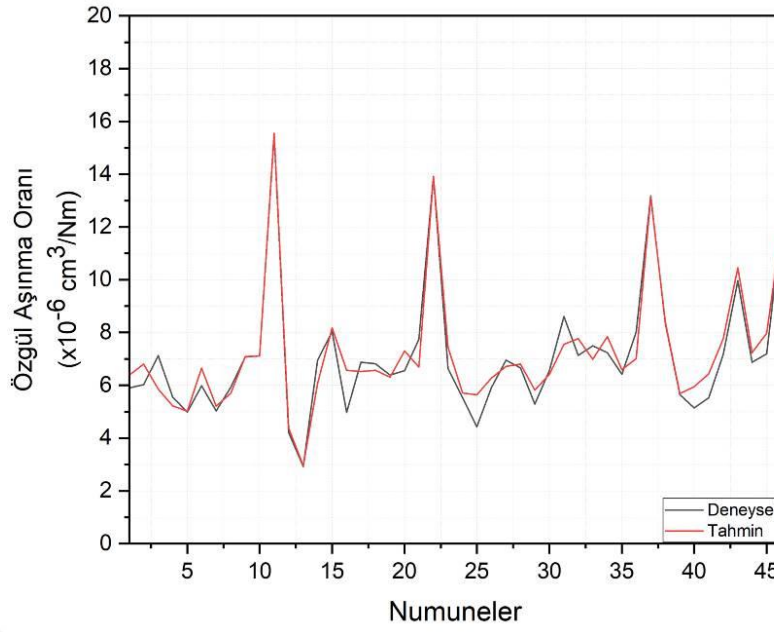
Çizelge 4.3 incelendiğinde belirleme katsayısı eğitim veri seti için 0,93; test verileri için 0,92 ve tüm veriler için 0,93 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.9’da deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ve model tarafından tahmin edilen tüm numunelerin özgöl aşınma oranlarının dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Deneysel ve tahmin edilen özgöl aşınma oranı noktasal grafiği

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen tüm numunelerin özgöl aşınma değerlerinin, model tarafından tahmin edilen değerlerle birlikte oluşturulan çizgi grafiği Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Deneysel ve tahmin edilen özgöl aşınma oranı çizgisel grafiği

4.2.3 Sürtünme Stabilitesi Modeli ve Performans Göstergeleri

Geliştirilen model doğrultusunda sürtünme stabilitesi modeli Denklem 4.3’de gösterilmiştir. Burada 8 adet giriş parametresi; fenolik reçine (x_1), bronz tozu (x_2), pirinç talaşı (x_3), cam elyaf (x_4), çelik yünü (x_5), barit (x_6), grafit (x_7) ve alümina (x_8) olarak ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 SS = & 0,236.x_2 - 2,52x_3 - 1,11x_8 - 9,06x_4 - 4,06x_1 + 0,0147x_5 + (5,16.10^{15}x_1) / \\
 & (2,25.10^{15}x_4 + (1,13.10^{15}x_5) / x_1 - 1,04.10^{16}) - (27x_4) / x_1^{1/4} - 1,38.10^{-4}(x_3x_2x_7)^{1/2} + \\
 & (1,57.10^{15}x_7^{1/2}) / (2,88.10^{17}x_6 - 2,88.10^{17}x_7) + 0,082(x_8x_3^2)^{1/2} + 0,312x_4^2 + \\
 & 78,5x_4^{1/2} - 0,00582x_5^2 - 1,21.10^{-4}x_7^2x_5^2 - (4,04.10^{15}x_1) / (2,81.10^{14}x_3 + 2,81.10^{14}x_4 + (4.3) \\
 & 2,81.10^{14}x_4^{1/2} - 2,61.10^{15}) - 0,00545x_8x_4 - 0,0217x_3x_4 - 0,0016x_4x_5 + \\
 & 0,00545x_2x_4x_1 - 0,0073x_2x_7x_1 + 2,25.10^{-5}x_8^2x_3x_4^2 + (1,85.10^{-4}x_3^2x_4^2x_7^2) / x_1 - \\
 & 1,38.10^{-4}x_2^2x_7x_1x_5 + 134
 \end{aligned}$$

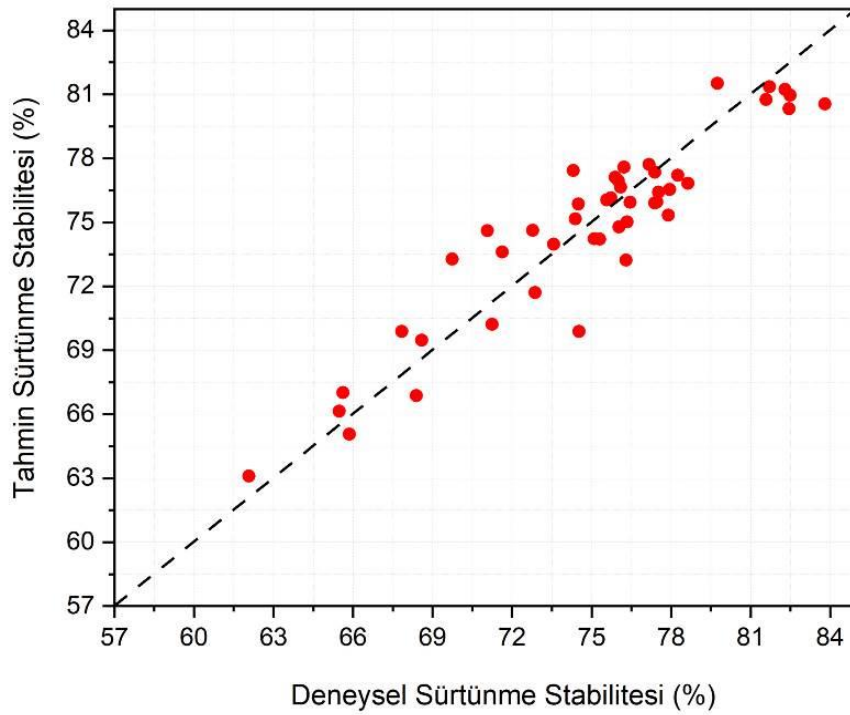
Sürtünme stabilitesi performans göstergeleri belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karekök hata (RMSE), ortalama karesel hata (MSE) ve karesel hatanın toplamı (SSE) eğitim ve test verileri için Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Sürtünme stabilitesi modelinin performans göstergeleri

Parametre	Eğitim Verileri	Test Verileri	Tüm Veriler
R^2	0,87	0,84	0,86
MAE	1,44	1,57	1,46
RMSE	1,76	1,67	1,75
MSE	3,11	2,79	3,06
SSE	121,63	19,57	141,20

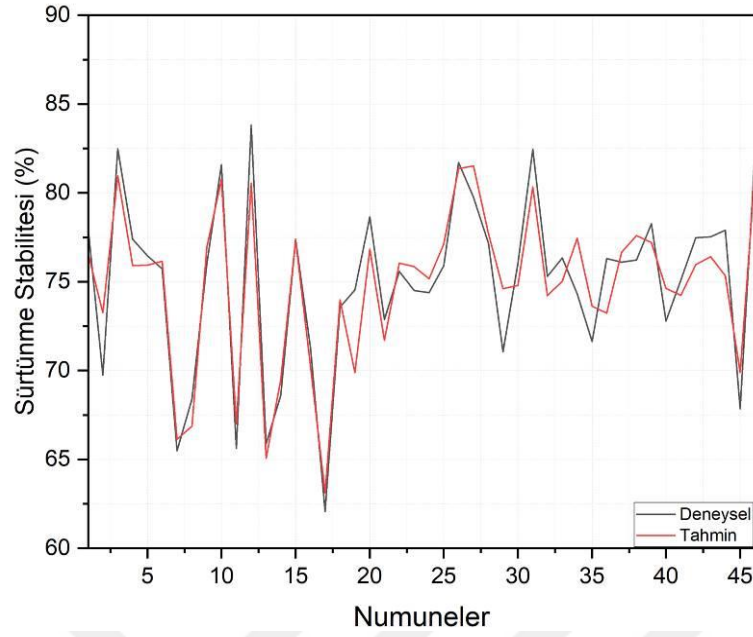
Çizelge 4.4 incelendiğinde belirleme katsayısı eğitim veri seti için 0,87; test verileri için 0,84 ve tüm veriler için 0,86 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.11’de deneysel çalışmalar sonucunda sürtünme stabilitesi elde edilen 46 numunenin model tarafından tahmin edilen değerlerle birlikte oluşturulan dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Deneysel ve tahmin edilen sürtünme stabilitesi noktasal grafiği

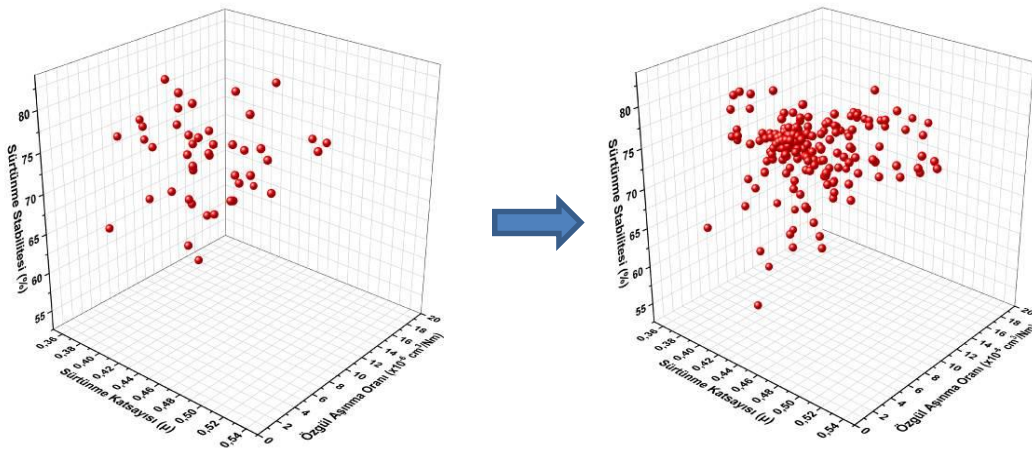
Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen tüm numunelerin özgül aşınma değerlerinin, model tarafından tahmin edilen değerlerle birlikte oluşturulan çizgi grafiği Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Deneysel ve tahmin edilen sürtünme stabilitesi çizgisel grafiği

4.2.4 Geliştirilen Modeller Tarafından Ara Değerlerin Bulunması

Doğruluk değerleri yukarıda belirtilen Ortalama SK, özgül aşınma oranı ve sürtünme stabilitesi için geliştirilen modeller kullanılarak deney planında bulunan ara değerler hesaplatılmıştır. Ara değerlerle birlikte deney planı 194 farklı içeriğe çıkartılmış ve bu sonuçlar kaydedilmiştir. Şekil 4.13’de deneyleri yapılmış ve sonuçları kaydedilmiş 46 deney ile geliştirilen modellerle tahmin edilmiş 194 içeriğin ortalama SK, özgül aşınma oranı ve sürtünme stabilitesinin 3 boyutlu noktasal grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Deneysel ve tahmin edilen verilerin 3 boyutlu noktasal grafiği

Ortalama SK değerleri 194 içerik için 0,377 ve 0,540 değerleri arasında elde edilmiştir. Özgül aşınma oranı değerleri $2,95 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ ve $17,75 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ arasında belirlenmiştir. Ve son olarak sürtünme stabilitesi değerleri %55,63 ile %81,5 arasında belirlenmiştir.

194 deney sonucu model ile tahmin edildikten sonra içerik belirleme işlemi yapılmıştır. Fren balatalarında yüksek sürtünme katsayısı, düşük özgül aşınma değeri ve yüksek sürtünme stabilitesi istenilen özellikler arasındadır. Bu yüzden içerik belirlenirken bu üç faktör dikkate alınarak belirlenmiştir. Üç aşamalı filtreleme işlemi sırasında içerik belirlenirken aşağıdaki kural uygulanmıştır.

- Ortalama SK > 0,45;
- Özgül Aşınma Oranı < $7 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$
- Sürtünme Stabilitesi > %75

Bu kural sonucunda önce ortalama SK değerleri 0,45'den büyük olanlar seçilmiş, daha sonra bu seçilen değerler arasında özgül aşınma oranı $7 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ 'den küçük olan değerler belirlenmiş ve son olarak da kalan değerler arasında sürtünme stabilitesi en yüksek olan değer seçilmiş ve içerik optimizasyonu tamamlanmıştır. Belirlenen deneyin içeriği Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Model tarafından belirlenen optimum içeriğin kütleli yüzdeleri

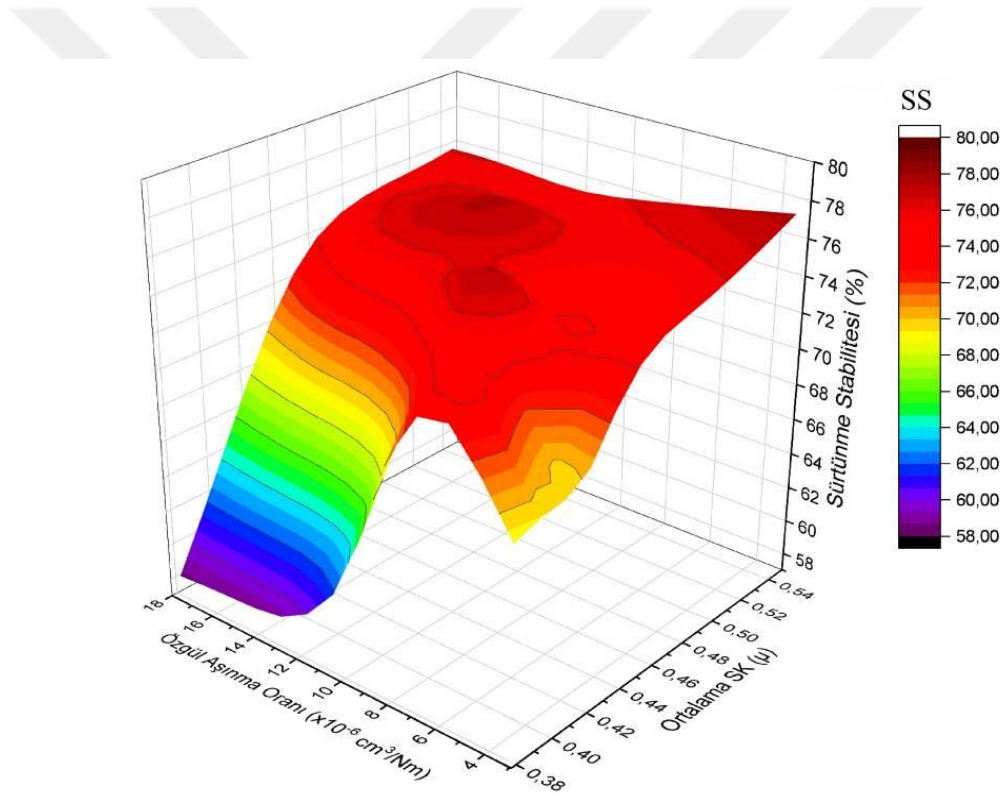
No	Fenolik Reçine	Bronz Tozu	Pirinç Talaşı	Cam Elyaf	Çelik Yünü	Barit	Grafit	Alümina	Toplam
86	12	5	5	15	5	40	10	8	100

Modelin tahmin ettiği 86 numaralı içerik numunesi deneyleri yapılan numunelerle aynı şartlar altında üretilmiş ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.6'da modellerin tahmin ettiği değerler, deney sonucu elde edilen değerler ve doğruluk oranları gösterilmiştir. Deney sonucunda elde edilen bilgilere göre geliştirilen modeller ortalama SK için %98,51, özgül aşınma oranı için %89,58 ve sürtünme stabilitesi için %98,49 doğruluk oranıyla tahmin etmiştir.

Çizelge 4.6 Model tarafından belirlenen içeriğin deneysel karşılaştırılması

	Model sonucu	Deney Sonucu	Doğruluk oranı (%)
Ortalama SK (μ)	0,469	0,476	98,51
Özgöl Aşınma Oranı ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	6,880	7,680	89,58
Sürtünme Stabilitesi (%)	77,82	79,01	98,49

Şekil 4.14’de modeller tarafından geliştirilen ortalama SK, özgöl aşınma oranı ve sürtünme stabilitesinin 3 boyutlu yüzey grafiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde ortalama sürtünme katsayısının düştüğü, özgöl aşınma oranının arttığı bölgelerde sürtünme stabilitesinin düşük olduğu görülmüştür. Artan ortalama sürtünme katsayısı değeriyle sürtünme stabilitesinde de bir artış görülmüştür.



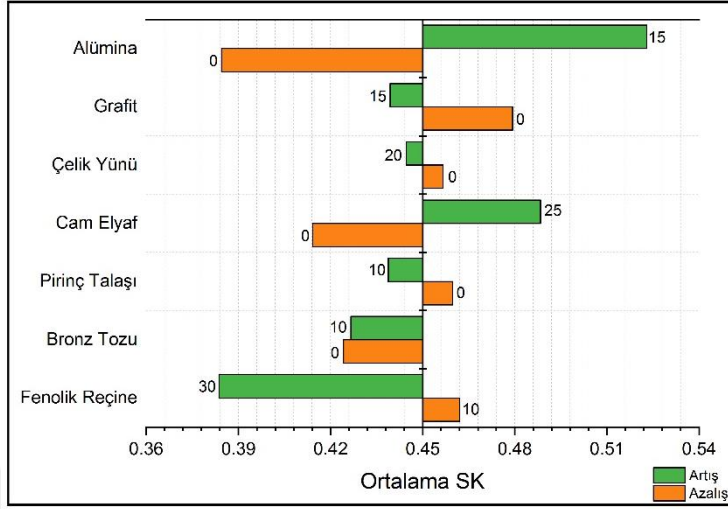
Şekil 4.14 Modeller kullanılarak elde edilen sonuçların 3 boyutlu yüzey grafiği

4.2.5 Duyarlılık Analizi

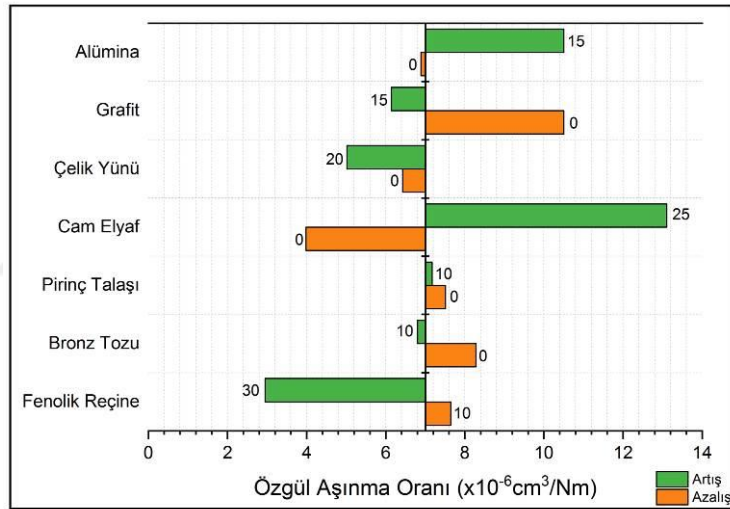
Çizelge 4.7’de fren balatası üretiminde kullanılan malzemelerin modeller tarafından tahmin edilen ortalama SK, özgöl aşınma oranı ve sürtünme stabilitesi üzerine etkisi tornado grafikleri kullanılarak duyarlılık analizi yapılmıştır.

Çizelge 4.7 Malzemelerin modeller tarafından tahmin edilen a) ortalama SK b) özgül aşınma oranı c) sürtünme stabilitesi üzerinde etkisi

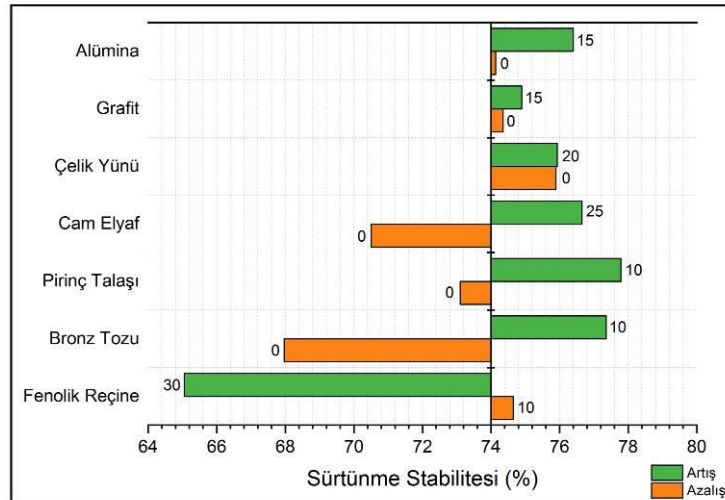
a)



b)



c)



Çizelge 4.7-a incelendiğinde ortalama SK değerini en fazla arttıran malzemenin alümina ve daha sonra cam elyaf olduğu görülmüştür. Fenolik reçinenin kütlece artışı ortalama SK değerinin aşırı düşmesine yol açmıştır. Ortalama SK değerini en az etkileyen çelik yünü, pirinç talaşı ve bronz tozu olmuştur. Khazaei ve Shojaei (2015) yaptıkları çalışmada tornado grafiği kullanarak duyarlılık analizi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlarda alüminanın (ana aşındırıcı olarak) sürtünme katsayısını artırmada en büyük etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Çizelge 4.7-b incelendiğinde ortalama SK değerlerine benzer olarak; özgül aşınma oranını en çok arttıran malzemenin cam elyaf, daha sonra alümina olduğu görülmüştür. Fenolik reçinenin ise özgül aşınmayı en çok düşüren malzeme olduğu görülmektedir. Pirinç talaşı ise özgül aşınma oranı değişimini en az etkileyen malzeme olmuştur. Çizelge 4.7-c incelendiğinde pirinç talaşı, bronz tozu, cam elyaf, alümina, çelik yünü ve grafit malzemelerinin sürtünme stabilitesini arttırdığı, fenolik reçinenin ise sürtünme stabilitesinin azalttığı görülmüştür.

4.3 Üretim Parametresi Optimizasyonu Sonuçları

Materyal metot kısmında Çizelge 3.3’de belirtilen üretim parametresi deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Numunelerin; yoğunluk, sertlik, sürtünme performansı, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, SEM, 3 boyutlu yüzey profilometre ve bazı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8 Üretim parametresi için üretilen numunelerin deney sonuçları

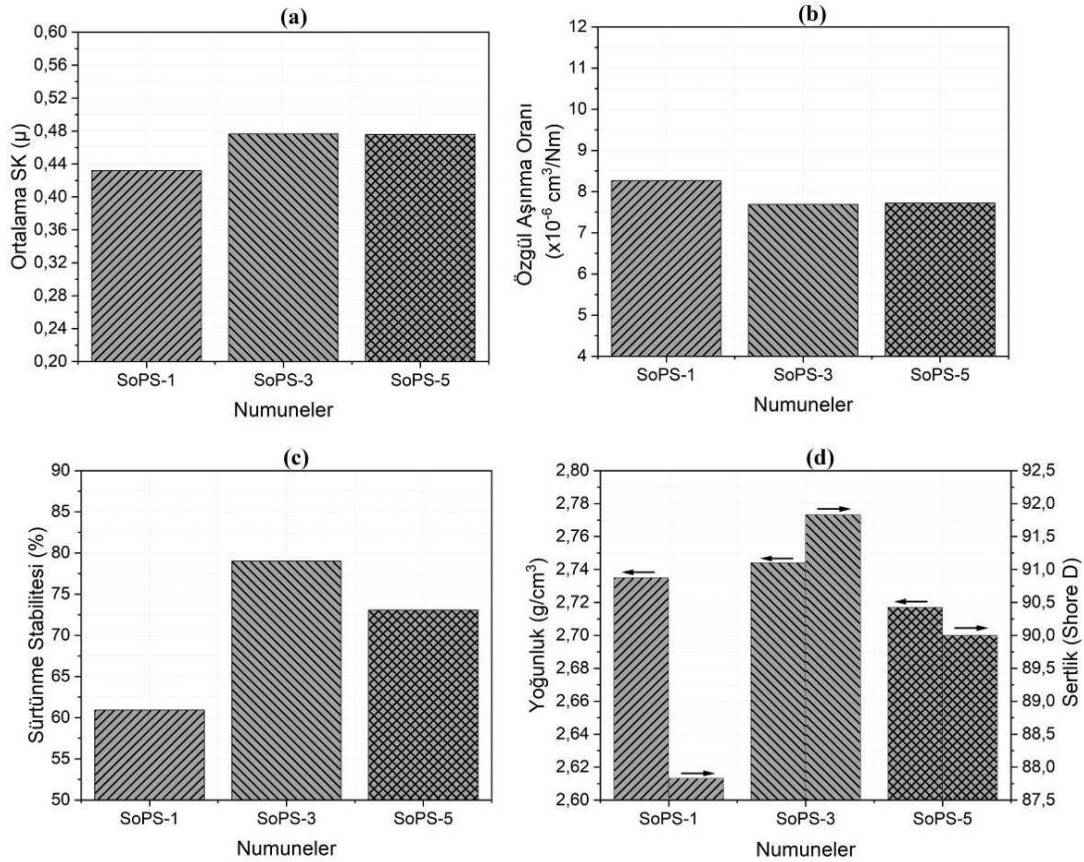
Numune	Ortalama SK	Sürtünme Stabilitesi (%)	Özgül Aşınma Oranı ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Yoğunluk (g/cm^3)	Sertlik (Shore D)
SoPS-1	0,431	60,93	8,2659	2,735	87,83
SoPS-3	0,476	79,01	7,6847	2,744	91,83
SoPS-5	0,475	73,08	7,7168	2,717	90
SoPB-8	0,479	73,56	9,3997	2,709	90,17
SoPB-10	0,476	79,01	7,6847	2,744	91,83
SoPB-12	0,500	78,30	7,6223	2,741	89,5
SiPS-5	0,455	63,70	10,7283	2,685	88
SiPS-10	0,476	79,01	7,6847	2,744	91,83
SiPS-15	0,496	79,42	7,7315	2,710	89,33
SiPB-8	0,437	67,63	10,3064	2,674	90
SiPB-10	0,476	79,01	7,6847	2,744	91,83
SiPB-12	0,547	77,23	9,3987	2,652	88,33

Çizelge 4.8 (Devam) Üretim parametresi için üretilen numunelerin deney sonuçları

S1PS1-125	0,468	70,77	9,1550	2,684	90,5
S1PS1-150	0,476	79,01	7,6847	2,744	91,83
S1PS1-175	0,507	75,30	9,3814	2,728	89,83
KS-4	0,430	70,86	8,2220	2,726	90,83
KS-8	0,476	79,01	7,6847	2,744	91,83
KS-12	0,553	77,33	10,3207	2,670	90,83
KS1-120	0,490	70,12	7,7066	2,738	91,67
KS1-150	0,476	79,01	7,6847	2,744	91,83
KS1-180	0,435	63,20	10,7437	2,672	90,83

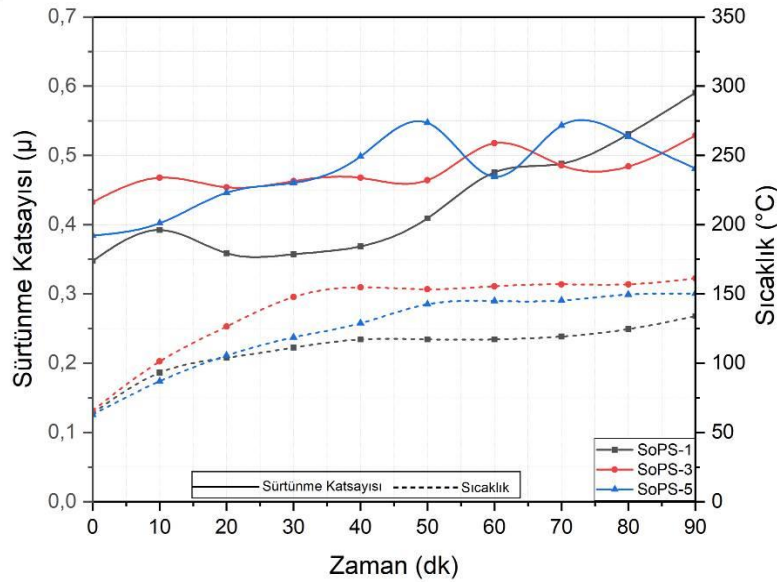
4.3.1 Soğuk Presleme Süresi ve Basıncının Etkisi

Soğuk presleme işlemi, homojen karıştırılan tozların soğuk presleme kalıbı içerisine alınarak ön şekillendirme yapıldığı işlemidir. Soğuk presleme süresi 1, 3 ve 5 dk olarak belirlenmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. SoPS-1, SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik sonuçları Şekil 4.15’de; zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.15 SoPS-1, SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları

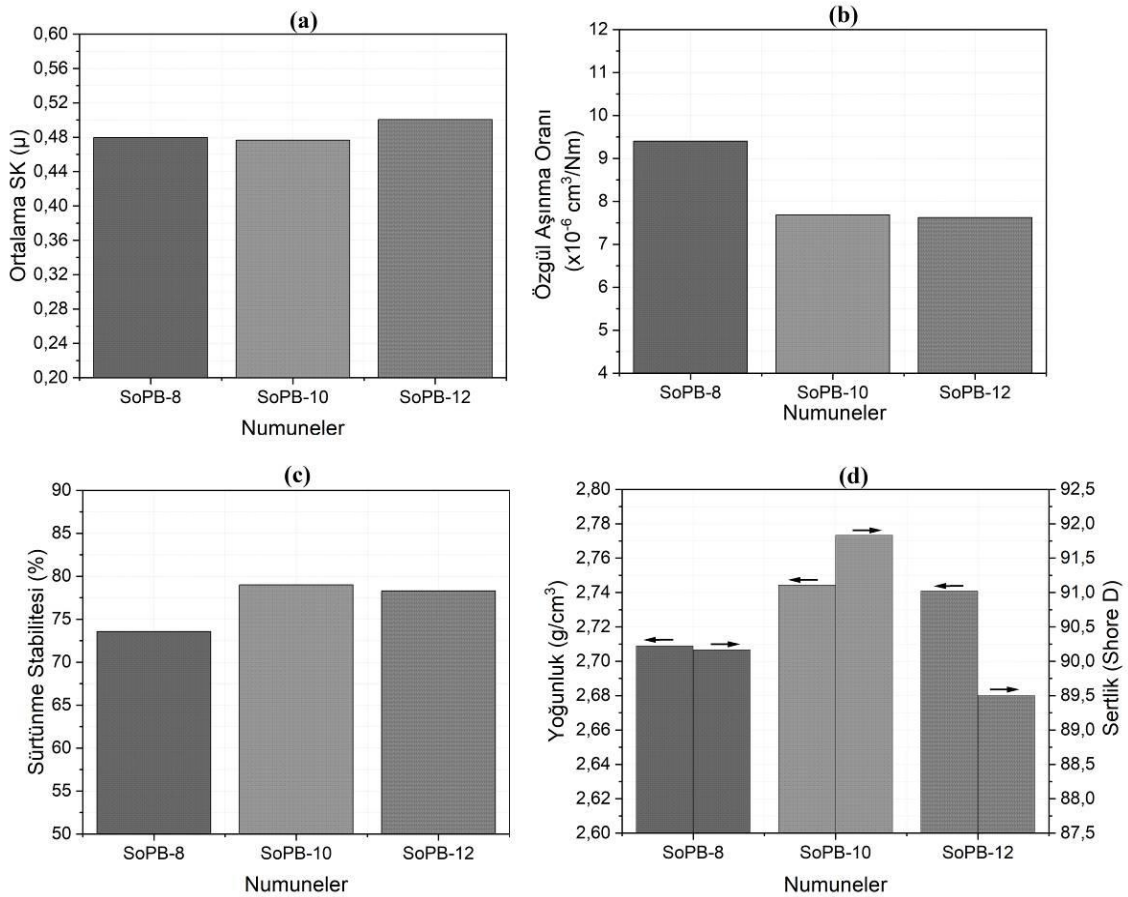
Elde edilen sonuçlara göre en yüksek ortalama SK değeri 3 dk boyunca preslenen SoPS-3, en düşük ortalama SK değeri 1 dk boyunca preslenen SoPS-1 numunesinde gözlemlenmiştir. SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin ortalama SK değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.16'da zamana bağlı SK-sıcaklık eğrisi incelendiğinde; SoPS-3 numunesinin diğer numunelere göre daha stabil bir sürtünme eğrisi çizdiği görülmektedir. Buna paralel olarak Şekil 4.15-c)'de sürtünme stabilitesi diğer iki numuneden daha yüksek olmuş ve %79,01 olarak hesaplanmıştır. Soğuk presleme süresi arttıkça özgül aşınma değeri azalmış, SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin özgül aşınma değerleri birbirine yakın değerde ölçülmüştür. Özgül aşınma oranı en yüksek SoPS-1 numunesinde hesaplanmıştır. En düşük sertlik değeri SoPS-1 numunesinde görülmüştür. Yoğunluk değerleri 3 numune için birbirine yakın değerlerde seyretmiştir. SoPS-1, SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin ortalama yoğunluk değeri $2,732 \text{ g/cm}^3$, sertlik değeri ise 89,89 Shore D olarak hesaplanmıştır. Soğuk presleme süresi için 1 dk.'nın SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerine kıyasla daha düşük ortalama SK ve sürtünme stabilitesi, daha yüksek özgül aşınma değeri sergilediği için bu sürenin soğuk presleme süresi için yetersiz olduğu belirlenmiştir.



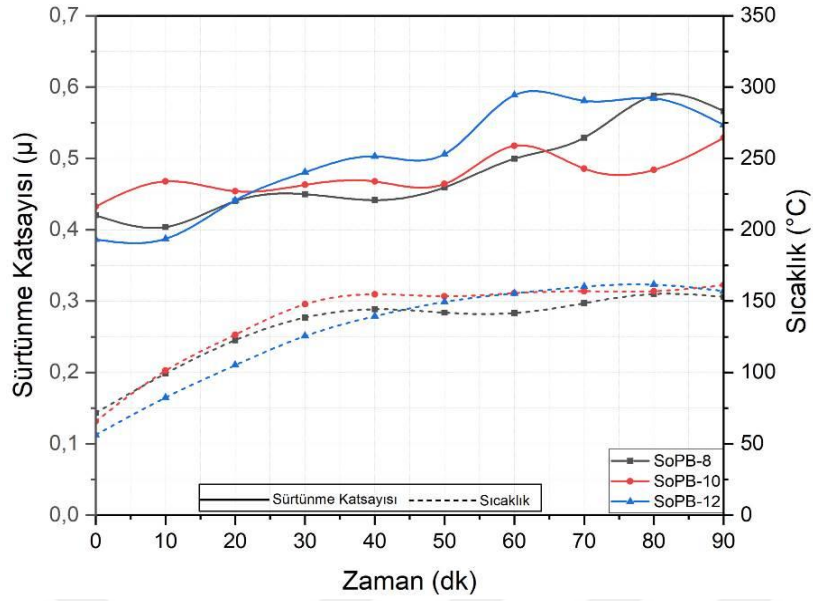
Şekil 4.16 SoPS-1, SoPS-3 ve SoPS-5 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

Numuneler için soğuk presleme işlemleri 8, 10 ve 12 MPa basınç değerlerinde yapılmıştır. SoPB-8, SoPB-10 ve SoPB-12 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma

oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik sonuçları Şekil 4.17’de; zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Ortalama SK değerleri incelendiğinde SoPB-8 ve SoPB-10 numunelerinin sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu, SoPB-12 numunesinin ortalama SK değerinin diğer numunelerden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünme stabilitesi en düşük ve özgül aşınma değeri en yüksek SoPB-8 numunesinde gözlenmiştir. SoPB-10 ve SoPB-12 numunelerinin sürtünme stabilite ve özgül aşınma değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.17 (d) incelendiğinde en düşük yoğunluk değerinin SoPB-8 numunesinde elde edildiği, SoPB-10 ve SoPB-12 numunelerinin yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sertlik değeri ise en yüksek SoPB-10 numunesinde görülmüştür. SoPB-8, SoPB-10 ve SoPB-12 numuneleri için ortalama yoğunluk değerleri 2,731 g/cm³, sertlik değerleri ise 90,5 Shore D olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.17 SoPB-8, SoPB-10 ve SoPB-12 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları



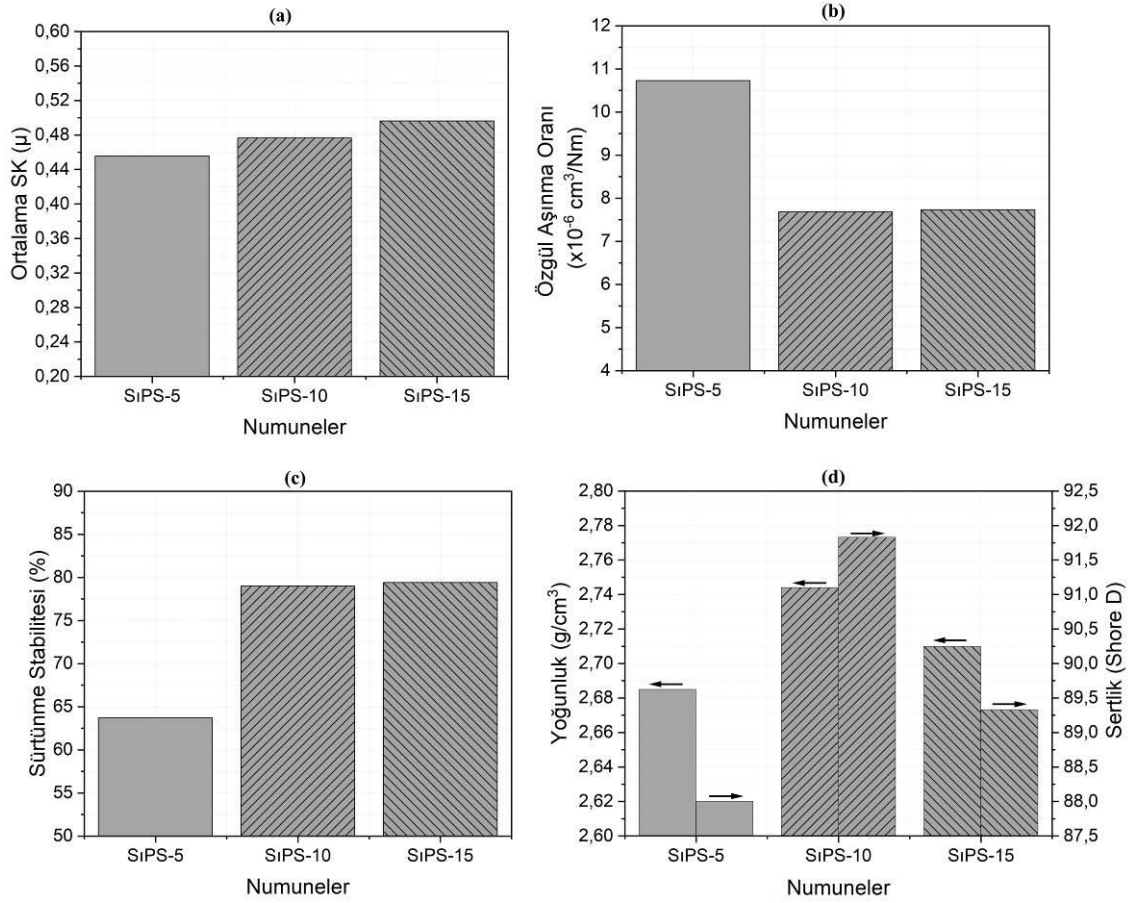
Şekil 4.18 SoPB-8, SoPB-10 ve SoPB-12 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

Şekil 4.18 incelendiğinde SoPB-10 numunesinin daha stabil bir sürtünme eğrisi seyrettiği, diğer numunelerin 80. dakikaya kadar genel eğride artış gösterdiği, daha sonra eğride bir düşüş olduğu gözlenmiştir.

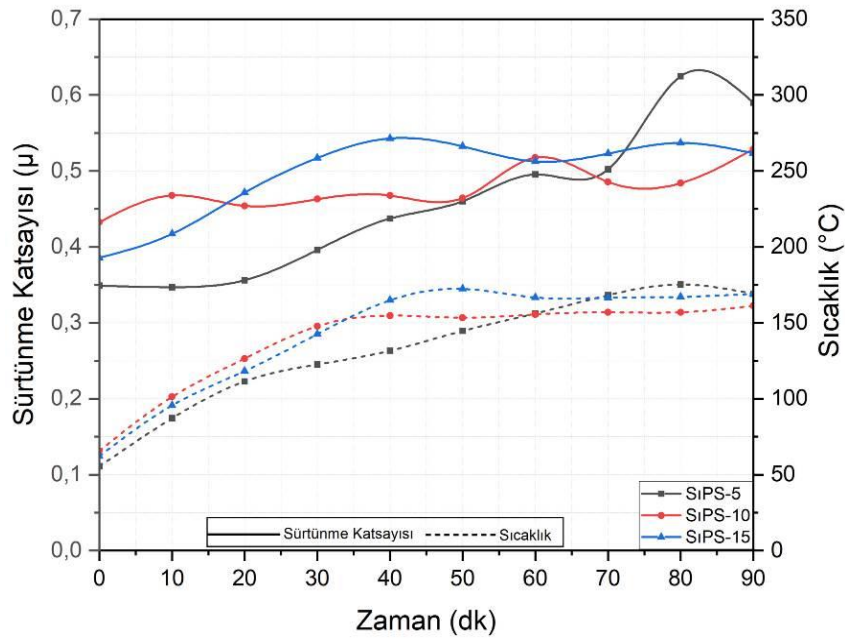
4.3.2 Sıcak Presleme Süresi, Basıncı ve Sıcaklığının Etkisi

Üretilen numuneler için sıcak presleme süresi 5, 10 ve 15 dk olarak belirlenmiş ve numunelere bu süreler kullanılarak sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. SıPS-5, SıPS-10 ve SıPS-15 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri Şekil 4.19'da; zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde sıcak presleme süresi arttıkça ortalama SK değeri ve sürtünme stabilitesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Düşük sıcak presleme sürelerinde meydana gelen düşük ortalama SK ve stabilite, yüksek özgül aşınma oranı değeri, toz malzemeler için bağlanma sürelerinin yetersiz olduğu ve bu yüzden de tozlar arasında zayıf bağlanma oluştuğundan açıklanabilir. Yetersiz bağlanma oluştuğu için en yüksek özgül aşınma oranı, en düşük ortalama SK ve stabilite değerleri 5 dk. boyunca preslenen SıPS-5 numunesinde görülmüştür. SıPS-10 ve SıPS-15 numunelerinin sürtünme stabiliteyi birbirine çok yakın çıkmıştır. Benzer şekilde özgül aşınma oranı sıcak presleme süresi arttıkça düşüş eğilimi göstermiş, SıPS-

10 ve SiPS-15 numunelerinin özgül aşınma değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.

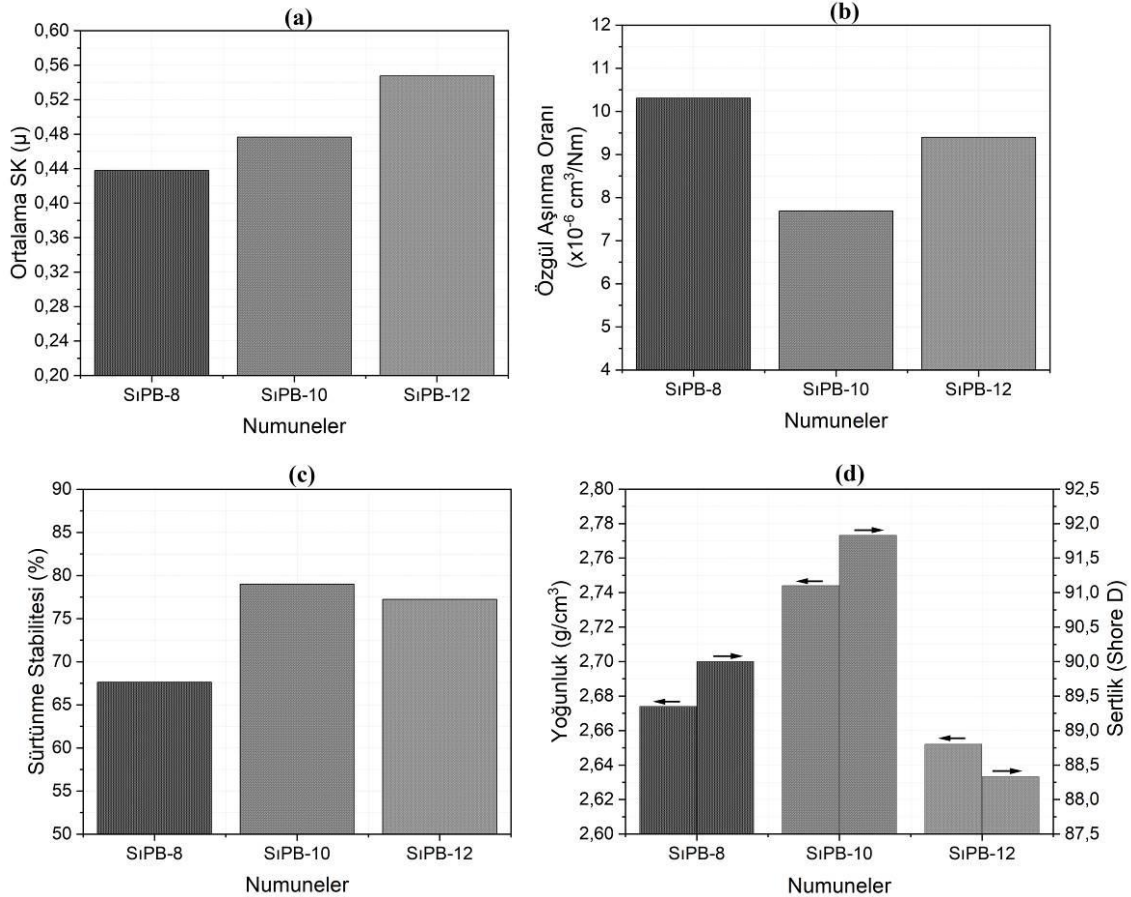


Şekil 4.19 SiPS-5, SiPS-10 ve SiPS-15 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları



Şekil 4.20 SıPS-5, SıPS-10 ve SıPS-15 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.19 (d) incelendiğinde en yüksek yoğunluk ve sertlik değerleri SıPS-10 numunesinde elde edilmiştir. SıPS-5, SıPS-10 ve SıPS-15 numunelerinin ortalama yoğunluk değeri 2,713 g/cm³, sertlik değeri 89,72 Shore D olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.21’de sürtünme eğrisi incelendiğinde SıPS-15 numunesinin özellikle 30. dk’dan sonra çok stabil bir eğri seyrettiği gözlenmiştir.

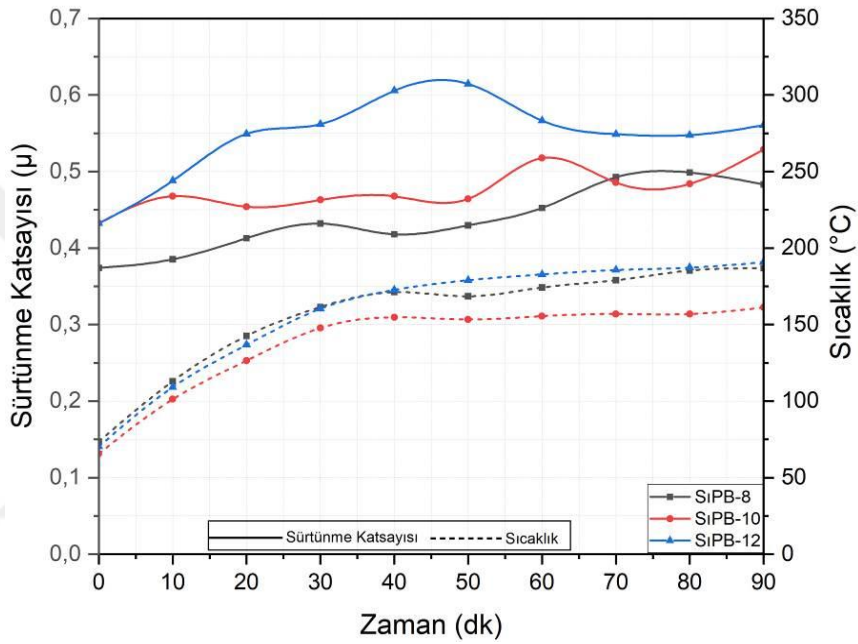
Numuneler için sıcak presleme basıncı 8,10 ve 12 MPa olarak belirlenmiştir. SıPB-8, SıPB-10 ve SıPB-12 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri Şekil 4.21’de; zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 SıPB-8, SıPB-10 ve SıPB-12 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları

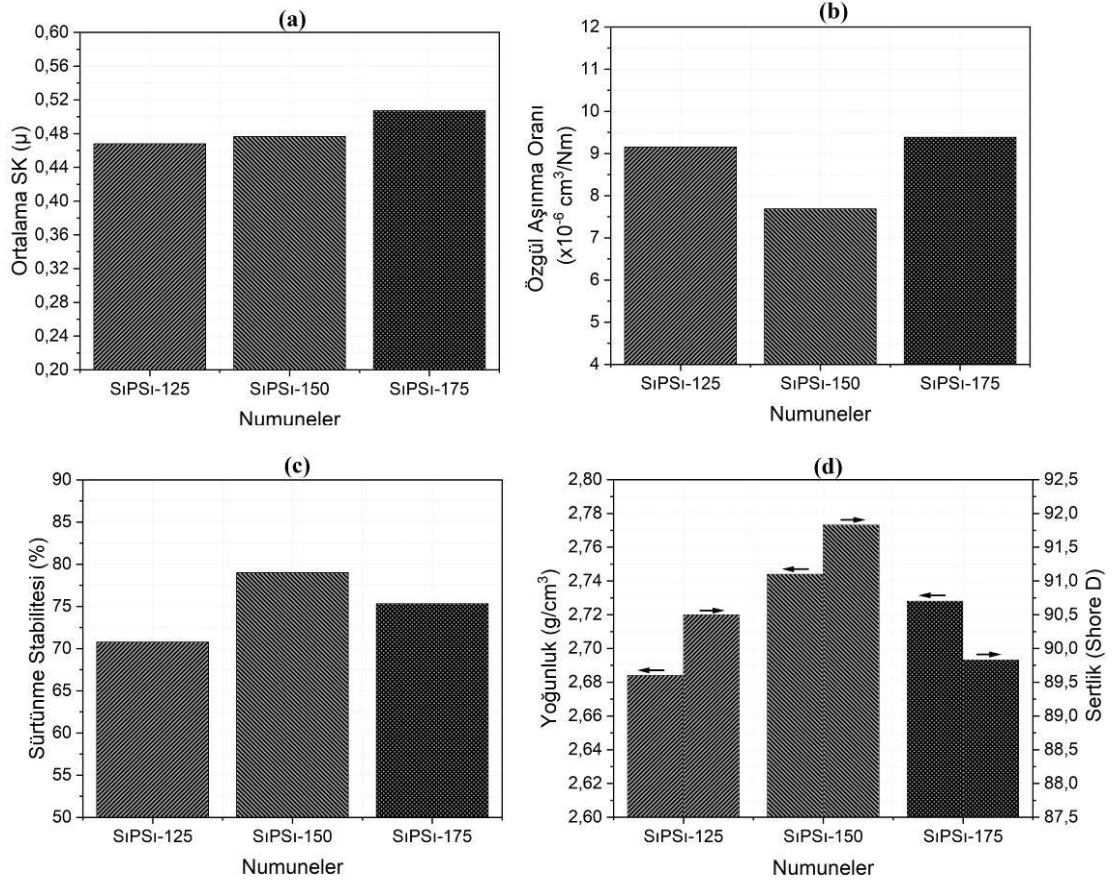
Sonuçlar incelendiğinde SıPB-8, SıPB-10 ve SıPB-12 numunelerinin ortalama SK değerleri artan presleme basıncıyla birlikte artış göstermiştir. En yüksek ortalama SK

değerine sahip SıPB-12 numunesi olmasına rağmen, en yüksek sürtünme stabilitesine ve en düşük özgül aşınma oranına sahip numune SıPB-10 numunesi olmuştur. Şekil 4.21 (d) incelendiğinde en yüksek yoğunluk ve sertlik değerleri SıPB-10 numunesinde elde edilmiştir. SıPB-8, SıPB-10 ve SıPB-12 numunelerinin ortalama yoğunluk değeri $2,69 \text{ g/cm}^3$, sertlik değeri 90,05 Shore D olarak hesaplanmıştır. SıPB-12 numunesinin sürtünme eğrisi 45. dakikaya kadar bir artış göstermiş, daha sonra biraz düşüş göstererek 60. dakikadan sonra daha stabil bir eğri sergilemiştir.

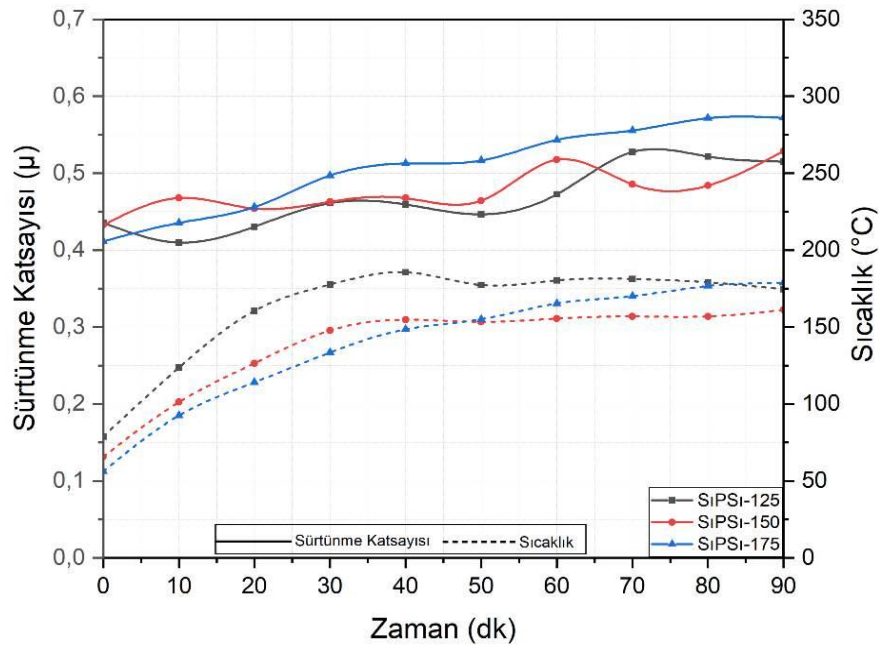


Şekil 4.22 SıPB-8, SıPB-10 ve SıPB-12 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

Numunelerin sıcak presleme sıcaklığı 125, 150 ve 175 °C olarak belirlenmiştir. SıPS-125, SıPS-150 ve SıPS-175 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri Şekil 4.23'de; zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.24'de gösterilmiştir. Sıcak presleme süresi arttıkça ortalama SK değeri artış göstermiştir. En yüksek sürtünme stabilitesi ve en düşük özgül aşınma oranı 150 °C'de preslenen SıPS-150 numunesinde elde edilmiştir. SıPS-175 numunesinin sürtünme eğrisi incelendiğinde deney boyunca artan bir sürtünme eğrisi sergilemiştir. Şekil 4.23 (d) incelendiğinde en yüksek yoğunluk ve sertlik değeri SıPS-150 numunesinde elde edilmiştir. SıPS-125, SıPS-150 ve SıPS-175 numunelerinin ortalama yoğunluk değeri $2,719 \text{ g/cm}^3$, sertlik değeri 90,72 Shore D olarak hesaplanmıştır.



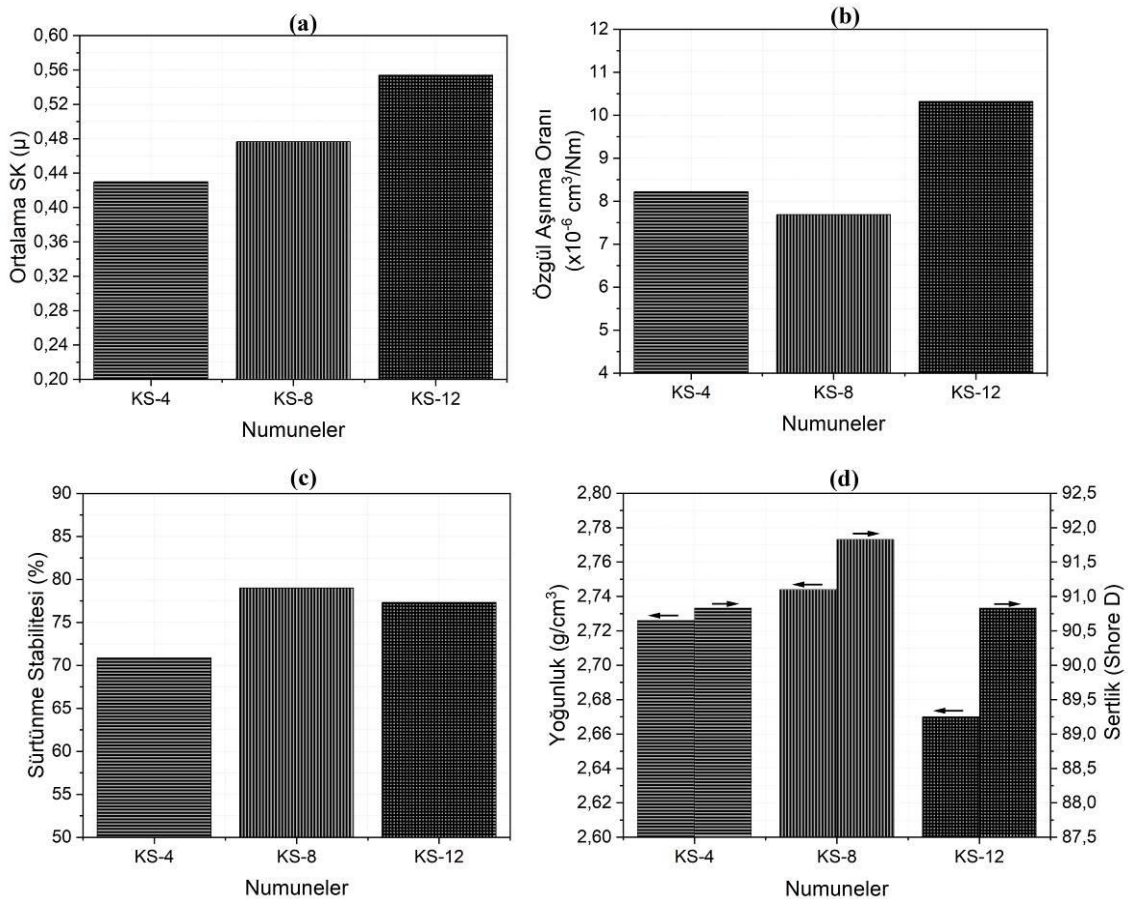
Şekil 4.23 SiPS-125, SiPS-150 ve SiPS-175 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları



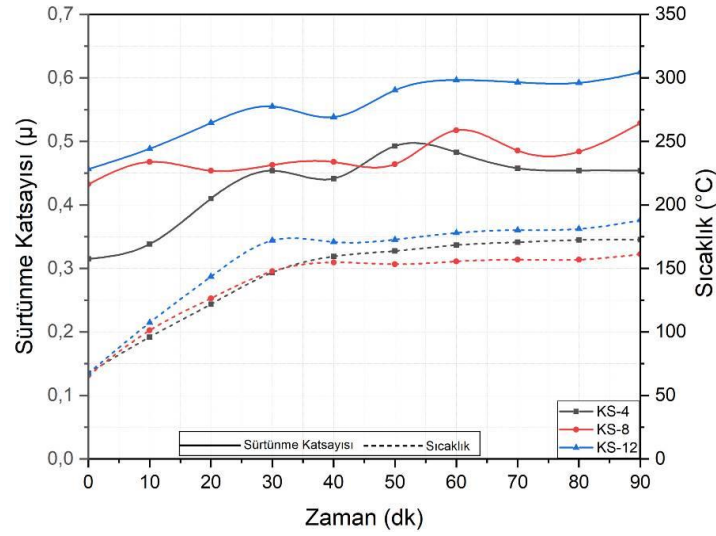
Şekil 4.24 SiPS-125, SiPS-150 ve SiPS-175 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

4.3.3 K rleme Süresi ve Sıcaklığının Etkisi

Numunelerin k rleme süresi 4, 8 ve 12 s olarak belirlenmiştir. KS-4, KS-8 ve KS-12 numunelerinin ortalama SK,  zg l aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri şekil 4.25’de; zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi şekil 4.26’de gösterilmiştir. K rleme sıcaklığı arttıkça numunelerin ortalama SK değerleri artış göstermiştir. En yüksek sürtünme stabilitesi ve en düşük  zg l aşınma oranı 8 s boyunca kürlenen KS-8 numunesinde oluşmuştur. Sürtünme eğrisi incelendiğinde KS-12 numunesinin deney boyunca sürtünme eğrisinde bir artış sergilediği görülmektedir. şekil 4.25 (d) incelendiğinde en yüksek yoğunluk ve sertlik değerleri KS-8 numunesinde g r lm ştir. KS-4, KS-8 ve KS-12 numunelerinin ortalama yoğunluk değeri 2,713 g/cm³, sertlik değeri 91,17 Shore D olarak hesaplanmıştır.

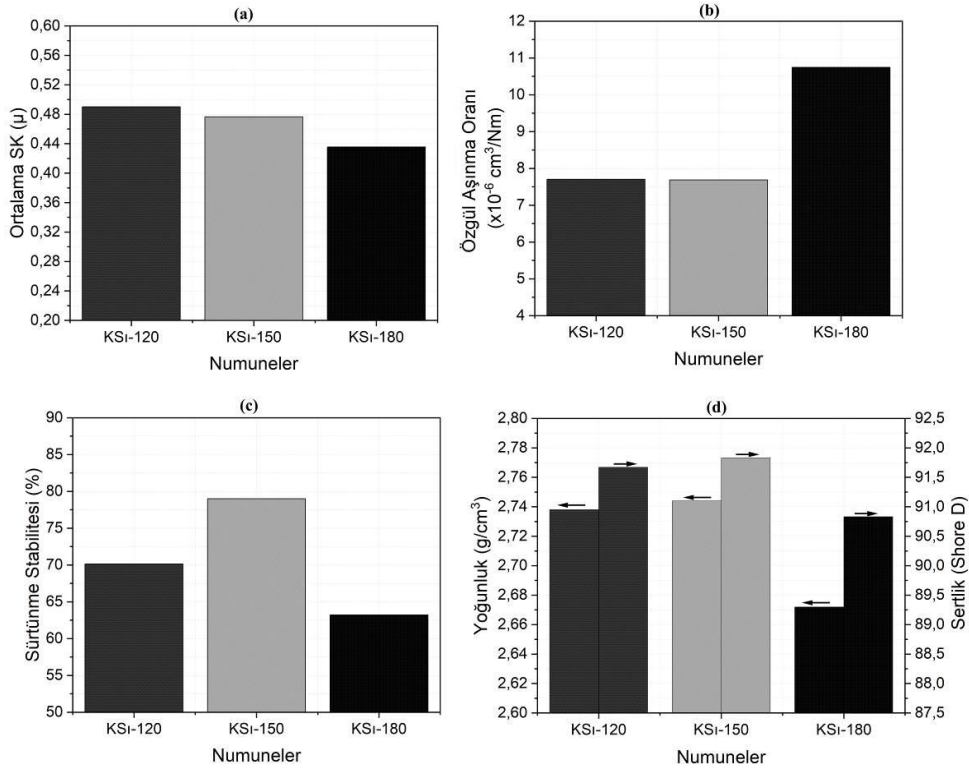


şekil 4.25 KS-4, KS-8 ve KS-12 numunelerinin (a) ortalama SK, b)  zg l aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları



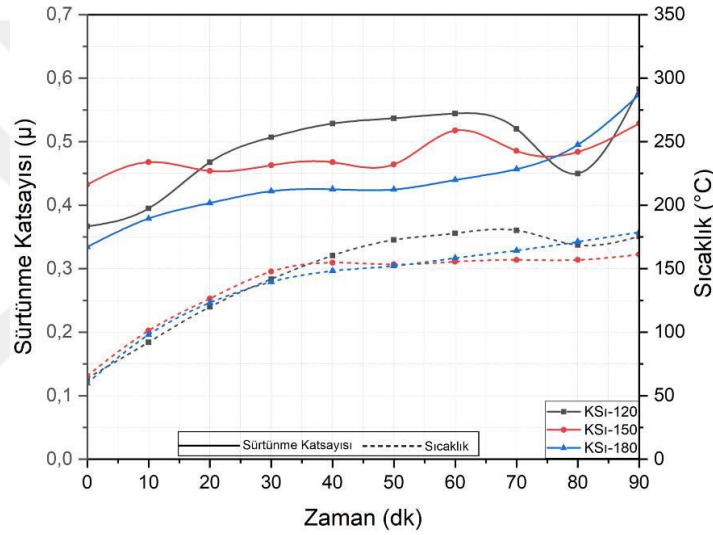
Şekil 4.26 KS-4, KS-8 ve KS-12 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

Numunelerin kütleme sıcaklığı 120, 150 ve 180 °C olarak belirlenmiştir. KSı-120, KSı-150 ve KSı-180 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri Şekil 4.27’de; zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 KSı-120, KSı-150 ve KSı-180 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde kürlenme sıcaklığı arttıkça ortalama SK değeri azalmaktadır. En düşük sürtünme stabilitesi ve en yüksek özgül aşınma oranı 180 °C’de kürlenmiş KS1-180 numunesinde elde edilmiştir. Belirli bir ısıl işlem sıcaklığının üzerinde fren balata yapısının bozulduğu ve malzemenin solmaya karşı direncinin azaldığı ifade edilmiştir (Ertan ve Yavuz 2010). KS1-120 numunesi sürtünme eğrisinde 70. dakikadan sonra sıcaklık eğrisine paralel olarak bir düşüş göstermiş, 80. dakikadan sonra artış sergilemiştir. Şekil 4.27 (d) incelendiğinde en yüksek yoğunluk ve sertlik değeri KS1-150 numunesinde görülmüştür. KS1-120, KS1-150 ve KS1-180 numunelerinin ortalama yoğunluk değeri 2,718 g/cm³, sertlik değeri 91,44 Shore D olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.28 KS1-120, KS1-150 ve KS1-180 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

Üretim optimizasyonu için yapılan deney sonuçları değerlendirilerek üretim parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler sırasıyla; soğuk presleme süresi 3 dk., soğuk presleme basıncı 12 MPa, sıcak presleme süresi 15 dk., sıcak presleme basıncı 12 MPa, sıcak presleme sıcaklığı 150 °C, kürlenme süresi 8 s ve kürlenme sıcaklığı 150 °C olarak belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra atık malzemelerin üretim kısmında bu parametreler kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir.

4.4 Atık Malzemelerin Kullanımı

Çalışmanın bu kısmında içerik ve üretim optimizasyonu yapılan fren balatalarında dolgu malzemesi olarak baritin yerine yüksek fırın cürufu, bakır cürufu ve alüminyum

cürufu kullanımı araştırılmıştır. Kütlece %40 bariti %10 oranında azaltarak cüruf malzemelerin oranı %10 oranında artırılmış ve kütlece %100 oranı korunmuştur. Üretim ve içerik optimizasyonu yapılan kütlece %40 barit içeriğine sahip numune üretilmiş ve testleri yapılmıştır. Referans numune (RN) olarak kabul edilen bu numune sonuçları Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 İçeriği ve üretim parametreleri optimize edilmiş numunenin deney sonuçları

Numune	Ortalama SK	Sürtünme Stabilesi (%)	Özgül Aşınma Oranı ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Yoğunluk (g/cm^3)	Sertlik (Shore D)
Referans Numune	0,531	80,13	6,0952	2,602	91,62

Yüksek fırın cürufu, bakır cürufu ve alüminyum cürufunun kimyasal analizlerini belirlemek için İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezinde XRF analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yüksek fırın cürufu içerisinde en yüksek orana sahip iki bileşik %45,34 ile CaO ve %32,36 ile SiO₂ olduğu görülmektedir. Bakır cürufu içeriğinde ise en yüksek orana sahip üç bileşik sırasıyla %32,46 ZnO; %27,83 ile SiO₂ ve %11,37 ile Fe₂O₃’tür. Son olarak alüminyum cürufunda en yüksek orana sahip bileşik %66,56 ile Al₂O₃ olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.10 Balata üretiminde kullanılan metalik cürufların kimyasal analiz sonuçları (%)

İçerik	Yüksek Fırın Cürufu	Bakır Cürufu	Alüminyum Cürufu
CaO	45,34	2,60	2,63
SiO ₂	32,36	27,83	5,01
Al ₂ O ₃	9,40	6,25	66,56
MgO	5,15	1,43	8,68
MnO	1,72	0,18	0,15
TiO ₂	1,54	0,38	0,39
SO ₃	1,51	3,32	< 0,0001
Fe ₂ O ₃	0,89	11,37	1,26
ZnO	< 0,0015	32,46	0,07
CuO	0,0102	8,69	0,05
PbO	< 0,00022	1,14	< 0,00022
Cl	0,04	0,05	8,68
K ₂ O	0,78	1,15	3,73
Na ₂ O	<0,11	< 0,11	1,90

4.4.1 Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı

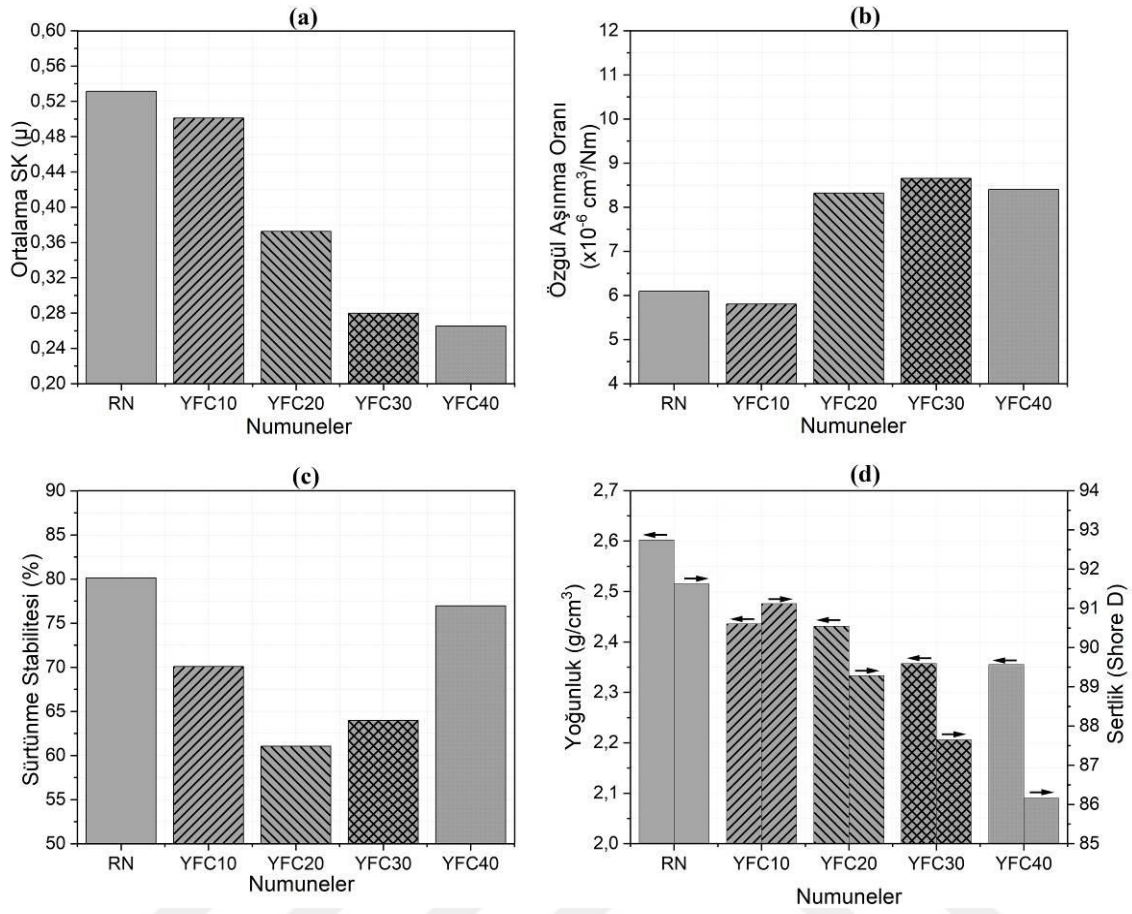
Yüksek fırın cürufu kullanılarak kütlece %10 oranından %40 oranına kadar 4 farklı numune üretilmiş, üretilen bu numunelerin; ortalama SK, zamana bağlı sürtünme katsayısı-sıcaklık eğrileri, sürtünme stabilitesi, özgül aşınma oranı, yoğunluk ve sertlik değerleri hesaplanarak kaydedilmiştir. Çizelge 4.11’de üretilen 4 farklı numunenin ortalama SK, sürtünme stabilitesi, özgül aşınma oranı, yoğunluk ve sertlik değerleri tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.11 RN ve YFC numunelerinin deney sonuçları

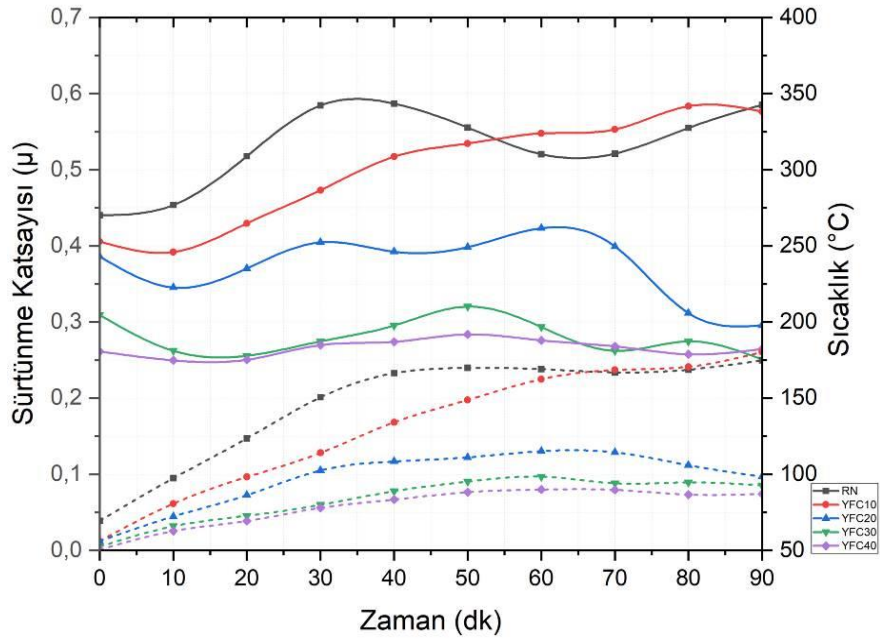
Numune	Ortalama SK	Sürtünme Stabilitesi (%)	Özgül Aşınma Oranı ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Yoğunluk (g/cm^3)	Sertlik (Shore D)
RN	0,531	80,13	6,0952	2,602	91,62
YFC10	0,501	70,09	5,8049	2,436	91,12
YFC20	0,372	61,07	8,3223	2,431	89,28
YFC30	0,279	63,98	8,6572	2,357	87,65
YFC40	0,265	76,97	8,4017	2,356	86,16

RN, YFC10, YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri Şekil 4.29’da zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.30’de grafik halinde gösterilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde yüksek fırın cürufu oranı arttıkça numunelerin ortalama SK değerlerinde bir azalma görülmüş ve en düşük ortalama SK değeri kütlece %40 yüksek fırın cürufu içeren YFC40 numunesi olmuştur. Özellikle kütlece %30 ve %40 yüksek fırın cürufu içeren numunelerde ortalama SK değeri 0,3’ün altına düşmüştür. %20 oranına kadar yüksek fırın cürufu kullanımında sürtünme stabilitesi azalmış, bu orandan sonra bir artış göstermiştir. Fakat YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinin özgül aşınma oranları diğer numunelere göre artmıştır. Şekil 4.29 (d) incelendiğinde numune içerisinde yüksek fırın cürufu oranı arttıkça numunenin yoğunluğu azalmıştır. En düşük yoğunluk kütlece %40 yüksek fırın cürufu içeriğine sahip $2,355 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk değeriyle YFC40 numunesinde ölçülmüştür. Yüksek fırın cürufunun yoğunluğu ($2,89 \text{ g/cm}^3$) baritin yoğunluğundan ($4,25\text{-}4,5 \text{ g/cm}^3$) düşük olduğu için yüksek fırın cürufu oranı arttıkça numunelerin yoğunluğu azalmıştır (Jariyathitipong vd. 2013, İnt. Kay. 2).



Şekil 4.29 RN, YFC10, YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları



Şekil 4.30 RN, YFC10, YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

Sertlik değerleri incelendiğinde yoğunluk değerlerine paralel bir şekilde azalma göstermiştir. En düşük sertliğe sahip numune kütlece %40 yüksek fırın cürufu içeriğine sahip 86,16 Shore D değeriyle YFC40 numunesinde ölçülmüştür. Sertlik değerindeki düşüş ortalama SK değerindeki düşüşe benzer bir durum sergilemiştir. Numunelerin sertliğinin azalmasıyla fren balataları üzerinde disk durdurmak için daha düşük kuvvetin oluşacağı bu yüzden de ortalama SK değerinin azalacağı düşünülebilir. Yine sertlik ve yoğunluğu azalmasıyla birlikte sürtünme esnasında balata yüzeyinden parçacıkların daha kolay kopacağı ve bu sebepten özgül aşınma oranının YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinde yüksek çıktığı düşünülebilir.

4.4.2 Bakır Cürufu Kullanımı

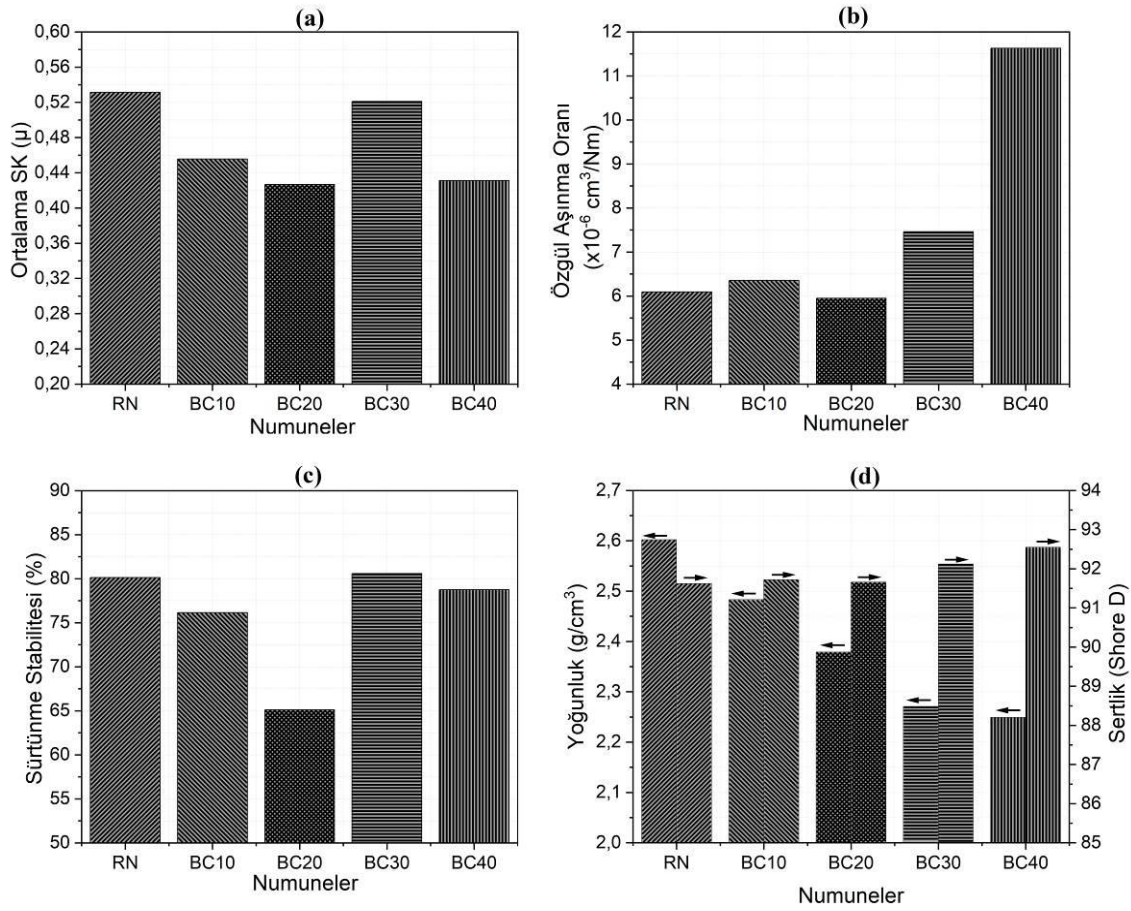
Bakır cürufu kullanılarak kütlece %10 oranından %40 oranına kadar 4 farklı numune üretilmiş, üretilen bu numunelerin; ortalama SK, zamana bağlı sürtünme katsayısı-sıcaklık eğrileri, sürtünme stabilitesi, özgül aşınma oranı, yoğunluk ve sertlik değerleri hesaplanarak kaydedilmiştir. Çizelge 4.12’de referans numune ve üretilen 4 farklı numunenin ortalama SK, sürtünme stabilitesi, özgül aşınma oranı, yoğunluk ve sertlik değerleri tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.12 RN ve BC numunelerinin deney sonuçları

Numune	Ortalama SK	Sürtünme Stabilitesi (%)	Özgül Aşınma Oranı ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Yoğunluk (g/cm^3)	Sertlik (Shore D)
RN	0,531	80,13	6,0952	2,602	91,62
BC10	0,455	76,14	6,3541	2,483	91,72
BC20	0,426	65,10	5,9506	2,379	91,66
BC30	0,521	80,59	7,4623	2,271	92,12
BC40	0,431	78,74	11,6290	2,249	92,55

RN, BC10, BC20, BC30 ve BC40 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri Şekil 4.31’de zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Şekil 4.31 incelendiğinde ortalama SK değeri bakır cürufu kullanımıyla kütlece %30 oranına kadar azalmış, %30 oranında referans numuneye yakın bir ortalama SK değeri sergilemiş ve sonra tekrar azalmıştır. Sürtünme stabilitesi de benzer bir durum sergilemiştir. Zamana bağlı sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde kütlece %30 bakır cürufu içeriğine sahip BC30 numunesi diğer

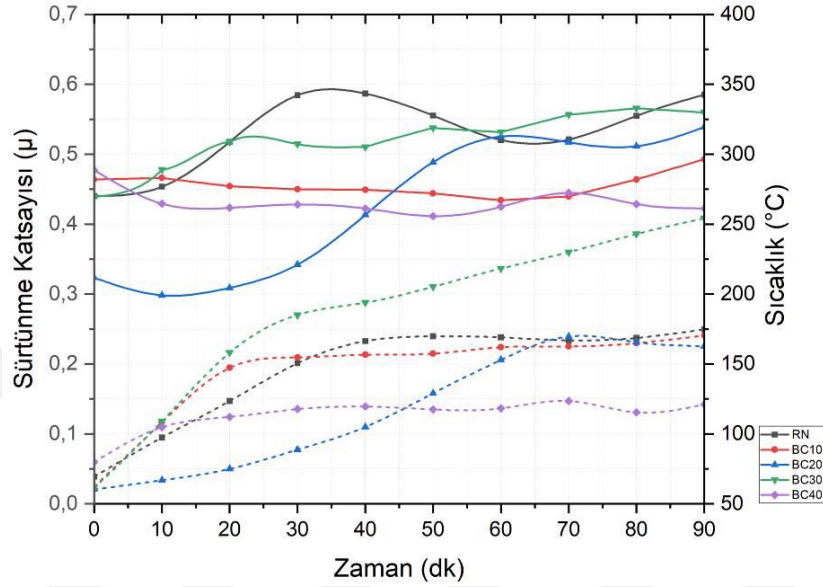
numunelere göre daha stabil bir eğri sergilemiştir. Buna paralel olarak sürtünme stabilitesi değeri de %80,59 değeriyle en yüksek BC30 numunesinde görülmüştür. BC30 numunesinin sıcaklık eğrisi 30.dakikadan sonra lineer bir eğri seyrederek 250 °C değerini aşmıştır. Deneylerde kullanılan bütün numuneler içerisinde en yüksek sıcaklık değeri BC30 numunesinde ölçülmüştür. Özgül aşınma oranı ise en yüksek kütlece %40 bakır cürufu içeren BC40 numunesinden görülmüştür.



Şekil 4.31 RN, BC10, BC20, BC30 ve BC40 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c)sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları

Şekil 4.31 (d) incelendiğinde; bakır cürufu kullanımının artmasıyla numunelerin yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmüştür. En düşük yoğunluğa sahip numune 2,249 g/cm³ değeriyle BC40 numunesinde ölçülmüştür. Bakır cürufunun yoğunluğu (3,16-3,87 g/cm³) baritin yoğunluğundan (4,25-4,5 g/cm³) düşük olduğu için bakır cürufu oranı arttıkça numunelerin yoğunluğu azalmıştır (Dhanesh vd. 2019, İnt. Kay. 2). Sertlik değerleri incelendiğinde bakır cürufu kullanımıyla numunelerin sertlik değerleri

artış göstermiştir. En yüksek sertlik değeri %40 bakır cürufu içeriğiyle BC40 numunesinde 92,55 Shore D değeri ölçülmüştür. Bakır cürufunun sertlik değeri (6-7 mohs) baritin sertlik değerinden (3,3 mohs) yüksek olduğu için bakır cürufu oranı arttıkça numunelerin sertlik değerinin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 4.32 RN, BC10, BC20, BC30 ve BC40 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

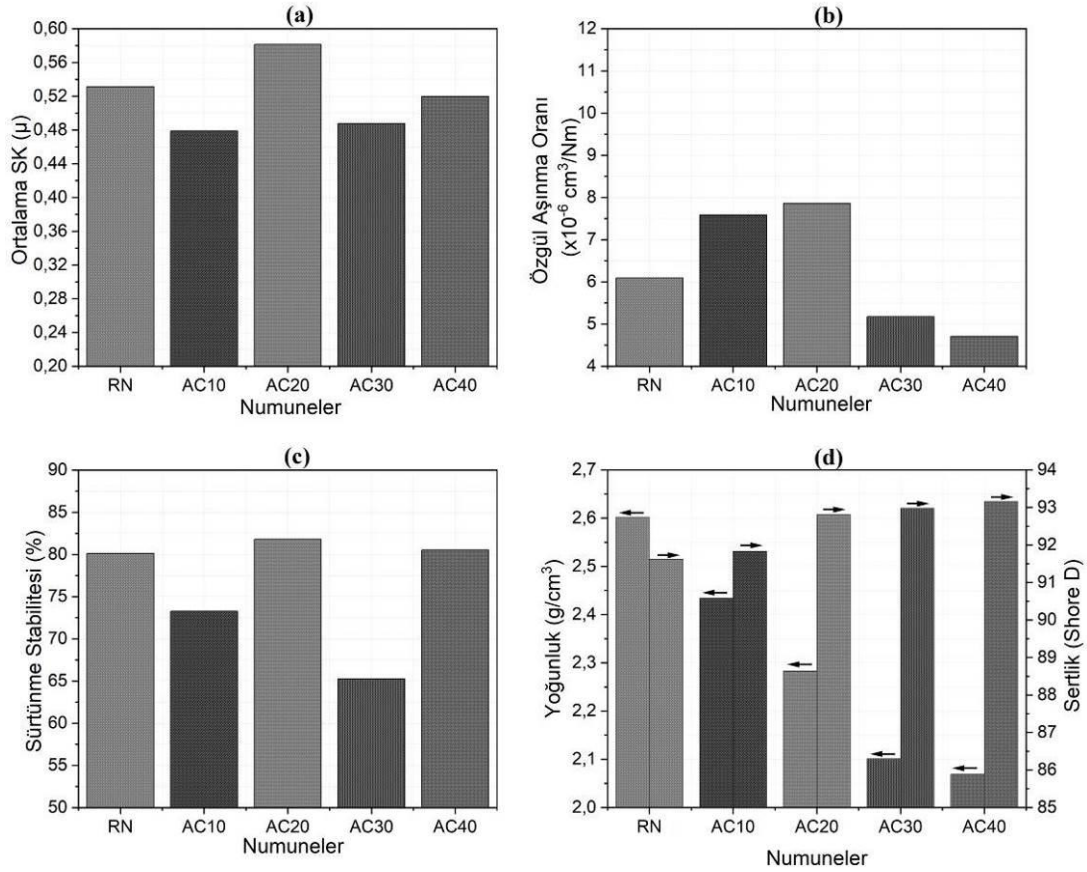
4.4.3 Alüminyum Cürufu Kullanımı

Alüminyum cürufu kullanılarak kütlece %10 oranından %40 oranına kadar 4 farklı numune üretilmiş, üretilen bu numunelerin; ortalama SK, zamana bağlı sürtünme katsayısı-sıcaklık eğrileri, sürtünme stabilitesi, özgül aşınma oranı, yoğunluk ve sertlik değerleri hesaplanarak kaydedilmiştir. Çizelge 4.13’de referans numune ve üretilen 4 farklı numunenin ortalama SK, sürtünme stabilitesi, özgül aşınma oranı, yoğunluk ve sertlik değerleri tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 RN ve AC numunelerinin deney sonuçları

Numune	Ortalama SK	Sürtünme Stabilitesi (%)	Özgül Aşınma Oranı ($\times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$)	Yoğunluk (g/cm^3)	Sertlik (Shore D)
RN	0,531	80,13	6,0952	2,602	91,62
AC10	0,478	73,28	7,5851	2,434	91,83
AC20	0,581	81,81	7,8647	2,283	92,81
AC30	0,487	65,26	5,1738	2,101	92,98
AC40	0,519	80,53	4,7113	2,069	93,16

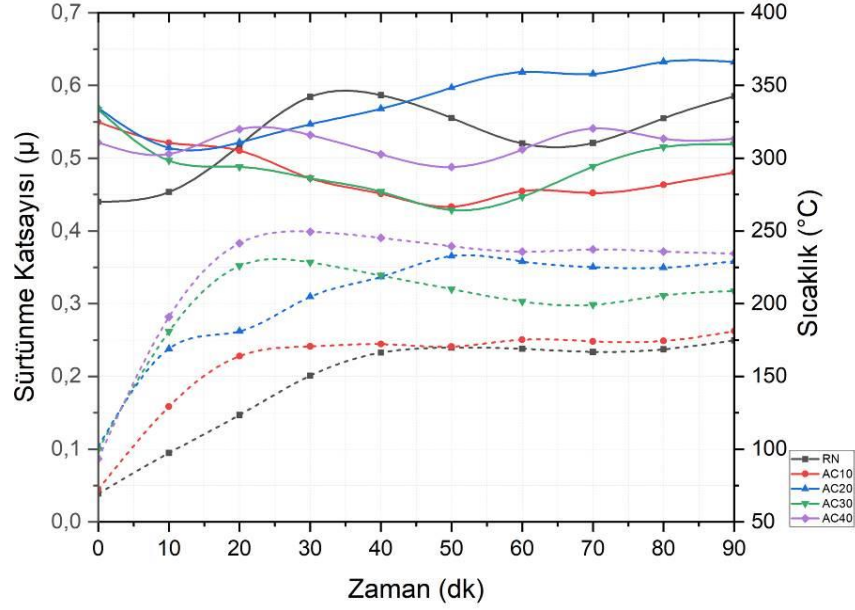
Şekil 4.33’de RN, AC10, AC20, AC30 ve AC40 numunelerinin ortalama SK, özgül aşınma oranı, sürtünme stabilitesi, yoğunluk ve sertlik değerleri Şekil 4.33’de zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.34’de gösterilmiştir.



Şekil 4.33 RN, AC10, AC20, AC30 ve AC40 numunelerinin (a) ortalama SK, b) özgül aşınma oranı, c) sürtünme stabilitesi, d) yoğunluk ve sertlik sonuçları

Şekil 4.33 incelendiğinde en yüksek ortalama SK değerine sahip numune %20 Alüminyum cürufu içeriğine sahip AC20 numunesinde görülmüştür. Zamana bağlı sürtünme katsayısı eğrisi incelendiğinde AC20 numunesinin daha stabil bir sürtünme eğrisi sergilediği görülmektedir. Bu duruma paralel olarak en yüksek sürtünme stabilitesi %81,81 ile AC20 numunesinde ölçülmüştür. Numune içerisinde kütlece alüminyum cürufu oranı arttıkça deneyler esnasında oluşan sıcaklık artmıştır. En düşük özgül aşınma oranı ise AC40 numunesinde elde edilmiştir. Şekil 4.33 (d) incelendiğinde numune içerisinde alüminyum cürufu kullanımı arttıkça numunelerin yoğunluğunda bir azalma görülmüştür. En düşük yoğunluğa sahip numune 2,069 g/cm³ değeriyle kütlece %40 alüminyum cürufu içeren AC40 numunesinde ölçülmüştür. Alüminyum cürufunun

yoğunluğu ($1,9 \text{ g/cm}^3$) baritin yoğunluğundan ($4,25\text{-}4,5 \text{ g/cm}^3$) düşük olduğu için alüminyum cürufu oranı arttıkça numunelerin yoğunluğu azalmıştır (Adeosun vd. 2014, İnt. Kay. 2). Sertlik değerleri incelendiğinde alüminyum cürufu oranı arttıkça numunelerin sertlik değeri artmıştır. En yüksek sertlik değeri kütlece %40 alüminyum cürufu içeren AC40 numunesinde 93,16 Shore D ölçülmüştür.



Şekil 4.34 RN, AC10, AC20, AC30 ve AC40 numunelerinin zamana bağlı SK ve sıcaklık eğrisi

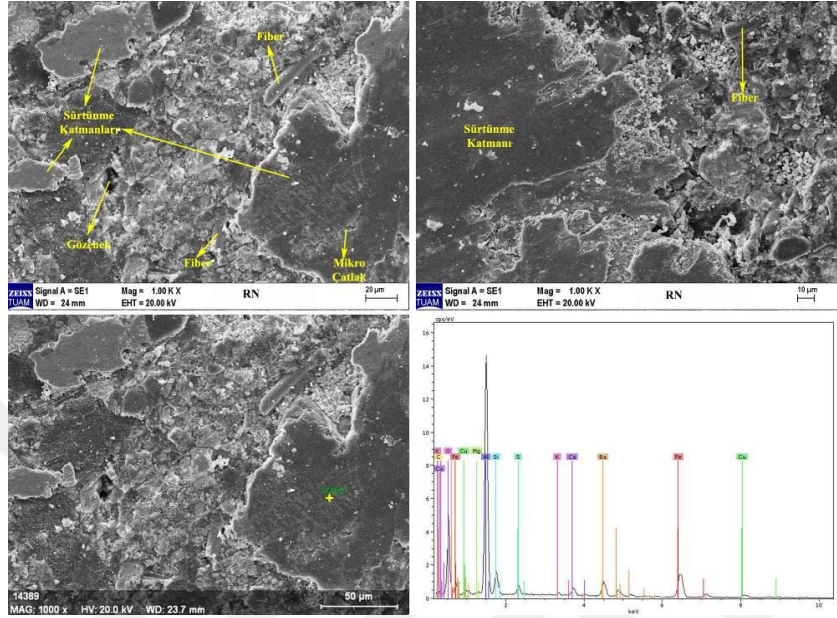
4.5 Numunelerin SEM Görüntüleri

Fren balatalarının SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi, fren sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. SEM, fren balatalarının mikro yapısını ve morfolojisini yüksek ayrıntı ve çözünürlükte gözlemlememizi sağlayarak malzeme bileşimi, faz dağılımı ve olası kusurlar hakkında bilgi edinmemizi sağlar. SEM analizi, fren balatalarının performansını ve çalışma koşullarını ilişkilendiren önemli bilgiler sunar. Mikro yapısal özellikler ve aşınma mekanizmaları arasındaki bağlantıyı anlamamıza yardımcı olarak fren balatalarının geliştirilmesine katkıda bulunur. Bu bilgiler, fren balatası malzemesi ve üretim süreçlerinin optimize edilmesine, fren sistemlerinin genel performansını ve güvenliğini artırmaya yardımcı olur. SEM analizi, fren balatalarının yüzey bütünlüğünü ve sunumunu değerlendirmek için de kullanılabilir. Farklı işlem parametrelerinin etkilerini analiz ederek üretim süreçlerini

optimize etmek için değerli bilgiler sağlar. Ayrıca SEM, fren balatalarının aşınma davranışını analiz etmek için de kullanılabilir. Yük ve hızın aşınma oranları üzerindeki etkilerini inceleyerek fren balatası performansını optimize etmek, hizmet ömrünü uzatmak ve erken arıza riskini azaltmak için bilgi edinmemizi sağlar. Genel olarak, fren balatalarının SEM analizi, fren balatalarının tasarımını, üretimini ve performansını geliştirmek için güçlü bir araçtır. Yapı, bileşim ve performans hakkında derinlemesine bilgi edinmemizi sağlayarak fren sistemlerinin güvenliğini ve verimliliğini artırmaya katkıda bulunur (Joshi 1980).

Aşınmaya neden olan; abrasiv, adhesif ve oksidasyon aşınması gibi birçok mekanizma vardır. Abrasiv aşınma, fren balatalarında oluşan yaygın bir aşınma mekanizmasıdır. Abrasiv aşınma, farklı sertlikteki iki malzeme arasındaki sürtünme sırasında meydana gelir (örneğin, fren balatası ve fren sistemindeki disk teması). Sürtünme-aşınma testi sırasında sürekli frenleme ve bırakma nedeniyle oluşan küçük parçacıklar havayla temas ederek oksitlenebilmektedir. Oksitlenmiş parçacıklar normal parçacıklardan daha serttir. Bu oksidasyon abrasiv aşınmayı daha da şiddetli hale getirir (Akıncıoğlu vd. 2021). Fren balatasından daha sert olan disk, fren balatasındaki daha yumuşak matrislere nüfuz ederek fren balatasının plastik deformasyona uğramasına neden olur. Artan ısı ile plastik deformasyona uğrayan fren balata malzemesi yüzeye sıvanarak yapışır. Yüzeye sıvanan malzemelerin kopması sonucu moloz oluşmuştur. Metalik, kovalent ve iyonik çekim kuvvetleri ve van der Waals bağları malzemenin temas yüzeyine yapışmasına neden olmuştur Bu daha sonra adhesiv aşınma mekanizmasının oluşmasına neden olur (Akıncıoğlu vd. 2021). Frenleme sırasında sıcaklığın etkisinin neden olduğu bazı küçük çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklarda görülen aşınma kalıntısı üçüncü bir cisim görevi görerek sürtünmeyi arttırmıştır. Birincil platolar (temas platoları), sürtünme sırasında yapışan ince liflerden oluşmuştur. Bu birincil platolar mekanik olarak daha sert ve frenleme sırasındaki sürtünme yükünü tolere etme kapasitesine sahip oldukları için fren balatalarının verimliliğini belirleyen ana faktörlerden biridir. Bu platoların oluşmasının sebebi disk ve fren balataları arasındaki temasın sağlanmasıdır. Platolar, fren balata malzemesinin (düşük aşınma direncine sahip fenolik matris ve dolgu maddesi gibi) diskle doğrudan temasını önler. İkincil platolar, frenleme sırasında oluşan ısı ve basıncın neden olduğu birincil liflerin yapışmasıyla oluşur. İkincil platolar yoğun bir

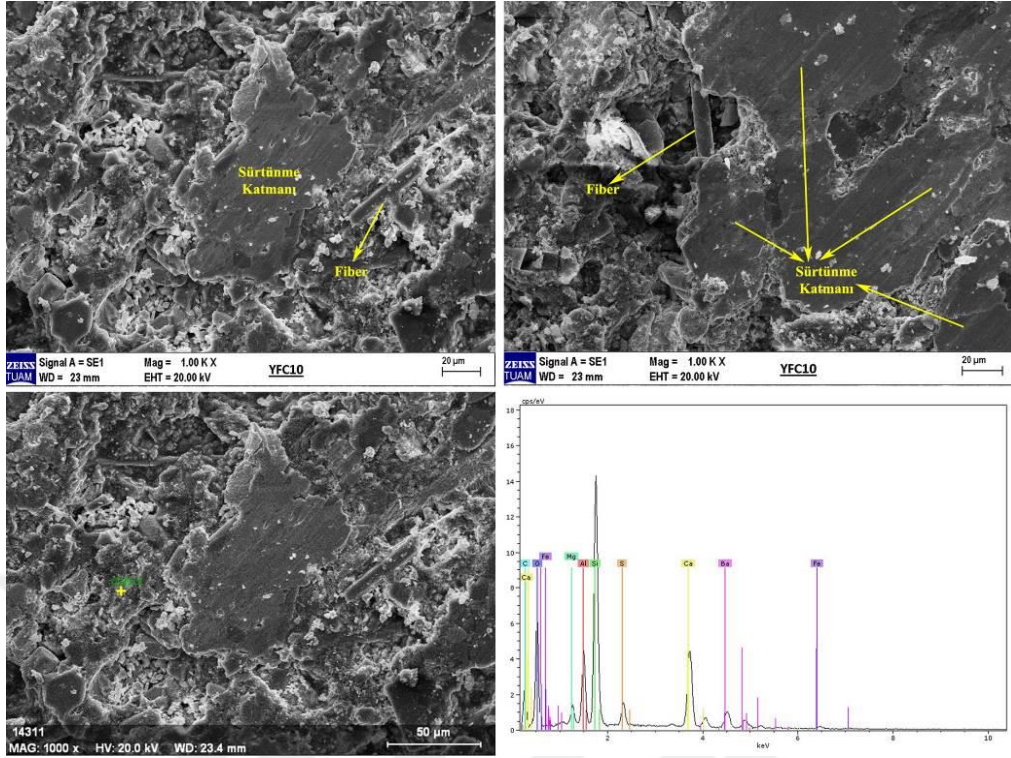
film tabakası oluşturur. Birincil platolar fren balatalarının yük taşıma kapasitesini ve sürtünmesini arttırırken, ikincil platolar azaltır (Akıncıoğlu vd. 2021, Surya Rajan vd. 2019).



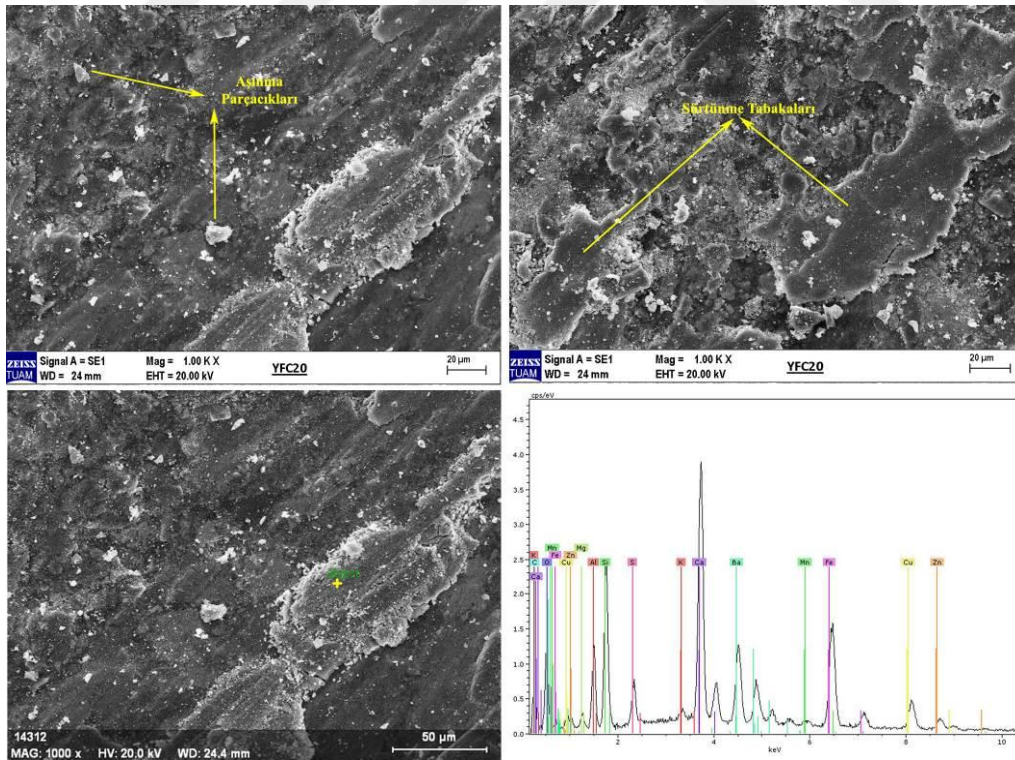
Resim 4.1 Referans numuneye ait SEM ve EDX analiz sonuçları

Resim 4.1’de referans numuneye ait aşınmış yüzeylerin 1000x büyütülmüş SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları gösterilmiştir. Resim 4.1 incelendiğinde referans numuneye ait aşınmış yüzeylerin üzerinde sürtünme katmanları görülmektedir. Sürtünme, sürtünme yüzeyinde abrasiv ve adhezif aşınma gibi mekanizmalar aracılığıyla malzeme kaybına neden olur. Bu malzeme kaybı, pürüzlülük ve topografik değişimlere yol açar. Uzun süreli sürtünme sonucunda, sürtünme yüzeyinde makroskopik boyutlarda çukurlar ve yükseltiiler oluşabilir. Bu çukur ve yükseltiilerin birleşmesi, geniş ve düz platoların oluşmasına neden olabilir. Resim 4.1 üzerinde de bu çukur ve yükseltiiler görülmektedir. Ayrıca sürtünme katmanı üzerinde mikro çatlakların varlığı da dikkat çekmektedir. Mikro çatlaklar yüksek sıcaklık, mekanik yük gibi çeşitli faktörlerden dolayı oluşabilir.

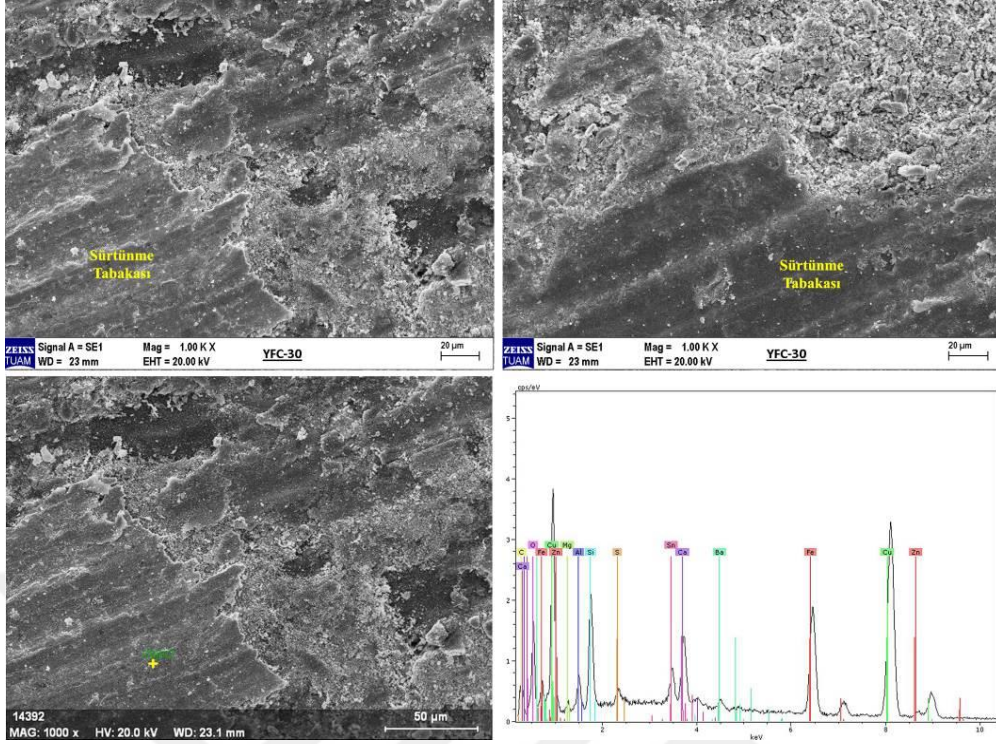
Resim 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5’de sırasıyla YFC10, YFC20, YFC30 ve YFC40 numunelerinin aşınmış yüzeylerinin 1000x büyütülmüş SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları gösterilmiştir.



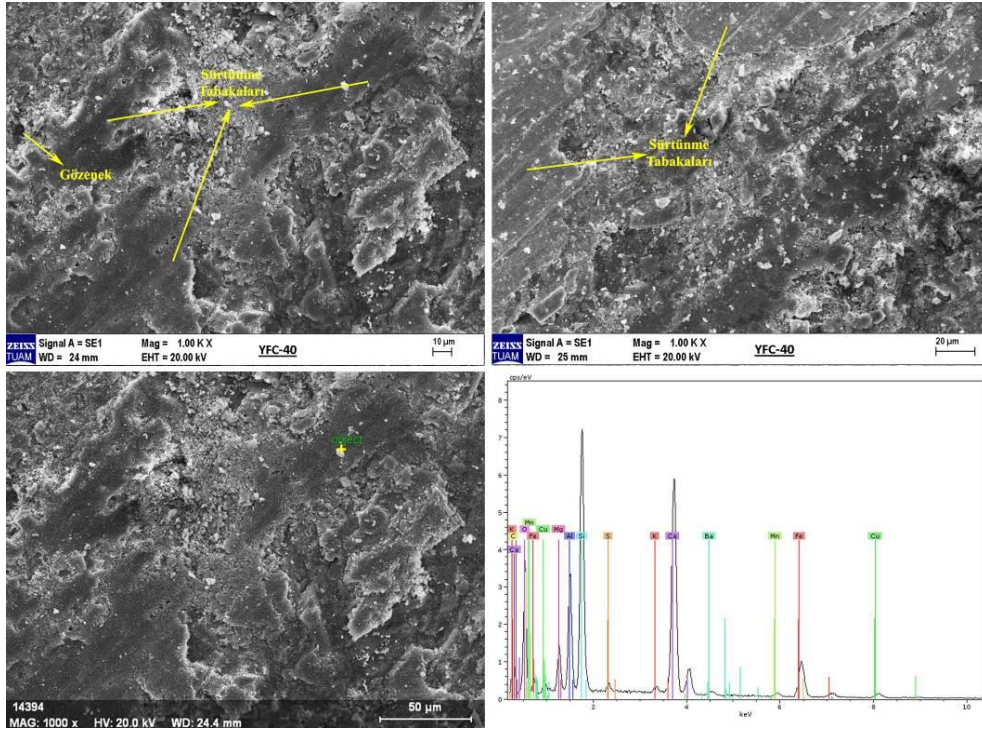
Resim 4.2 YFC10 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



Resim 4.3 YFC20 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



Resim 4.4 YFC30 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları

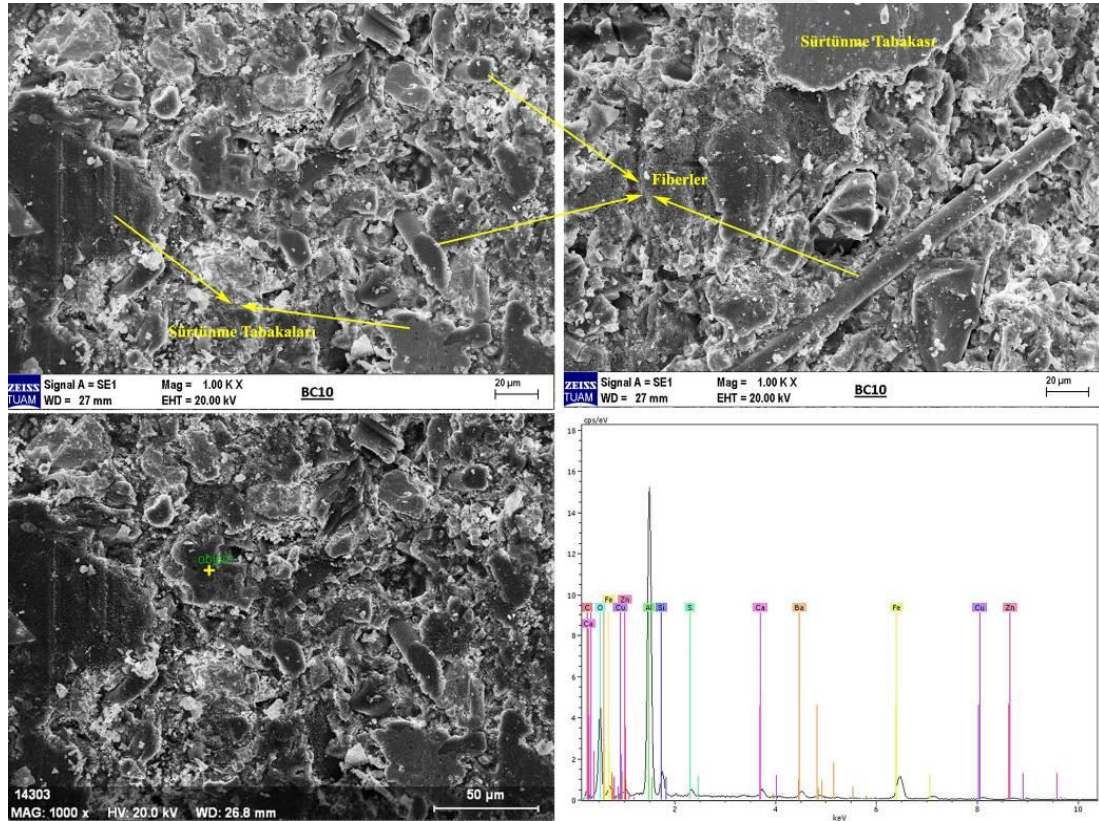


Resim 4.5 YFC40 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları

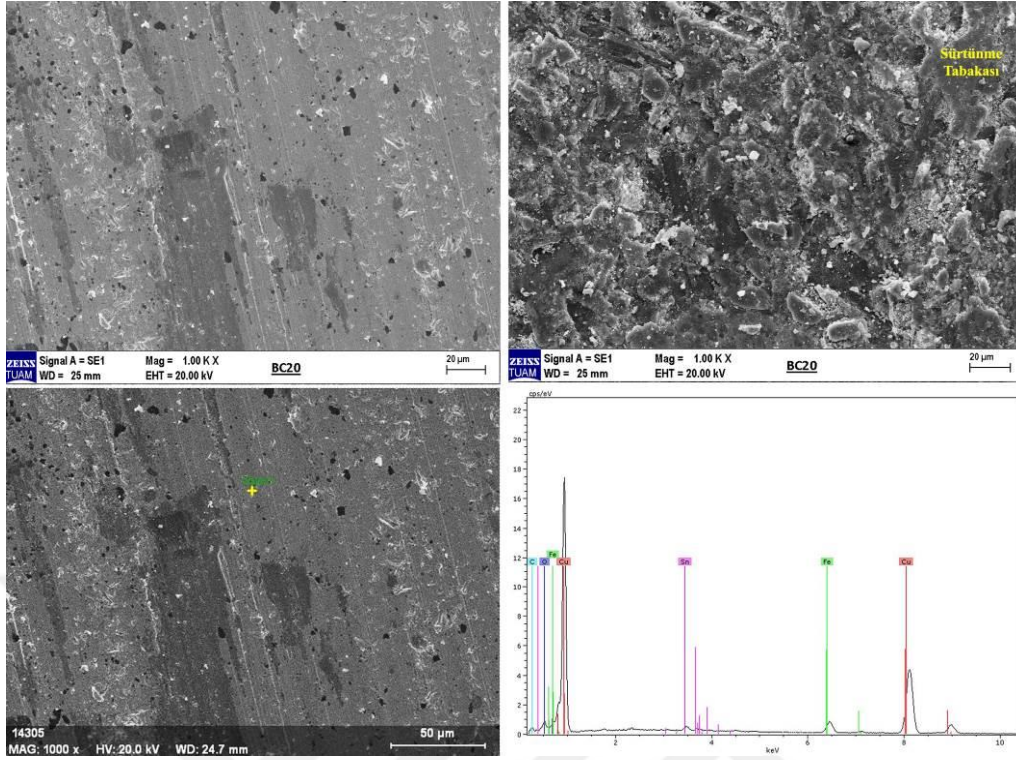
Çizelge 4.10'da yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği incelendiğinde içerisinde %45,34 oranında CaO ve %32,36 oranında SiO₂ olduğu görülmektedir. Numune

bileşimi içerisinde yüksek fırın cürufu içeriği arttıkça Ca ve Si elementlerinin oranının artışı göze çarpmaktadır. Özellikle Resim 4.5 incelendiğinde yapı içerisinde %40 oranında yüksek fırın cürufu içeren numunenin aşınmış yüzeyi üzerinde belirlenen noktanın EDX analizinde en yüksek oranda iki elementin Si ve Ca elementleri olduğu görülmektedir. Frenleme sırasında balata ve disk arasında oluşan yüksek sürtünmeden dolayı kopmalar ve aşınma parçacıkları meydana gelir. Aşınma sonucu oluşan parçacıklar balata yüzeyinde birikir. Resim 4.2’de YFC20 numunesinin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntülerinde aşınma sonucu oluşan parçacıkların balata yüzeyinde biriktiği görülmektedir.

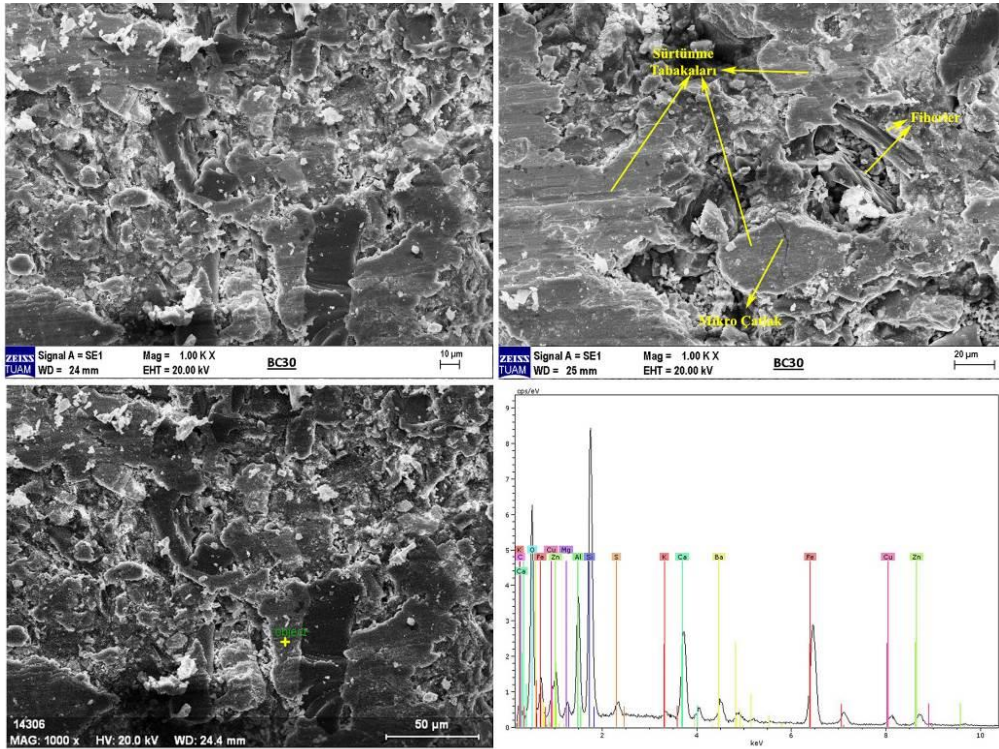
Resim 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9’da sırasıyla BC10, BC20, BC30 ve BC40 numunelerinin aşınmış yüzeylerinin 1000x büyütülmüş SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları gösterilmiştir.



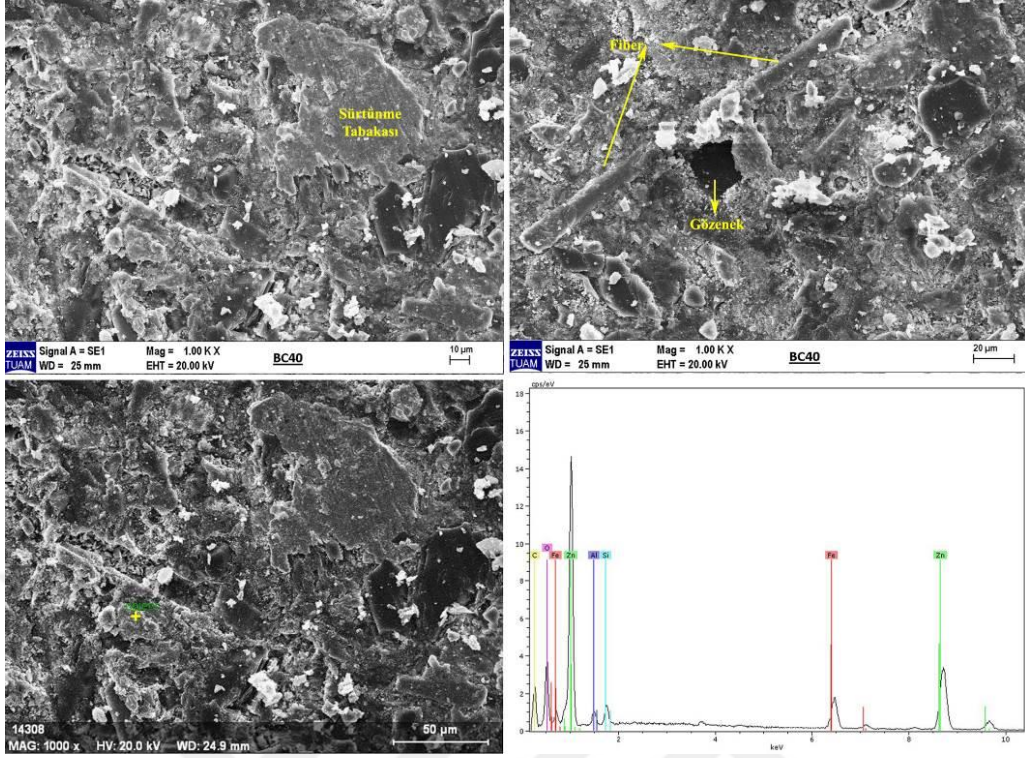
Resim 4.6 BC10 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



Resim 4.7 BC20 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



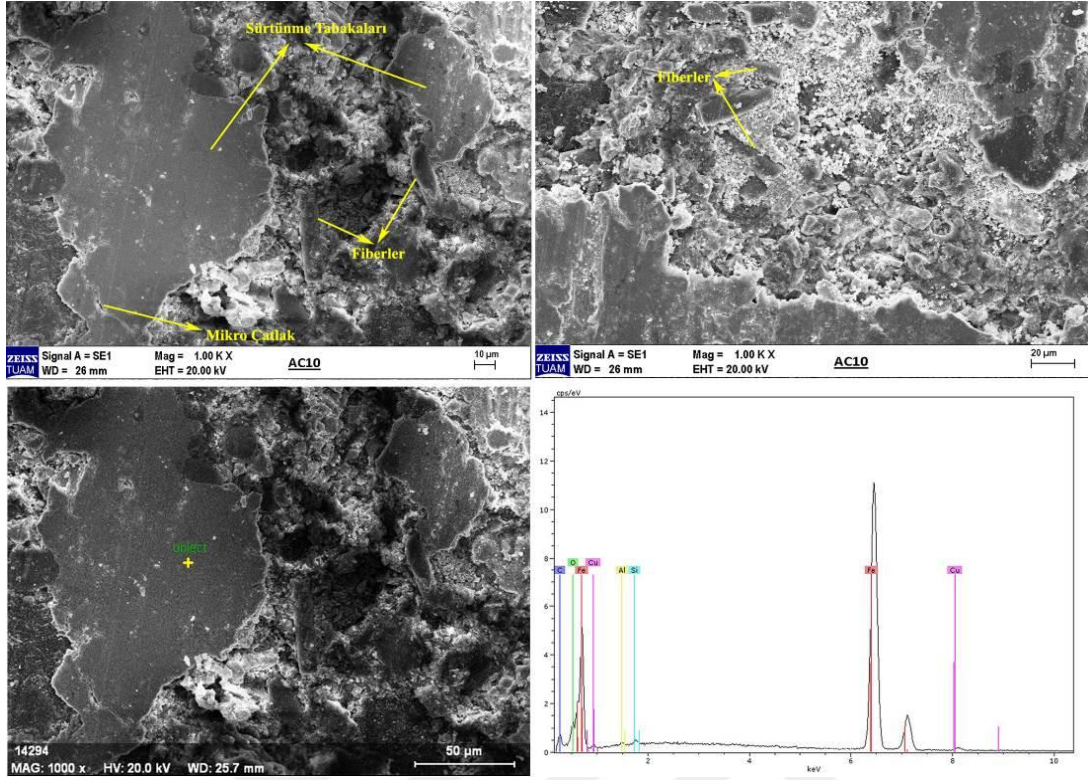
Resim 4.8 BC30 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



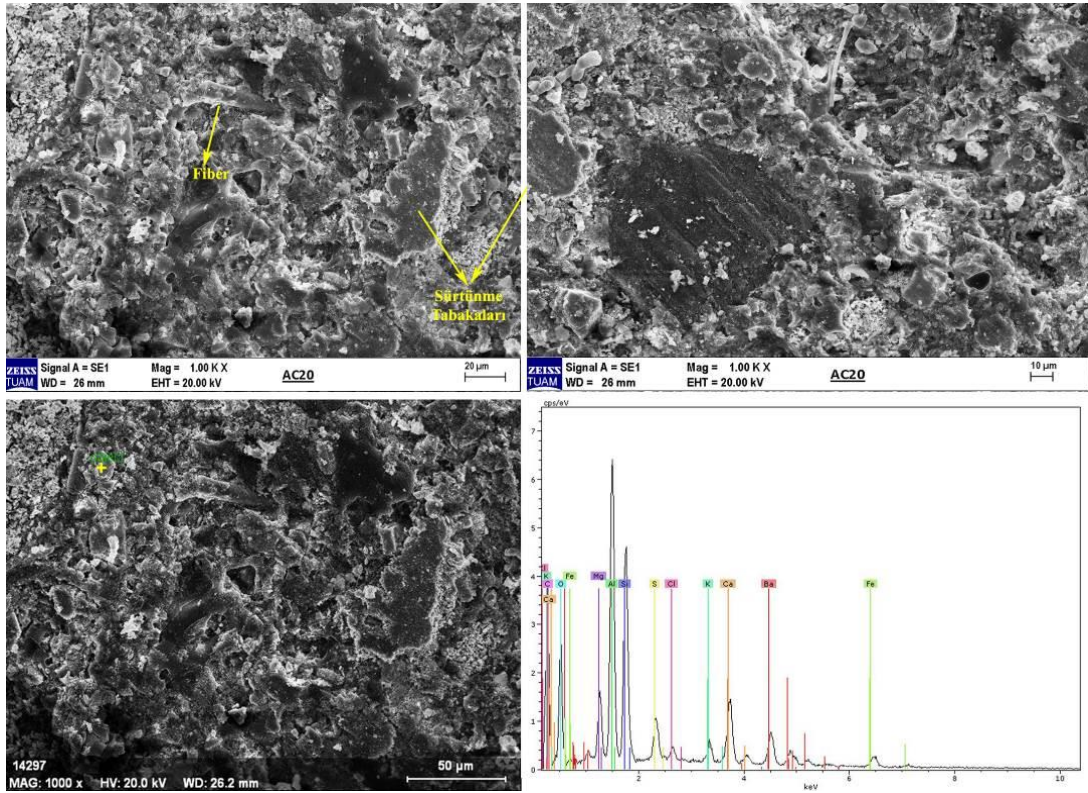
Resim 4.9 BC40 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları

Çizelge 4.10’da bakır cürufunun kimyasal içeriği incelendiğinde içerisinde %32,46 oranında ZnO, %27,83 oranında SiO₂ ve %11,37 oranında Fe₂O₃ olduğu görülmektedir. Numune bileşimi içerisinde bakır cürufu içeriği arttıkça Zn, Si ve Fe elementlerinin oranının artışı göze çarpmaktadır. Özellikle Resim 4.8 ve 4.9 incelendiğinde yapı içerisinde sırasıyla %30 ve %40 oranında bakır cürufu içeren numunenin aşınmış yüzeyi üzerinde belirlenen noktanın EDX analizinde en yüksek orandaki elementlerin Zn, Si ve Fe elementleri olduğu görülmektedir. Resim 4.7’de BC20 numunesinin aşınmış yüzeyinin SEM görüntüleri incelendiğinde, bronz tozu içerisinde bulunan Cu elementinin varlığı göze çarpmaktadır. Sürtünme sırasında yüzeye yapışarak bir tabaka oluşturmuştur. Resim 4.8’de ise balata ve disk arasında oluşan sürtünmeden dolayı çukur ve yükseltilerin olduğu göze çarpmaktadır.

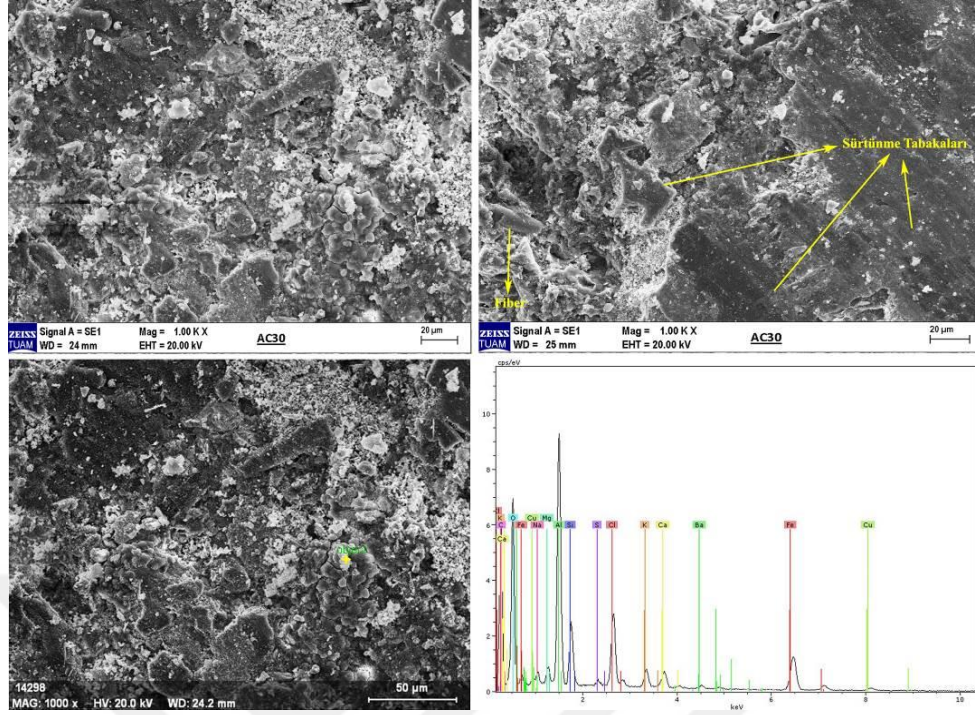
Resim 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13’de sırasıyla AC10, AC20, AC30 ve AC40 numunelerinin aşınmış yüzeylerinin 1000x büyütülmüş SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları gösterilmiştir.



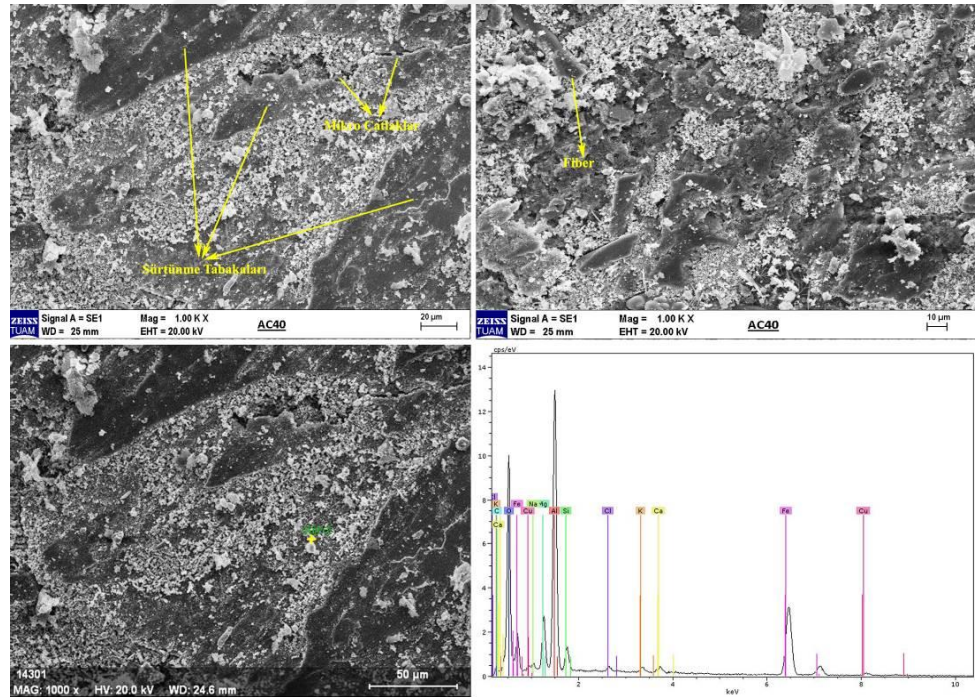
Resim 4.10 AC10 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



Resim 4.11 AC20 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



Resim 4.12 AC30 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları



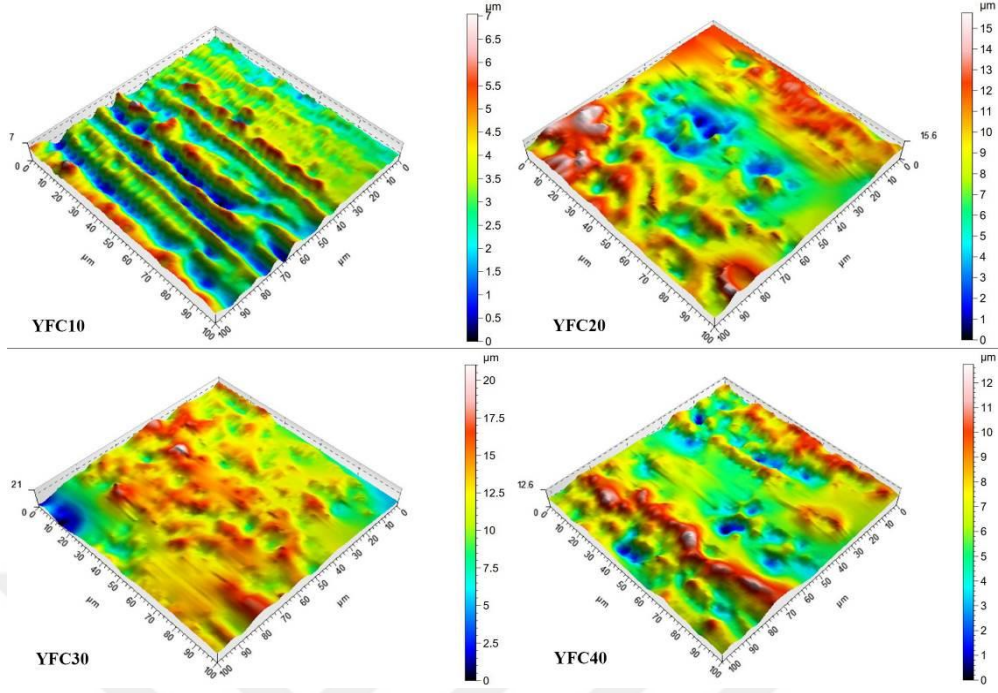
Resim 4.13 AC40 numunesine ait SEM ve EDX analiz sonuçları

Çizelge 4.10’da alüminyum cürufunun kimyasal içeriği incelendiğinde içerisinde %66,56 oranında Al_2O_3 olduğu görülmektedir. Numune bileşimi içerisinde alüminyum cürufu içeriği arttıkça Al elementinin oranının artışı göze çarpmaktadır. Özellikle Resim

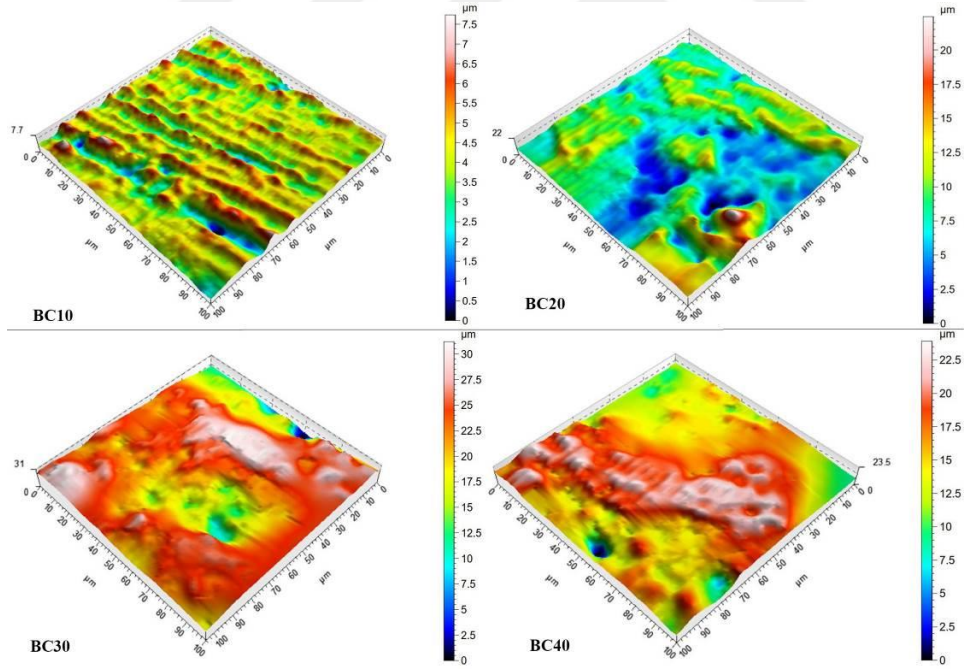
4.13 incelendiğinde yapı içerisinde %40 oranında alüminyum cürufu içeren numunenin aşınmış yüzeyi üzerinde belirlenen noktanın EDX analizinde en yüksek oranda Al elementi olduğu görülmektedir. Resim 4.10 ve Resim 4.13’de sürtünme sonucu numunelerin SEM görüntülerinde mikro çatlakların oluştuğu görülmektedir. Tez çalışmasındaki tüm numuneler içerisinde en yüksek ortalama SK, %20 oranında alüminyum cürufu içeren AC20 numunesinde görülmüştür. Resim 4.11’de AC20 numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde oluşan yüksek sürtünme katsayısından kaynaklı aşınmış bölgenin daha pürüzlü ve düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

4.6 Numunelerin Üç Boyutlu Profilometre Görüntüleri

Ölçülen sürtünme yüzeylerinin ortalama pürüzlülük değerinin karekökü (S_q), en yüksek tepe noktası pürüzlülüğü (S_p), en derin çukur derinliği pürüzlülüğü (S_v), profilin maksimum yükseklik değeri ortalamaları (S_z) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (S_a) değerleri kaydedilmiştir. S_a , R_a ’nın (bir çizginin aritmetik ortalama yüksekliği) bir yüzeye uzantısıdır. Mutlak bir değer olarak, yüzeyin aritmetik ortalamasına göre her noktanın yükseklik farkını ifade eder. Bu parametre genel olarak yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmek için kullanılır. Resim 4.14’de yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen numunelerin, deneylerden sonra sürtünme yüzeylerinin 3 boyutlu morfolojisi gösterilmiştir. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri YFC20 numunesinde 2,14 μm ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri YFC10 numunesinde 0,773 μm olarak ölçülmüştür. S_z , tanımlanan alan içindeki en büyük tepe yüksekliği değeri ile en büyük çukur derinliği değerinin toplamı olarak tanımlanır. En yüksek S_z değeri 21 μm olarak YFC30 numunesinde ölçülmüştür. En düşük S_z değeri ise 7,04 μm olarak YFC10 numunesinde ölçülmüştür. Resim 4.15’de bakır cürufu kullanılarak üretilen numunelerin, deneylerden sonra sürtünme yüzeylerinin 3 boyutlu morfolojisi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri BC30 numunesinde 3,40 μm ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri BC10 numunesinde 0,65 μm olarak ölçülmüştür. En yüksek S_z değeri 31,2 μm olarak BC30 numunesinde, en düşük S_z değeri ise 7,73 μm olarak BC10 numunesinde ölçülmüştür.



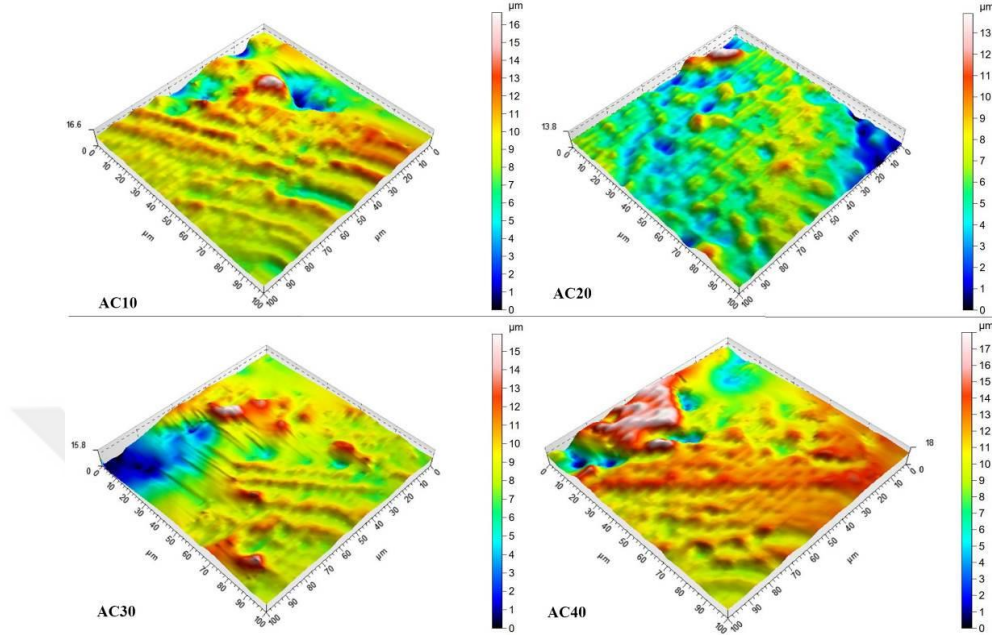
Resim 4.14 YFC numunelerinin 3 boyutlu profilometre görüntüleri



Resim 4.15 BC numunelerinin 3 boyutlu profilometre görüntüleri

Resim 4.16’da alüminyum cürufu kullanılarak üretilen numunelerin, deneylerden sonra sürtünme yüzeylerinin 3 boyutlu morfolojisi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri AC40 numunesinde 1,80 μm ve en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri AC20 numunesinde 1,23 μm olarak

ölçülmüştür. En yüksek Sz değeri 18 μm olarak AC40 numunesinde ölçülmüştür. En düşük Sz değeri ise 13,9 μm olarak AC20 numunesinde ölçülmüştür.



Resim 4.16 AC numunelerinin 3 boyutlu profilometre görüntüleri

4.7 Diğer Fiziksel Özellikler

Tez çalışması boyunca üretilen bütün numuneler için TS 9075'te belirlenen deney şartları uygulanarak su, tuzlu su, yağ ve fren sıvısına dayanımını testleri gerçekleştirilmiştir. Su ve tuzlu sudaki kütle ve boyut değişimleri % olarak Çizelge 4.14'de, yağ ve hidrolik yağındaki kütle ve boyut değişim değerleri % olarak Çizelge 4.15'de gösterilmiştir. Çizelge 4.14 incelendiğinde numunelerin saf su içerisindeki en yüksek kütleli değişimi %6,588 değeriyle AC40 numunesinde, en yüksek boyut değişimi ise %0,772 ile KS-12 numunesinde görülmüştür. Tuzlu su içerisindeki en yüksek kütleli değişim %8,757 değeriyle SıPB-12 numunesinde, en yüksek boyut değişimi ise %0,836 değeriyle yine SıPB-12 numunesinde görülmüştür. Çizelge 4.15 incelendiğinde numunelerin yağ içerisindeki en yüksek kütleli değişimi %9,130 değeriyle 45 numaralı deney numunesinde, en yüksek boyut değişimi ise %0,977 değeriyle SıPSı-125 numunesinde görülmüştür. Hidrolik yağı içerisindeki en yüksek kütleli değişim %9,636 değeriyle SoPS-1 numunesinde, en yüksek boyut değişimi ise %0,806 değeriyle 9 numaralı deney numunesinde görülmüştür.

Çizelge 4.14 Numunelerin su ve tuzlu sudaki kütle ve boyut değişim değerleri

Numune Adı	Su (%)		Tuzlu Su (%)	
	Kütle	Boyut	Kütle	Boyut
1	2,805	0,297	5,193	0,460
2	2,409	0,254	4,143	0,416
3	2,303	0,471	3,560	0,232
4	2,339	0,502	3,298	0,377
5	2,124	0,241	3,127	0,360
6	2,107	0,134	3,059	0,663
7	2,198	0,237	3,333	0,464
8	2,345	0,327	3,616	0,332
9	2,264	0,530	3,461	0,806
10	2,604	0,229	3,903	0,669
11	2,608	0,764	2,939	0,366
12	2,145	0,639	3,084	0,387
13	2,550	0,613	3,565	0,373
14	2,486	0,678	4,151	0,584
15	2,549	0,109	4,283	0,473
16	2,281	0,226	3,612	0,323
17	2,154	0,247	3,171	0,246
18	2,263	0,261	2,974	0,503
19	2,248	0,567	3,356	0,439
20	2,451	0,228	3,697	0,631
21	2,393	0,407	3,500	0,275
22	2,489	0,522	3,486	0,355
23	2,471	0,555	4,097	0,680
24	2,380	0,382	3,388	0,726
25	2,554	0,275	3,749	0,390
26	2,219	0,467	3,199	0,240
27	2,309	0,255	3,251	0,357
28	2,134	0,248	3,117	0,706
29	2,341	0,538	3,194	0,242
30	2,881	0,539	4,129	0,418
31	2,512	0,263	3,590	0,518
32	2,277	0,476	3,616	0,373
33	2,650	0,535	3,625	0,531
34	2,209	0,375	3,403	0,257
35	2,273	0,126	3,788	0,399
36	2,403	0,395	3,530	0,519
37	2,510	0,559	3,458	0,133
38	3,179	0,636	3,979	0,421
39	2,750	0,432	4,048	0,526
40	2,654	0,581	4,591	0,432
41	2,419	0,407	3,829	0,277

Çizelge 4.14 (Devam) Numunelerin su ve tuzlu sudaki kütle ve boyut değişim değerleri

42	2,462	0,539	3,563	0,140
43	2,467	0,404	3,613	0,651
44	2,670	0,526	3,675	0,523
45	2,761	0,391	3,637	0,403
46	2,387	0,387	3,680	0,654
SoPS-1	2,280	0,248	8,599	0,677
SoPS-3	2,303	0,762	5,933	0,515
SoPS-5	2,837	0,350	6,243	0,384
SoPB-8	2,377	0,249	6,998	0,442
SoPB-10	2,303	0,762	5,933	0,515
SoPB-12	2,533	0,527	6,624	0,147
SiPS-5	2,952	0,414	7,472	0,772
SiPS-10	2,303	0,762	5,933	0,515
SiPS-15	2,992	0,587	8,094	0,329
SiPB-8	2,986	0,562	7,395	0,632
SiPB-10	2,303	0,762	5,933	0,515
SiPB-12	3,643	0,611	8,757	0,836
SiPSi-125	2,206	0,219	5,358	0,106
SiPSi-150	2,303	0,762	5,933	0,515
SiPSi-175	2,638	0,419	7,158	0,475
KS-4	2,535	0,268	7,017	0,750
KS-8	2,303	0,762	5,933	0,515
KS-12	3,026	0,772	8,466	0,504
KS _i -120	3,033	0,498	7,525	0,305
KS _i -150	2,303	0,762	5,933	0,515
KS _i -180	2,780	0,258	7,064	0,302
RN	3,547	0,356	4,186	0,700
YFC10	3,733	0,566	5,944	0,408
YFC20	3,574	0,581	5,184	0,477
YFC30	4,362	0,386	5,857	0,505
YFC40	3,490	0,532	5,329	0,653
BC10	4,585	0,404	5,374	0,264
BC20	4,292	0,140	5,678	0,516
BC30	5,122	0,401	7,858	0,385
BC40	3,910	0,683	6,715	0,659
AC10	5,078	0,456	4,785	0,654
AC20	4,660	0,323	5,328	0,375
AC30	4,662	0,374	7,546	0,627
AC40	6,588	0,564	8,458	0,427

Çizelge 4.15 Numunelerin yağ ve hidrolik yağındaki kütle ve boyut değişim değerleri

Numune Adı	Yağ (%)		Hidrolik Yağı (%)	
	Kütle	Boyut	Kütle	Boyut
1	7,521	0,148	5,193	0,460
2	6,597	0,253	4,143	0,416
3	6,339	0,236	3,560	0,232
4	6,832	0,251	3,298	0,377
5	6,268	0,120	3,127	0,360
6	6,264	0,134	3,059	0,663
7	6,801	0,236	3,333	0,464
8	7,062	0,435	3,616	0,332
9	7,155	0,318	3,461	0,806
10	8,221	0,569	3,903	0,669
11	7,452	0,510	2,939	0,366
12	6,258	0,384	3,084	0,387
13	7,353	0,368	3,565	0,373
14	7,049	0,452	4,151	0,584
15	7,531	0,109	4,283	0,473
16	6,974	0,337	3,612	0,323
17	6,885	0,735	3,171	0,246
18	7,102	0,260	2,974	0,503
19	7,161	0,340	3,356	0,439
20	8,249	0,228	3,697	0,631
21	8,009	0,136	3,500	0,275
22	8,360	0,261	3,486	0,355
23	6,642	0,277	4,097	0,680
24	6,522	0,633	3,388	0,726
25	7,350	0,274	3,749	0,390
26	6,405	0,233	3,199	0,240
27	6,654	0,382	3,251	0,357
28	6,560	0,494	3,117	0,706
29	7,060	0,537	3,194	0,242
30	8,498	0,538	4,129	0,418
31	7,853	0,523	3,590	0,518
32	7,227	0,710	3,616	0,373
33	8,635	0,268	3,625	0,531
34	6,279	0,125	3,403	0,257
35	6,492	0,250	3,788	0,399
36	7,176	0,394	3,530	0,519
37	7,477	0,279	3,458	0,133
38	8,364	0,382	3,979	0,421
39	8,695	0,144	4,048	0,526
40	8,470	0,291	4,591	0,432
41	8,068	0,675	3,829	0,277

Çizelge 4.15 (Devam) Numunelerin yağ ve hidrolik yağındaki kütle ve boyut değişim değerleri

42	7,943	0,671	3,563	0,140
43	7,839	0,670	3,613	0,651
44	8,784	0,263	3,675	0,523
45	9,130	0,519	3,637	0,403
46	6,364	0,129	3,680	0,654
SoPS-1	6,139	0,248	9,636	0,676
SoPS-3	6,152	0,762	5,461	0,388
SoPS-5	6,860	0,350	6,165	0,384
SoPB-8	6,156	0,249	6,016	0,589
SoPB-10	2,303	0,762	5,933	0,515
SoPB-12	6,727	0,527	7,271	0,295
SiPS-5	7,317	0,414	7,472	0,155
SiPS-10	2,303	0,762	5,933	0,515
SiPS-15	7,386	0,587	7,458	0,493
SiPB-8	6,626	0,562	7,082	0,790
SiPB-10	2,303	0,762	5,933	0,515
SiPB-12	8,383	0,762	7,817	0,502
SiPSi-125	5,749	0,977	5,536	0,106
SiPSi-150	2,303	0,762	5,933	0,515
SiPSi-175	6,863	0,419	6,205	0,475
KS-4	6,595	0,268	6,815	0,600
KS-8	2,303	0,762	5,933	0,515
KS-12	7,840	0,772	8,457	0,672
KS _i -120	7,855	0,498	7,005	0,152
KS _i -150	2,303	0,762	5,933	0,515
KS _i -180	6,850	0,515	7,865	0,452
RN	6,356	0,238	8,744	0,585
YFC10	5,871	0,341	6,614	0,408
YFC20	6,098	0,465	6,622	0,477
YFC30	6,435	0,513	7,608	0,505
YFC40	6,677	0,532	6,286	0,654
BC10	7,108	0,404	5,714	0,132
BC20	6,268	0,419	8,034	0,387
BC30	7,637	0,534	8,839	0,256
BC40	6,143	0,570	7,412	0,423
AC10	6,321	0,228	6,986	0,785
AC20	8,883	0,323	8,257	0,375
AC30	7,467	0,374	7,519	0,501
AC40	7,295	0,564	8,434	0,320

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada endüstriyel atık malzemelerin otomotiv fren balatalarında kullanımı detaylı olarak araştırılmıştır. Tez çalışması dört adımda yürütülmüştür. İlk adımda içerik optimizasyonu için 46 farklı içeriğe sahip numune üretilmiş, bu numunelerin ortalama SK, sürtünme stabilite, özgül aşınma oranı, yoğunluk ve sertlik değerleri ölçülmüştür. İçerik optimizasyonunda elde edilen sonuçlara göre;

- 46 numunenin sonucu detaylı olarak incelendiğinde fenolik reçinenin fren balatası içerisinde kütlece oranı %15-25 arasında olduğunda, numunelerin sertlik değerinde bir artış olduğu görülmüştür.
- Alümina oranının en yüksek %15 kullanıldığı numune en yüksek sertliğe sahip olmuştur. Ayrıca fren balatalarının sertliğiyle özgül aşınma oranı arasında doğru bir orantı belirlenmiştir. Numunelerin sertliği arttıkça özgül aşınma oranlarının da artma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir.
- Grafit tozunun kullanımıyla ortalama SK değeri arasında ters bir orantı olduğu görülmüştür. Grafit tozunun kütlece oranının artması ortalama SK değerini azaltmıştır.
- Numunelerin ortalama SK değeri, yapı içerisine katılan malzemelerin oranlarına bağlı olarak değişmektedir. 46 deney sonucuna göre fren balatası içerisinde bağlayıcı ve yağlayıcı oranlarının artmasıyla ortalama SK değerinde düşüş olduğu, tam tersi olarak fiber malzeme ve aşındırıcı oranlarının artmasıyla da ortalama SK değerinde artış olduğu görülmüştür. Bu yüzden fren balatası üretiminde malzeme oranları belirlenirken optimum bir oran oluşturulması önemli bir konudur.
- TS555 (2019) standardında, fren balatalarının sıcaklığa bağlı olarak 0.20-0.70 arasında bir sürtünme katsayısına sahip olması gerektiği belirtilir. 46 deney sonucu içerisinde maksimum sürtünme katsayısı 43 numaralı deney numunesinde 0,519, minimum sürtünme katsayısı 41 numaralı deney numunesinde 0,371 olarak elde edilmiştir. 46 numune için ortalama SK değeri 0,44 olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, üretilen tüm balata numunelerinde bu standartlarda belirtilen aralıkta optimum sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

İkinci adımda, üretilen ve testleri yapılan 46 farklı içeriğe sahip numunelerin sonuçlarına göre ortalama SK, özgül aşınma oranı ve sürtünme stabilitesi değerleri genetik programlama yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Çok genli genetik programlamada 8 adet giriş değişkeni (üretim için kullanılan toz malzemeler) belirlenmiştir. Tüm modeller için uygunluk fonksiyonu ortalama karekök hata (RMSE) olarak seçilmiştir. 46 tane numunenin %85'i eğitim için ayrılmış, kalan %15'i ise test için kullanılmıştır. Genetik programlama tabanlı modelleri oluşturmak için MATLAB 2018a'da yazılmış açık kaynak kodlu GPTIPS araç seti kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karekök hata (RMSE), ortalama karesel hata (MSE) ve karesel hatanın toplamı (SSE) performans göstergeleri hesaplanmıştır. Elde edilen model sonuçlarına göre;

- Ortalama SK değerinin modelini oluşturabilmek için popülasyon büyüklüğü 100 ve nesil sayısı 3000 olarak belirlenmiştir. Geliştirilen modelde belirleme katsayısı değeri eğitim verileri için 0,96; test verileri için 0,90 ve tüm veriler için 0,95 olarak hesaplanmıştır.
- Ortalama mutlak hata değeri (MAE) eğitim verileri için 0,004707; test verileri için 0,01198 ve tüm veriler için 0,005814 olarak belirlenmiştir. Ortalama karekök hata (RMSE) değerleri eğitim verileri için 0,006165; test verileri için 0,01368 ve tüm verileri için 0,007792 olarak hesaplanmıştır.
- Özgül aşınma oranı modelini oluşturmak için popülasyon büyüklüğü 300 ve nesil sayısı 300 olarak belirlenmiştir. Geliştirilen modelde belirleme katsayısı değeri eğitim verileri için 0,93; test verileri için 0,92 ve tüm veriler için 0,93 olarak hesaplanmıştır.
- Ortalama mutlak hata değerleri (MAE); eğitim verileri için $4,3779 \times 10^{-7}$; test verileri için $5,7664 \times 10^{-7}$ ve tüm veriler için $4,5892 \times 10^{-7}$ olarak belirlenmiştir. Ortalama karekök hata (RMSE) değerleri eğitim verileri için $6,0356 \times 10^{-7}$; test verileri için $6,3286 \times 10^{-7}$ ve tüm veriler için $6,0811 \times 10^{-7}$ olarak hesaplanmıştır.
- Sürtünme stabilitesi modelini oluşturmak için popülasyon büyüklüğü 200 ve nesil sayısı 300 olarak belirlenmiştir. Geliştirilen modelde belirleme katsayısı değeri eğitim verileri için 0,87; test verileri için 0,84 ve tüm veriler için 0,86 olarak hesaplanmıştır.

- Ortalama mutlak hata değerleri (MAE); eğitim verileri için 1,4413; test verileri için 1,5728 ve tüm veriler için 1,4614 olarak belirlenmiştir. Ortalama karekök hata (RMSE) değerleri eğitim verileri için 1,766; test verileri için 1,672 ve tüm verileri için 1,752 olarak hesaplanmıştır.

nc adımda numunelerin üretim parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Soğuk presleme süresi ve basıncı; sıcak presleme süresi-sıcaklığı ve basıncı; krleme sıcaklığı ve süresi değerleri optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Soğuk presleme süresi arttıķa numunelerin genel olarak ortalama SK değeri artmış, zgl aşınma oranı değeri azalmıştır. Soğuk presleme basıncındaki artış da yine numunelerin ortalama SK değerini arttırmış, zgl aşınma oranı değerini azaltmıştır.
- Soğuk presleme parametreleri içerisinde presleme süresinin 3 dk ve presleme basıncının 12 MPa olması yeterli grlmştir.
- Sıcak presleme sresindeki artış numunelerin ortalama SK değerini arttırmıştır. Fakat 10 ve 12 dakika presleme sürelerinde sürtünme stabilitesi ve özgül aşınma oranı değerleri çok etkilenmemiş ve birbirine yakın değerler göstermiştir. Sıcak presleme basıncının artmasıyla ortalama SK değeri artmıştır.
- Sıcak presleme parametreleri içerisinde presleme süresinin 15 dk, presleme basıncının 12 MPa ve presleme sıcaklığının 150 C olması yeterli grlmştir.
- KS-4, KS-8 ve KS-12 numuneleri arasında ortalama SK değeri en yüksek olan numune 12 s boyunca kürlenen KS-12 numunesi olmuştur. Fakat bu numunenin zgl aşınma değeri diğerlerine göre çok yüksek olmuştur. Krleme sıcaklığındaki artışla beraber numunelerin ortalama SK değerleri azalmıştır.
- Krleme parametreleri içerisinde krleme süresi 8 s ve krleme sıcaklığı 150 C olması yeterli grlmştir.

Dördüncü ve son adımda ise yüksek fırın cürufu, bakır cürufu ve alüminyum cürufunun fren balatası içeriğinde baritin yerine dolgu malzemesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Balata bileşimi içerisinde yüksek fırın cürufu oranının arttırılmasıyla numunelerin

ortalama SK değerleri azalmıştır.

- YFC10, YFC20, YFC30 ve YFC40 numuneleri arasında en dūřuk ortalama SK deęeri %40 oranında yūkksek fırın cūrufu ięeren YFC40 numunesinde geręekleřmiřtir.
- Yūkksek fırın cūrufu oranının artmasıyla ortalama SK deęerine benzer řekilde numunelerin sertlik ve yoęunluk deęerlerinde de dūřuř meydana gelmiřtir. Yūkksek fırın cūrufunun fren balatası kompozisyonunda %10 deęerine kadar kullanımının uygun olduęu ęalıřma sonucunda ōnerilebilir.
- Yūkksek fırın cūrufu kullanılarak geręekleřtirilen arasında maksimum sūrtūnme katsayısı YFC10 numunesinde 0,5011, minimum sūrtūnme katsayısı YFC40 numunesinde 0,2653 olarak elde edilmiřtir. Yapılan ęalıřmalar sonucunda, ūretilen tūm balata numunelerinde TS555 (2019) standartlarında belirtilen aralıktaki sūrtūnme katsayıları elde edilmiřtir.
- Balata bileřimi ięerisinde bakır cūrufu oranının arttırılmasıyla yoęunluk deęerinde bir azalma, sertlik deęerinde de bir artıř gōrūlmūřtır.
- BC10, BC20, BC30 ve BC40 numuneleri ięerisinde en yūkksek ortalama SK deęerine ve sūrtūnme stabilitesine sahip numune %30 oranında bakır cūrufu ięeren BC-30 numunesi olmuřtur.
- Sūrtūnme-ařınma testi sırasında diskle balata arasında en yūkksek sıcaklık yine BC-30 numunesinde gōrūlmūřtır. Bakır cūrufunun fren balatası kompozisyonunda %30 deęerine kadar kullanımının uygun olduęu ęalıřma sonucunda ōnerilebilir.
- Tez ęalıřmasında yapılan tūm deneyler ięerisinde en yūkksek ortalama SK deęerine 0,5815 ile %20 oranında alūminyum cūrufu ięeren AC20 numunesinde ulařılmıřtır.
- Balata bileřimi ięerisinde alūminyum cūrufu oranının arttırılmasıyla yoęunluk deęerinde bir azalma, sertlik deęerinde de bir artıř gōrūlmūřtır.
- Tez ęalıřmasında yapılan tūm deneyler ięerisinde en dūřuk ōzgūl ařınma oranı deęeri $2,069 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ ile %40 oranında alūminyum cūrufu ięeren numunesinde gōrūlmūřtır. Fakat %40 alūminyum cūrufu ięerięine sahip AC40 numunesinin deneyleri geręekleřtirilirken yūkksek gūrūltū seviyesi oluřmuřtur. Yūkksek gūrūltū seviyesi fren balatalarında istenilmeyen ōzelliklerden biridir.
- Bu yūzden Alūminyum cūrufunun fren balatası kompozisyonunda %20 deęerine kadar kullanımının uygun olduęu ęalıřma sonucunda ōnerilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abhik R, Umasankar V, Xavior M A, 2014, Evaluation of Properties for Al-Sic Reinforced Metal Matrix Composite for Brake Pads, *Procedia Engineering*, 97, 941-950.
- Abutu J, Lawal S A, Ndaliman M B, Lafia-Araga R A, Adedipe O, Choudhury I A, 2018, Effects of Process Parameters on the Properties of Brake Pad Developed From Seashell as Reinforcement Material Using Grey Relational Analysis, *Engineering Science and Technology, An International Journal*, 21, 787-797.
- Adeosun S O, Sekunowo O I, Taiwo, O O, Ayoola W A, Machado A, 2014, Physical and Mechanical Properties of Aluminum Dross, *Advances in Materials*, 3, 6-10.
- Affatato S, Grillini L, 2013, Topography in Bio-Tribocorrosion, *Bio-Tribocorrosion in Biomaterials and Medical Implants*, Woodhead Publishing Limited, 1-21.
- Akbulut F, Mutlu İ, The Effect of Sintering Time on the Tribological Properties of Automotive Brake Pads, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 12, 16-21.
- Akıncıoğlu G, Akıncıoğlu S, Öktem H, Uygur İ, 2021, Brake Pad Performance Characteristic Assessment Methods, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5, 67-78.
- 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.
- Akıncıoğlu G, 2022, Evaluation of the Effect of the Novolac Resin Ratio on the High-Temperature Performance of the Brake Pads, *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6, 196 - 201.
- Alaud S, 2019, Ground Granulated Blast-Furnace and Corex Slag-Comparative Study, *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*, 1636–1640.
- Aleksendrić D, Carlone P, 2015, Soft Computing in the Design and Manufacturing of

- Composite Materials: Applications to Brake Friction and Thermoset Matrix Composites, Woodhead Publishing, 7-13.
- Aleksendrić D, Senatore A, 2012, Optimization of Manufacturing Process Effects on Brake Friction Material Wear, *Journal of Composite Materials*, 46, 2777-2791.
- Amaren S G, Yawas D S, Aku S Y, 2013, Effect of Periwinkles Shell Particle Size on the Wear Behavior of Asbestos free Brake Pad, *Results in Physics*, 3, 109-114.
- Aras S, Tarakçioğlu N, 2021, Optimization and Assessment of Brake Pad Production Parameters and Organic Juniperus Drupacea Cone Powder Additive Ratio Using the Taguchi Method, *Journal of Composite Materials*, 55, 2705-2719.
- Bayazidi A M, Wang G, Bolandi H, Alavi A H, Gandomi A H, 2014, Multigene Genetic Programming for Estimation of Elastic Modulus of Concrete, *Mathematical Problems in Engineering*, Special Issue, 1-10.
- Bijwe J, 2015, Multifunctionality of Nonasbestos Organic Brake Materials, *Multifunctionality of Polymer Composites*, 551-572.
- Bijwe J, Aranganathan N, Sharma S, Dureja N, Kumar R, 2012, Nano-Abrasives in Friction Materials-Influence on Tribological Properties, *Wear*, 296, 693-701.
- Blau P J, 2001, Compositions, Functions, And Testing Of Friction Brake Materials And their Additives, Oak Ridge National Laboratory, 27p.
- Chan D, Ve Stachowiak G W, 2004, Review of Automotive Brake Friction Materials, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 218, 953-966.
- Chandradass J, Baskara S P, Amutha S M, 2021, Fabrication and Characterization of Asbestos Free Epoxy Based Brake Pads Using Carbon Fiber as Reinforcement, *Materials Today: Proceedings*, 45, 7222-7227.
- Che Mohd Ruzaidi G, 2014, Study of a Palm Slag-Filled Friction Composite for Brake Pad, School of Materials Engineering, Ph D, 157p, Malaysia.
- Contreras M, Gázquez M J, Romero M, Bolívar J P, 2020, Recycling of Industrial Wastes for Value-added Applications in Clay-Based Ceramic Products: A Global Review, *New Materials in Civil Engineering*, 155-219.

- Dante R C, 2016, Types of Friction Material Formulas, Handbook of Friction Materials and Their Applications, 29-54.
- Das B, Prakash S, Reddy P S R, Misra V N, 2007, An Overview of Utilization of Slag and Sludge From Steel Industries, Resources, Conservation And Recycling, 50, 40–57.
- Dhanesh P, Amit R, Pitroda J R, 2019, Sustainable Construction Material-Copper Slag: A Review, International Journal of Engineering Research, 8, 10-15.
- Ekpruke E, Ossia C V, Big-Alabo A, 2022, Recent Progress and Evolution in the Development of Non-Asbestos Based Automotive Brake Pad- A Review, Journal of Manufacturing Engineering, 17, 51-63.
- EN 197-1, Slag Cement Granulated Blast Furnace Slag, CEM III, Type Cements.
- Ertan R, Yavuz N, 2010, An Experimental Study on the Effects of Manufacturing Parameters on the Tribological Properties of Brake Lining Materials, Wear, 268, 1524-1532.
- Fei J, Li H J, Fu Y W, Qi L H, Zhang Y L, 2010, Effect of Phenolic Resin Content on Performance of Carbon Fiber Reinforced Paper-Based Friction Material, Wear, 269, 534-540.
- Fonlupt C, 2005, Book Review: Genetic Programming IV: Routine Human-Competitive Machine Intelligence, Genetic Programming and Evolvable Machines, 6, 231-233
- Gandomi A H, Alavi A H, 2012, A New Multi-Gene Genetic Programming Approach to Nonlinear System Modeling, Part I: Materials and Structural Engineering Problems, Neural Computing and Applications, 21, 171-187.
- Ghareeb W T, El Saadany E F, Multi-Gene Genetic Programming For Short Term Load Forecasting, 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2013, October 2-4, İstanbul.
- Hentati N, Kchaou M, Cristol A L, Najjar D, Elleuch R, 2014, Impact of Post-Curing Duration on Mechanical, Thermal and Tribological Behavior of An Organic Friction Material, Materials and Design, 63, 699-709.

- Jariyathitipong P, Hosotani K, Fujii T, Ayano T, Strength and Durability of Concrete with Blast Furnace Slag, Sustainable Construction Materials and Technologies, Conference Paper, 2013, August.
- Joshi M N, 1980, Disc Brake Linings-Analytical Study and Selection Criteria, SAE International, 89, 2360-2370.
- Kanagaraj M, Babu S, Raj S, Jonah N, Fekete G, Christy T V, 2022, Influence of Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Tribological Characteristics of Automotive Brake Friction Materials, Industrial Lubrication and Tribology, 74, 837-843.
- Khafagy M, El-Dakhakhni W, Dickson-Anderson S, 2022, Multi-Gene Genetic Programming Expressions for Simulating Solute Transport in Fractures, Journal of Hydrology, 606, 127316.
- Khazaei A, Shojaei A, 2015, Modeling and Optimization of Friction Materials Based on Genetic Programming and Experimental Frictional Data, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 34, 581-590.
- Kim Y C, Cho M H, Kim S J, Jang H, 2008, The Effect of Phenolic Resin, Potassium Titanate, and CNSL on the Tribological Properties of Brake Friction Materials, Wear, 264, 204-210.
- Kosbe P, Patil P, Kulkarni R, 2022, Fade and Recovery Characteristics of Commercial Disc Brake Friction Materials: A Case Study, International Journal of Ambient Energy, 43, 2446-2452.
- Kumar V V, Kumaran S S, 2019, Friction Material Composite: Types of Brake Friction Material Formulations and Effects of Various Ingredients on Brake Performance-A Review, Materials Research Express, 6, 1-14.
- Lawal S A, Ugwuoke I C, Abutu J, Lafia-Araga R A, Dagwa I M, Kariim I, 2016, Rubber Scrap as Reinforced Material in the Production of Environmentally Friendly Brake Lining, Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 1, 763-772.
- Mahinroosta M, Allahverdi A, 2018, Enhanced Alumina Recovery from Secondary Aluminum Dross for High Purity Nanostructured γ -Alumina Powder Production:

- Kinetic Study, *Journal of Environmental Management*, 212, 278–291.
- Makni F, Cristol A L, Elleuch R, Desplanques Y, 2022, Organic Brake Friction Composite Materials: Impact Of Mixing Duration on Microstructure, Properties, Tribological Behavior and Wear Resistance, *Polymers*, 14, 1692.
- Matějka V, Jayashree P, Leonardi M, Vlček J, Sabovčík T, Straffellini G, 2022, Utilization of Metallurgical Slags in Cu-Free Friction Material Formulations, *Lubricants*, 10, 219.
- Mutlu İ, 2002, Seramik Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin Deneysel İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 195s, Sakarya.
- Mutlu İ, 2009, Artificial Neural Networks Modelling of Non-Asbestos Brake Lining Performance Boric Acid in Brake Pad, *Information Technology Journal*, 8, 398-402.
- Mutlu İ, Sugözü İ, Keskin A, 2015, The Effects of Porosity in Friction Performance of Brake Pad Using Waste Tire Dust, *Polímeros*, 25, 440-446
- Nawangarsi P, Jamasri, Rochardjo H S B, 2019, Effect of Phenolic Resin on Density, Porosity, Hardness, Thermal Stability, and Friction Performance as A Binder in Non-Asbestos Organic Brake Pad, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 547, 1-8.
- Paustenbach D J, Finley B L, Lu E T, Brorby G P, Sheehan P J, 2004, Environmental and Occupational Health Hazards Associated with the Presence of Asbestos in Brake Linings and Pads (1900 to Present): A “State-of-The-Art” Review, *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews*, 7, 25-80.
- Petavratzi E, Wilson S, 2007, Characterisation of Mineral Wastes, Resources and Processing Technologies Integrated Waste Management for the Production of Construction Material, Case Study: Residues From Aluminium Dross Recycling In Cement, *WRT* 177, 1–8.
- Rajan R, Tyagi Y K, Pruncu C I, Kulshreshtha S, Ranakoti L, Ve Singh T, 2022, Tribological Performance Evaluation of Slag Waste Filled Phenolic Composites

- for Automotive Braking Applications, *Polymer Composites*, 43, 7118-7129.
- Rebai H, 2014, *Tribology and Machine Elements*, HAMK Häme University Of Applied Sciences, B Sc, Thesis, 58p, Hämeenlinna.
- Reddy M S, Neeraja D, 2016, Mechanical and Durability Aspects of Concrete Incorporating Secondary Aluminium Slag, *Resource-Efficient Technologies*, 2, 225–232.
- Rupiyawet K, Kaewlob K, Sujaridworakun P, Buggakupta W, 2019, Optimization of Mixing Conditions on The Physical and Tribological Properties of Brake Pads, *Key Engineering Materials*, 824, 67-72.
- Sagiroglu S, Akdogan K, 2023, The Effect of the Addition of Blast Furnace Slag on the Wear Behavior of Heavy Transport Polymer-Based Brake Pads, *Tribology International*, 189, 108845.
- Sarmadi H, Kokabi A H, Seyed Reihani S M, 2013, Friction and Wear Performance of Copper-Graphite Surface Composites Fabricated by Friction Stir Processing (FSP), *Wear*, 304, 1-12.
- Sathyamoorthy G, Vijay R, Singaravelu D L, 2022, A Comparative Study on Tribological Characterisations of Different Abrasives Based Non-Asbestos Brake Friction Composites, *Materials Today: Proceedings*, 56, 661-668.
- Saurabh A, Joshi K, Manoj A, Ve Verma P C, 2022, Process Optimization of Automotive Brake Material in Dry Sliding Using Taguchi and ANOVA Techniques for Wear Control, *Lubricants*, 10, 161.
- Searson D P, Leahy D E, Willis M J, 2010, GPTIPS:An Open Source Genetic Programming Toolbox for Multigene Symbolic Regression, *Proceedings of The International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2010*, March 17-19, Hong Kong.
- Shinde D, Ve Mistry K N, 2017, Asbestos Base and Asbestos Free Brake Lining Materials: Comparative Study, *International Journal of Scientific World*, 5, 47-49.
- Song W, Park J, Seo H, Choi J, Lee J J, Sohn S S, Jang H, 2023, Reduction of Brake

- Emission by Optimizing the Curing Condition for Brake Pads Using An Artificial Neural Network, *Wear*, 516–517, 204606.
- Stachowiak G W, Batchelor A W, 2006, *Engineering Tribology*, Elsevier, Third Edition.
- Sundarrajan D, Pandian P, Sembian M, 2020, Synergistic Effect of Steel Slag-Molybdenum Disulfide Particles on Fade-Recovery Performances of Non-Asbestos Organic Friction Material, *Industrial Lubrication And Tribology*, 73, 215-220.
- Sydow Z, Sydow M, Wojciechowski Ł, Bieńczak K, 2021, Tribological Performance of Composites Reinforced with the Agricultural, Industrial and Post-Consumer Wastes: A Review, *Materials*, 14, 1863.
- Şeker M, 2013, Fren Balatalarının Üretim Şartları ve İçeriğinin, Performansa Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 147s, Afyonkarahisar.
- Talib R J, Eliasidi O, Basri M H, Ismail N I, Ramlan K, Effect of Phenolic Resin on the Friction Behaviors with Respect to Temperature and Operating Speed, *International Conference on Advanced Science, Engineering and Technology*, 2015, December 21-22, Penang.
- Toros, M, 2011, Fren Balatalarında Nano Malzemelerin Kullanımının Frenleme Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, Konya
- Uysal F F, Bahar S, 2018, Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 37–52.
- Venkatesh S, Murugapoopathiraja K, 2019, Scoping Review of Brake Friction Material for Automotive, *Materials Today: Proceedings*, 16, 927-933.
- Verma P C, 2016, *Automotive Brake Materials: Characterization of Wear Products and Relevant Mechanisms at High Temperature*, University of Trento, Ph D Thesis, 155p, Trento.
- Wang Q J, Chung Y W, 2013, *Encyclopedia of Tribology*, Springer New York, NY,

4192 p.

- Wang Z, Hou G, Yang Z, Jiang Q, Zhang F, Xie M, Yao Z J, 2016, Influence of Slag Weight Fraction on Mechanical, Thermal and Tribological Properties of Polymer Based Friction Materials, *Materials and Design*, 90, 76-83.
- Yan Y, 2010, Tribology and Tribo-Corrosion Testing and Analysis of Metallic Biomaterials, *Metals for Biomedical Devices*, Woodhead Publishing Series In Biomaterials, 178-201.
- Zhang E, Gao F, Fu R, Lu Y, Han X, Su L, 2021, Tribological Behavior of Phenolic Resin-Based Friction Composites Filled with Graphite, *Materials*, 14, 742
- Zhang S-W, 2004, An Introduction To Wear, Tribology and Interface Engineering Series, 33-38.
- Zheng Y, Liu Y, Zheng F, Song Q, Zhang C, Wang J, Dong N, Shi A, Han P, 2019, Effects of Iron Content on Tribological Properties of Cu-Fe-Based Friction Material, *Industrial Lubrication and Tribology*, 71, 718-723.

İnternet Kaynakları

- 1- <http://cpheeo.gov.in/upload/uploadfiles/files/chap6.pdf>, 03.01.2024
- 2- <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Barium-Sulfate>, 03.01.2024

Technologies, 12, 16-21.

Polat S, Bulut A, Akbulut F, Eroğlu TN, 2023, Comparison of Combustion Parameters and Homogeneity of Full and Direct Injection Homogeneous Charge Compression Ignition Engine under Supercharger Conditions, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 16, 135-143.

Şevik S, Özdiilli Ö, Akbulut F, 2022, Numerical Investigation of the Effect of Different Heat Sink Fin Structures on the Thermal Performance of Automotive LED Headlights, International Journal of Automotive Science and Technology 6, 17-26.

Uyumaz A, Aksoy F, Mutlu İ, Akbulut F, Yılmaz E, 2018, The Pyrolytic Fuel Production From Nutshell-Rice Husk Blends and Determination of Engine Performance and Exhaust Emissions in a Direct Injection Diesel Engine, International Journal of Automotive Engineering and Technologies 7, 134-141.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

Akbulut F, Bayrakçeken H, Aysal F E, Analysis of the Effect of Wheel Slip on Vehicle Speed in Various Road Conditions, International Symposium on Automotive Science and Technology (ISASTECH), 2019, September 5-6, Ankara.

Akbulut F, Polat S, Kaya Z, Yücel Z, Mutlu İ, Çaşın E, Investigation of the Use of Fine Fire Clay as a Friction Modifier in Automotive Friction Materials, International Symposium on Automotive Science and Technology (ISASTECH), 2023, September 7-8, Ankara.

Çelik İ, Akbulut F, Modeling of Electronic Differential Application for Electric Vehicles, International Conference on Advances in Natural Applied Science (ICANAS), 2019, June 19-21, Ağrı.

Mutlu İ, Akbulut F, Kavla F, Investigation of the Effect of Coated Automotive Brake Disc on Braking Performance, International Conference on Advances in Natural Applied Science (ICANAS), 2019, June 19-21, Ağrı.

Mutlu İ, Aksoy F, Akbulut F, Aksoy L, The Optimization of Fuel Production with Pyrolysis Method from Hazelnut Shells, 8th International Advanced

- Technologies Symposium (IATS'17), 2017, October 19-21, Elazığ.
- Mutlu İ, Aksoy F, Akbulut F, Arslan M, Dinler R, Optimization of Biodiesel Production from Soybean Oil and Engine Performance Tests, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), 2017, October 19-21, Elazığ.
- Mutlu İ, Aksoy F, Aksoy L, Arslan M, Akbulut F, Çivi A, The Fuel Production from Opium Poppy Residue with Pyrolysis Method, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), 2017, October 19-21, Elazığ.
- Mutlu İ, Aksoy F, Arslan M, Akbulut F, Dinler R, Maden K, Optimization of Production Process of Biodiesel Obtained From Canola Oil and its Effects to Engine Performance, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), 2017, October 19-21, Elazığ.
- Mutlu İ, Babagiray M, Akbulut F, Furkan K, Investigation of Micro Structure and Mechanical Properties of Brake Disc Covered by Plasma Spraying Method, International Engineering and Technology Symposium İETS, 2018, May 3-5, Bartın.
- Mutlu İ, Bayrakçeken H, Yavuz İ, Can G, Akbulut F, Comparison of Various Biodiesel-Diesel Mixtures in Terms of Exhaust Emissions, 14th International Combustion Sysmposium (INCOS), 2018, April 25-27, Karabük.
- Sayman M, Keleş H, Akbulut F, Polat S, Estimation Of CA50 Angle In Low Temperature Combustion Engines Using Genetic Programming Method, 3. Boğaziçi Scientific Research Congress, 2024, January 20-21, İstanbul
- Solmaz C, Seyrek B G, Akbulut F, Polat S, Modeling The Combustion Process In A Homogeneous Compression Ignition (HCCI) Engine With Converge Cfd Software Using A Semi-Detailed Chemical Kinetic Model, 3. Boğaziçi Scientific Research Congress, 2024, January 20-21, İstanbul
- Solmaz H, Aksoy F, Uyumaz A, Mutlu İ, Akbulut F, Eryılmaz T, Babagiray M, Investigation of Fuel Production and Exhaust Emission Values from Fish Internal Wastes by Pyrolysis Method, 14th International Combustion Sysmposium (INCOS), 2018, April 25-27, Karabük.