



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FREN BALATALARINA RAFİNE BOR BİLEŞENİ İLAVESİNİN
MİKROYAPI, SERTLİK VE AŞINMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Noman GÜNDÜZ

**Aralık-2024
BATMAN**

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FREN BALATALARINA RAFİNE BOR BİLEŞENİ İLAVESİNİN
MİKROYAPI, SERTLİK VE AŞINMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

Noman GÜNDÜZ

Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Diğer Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ

Aralık-2024
BATMAN

TEZ KABUL VE ONAYI

Noman GÜNDÜZ tarafından hazırlanan “Fren Balatalarına Rafine Bor Bileşeni İlavesinin Mikroyapı, Sertlik ve Aşınma Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması 24/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ

Danışman

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Noman GÜNDÜZ
Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FREN BALATALARINA RAFİNE BOR BİLEŞENİ İLAVESİNİN MİKROYAPI, SERTLİK VE AŞINMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Noman GÜNDÜZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2024, 75 Sayfa

Bu tez çalışmasında, fren balatalarına rafine bor bileşeni ilavesinin mikroyapı, sertlik ve aşınma özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan ana malzemeler arasında novolak reçine, bakır, alümina, grafit, pirinç, zirkonyum silikat, kalsiyum sülfat, çinko sülfat ve baryum sülfat yer almakta olup, bunlara ek olarak borik asit ve boraks dekahidrat tozları belirli ağırlık oranlarında balata karışımına dahil edilmiştir. Malzeme formülasyonunda, baryum sülfat toplam ağırlığın %1,25, %2,5, %5, %10 ve %20 oranlarında azaltılmış ve yerine borik asit ve boraks dekahidrat tozları eklenmiştir. Tartım işlemleri sonrası tüm malzemeler, mekanik bir karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra 30 mm çapındaki kalıplara yerleştirilerek 10 MPa basınç ve 140 °C sıcaklık altında 30 saniye ile preslenmiştir. Her formülasyon için üç adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapıları optik mikroskopla incelenmiştir. Ayrıca numunelerin teorik ve yığınsal yoğunlukları hesaplanmış ve bu yoğunluk değerlerine bağlı olarak porozite oranları belirlenmiştir. Daha sonra Brinell sertlik testi ile sertliği belirlenen numuneler, 18 N yük altında 400 m, 800 m ve 1200 m kayma mesafelerinde aşınma testine tabi tutulmuştur. Mikroyapı analizleri, numunelerin gözenekli bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir ve yapıdaki bor bileşeni oranı arttıkça gözenekliliğin arttığı görülmüştür. Bu durum, yoğunluğun azalmasına neden olmuştur. Rafine bor ürünü kullanılan numunelerde, başlangıçta artan takviye oranı ile sertlik değerinin yükseldiği, ancak belirli bir takviye oranının üzerine çıkıldığında sertlik değerinde düşüş tespit edilmiştir. Borik asit bileşeninin kullanıldığı numunelerde %2,5 takviye oranından, boraks dekahidrat bileşeninin kullanıldığı numunelerde ise %5 takviye oranından en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Öte yandan sertlik ve aşınma arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür. En yüksek sertliğe sahip numunelerin daha düşük aşınma hacmine ve oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca balata numunesine eklenen rafine bor bileşeninin sürtünme katsayısını da arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fren balatası, bor bileşeni, mikroyapı, sertlik, sürtünme-aşınma.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF REFINED BORON COMPONENT ADDITION ON THE MICROSTRUCTURE, HARDNESS, AND WEAR PROPERTIES OF BRAKE PADS

Noman GÜNDÜZ

Batman University Graduate Education Institute

Department of Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2024, 75 Pages

In this thesis, the effects of adding refined boron compound to brake pads on microstructure, hardness, and wear properties are investigated. The primary materials used in the study include novolac resin, copper, alumina, graphite, brass, zirconium silicate, calcium sulfate, zinc sulfate, and barium sulfate. Additionally, boric acid and borax decahydrate powders are incorporated into the brake pad mixture in specific weight ratios. In the material formulation, barium sulfate was reduced by 1.25%, 2.5%, 5%, 10%, and 20% of the total weight, and boric acid and borax decahydrate powders were added in place. After weighing, all materials were mixed with a mechanical mixer, placed into 30 mm diameter molds, and pressed for 30 seconds under 10 MPa pressure at 140°C. Three samples were produced for each formulation. The microstructures of the produced samples were examined using an optical microscope. Additionally, the theoretical and bulk densities of the samples were calculated, and porosity rates were determined based on these density values. The samples' hardness was determined using the Brinell hardness test, and wear tests were conducted under an 18 N load at 400 m, 800 m, and 1200 m sliding distances. Microstructure analysis revealed that the samples had a porous structure, and it was observed that as the proportion of boron compound in the structure increased, the porosity also increased. This caused a decrease in density. In the samples with refined boron products, hardness values initially increased with the increasing reinforcement ratio, but a decrease in hardness was detected once a certain reinforcement ratio was exceeded. The highest hardness values were obtained at a 2.5% reinforcement ratio for samples with boric acid and at a 5% reinforcement ratio for samples with borax decahydrate. Furthermore, a linear relationship between hardness and wear was observed. It was noted that the samples with the highest hardness had lower wear volume and rate. Additionally, it was also found that the addition of refined boron compound to the brake pad sample increased the friction coefficient.

Keywords: Brake pad, boron component, microstructure, hardness, friction-wear.

ÖN SÖZ

Fren balatalarına rafine bor bileşeni ilavesinin mikroyapı, sertlik ve aşınma üzerindeki etkilerini içeren bu yüksek lisans tez çalışması Giriş, Kaynak Araştırması, Materyal ve Yöntem, Deneysel Bulgular ve Tartışma, Sonuçlar ve Öneriler olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. Araştırma sürecinde, bu konuda önemli literatür taramaları yapılmış, malzeme seçiminden üretim süreçlerine kadar pek çok aşama titizlikle gerçekleştirilerek, rafine bor bileşenlerinin balata üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın amacına ulaşmasında bana katkı sağlayan, her adımda yönlendiren ve sabırla rehberlik eden danışman hocam Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK'e içtenlikle teşekkür ederim. Ayrıca, deneysel çalışmamın çeşitli aşamalarında yardımlarını esirgemeyen ve deneysel çalışmalarımın daha hızlı tamamlanmasına katkı sağlayan Prof. Dr. Erol KILIÇKAP ve Dr. Zülal ARCA BATI hocalarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamda, özellikle rafine bor ürünlerinin temininde gösterdiği iş birliği için ETİMADEN Şirketi'ne de teşekkür ederim.

Son olarak, bu süreç boyunca her zaman yanımda olan, beni duygusal ve moral olarak destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Noman GÜNDÜZ
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Önemi	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Fren Sistemi ve Nominal Temas Koşulları	5
2.2. Fren Balataları.....	7
2.2.1. Fren balatalarının tarihsel gelişimi	7
2.2.2. Fren balatalarından beklenen özellikler	9
2.2.3. Fren balatalarının sınıflandırılması	10
2.2.4. Balata yapımında kullanılan malzemeler ve işlevleri	11
2.2.4.1. Bağlayıcı malzemeler	12
2.2.4.2. Takviye malzemeleri.....	14
2.2.4.3. Dolgu malzemeleri.....	14
2.2.4.4. Sürtünme ayarlayıcı malzemeler	16
2.2.5. Balatanın mikroyapı ve tribolojik özelliklerini etkileyen faktörler	18
2.2.6. Balata üretim yöntemleri	20
2.2.7. Fren balata malzemeleri üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmaları	20
2.3. Bor	32
2.3.1. Bor elementi.....	32
2.3.2. Bor minarelleri.....	33
2.3.3. Rafine bor ürünler	34
2.3.4. Borun mühendislik malzemelerinde kullanımı	35
2.3.5. Bor ve bileşenlerinin fren balatasında kullanımı üzerine yapılan çalışmalar	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	38
3.2. Rafine Bor Bileşeni İlavesi Prosedürü	40
3.3. Numune Üretim Süreci	41
3.4. Mikroyapı Analizi.....	42
3.5. Yoğunluk Tespiti	43
3.6. Sertlik Ölçüm Yöntemi.....	43
3.7. Aşınma Test Prosedürleri.....	44

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Mikroyapı Sonuçları ve Yorumları	46
4.2. Yoğunluk Sonuçları	52
4.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi	55
4.4. Aşınma Test Sonuçları ve Analizi	56
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
5.1 Sonuçlar	69
5.2 Öneriler	70
KAYNAKLAR	71



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Otomotiv sürtünmeli fren malzemelerinin tarihsel bileşimleri.....	8
Tablo 2.2. TS 555'e göre sürtünme katsayısına bağlı balataların sınıflandırılması.....	10
Tablo 2.3. Takviye malzemeleri ve tanımları	14
Tablo 2.4. Dolgu malzemeleri ve tanımları	15
Tablo 2.5. Aşındırıcı sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları.....	16
Tablo 2.6. Aşındırıcı olmayan sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları.....	17
Tablo 2.7. Bor elementinin fiziksel özellikleri.....	33
Tablo 2.8. Ticari olarak üretilen rafine bor ürünleri	34
Tablo 2.9. Ticari olarak üretilen rafine bor ürünleri	35
Tablo 3.1. Balata yapımında kullanılan malzemeler ve özellikleri.....	39
Tablo 3.2. Toz borik asidin kimyasal özellikleri.....	39
Tablo 3.3. Toz borik asidin fiziksel özellikleri	39
Tablo 3.4. Toz boraks dekahidratın kimyasal özellikleri.....	40
Tablo 3.5. Toz boraks dekahidratın fiziksel özellikleri.....	40
Tablo 3.6. Balata toz bileşenleri ve oranları	40
Tablo 3.7. Üretilen balata numunelerinin yoğunluk ve porozite değerleri	52
Tablo 3.8. Üretilen balata numunelerinin ortalama sertlik ve standart sapma değerleri	55

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Disk freninin şeması.....	5
Şekil 2.2. Önemli fren balatası bileşenleri.....	7
Şekil 2.3. Fren balatası yapısında kullanılan malzemeler	12
Şekil 3.1. Fren balata malzemeleri	38
Şekil 3.2. Balata tozlarının tartım işlemleri	41
Şekil 3.3. Nihai ürün haline getirilen numuneler.....	42
Şekil 3.4. Ernst model Brinell sertlik cihazı ile yapılan sertlik testi	44
Şekil 3.5. Aşınma deney düzeneği.....	45
Şekil 3.6. Aşınmış numuneye ait görüntü.....	45
Şekil 3.7. Rafine bor ürünü kullanılmayan numunenin mikroyapısı.....	46
Şekil 3.8. %1,25 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı.....	47
Şekil 3.9. %2,5 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı.....	47
Şekil 3.10. %5 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı.....	48
Şekil 3.11. %10 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı.....	48
Şekil 3.12. %20 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı.....	49
Şekil 3.13. %1,25 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı	49
Şekil 3.14. %2,5 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı	50
Şekil 3.15. %5 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı	50
Şekil 3.16. %10 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı	51
Şekil 3.17. %20 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı	51
Şekil 3.18. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak yoğunluk değişim grafiği	53
Şekil 3.19. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak hesaplanan porozite oranı değişimi.....	53
Şekil 3.20. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak sertlik değişim grafiği	55
Şekil 3.21. Saf numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi	57
Şekil 3.22. %1,25 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi	57
Şekil 3.23. %2,5 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi	57

Şekil 3.24. %5 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi	58
Şekil 3.25. %10 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi	58
Şekil 3.26. %20 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi	58
Şekil 3.27. %1,25 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi.....	59
Şekil 3.28. %2,25 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi.....	59
Şekil 3.29. %5 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi	59
Şekil 3.30. %10 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi.....	60
Şekil 3.31. %20 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi.....	60
Şekil 3.32. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı değişim grafiği.....	61
Şekil 3.33. 400 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen aşınma hacmi değişikliği.....	62
Şekil 3.34. 800 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen aşınma hacmi değişikliği.....	62
Şekil 3.35. 1200 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen aşınma hacmi değişikliği.....	63
Şekil 3.36. Borik asit takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı aşınma hacmi değişikliği	63
Şekil 3.37. Boraks dekahidrat takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı aşınma hacmi değişikliği.....	64
Şekil 3.38. 400 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen spesifik aşınma oranı değişikliği	66
Şekil 3.39. 800 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen spesifik aşınma oranı değişikliği	66
Şekil 3.40. 1200 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen spesifik aşınma oranı değişikliği	67
Şekil 3.41. Borik asit takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranı değişikliği.....	67
Şekil 3.42. Boraks dekahidrat takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranı değişikliği	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

w_i	: i bileşeninin kütlece ağırlık oranı,
ρ_i	: i bileşeninin yoğunluğu (g/cm ³),
ρ_{teorik}	: teorik yoğunluk (g/cm ³),
$\rho_{yığınsal}$	: yığınsal Yoğunluk (g/cm ³),
Al_2O_3	: Alümina
B_2O_3	: Bor Oksit
$BaSO_4$	: Baryum Sülfat
c	: Grafit
$Ca(OH)_2$	: Kireç
$CaCO_4$	: Kalsiyum Karbonat
$CaSO_4$	: Kalsiyum Sülfat
Cl	: Klor
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
H_3BO_3	: Borik Asit
m	: kütle (g),
MoS_2	: Molibden Disülfür
n	: toplam bileşen sayısı,
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	: Disodyum Tetraborat Dekahidrat
Na_2O	: Sodyum Oksit
SO_4	: Sülfat
V	: hacimdir (cm ³)
ZnO	: Çinko Oksit
$ZnSO_4$	: Çinko Sülfat
$ZrSiO_4$	: Zirkonyum Silikat

Kısaltmalar

EDS	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Fren sistemleri, aracın en önemli bileşenlerinden biridir ve kullanım süreci boyunca sabit performans sunarak yüksek güvenilirlik sağlamalıdır. Uygun şekilde eşleştirilmiş sürtünme çifti, bir disk ve fren balatası, aracın belirli bir süre içinde durdurulması veya yavaşlatılmasını sağlamak amacıyla işlev gördüğü için birçok insanın sağlığı ve hayatı için temel bir rol oynamaktadır (Borawski, 2020). Bu işlev, iki temas yüzeyi arasındaki sürtünme ile sağlanmaktadır. Fren balataları önemli miktarda ısıya maruz kaldığı için, günümüzde, ısyıyı daha hızlı dağıtarak fren solmasına katkı sağlayan disk frenler kullanılmaktadır (Gawande vd., 2023; Saindane vd., 2021). Çoğu durumda, disk gri dökme demirden üretilir. Çünkü gri dökme demir, yeterli mekanik mukavemet, tatmin edici aşınma direnci, iyi termal iletkenlik ve titreşim önleme kapasitesi, düşük maliyet ve kolay işlenebilme özellikleriyle karakterize edilir. Ancak, fren balataları çok daha karmaşık bileşenlerden üretilebilmektedir (Borawski, 2020; Eriksson ve Jacobson, 2000).

Fren balataları, disk fren rotorunun yüzeyine temas eden sürtünme malzemelerini içeren en kritik araç elemanlarıdır. Temel işlevi, hareket halindeki aracın hızını düşürmek veya aracı tamamen durdurmaaktır. Bu nedenle, fren balataları güvenilir olmalı ve ömrü boyunca değişen atmosferik koşullarda dahi sabit bir verimlilik sağlamalıdır. Fren balatalarının güvenilirliği yalnızca araç yolcularının güvenliği açısından değil, aynı zamanda yoldaki diğer araçlar ve yayalar için de kritik önem taşımaktadır (Borawski, 2020). Fren balatası diske temas ettiğinde, sürtünme yoluyla, fren balataları aracın kinetik enerjisini ısı enerjisiye dönüştürmektedir. Frenleme sırasında, yüzey pürüzlerindeki flaş sıcaklığı 1 ms içinde 1100°C'ye kadar yüksek değerlere ulaşabilir ve bu durum lokalize organik faz ayrışmasına neden olabilir (Marin vd., 2019). Sürtünme etkileşimi, sadece enerji salınımına neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda malzeme aşınmasına da yol açarak fren bileşenlerinin ısınmasına ve aşınma parçacıklarının salınmasına neden olur. Bu nedenle, fren balatalarının aşınması, fren performansını azaltarak balataların değiştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır (Gawande vd., 2023). Ancak fren balatalarında aşınma, değişken çalışma basınçları, hızlar, çevresel koşullar, sürüş koşulları, fren balatası formülasyonu, üretim parametreleri ve rotor ile sürtünme malzemesi arasındaki arayüzde biriken sürtünme filmi gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak sürekli bir değişim göstermektedir (Saindane vd., 2021; I. Sugoza vd., 2018). Bu yüzden fren balatalarının

yüksek sıcaklıklarda etkili performans sağlamak üzere olağanüstü tribolojik özelliklere (kontrollü bir sürtünme katsayısına, minimum aşınma oranına ve iyi bir termal iletkenliğe) sahip olması beklenir (Hendre ve Bachchhav, 2019).

Fren balatası geliştirilirken, başlangıçta asbest, dayanıklılığı, ısıya ve alevlere karşı direnci gibi özelliklerinden dolayı baskın malzeme olarak kullanılmış ve kullanımı bir yüzyıl kadar sürmüştür. Sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle (kanserojen olarak tanımlanması) 1980'lerden bu yana fren balatası üretiminde kullanılması yasaklanmıştır. Bu durum asbest malzemesi yerine kullanılabilecek alternatiflerin aranmasına yol açmıştır. Asbestin yasaklanmasının ardından çeşitli metalik ve yarı metalik malzemeler devreye girmiştir (Hendre ve Bachchhav, 2019; Gawande vd., 2023; Saindane vd., 2021).

Fren balata formülasyonlarında bakır veya pirinç makro-parçacıkları veya her ikisinin bir kombinasyonu bulunur (Österle vd., 2010). Çünkü bakır ve pirinç, sürtünme malzemelerinin performans özelliklerini artıran kendine özgü özelliklere sahiptir. Özellikle bakır, balatada termal solmayı önlemesi ve ısı iletkenliği artırması nedeniyle bir sürtünme düzenleyici olarak işlev görmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı bir özellik gösteren bakır, temas alanlarında homojen bir sürtünme tabakası oluşturarak gürültü ve titremeyi azaltır ve sürtünme katsayısının stabilizasyonuna katkı sağlar (Tavangar vd., 2020; Zhang vd., 2019). Bakır, fren performansına çok yönlü katkılar sağlasa da en ciddi dezavantajlarından biri, su ekosistemine verdiği zarardır. Yüksek toksisite oranı, birçok sucul türün yok olmasına ve ekosistem üzerinde ciddi tahribata yol açmaktadır. Bu olumsuz etkiler nedeniyle, gelişmiş ülkelerde fren malzemesi formülasyonlarında bakır kullanımı önemli ölçüde azaltılmıştır (Krishnan vd., 2021). Bu bağlamda, ABD Çevre Koruma Ajansı ve otomotiv endüstrisi, motorlu taşıt fren balatalarındaki bakır oranını azaltmak için bir anlaşma imzalamıştır. Kaliforniya ve Washington eyaletleri bu konuda öncülük ederek, fren balatalarındaki bakır içeriğini azaltmaya yönelik yasalar çıkarmıştır. Bu yasal düzenlemelerin amacı, fren balatalarındaki bakır oranını 2021 yılı itibarıyla %5'e (bakır-düşük fren balatası) ve 2025 yılı itibarıyla %0,5'e (bakır içermeyen fren balatası) düşürmektir (Lyu vd., 2020).

Fren balatalarında hem asbestin yasaklanması hem de bakır kullanımının azaltılmasına yönelik çabalara ilaveten yeni teknolojik gelişmeler, son yıllarda, fren balatası matrisine genellikle mekanik mukavemetini ve termal stabilitesini artırmak için farklı lif türü eklenmesine ve bunların tribolojik ve mekanik etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına yol açmıştır (Yanar vd., 2020). Günümüzdeki fren balataları

(asbestosuz organik—NAO), frenlerin gerektirdiği özellikleri sağlamak amacıyla, tek bir element veya bileşikten oluşmak yerine, birçok malzemenin kompozitlerinden oluşmaktadır. Fren bileşenlerinde 2000’den fazla farklı malzeme ve bunların varyantları kullanılmaktadır (Blau, 2001). Bu bileşenlerin performans özellikleri üzerindeki etkileri çoğunlukla sinerjik bir biçimde gerçekleştiğinden, sürtünme malzemelerinin formülasyonu genellikle deneysel gözlemlere, deneme-yanılmaya veya tecrübeye bağılı olarak değerlendirilmektedir. (I. Sugozy vd., 2018; Liew ve Nirmal, 2013; Saindane vd., 2021).

Balatada kullanılan bir bileşen balatanın herhangi bir diğeri bileşeniyle reaksiyona girmemelidir. Çünkü bu, genel malzeme karakteristiğinde değişikliklere yol açabilir veya kompozitin delaminasyonuna neden olabilir. Bu da fren sisteminin verimliliğini büyük ölçüde sınırlandırabilir. Bağlayıcı genellikle epoksi veya silikon reçineden yapılır. Takviye malzemesi, bağlayıcının mekanik özelliklerini güçlendiren lifli bir yapıya sahiptir. Farklı takviye türleri, fren balatalarının dayanıklılığı ve mukavemeti üzerinde önemli bir etki gösterdiğinden, uygun takviye seçimi dikkatle yapılmalıdır. Geçmişte asbest, üstün takviye özellikleriyle yaygın olarak kullanılmışsa da, sağlık üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle güvenli alternatifler geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Günümüzde, bu amaçla başarıyla kullanılabilecek çok çeşitli takviye malzemeleri bulunmaktadır. Bu malzemeler, fren balatalarının performansını artırmaya yönelik olarak güvenli ve etkili seçenekler sunmaktadır (Borawski, 2020).

Bor mineralleri yüksek oranda sodyum, kalsiyum ve magnezyum içerdiğinden dolayı, yüksek sıcaklıklarda sürtünme kararlılığını artırabilir ve bu yüzden fren balatalarında kullanılabilir. Özellikle bor minerallerinden olan uleksit, ısıya dayanıklılığı artırma ve aşınmaya karşı direnç sağlama özellikleri sayesinde borosilikat cam ve seramik endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca, uygulandığı malzemelerde sertliği artırıcı etkisi nedeniyle fren balatası formülasyonlarında da yer almaktadır (I. Sugozy vd., 2018).

Farklı kökenli birçok malzeme, fren balatası uygulaması için dolgu maddesi veya sürtünme düzenleyici olarak test edilmiştir, bu da fren sürtünme malzemelerinin seçiminin hala açık bir araştırma konusu olduğunu ortaya koymaktadır (Marin vd., 2019).

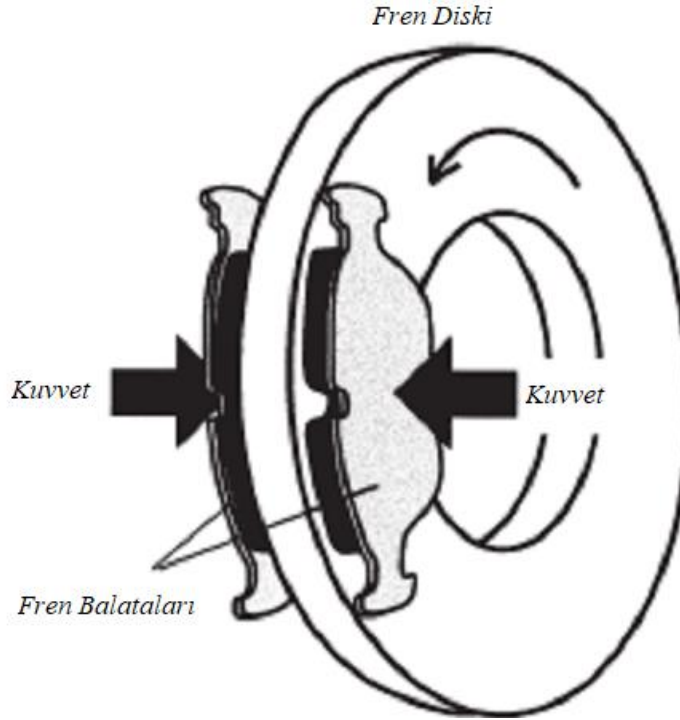
1.1. Çalışmanın Önemi

Asbestin yasaklanması ve bakırın çevre üzerindeki olumsuz etkileri dikkate alındığında, fren balatalarının performansı üzerine alternatif malzemeler büyük önem taşımaktadır. Özellikle ülkemizde bol miktarda bulunan ve ülke ekonomisine büyük katkı sağlayan bor minarelinin sürtünme kararlılığı ve aşınma direnci konusundaki potansiyelleri umut vadettiğinden dolayı fren balatalarında rafine bor ürünlerinin kullanılması veya kullanımının sağlanması, fren balatalarının daha yüksek performans göstermesine ve ekolojik açıdan daha uygun malzemelerle üretilmesine yönelik katkılar sağlayacaktır. Bu çalışmanın önemi, hem araç güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik olan fren balatalarının daha iyi performans sergileyen ve çevreye daha az zarar veren malzemelerle üretilmesine katkıda bulunmasıdır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Fren Sistemi ve Nominal Temas Koşulları

Fren sistemi, otomobil ve endüstriyel makinelerin güvenliği ve performansı açısından kritik bir bileşen olup, hareket eden mekanizmanın belirli bir süre içinde durdurulması veya yavaşlatılmasını sağlamak amacıyla işlev görmektedir. Bu işlev, iki temas yüzeyi arasındaki sürtünme ile sağlanmaktadır (Gawande vd., 2023). Sürtünme frenlerinin iki farklı türü bulunmaktadır. Bunlar tambur frenler ve disk frenlerdir. Tambur frenlerine kıyasla, günümüzde çoğu araçlarda disk fren sistemleri tercih edilmektedir. Bunun nedeni, disk frenlerin ısıyı daha etkili bir şekilde dağıtarak fren solmasını azaltma yeteneğidir (Saindane vd., 2021). Şekil 2.1’de disk freninin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.1. Disk freninin şeması (Eriksson ve Jacobson, 2000)

Şekil 2.1’de şematik görüntüsü verilen disk frenler, kullanım süreci boyunca sabit performans sunarak yüksek güvenilirlik sağlamalıdır. Değişen atmosferik koşullarda dahi sabit bir verimlilik sunmalıdır. Bu yüzden korozyona dayanıklı, hafiflik, uzun ömürlü,

düşük gürültülü, kararlı sürtünme, düşük aşınma oranı ve performansa göre kabul edilebilir maliyet gibi ek gereksinimleri bulunmalıdır (Blau, 2001).

Çoğu durumda fren sistemlerinde kullanılan disk, gri dökme demirden üretilir. Çünkü gri dökme demir, iyi termal iletkenlik ve titreşim önleme kapasitesiyle karakterize edilir. Ancak, fren balataları çok daha karmaşık bileşenlerden üretilebilmektedir. Bunun ana nedeni yeni teknolojik gelişmelerin çeşitli bileşimlere ve farklı oranlara sahip malzemelerin geliştirilmesini ve bunların tamamen kontrol edilebilir işlemlerde kalıcı olarak birbirine bağlanmasını mümkün kılmasıdır (Borawski, 2020).

Fren balatası diske temas ettiğinde, kinetik enerjiyi ısıya dönüştür. Bu süreçte açığa çıkan ısı enerjisi atmosfere yayılır. Bu ısı transferi kritik bir öneme sahiptir; zira aşırı ısınma, süspansiyon elemanları gibi plastik veya kauçuk bazlı bileşenlere zarar verebilir (Borawski, 2020).

Nominal temas koşullarını anlatırken, tipik bir araç disk fren sistemi olarak Volvo 850 veya S70'in ön fren sistemi örnek alınabilir. Bu model, 280 mm çapında gri dökme demir bir disk ve tek pistonlu bir kaliperle donatılmıştır. Fren sisteminde, yaklaşık 4000 mm² büyüklüğünde organik fren balataları kullanılmakta ve diske uygulanan kuvvet 25 kN'ye kadar çıkabilmektedir. Bu kuvvet, 100 bar'lık bir fren hattı basıncına denk gelmektedir. Ancak, günlük sürüş koşullarında, bu sıkıştırma kuvveti nadiren 10 kN'yi aşar (Eriksson ve Jacobson, 2000).

Otomotiv fren sistemlerinde sürtünmeden kaynaklanan ısı enerjisi de büyük önem taşır. Normal bir aile arabasında sert fren yapıldığında, her bir ön fren balatasında 80 kW'ı aşkın güç açığa çıkabilir. Yapılan incelemelerde, balatalar ile disk arasında oluşan gerçek temas alanının, nominal temas alanının yalnızca %20'sine karşılık geldiği ve deforme olmuş yüzey tabakasının kalınlığının 0,1 mm olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, toplam deforme olmuş hacim 1 mm³'ten azdır ve bu bölgedeki güç yoğunluğu yaklaşık 80 TW/m³'tür. Bu oran, 1 dm³ hacminde yaklaşık 80 nükleer reaktörün ürettiği güce eşdeğerdir (Eriksson ve Jacobson, 2000).

Amerika ve Avrupa'da fren tercihleri farklılık gösterir. Avrupalı sürücüler yüksek konfor arayan Amerikalıların aksine, genellikle yüksek performanslı frenleri tercih ederler. Bu durum, iki kıta arasındaki balata malzemesi seçimlerinde de kendini göstermektedir. ABD'de kullanılan araç fren sistemlerinde ortalama sürtünme katsayısı genelde 0,4 civarında iken, Avrupa araçlarında bu katsayı 0,5'in üzerinde olur (Eriksson ve Jacobson, 2000).

2.2. Fren Balataları

Fren balataları, belirli katmanlardan oluşur. En önemli bileşeni, Şekil 2.2’de görülen frenleme sırasındaki aktif olan sürtünme katmanıdır. Bu katman, 6 ila 9 mm kalınlığında olup bileşimi farklı uygulamalara göre optimize edilmektedir. Sürtünme katmanının hemen altında, sürtünme malzemesini yapısal olarak destekleyen ve onu arka plakaya bağlayan 1–4 mm kalınlığında bir alt katman bulunur. Alt katman, ayrıca fren balatasının arka plakaya daha iyi yapışmasını sağlayan ince bir yapışma tabakasıyla desteklenir. Bu tabaka, aynı zamanda belirli bir termal yalıtım sağlamakta olup, aşırı ısının fren sıvısına ulaşmasını önler. Fren balatasının en alt kısmında bulunan arka plaka, fren balatasının yeterli sertlikte olmasını sağlar ve kenar profili ile kaliperin kılavuzu boyunca düzgün hareket etmesine katkıda bulunur. Bu yapı, fren balatalarının verimlilik, ısı dayanımı ve ses kontrolü gibi çok boyutlu işlevlerini yerine getirmesine olanak tanır (Borawski, 2020).



Şekil 2.2. Önemli fren balatası bileşenleri: 1- arka plaka, 2- alt katman, 3- sürtünme malzemesi (Borawski, 2020)

Fren balataları önemli miktarda ısıya maruz kaldığı için, yüksek sıcaklıklarda etkili performans sağlamak üzere olağanüstü tribolojik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Sistemin sürtünme katsayısı ve aşınma özellikleri, balata-disk temas alanındaki sürtünme tabakasının özelliklerine bağlıdır; bu durum, kullanılan malzemelerin yapısı ve işlevselliğinden etkilenir (Gawande vd., 2023).

2.2.1. Fren balatalarının tarihsel gelişimi

Tarihsel süreç boyunca frenlerin birçok malzemeden üretildiği görülmüştür. Başlangıçta at arabalarının frenleri ahşap ve deriden yapılmıştır. Aslında, günümüzde

birçok fren malzemesi hala polimerler ve bitki lifleri gibi organik bazlı malzemeler içermektedir. 1800'lerdeki yeni demiryolu teknolojisi, fren malzemelerinin yüksek yükler ve hızlar altında performans göstermesini gerektirmiş ve 1870'lerde demir fren ayakkabılarıyla sürtünme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Blau, 2001).

Nicholson'a göre, ilk fren balatası malzemelerinin icadı Herbert Frood'a atfedilmektedir ve bu malzeme 1897 yılında geliştirilmiştir. Frood'un icat ettiği bu malzeme, pamuk bazlı olup bitüm çözeltisi ile emdirilmiştir. Hem vagon tekerleklerinde hem de erken otomobillerde kullanılmıştır. Bu icat, günümüzde de fren malzemeleri tedarik eden Ferodo Şirketi'nin kuruluşuna yol açmıştır. İlk fren balatası malzemeleri dokuma şeklindeydi, ancak 1920'lerde bunlar, bol miktarda bulunan krizotil asbest lifleri içeren kalıplı malzemelerle değiştirilmiştir. 1950'lerde reçine ile bağlanmış metalik balatalar tanıtılmış ve 1960'larda ise "yarı metal" olarak adlandırılan malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler, daha yüksek miktarda metal katkı maddesi içermektedir. Nicholson'un (1995) çalışmasında yer alan Tablo 2.1'de bazı yaygın fren malzemelerini listelemektedir (Blau, 2001).

Tablo 2.1. Otomotiv sürtünmeli fren malzemelerinin tarihsel bileşimleri (Blau, 2001)

Malzeme Tanımı	Uygulama(lar)	Yaklaşık Yıl
Çelik üzerine dökme demir	Demiryolu vagonu fren blokları ve lastikler	1870'lerden önce
Saç veya pamuk kayışı (yaklaşık 300°F'de yanma ile sınırlı)	Arazi tekerlekleri ve erken otomobiller	1897 civarı
Güç ve performansı artırmak için pirinç ve diğer tellerle dokuma asbest	Otomobiller ve kamyonlar	1908 civarı
Kısa krizotil lifleri, pirinç parçacıkları ve düşük kül içeren bitümlü kömür ile yapılan kalıplı astarlar	Endüstriyel uygulamalar	1926 civarı
Metal toz üreterek elektrikli tren raylarını kısa devre yapan dökme demir fren bloklarını değiştirmek için kuru karışım kalıplı malzeme	Londra yer altı demiryolu	1930 civarı
Daha karmaşık fren tamburu astar formülasyonları ile birlikte geliştirilen esnek reçine bağlayıcıları	Otomotiv uygulamaları	1930'lar
Reçine bağlı metalik fren astarları	Endüstriyel ve hava aracı uygulamaları	1950'ler
Cam lifleri, mineral lifler, metal lifler, karbon ve sentetik lifler	Otomobiller ve kamyonlar	1960'lar
Asbest içermeyen (fiber cam) malzemeler	Orijinal ekipmandaki fren tamburları	1980'ler
Karbon liflerinin önerilen kullanımı	Otomotiv frenleri	1991

Tablo 2.1’de görüldüğü gibi 1900’lü yılların başlarında asbest fren balatalarında kullanılan temel malzeme olmuşken, akciğer kanserine ve diğer sağlık sorunlarına neden olduğu için 1980’lerde yasaklanmıştır. Bu nedenle, asbest yerine fiber cam ve karbon lifleri içeren asbest dışı içerikli balataların üretimine başlanmıştır (Liew ve Nirmal, 2013). Son yıllarda, teknolojik gelişmelerle birlikte fren balatası matrisine genellikle mekanik mukavemetini ve termal stabilitesini artırmak için farklı lif türü eklenmesine ve bunların tribolojik ve mekanik etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılmasına yol açmıştır (Yanar vd., 2020).

2.2.2. Fren balatalarından beklenen özellikler

Balata malzemelerinin gerekli özelliklerinin belirlenebilmesi için çalışma koşullarının iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Özellikle balata yüzeyine etki eden basınç, aracın hızı ve sürtünme kaynaklı sıcaklık artışlarında oldukça önemlidir. Bu yüzden balata testlerinde basınç, hız ve sıcaklık gibi değişkenlerin birbiriyle etkileşimi dikkate alınmalıdır. Çünkü bu değişkenler balata ömrünü belirleyen temel faktörlerdir. Ancak balatalar sürekli değişen basınç ve sıcaklık koşullarında çalıştıkları için, aşınma ve sürtünme davranışları oldukça karmaşıktır. Temas eden yüzeyler 1 m/s hızında 1000°C ila 1100°C’ye kadar ısınabilir ve diğer yüzeyler gibi ısıyı emerek soğutulurlar. Bu karmaşık termoelastik davranıştan kaçınmak için yüksek performanslı, anizotropik balata malzemeleri geliştirilmektedir (Akpınar, 2008).

Balataların tüm frenleme koşullarında sabit bir sürtünme katsayısına sahip olması beklenir. Ancak uygulamada, hız ve basıncın artması ile sıcaklık yükselmesi sürtünme katsayısında azalmaya neden olabilir. Araçların farklı hızlarda fren yaparken kullanıldığı koşullar ve iklim şartları, fren kuvvetini olumsuz etkilememelidir. Balata malzemeleri, zorlu koşullardan etkilenmeyecek özelliklere sahip olmalıdır (Akpınar, 2008).

Bu doğrultuda, balatalardan beklenen özellikler;

1. Tüm çalışma koşullarında sabit sürtünme performansı,
2. Sürtünme katsayısının sıcaklık, basınç ve hızdan bağımsız ya da çok az değişken olması,
3. Yüksek sıcaklık direnci,
4. Yüksek ısı iletkenliği,
5. İyi korozyon direnci,

6. Yüksek mekanik mukavemet,
7. Düşük gürültü seviyesi,
8. Hava koşullarından etkilenmeme,
9. Sağlığa zararsız malzeme,
10. Yüksek aşınma direnci ve karşı malzemede düşük aşınmadır (Akpınar, 2008).

2.2.3. Fren balatalarının sınıflandırılması

Fren balatalarının sınıflandırılması, TS 555'te tanımlanan sürtünme katsayısı değerleri temel alınarak yapılmaktadır. Bu standart, farklı sürtünme malzemelerinin performanslarını belirlemek ve karşılaştırmak amacıyla sürtünme katsayısı kriterlerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Fren balataları, bu katsayı değerlerine göre farklı kategorilere ayrılır ve her kategori belirli performans ve kullanım alanlarına yönelik tanımlamalar içerir. Tablo 2.2'de, TS 555 standardında belirtilen sürtünme katsayısı aralıklarına göre fren balatalarının kategorileri detaylı bir şekilde sunulmuştur (Toros, 2011).

Tablo 2.2. TS 555'e göre sürtünme katsayısına bağlı balataların sınıflandırılması

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

Bu sınıflandırma, balataların kullanım ömrü, aşınma direnci ve frenleme performansı gibi önemli parametrelerin değerlendirilmesine olanak sağlar ve endüstride balata seçimi ve uygulama sürecine rehberlik eder.

Endüstride kullanılan balatalar, içerdiği malzemelerin benzerliklerine göre de sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmaya göre balatalar üç ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar; organik balatalar, metalik balatalar ve karbon esaslı balatalardır (Toros, 2011).

Organik polimer esaslı fren balataları, fren ve kavrama sistemlerinde en yaygın kullanılan sürtünme malzemeleridir. Çeşitli bileşimlerde üretilen bu balataların formülasyonları genellikle patent koruması altındadır. Organik polimer esaslı balatalar, bağlayıcılar, dolgu maddeleri, sürtünme düzenleyiciler ve takviye edici malzemelerden

oluşmaktadır. Bu balatalar, asbest esaslı ve asbestsiz olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Kara, 2011).

Metalik esaslı fren balataları genellikle bakır veya demir esaslı malzemelerden üretilmekte olup, yüksek ısı kararlılık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Performansı artırmak amacıyla bu balatalara, genellikle inorganik katkı maddeleri veya seramikler ilave edilerek katı faz sinterleme yöntemi uygulanır. Üretim süreçleri nispeten kolay ve ekonomiktir (Kara, 2011).

Karbon esaslı malzemeler ise ağırlığın önemli olduğu ve yüksek performans gereksinimi duyulan, maliyetin ise ikincil öneme sahip olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Hacimce yaklaşık %63 oranında karbon-karbon bileşiminde olan bu kompozitler, genellikle uçak fren sistemlerinde kullanılmaktadır. Karbon bazlı sürtünme malzemeleri, karbon elyafların amorf karbonla bağlanmasıyla elde edilir. Bu bağlama sürecinde organik reçineler yüksek sıcaklıklarda ısı işleminden geçirilerek amorf karbon bağlayıcı oluşturulur ya da kimyasal buhar çöktürme yöntemi kullanılır. Hafif yapıları, yüksek ısı kararlılıkları ve uygun özgül ısı özellikleri sayesinde bu malzemeler fren uygulamalarında üstün performans sergiler (Kara, 2011).

2.2.4. Balata yapımında kullanılan malzemeler ve işlevleri

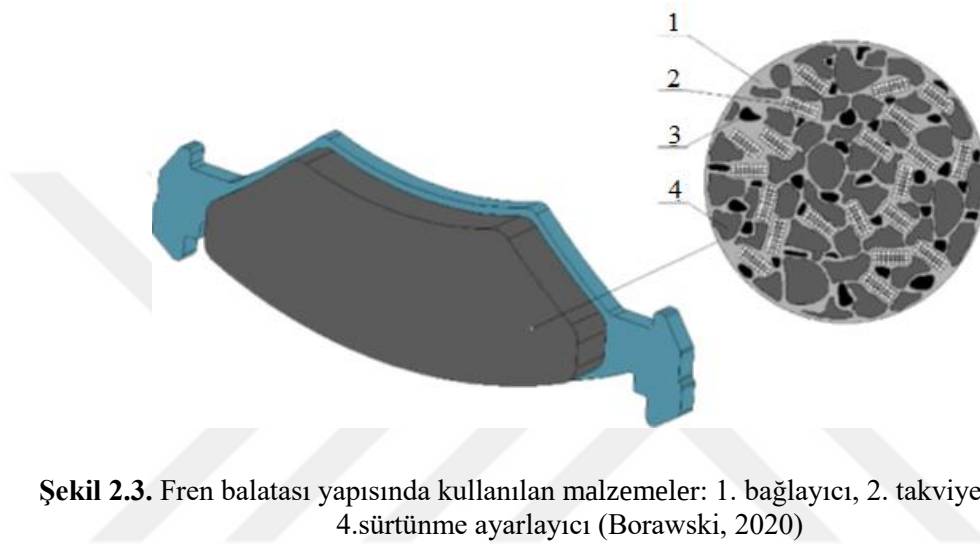
Fren balatası üreticileri, nihai ürün üzerinde farklı etkilere sahip yaklaşık 2000 farklı malzeme kullanır. Ortalama bir fren balatası 10 ila 20 farklı makro veya mikro bileşenden oluşur. Fren balatası için doğru bileşimi seçmek ve nihai ürünler üzerindeki etkisini tahmin etmek zordur. Çok sayıda deneysel çalışma ve oldukça fazla deneyim gerektirir. Fren balatasının nihai özellikleri, genellikle her üreticinin en iyi saklanan ticari sırrı olan üretim teknolojisi tarafından da şekillendirilir. Etkili üretim teknolojisi, fren balatasının tribolojik özelliklerini %100 oranında iyileştirebilir (Borawski, 2020; Österle vd., 2010).

Balata kompozisyonlarında kullanılan malzemeler, genellikle birçok farklı bileşen içeren kaba tozların sıcak sıkıştırılmasıyla oluşturulan kompozitlerdir. Bileşenlerin mekanik özellikleri, çok yumuşak ve kolay aşınan fenolik reçinelerden sert ve aşınmaya dayanıklı liflere ve aşındırıcı parçacıklara kadar geniş bir yelpazeye yayılır. Ancak görevleri bakımından dört ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Bağlayıcı malzemeler,

2. Takviye malzemeleri,
3. Dolgu malzemeleri,
4. Sürtünme ayarlayıcı malzemelerdir (Eriksson ve Jacobson, 2000; I. Sugözü ve Mutlu, 2008).

Ancak bu kategorilendirmede bazı belirsizlikler vardır. Bazı katkı maddeleri birden fazla işlevi yerine getirdikleri için birden fazla kategoriye yerleştirilebilirler (Blau, 2001). Şekil 2.3'te fren balata malzemesinin yapısı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.3. Fren balatası yapısında kullanılan malzemeler: 1. bağlayıcı, 2. takviye, 3. dolgu, 4. sürtünme ayarlayıcı (Borawski, 2020)

Balatada kullanılan herhangi bir malzeme, balatanın herhangi bir diğer bileşeniyle reaksiyona girmemelidir, çünkü bu, genel malzeme karakteristiğinde değişikliklere yol açabilir veya kompozitin delaminasyonuna neden olabilir ve fren sisteminin verimliliğini büyük ölçüde sınırlayabilir (Borawski, 2020).

2.2.4.1. Bağlayıcı malzemeler

Bağlayıcılar, bileşenlerini bir arada tutmak ve kararlı bir matris yapısı oluşturmak amacıyla kullanılır. Bu maddeler genellikle polimer bazlıdır ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri sınırlıdır. Fren malzemesinin içinde kullanım oranı en zor tahmin edilebilen bileşenler olarak kabul edilirler. Yetersiz reçine kullanımı, fren balatasının dayanıklılığını azaltırken, aşırı reçine kullanımı ise yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını düşürebilir ve sertliği önemli ölçüde artırabilir (Borawski, 2020). Yaygın olarak kullanılan bağlayıcı

reçineler arasında termoset veya novolak tipi fenolik reçineler, epoksi reçineler ve polyester reçineler yer almaktadır (Blau, 2001; I. Sugözü ve Mutlu, 2008).

Frenleme sırasında aşırı ısı oluştuğundan dolayı, fren balatasının malzeme kalitesi bozulabilir. Bu durum, reçinenin bozulmasıyla ilişkilidir ve sonuç olarak malzemenin bağlayıcı özelliklerini kaybetmesine neden olur. Bu nedenle, fren balatasının termal stabilitesi, mekanik özelliklerini koruma kapasitesi ve olumsuz frenleme koşullarında bileşenleri bağlama yeteneği büyük ölçüde reçineye bağlıdır (Borawski, 2020).

Fenol reçineler, genellikle sürtünme malzemeleri üretimi için neredeyse yalnızca kullanılan düşük maliyetli, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve iyi mekanik özelliklere sahip bağlayıcı malzemelerdir (Blau, 2001). Diğer reçinelerle karşılaştırıldığında, çözücülere, asitlere ve suya daha dayanıklıdır ve yanma sırasında daha az duman üretir. Önemli bir özellik olarak, ilk bozulma sıcaklığı, fren balatası solması ile ilgili bir fenomen ile korelasyon nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Bu sıcaklık saf reçinelerde 354 °C'den, kürlenmiş sürtünme malzemesinde 303 °C'ye düşmektedir. Fenol reçinesi, yüksek sıcaklık sürtünmesi için en uygun malzeme değildir. Ani frenleme durumlarında, fren balatasının sıcaklığı kolaylıkla 700 °C'ye ulaşabilir ve bu, fenol reçinesinin bozulma sıcaklığını önemli ölçüde aşmaktadır (Borawski, 2020).

Bir fren balatasındaki fenol reçinesi oranı hacim açısından %5 ile %35 arasında değişmektedir. Bu içeriğin miktarı, sürtünme katsayısı değeri ve aşınma oranı üzerinde ters etkiye sahiptir. Reçine içeriğindeki %10'luk bir düşüş, sürtünme katsayısında yalnızca birkaç yüzdelik değişime neden olur (Borawski, 2020).

Epoksi reçineler, mükemmel yapışma ve kimyasal dayanıklılık özelliklerine sahip bağlayıcılardır. Genellikle yüksek performanslı kompozitlerde tercih edilir (Blau, 2001).

Polyester reçineler, uygun maliyetli olup, birçok uygulamada kullanılabilir, ancak genellikle epoksi kadar dayanıklı değildir (Blau, 2001).

Fenol ve formaldehit, genellikle kalıp pudrası formunda kullanılır ve yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Moleküler yapıları, sürekli bir kafes yapısına sahip olmalarını sağlar, bu da moleküller arasında kayma olasılığını ortadan kaldırır ve şekil değiştirmeyi sıcaklık artışına karşı dirençli hale getirir. Ayrıca, doğal veya sentetik kauçuk da bağlayıcı olarak kullanılabilir, bu da malzemenin elastikiyetini ve genel performansını artırır (I. Sugözü ve Mutlu, 2008).

2.2.4.2. Takviye malzemeleri

Takviye malzemeleri, mekanik mukavemet sağlayan bileşenlerdir. Fren balatalarının dayanımını artırmak ve rijitliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Matris içinde homojen bir şekilde dağılan bu malzemeler, balataların performansını iyileştirmektedir. Uzun yıllar boyunca (1980'lerin ortalarına kadar) asbest, yaygın olarak yapısal bir takviye malzemesi olarak kullanılmıştır; ancak, sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle kullanımı yasaklanmış ve yerine alternatif elyaflar tercih edilmiştir. Bu alternatif takviye malzemeleri arasında metal, karbon, cam ve kevlar lifleri öne çıkmaktadır. Kevlar, yüksek dayanıklılık özellikleri ile fren balatalarının performansını iyileştirmekte etkili bir malzemedir. Cam elyafı, özel işlemlerle üretilmekte ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı ile bilinmektedir. Çelik fiber ise, iyi ısı ve sürtünme kararlılığına sahip olup, kolay temin edilebilirliği ile avantaj sağlamaktadır (Eriksson ve Jacobson, 2000; I. Sugözü ve Mutlu, 2008; Yanar vd., 2020). Takviye malzemeleri ve tanımlarına ait bazı bilgiler Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Takviye malzemeleri ve tanımları (Blau, 2001)

Malzeme	Tanım/Yorum
Asbest	İlk fren malzemelerinde en yaygın dolgu malzemesidir.
Pamuk Takviye Lifleri	Matris için kullanılır.
Karışık Oksit Takviye Lifleri	Temel cüruflardan üretilir.
Mineral Yün	Silika (%40-50 ağırlık), alümina (%5-15 ağırlık), kalsiyum (%34-42 ağırlık), magnezyum (%3-10 ağırlık) ve diğer inorganik bileşenleri içerebilir (%0-7 ağırlık); amacı kaymayı kontrol etmek ve fren etkinliğini artırmaktır.
Kauçuk (Diene, Nitril)	Asbest lifleri içeren polimer kompozit fren malzemelerinde çapraz bağlanmayı teşvik etmek ve aşınma direncini artırmak için stabilizatörler olarak kullanılır; ayrıca, sıkıştırılabilirliği (modül/sertlik) de değiştirir.

2.2.4.3. Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemeleri, fren balatalarının üretim maliyetini azaltmak ve işlenebilirliği arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında temizleyiciler, renklendiriciler ve organik/inorganik dolgu maddeleri yer almaktadır. Genellikle sürtünme performansına etkisiz oldukları kabul edilmekle birlikte, bazı durumlarda sürtünme ayarlayıcı işlev de görebilirler. Fren balatalarında yaygın olarak kullanılan

dolgu maddeleri barit, kil, alçı ve talk'tır. Barit, genellikle sürtünme katsayısını etkilemeyen bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmekle birlikte sadece dolgu işlevi görmektedir. Kil, doğal olarak toprak ve taş formunda bulunan ve dolgu malzemesi olarak kullanılan bir bileşendir. Alçı, düşük ısı iletkenliğe sahip olup dolgu malzemesi olarak %50'ye kadar kullanılabilir. Talk ise, yüksek yağ ve gres emme kapasitesi ve yaprağımsı yapısıyla balatalarda tercih edilen dolgu malzemelerinden biridir (I.Sugözü ve Mutlu, 2008). Dolgu malzemeleri ve tanımlarına ait bazı bilgiler Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Dolgu malzemeleri ve tanımları (Blau, 2001)

Malzeme	Tanım/Yorum
Baryum Sülfat (BaSO_4)	Temelde inert bir malzeme olup, yoğunluğu artırır ve aşınma direncine yardımcı olabilir; yüksek sıcaklıklarda kararlıdır.
Kalsiyum Karbonat (CaCO_3)	Baryum sülfata daha düşük maliyetli bir alternatif, ancak yüksek sıcaklıklarda tam olarak stabil değildir.
Kaju Fıstığı Kabuk Yağı	Bağlayıcı sistemde dayanıklılığı artırır ve fren gürültüsünü azaltır.
Kireç (Ca(OH)_2)	Demir katkı maddelerinde korozyonu önlemek için kullanılır; işleme yardımcı olur ve kayma sıcaklıklarını artırır.
Potasyum Titanat	Inert dolgu malzemesi; ayrıca bir yalıtkan ve asbestin rolünü değiştiren yapısal bir katılımcıdır.
Kauçuk Atığı	Öğütülmüş lastik ("lastik kabukları"), maliyeti düşürür, yol kirini içermemelidir.
Deniz Kömürü	Genel düşük maliyetli parçacıklı dolgu; zararlı kül içerebilir, yüksek sıcaklıklar için iyi değildir.
Çinko Oksit (ZnO)	Bazı aşınma direnci sağlar, ancak tamburları parlatabilir.

Uçucu kül, sanayi fabrikaları ve ısıtma ile elektrik santrallerinde kömür yanmasından kaynaklanan bir yan üründür. İnce mineral tozu formunda, açık gri ile koyu gri ya da açık kahverengi renklerde olup, esas olarak silisyum, alüminyum ve demir bileşenlerinden oluşmaktadır. Uçucu kül, ayrıca doğal taşlarla benzer şekilde çeşitli iz elementleri içerir ve yanmamış karbon içeriği düşüktür. Kömür yanması çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açtığı için, atık yönetimi, özellikle sanayi atıkları açısından birçok devlette çevresel politika önceliği haline gelmiştir. Farklı kömür türleri ve çeşitleri, uçucu külün değişen özelliklerle sonuçlanmasına yol açmakta ve bu da atık yönetim sürecini etkilemektedir. Uçucu kül, maliyetinin düşük olması nedeniyle fren balatalarında dolgu maddesi olarak kullanılması amacıyla denenmiştir. Toplam ağırlığın %5'inden %55-60'ına kadar kütle içeriği bulunmaktadır. Araştırmalar, yüksek kül içeriğine sahip fren balatalarının, araçların düşük başlangıç hızlarında sürtünme katsayılarının stabil olduğunu göstermiştir (Borawski, 2020).

2.2.4.4. Sürtünme ayarlayıcı malzemeler

Sürtünme ayarlayıcı malzemeler, sürtünme koşullarını kararlı bir şekilde sağlamak amacıyla eklenen bileşenlerdir. Bu malzemeler, sürtünme katsayısını modifiye ederek, fren performansının iyileşmesinde kritik bir rol oynar (Eriksson ve Jacobson, 2000). Abrasif (aşındırıcı) ve non-abrasif (aşındırıcı olmaya) olmak üzere iki gruba ayrılabilir (I. Sugözü ve Mutlu, 2008).

Aşındırıcılar, birleşim yüzeylerinin temizliğini korumaya ve sürtünme filmlerinin birikimini kontrol etmeye yardımcı olur. Ayrıca, özellikle duruşu başlatırken sürtünmeyi artırır (yani, "diş" artırırlar) (Blau, 2001). Tablo 2.5'te aşındırıcı olarak kullanılan malzemeler ve tanımları verilmiştir.

Tablo 2.5. Aşındırıcı sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları (Blau, 2001)

Malzeme	Tanım/Yorum
Alüminyum oksit	(1) Polişing ajanı olarak eklenir ve aşınma direnci sağlar. Ancak solma üretebilir. (2) Anhidrat formu daha az aşındırıcıdır. (3) Eritilmiş formu çok serttir ve en aşındırıcı formdur.
Demir oksitler	Hematit hafif bir aşındırıcı olarak işlev görebilir; manyetit de hafifçe aşındırıcıdır.
Kuvartz	Kırılmış minarel parçacıkları
Silika	Doğal veya sentetik olarak üretilmiş silika
Zirkonyum silikat	(ZrSiO ₄)

Aşındırıcı olmayan maddeler ise sürtünme katsayısını etkileyen ancak aşındırıcı özellik göstermeyen malzemelerdir (I. Sugözü ve Mutlu, 2008). Bu malzemeler, yağlama yapar, sürtünmeyi artırır veya oksijenle reaksiyona girerek arayüz filmlerinin kontrolüne yardımcı olur (Blau, 2001). Tablo 2.6'da aşındırıcı olmayan malzemeler ve tanımları verilmiştir.

Grafit, iki boyutlu halkalar şeklinde dizilmiş karbon atomlarından oluşan, parlak ve yumuşak bir malzemedir. Yüksek ısıya dayanıklılığı ve birçok korozyif maddeye karşı gösterdiği direnç ile öne çıkar. Grafitin sıcaklıkla birlikte artan dayanımı, düşük sürtünme uygulamalarında avantaj sağlar. Fren balatalarında, grafitin uygun oranlarda kullanılması, sürtünme katsayısının istenilen seviyede dağılmasına yardımcı olur ve bu da balata performansını iyileştirir.

Bakır, kalay ve çinkodan oluşan bronz tozu, katıldığı malzemenin elastik modülünü, sıcaklık iletkenliğini ve elektromanyetik koruma kapasitesini artırır. Ayrıca,

malzemenin katılaşma süresini kısaltır ve termal genleşme katsayısını düşürür, böylece fren balatasının genel performansını iyileştirir (I. Sugözü ve Mutlu, 2008).

Bakır, sürtünme malzemelerinin performans özelliklerini artıran kendine özgü özellikleri sayesinde uzun süredir fren balata bileşimlerinde önemli bir bileşen olarak kullanılmaktadır. Bakır, balatada termal solmayı önlemesi ve ısı iletkenliği artırması nedeniyle bir sürtünme düzenleyici olarak işlev görmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yağlayıcı bir özellik gösteren bakır, temas alanlarında homojen bir sürtünme tabakası oluşturarak gürültü ve titremeyi azaltır ve sürtünme katsayısının stabilizasyonuna katkı sağlar. Ayrıca, bakırın balatada fiber formunda takviye olarak kullanılması, aşınmayı azaltıcı bir rol oynar (Tavangar vd., 2020; Zhang vd., 2019).

Tablo 2.6. Aşındırıcı olmayan sürtünme ayarlayıcı maddeler ve tanımları (Blau, 2001)

Malzeme	Tanım/Yorum
Antimony trisulfide	Sürtünme kararlılığını artırmak için eklenen katı yağlayıcıdır. Potansiyel olarak toksik içerir.
Pirinç	Tipik olarak %62 Cu - %38 Zn içerir. Bazen talaş veya makine atığı olarak kullanılır, ıslak sürtünmeyi ve geri kazanımı artırdığı söylenir.
Karbon (grafit)	Ucuz ve yaygın olarak kullanılır. Birçok form ve kaynağı vardır, bazıları aşındırıcı kirleticiler içerebilir; hava ile >700°C’de yanar, sürtünme seviyesi nem ve yapıyla etkilenir.
Seramik ‘mikrosferler’	Alümina-silika ile düşük yoğunluklu dolgu, rotor aşınmasını azaltmaya ve sürtünmeyi kontrol etmeye yardımcı olduğu iddia edilir.
Bakır	Isı taşıma kontrolü için toz olarak kullanılır ancak aşırı dökme demir aşınmasına neden olabilir.
Sürtünme tozu	İşlenmiş kaju reçinelerinden oluşur, bazen kauçuk bazlı olabilir; spontan yanmayı azaltmak veya parçacık dağılımını desteklemek için bazı katkı maddeleri kullanılır.
Kurşun oksit	Sürtünme modifikatörü olarak kullanılmıştır, ancak toksisite endişeleri vardır.
Metaller - Akışkan Bileşenler	Pb, Sb, Bi, Mo, akışkan bileşenleri olarak, sürtünme kaynaklı filmleri stabilize etmek ve bunların aşırı kalınlaşmasını önlemek için oksijen alıcıları olarak işlev görür.
Metal oksitler - çeşitli	Magnetit soğuk sürtünmeyi artırır; ZnO yağlama yapar ancak tambur parlatmasına neden olabilir; Cr ₂ O ₃ sürtünmeyi artırır.
Metal sülfürler - çeşitli	Cu ₂ S, Sb ₂ S ₃ , PbS; metal fiber içeren ve içermeyen disk fren balataları üzerindeki katkı maddelerinin etkisini göstermektedir; sürtünme katsayısını değiştirmekte ve stabilize etmektedir; en yüksek değer Sb için yaklaşık 1 (0.47-0.49), ardından PbS (0.40-0.47) gelmektedir; Cu için en değişken değerler (0.36-0.52) olup, Cu-S için aşınma en kötüsüdür.
Mineral dolgu maddeleri	Mullit, kyanit, sillimanit, alümina, kristalin silika; aşınmayı kontrol etmeye yardımcı olur.
Molibden disülfür	(MoS ₂), tipik bir katman ızgara türü yağlayıcıdır; düşük maliyetli, sürtünmeyi azaltabilir.
Petrol koku	Düşük maliyetli, sürtünmeyi azaltabilir, düşük kül içerir.

2.2.5. Balatanın mikroyapı ve tribolojik özelliklerini etkileyen faktörler

Fren balatalarının mikroyapı ve tribolojik özellikleri, malzemenin performansını belirleyen önemli parametrelerdir. Bu özellikler, fren balatalarının sürtünme, aşınma, dayanıklılık ve uzun ömür gibi kritik performans kriterlerini doğrudan etkiler. Balatanın mikroyapısı, kullanılan malzemeler ve üretim süreciyle şekillenirken; tribolojik performansı, malzemenin sürtünme ve aşınma davranışlarıyla ilişkilidir. Bu faktörler, fren balatasının genel verimliliğini ve güvenliğini belirlemede önemli rol oynar.

Balatanın mikroyapısını etkileyen faktörler, malzemenin bileşen yapısına ve üretim süreçlerine dayanır. Bu faktörler, balatanın dayanıklılığını ve performansını belirleyen unsurlardır.

1. *Balatada Kullanılan Malzemeler:* Fren balatasının bileşenlerinde kullanılan malzemeler, mikroyapıyı doğrudan etkiler. Örneğin, organik, metalik veya karbon esaslı malzemeler arasındaki farklar, mikroyapı özelliklerinin değişmesine yol açabilir. Her malzeme türü, farklı sertlik, yoğunluk ve aşınma direnci sunar.
2. *Malzemelerin Yapısı:* Malzemelerin kristal yapısı, içsel boşluklar ve bağ yapıları gibi faktörler, mikroyapıyı belirleyen önemli unsurlardır. Bu yapılar, malzemenin sürtünme ve aşınma özelliklerini etkileyebilir.
3. *Malzemelerin Oransal Kullanımı:* Malzemelerin farklı oranlarda karıştırılması, kompozit malzeme oluşumunda önemli bir rol oynar. Balatanın mikroyapısındaki değişiklikler, bu karışım oranlarının etkisiyle şekillenir.
4. *Sıkıştırma Basıncı:* Üretim sırasında uygulanan sıkıştırma basıncı, balatanın yoğunluğunu ve yapısal bütünlüğünü belirler. Yüksek basınç, daha dayanıklı ve homojen bir mikroyapı oluşumunu teşvik eder.
5. *Sinterleme Sıcaklığı ve Süresi:* Sinterleme süreci, balatanın mikroyapısını etkileyen kritik bir adımdır. Sıcaklık ve süre, malzemenin bağ yapısını ve aşınma direncini artırmak için optimize edilmelidir.
6. *Üretim Yöntemi:* Üretim yöntemleri, mikroyapıyı belirleyen bir diğer faktördür. Örneğin, döküm, sinterleme veya presleme yöntemlerinin her biri, balatanın mikroyapısal özelliklerini farklı şekilde etkiler.

Fren balatasının tribolojik performansı, sürtünme ve aşınma davranışlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu performans hem balatanın içyapısına hem de çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

1. *Balataların İçerdikleri Malzeme Bileşenleri:* Balatalarda kullanılan malzeme bileşenleri, sürtünme özelliklerini belirleyen temel unsurlardan biridir. Takviye edici malzemeler ve dolgu maddeleri, balatanın tribolojik performansını iyileştirebilir.
2. *Balatanın Yüzey Yapısı:* Fren balatasının yüzey yapısı, sürtünme davranışını önemli ölçüde etkiler. Pürüzlü yüzeyler, sürtünmeyi artırırken, düzgün yüzeyler daha düşük sürtünme sağlar.
3. *Yüzey Enerjisi:* Yüzey enerjisi, malzemenin çevresiyle etkileşim kapasitesini gösterir. Bu, özellikle sürtünme katsayısını ve aşınma oranını etkileyen bir faktördür.
4. *Fren Balatalarındaki Kimyasal Reaksiyonlar:* Frenleme sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, sürtünme özelliklerini değiştirebilir. Bu reaksiyonlar, yüzeydeki oksitlenme, aşınma ve diğer kimyasal bozulmalarla bağlantılıdır.
5. *Balatanın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri:* Sertlik, yoğunluk, ısıl iletkenlik gibi fiziksel özellikler ile çekme dayanımı ve esneklik modülü gibi mekanik özellikler, balatanın tribolojik performansını doğrudan etkiler.
6. *Çalışma Koşulları:* Fren balatasının çalışma koşulları, özellikle hız, basınç ve sıcaklık gibi faktörler, sürtünme davranışını önemli ölçüde değiştirebilir. Bu koşullar, balatanın aşınma hızını ve etkinliğini etkiler.
7. *Çevresel Koşullar:* Çevresel faktörler, sıcaklık, nem ve dış ortam koşulları, balatanın performansını ve ömrünü etkileyebilir. Örneğin, aşırı sıcaklık, malzemenin aşınma hızını artırabilir.
8. *Yağlı, Nemli ve Kirli Yüzeyler:* Fren balatalarının çalıştığı yüzeyin yağlı, nemli veya kirli olması, sürtünme katsayısını ve aşınma direncini değiştirir. Bu tür yüzeyler, frenleme verimliliğini olumsuz etkileyebilir (Kara, 2011; Üstün, 2011)

2.2.6. Balata üretim yöntemleri

Fren balataları, çeşitli malzemelerin toz halinde bir araya getirilip preslenmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Bu balataların kimyasal ve mekanik özellikleri, içerdiği bileşenlerin oranlarına göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, balata malzemesinin tasarımında kullanılan malzemelerin türü ve oranlarının belirlenmesi oldukça karmaşık ve önemli bir süreçtir (Ertan, 2008).

Fren balatalarının üretiminde toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, metal veya metal dışı malzemelerin çok ince tozlar halinde karıştırılıp, istenen formda preslenerek kontrollü bir atmosferde ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta belirli bir süre boyunca sinterlenmesini içerir. Bu yöntemle, tek aşamalı üretim mümkündür. Bu yöntemin fren balata üretiminde tercih edilmesinin temel nedeni, farklı özelliklere sahip malzeme karışımlarının, özelliklerini kaybetmeden üretilebilmesidir. Örneğin, yüksek sıcaklıklara dayanımı düşük olan kauçuk veya reçine gibi malzemeler, yüksek sıcaklıkta yapılan üretim sırasında yanarak özelliklerini kaybedebilir. Bu nedenle, fren balata malzemeleri, döküm gibi yüksek sıcaklık gerektiren yöntemlerle üretilemez. Ancak toz metalürjisi yöntemi ile üretilen fren balataları, bileşimdeki tüm malzemelerin üretim süresince özelliklerini korumasını sağlar. Ayrıca bu yöntemle, istenen boyutlarda gözenekli bir yapı elde edilebilir ve farklı boyut ve şekillere sahip malzeme tozları dayanıklı, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülebilir (Ertan, 2008).

2.2.7. Fren balata malzemeleri üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmaları

Fren balatalarında kullanılan malzemelerin performans üzerindeki etkileri, birçok araştırmacının dikkatini çekmiş ve çeşitli çalışmalarla incelenmiştir. Farklı malzeme kombinasyonlarının fren performansı, dayanıklılık ve aşınma direnci üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar, aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

B. Sugözü ve Dağhan (2017), çalışmalarında farklı oranlarda alümina, silika ve zirkon (ağırlıkça %5 ve %10) içeren altı farklı fren balatası numunesi üreterek bu numunelerin sürtünme özelliklerini incelemişlerdir. Fren balatalarını geleneksel yöntemleri izleyerek sırasıyla toz karıştırma, ön şekillendirme ve sıcak presleme işlemleri ile üretmişlerdir. Numunelerin aşınma karakteristiklerini, pad-on-disk tipi aşınma test cihazı kullanarak belirlemişlerdir. Ayrıca, sertlik, yoğunluk, porozite, çekme dayanımı ve

basma dayanımı gibi fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirmişler; morfolojik özellikleri ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular doğrultusunda, aşındırıcı miktarının artması ile sürtünme katsayısının yükseldiğini ve özgül aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir. Yapılan sürtünme testleri sonucunda en yüksek sürtünme katsayısının 0,407 ile ağırlıkça %10 alümina içeren numuneden, en düşük sürtünme katsayısının ise 0,296 ile %5 zirkon içeren numuneden elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca ağırlıkça %10 alümina içeren balata numunesinin yüksek sürtünme performansı sergilediğini vurgulamışlardır.

Bashir vd. (2021), özel olarak tasarlanmış bir disk fren test düzeneğinde muz lifi ve fenolik reçineyi modifiye bağlayıcı olarak kullanarak fren balatası üretmişler ve ürettikleri fren balatasının termal kararlılığını ve sürtünme performansını analiz etmişlerdir. Balata malzemesine muz lifi eklenmesinin fren sürtünme malzemesindeki bağlayıcıların termal kararlılığını artırma potansiyeline sahip olduğunu ve bu durumun, alternatif bağlayıcılar açısından umut verici bir yaklaşım sunduğunun ifade etmişlerdir.

Boz ve Kurt (2006a), bronz esaslı fren balatalarına toz metalurjisi yöntemiyle farklı oranlarda (%0,5–%4) çinko tozu ekleyerek yeni fren balata numuneleri üretmişlerdir. Bu numunelerin yoğunluk, sertlik, sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti ve aşınma miktarlarını belirlemişlerdir. Ayrıca, numunelerin sinterleme öncesi ve sonrası mikroyapı görüntülerini ve aşınan yüzeylerden alınan SEM görüntülerini inceleyerek, aşınma türlerini analiz etmişlerdir. Fren balata numunelerinde optimum sürtünme ve aşınma davranışının 350 MPa presleme basıncında ve 820 °C sinterleme sıcaklığında elde edildiğini ifade etmişlerdir. Tüm fren balata numunelerinin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı değerlerinin SAE-J661 standardına uygun olduğunu belirtmişlerdir. Aşınma direnci açısından en yüksek performansın %0,5 çinko katkılı sürtünme malzemesinden, sürtünme katsayısı açısından ise en iyi sonucun %2 çinko katkılı sürtünme malzemesinden elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Boz ve Kurt (2006b), yaptıkları diğer bir çalışmada ise bronz esaslı fren balatalarına toz metalurjisi yöntemiyle farklı oranlarda (%0,5 - %4) antimon trisülfid tozu ilave etmişler ve ürettikleri fren balatalarının sürtünme ve aşınma davranışlarını bronz esaslı balata numuneleri ile karşılaştırmışlardır. Aşınma direnci açısından en iyi sonucunun %0,5 antimon trisülfid içeren sürtünme malzemesinden elde edildiğini, sürtünme katsayısı açısından ise en iyi sonucun %4 antimon trisülfid katkılı sürtünme malzemesinden elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Boz ve Kurt (2006c), diğer bir çalışmalarında ise bronz esaslı fren balatalarına sepiyolit tozu ilave etmişler ve sepiyolit tozunun fren balatasının tribolojik özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Aşınma direnci açısından en iyi sonucu %,5 sepiyolit içeren balata malzemesinin verdiğini, sürtünme katsayısı açısından ise en iyi değerleri %2 sepiyolit içeren balata malzemesinin verdiğini belirtmişlerdir.

El-Tayeb ve Liew (2009), yeni geliştirilen dört farklı ticari olmayan sürtünmeli fren balatası malzemesinin kuru ve ıslak sürekli kayma performanslarını bir tribo test cihazında belirlemeye çalışmışlar ve seçtikleri iki ticari fren balatası malzemesiyle karşılaştırmışlardır. Kuru sürekli frenleme altında, ticari fren balatası dahil olmak üzere tüm ticari olmayan fren balatası malzemelerinin sürtünme katsayılarının fren balatası malzemelerinin türüne duyarsız olduğunu gözlemlemişlerdir. Tüm fren balatası malzemelerinde, artan basınç veya hızla sürtünme katsayılarında hafif bir artış (%5-19) olduğunu ifade etmişlerdir. Aşınma oranlarının fren balatası malzemelerinin türüne veya bileşenine ve basınç önemli ölçüde bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Diğer taraftan, ıslak kayma koşulunda, ölçülen sürtünme katsayısı değerlerinin kuru sürtünme sırasında ölçülenden daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Eriksson ve Jacobson (2000), çalışmalarında otomotiv fren sistemlerinin tribolojik temas durumunun mikroskobik düzeyde anlaşılmasına yönelik eksiklikleri vurgulamışlardır. Organik bir fren balatasının gri dökme demir bir rotor ile sürtünme durumunda, diğer tribolojik sistemlerden çok farklı bir davranış sergilediğini ifade etmişlerdir. Balatanın karmaşık yapısının ve heterojen bileşiminin rotora karşı aşındığında belirgin yüzey yapısına ve yüzeyde birkaç mikrometre yüksekte büyük temas plakaları oluşturabileceğine vurgu yapmışlardır. Bu bağlamda araştırmalarında, bu tribolojik yüzeylerin oluşumu, mekanik özellikleri ve bileşimini yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu, nanoindentasyon, enerji dağılımlı X-ışını analizi ve beyaz ışık optik interferometri ile üç boyutlu profilometri tekniklerini kullanarak incelemişlerdir.

Erkoca ve Bayrakçeken (2021), çalışmalarında paralel kayar mesnetli Simpleks pabuçlu kampanalı bir fren sistemi üzerinde mesnet ve fren kuvveti uygulama noktalarının konum değişikliklerinin fren performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla, mesnet noktasını yatay ve düşey eksenlerde farklı konumlara taşımış, ardından fren kuvvetinin uygulama noktasını düşey ekseninde değiştirerek fren faktöründeki değişimleri analiz etmişlerdir. Mesnet noktasının yatay ve düşey eksenlerde merkeze yaklaştırılmasıyla fren faktöründe bir artış olduğunu, fren kuvveti uygulama

noktasının merkezden uzaklaştırılmasının da fren faktörünü artırıcı bir etki gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Faga vd. (2019), çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan altı karbon malzemesini fren balatalarında katı yağlayıcı olarak kullanmışlardır. Malzemelerin içsel özelliklerinin sürtünme davranışını nasıl etkilediğini anlamak amacıyla, ürettikleri balataların morfolojik ve yapısal özellikleri ile tribolojik özelliklerini incelenmişlerdir. Küresel parçacıkların arayüzdeki parçacıkların daha kolay yuvarlanmasını sağlayarak önemli bir yağlayıcı etkiye sahip olduğunu, azalan parçacık boyutunun arayüzde daha yüksek parçacık yoğunluğu ile ilişkili olarak sürtünmenin azalmasına neden olduğu vurgulamışlardır. Arayüzde sürtünme azalmasına yol açan kararlı bir tribofilmin oluşumunun, malzeme yoğunluğu ve tek bir kristalin grafit eksenli boyunca istifleme düzeniyle doğru orantılı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, yük ile sürtünme arasında doğrusal bir korelasyon olduğunu tespit ederek, burada düz çizginin kesişiminin parçacıkların morfolojik özelliklerinden (en-boy oranı ve yuvarlaklık) etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Gawande vd. (2023), otomotiv uygulamalarında kullanılan farklı balata malzemelerinin (asbestli, asbestsiz ve CL3003) değişen yükler altındaki ağırlık kaybını ve aşınma oranını incelemişlerdir. Aşınma oranının, kuru koşullar altında fren yüzeyleri arasındaki temas basıncındaki artışla arttığını belirtmişlerdir. Asbestli malzemede, asbestsiz malzemeye kıyasla daha fazla ağırlık kaybı (%8-10) olduğunu gözlemlemişlerdir. Asbestsiz malzeme ve CL3003 malzemesinin aşınma oranı asbeste kıyasla daha az olduğundan, bu malzemelerin asbestin yerine iyi bir seçenek olabileceğini belirtmişlerdir.

Gurunath ve Bijwe (2007), fenolikler veya bunların modifiye edilmiş versiyonlarının sürtünme kompozitlerinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılabildiğini, ancak bu bağlayıcılardaki başlıca sorunların (düşük raf ömrü, işleme sırasında zararlı uçucu maddelerin evrimi, pazara sunulmadan önce kütleme maddesinin dahil edilme ihtiyacı, boşluklarla birlikte nihai ürünlerdeki büzülme vb.) üstesinden gelmek için yaptıkları çalışmada alternatif bir reçine sentezlemişler ve kullanılan fenoliklerin yerini alma olasılığını araştırmışlardır. Bu bağlamda halka açılmasıyla polimerize olabilen bir monomeri laboratuvarında sentezleyerek, sürtünme kompoziti için bağlayıcı olarak kullanmışlardır. Aynı bileşenlere sahip ancak yalnızca reçine türü (%10 ağırlık) farklı olan iki tür asbestsiz organik sürtünme kompoziti geliştirmişler ve geliştirdikleri kompozitin fiziksel, termal, mekanik ve tribolojik özelliklerini karakterize etmişlerdir.

Yeni geliştirdikleri reçineli kompozitin, geleneksel fenolikli kompozitten, performans, solma, disk sıcaklık artışı, daha az çizilme, aşınma vb. açılardan karşı yüzey dostu olma gibi tüm tribo-performans özelliklerinde daha iyi olduğu gözlemlemişlerdir.

Hamamcı ve Sali (2020), farklı sıcaklıklarda (150 ve 180 °C) ve farklı sürelerde (6 s – 24 s) sinterleme ile imal edilen asbest içermeyen sekiz balata malzemesi üretmişlerdir. Ürettikleri balata numunelerinin sürtünme katsayısını, kesme dayanımını, özgül aşınma değerlerini, sertliğini ve yoğunluğunu belirleyerek, SEM/EDS analizi ile sinterleme sıcaklığı ve sürelerinin balata malzemesinin performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sinterleme sıcaklığı ve süresindeki artışın balata sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı, kesme gerilme değerleri ve balata sıcaklık değerleri açısından olumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Hendre ve Bachchhav (2019), asbestsiz kauçuk reçine esaslı metalik fren balatası malzemesinin sürtünme ve aşınma özelliklerini karşılaştırmak amacıyla Taguchi yöntemi kullanarak L9 ortogonal tasarım çerçevesinde bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneylerini, pin–on–disk test cihazında değişen sıcaklık, kayma hızı, basınç ve kayma mesafesi koşullarında yapmışlardır. Sürtünme üzerindeki en etkili parametrelerin sıcaklık (%95,37) ve kayma hızı (%2,99) olduğunu; aşınma üzerinde ise sıcaklığın (%82,96) ve basıncın (%6,80) en belirleyici faktörler olduğunu ifade etmişlerdir.

I. Sugozu vd. (2018), yeni formüle edilmiş fren balatalarında uleksitin sürtünme özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sürtünme katsayısı, özgül aşınma oranı ve sürtünme yüzeylerinin SEM görüntülerini kullanılarak fren balatalarının performansını değerlendirilmişlerdir. Uleksit içeren sürtünme malzemesinin, sürtünme kararlılığını ve solma direncini iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, ısııl işlem uygulanmış uleksit katkılı numunelerde, ısııl işlem uygulanmamış olanlara kıyasla daha düşük aşınma oranı elde edildiğini belirtmişlerdir. Numunelerdeki uleksit miktarının artmasının sürtünme katsayısında artışa neden olduğunu ve uleksit kullanımıyla sürtünme katmanının genel performansında önemli bir iyileşme kaydedildiğini vurgulamışlardır.

I. Sugözü (2019), fren balatalarında bakır kullanımının frenleme performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu amaçla, balata karışımına %5, %10 ve %15 oranlarında bakır ekleyerek üç farklı balata numunesi hazırlamıştır. Elde edilen numunelerin sürtünme katsayısı, aşınma, yoğunluk ve sertlik gibi özelliklerini belirlemiştir. Çalışmada, bakır oranındaki artışın balatanın yoğunluk, sertlik, özgül

aşınma oranı ve ortalama sürtünme katsayısını yükselterek frenleme performansını olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşmıştır.

İ. Sugözü vd. (2011), balata üretiminde önemli bir parametre olan sıcak presleme süresinin, balatanın özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, aynı malzeme içeriğine sahip üç farklı sıcak presleme süresinde (5, 10 ve 15 dakika) numuneler üretmişlerdir. Elde ettikleri numunelerin aşınma ve mekanik özellikleri üzerinde gerçekleştirdikleri incelemelerde, 10 dakika süre ile sinterlenen numunelerin, diğer iki süre ile sinterlenen numunelere kıyasla daha iyi bir sürtünme katsayısı değeri sunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, sıcak presleme süresinin artışıyla birlikte sürtünme performansının daha stabil bir hale geldiğine de değinmişlerdir.

K. B. Sugözü (2015), maun cevizi tozunun fren sürtünme malzemelerinin sürtünme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, %5, %10 ve %15 oranında maun cevizi tozu içeren 3 farklı sürtünme malzemesi üretmiş ve bir fren dinamometresi kullanarak sürtünme malzemelerinin tribolojik özelliklerini incelemiştir. Artan arayüzey sıcaklığı ile en kararlı sürtünme katsayısının 0,48 değeriyle %10 maun cevizi tozu içeren balata malzemesinden elde edildiğini belirtmiştir. Aşınma incelemelerinde ise, en fazla aşınmanın %10 maun cevizi katkılı malzemede, en düşük aşınmanın ise %15 maun cevizi katkılı malzemede gözlemlendiğini ifade etmişlerdir.

Koç vd. (2009), ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanarak, dört farklı kalınlığa sahip beş çeşit balata malzemesinin, 300 saniye süresince sürekli frenleme işlemine tabi tutulması durumunda sıcaklık ve gerilme durumundaki değişimleri incelemişlerdir. Frenleme sırasında balatanın merkezinden uzaklaştıkça uygulanan ısıl gücün değiştiğini ve bu nedenle balatanın dış kısımlarında daha yüksek sıcaklık değerleri elde edildiğini gözlemlemişlerdir. En yüksek sıcaklık değerlerinin balatanın diske temas ettiği yüzeylerde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı ile özgül ısı ve yoğunluğu arasında ters bir orantı olduğu gözlemlemişlerdir. ısıl iletkenlik katsayısı düşük, özgül ısı ve yoğunluğu yüksek olan balata malzemesinin yüzeyinde oluşan sıcaklık ile sıcaklık farkı değerlerinin maksimum seviyelere ulaştığını, buna karşın ısıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı ve yoğunluğu yüksek olan balata malzemesinin yüzeyindeki sıcaklık ile sıcaklık farkının minimum seviyede olduğunu ifade etmişlerdir. Aşınma miktarındaki artışın, balata yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değerleri ve sıcaklık farklarının yanı sıra gerilme miktarlarını da artırdığını vurgulamışlardır.

Krishnan vd. (2021), fren malzemelerinde bakır içeriğini azaltmak amacıyla, ticari olarak temin edilebilen alüminyum ve demir alaşımı ile çeşitli bileşenleri kullanarak fren balataları üretmişlerdir. Çalışmalarında, ürettikleri alüminyum ve demir alaşımlı fren balatalarının fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklerini bakır alaşımlı fren balataları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Ayrıca, bu balataların tribolojik özelliklerini Chase testi ile analiz ederek, demir ve alüminyum alaşımı bazlı fren balatalarının üstün solma ve toparlanma özelliklerine sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Kumar vd. (2023), yeni geliştirilen metal matris kompozit ve ticari fren balatası malzemeleri üzerindeki havadaki parçacıkların yapay sinir ağları ve sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırmalı başlıklı çalışmalarında, çevre dostu fren balatası malzemeleri geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda öncelikle yeni fren balatası malzemelerini, toz metalurjisi işlemi kullanılarak 15 ton sıkıştırma yükünde ve 250 °C sinterleme sıcaklığında üretmişlerdir. Ürettikleri fren balatası numunelerinin mukavemetini belirlemek için basma ve sertlik testleri yapmışlardır. Tribometre testiyle, geliştirilen numunenin ticari fren balatası örneğine kıyasla daha düşük aşınma oranına ve kütle kaybına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Geliştirilen ve ticari fren balatalarının aşınma kalıntılarının boyutları, sonlu elemanlar analizine göre sırasıyla 1,865–159,7 µm ve 1,180–101,7 µm arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Ticari fren balatalarında aşınma artık parçacıklarının geliştirilmiş fren balatalarına göre daha küçük olduğunu gözlemlemişlerdir. Havadaki parçacıkların aralığını bulmak için bir parçacık boyutu analizörü kullanmışlar ve ticari fren balatalarının, geliştirilmiş numunelere kıyasla 10 µm'den daha az olmak üzere birçok küçük boyutlu parçacık yaydığını ifade etmişlerdir. Kütle kaybını tahmin etmek için kullanılan yapay sinir ağ modelinin deneysel sonuçları doğrular nitelikte olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, çevre dostu geliştirilmiş fren balatasının ticari fren balatasına göre daha iyi mekanik özelliklere ve ısı transfer kapasitesine sahip daha düşük havadaki parçacık emisyonuna sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Kumar ve Ghosh (2020), metal matrisli kompozit fren balatalarında, nikel sülfat dolgu malzemesinin üretilen fren balatalarının mikroyapısı, yüzey pürüzlülüğü, sertliği ve termal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Geliştirilen fren balatasının, sertlik, termal özellik, gözeneklilik dağılımı ve tribolojik performans analizi temelinde seçilmiş piyasada bulunan kompozit fren balatalarından daha iyi olduğunu ve yakın gelecekte ticari kullanım için iyi bir seçenek sunabileceğini ifade etmişlerdir.

Kuş vd. (2016), sıcak presleme yöntemiyle kütlece %6 uçucu kül takviyesi içeren bronz matrisli fren balata malzemesi üretmiş ve bu malzemeye farklı oranlarda (%0,5–%4) kolemanit ilavesinin tribolojik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sürtünme ve aşınma deneylerini SAE J661 test standardına göre Chase tipi test cihazında gerçekleştiren araştırmacılar, tüm balata numunelerinin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı değerlerinin SAE-J661 standart aralığında olduğunu tespit etmişlerdir. Aşınma direnci bakımından en yüksek performansın kolemanit ilavesiz sürtünme malzemesinden, sürtünme katsayısı açısından ise en iyi sonucun %0,5 kolemanit ilaveli sürtünme malzemesinden elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Liew ve Nirmal (2013), çeşitli hız ve nominal temas basınçları altında asbestli ve asbestsiz olarak tasarladıkları ticari olmayan fren balatası malzemelerinin tribolojik özelliklerini incelemişler ve bu balataların özelliklerini seçilmiş bir ticari fren balatası malzemesiyle karşılaştırmışlardır. Tüm fren balata malzemelerinde, sürtünme katsayılarının artan hız ve basınca duyarsız olduğunu gözlemlemişlerdir. Asbestsiz fren balatasının diğer fren balatalarına kıyasla daha fazla aşınma direncine sahip olduğunu ve bu doğrultuda ticari olmayan bu balatanın potansiyel frenleme özelliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Lyu vd. (2020), bakır içermeyen iki farklı fren balatası ile bakır içeren bir fren balatasının sürtünme, aşınma ve havadaki partikül emisyonunu inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bakır içermeyen fren balatalarının bakır içeren fren balatasıyla karşılaştırıldığında benzer bir sürtünme katsayısı sağladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, üç fren malzemesinin de eşleşen fren rotoruna benzer aşınma yarattığını, ancak bakır içermeyen fren balatalarının bakır içeren fren balatalarına kıyasla daha fazla havada partikül ürettiğini belirtilmiştir.

Marin vd. (2019), fenol formaldehit reçine matrisine gömülü barit, potasyum titanat ve aramid elyaf karışımli kompozit bir fren balatası üretmişler ve ürettikleri fren balatasını dökme demir üzerinde laboratuvar ortamında aşınma testine tabi tutmuşlardır. Aşınma testinden elde ettikleri numuneleri çeşitli mikroskopik ve spektroskopik teknikleri ile karakterize etmişlerdir. Fren balatası bileşimine bağlı olarak dört ana aşınma mekanizması gözlemlemişlerdir. Bunların tribo tabaka oluşumu, seramik kristal çekilmesi, aramid hamur elyaflarındaki C–N bağının kopması ve baritin amonyum veya potasyum sülfat üretmek üzere çözünmesi olduğunu belirtmişlerdir. Potasyum titanatın varlığında hem aşınma oranının hem de tribo tabaka alanı kapsamının azaldığını ifade etmişlerdir.

Mausam vd. (2021), CATIA programını kullanarak tasarladıkları fren balatalarında, ekolojik açıdan uyumlu olan ve farklı oranlarda (%85–%100) kullanılan magnezyum silisyum nitrür bileşiğinin aşınma gerilmelerine etkilerini ANSYS yazılımı ile belirli süre aralıklarında (10, 20, 30 dakika) analiz etmişlerdir. Bu bileşik oranlarının fren balatasının performansına etkilerini değerlendirilmiş ve asbestli fren balataları ile karşılaştırmışlardır. %85 oranında magnezyum silisyum nitrür bileşiği içeren fren balatasının asbestli balata ile benzer sonuçlar sağladığını ve bu bileşim oranının fren balatası üretimi için uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Mutlu ve Cengiz (2002), çevre kirliliği ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla, fren balatalarında asbest yerine cam elyaf kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişler ve cam elyaf takviyeli fren balatalarının sürtünme katsayısı ve birim aşınma miktarlarını incelenmişlerdir. Özellikle pişirme işlemi sonrası balataların fırınlanması durumunda, sürtünme katsayısının belirgin bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir.

Österle vd. (2009), tribolojik bir test esnasında oluşan temas durumlarını belirlemek amacıyla ticari bir fren balatası malzemesi ile gri dökme demir diskten oluşan bir sürtünme çiftinin aşınma deneylerini pin-on-disk cihazında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, frenleme sonrasında her zaman gözlenmese de öğütülmüş ve sıkıştırılmış aşınma artıklarından meydana gelen ve sürtünme özelliklerini etkileyen "üçüncü cisim" olarak adlandırılan bir yapı oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu üçüncü cismin, 100–1000 nm boyutlarında parçacıklar içeren nanokristalin bir malzeme matrisinden oluştuğu belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca, daha iri aşınma parçacıklarının temas bölgesinden dışarı atılma eğiliminde olduklarını, ancak daha ince parçacıkların yüzeye yapışabildiğini veya aşınma oluklarında tutulabildiğini ifade etmişlerdir. Tribolojik testler sırasında gözlemlenen sürtünme katsayısındaki dalgalanmaların, arayüzde yeterli miktarda ince aşınma partikülünün bulunmaması nedeniyle kararlı ve sabit bir sürtünme katsayısının sağlanamamasıyla ilişkili olduğunu vurgulamışlardır.

Österle vd. (2010), fren sürtünme malzemelerinde bakırın rolüne odaklandıkları çalışmalarında, bakırın fren performansı ve termal iletkenliğe katkı sağlama mekanizmalarını incelemişlerdir. Fren balatalarının yüzeyinde bulunan bakır talaşlarının, yüksek sertlik sağlayan yoğun bir plastik deformasyon bölgesi oluşturduğunu ve balata yüzeyinden ayrılan bazı rekristalize bakır nano-parçacıklarının sürtünme tabakalarına yumuşak bir bileşen olarak dahil olduğunu ifade etmişlerdir. Bu bilgiler doğrultusunda, balatada kullanılan bakırın fren balatasında birincil temas noktalarını oluşturarak takviye

elemanı ve dönen disk ile sabit balata arasında kaygan bir geçiş sağlayan granüler bir tabaka oluşturarak katı bir yağlayıcı işlevi olmak üzere iki temel işlev üstlendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, çelik liflerin ve bakır parçacıklarının birincil temas noktası sağlama açısından benzer işlev gösterdiğini, bakır veya grafit içeren sürtünme tabakalarının benzer kayma özellikleri sunduğunu vurgulamışlardır. Sürtünme kuvvetinin dengelenmesi ve yumuşak kayma davranışının yalnızca malzeme özelliklerinden değil, aynı zamanda sürtünme tabakalarındaki katı yağlayıcı parçacıkların miktarından da etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Österle vd. (2014), tipik fren balatası bileşenlerinin tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla modifiye edilmiş bir pin-on-disk test cihazında grafit ve metal sülfür içeren fren balatalarının performansını analiz etmişlerdir. Katı yağlayıcı olarak grafit, Fe_3O_4 tozlarının sürtünme ve aşınma davranışını önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir. Saf demir oksitin 0,4–0,5 arasında istenen sürtünme katsayısı seviyesini sağlasa da kayma işleminin düzgün olmamasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Düzgün kayma davranışının elde edilmesi için fren balatasına %15–%30 oranında bir katı yağlayıcı eklenmesinin gerektiğini, ancak bu durumda da sürtünme katsayısının 0,35'e düştüğünü belirtmişlerdir.

P. Topuz ve A. Topuz (2018), Türkiye'de kullanılan üç farklı otomobil fren diski balatasının (yerli ve ithal) aşınma ve sürtünme karakteristiklerini, ayrıca mekanik ve fiziksel özelliklerini değerlendiren deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, her bir balatanın aşındırıcı bileşenlerinin farklılık gösterdiğin, ancak hiçbir örnekte asbest kullanılmadığı tespit etmişlerdir. İncelenen balataların tamamında, normal ve sıcak sürtünme katsayılarının TS 555 standardında belirtilen 0,25-0,55 arasında olduğunu ve E, F ile G sınıfı balata özelliklerini taşıdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, ticari olarak temin edilen bu balatalarda sıcak ve normal sürtünme katsayısı arasındaki farkın, TS 555 standardına göre öngörülen %15 sınırını aşmadığını belirlemişlerdir. Özgül aşınma değerleri açısından tüm numunelerin TS 555 standardındaki $5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{Nm}$ sınırını aşmadığını, ancak balatalar arasında aşınma kaybı bakımından düşük ve nispeten yüksek değerlere sahip olanlar arasındaki farkın, balatalarda kullanılan farklı takviye ve dolgu bileşenlerinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Bunlara ilaveten, iç kesme dayanımı ve yoğunluğu en düşük olan balatanın orijinal balata olduğunu, ancak sertlik bakımından en yüksek değeri de yine bu balatanın verdiğini gözlemlemişlerdir. Bu durumun, balata içerisinde yoğunluğu düşük olan takviye bileşenlerinin oranıyla ilişkili olduğu ifade edilmiştir.

Pujari ve Srikan (2019), alüminyum oksit (%5-%20) ve grafit tozu (%10-%35) gibi katkı maddeleri ile palmye çekirdeği (%0-%50), Nil gülü (%0-%15) ve buğday (%0-%10) gibi doğal liflerin çeşitli kombinasyonlarını %35 fenolik reçine bağlayıcı ile birleştirerek beş farklı fren balatası üretmişlerdir. Bu fren balatalarının tribolojik özelliklerini incelemişler ve asbestli fren balatalarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, sürtünme katsayısını artırmak için parçacıklı Nil gülü, aşınma oranını azaltmak için ise buğday tozu kullanıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, alüminyum oksit ve grafitin aşındırıcı özellikte olması sayesinde düşük gürültü seviyesine, yüksek sürtünme katsayısına ve düşük aşınma oranına sahip fren balataları üretimine katkı sağladığını ifade etmişlerdir. %30 lif oranına %5 buğday eklenmesiyle fren balatalarında daha iyi aşınma özellikleri elde edildiğini, kompozitlerde maksimum sertlik değerine ise %10 buğday, %15 Nil gülü ve %25 palmye çekirdeği oranlarında ulaşıldığını gözlemlemişlerdir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, test edilen doğal liflerin sürtünme kompozitlerini güçlendirmede asbestin yerine geçebileceği sonucuna varmışlardır.

Saindane vd. (2021), mevcut fren balatası malzemeleri ile karşılaştırıldığında gelişmiş fiziksel, mekanik ve sürtünme özelliklerine sahip bir polimer nanokompozit fren balatası malzemesi üzerine odaklanmışlardır. Polimer nanokompozit numunelerin yoğunluk, su-yag emilimi ve gözeneklilik gibi fiziksel özelliklerini, Vicker sertlik test cihazı ile mekanik sertliğini, pim veya disk aparatı ile sürtünme özelliklerini ve aşınma değerlerini tespit etmişlerdir. Ayrıca, nominal temas basıncının ve kayma mesafesinin sürtünme ve sıcaklık parametreleri üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Geliştirilen fren balata numunelerinin su ve yağ emilimine karşı mükemmel bir direnç gösterdiğini ve polimer nanokompozit fren balatası numuneleri için elde edilen sonuçların, bu malzemelerin fren balatası uygulamaları açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Tavangar vd. (2020), düşük metalik ve bakır içermeyen fren balatalarının kuru kayma davranışı ve aşınma mekanizmasının karşılaştırılması başlıklı çalışmalarında, bakır içeren ve içermeyen iki ticari sürtünme malzemesi formülasyonunu fren balatalarının üretiminde kullanmışlardır. Bakır içermeyen fren balatasının tribolojik davranışının düşük metalik bakır içeren balata ile benzer özellikler sergilediğini, ancak bakır içermeyen balatanın aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir. Selüloz elyafının termal grafitle birlikte sunduğu kümülatif özelliklerinin bakırın işlevini yerine getirebileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, bakır içeren balatanın sürtünme esnasında oluşan ısının etkilerine karşı daha dirençli olduğunu ifade etmişlerdir.

Timur ve Kılıç (2013), Türkiye’de mermer işleme sürecinden kaynaklanan mermer toz atıklarının değerlendirilmesine yönelik olarak, bu atıkların fren balatası üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, mermer artıklarını öğütürerek toz haline getirmişler ve çeşitli katkı maddeleri ekleyerek yeni formülasyonlu bir fren balatası geliştirmişlerdir. Üretilen fren balatalarının sürtünme performansları farklı firmaların balatalarıyla karşılaştırılarak analizler yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda, mermer tozunun frenleme performansı üzerinde olumlu etkiler sağladığını gözlemlemişlerdir.

Wahlström vd. (2011), disk frenlerden kaynaklanan aşınma parçacıklarının şehir atmosferindeki partikül konsantrasyonuna katkısını incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu bağlamda, nano gözenekli kompozit tabanlı fren balatası ile geleneksel fren balatalarını modifiye edilmiş bir pin-on-disk aşınma cihazında test etmişlerdir. Testlerde disk malzemesi olarak dökme demir kullanmışlardır. Test sırasında havada bulunan aşınma parçacıklarını filtrelerde toplamışlardır. Toplanan parçacıkları SEM ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi ile analiz etmişlerdir. Havada taşınan aşınma parçacıklarının demir, oksijen ve bakır gibi elementleri içeren parçacıklardan oluştuğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda, nano gözenekli fren balatası malzemelerinin havada taşınan aşınma parçacıkları bakımından geleneksel malzemelere göre 3 ile 7 kat daha az partikül ürettiğini gözlemlemişlerdir. Bu bulgular doğrultusunda, nano gözenekli kompozit fren balatalarının partikül kirliliğini azaltmada potansiyel olarak daha çevre dostu bir alternatif olabileceğini ifade etmişlerdir.

Yanar vd. (2020), asbestsiz fren balatasına %0–%20 ağırlık oranlarında çelik elyaf ilaveli balata malzemelerinin sürtünme ve aşınma karakteristikleri ile mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Hazırlanan numunelerin sürtünme davranışını pim–disk tipi test konfigürasyonunu kullanarak test etmişlerdir. Kompozit balata numunelerinin sürtünme katsayısının çelik elyaf içeriğinin artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça %5 çelik elyaf ilavesinden sonra kompozitin sürtünme katsayısının önemli ölçüde değişmediğini belirtmişlerdir. Çelik elyaf ilavesinin kompozitin sürtünme katsayısında önemli bir artışa neden olsa da ağırlıkça %15’e kadar çelik elyaf ilavesiyle özgül aşınma oranında önemli bir değişiklik gözlemlenmediğini belirtmişlerdir. Öte yandan kompozit matrise çelik elyaf ilavesi numunenin solmaya karşı balata direncinin artmasına katkı sağlasa da mekanik özelliklerinin kötüleşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang vd. (2019), demir matris alaşımının bakır bazlı fren balatası malzemelerinin sũrtũnme ve aşınma ȳzellikleri ȳzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla argon gazı atomize edilmiş bakır–demir ȳn alaşımlı toz karışımları kullanarak bakır bazlı fren balatası ȳretimi gerçekleştirmişlerdir. Deneylerini MS3000 sũrtũnme ve aşınma test cihazında gerçekleştiren araştırmacılar, demir matris alaşımının tanelerin iç kısmında dũzgũn bir şekilde dağılmış demir açısından zengin bir fazın ȳkelmesine neden olduğunu, bu fazın SiO₂–matris arayũzũ boyunca ayrıldığını ve grafit–matris ara yũzũnũn yakınında perlit oluşumunu tetiklediğini gȳzlemlemiřlerdir. Bu durumun bakır matrisinin gũlendirilmesine, arayũz bağının iyileştirilmesine ve ȳũncũ bir gȳvdenin korunmasına katkıda bulunduğunu ifade etmişlerdir. ȳn alaşımlı numunelerin nispeten yũksek bir sũrtũnme katsayısının yanı sıra gelişmiş sũrtũnme kararlılığına sahip olduklarını ve fren hızının 200 km/saatten dũřũk olduğu durumda aşınma kaybını azalttıkları vurgulamışlardır. Bununla birlikte, fren hızlarının 200 km/saatin ȳzerine çıktığı durumlarda, demir açısından zengin fazın kırılmasının dengesiz bir sũrtũnme katsayısına ve yũksek aşınma kaybına yol açtığını belirtmişlerdir.

2.3. Bor

Bor, endũstriyel uygulamalar açısından oldukça ȳnemli bir yarı metaldir. Yũksek erime noktası ve dũřũk kimyasal reaktivitesi, boru hem termal hem de elektriksel yalıtkan olarak tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir (Borawski, 2020). Gũbre ve ilaç endũstrisinden kimya ve otomotiv sektȳrlerine, nũkleer enerji ȳretimi dahil olmak ȳzere çok çeşitli alanlarda kullanılmakta olan bor, stratejik bir mineral olarak kabul edilir. Kũresel bor rezervlerinin yaklaşık %65'ine ev sahipliği yapan Tũrkiye, dũnya bor ȳretiminin %32'sini karşılayarak bu alanda lider konumda yer almaktadır (B. Sugȳzũ vd., 2018).

2.3.1. Bor elementi

Bor elementi, periyodik tabloda B simgesiyle gȳsterilir ve atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81'dir. Yarı metal ve yarı iletken ȳzellikleri ile tanınan bor, periyodik tablonun 3A grubunda yer almaktadır. Doğada, bor elementi kararlı iki izotop formunda bulunur.

Bunlar, B10 ve B11'dir. B10 izotopu doğada %19,1-20,3 oranında, B11 izotopu ise %79,7-80,9 oranında yer alır (ETİMADEN, 2024).

Doğada serbest halde bulunmayan bor, farklı metal ve ametal elementlerle bileşikler oluşturarak çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikler sergiler. Bor bileşiklerinin geniş bir yelpazede endüstriyel uygulamaları bulunmaktadır. Bileşiklerinde genellikle ametal karakter gösteren bor, saf haliyle karbon gibi elektriksel iletkenlik özelliklerine sahiptir. Kristalize bor, görünüm ve optik özellikler açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir. Bor elementi ilk kez 1808 yılında Fransız kimyagerler J.L. Gay-Lussac ve Baron L.J. Thenard ile İngiliz kimyager H. Davy tarafından izole edilmiştir (ETİMADEN, 2024).

Bor, dünya yüzeyinde toprak, kayalar ve su kaynaklarında geniş bir dağılıma sahiptir. Bor konsantrasyonu, topraklarda genellikle 10-20 ppm arasında değişirken, deniz suyunda bu değer 0,5-9,6 ppm, tatlı sularda ise 0,001-1,5 ppm aralığında seyrederek. Ekonomik açıdan değerli bor yatakları, borun oksijenle oluşturduğu bileşikler formunda, daha çok Türkiye ve Amerika Birleşik Devletleri'nde, volkanik ve hidrotermal aktivitenin yoğun olduğu kurak bölgelerde bulunmaktadır. Bu bölgeler, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarının bor içeriğinin zenginleşmesine katkıda bulunduğu jeolojik özellikler sergiler (İ. Sugözü, 2009). Bor elementinin fiziksel özelliklerine ait bilgiler Tablo 2.7'de verilmiştir.

Tablo 2.7. Bor elementinin fiziksel özellikleri (ETİMADEN, 2024)

Özellik	Değer	Birim
Atomik kütle	10,811	
Ergime noktası	2300	°C
Kaynama noktası	4002	°C
Termal iletkenlik	0,274	W/cmK
Yoğunluk	2,34	g/cm ³
Vickers sertlik	49000	MN/m ²
Spesifik ısı	1,02	J/gK

2.3.2. Bor mineralleri

Bor mineralleri, yapılarında farklı miktarlarda bor oksit içeren doğal bileşikler olarak tanımlanır ve doğada 230'dan fazla çeşidi bulunmaktadır. Ticari açıdan en önemli bor mineralleri arasında tinkal, kolemanit, kernit, üleksit, pandemit, borasit, szaybelit ve hidroborasit yer almaktadır. Dünya bor piyasasında lider konumda olan ETİMADEN, bu

mineralleri uluslararası kalite standartlarına uygun, yüksek katma değerli ürünlere dönüştürmektedir. Özellikle, tinkal, kolemanit ve üleksit, ETİMADEN tarafından işlenerek endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olan temel bor ürünlerine dönüştürülmektedir (ETİMADEN, 2024).

2.3.3. Rafine bor ürünler

Rafine bor ürünleri, sanayide geniş kullanım alanları bulan borun en çok tüketilen türleri arasında yer almaktadır. Tablo 2.8’de dünyada ticari olarak üretilen rafine bor ürünleri verilmiştir. Bu ürünlerin başlıca kullanım alanları; cam ve cam elyafı, sabun ve deterjan üretimi, seramik sanayisi, yangın geciktirici materyaller, tarım, nükleer uygulamalar, metalurji, ilaç ve kozmetik sektörü, elektronik ve bilgisayar endüstrisidir (İ. Sugözü, 2009).

Tablo 2.8. Ticari olarak üretilen rafine bor ürünleri (İ. Sugözü, 2009)

Rafine ürün	Kimyasal formülü	B ₂ O ₃ (%)
Boraks dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36,50
Boraks pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	47,80
Susuz boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69,30
Borik asit	H ₃ BO ₃	56,50
Susuz borik asit	B ₂ O ₃	100
Sodyum perborat	NaBO ₃ .4H ₂ O	22
Sodyum metaborat	Na ₂ B ₂ O ₄ .4H ₂ O	64,20
Sodyum oksiborat	Na ₂ B ₈ O ₁₃	81,80

Rafine bor ürünleri, özellikle boraks penta ve dekahidrat ile susuz boraks, borun yaygın olarak tüketilen türleridir. Dünya genelinde bu ürünlerin yıllık toplam üretim kapasitesi yaklaşık 1600000 tona ulaşmaktadır. Bu kapasitenin 452000 tonu Türkiye’de bulunmaktadır. Türkiye’nin yıllık boraks penta ve dekahidrat üretimi, B₂O₃ cinsinden 135000 ton seviyesindedir ve bu miktar, dünya üretiminin yaklaşık %23’ünü oluşturmaktadır (İ. Sugözü, 2009).

Boraks pentahidrat ve dekahidrat, tinkal cevherinden toz veya kristal formda elde edilmektedir. Üretim süreci, çözme, çeşitli flokülantlarla çöktürme, santrifüj, filtrasyon ve kurutma gibi aşamalardan oluşmaktadır. Cam, tarım, seramik ve alev geciktiriciler gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır (ETİMADEN, 2024).

Borik asit üretimi açısından dünya kapasitesi yıllık yaklaşık 800000 ton seviyesindedir. Türkiye, yıllık 30000 ton B₂O₃ eşdeğerinde borik asit üretmekte olup, bu

miktar dünya genelindeki toplam borik asit üretiminin yaklaşık %11'ini karşılamaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu zengin bor rezervleri ve üretim potansiyeli, küresel bor piyasasında stratejik bir rol oynamasına olanak sağlamaktadır. Bu durum, Türkiye'yi bor üretiminde ve ticaretinde lider ülkelerden biri haline getirmektedir (İ. Sugözü, 2009).

Borik asit, genellikle kolemanit cevherinin sülfürik asit ile veya boraksın mineral asitlerle reaksiyona girmesi sonucunda elde edilir. Cam endüstrisinde, camın ısıya, kimyasal maddelere ve mekanik etkilere karşı dayanıklılığını artırma özelliği ile öne çıkmaktadır. Seramik endüstrisinde ise, seramiğin fiziksel darbelere karşı kırılma ve çizilme direncini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Antimikrobiyal özellikleri sayesinde deterjan endüstrisinde önemli bir katkı maddesi olarak yer alırken, bitkiler için gerekli bir besin elementi olması nedeniyle tarım sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, ısı ve korozyona karşı direnci sayesinde tıp ve petrokimya gibi diğer uygulama alanlarında da kullanılmasına olanak tanımıştır (TİMADEN, 2024).

2.3.4. Borun mühendislik malzemelerinde kullanımı

Ham bor cevherleri, çıkarıldığı ilk haliyle çeşitli fiziksel zenginleştirme işlemlerine tabi tutulur ve bu işlemler sonucunda daha yüksek kalitede rafine edilerek nihai kullanım için hazır hale getirilir. Bor ürünlerinin kullanımı birçok sektörde oldukça yaygın olmasına rağmen, en büyük tüketim oranı “cam (yalıtım cam elyafı, tekstil tipi cam elyafı, borosilikat cam ve panel cam)”, seramik-frit, tarım ve deterjan” endüstrilerinde gerçekleşmekte olup, bu sektörler toplam bor tüketiminin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır (Kurt, 2019).

Dünya genelinde çıkarılan bor cevherlerinin büyük çoğunluğu, kullanılmadan önce zenginleştirme işlemlerine tabi tutulmaktadır. Tablo 2.9, bor bileşiklerinin sektörel bazda Dünya ve Türkiye'deki kullanım dağılımını göstermektedir (Kurt, 2019).

Tablo 2.9. Ticari olarak üretilen rafine bor ürünleri (İ. Sugözü, 2009)

Sektör	Dünya'da Kullanımı (%)	Türkiye'de Kullanımı (%)
Cam	48	40
Tarım	15	7
Seramik	15	34
Kimya	2	8
Diğer	20	11

Bor mineralleri ve türevleri dünya çapında birçok alanda kullanılmakta ve bu kullanım giderek artmaktadır. Endüstride ve günlük yaşamda sağladığı üstün özellikleri sayesinde borun önemi sürekli olarak artan bir ivmeyle yükselmektedir. Borun kullanım alanları, endüstriyel gelişmişlik düzeyi ve tercihlere göre farklılık göstermektedir. Örneğin, Avrupa’da bor tüketimi ağırlıklı olarak deterjan sanayisinde yoğunlaşırken, Kuzey ve Orta Amerika’da yalıtım cam yünü (fiberglas) üretiminde, Japonya’da ise genellikle tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kurt, 2019).

2.3.5. Bor ve bileşenlerinin fren balatasında kullanımı üzerine yapılan çalışmalar

Bor elementinin mühendislik alanında kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bunun temel nedeni bor ve türevlerinin kullanıldığı malzemelerde mekanik ve tribolojik özellikleri iyileştirerek performans iyileştirme potansiyeline sahip olmasıdır. Özellikle fren balatalarında, bor bileşenlerinin sürtünme özelliklerini optimize etme ve aşınma direncini artırma konusundaki katkıları dikkat çekmektedir. Borun ve bileşenlerinin fren balatası malzemelerinde kullanımına yönelik yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Akıncıoğlu vd. (2018), Renault Clio otomobilinin fren balatası üretiminde, bor oksit tozu katkısını incelemişlerdir. Sıcak presleme yöntemiyle üretilen bu balatalarda bor oksit tozunun tribolojik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bor oksit katkısının sürtünme katsayısını olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Akıncıoğlu vd. (2019), dünya rezervlerinin önemli bir kısmı ülkemizde bulunan bor oksit malzemesini, fren balatası üretiminde ağırlıkça %6 oranında katkı maddesi olarak kullanmış ve bu katkı ile üretilen fren balatasının performansını değerlendirmişlerdir. Bor oksit katkılı numune ile gerçekleştirilen performans testlerinin sonuçlarına dayanarak, borun fren balatalarında alternatif bir toz bileşen olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

B. Sugözü vd. (2018), kütlece %4, %8 ve %12 oranlarında boraks ve üleksit içeren üç farklı fren balata numunesi üretmiş ve bu numuneleri gri dökme demir disk ile donatılmış tam ölçekli bir fren balata test cihazında test etmişlerdir. Balata numunelerinin yoğunluk ölçümlerini Arşimet prensibine göre, sertlik ölçümlerini ise Rockwell sertlik cihazı kullanarak belirlemişlerdir. Test öncesi ve sonrası her numunenin ağırlıklarını belirleyerek, TS 555 standardına göre özgül aşınma oranlarını hesaplamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, %12 üleksit ve boraks içeren balata numunesinin sürtünme

katsayısını 0,35 olarak, %8 üleksit ve boraks içeren numunenin sürtünme katsayısını 0,31 olarak ve %4 üleksit ve boraks içeren numunenin sürtünme katsayısını ise 0,3 olarak elde etmişlerdir. Boraks ve üleksitin sürtünme materyalleri üzerindeki olumlu etkilerinin olduğunu ve bu maddelerin sürtünme malzemelerinde yeni bir düzenleyici işlevi görebileceğini ifade etmişlerdir.

Başar vd. (2018), kütlece %4, %8 ve %12 oranlarında kolemanit ve boraks içeren üç farklı fren balata numunesini sırasıyla toz karıştırma, ön şekillendirme ve sıcak presleme işlemlerini kapsayan geleneksel yöntemlerle üretmiş ve bu numunelerin sürtünme ve aşınma özelliklerini pin-on-disk tipi aşınma cihazı kullanarak test etmişlerdir. Ayrıca, numunelerin sertlik ve yoğunluk değerlerini de incelemişlerdir. Sürtünme katsayısı bakımından en iyi sonucun %4 kolemanit ve boraks takviyeli sürtünme malzemesi kullanılan balata numunesinden elde edildiğini belirtmişlerdir. Balatadaki kolemanit ve boraks bileşeni içeriğinin artmasıyla yoğunluk ve sertlik değerlerinin azaldığını ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Fren balatalarına rafine bor bileşeni ilavesinin mikroyapı, sertlik ve aşınma üzerindeki etkisinin araştırılması başlıklı bu tez çalışmasında, balata yapımında kullanılan standart malzemeler ticari olarak temin edilmiş ve bu malzemelere ilaveten rafine bor ürünler ETİMADEN şirketi tarafından kullanılmak üzere tarafımıza hibe edilmiştir. Fren balata malzemelerine ait görüntü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Fren balata malzemeleri

Ticari olarak temin edilen malzemeler; Novolak R-0105, bakır (Cu), alümina (Al_2O_3), grafit (c), pirinç, baryum sülfat ($BaSO_4$), zirkonyum silikat ($ZrSiO_4$), kalsiyum sülfat ($CaSO_4$) ve çinko sülfat ($ZnSO_4$) tır. Bu malzemelere ait bazı özellikler, temin edilen firmadan alınan verilere dayanarak Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Balata yapımında kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm³)	Boyut (μm)	Kullanım amacı
Novolak R-0105	1,2	50-100	Bağlayıcı
Bakır (Cu)	8,96	≤ 100	Sürtünme ayarlayıcı & takviye
Alümina (Al ₂ O ₃)	3,99	≤ 50	Takviye & sürtünme ayarlayıcı
Grafit (c)	2	≤ 50	Sürtünme ayarlayıcı
Pirinç	8,73	≤ 100	Takviye & sürtünme ayarlayıcı
Baryum sülfat (BaSO ₄)	4,5	≤ 20	Dolgu
Zirkonyum silikat (ZrSiO ₄)	4,56	≤ 40	Takviye & sürtünme ayarlayıcı & bağlayıcı
Kalsiyum sülfat (CaSO ₄)	2,32	≤ 30	Dolgu
Çinko sülfat (ZnSO ₄)	3,54	≤ 30	Dolgu

ETİMADEN tarafından hibe edilen ve balata üretiminde kullanılan ürünler toz borik asit ve boraks dekahidratır.

Toz borik asit ve boraks dekahidratın balata üretiminde tercih edilmelerinin nedenleri arasında ülkemizde bol miktarda bulunması, ülke ekonomisine büyük katkı sağlaması ve çeşitli endüstrilerdeki geniş uygulama alanlarında göstermiş olduğu üstün özellikler yer almaktadır. Borik asidin kimyasal ve fiziksel özelliklerine ait bazı temel bilgiler sırasıyla Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te, boraks dekahidratın kimyasal ve fiziksel özelliklerine ait bazı temel bilgiler ise sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Toz borik asidin kimyasal özellikleri (ETİMADEN, 2024)

Bileşen	İçerik
Bor oksit (B ₂ O ₃)	%56,25-56,80
Borik asit (H ₃ BO ₃) denk gelen miktarı	%99,92-100,89
Sülfat (SO ₄)	Maks. 300 ppm
Klor (Cl)	Maks. 5 ppm
Demir (Fe)	Maks. 4 ppm

Tablo 3.3. Toz borik asidin fiziksel özellikleri (ETİMADEN, 2024)

Özellik	Değer
Yoğunluk	1,51 g/cm ³
Erime noktası	450 °C
Kaynama noktası	1860 °C
Isı kapasitesi	24,7 J/g°C
Isıl iletkenlik	0,407 W/mK
Özgül yüzey alanı	<1 m ² /g
Difüzyon katsayısı	1,1×10 ⁻⁵ cm ² /s
Yüzey gerilimi	63,83 mN/m
Partikül boyutu	İçerik
+1.000 mm	Maks. %0,00
-0,125 mm	Min. %45,00

Tablo 3.4. Toz boraks dekahidratın kimyasal özellikleri (ETİMADEN, 2024)

<i>Bileşen</i>	<i>İçerik</i>
Bor oksit (B_2O_3)	%36,47-38,50
Disodyum Tetraborat Dekahidrata ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) denk gelen miktarı	%99,90-105,45
Sodyum oksit (Na_2O)	%16,24-17,14
Sülfat (SO_4)	Maks. 200 ppm
Klor (Cl)	Maks. 70 ppm
Demir (Fe)	Maks. 15 ppm

Tablo 3.5. Toz boraks dekahidratın fiziksel özellikleri (ETİMADEN, 2024)

<i>Özellik</i>	<i>Değer</i>
Yoğunluk	1,73 g/cm ³
Erime noktası	741 °C
Kaynama noktası	1575 °C
Isı kapasitesi	4,0 J/g°C
Isıl iletkenlik	0,740 W/mK
Özgül yüzey alanı	13,55 m ² /g
Difüzyon katsayısı	67,19×10 ⁻⁵ cm ² /s
Yüzey gerilimi	67,19 mN/m
<i>Partikül boyutu</i>	<i>İçerik</i>
+1.180 mm	Maks. %0,00
-0,063 mm	Min. %30,00

3.2. Rafine Bor Bileşeni İlavesi Prosedürü

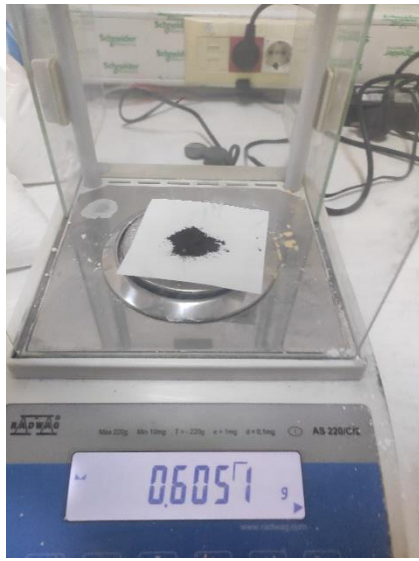
Rafine bor ürünleri, çeşitli endüstriyel uygulamalarda katkı maddesi olarak kullanıldığından dolayı bu çalışmada balata üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılan baryum sülfat ($BaSO_4$) belirli ağırlık oranlarda azaltılmıştır. Bunun yerine, sırasıyla borik asit ve boraks dekahidrat tozu eklenerek balata bileşen karışımları hazırlanmıştır. Tablo 3.6’da hazırlanan balata bileşenleri ve oranları verilmiştir.

Tablo 3.6. Balata toz bileşenleri ve oranları

<i>Numune No</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
Novolak reçine (%)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Bakır (%)	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Alümina (%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Grafit (%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Pirinç (%)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Zirkonyum silikat (%)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Kalsiyum sülfat (%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Çinko sülfat (%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Baryum sülfat (%)	40	38,75	37,5	35	30	20	38,75	37,5	35	30	20
Borik asit (%)	-	1,25	2,5	5	10	20	-	-	-	-	-
Boraks dekahidrat (%)	-	-	-	-	-	-	1,25	2,5	5	10	20
TOPLAM (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

3.3. Numune Üretim Süreci

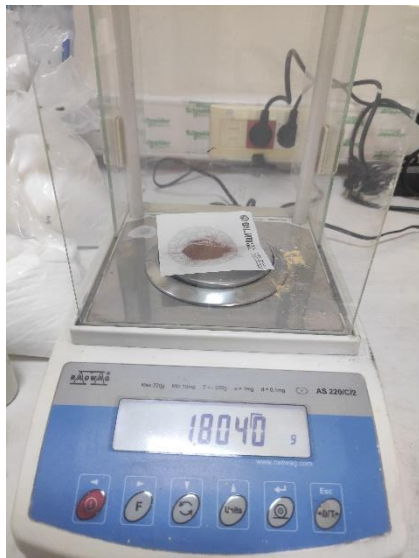
Her bir numuneden üç adet olmak üzere toplamda 33 adet balata numunesi üretmek amacıyla, 12 gramlık karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlarda; novolak reçine, bakır, alümina, grafit, pirinç, zirkonyum silikat, kalsiyum sülfat ve çinko sülfat oranları sabit tutulmuştur. Baryum sülfat oranı ise Tablo 3.6’da verilen ağırlık oranlarda azaltılarak, yerine borik asit ve boraks dekahidrat tozları eklenmiştir. Tozlar, 0,1 mg hassasiyetle ölçüm yapabilen RADWAG marka AS 220/C/2 model hassas terazi ile tartılmıştır. Bu işlemler sırasında çekilen bazı fotoğraflar Şekil 3.2’de verilmiştir.



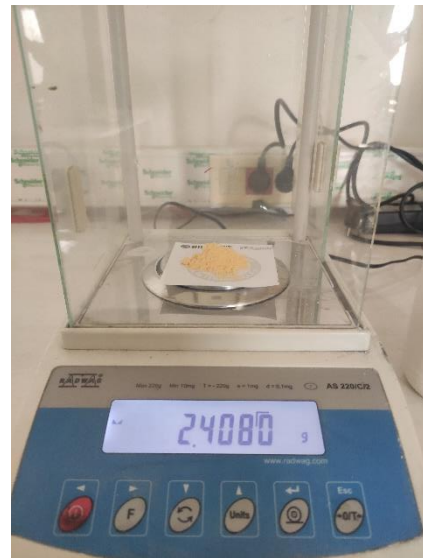
a) Grafit tozu



b) Pirinç tozu



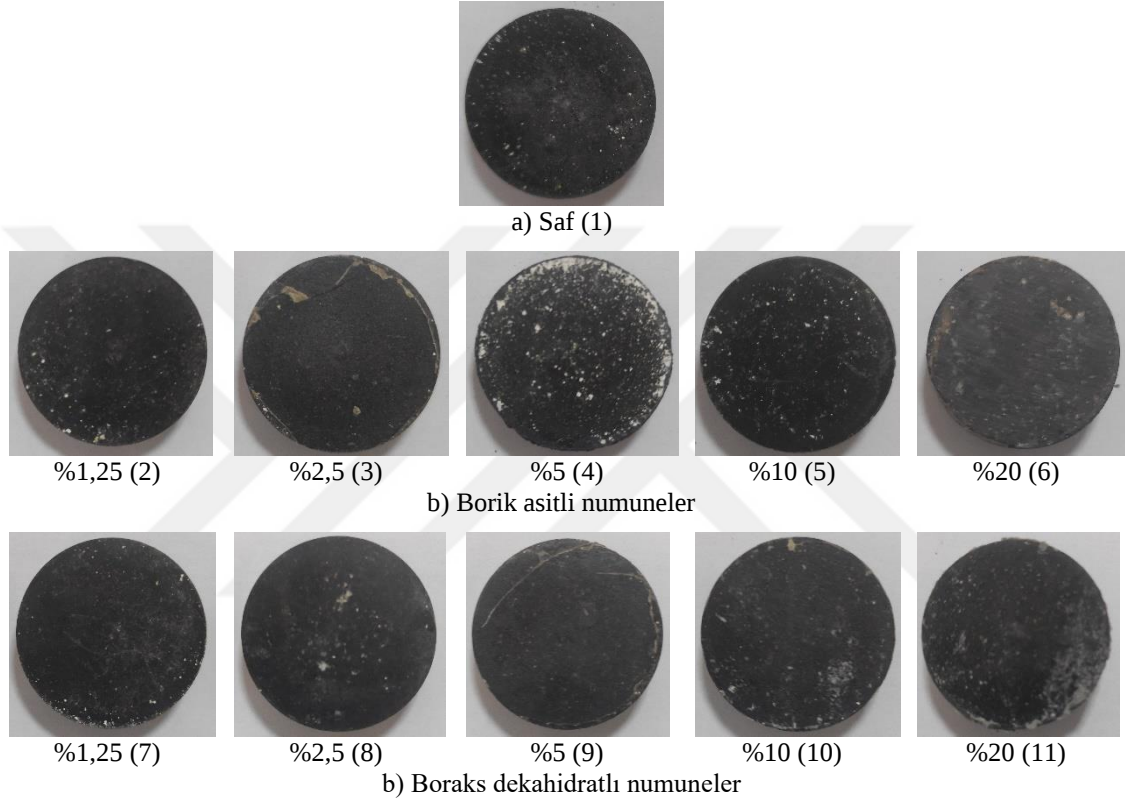
c) Bakır tozu



d) Reçine tozu

Şekil 3.2. Balata tozlarının tartım işlemleri

Tozların tartımı tamamlandıktan sonra, homojen bir karışım elde edilene kadar mekanik karıştırıcı kullanılarak karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemi sonrasında, bağlayıcı reçinenin erime sıcaklığı, kalıplama cihazının basıncı ve ön deney parametreleri dikkate alınarak, numuneler 30 mm çapındaki kalıpta 10 MPa basınç ve 140 °C sıcaklık altında 30 saniye süre boyunca preslenerek nihai ürün haline getirilmiştir. Nihai ürün haline getirilen numuneler Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Nihai ürün haline getirilen numuneler

3.4. Mikroyapı Analizi

Nihai ürün haline getirilen balata numunelerindeki bileşenlerin birbirine nasıl yapıştığı ve bileşenler arasında porozite oluşumunun nasıl olduğunu tespit edebilmek için üretilen tüm numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri Leica DM 2500 P optik mikroskop ve Leica DFC450 C dijital kamera kullanılarak 10X büyütme seviyesinde yapılmıştır. Elde edilen mikroyapı görüntülerine bağlı olarak analizler gerçekleştirilmiştir.

3.5. Yoğunluk Tespiti

Numunelerin yoğunlukları teorik ve yığinsal olmak üzere iki şekilde hesaplanmıştır. Teorik ve yığinsal yoğunluklar sırasıyla denklem 3.1 ve denklem 3.2’de verilen eşitliklerle hesaplanmıştır.

$$\rho_{teorik} = \sum_{i=1}^n (w_i \times \rho_i) / 100 \quad (3.1)$$

$$\rho_{yığinsal} = m/V \quad (3.2)$$

Burada;

ρ_{teorik} : teorik yoğunluk (g/cm³),

n : toplam bileşen sayısı,

ρ_i : i bileşeninin yoğunluğu (g/cm³),

w_i : i bileşeninin kütlece ağırlık oranı,

$\rho_{yığinsal}$: yığinsal Yoğunluk (g/cm³),

m : kütle (g),

V : hacimdir (cm³).

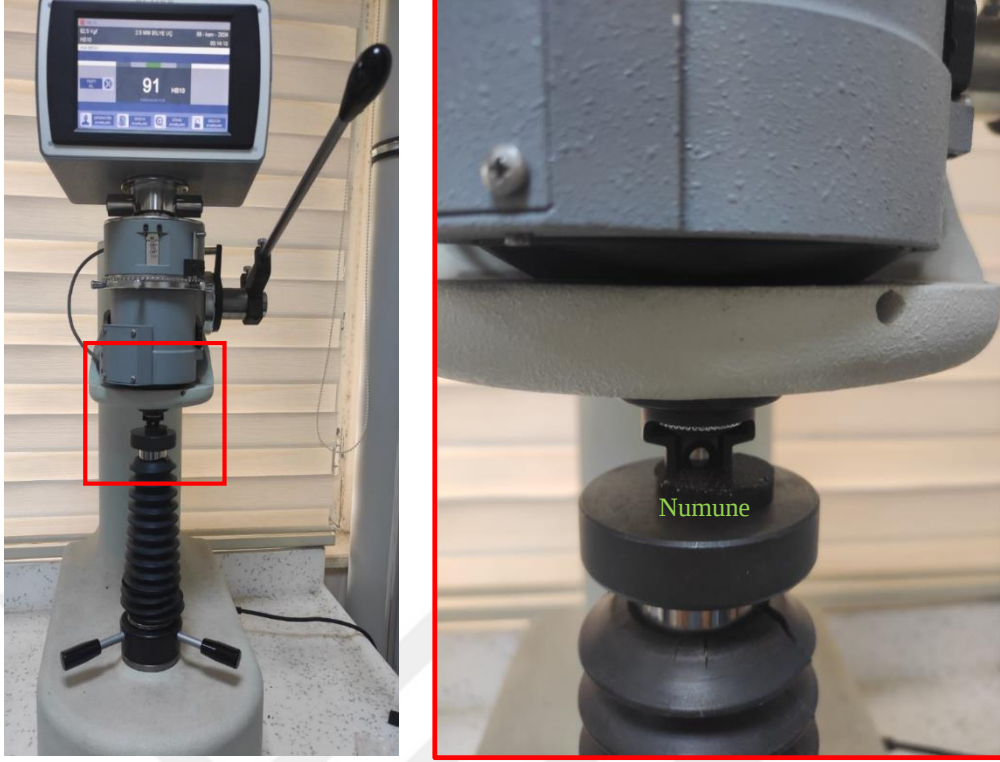
Yığinsal yoğunluk değerlerinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, aynı içerikli üç numune üzerinde yapılan ölçümlerden elde edilen yoğunluk değerlerinin ortalaması alınmış ve bu şekilde ortalama yığinsal yoğunluk değeri tespit edilmiştir.

Ayrıca gerçek ve yığinsal yoğunluk değerlerine bağlı olarak denklem 3.3’te verilen eşitlik kullanılarak balata numunelerindeki porozite miktarı hesaplanmıştır (Ünaldı ve Kuş, 2018).

$$\% \text{ Porozite} = [1 - (\rho_{yığinsal} / \rho_{teorik})] \times 100 \quad (3.3)$$

3.6. Sertlik Ölçüm Yöntemi

Numunelerin sertlik ölçümleri, Ernst model Brinell sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, HB₁₀ skalasında yapılmıştır. Numunelere 2,5 mm çapındaki bilye ile 10 saniye süreyle 62,5 kgf ön yük uygulanmış ve ardından tam yükleme yapılarak sertlik değerleri tespit edilmiştir. Her numune için beş ayrı sertlik ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Sertlik deneyin yapıldığı ve rafine bor ürünü kullanılmayan numuneye (Numune No: 1) ait görüntü Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. Ernst model Brinell sertlik cihazı ile yapılan sertlik testi

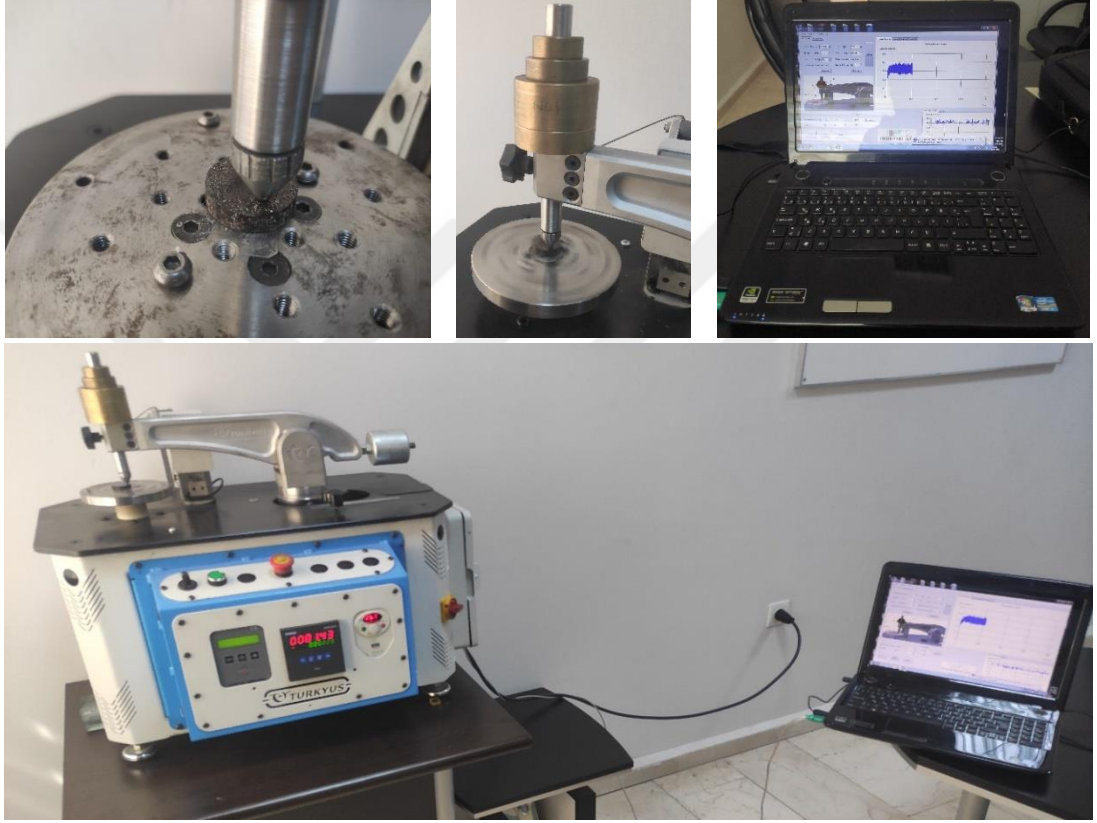
3.7. Aşınma Test Prosedürleri

Balata numunelerinin aşınma testleri, TURKYUS marka pin-on-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Testlere başlamadan önce, saf balata numunesi üzerinde ön deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu balata numunesi; 100 mm/s dönme hızı, 10 N, 15 N, 18 N yük ve 100 m, 200 m ve 400 m kayma mesafesinde aşınma testlerine tabi tutulmuştur. 18 N altındaki yüklerde ve 400 m altındaki kayma mesafelerinde belirgin bir aşınma olmadığı için deneyler 18 N yükte ve 400 m, 800 m ve 1200 m kayma mesafelerinde gerçekleştirilmiştir.

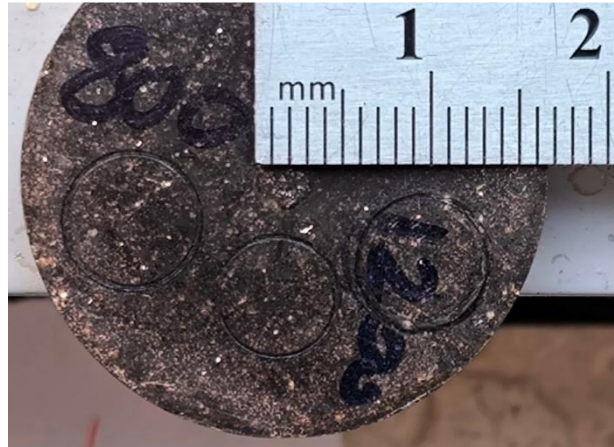
Aşınma deneylerinde, öncelikle balata numunesi dönen disk üzerine sabitlenmiş ve 18 N yük altında, 6 mm çapındaki 100Cr6 alaşımlı çelik bilyenin balata numunesine teması sağlanmıştır. Dönme hızı 100 mm/s olarak ayarlanmış temas yüzeyinin 400 m, 800 m ve 1200 m kayma mesafelerindeki sürünme katsayıları ile aşınma oranları belirlenmiştir. Aşınma deney düzeneklerine ait fotoğraf, Şekil 3.5'te verilmiştir.

Sürtünme katsayısı, aşınma deneyleri sırasında bilgisayara anlık olarak kaydedilmiştir. Anlık kaydedilen sürtünme katsayısının ortalaması alınarak ortalama

sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Numunelerin aşınmaları, hacim bazında ASTM G99 standardına göre hesaplanmıştır. Aşınma bölgesinden mikroskop yardımıyla aşınma iz genişliği belirlenmiş olup, daha sonra bu iz genişlikleri ASTM G99 standardında verilen denkleme yazılarak aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Ayrıca elde edilen değerler kayma mesafesi ve yükün çarpımına bölünerek mm^3/Nm cinsinden spesifik aşınma oranları da hesaplanmıştır. Aşınmış numuneye ait bir görüntü Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.5. Aşınma deney düzeneği



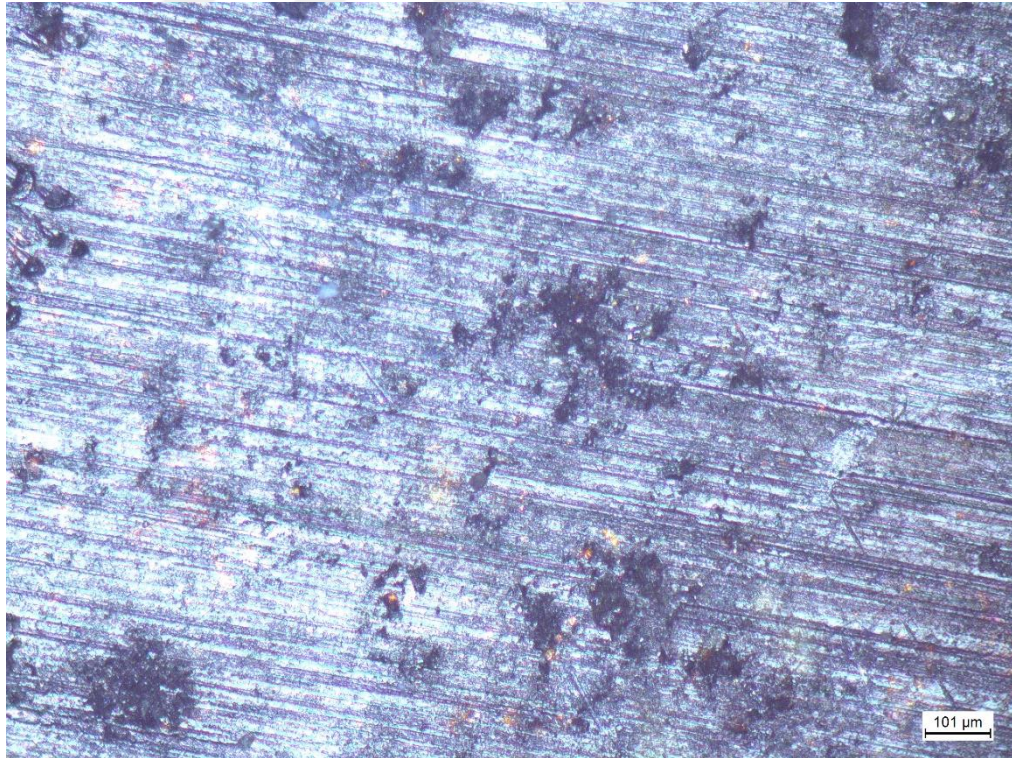
Şekil 3.6. Aşınmış numuneye ait görüntü

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

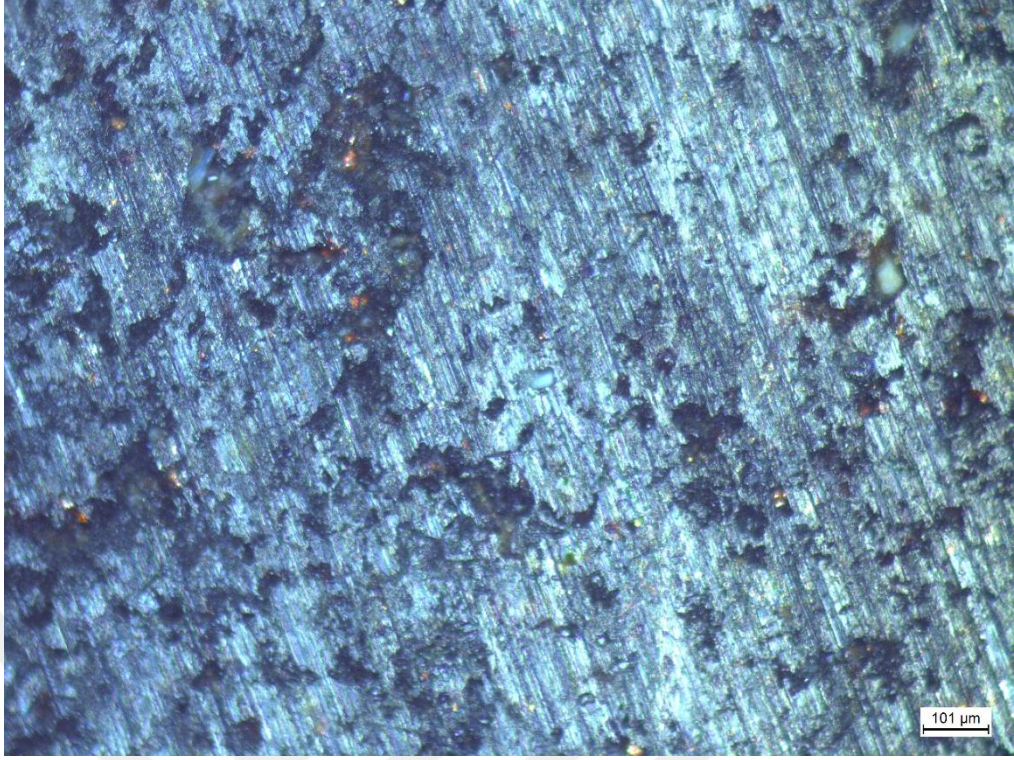
Bu bölümde, rafine bor bileşeninin fren balata numunelerinin mikroyapısı, yoğunluğu, sertliği ve aşınma özellikleri üzerindeki etkileri alt başlıklar halinde detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen veriler, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış ve bor bileşeninin malzeme performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

4.1. Mikroyapı Sonuçları ve Yorumları

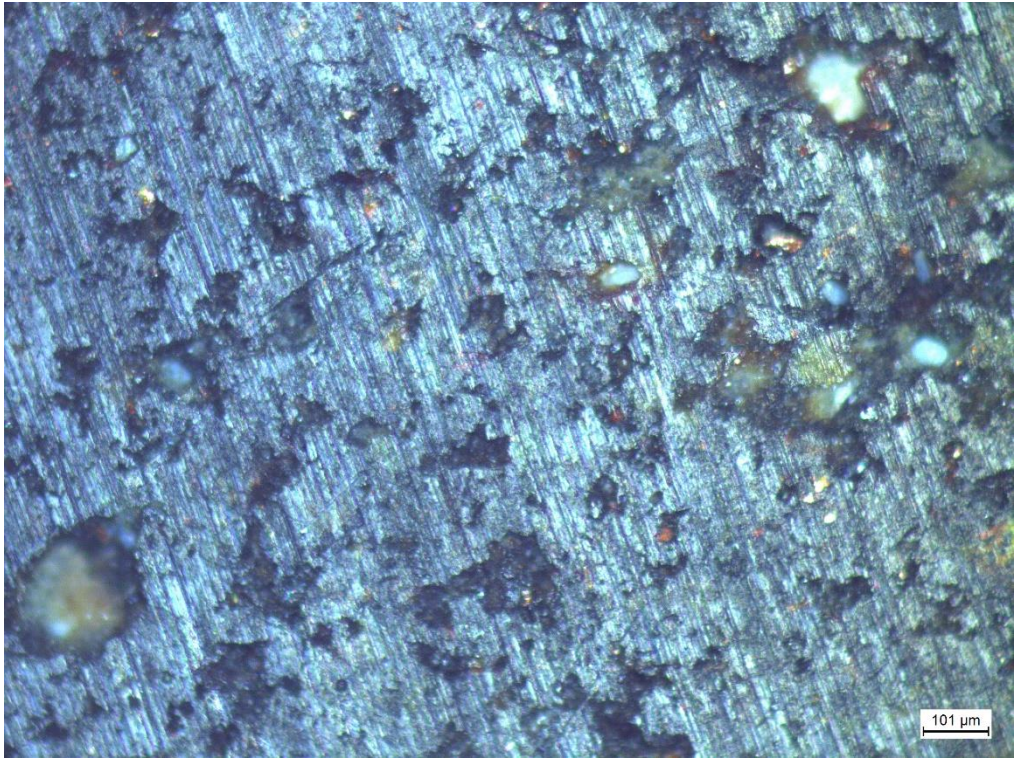
Fren balata numunelerine rafine bor bileşeni ilavesinin mikroyapı üzerindeki etkileri, optik mikroskopla incelenmiştir. Şekil 3.7’de rafine bor ürünü kullanılmayan balata numunesinin, Şekil 3.8–3.12’de farklı oranlarda borik asit kullanılan balata numunelerinin ve Şekil 3.13–3.17’de ise farklı oranlarda boraks dekahidrat kullanılan balata numunelerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



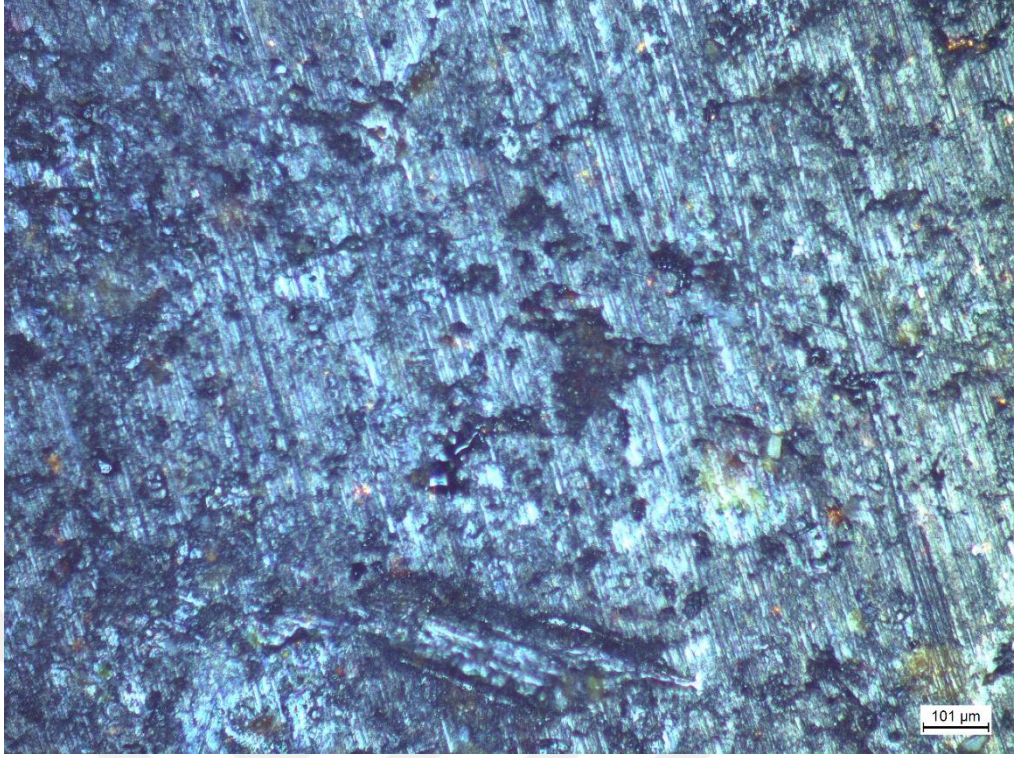
Şekil 3.7. Rafine bor ürünü kullanılmayan numunenin mikroyapısı



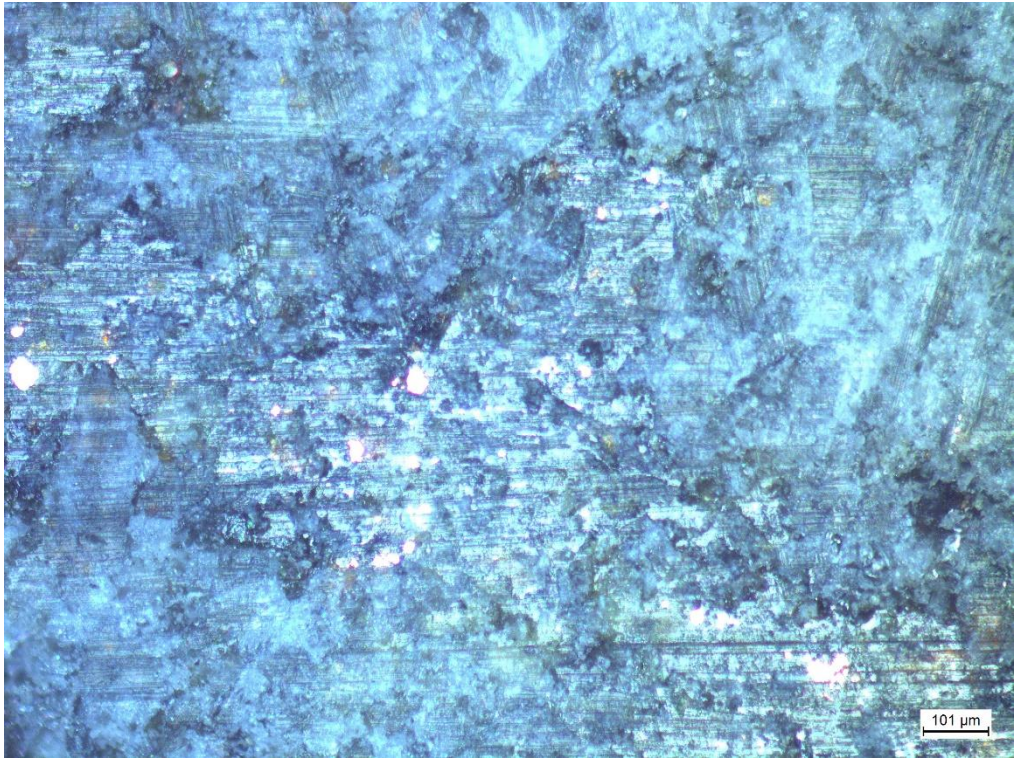
Şekil 3.8. %1,25 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı



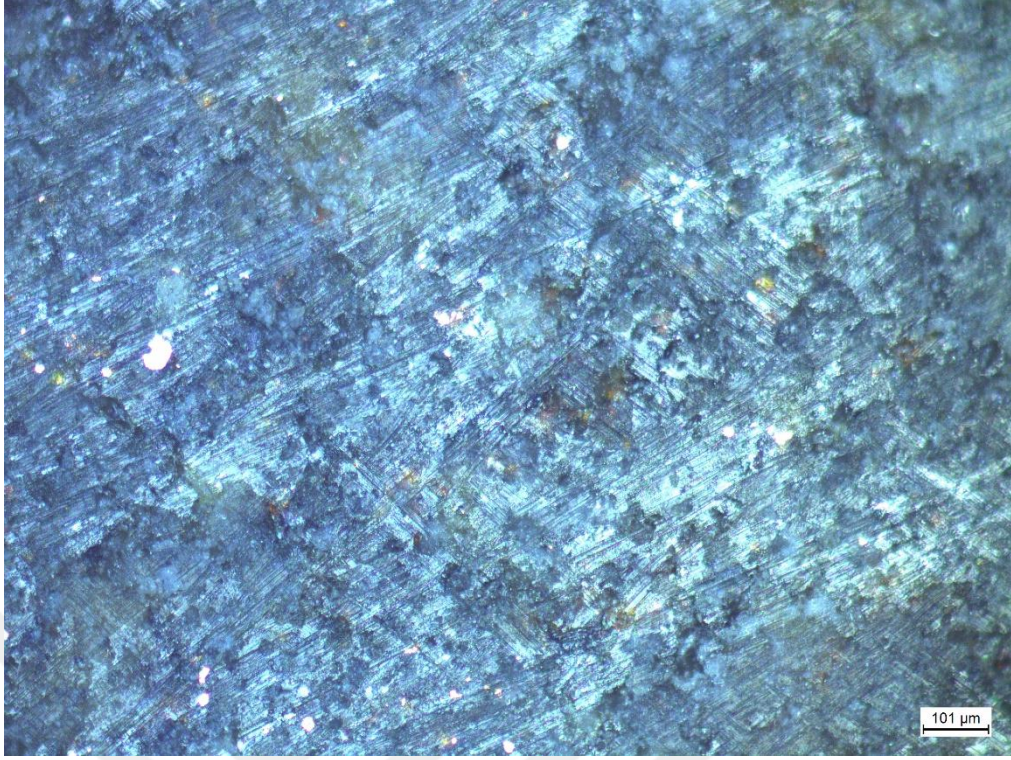
Şekil 3.9. %2,5 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı



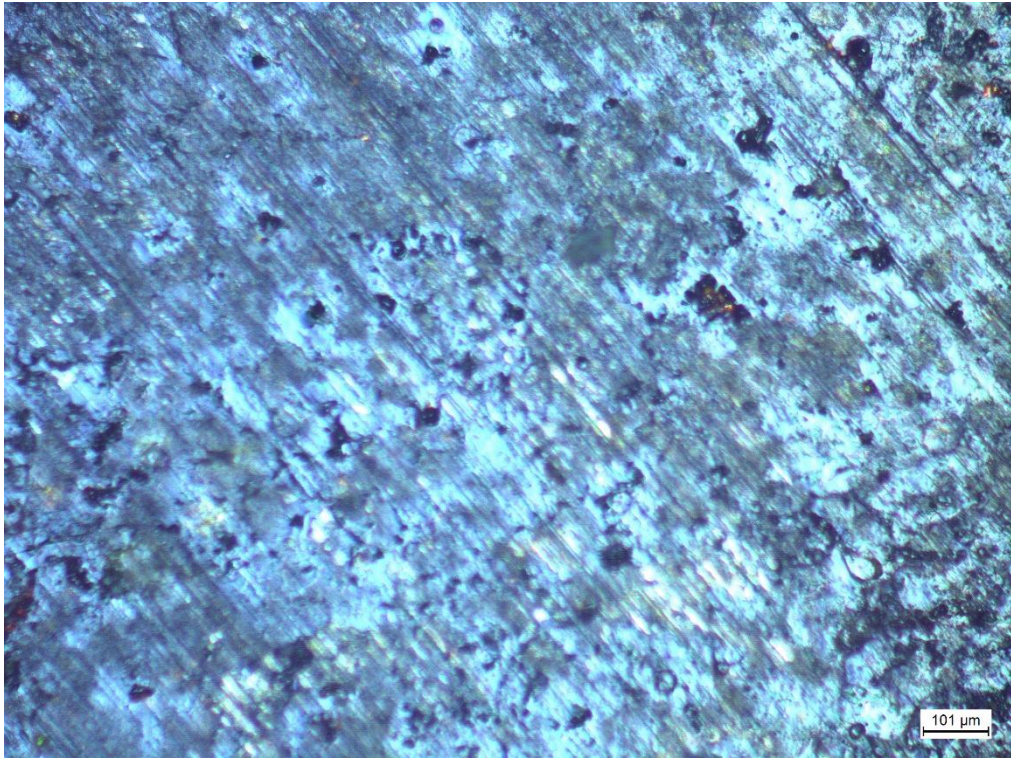
Şekil 3.10. %5 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı



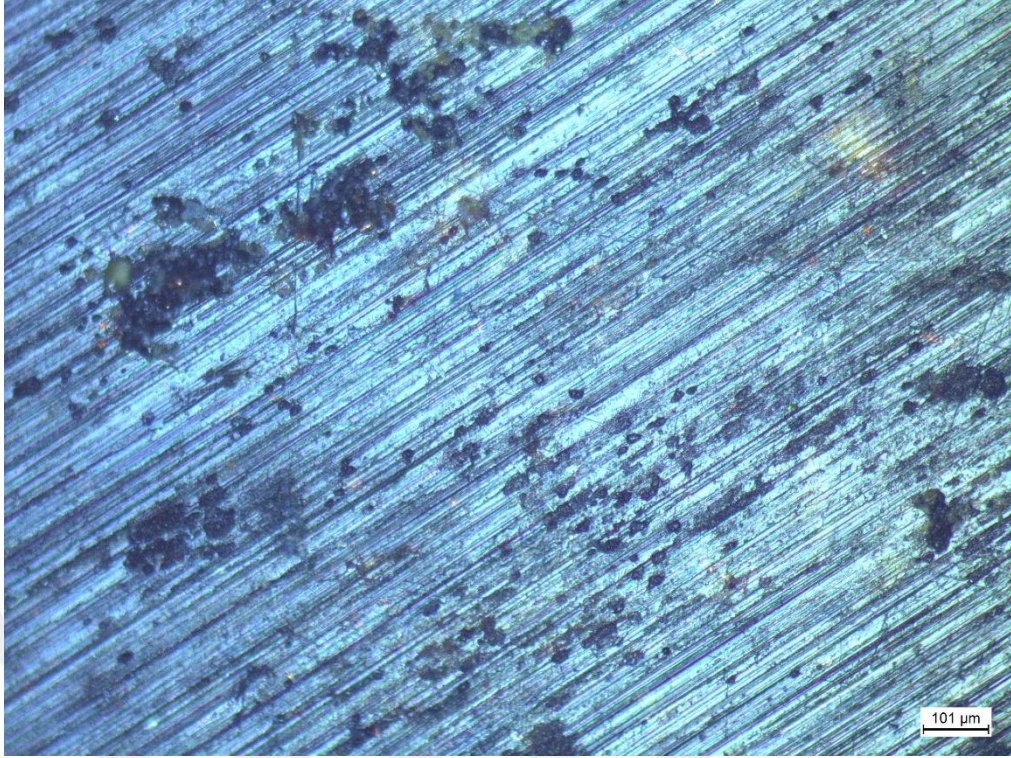
Şekil 3.11. %10 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı



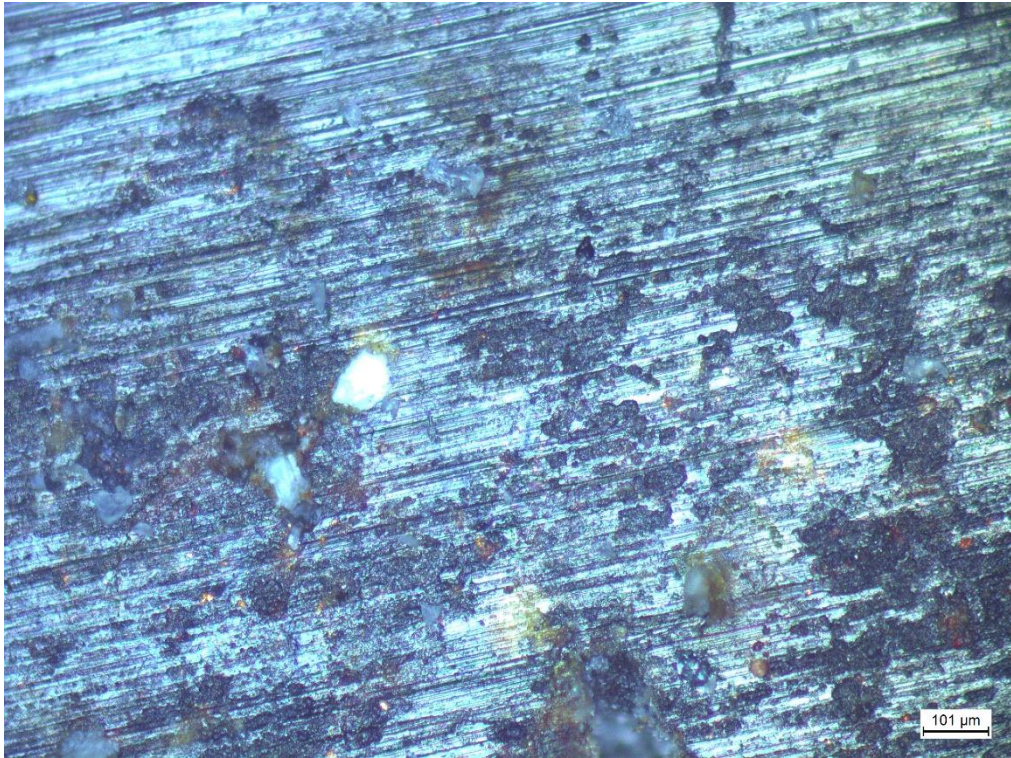
Şekil 3.12. %20 borik asit kullanılan numunenin mikroyapısı



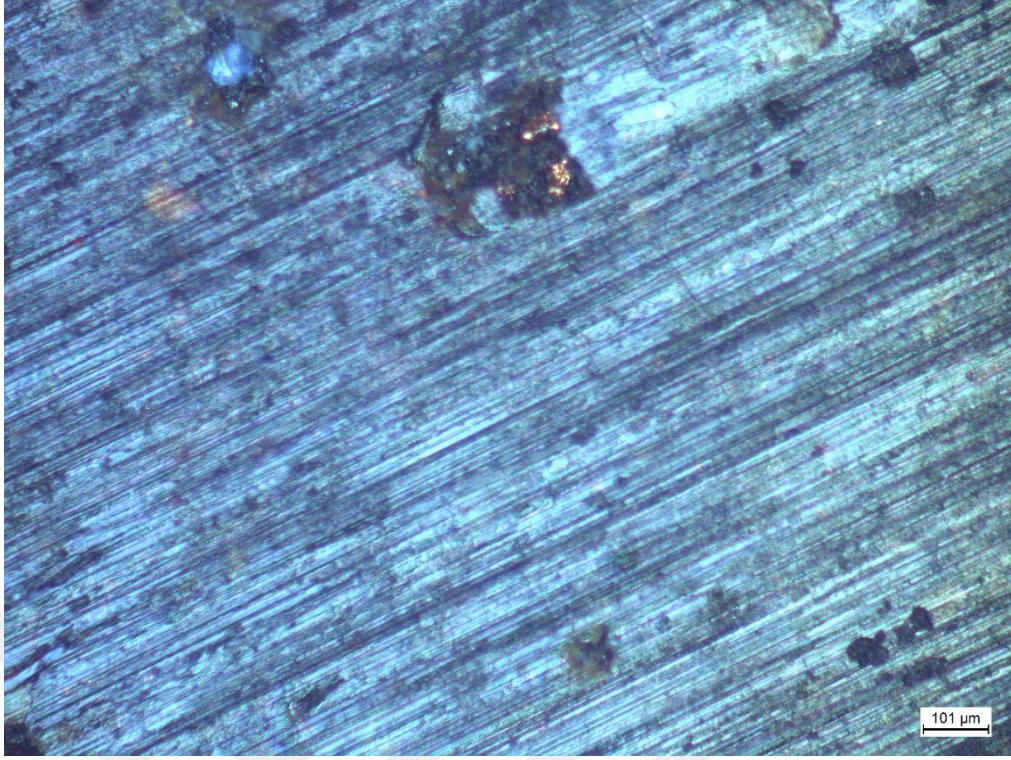
Şekil 3.13. %1,25 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı



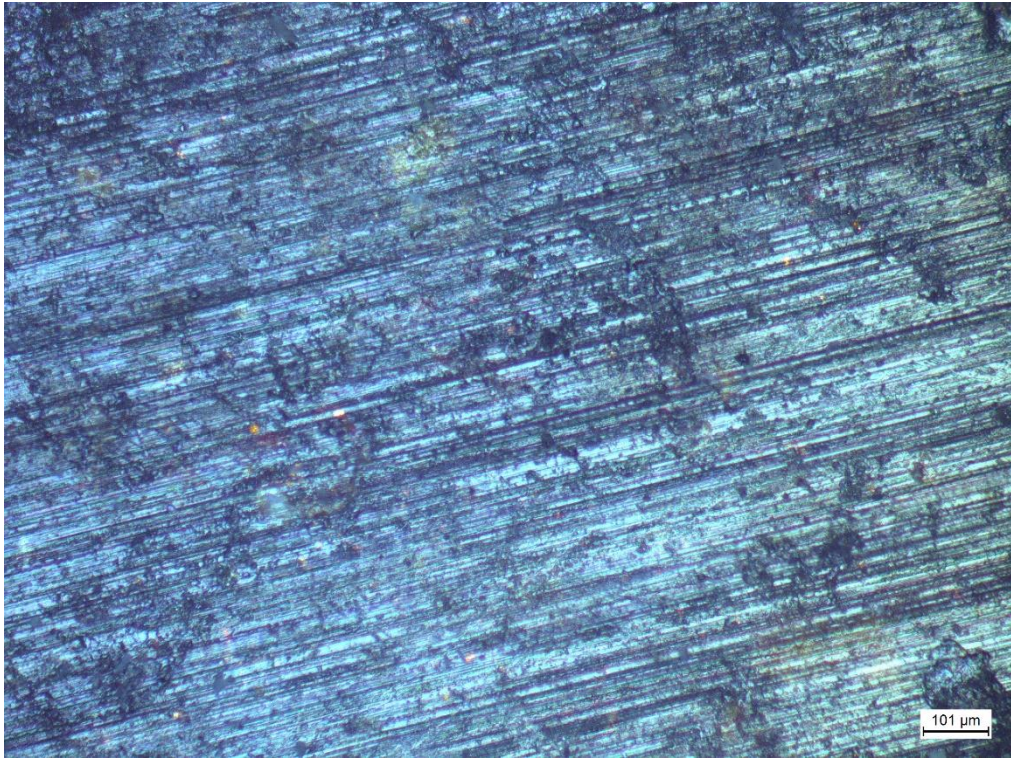
Şekil 3.14. %2,5 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı



Şekil 3.15. %5 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı



Şekil 3.16. %10 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı



Şekil 3.17. %20 boraks dekahidrat kullanılan numunenin mikroyapısı

Şekil 3.7–3.17’de yer alan mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, fren balata numunelerini oluşturan bileşenlerin novolak reçinesi aracılığıyla birbirine iyi bir şekilde bağlandığı, ancak yapıda belirgin bir gözenekli yapı varlığının da bulunduğu görülmektedir. Hem borik asit hem de boraks dekahidrat oranındaki artış ile balata numunelerindeki gözeneklilik belirgin bir şekilde artmıştır. Bu durum, balata numunelerinde kullanılan rafine bor bileşenlerinin boyutuyla ve numune üretimi sırasında uygulanan kalıplama basıncının kısmen düşük olması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ancak, üretim sırasında kalıplama basıncının artırılmasının gözenek oranını azaltabileceği öngörülmektedir.

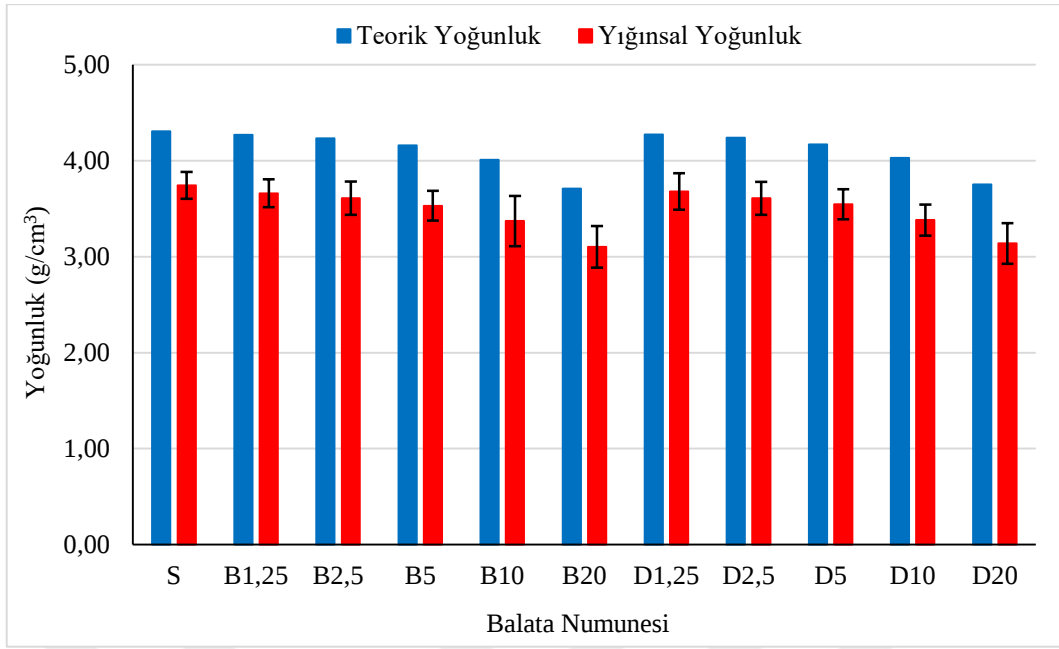
Gözenek, genellikle malzemenin hafifliğini sağlarken aynı zamanda frenleme performansını etkileyen bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Fren malzemelerinde, genellikle %5 ile %10 arasında veya daha yüksek oranda gözenek (porozite) bulunması beklenmektedir (Blau, 2001). Çünkü porozite, frenleme sırasında ısının daha verimli bir şekilde dağılmasına katkı sağladığı belirtilmiştir (Saindane vd., 2021).

4.2. Yoğunluk Sonuçları

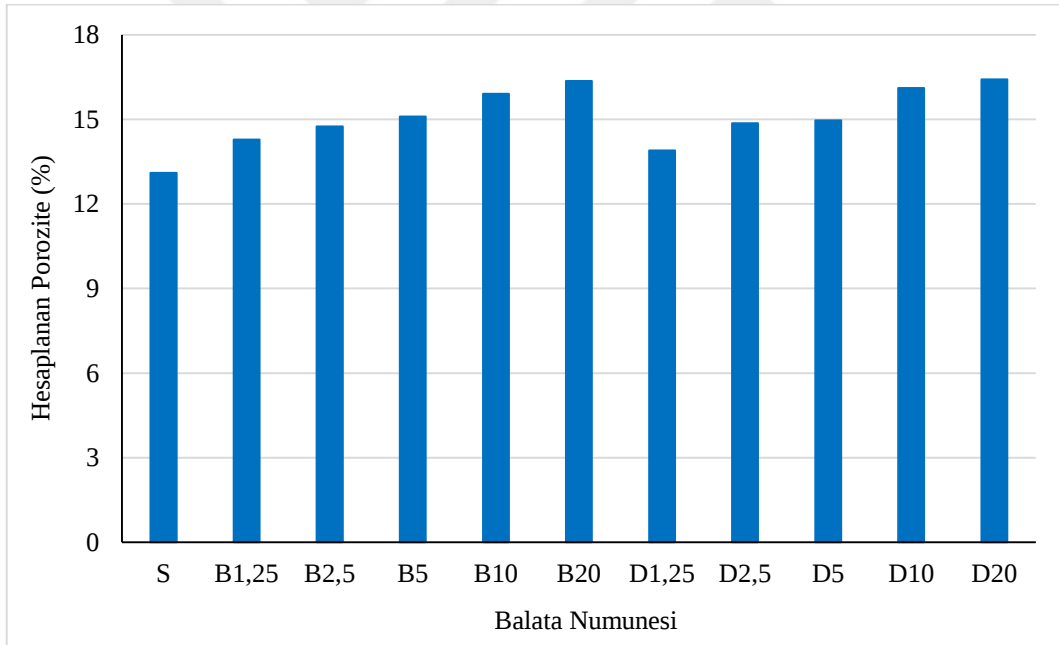
Fren balata numunelerine rafine bor bileşeni ilavesinin yoğunluk ve porozite üzerindeki etkileri hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 3.7’de verilmiştir. Ayrıca yoğunluk değerleri Şekil 3.18’de, porozite oranları ise Şekil 3.19’da grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.7. Üretilen balata numunelerinin yoğunluk ve porozite değerleri

Numune No	Rafine Bor Bileşeni	Takviye Oranı (%)	Kısaltma	Yığınsal Yoğunluk (g/cm ³)		Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Porozite (%)
				Ort.	Std. Sapma		
1	- (Saf)	0	S	3,74	0,140	4,31	13,11
2	Borik Asit	1,25	B1,25	3,66	0,145	4,27	14,29
3		2,5	B2,5	3,61	0,174	4,23	14,75
4		5	B5	3,53	0,154	4,16	15,10
5		10	B10	3,37	0,262	4,01	15,91
6		20	B20	3,10	0,218	3,71	16,37
7	Boraks Dekahidrat	1,25	D1,25	3,68	0,189	4,27	13,90
8		2,5	D2,5	3,61	0,171	4,24	14,87
9		5	D5	3,55	0,157	4,17	14,96
10		10	D10	3,38	0,162	4,03	16,12
11		20	D20	3,14	0,213	3,75	16,42



Şekil 3.18. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak yoğunluk değişim grafiği



Şekil 3.19. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak hesaplanan porozite oranı değişimi

Tablo 3.7 ve Şekil 3.18’de görüldüğü gibi saf balata numunesi ile karşılaştırıldığında, her iki rafine bor bileşeni ilavesi, teorik olarak hesaplanan balata numunelerinin yoğunluklarında azalmaya neden olmuştur. Bu durum, kompozit yapıda baryum sülfat oranının azaltılarak yerine eklenen bor bileşenlerinin yoğunluklarının baryum sülfattan daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden rafine bor ürünlerinden hem borik asit hem de borak dekahidratın yapıda daha fazla oranda

kullanılması, teorik yoğunluktaki azalmayı daha belirgin hale getirmiştir. Saf balata numunesinin teorik yoğunluğu $4,31 \text{ g/cm}^3$ iken %20 borik asit kullanılan numunenin teorik yoğunluğu $3,71 \text{ g/cm}^3$ ve %20 boraks dekahidrat içeren numunenin teorik yoğunluğu ise $3,75 \text{ g/cm}^3$ hesaplanmıştır. Yığmsal yoğunluk değerleri de teorik yoğunluk değerleri ile benzer bir eğilim göstermiştir. Saf balata numunesinin yığmsal yoğunluğu $3,74 \text{ g/cm}^3$ olarak elde edilmiştir. %1,25 takviyeli borik asit ile hazırlanan B1,25 numunesinde $3,66 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülen yığmsal yoğunluk, %20 takviyeli borik asit ile hazırlanan B20 numunesinde $3,10 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar düşmüştür. Benzer şekilde, %1,25 takviyeli boraks dekahidrat ile hazırlanan D1,25 numunesinde $3,68 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülen yığmsal yoğunluk, %20 takviyeli boraks dekahidrat ile hazırlanan D20 numunesinde $3,14 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar gerilemiştir. B. Sugözü vd. (2018) üleksit ve boraks içeren fren sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleri başlıklı çalışmalarında, artan boraks ve üleksit bor minarellerinin fren sürtünme malzemelerinin yoğunluğunda azalmaya neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Şekil 3.18'de yığmsal yoğunluk değerlerinin teorik olarak hesaplanan yoğunluk değerlerinden daha düşük elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu durum yapının gözenekli veya poroziteye sahip olduğunu göstermektedir. Yığmsal ve teorik yoğunluk arasındaki farkın artmasıyla porozite oranlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Saf numunede porozite oranı %13,11 olarak hesaplanırken, bu oran borik asit ile takviye edilen numunelerde %16,37'ye, boraks dekahidrat içeren numunelerde ise %16,42'ye ulaşmıştır.

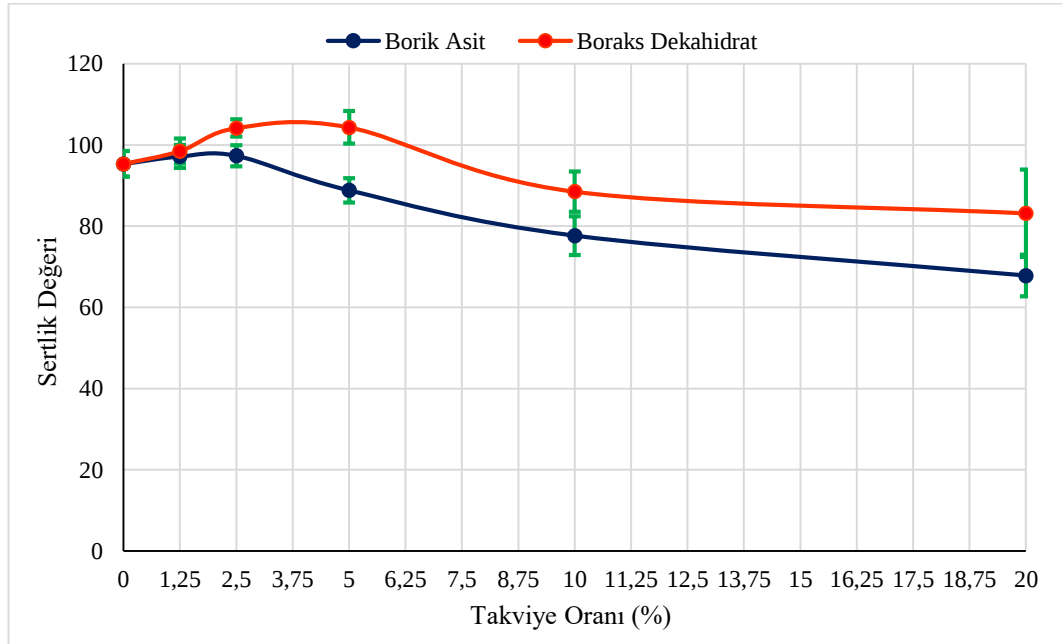
Faga vd. (2019), bir malzemenin yüksek yoğunluğa sahip olmasının düşük poroziteye sahip olması anlamına geldiğini ve bu durumun arayüzde daha stabil ve homojen bir tribolayer (sürtünme filmi) oluşumuna olanak tanıdığını belirtmiştir (Faga vd., 2019). Öte yandan, fren malzemelerinde ısının verimli bir şekilde dağıtılması ve ses veya titreşim gibi özelliklerin iyileştirilmesi için %5 ile %10 arasında veya daha yüksek oranda porozite bulunması gerektiği belirtilmiştir (Blau, 2001; Saindane vd., 2021). Yoğunluk değerlerinin fren balatasını oluşturan elementlerin yoğunluğu ve bu elementlerin yapı içerisindeki oranlarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği göz önünde bulundurulduğunda, yapıdaki porozitenin önemli bir parametre olduğu söylenebilir. Bu bilimsel çerçevede doğrultusunda, rafine bor bileşenli balata numunelerinde özellikle yüksek oranda rafine bor bileşeni kullanılan numunelerde elde edilen porozitenin kısmen yüksek olduğu söylenebilir.

4.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Fren balata numunelerine rafine bor bileşeni ilavesinin sertlik üzerindeki etkisini daha iyi analiz edebilmek için toplam sekiz adet Brinell sertlik ölçümü alınmış olup, bu sertlik değerlerinin ortalaması alınarak ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Belirlenen ortalama sertlik ve standart sapma değerleri Tablo 3.8’de, grafiksel gösterimi ise Şekil 3.20’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Üretilen balata numunelerinin ortalama sertlik ve standart sapma değerleri

Numune No	Rafine Bor Bileşeni	Takviye Oranı (%)	Kısaltma	Sertlik Değerleri	
				Ort.	Std. Sapma
1	- (Saf)	0	S	95,33	3,14
2	Borik Asit	1,25	B1,25	97,17	2,86
3		2,5	B2,5	97,33	2,58
4		5	B5	88,83	2,99
5		10	B10	77,67	4,76
6		20	B20	67,83	5,12
7	Boraks Dekahidrat	1,25	D1,25	98,50	3,08
8		2,5	D2,5	104,17	2,14
9		5	D5	104,33	4,03
10		10	D10	88,50	4,97
11		20	D20	83,17	10,78



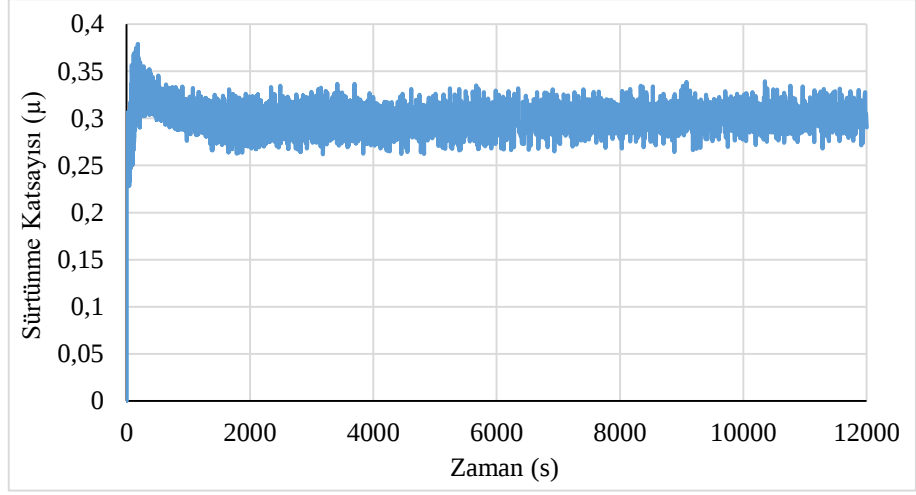
Şekil 3.20. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak sertlik değişim grafiği

Saf numune, 95,33 ortalama Brinell sertlik değeri ve 3,14 standart sapma ile referans olarak kabul edildiğinde; balata numunesinde düşük oranlarda (%1,25 ve %2,5) kullanılan borik asit takviyesi, Brinell sertlik değerlerini artırarak sırasıyla 97,17 ve 97,33'e yükseltmiştir. Ancak daha yüksek oranlarda (%5, %10 ve %20) kullanılan borik asit takviyesi sertlikte kademeli bir azalma göstermiş ve sertliği 88,83'ten 67,83'e kadar düşürmüştür. Boraks dekahidrat takviyesi ise %2,5 ve %5 oranlarında sertlik değerini anlamlı derecede artırarak 104,17 ve 104,33'e ulaştırmış, ancak %10 ve %20 oranlarında bu artış azalmış ve sertlik değeri 83,17'ye kadar düşmüştür. Öte yandan, tüm ölçüm sonuçlarından elde edilen standart sapma değerlerinin düşük olması, ölçümlerin güvenilirliğini desteklemektedir. Elde ettiğimiz sonuçlara benzer şekilde B. Sugözü vd. (2018) minimum %8 ve maksimum %24 oranlarında üleksit ve boraks içeren fren sürtünme malzemelerinde artan bor minarellerinin fren sürtünme malzemelerinin Rockwell sertliğini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ancak yaptığımız bu çalışmada, daha düşük oranlarda da rafine bor ürünleri kullanıldığından dolayı düşük oranlarda kullanılan bor ürünlerinin kısmen sertliği artırdığı görülmüştür.

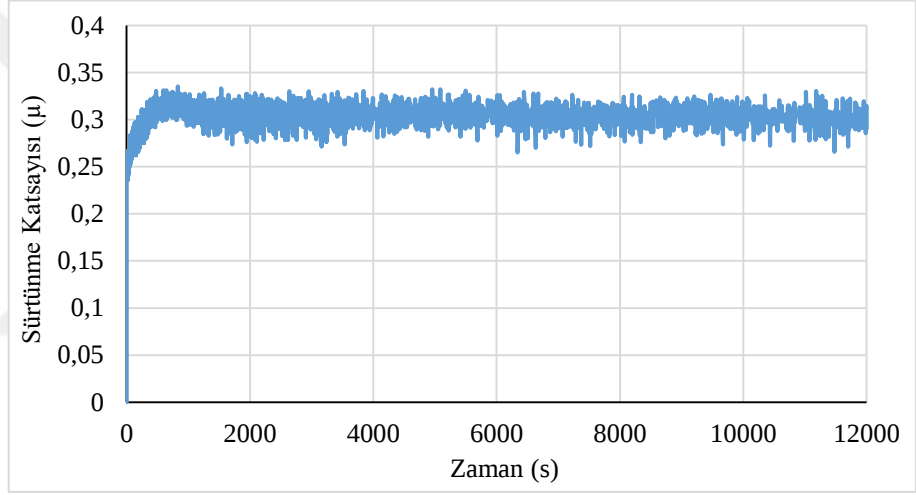
Porozite ve sertlik arasında genel olarak ters bir ilişki vardır. Porozite arttıkça sertlik azalma eğilimi sergilemektedir; bu durum, artan gözenekliliğin malzemenin mekanik dayanımını olumsuz etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Borik asit takviyeli numunelerde, düşük takviye oranlarında (%1,25 ve %2,5) sertlik artışı görülürken, yüksek takviye oranlarında (%5, %10 ve %20) gözeneklerin artışı nedeniyle sertlik azalmıştır. Boraks dekahidrat takviyeli numunelerde ise düşük ve orta takviye oranlarında (%1,25, %2,5 ve %5) sertlik artmış, yüksek takviye oranlarında (%10 ve %20) benzer şekilde gözenekliliğin etkisiyle sertlik kaybı yaşanmıştır. Genel olarak boraks dekahidrat, sertlik artışında borik asitten daha etkili görünmektedir. Ancak, her iki bileşende de yüksek takviye oranlarında porozitenin baskın hale gelmesi, malzemenin sertlik değerini olumsuz yönde etkilemiştir.

4.4. Aşınma Test Sonuçları ve Analizi

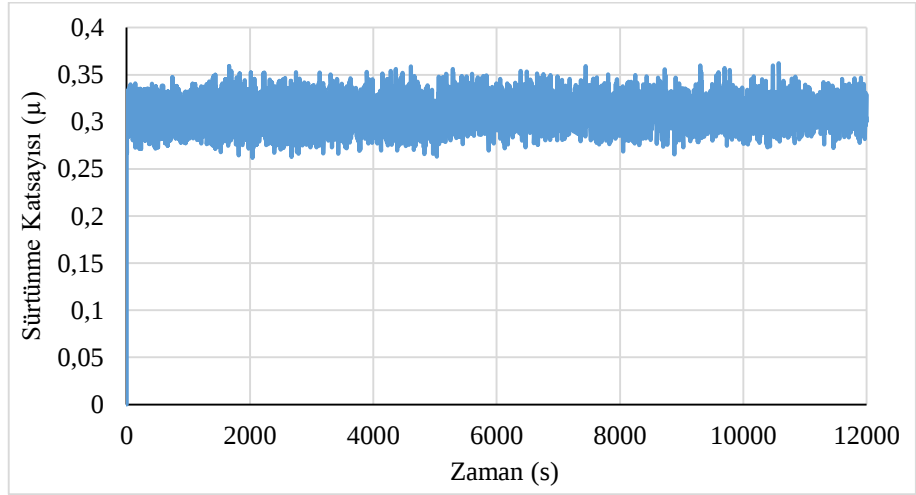
Aşınma deneyleri sırasında, sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi bilgisayar destekli ölçüm sistemiyle kaydedilmiştir. Bu ölçümler sonucunda elde edilen veriler, sürtünme katsayısının zaman içerisindeki davranışını analiz etmek amacıyla grafikler halinde görselleştirilmiş olup, ilgili grafikler Şekil 3.21–3.31'de verilmiştir.



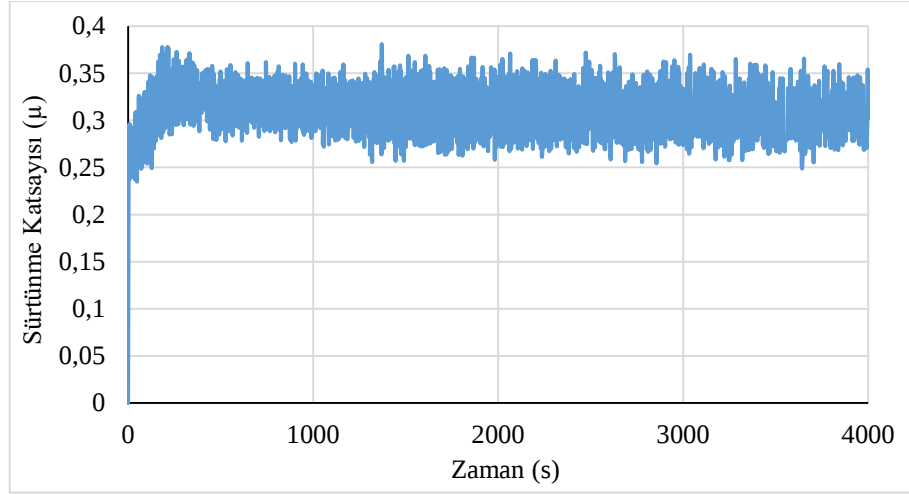
Şekil 3.21. Saf numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



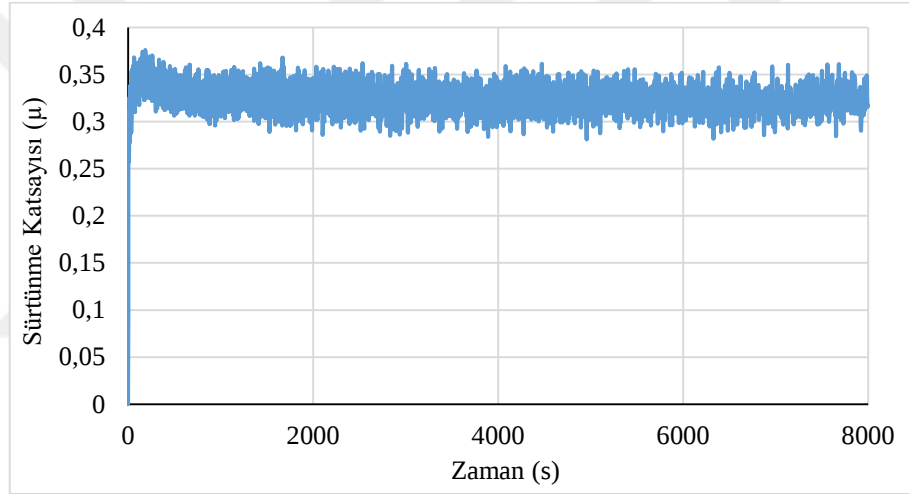
Şekil 3.22. %1,25 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



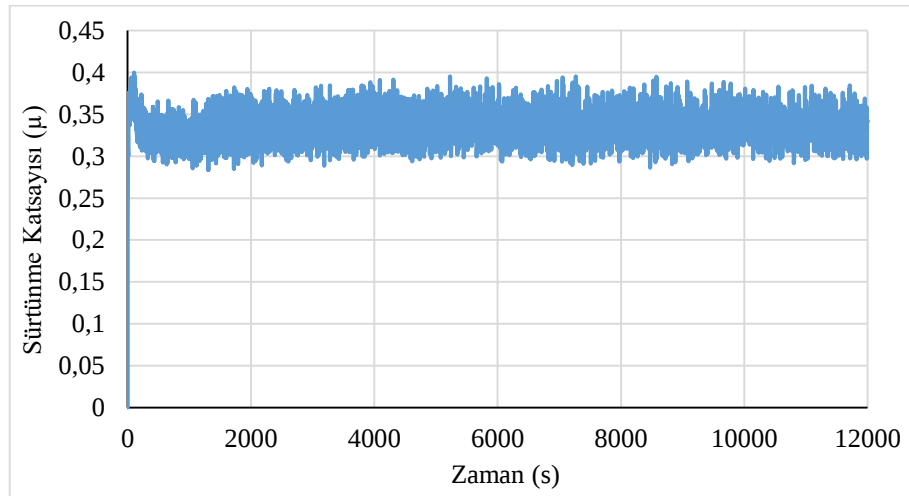
Şekil 3.23. %2,5 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



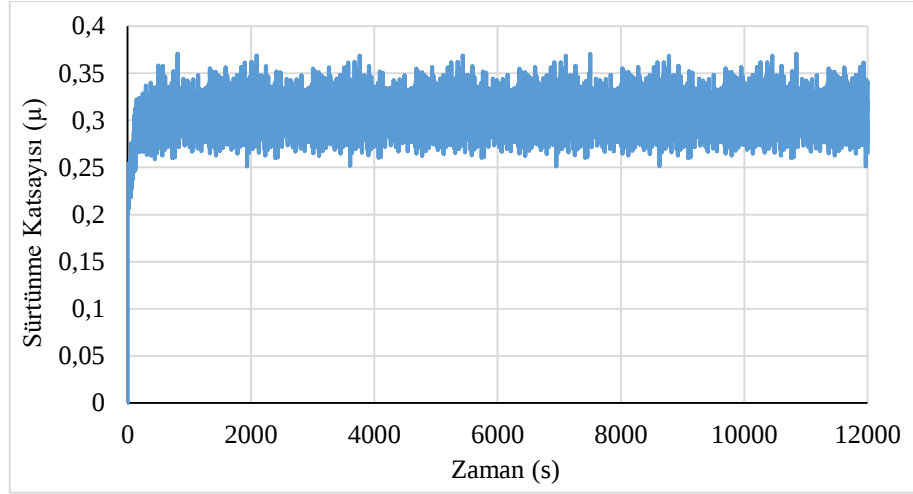
Şekil 3.24. %5 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



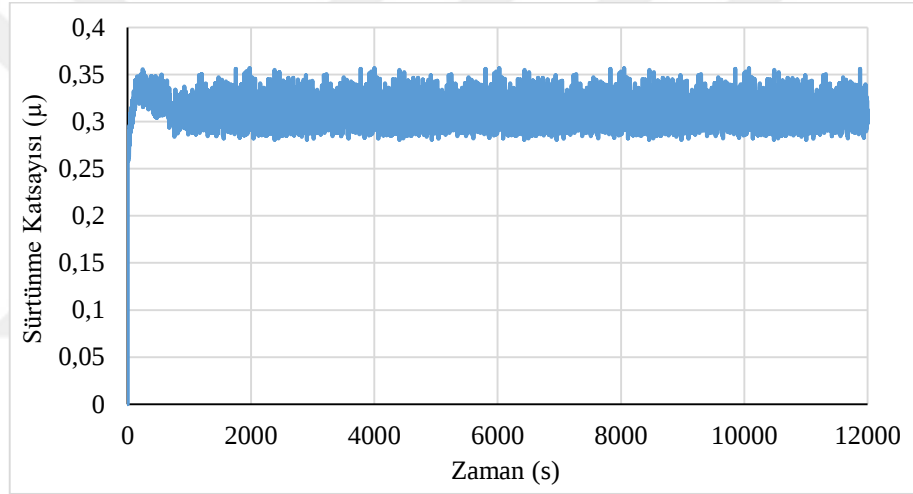
Şekil 3.25. %10 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



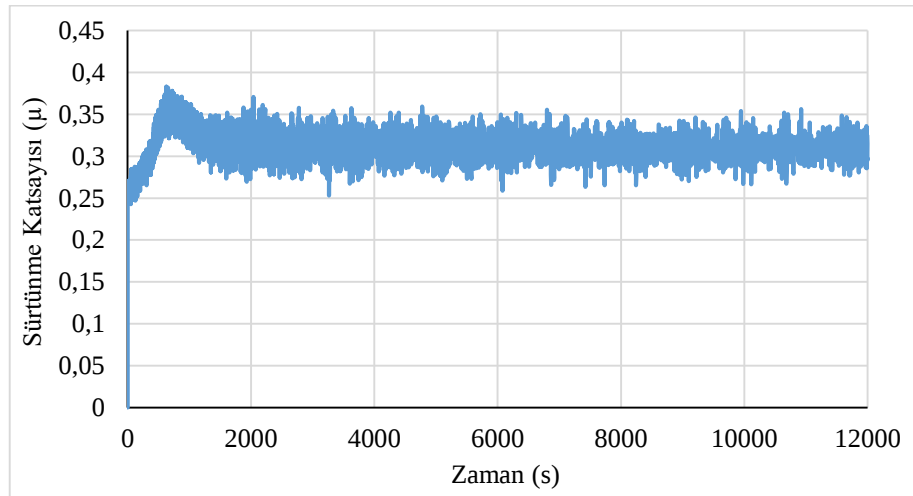
Şekil 3.26. %20 borik asitli numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



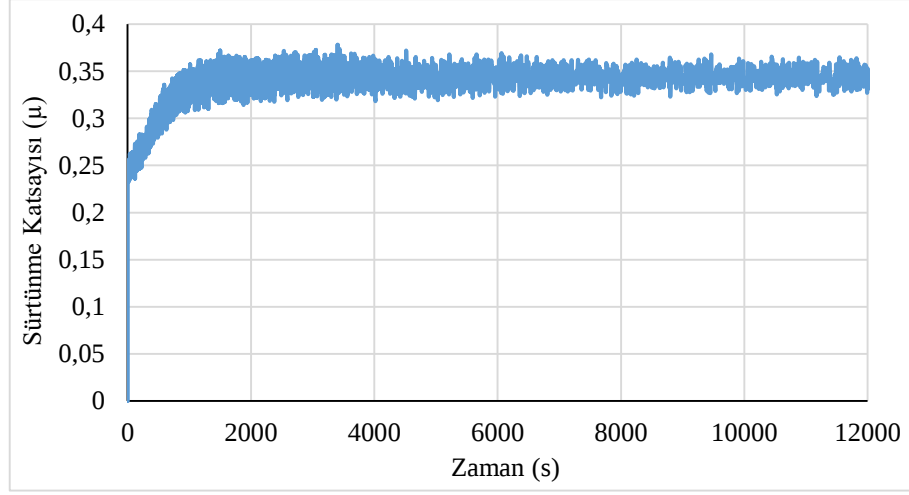
Şekil 3.27. %1,25 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



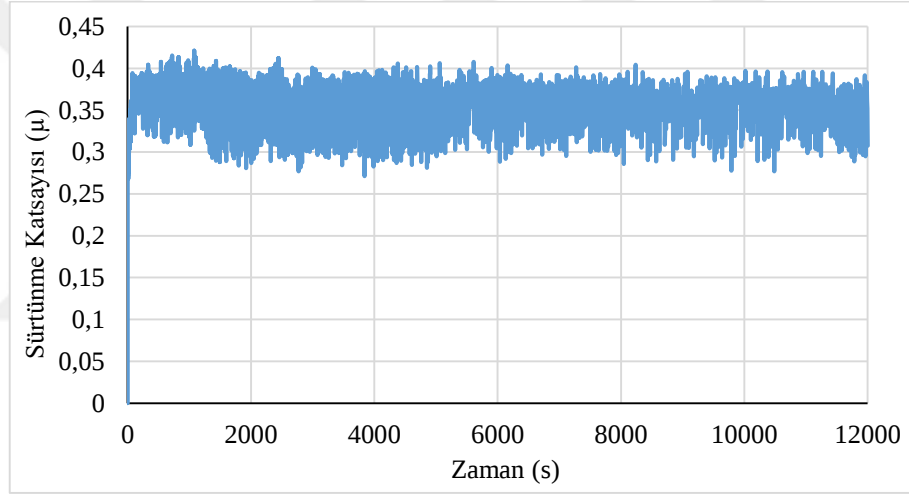
Şekil 3.28. %2,25 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



Şekil 3.29. %5 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayı değişimi



Şekil 3.30. %10 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

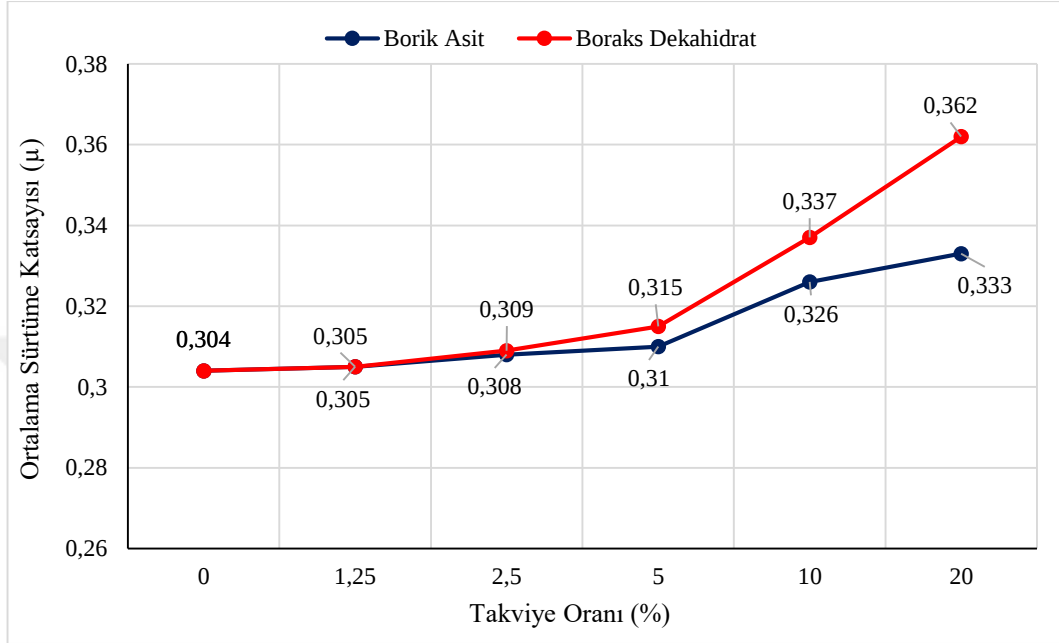


Şekil 3.31. %20 boraks dekahidratlı numunenin zamana bağlı sürtünme katsayısı değişimi

Şekil 3.21–3.31’de zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimleri incelendiğinde, aşınma deneyinin ilk anlarında sürtünme katsayısının hızlıca arttıktan sonra 0,3 çizgisi üzerinde salınım yaptığı, bazı durumlarda sürtünme katsayısının hızlıca artmasını takiben kısa bir düşüşten sonra 0,3 çizgisi üzerinde salınım yaptığı görülmektedir. Yaklaşık 1000 saniyelik kayma zamanından sonra sürtünme katsayısı değişimi aynı salınım miktarıyla 12000. saniyeye kadar ulaşmıştır. Sadece kullanılan rafine bor ürünü cinsi ve takviye oranına bağlı olarak salınım dalga boyunda değişimler olmuştur. Ancak grafiklerde ortalama sürtünme katsayıları her bir grafiğin tamamında genel olarak sabit kalmıştır. Bu grafikler kullanılan malzemenin sürtünme davranışında belirgin bir düşüş veya artış olmadan uzun süre boyunca kararlı bir şekilde çalışabileceğini ve mekanik sistemlerde güvenilir bir performans sergileyebileceğini

göstermektedir. Bu durum, malzemenin aşınmaya karşı dirençli olduğunu ve yüzey özelliklerinin sürtünme süresince korunduğunu düşündürmektedir.

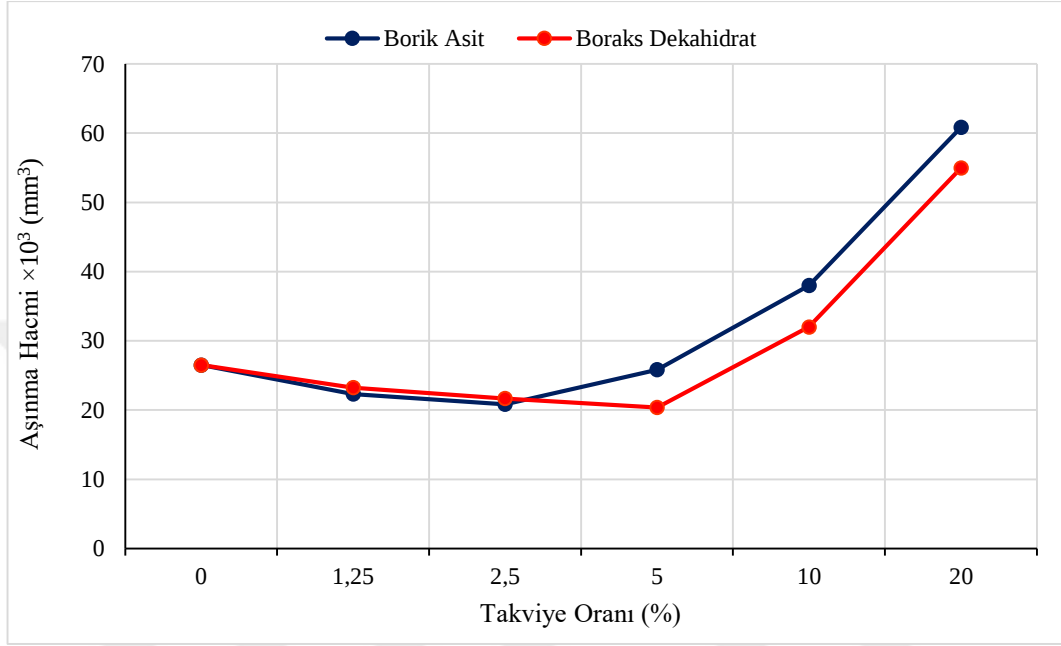
Ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin, rafine bor takviye oranına bağlı olarak değişimi Şekil 3.32’de verilmiştir.



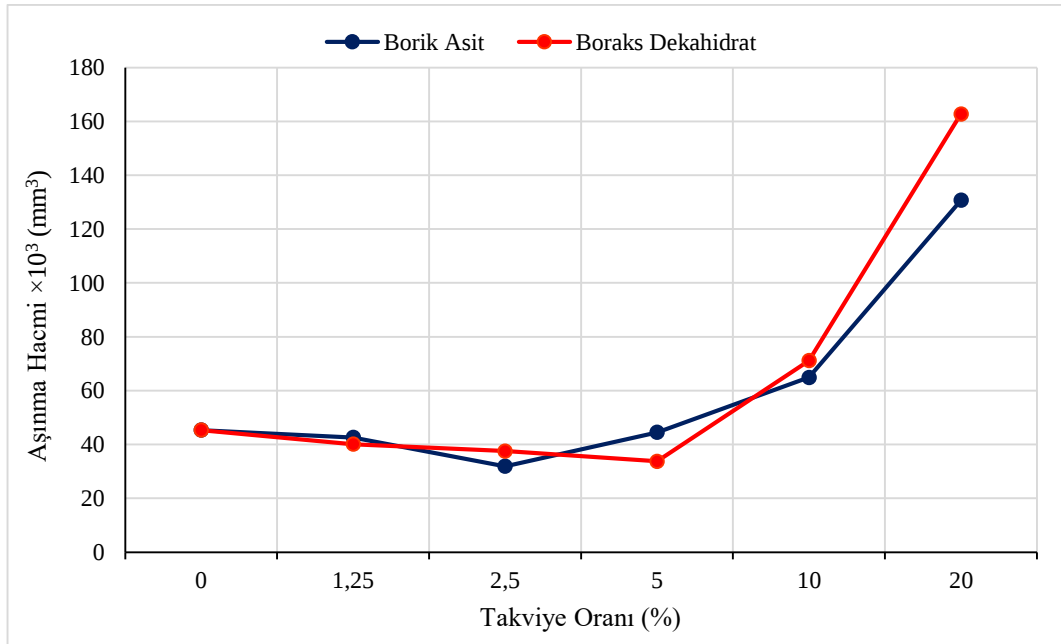
Şekil 3.32. Rafine bor bileşeni cinsi ve oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı değişim grafiği

Şekil 3.32’de görüldüğü gibi saf numune (0% takviye oranı) için sürtünme katsayısı yaklaşık 0,304 olarak tespit edilmiştir. %1,25 ve %2,5 borik asit ile takviye edilen numunelerde sürtünme katsayısı sırasıyla 0,305 ve 0,308 elde edilmiş ve sürtünme katsayısının kısmen arttığı görülmüştür. Bu artış %5 takviye oranında 0,31, %10 ve %20 takviye oranlarında ise sırasıyla 0,326 ve 0,333 olarak devam etmiştir. Boraks dekahidrat takviyesiyle hazırlanan numunelerde de benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. %1,25 ve %2,5 boraks dekahidratlı numunelerin sürtünme katsayısı sırasıyla 0,305 ve 0,309 olarak ölçülmüştür. Ancak %5 takviye oranından itibaren sürtünme katsayısında belirgin bir artış görülmüş ve bu değer %10 ve %20 oranlarında sırasıyla 0,337 ve 0,362’ye ulaşmıştır. Boraks dekahidrat, özellikle yüksek oranlarda ($\geq$ %10) borik aside kıyasla daha yüksek sürtünme katsayısı sağlamıştır. Genel olarak, her iki takviye malzemesi için de sürtünme katsayısı takviye oranıyla birlikte artış göstermiştir. Bu durum, takviye malzemelerinin malzemenin yüzey özelliklerini ve sürtünme davranışını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Borik asit, düşük oranlarda daha dengeli bir artış sağlarken, boraks dekahidratın etkisi yüksek oranlarda daha belirgin hale gelmiştir.

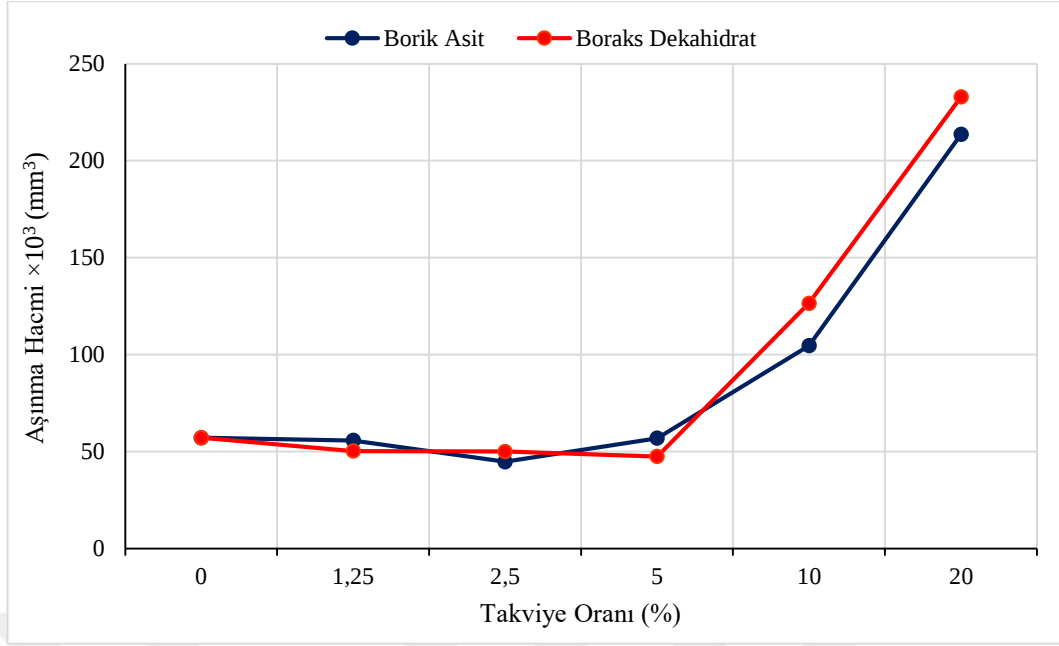
Borik asit ve boraks dekahidrat rafine bor ürünleri için farklı takviye oranlarından elde edilen numunelere ait aşınma hacmi değişimleri 400 m, 800 m ve 1200 m kayma mesafeleri için Şekil 3.33–3.35’te, her bir rafine bor ürünü için ise ayrı ayrı Şekil 3.36–3.37’de verilmiştir.



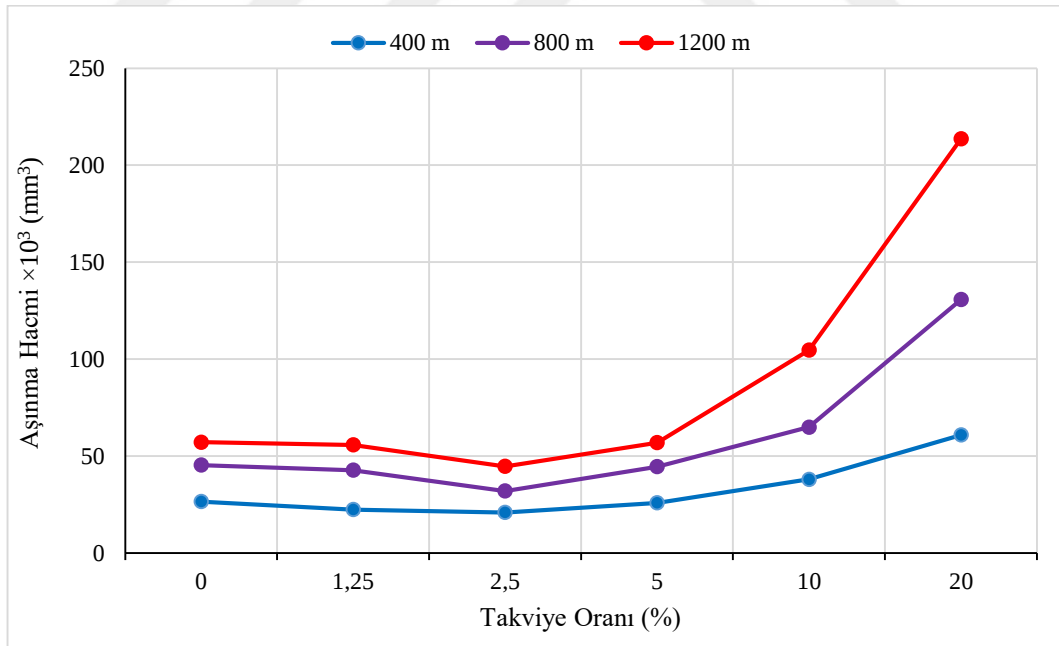
Şekil 3.33. 400 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen aşınma hacmi değişikliği



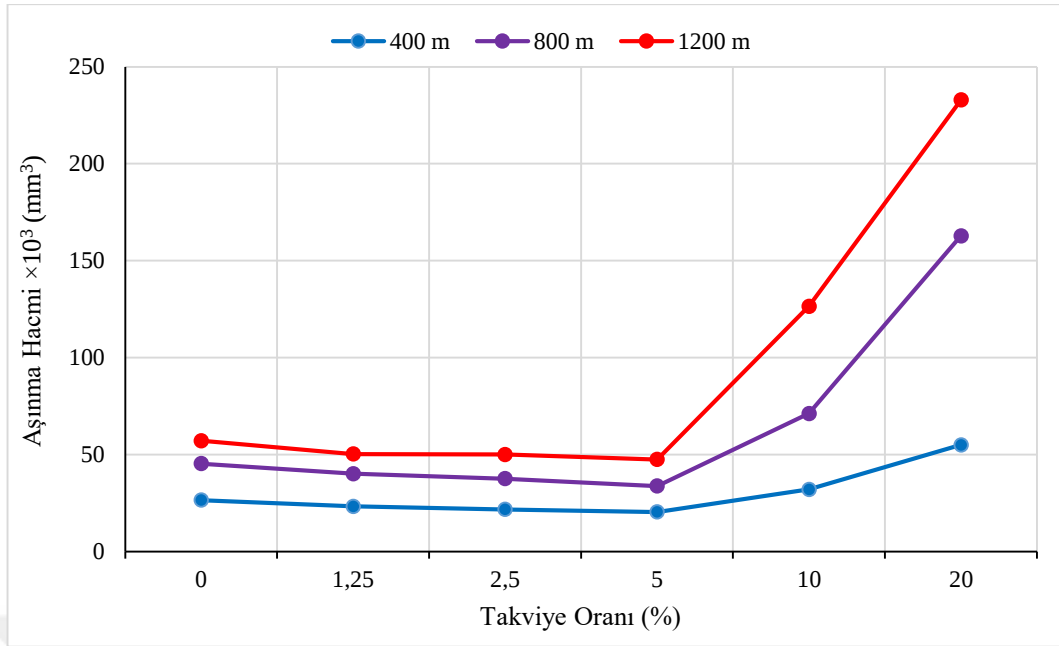
Şekil 3.34. 800 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen aşınma hacmi değişikliği



Şekil 3.35. 1200 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen aşınma hacmi değişikliği



Şekil 3.36. Borik asit takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı aşınma hacmi değişikliği



Şekil 3.37. Boraks dekahidrat takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı aşınma hacmi değişikliği

Şekil 3.36–3.37’de verilen grafiklerde, borik asit ve boraks dekahidrat takviyeli numunelere ait aşınma hacminin takviye oranı ve kayma mesafesine bağlı olarak değişim gösterdiği açıkça görülmektedir. Kayma mesafesi arttıkça aşınma hacmi yükselmiştir. Ancak, takviye oranına bağlı olarak bazı düşüşler de gözlemlenmiştir. Borik asitli numunelerde %2,5 takviye oranına kadar, boraks dekahidratlı numunelerde ise %5 takviye oranına kadar rafine bor ürünü kullanılmasının aşınma hacminde düşüşler meydana gelmesine katkı sağlamıştır. Belirlenen bu takviye oranlarının üzerinde rafine bor ürünlerinin kullanılması ise aşınma hacminde belirgin artışlar kaydedilmesine neden olmuştur.

Saf (% takviye oranına sahip) numunenin 400 m kayma mesafesi için ölçülen aşınma hacmi 26,5 mm³’tür. Kayma mesafesi arttıkça aşınma hacmi artmıştır. 800 m ve 1200 m kayma mesafesi için ölçülen aşınma hacmi ise sırasıyla 45,324 mm³ ve 57,072 mm³’tür.

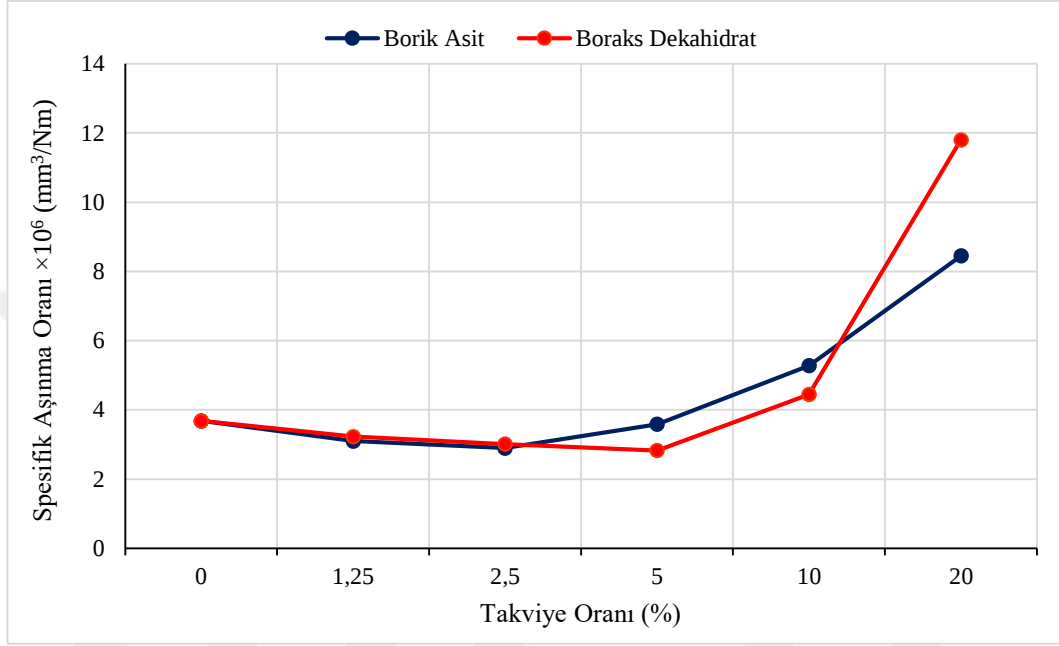
Borik asit numuneleri deneylerde, 400 m kayma mesafesi için başlangıçta, %1,25 takviye oranında aşınma hacmi 22,324 mm³ olarak ölçülmüşken, %2,5 takviye oranına çıkıldığında bu değer 20,843 mm³ ile minimum seviyeye düşmüştür. %5 takviye oranında aşınma hacminde bir artış meydana gelmiş ve aşınma hacmi 25,826 mm³’e çıkmıştır. %10 takviye oranına ulaşınca aşınma hacmi 37,984 mm³’e yükselmiş ve bu yükseliş %20 takviye oranında 60,837 mm³ ile belirgin bir hale gelmiştir. 800 m kayma mesafesi için

aşınma hacmi burada da artmaya devam etmiştir. %1,25 takviye oranında 42,625 mm³ olan aşınma hacmi, %2,5 oranına çıktığında 31.93 mm'e düşmüştür, ardından ise %5 takviye oranında bir artışla 44,519 mm³'e çıkmıştır. %10 takviye oranında ise aşınma hacmi 64,868 mm³'e yükselmiştir. %20 takviye oranına gelindiğinde ise 130,694 mm³'lük bir artış olmuştur. 1200 m kayma mesafesine gelindiğinde; aşınma hacmi, kayma mesafesinin artırılmasına paralel olarak artmaya devam etmiştir. %1,25 takviye oranında 55,666 m³ olan aşınma hacmi, %2,5 takviye oranında 44,679 mm³'e düşmüş, ancak %5 takviye oranına çıktığında tekrar 56,883 mm³'e artmıştır. Takviye oranı arttıkça aşınma hacmi 104,557 mm³'e çıkarken, %20 takviye oranına ulaşıldığında ise aşınma hacmi 213,569 mm³ ile maksimum seviyeye ulaşmıştır. Her üç kayma mesafesinde de %2,5 takviye oranına kadar borik asidin kullanıldığı numunelerin saf numuneye kıyasla daha düşük aşınma hacmine sahip olduğu görülmüştür.

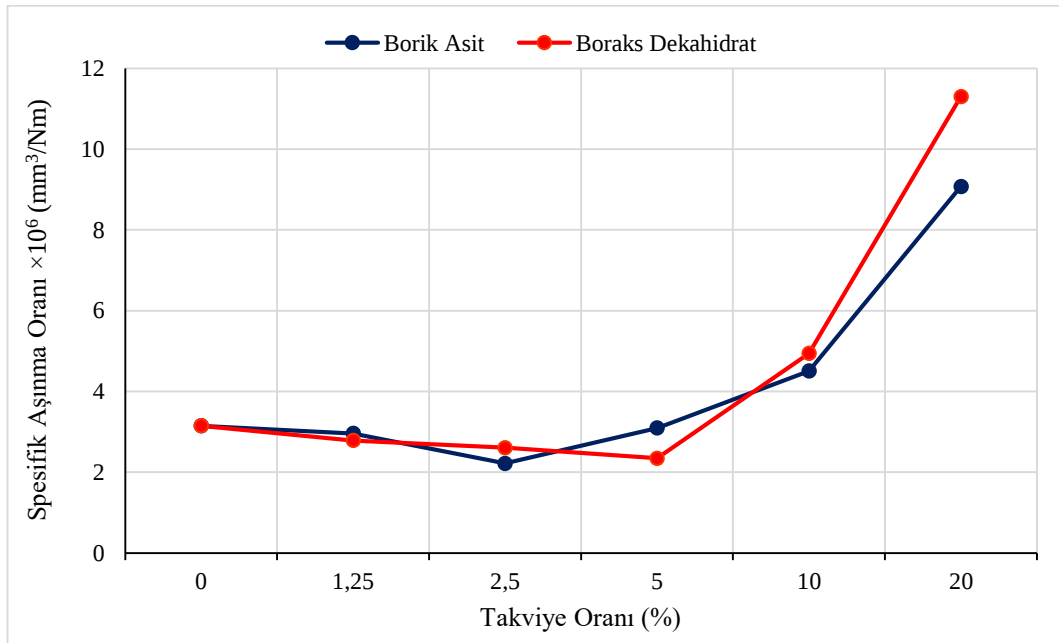
Boraks dekahidrat numuneleri deneylerde, 400 m kayma mesafesinde, %1,25 takviye oranında 23,246 mm³ olan aşınma hacmi, %2,5 oranına yükseldiğinde 21,674 mm³'e düşmüştür. Ancak %5 takviye oranında 20,365 mm³ ile tekrar bir düşüş yaşanmış ve minimum aşınma hacmi elde edilmiştir. %10 takviye oranında aşınma hacminde bir artış olmuş ve bu artış %20 takviye oranına kadar devam etmiştir. Bu oranlardan elde edilen aşınma hacimleri sırasıyla 31,994 mm³ ve 54,973 mm³'tür. 800 m kayma mesafesinde %1,25 takviye oranında 40,11 mm³ olan aşınma hacmi, %2,5 takviye oranında 37,554 mm³'e ve %5 takviye oranında ise 33,759 mm³'e düşmüştür. Bu takviye oranından sonra artan takviye oranıyla aşınma hacminde belirgin artışlar görülmüştür. %10 ve %20 takviye oranları için ölçülen aşınma hacimleri sırasıyla 71,133 mm³ ve 162,77 mm³'tür. 1200 m kayma mesafesinde, %1,25 takviye oranı ile 50,275 mm³ olan aşınma hacmi, takviye oranının artmasıyla düşmeye başlamıştır. Bu düşüş %5 takviye oranına kadar devam etmiştir. %2,5 ve %5 takviye oranları için ölçülen aşınma hacimleri sırasıyla 50,015 mm³ ve 47,464 mm³'tür. Ancak takviye oranı artmaya devam ettikçe aşınma hacmi yükselmeye başlamış ve %20 takviye oranında aşınma hacmi maksimuma ulaşmıştır. %10 ve %20 takviye oranları için ölçülen aşınma hacimleri sırasıyla 126,467 mm³ ve 232,846 mm³'tür. Her üç kayma mesafesinde de %5 takviye oranına kadar boraks dekahidratın kullanıldığı numunelerin saf numuneye kıyasla daha düşük aşınma hacmine sahip olduğu görülmüştür.

Aşınma hacmi: sürtünme katsayısı, porozite ve sertlik ile ilişkilendirildiğinde; sürtünme katsayısının ve porozitenin artması, aşınma hacmini arttırırken, sertliğin artması aşınma hacmini azaltmıştır.

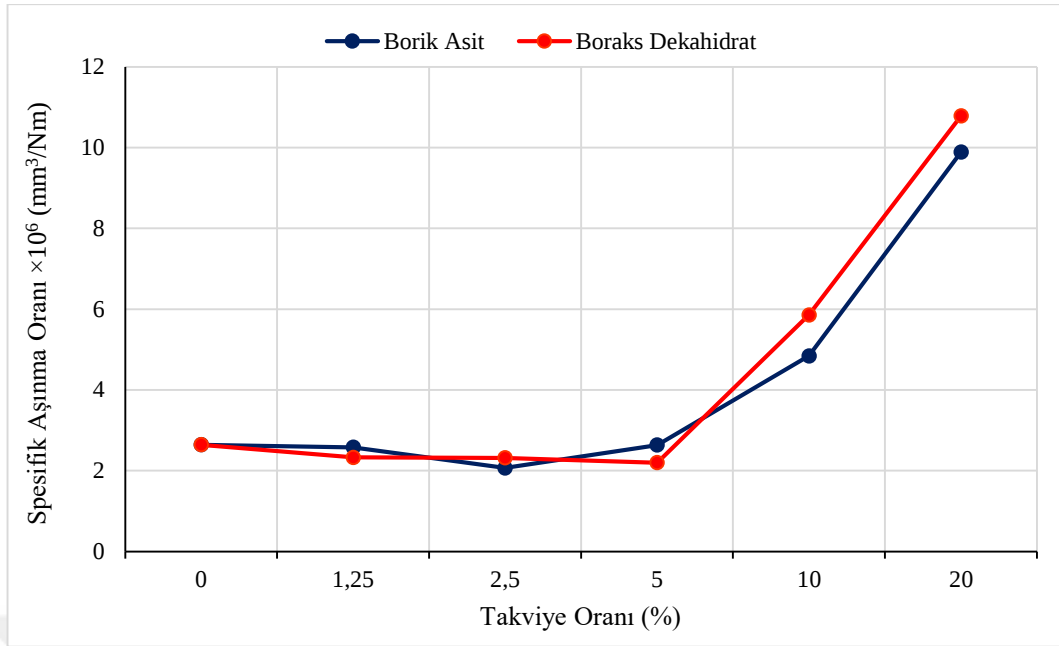
Spesifik aşınma oranları, aşınma hacminin uygulanan yük ve kayma mesafesine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Bu bileşenler için farklı takviye oranlarından elde edilen spesifik aşınma oranlarının kayma mesafesine bağlı olarak gösterdiği değişimler, 400 m, 800 m ve 1200 m kayma mesafeleri için sırasıyla Şekil 3.38–3.40'ta, her bir rafine bor ürünü için ise ayrı ayrı 3.41–3.42'de verilmiştir.



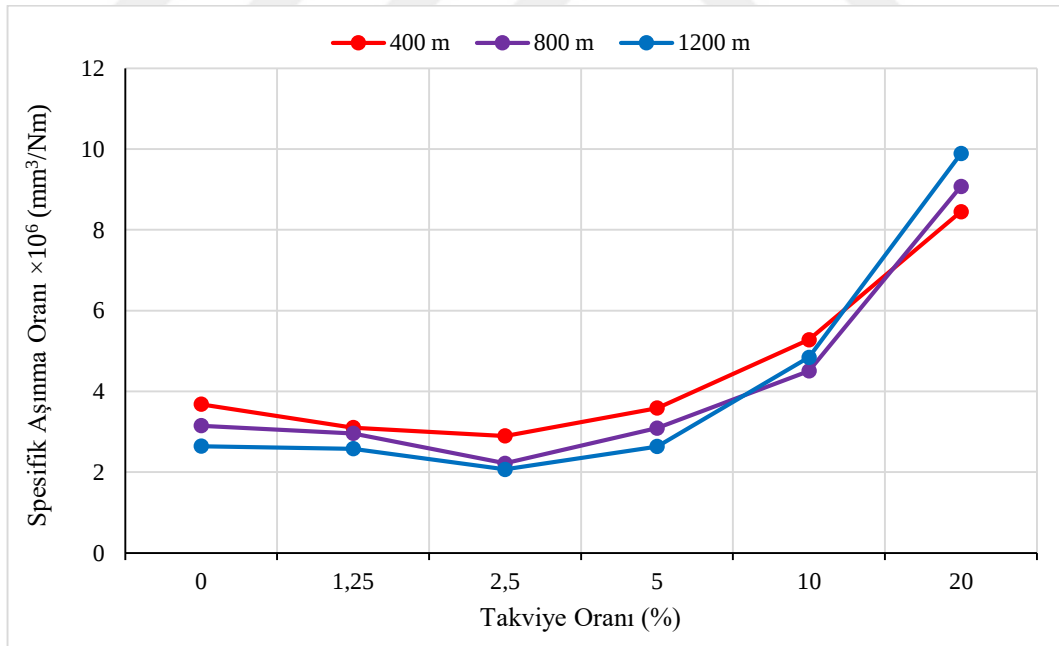
Şekil 3.38. 400 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen spesifik aşınma oranı değişikliği



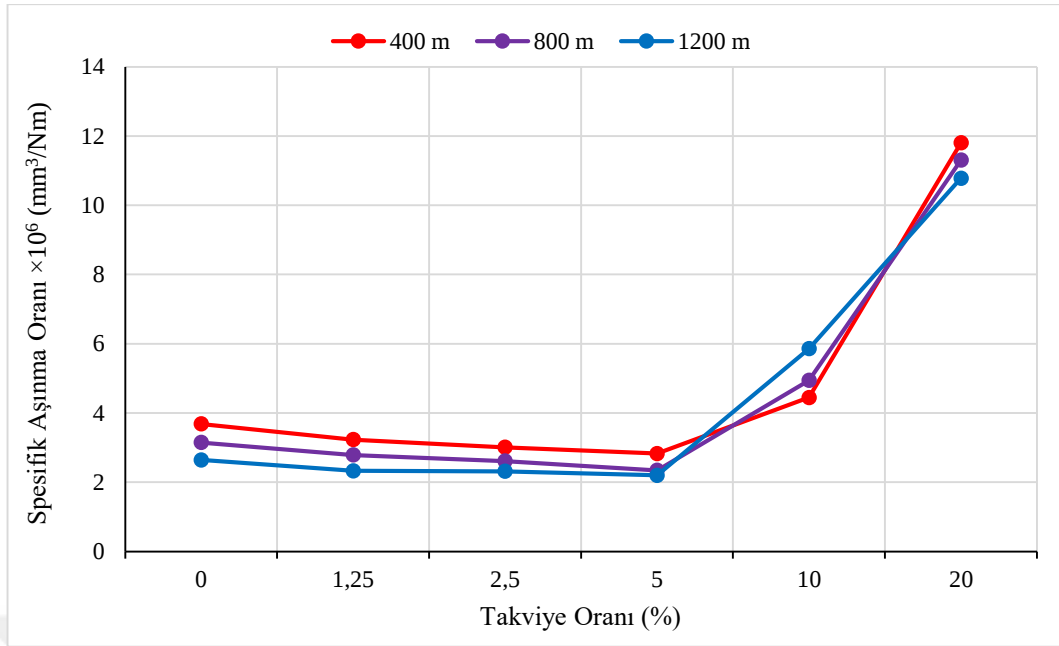
Şekil 3.39. 800 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen spesifik aşınma oranı değişikliği



Şekil 3.40. 1200 m kayma mesafesi için takviye oranına bağlı meydana gelen spesifik aşınma oranı değişikliği



Şekil 3.41. Borik asit takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranı değişikliği



Şekil 3.42. Boraks dekahidrat takviyeli numunelerde takviye oranına ve kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranı değişikliği

Şekil 3.38–3.42’de verilen grafikler incelendiğinde, başlangıçta takviye oranının artmasıyla spesifik aşınma oranı düşmüş, ancak daha yüksek takviye oranlarında spesifik aşınma oranları belirgin bir şekilde artmıştır. Genel olarak %5 takviye oranına kadar kayma mesafesinin artması spesifik aşınma oranını düşürmüştür.

Aşınma hacmi ve spesifik aşınma oranları, malzemenin aşınma davranışını değerlendiren iki farklı parametre olmasına rağmen, birbirleriyle ilişkilidir. Aşınma hacmi, belirli bir kayma mesafesinde kaybedilen malzeme miktarını ifade ederken, spesifik aşınma oranı, kayma mesafesi başına kaybedilen malzeme miktarını belirtir ve belirli bir mesafeye göre kaybedilen malzeme miktarını daha hassas bir şekilde gösterir. Kayma mesafesi arttıkça, genellikle aşınma hacmi de artar, çünkü daha uzun süreli sürtünme sonucu malzeme daha fazla aşınır. Ancak spesifik aşınma oranı, sadece kayma mesafesiyle normalize edildiği için, daha uzun kayma mesafelerinde bile farklı takviye oranları ve malzeme özellikleri nedeniyle dalgalanmalar gösterebilir. Özellikle düşük takviyeli numunelerin aşınma hacminde belirgin bir fark görülmesi de spesifik aşınma oranındaki azalma, malzemenin daha verimli bir şekilde aşındığını ve daha düşük bir malzeme kaybı sağladığını göstermektedir. Ayrıca yüksek takviyeli numunelerin daha yüksek aşınma hacmi ve spesifik aşınma oranlarına sahip olması, bu oranların aşınma direncini artırmak yerine, malzemenin daha fazla aşınmasına ve daha fazla malzeme kaybına neden olmuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, fren balatasına farklı oranda borik asit ve boraks dekahidrat rafine bor bileşeninin ilavesinin mikroyapı, sertlik ve aşınma üzerindeki etkileri incelenmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

1. Fren balata numunelerini oluşturan bileşenler, novolak reçine aracılığıyla birbirine iyi bir şekilde bağlanmış ve numune yapılarının gözenekli (porozite) olduğu görülmüştür. Hem borik asit hem de boraks dekahidrat oranındaki artış ile balata numunelerindeki gözeneklilik artmıştır.
2. Balata malzemelerine borik asit ve boraks dekahidrat toz rafine bor bileşeni ilavesinin teorik ve yığinsal olarak hesaplanan balata numunelerinin yoğunluklarını azalttığı görülmüştür. Maksimum teorik ve yığinsal yoğunluklar saf balata numunelerinden sırasıyla $4,31 \text{ g/cm}^3$ ve $3,74 \text{ g/cm}^3$ elde edilmiştir. Minimum yoğunluklar ise rafine bor bileşenlerinin ilave edildiği %20 takviye oranlarından gözlemlenmiştir. %20 borik asit takviyeli balata numunesinin teorik ve yığinsal yoğunlukları sırasıyla $3,71 \text{ g/cm}^3$ ve $3,10 \text{ g/cm}^3$ iken, %20 boraks dekahidrat takviyeli balata numunesinin teorik ve yığinsal yoğunlukları sırasıyla $3,75 \text{ g/cm}^3$ ve $3,14 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Ayrıca balata malzemelerine borik asit ve boraks dekahidrat toz rafine bor bileşeni ilavesi, porozite oranını arttırmıştır. Saf numunede porozite oranı %13,11 olarak hesaplanırken, bu oran borik asit ile takviye edilen numunelerde %16,37'ye, boraks dekahidrat içeren numunelerde ise %16,42'ye ulaşmıştır.
3. Balata numunesine düşük oranlarda rafine bor bileşeni ilavesinin sertliği olumlu yönde etkilediği görülürken yüksek oranlarda eklenmesi sertlik üzerinde olumsuz etki oluşturmuştur. 95,33 ortalama Brinell sertlik değeri ile saf numunenin sertliği borik asit takviyeli numunede %2,5 takviye oranıyla maksimum 97,33'e kadar çıkmıştır. Ancak %20 takviye oranında sertlik değeri minimum 67,83'e kadar gerilemiştir. Benzer şekilde boraks dekahidrat takviyeli numunelerde ise 95,33 ortalama sertlik değeri ile saf numunenin setliği %5 takviye oranında maksimum seviyeye çıkmış ve ölçülen değer 104,33'tür. Minimum sertlik değeri ise %20 takviye oranından 83,17 olarak ölçülmüştür.

4. Balata malzemelerine borik asit ve boraks dekahidrat toz rafine bor bileşeni ilavesi, sürtünme katsayısını arttırmıştır. 0,304 değere sahip olan saf balatanın sürtünme katsayısı %20 borik asit takviyesiyle 0,333 değere çıkmıştır. Boraks dekahidrat takviyeli numunelerde sürtünme katsayısı kısmen daha yüksek elde edilmiş olup maksimum elde edilen sürtünme katsayısı %20 takviye oranında 0,362'tür.
5. Kayma mesafesi arttıkça aşınma hacmi artmıştır. %5 takviye oranına kadar artan kayma mesafesi spesifik aşınma oranını azaltmıştır. Takviye oranına bağlı olarak önce artan takviye oranı ile aşınma hacmi ve oranı azalmış ve takviye oranının belli bir seviyeye çıkması ile artan takviye oranı aşınma hacmi ve oranını arttırmaya başlamıştır. Minimum aşınma borik asitli numunelerde %2,5 takviye oranında, boraks dekahidratlı numunelerde ise %5 takviye oranında elde edilmiştir. Maksimum aşınmalar ise %20 takviye oranlarında elde edilmiştir.
6. Fren balata malzemelerinde düşük oranlarda bor bileşeni kullanımının yoğunluğu azaltırken sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma direncini artırdığı sonucuna varılmıştır.

5.2 Öneriler

Fren balatalarının performansını artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak amacıyla bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak aşağıdaki önerilerde bulunulabilir. Bunlar;

1. Bor bileşenli fren balataları, farklı sıkıştırma basıncı ile üretilerek numunelerde porozite daha düşük seviyeye çekilebilir. Böylece yüksek oranda bor bileşeni kullanımının sürtünme katsayısını arttırdığı gibi sertlik ve aşınma direncini de arttırmaya yönelik çalışmalar yapılabilir.
2. Bor bileşenleri, çevresel açıdan iyi bir alternatif olduğu için çevre dostu diğer takviye malzemeleri ile kullanılmasının fren balatalarının performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
3. Farklı sıcaklıklarda bor bileşenli malzemelerin sürtünme ve aşınma üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Akıncioğlu, G., Akıncioğlu, S., Uygur, İ., & Öktem, H. (2019). Alternatif katkı maddesi olarak kullanılan bor oksitin fren balatasının sürtünme davranışına etkisinin incelenmesi. *Journal of Boron*, 4(1), 1-6.
- Akıncioğlu, G., Uygur, İ., Öktem, H., & Akıncioğlu, S. (2018). Bor oksit tozunun fren balatalarının tribolojik özelliklerine etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 755-760.
- Akpınar, G. (2008). *Modifiye edilmiş karaçam kozalaklarının otomotiv fren balatalarında kullanımının araştırılması*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Bashir, M., Qayoum, A., & Saleem, S. S. (2021). Experimental investigation of thermal and tribological characteristics of brake pad developed from eco-friendly materials. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 7, 1-13.
- Başar, G., Buldum, B. B., & Sugözü, İ. (2018). Kulemanit ve boraks takviyeli fren balatalarının sürtünme performansı. *El-Cezeri*, 5(2), 635-644.
- Blau, P. J. (2001). *Compositions, functions, and testing of friction brake materials and their additives* (No. ORNL/TM-2001/64). Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- Borawski, A. (2020). Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads—review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 27(1), 374-396.
- Boz, M., & Kurt, A. (2006a). Toz metal fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma performansı üzerine çinkonun etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 115-122.
- Boz, M., & Kurt, A. (2006b). Antimon trisülfid'in bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özelliklerine etkisi. *Teknoloji*, 9(2), 79-90.
- Boz, M., & Kurt, A. (2006c). Bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özelliklerine sepiyolit'in etkisi. *Politeknik Dergisi*, 9(4), 303-311.
- El-Tayeb, N. S. M., & Liew, K. W. (2009). On the dry and wet sliding performance of potentially new frictional brake pad materials for automotive industry. *Wear*, 266(1-2), 275-287.
- Eriksson, M., & Jacobson, S. (2000). Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology international*, 33(12), 817-827.
- Erkoca, M. C., & Bayrakçeken, H. (2021). Simpleks pabuçlu kampanada fren ebatı değişiminin fren faktörü üzerine etkisi. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 2(2), 127-140.

- Ertan, R. (2008). *Fren balata malzemelerinin optimizasyonu ve üretim parametrelerinin analizi*. [Yayınlanmış doktora tezi]. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- ETİMADEN (2024, 09 Kasım). *Bor elementi*. <https://www.etimaden.gov.tr/bor-elementi#>
- Faga, M. G., Casamassa, E., Iodice, V., Sin, A., & Gautier, G. (2019). Morphological and structural features affecting the friction properties of carbon materials for brake pads. *Tribology International*, 140, 105889.
- Gawande, S. H., Banait, A. S., & Balashowry, K. (2023). Study on wear analysis of substitute automotive brake pad materials. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 21(1), 144-153.
- Gurunath, P. V., & Bijwe, J. (2007). Friction and wear studies on brake-pad materials based on newly developed resin. *Wear*, 263(7-12), 1212-1219.
- Hamamcı, B., & Sali, M. (2020). Asbest içermeyen fren balata imalatında farklı sinterleme sıcaklığı ve süresinin tribolojik ve mekanik özelliklere etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(1), 520-531.
- Hendre, K. N., & Bachchhav, B. D. (2019). Friction and wear characteristics of rubber resin-bonded metallic brake pad materials. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(6), 1312-1316.
- Kara, F. (2011). *Karbon elyaf takviyeli otomotiv fren balata özelliklerinin araştırılması*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Koç, C., Mutlu, İ., & Taşgetiren, S. (2009). Fren balata sisteminde sürtünme sonucu oluşan ısı transferi ve termal gerilme analizi. *Electronic Journal of Vehicle Technologies (EJVT)*, 1(2), 9-20.
- Krishnan, G. S., Kumar, S., Suresh, G., Akash, N., Kumar, V. S., & David, J. P. (2021). Role of metal composite alloys in non-asbestos brake friction materials-A solution for copper replacement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 926-929.
- Kumar, S., & Ghosh, S. K. (2020). Porosity and tribological performance analysis on new developed metal matrix composite for brake pad materials. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 186-204.
- Kumar, S., Priyadarshan, & Ghosh, S. K. (2023). Comparative study of airborne particles on new developed metal matrix composite and commercial brake pad materials with ANN and finite element analysis. *Computational Particle Mechanics*, 10(2), 273-287.
- Kurt, H. A. (2019). *Bor karbür takviyeli fren balatalarının mekanik özelliklerinin incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Balıkesir Üniversitesi.

- Kuş, H., Altıparmak, D., & Başar, G. (2016). Sıcak presleme yöntemi ile üretilmiş uçucu kül takviyeli bronz matrisli fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma özellikleri üzerine kolemanit miktarının etkisi. *Politeknik Dergisi*, 19(4), 537-546.
- Liew, K. W., & Nirmal, U. (2013). Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials. *Materials & Design*, 48, 25-33.
- Lyu, Y., Leonardi, M., Wahlström, J., Gialanella, S., & Olofsson, U. (2020). Friction, wear and airborne particle emission from Cu-free brake materials. *Tribology International*, 141, 105959.
- Marin, E., Daimon, E., Boschetto, F., Rondinella, A., Inada, K., Zhu, W., & Pezzotti, G. (2019). Diagnostic spectroscopic tools for worn brake pad materials: A case study. *Wear*, 432, 202969.
- Mausam, K., Sharma, A., & Singh, P. K. (2021). Calculating stress, temperature in brake pad using ANSYS composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 45, 3547-3550.
- Mutlu, İ., & Cengiz, Ö. (2002). Cam elyaf takviyeli disk fren balatalarının özelliklerinin incelenmesi. *Teknoloji, Yıl 5*(3-4), 89-96.
- Österle, W., Deutsch, C., Gradt, T., Orts-Gil, G., Schneider, T., & Dmitriev, A. I. (2014). Tribological screening tests for the selection of raw materials for automotive brake pad formulations. *Tribology International*, 73, 148-155.
- Österle, W., Dörfel, I., Prietzel, C., Rooch, H., Cristol-Bulthé, A. L., Degallaix, G., & Desplanques, Y. (2009). A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test. *Wear*, 267(5-8), 781-788.
- Österle, W., Prietzel, C., Kloß, H., & Dmitriev, A. I. (2010). On the role of copper in brake friction materials. *Tribology International*, 43(12), 2317-2326.
- Pujari, S., & Srikanth, S. (2019). Experimental investigations on wear properties of Palm kernel reinforced composites for brake pad applications. *Defence Technology*, 15(3), 295-299.
- Saindane, U. V., Soni, S., & Menghani, J. V. (2021). Dry sliding behavior of carbon-based brake pad materials. *International Journal of Engineering*, 34(11), 2517-2524.
- Sugozu, I., Mutlu, I., & Sugozu, K. B. (2018). The effect of ulexite to the tribological properties of brake lining materials. *Polymer Composites*, 39(1), 55-62.
- Sugözü, B., & Dağhan, B. (2017). Fren sürtünme malzemelerinde aşındırıcıların (alümina, silika, zirkon) tribolojik özellikleri. *Nevşehir bilim ve teknoloji dergisi*, 7(1), 14-23.

- Sugözü, B., Buldum, B. B., & Sugözü, İ. (2018). Üleksit ve boraks içeren fren sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleri. *Journal of Boron*, 3(2), 126-131.
- Sugözü, I. (2019). Kompozit fren balatasında bakır oranının frenleme karakteristiğine etkisi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(4), 1458-1465.
- Sugözü, I., & Mutlu, I. (2008). Fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınmaya etkisinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (elektronik)*, 5(4), 33-40.
- Sugözü, İ. (2009). *Bor katkılı asbestsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin incelenmesi*. [Yayınlanmış doktora tezi]. Fırat Üniversitesi.
- Sugözü, İ., Mutlu, İ., & Öner, C. (2011). Fren balatası üretiminde sıcak presleme süresinin frenleme karakteristiğine etkisinin araştırılması. In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey.
- Sugözü, K. B. (2015). Otomotiv fren balata malzemelerinde maun cevizi tozunun sürtünme performansına etkisi. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 8(2), 166-177.
- Tavangar, R., Moghadam, H. A., Khavandi, A., & Banaeifar, S. (2020). Comparison of dry sliding behavior and wear mechanism of low metallic and copper-free brake pads. *Tribology International*, 151, 106416.
- Timur, M., & Kılıç, H. (2013). Mermer atıkları kullanılarak üretilen otomotiv fren balatasının sürtünme katsayısının farklı fren balataları ile karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 10-14.
- Topuz, P., & Topuz, A. (2018). Otomobil disk fren balatalarının deneysel yöntemlerle karakterizasyonu ve karşılaştırılması. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 30(3), 241-248.
- Toros, M. (2011). *Fren balatalarında nano malzemelerin kullanımının frenleme performansına etkilerinin deneysel araştırılması*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- Ünaldı, M., & Kuş, R. (2018). The determination of the effect of mixture proportions and production parameters on density and porosity features of Miscanthus reinforced brake pads by Taguchi method. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7(1), 48-57.
- Üstün, N. S. (2011). *Otomotiv endüstrisi için bir disk fren balatası üretimi ve performansının incelenmesi*. [Yayınlanmış yüksek lisans tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.

- Wahlström, J., Gventsadze, D., Olander, L., Kutelia, E., Gventsadze, L., Tsurtssumia, O., & Olofsson, U. (2011). A pin-on-disc investigation of novel nanoporous composite-based and conventional brake pad materials focussing on airborne wear particles. *Tribology international*, 44(12), 1838-1843.
- Yanar, H., Purcek, G., & Ayar, H. H. (2020). Effect of steel fiber addition on the mechanical and tribological behavior of the composite brake pad materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 724, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- Zhang, P., Zhang, L., Ren, S., Fu, K., Wu, P., Cao, J., Shijia, C., & Qu, X. (2019). Effect of matrix alloying of Fe on friction and wear properties of Cu-based brake pad materials. *Tribology Transactions*, 62(4), 701-711.

