



**MEKANİK ALAŞIMLI BOR TÜREV TAKVİYELİ FREN BALATALARININ
TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

Hazırlayan: Çetin KARADENİZ

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜN

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

İĞDIR/2023

Her Hakkı Saklıdır

T.C.
IĞDIR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEKANİK ALAŞIMLI BOR TÜREV TAKVİYELİ FREN BALATALARININ
TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Çetin KARADENİZ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

IĞDIR/2023

TAAHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Çetin KARADENİZ



ÖZET

MEKANİK ALAŞIMLI BOR TÜREV TAKVİYELİ FREN BALATALARININ TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

KARADENİZ, Çetin

Yüksek Lisans Tezi

Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜN

Temmuz 2023, 118 Sayfa

Doğa dostu bir fren balatası kompozisyonunu oluşturmak amacıyla ülkemiz maden rezervlerinde zengin bir hacme sahip olan bor türevli malzemelerin yapılan çalışmada kullanımı sağlanmıştır. Bu amaçla ülkemizde yer alan bor oksit, boraks ve kolemanit malzemelerinin yanında ithal olarak temin edilen bor karbür de dahil edilerek detaylı bir fren balata malzemesi üretiminde takviye etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın özgünlük niteliği ise bor malzeme (bor oksit, kolemanit, boraks) içeriklerinin mekanik alaşımlandırılması oluşturularak, fren balatasını oluştururken balata malzemelerin içerisine belirlenen farklı oranlarda (%5-%10-%15) takviye edilmesi sağlanmıştır. Aynı şekilde herhangi bir işlem yapılmamış diğer bor malzemeleri de (bor oksit, kolemanit, boraks ve bor karbür) yine bu belirtilen oranlarda fren balatası oluşumunda katkı malzemeleri olarak yer almıştır. Yapılan testlerde tüm deney numuneleri için farklı basınç yükleme değerlerinde (0,5 MPa, 0,75 MPa ve 1 MPa) iki farklı uygulamada (sabit sıcaklıkta ve değişken sıcaklıkta) balata sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen değerlere göre bor türevli mekanik alaşımlanmış takviyeli balata numunelerinin kararlı bir sürtünme katsayısı ve özgül aşınma oranında düşük olması sebebiyle avantajlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fren Balatası, Bor, Mekanik Alaşımlama, Aşınma

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL PERFORMANCES OF MECHANICAL ALLOYED BORON DERIVATIVE REINFORCED BRAKE PADS

KARADENİZ, Çetin

Master's Thesis

Department of Mechatronics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Gökçen AKGÜN

July 2023, 118 Pages

In order to develop an environmentally eco-friendly brake pad composition, the utilization of boron-based materials, which are abundant in our country's mineral reserves, has been ensured. In pursuit of this objective, the reinforcing effects in the production of a detailed brake pad material were evaluated by incorporating domestically available boron oxide, borax, and colemanite materials, as well as imported boron carbide. The originality of the study is based on the mechanical alloying of boron materials (boron oxide, colemanite, borax) to create the brake pad, where the reinforcement of these materials was achieved by incorporating them into the brake pad composition at specified varying proportions (%5-%10-%15). Similarly, the other boron materials (boron oxide, colemanite, borax, and boron carbide), without undergoing any treatment, have also been included as additive materials in the formation of brake pads at the specified ratios mentioned earlier. In the conducted tests, friction tests of brake pads were carried out at different pressure loading values (0.5 MPa, 0.75 MPa, and 1 MPa) for all experimental samples. These tests were performed under two different conditions: constant temperature and variable temperature. Based on the obtained values, it has been observed that boron derivative reinforced brake pad samples exhibit advantageous due to their stable friction coefficient and a low specific wear rate.

Key Words: Brake Pad, Boron, Mechanical Alloying, Wear

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerini paylaşarak tez çalışmamın her aşamasında destek olan değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜN' e, fren balatası malzemelerinde desteklerini esirgemen ERKA BEŞYILDIZ firmasından Hasan bey' e, deneysel çalışmalarımda yanımda yardımcı olan Iğdır Üniversitesi Makine mühendisliği lisans öğrencisi Ali ACUZ' a, yük hücresi ve indikatör sistemlerinin fren balatası test cihazının kapsamlı ve rijit bir şekilde çalışabilir olmasına katkı veren sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KOCABAŞ' a, sayın Dr. Öğr. Üyesi Fesih KESKİN' e, sayın Dr. Öğr. Üyesi Melih YILDIZ' a, sayın Dr. Öğr. Üyesi Fethi ŞERMET' e, sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Raci AYDIN' a, malzemelerimizin ön analiz değerlendirmelerinde akademik bir hocadan daha fazlası olan kıymetli hocamız sayın Doç. Dr. Temel VAROL 'a, balataların test uygulamaları ve detaylı görüşleriyle desteklerini bizlerden esirgemeyen değerli hocamız sayın Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK' e, mikro yapı analizlerinde desteklerini esirgemeyen kıymetli hocam Doç. Dr. Fahri SARAÇ' a en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca canım kızım Berçem' e de sevgilerimi sunuyorum.

Bu yüksek lisans tezi, MÜF1121Y39 nolu proje kapsamında Iğdır Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Çetin KARADENİZ

IĞDIR/2023

Otomotiv Öğretmeni

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Özgünlüğü.....	1
1.2. Konu ve Kapsam	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Fren Mekanikği ve Sistemleri	3
2.1.1. Fren Mekanikği.....	3
2.1.2. Fren Sistemleri.....	4
2.1.2.1. Tasarımlarına Göre Fren Çeşitleri	4
2.1.2.2. Fren Gücünün İletim Sistemine Göre Fren Çeşitleri	11
2.2. Fren Balataları	12
2.2.1. Organik Esaslı Fren Balataları	13
2.2.2. Metalik Esaslı Fren Balataları	14
2.2.3. Karbon Esaslı Fren Balataları	15
2.3. Fren Balatası Malzeme Bileşenleri.....	15
2.3.1. Bağlayıcı Malzemeleri.....	16
2.3.2. Takviye Malzemeleri	17
2.3.3. Dolgu Malzemeleri	19
2.3.4. Sürtünme Düzenleyici Malzemeler	20
2.4. Sürtünme ve Aşınma Mekanizması.....	22
2.4.1. Sürtünme.....	22
2.4.2. Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları	24

2.4.3. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri	27
2.5. Mekanik Alaşımlama ve Mekanokimyasal Sentez	29
2.6. Literatürdeki Fren Balatası ile İlgili Çalışmalar	33
3. MATERYAL VE METOD.....	41
3.1. Fren Balatası Numunelerinin Seçimi ve Üretimi	41
3.1.1. Fren Balatalarının Üretiminde Balata Tozlarının Hazırlanması.....	42
3.1.2. Fren Balatası Numunelerinin İmalatı.....	46
3.1.3. Fren Balatası Numunelerinin TS Standart Boyutlarına Getirilmesi.....	49
3.2. Fren Balatalarının Sertlik Testleri	50
3.3. Fren Balatalarının Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçümü.....	51
3.4. Fren Balatalarının Yoğunluk Ölçümleri.....	52
3.5. Fren Balatalarının Aşınma Performansı Testleri.....	53
3.6. Fren Balatası Numunelerine Uygulanan SEM ve EDX Analizleri	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	58
4.1. Fren Balatası Numunelerinin Sertlik Testi Sonuçları.....	58
4.2. Fren Balatası Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları	60
4.3. Fren Balatalarının Aşınma Performansı Testlerinin Sonuçları	63
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ.....	119

KISALTMALAR DİZİNİ

μ	Sürtünme Katsayısı
E_k	Kinetik Enerji
HRM	Rockwell M Skalasındaki Sertlik Değeri
MA	Mekanik Alaşım
SAE	Otomotiv Mühendisleri Birliği
SWR	Özgül Aşınma Oranı
TS	Türk Standartı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
Wa	Aşınma Oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Otomobilde fren sisteminin genel görünümü	3
Şekil 2.2. Disk ve kampanalı fren sistemlerini oluşturan fonksiyonel elemanlar.....	5
Şekil 2.3. Fren pedalının çalışma prensibi	7
Şekil 2.4. Fren ana merkezinde oluşan basınç dağılımı.....	9
Şekil 2.5. Disklerdeki frenleme kuvvet analizi.....	10
Şekil 2.6. Disk frenlerde fren faktörü ile sürtünme katsayısının değişimi.....	11
Şekil 2.7. Fren pedalının katmanlı yapıları	15
Şekil 2.8. Sürtünme kuvvetinin şematik görünümü.....	23
Şekil 2.9. Statik ve kinetik sürtünme katsayıları	24
Şekil 2.10. DIN 50320 normuna göre tribolojik gelişim	25
Şekil 2.11. Kullanımı yaygın sürtünme test tipleri	28
Şekil 2.12. MA. uygulamasında toz boyutunun öğütme süresi ile ilişkisi.....	30
Şekil 2.13. Mekanik alaşımlama mekanizmasının sistematik yapısı.....	31
Şekil 2.14. Öğütücü değirmen türleri.....	33
Şekil 3.1. Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) malzemesine ait SEM görüntüsü.....	43
Şekil 3.2. Bor oksit (B_2O_3) malzemesine ait SEM görüntüsü.....	43
Şekil 3.3. Öğütülmüş Kolemanit ($2\text{CaO}_3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) malzemesine ait SEM görüntüsü	44
Şekil 3.4. Mekanik alaşımlanmış bor malzemelerine ait SEM görüntüsü.....	44
Şekil 3.5. Mekanik alaşımlanmış bor malzemelerine ait SEM görüntüsünden boyut tayini.....	45
Şekil 3.6. Üretilen Fren Balataları Numuneleri	48
Şekil 3.7. TS 9046 Numune boyutuna indirgenmiş örnek balata	50
Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan makro sertlik test cihazı ve Shore D test aleti	50
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	51
Şekil 4.1. Sıcaklığa bağlı olarak ticari balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	64
Şekil 4.2. Sıcaklığa bağlı olarak %5 bor oksit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	66
Şekil 4.3. Sıcaklığa bağlı olarak %10 bor oksit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	67
Şekil 4.4. Sıcaklığa bağlı olarak %15 bor oksit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	68

Şekil 4.5. Sıcaklığa bağlı olarak %5 boraks katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	70
Şekil 4.6. Sıcaklığa bağlı olarak %10 boraks katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	72
Şekil 4.7. Sıcaklığa bağlı olarak %15 boraks katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	73
Şekil 4.8. Sıcaklığa bağlı olarak %5 kolemanit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	76
Şekil 4.9. Sıcaklığa bağlı olarak %10 kolemanit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	77
Şekil 4.10. Sıcaklığa bağlı olarak %15 kolemanit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	78
Şekil 4.11. Sıcaklığa bağlı olarak %5 bor karbür katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	81
Şekil 4.12. Sıcaklığa bağlı olarak %10 bor karbür katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	82
Şekil 4.13. Sıcaklığa bağlı olarak %15 bor karbür katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	83
Şekil 4.14. Sıcaklığa bağlı olarak %5 btma katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	86
Şekil 4.15. Sıcaklığa bağlı olarak %10 btma katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	87
Şekil 4.16. Sıcaklığa bağlı olarak %15 btma katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi.....	88
Şekil 4.17. Özgül aşınma oranında aşınma yükünün etkisi (200°C sabit sıcaklık)	89
Şekil 4.18. Sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi (200°C sabit sıcaklık) ..	90
Şekil 4.19. %5 Bor oksit katkılı numunenin SEM görüntüsü.....	92
Şekil 4.20. %5 Boraks katkılı numunenin SEM görüntüsü	94
Şekil 4.21. %5 Kolemanit katkılı numunenin SEM görüntüsü.....	95
Şekil 4.22. %5 Bor karbür katkılı numunenin SEM görüntüsü	96
Şekil 4.23. %5 MA. katkılı numunenin SEM görüntüsü	97
Şekil 4.24. %10 MA. katkılı numunenin SEM görüntüsü	99
Şekil 4.25. %15 MA. katkılı numunenin SEM görüntüsü	100
Şekil 4.26. ticari deney numunenin SEM görüntüsü	101

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Fren kampanasını oluşturan alt fonksiyonel elemanlar.....	5
Tablo 2.2. Fren diskini oluşturan alt fonksiyonel elemanlar	6
Tablo 2.3. Fren Diski ve Kampana malzemelerinin kimyasal içeriği	7
Tablo 3.1. Fren Balatası Numunelerinin Toz Karışım İçeriği.....	46
Tablo 3.2. DeneYlerde kullanılan fren balatalarının kısaltılmış kodlamaları	49
Tablo 3.3. DeneYlerde kullanılan fren balatalarının yoğunluk değerleri.....	52
Tablo 3.4. Sürtünme katsayılarının harflendirilmesi	56
Tablo 4.1. DeneYde kullanılan ticari fren balatasının sertliği	58
Tablo 4.2. Üretimi yapılan ve DeneYlerde kullanılan fren balatalarının sertlik değerleri	58
Tablo 4.3. Farklı Yükler altındaki ticari fren balatalarının (Ra) değerleri	61
Tablo 4.4. Üretilen fren balatalarının 0.5MPa basınç yükü altındaki (Ra) değerleri	61
Tablo 4.5. Üretilen fren balatalarının 0.75 MPa basınç yükü altındaki (Ra) değerleri ..	61
Tablo 4.6. Üretilen fren balatalarının 1 MPa basınç yükü altındaki (Ra) değerleri	62
Tablo 4.7. %5 Bor oksit katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları	93
Tablo 4.8. %5 Boraks katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları	94
Tablo 4.9. %5 Kolemanit katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları	96
Tablo 4.10. %5 Bor karbür katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları.....	97
Tablo 4.11. %5 MA. katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları.....	98
Tablo 4.12. % 10 MA. katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları.....	99
Tablo 4.13. % 15 MA. katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları.....	101
Tablo 4.14. ticari deney numunesinin EDS elementsel analiz sonuçları	102

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ve Özgünlüğü

Doğa dostu, çevreci otomobillerin gittikçe artış gösterdiği son zamanlarda, otomobillerin her bir parçasının üretimine de etkisi yansımaktadır. Öyle ki otomobiller için olmazsa olmaz olan güvenliğin sağlanmasında, kontrollü yavaşlama ve durması yatmaktadır. Bu sebeptendir ki fren sistemleri, hem otomotivde hem de otomobillerde önemli bir yer tutmaktadır. Bu amaçla fren sisteminin bir parçası olan fren balataları da, fren sisteminin frenleme performansında etkili bir öneme sahiptir. Fren balatalarının dönen diske etki eden baskı kuvveti ile birlikte sürtünme davranışı ve buna paralel aşınmaya maruz kaldığı düşünülürse, balata malzemelerinin ani kuvvetlere, sürtünme davranışına ve aşınmaya karşı etkili malzeme kompozisyonlarından üretilmesinin teması anlaşılmaktadır. Ülkemizde ve dünyada maden rezervinde büyük bir hacme sahip olan bor türevli malzemelerin, fren balatalarında kullanılabilirliği, oluşturulacak farklı içerikli kompozit türlerinin davranışının aşınmaya olumlu yönde katkısının olabileceği düşünülmektedir.

Yapılacak çalışma ile bor oksit, kolemanit, boraks ve bor karbür takviyeli fren balatalarının hem kendi aralarında hem de ticari var olan fren balataları ile frenleme performanslarının karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Çalışmanın özgünlük niteliğini fren balatasında kullanılacak, ülkemiz rezervli bor esaslı (bor oksit, kolemanit, boraks) malzemelerin oranları, mekanik alaşım yapılarak belirlenen oranlarda takviyesi ile olan çalışması olacaktır.

1.2. Konu ve Kapsam

Fren sistemlerinde sürtünme karakteristiğini belirleyen ve aşınma yaşayan bileşenlerin temelinde fren balataları olsa da karşı yüzeyin malzeme içeriği de sürtünme katsayısı ve aşınmalar üzerine kritik etkiye sahiptir. Literatür değerlendirildiğinde otomotiv sektöründe kullanılan sürtünme malzemelerinin organik, metalik ve karbon esaslı olmak üzere üç farklı kategoriye ayrıldığı görülmektedir.

Asbestin kullanımının sona ermesiyle birlikte, fren balatası üreticileri organik, yarı metalik ve uçucu maddeleri kapsamayan reçine dolgusuna sahip metalik esaslı balataların geliştirilmesine odaklanmışlardır (Bijwe, 1997).

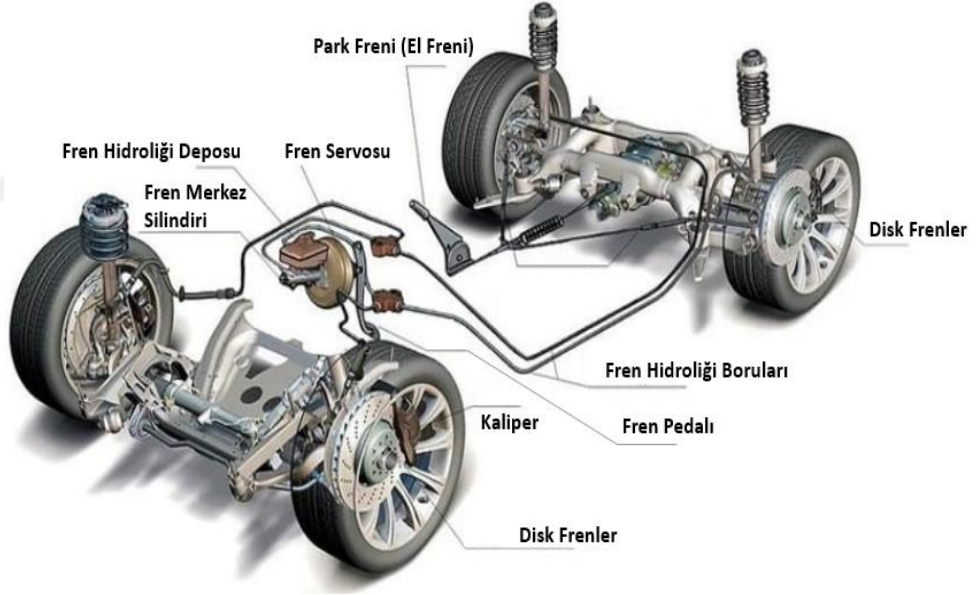
Son dönemlerde farklı içeriklerden oluşan fren balatası kompozisyonlarına yönelik çalışılmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda balata malzeme kompozisyonları farklılık göstermektedir (Can, 2019). Fren balatalarında istenen temel özellikler, zorlu çevre koşullarında dahi güvenli kullanım sağlayan ve yüksek dayanıklılığa sahip, stabil sürtünme katsayısı, aşınma oranı az, düşük ses ve anti titreşim karakteristikleridir (Gopal vd., 1996). Bununla birlikte, bazı toz malzemelerin fren balatalarında kullanımını için yurtdışından ithal edilmesi gerekmektedir. Bu durum, balata üretim maliyetini artırmaktadır. Ülkemizde zengin bir maden yatağına sahip olan bor mineralinin fren balatası üretiminde doğal bir katkı malzemesi olarak kullanılması hem çevre hem de ekonomi açısından faydalı olacaktır (Akıncıoğlu vd., 2018). Balata üretim teknolojisinde malzeme içeriği olarak özellikle ülkemizde bor takviyeli çalışmaların sayısında gittikçe artan bir araştırma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi bor malzemesinin ülkemiz sınırları içerisinde yer alan önemli bir stratejik kaynak olması hem de fren balatalarındaki aşınmaya karşı mukavemetli olmasıdır. Bor türevli kompozit fren balataları çalışmaları incelendiğinde sürekli güncelliği tutan bir çalışma olması ve oluşturulan farklı içerikli Kompozit türlerinin davranışının aşınmaya olumlu yönde etkisi olabileceği düşünülmektedir. Hatta son zamanlarda fren balataları için mükemmel termal mekanik özelliklerin yanı sıra olağanüstü tribolojik özelliklere sahip kompozit malzemeler geliştirmeye yönelikte artan bir talep mevcuttur. Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde genel olarak "sürtünme düzenleyici ve takviye malzemesi" olarak bor türevli malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Daha iyi bir sürtünme düzenleyici olarak ithal edilen bor karbür malzemelerin yanı sıra ülkemizde yüksek hacimli rezerve sahip bor oksit, kolemanit ve boraks malzemelerinin ayrı ayrı kullanıldığı da görülmüştür.

Bu amaçla farklı takviye, dolgu, bağlayıcı ve sürtünme ayarlayıcı malzemeler kullanarak otomotiv sektöründe kullanılabilir fren balatasının üretimi ve araştırılması etkili bir çalışma olmasının yanı sıra bu alanda da literatüre pozitif yönde katkı sunacaktır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Fren Mekanikliği ve Sistemleri

Çalışma sürelerince kinetik enerjiyi termal enerjiye dönüştüren frenler, bir tür enerji dönüşüm cihazı olarak da tanınırlar (Day, 2014). Burada enerji dönüşümünü gerçekleştiren sistem bileşenleri fren balataları olarak bilinmektedir. Fren balataları, sürtünme kararlılığı, uzun servis kullanım ömrü, minimum ses ve etkili titreşim sönümlenme performansı gibi özelliklere sahip olması beklenirken, tasarım ve üretim aşamasında bu özellikler göz önünde bulundurularak değerlendirilir (Ertan ve Yavuz, 2006). Araçlardaki fren sisteminin çalışma prensibi genellikle kuvvet iletimine dayanan bir şekilde nitelendirilir. Fren sistemlerinin genel görünümü otomobil anatomik yapısındaki gibi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Otomobilde fren sisteminin genel görünümü

(<https://avtotachki.com/en/chto-nuzhno-znat-o-tormoznoj-sisteme-avtomobilya/>)

2.1.1. Fren Mekanikliği

Taşıtlardaki frenleme mekanizmasında, hareket halindeki bir araca ait hız seviyesini azaltmak ve/veya durdurabilmek için sağlanan kontrol ile edilen bir kuvvetin oluşturduğu fren kuvveti önemlidir (Kocabaş, 2012). Frenleme sırasında, fren balatası kampanaya basınç uygulayarak sürtünme yaratır.

Bu sürtünme kuvveti aracın kontrollü bir Şekilde yavaŐlamasını veya durmasını sağlar. Hareket halindeki her nesne kinetik enerjiye sahiptir. Kinetik enerji denklemini yazacak olursak;

$$E_k = \frac{1}{2}(mv^2) \quad (2.1)$$

Kinetik enerji denkleminde de anlaŐılacaĐı üzere, aracın kütlesi doğru orantılı artmaktadır. Yine aynı denklem üzerinden, aracın hızı anlık olarak iki kat seviyesine çıktığında, kinetik enerjisi de 4 kat artar. Böylece, aracı durdurma gayesiyle frenleme enerjisi, taşıtın hız miktarının karesiyle doğru orantılı olarak artar. Bu nedenle, fren gücü aracın motor gücünden daha fazla olması gerektiğini ifade etmektedir (Kocabaş, 2012; ocalak, 2019).

2.1.2. Fren Sistemleri

Motorlu taşıtlarda yer alan frenleme araçların yavaŐlamasını ve durmasını sağlamada en kritik düzenek olarak bilinir (Ekingen, 2012). Fren sistemlerinde etkin parçanın, sistemin fonksiyonunu yerine getirmede en fazla aşınma tehlikesi gösteren fren balataları olduğu bilinmektedir. (Ertan, 2008). Karayolu taŐıtlarında kullanılan fren sistemlerinin eŐitleri, sınıflandırılmalarının belirli kriterlere göre yapıldığı ve her bir sınıflandırmanın farklı bir kriteri temel aldığı Şeklinde ifade edilmiştir (Kurt, 2019).

2.1.2.1. Tasarımlarına Göre Fren eŐitleri

Tasarım yapılarına göre fren eŐitleri ikiye ayrılmaktadır;

1. Kampanalı Frenler
2. Disk Frenler

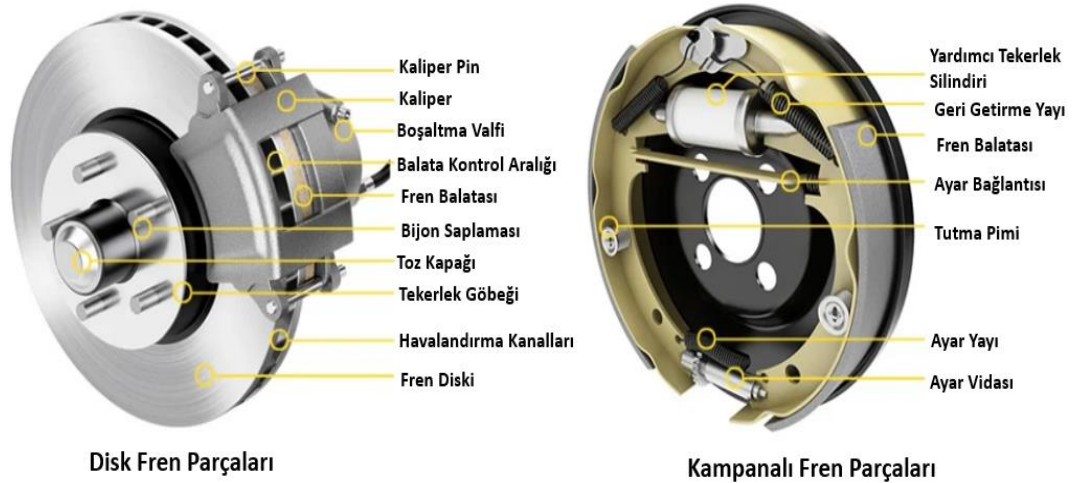
Kampanalı frenler, Şekil bağı kuran ve çözülebilen türdeki bağlantı elemanları ile tekerin merkezine konumlandırılan ve genellikle dökme demirden üretilmiş olan parçalarına denir. Fren kampanalarındaki sürtünen yüzey Şekil 2.2'te gösterildiği gibi kampananın i yüzeyinin balataların dış yüzeyi ile teması Şeklinde oluşmaktadır. Araç sürücüsü frenleme yaptığı anda tekerlek silindiri, kampanadaki balataları iterek kampana ile sürtünme bağlantısını oluşturur. Fren kampanalarını oluşturan unsurların işlevsel bileşenleri ise Tablo 2.1 de belirtildiği gibidir (Kurt, 2019).

Tablo 2.1. Fren kampanasını oluşturan alt fonksiyonel elemanlar

Tekerlek Silindiri	Fren merkezinden iletilen basınçtan kaynaklı kuvveti fren balatalarına aktararak balataların dikey eksen boyunca hareket etmesini sağlar. Dış bileşenleri genellikle dökme demir malzemedir.
Fren Pabuçları	Fren pabuçları, kampanalarla aynı formda bir yapıya sahip olup yarım ay geometrisinde tasarlanmıştır. Çelik malzemedir imal edilen fren pabuçları, kampana ile temas halinde olan fren balatalarını taşır. Fren pabuçları, tekerlek silindirinin hareketini balatalara ileterek frenleme sağlar ve fren serbest bırakıldığında da geri çekme yayının etkisiyle balataları geriye çeker.
Balatalar	Fren pabuçlarının üzerinde bulunan ve frenleme yapıldığında pabuçlarla birlikte dışa doğru açılarak kampana ile temas eden frenleme yüzeyini oluşturan ve sürtünme bağlantısı sağlayarak frenleme işlemini gerçekleştiren parçadır.
Geri Getirme Yayı	Fren pedalına basıldığında tekerlek silindirinin etkisiyle açılan ve kampana ile temas kuran fren pabuçlarını, fren serbest bırakıldığında geri çeken ve normal konumlarına getiren geri çekme yaylarıdır.

Fren diskleri ise; Tekerleğin merkezine kampana gibi çözülebilen tipte bağlantılarla monte edilen fren diski, dökme demir malzemesinden imal edilmiştir.

Genel olarak fren diskinin alt sistemlerini oluşturan işlevsel bileşenler, Şekil 2.2’de görselleştirildiği gibi Tablo 2.2 te de detaylı olarak belirtilmiştir (Kurt, 2019).



Şekil 2.2. Disk ve kampanalı fren sistemlerini oluşturan fonksiyonel elemanlar

<https://www.jaxytyres.com.au/knowledge/services-repairs/brake-service>

Tablo 2.2. Fren diskini oluşturan alt fonksiyonel elemanlar

Kaliper	Fren ana merkezinden gelen hidrolik basınçtan kaynaklı kuvveti, kaliper ve piston aracılığıyla balataları disk yüzeyine doğru itmeye çalışır. Kaliper pistonu, hidrolik basınçtan kaynaklı kuvvet ile iki balatayı diske doğru iterek frenleme işlemini yerine getirir.
Balatalar	Kaliper ve piston, sürtünme yüzeyini ve bağlantıyı oluşturan önemli bileşenlerdir. Bu yüzden, diskli fren balatalarının yüksek sürtünme katsayı değerine ve dayanımına sahip olması gereklidir.
Fren Ana Merkezi	Fren ana merkezi, fren kuvvetini tekerleklerle ileten ve kuvvet iletim elemanlarının hepsini içeren bir sistemdir. Mekanik iletimle başlayan fren kuvveti, hidrolik basınç kuvvetine ve ardından tekrar mekanik kuvvete dönüşür.
Fren Servosu	Vakum destekli fren sistemi, pozitif atmosferik basınç kuvvetine ek olarak fren pedalına uygulanan kuvvete eklemek için tek taraflı vakum oluşturarak basınç farkı yaratan bir mekanizmadır.
Basınç Oranlama Valfi	Fren dengeleme valfi, aracın ön tekerleklerine hidrolik basınç kuvvetinin arka tekerleklerden daha fazla uygulanmasını sağlayan bir parçadır.

Tablo 2.2 de yer alan fren ana merkezini detaylandırırsak, fren sistemine hidrolik basıncını uygulayan ve aynı zamanda fren hidroliğinin depolandığı bir parçadır. Bir pedal tarafından hareket ettirilen ana merkez, iki alt sistemini kontrol eder. Bu yapı, bir sistemde hidrolik bir sızıntı meydana gelirse diğer sistemin hala işlevini sürdürebilmesini sağlar (Yavuzaslan, 2006).

Sürtünmeye bağlı olarak artan sıcaklık sonucu disk veya kampanaların etkilenmeden, en az deformasyon etkisi için ısı iletim katsayı değerinin yüksek olması beklenir. Frenleme sürecinde hızla artan ısının yükseldiği, disk ve kampana malzemelerinin yüksek ısı iletim kabiliyetine sahip olması hedeflenir. Bu özellik sayesinde, frenleme esnasında oluşan ısı etkili bir şekilde dağıtılır. Bu amaçla araçlarda yer alan disk veya kampanaların ısı iletim kapasitelerinin yüksek olması istenir (Kocabaş, 2012). Bu sebeple, genelde disk ve kampana üretiminde perlitik yapıli dökme demir tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. Disk ve kampanaların içeriğinde yer alan dökme demirlerde de % 3,4 civarında karbon bulunmaktadır.

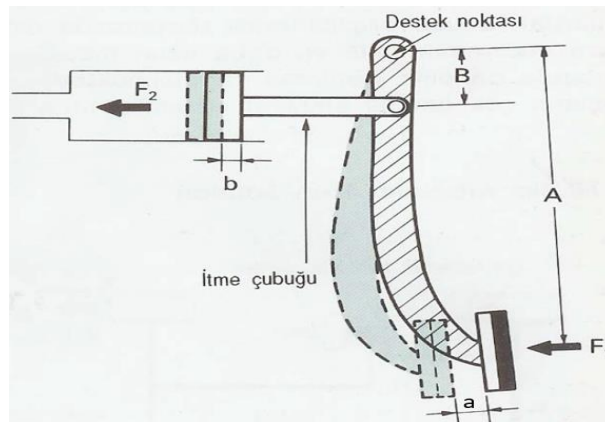
Kullanılan dökme demirlerin sertliği 170 ile 255 HB (kg/mm^2) aralığında değişkenlik gösterebilir. Diğer alaşım oranları ise Tablo 2.3'te verilmiştir.

Özellikle disklerin perlitik dökme demir grafit lamel yapılara sahip olması iyi bir kayma özelliği gösterir. Yüksek ısıl iletkenlik, titreşim absorbe edebilme, yüksek işlenebilirliği gibi etkili özelliklerinin yanı sıra aşınma direnci de önemli özellikleri arasında yer alır (Kocabaş, 2012).

Tablo 2.3. Fren Diski ve Kampana malzemelerinin kimyasal içeriği (Kocabaş, 2012)

Disk ve Kampana için kullanılan dökme demir analizi				
%C	%Si	%Mn	%S	%P(maks)
3.4	2.00-2.40	0.60-0.90	0.15	2

Kampana frenlerinde en önemli sorun, ısının etkisiyle ilişkilidir. Kapalı yapıları ve sürekli olarak tekerleklerle temas halinde olmaları nedeniyle, artan ısıyı mevcut sistemden kolaylıkla uzaklaştıramadıkları için frenleme performansını önemli ölçüde düşürebilirler. Bu durum, disk balataları açısından değerlendirildiğinde, sürtünme yüzeylerinin geniş geometrik tasarımı ve hareket halinde sürekli olarak hava sirkülasyonu ile birlikte, mevcut ısıyı sisteme göre çok daha hızlı bir şekilde izole ederler. Bu gaye ile birçok disk, oluşan ısınmayı daha hızlı tahliye etmek adına soğutma kanallarına sahiptir. Bütün bu özellikler, kampanalara göre daha üstün frenleme gücü ve fade direnci (frenleme kabiliyetinin zayıflaması) sağlarlar (Owen, 2004; Algan, 2015).



Şekil 2.3. Fren pedalının çalışma prensibi (Yavuzaslan, 2006)

Fren pedalına basıldığında, fren ana merkezinde oluşan kuvvet hidrolik basıncına dönüşür. Kaldıraç ilkesi mantığına dayalı olarak çalışan fren pedalı, pedala uygulanan düşük seviyedeki bir kuvveti fren merkezine büyük bir kuvvet olarak iletmektedir. Bu durum Pascal kanununa göre şu şekilde açıklanabilir, fren ana merkezinde yer alan hidrolik kuvvetin fren hattını takip ederek tekerlek silindirlerin her birine ulaşır. Böylece fren balatalarında bir frenleme kuvveti meydana gelir. Kaldıraç prensibinden yararlanılarak şekil 2.3 te gösterildiği gibi fren pedalı ile uygulanması sağlanır. Çalışma kuvveti ve hareketin miktarı denklem 2.2 ve 2.3 te belirtildiği gibidir (Yavuzaslan, 2006).

Çalışma kuvveti;

$$F_1 * A = F_2 * B \text{ ise } F_2 = F_1 * A/B \quad (2.2)$$

F_1 : Pedal kuvveti

F_2 : İtici çubuk kuvveti

A: Fren pedalının merkezinden destek noktasına olan mesafe

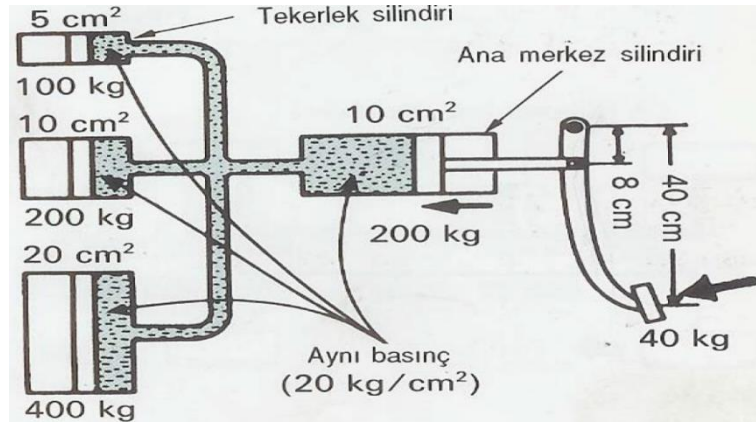
B: İtme çubuğundan destek noktasına olan mesafe

Hareketin miktarı;

$$b/a = B/A \text{ ise } a = b * A/B \text{ b} = a * B/A \quad (2.3)$$

Denklemden yer alan 'a', Pedal kenarının hareket miktarını ifade ederken, b ise İtme çubuğunun hareket miktarını temsil etmektedir. Pascal kanununa göre, harici bir kuvvetle hidrolik sıvının üzerine uygulanan basınç, bu basıncın etkisini sıvının bulunduğu her yöne eşit olarak iletir. Fren sistemi içindeki hidrolik bağlantıda da bu prensipler geçerli olmakta ve fren ana merkezinde oluşan basınç (kg/cm^2 veya psi), tekerlek silindirlerine eşit miktarda iletilir.

Frenleme kuvveti aşağıda yer alan şekil 2.4'te görüldüğü gibi tekerlek silindirinin çap boyutuna bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Eğer aracın ön tekerleklerinde daha fazla frenleme kuvveti isteniyorsa, ön silindir normalden daha büyük olmalıdır (Yavuzaslan, 2006).



Şekil 2.4. Fren ana merkezinde oluşan basınç dağılımı (Yavuzaslan, 2006)

Özellikle disk frenlerdeki fren faktörü analiz edildiğinde, frenleme kuvveti ile birlikte P_h hidrolik basıncı tekerlek fren silindirindeki A_p kesitli pistonu etkileyerek denklem 2.4 deki **baskı kuvvetini** oluşturmaktadır.

$$F_a = P_h * A_p \quad (N) \quad (2.4)$$

Burada, balatanın diske bastırmasını sağlayan kuvvet, disk ile balata yüzeyi arasında basınçtan kaynaklı kuvveti oluşturur. Yine balatadan kaynaklı ortalama yüzey basıncı denklem 2.5 deki gibi yazılır.

$$p = F_a / A_B \quad (MPa) \quad (2.5)$$

Ayrıca balata ve temas ettiği disk yüzeyi arasında oluşan sürtünme katsayısı μ ve fren yüzeyi sayısı z (Şekil 3.3’de $z = 2$) olduğuna göre, baskı kuvvetinin oluşturduğu **çevresel kuvvet** (sürtünme kuvveti) denklem 2.6 da yer adlıği gibi ifade edilir.

$$F_d = \mu * z * F_a \quad (N) \quad (2.6)$$

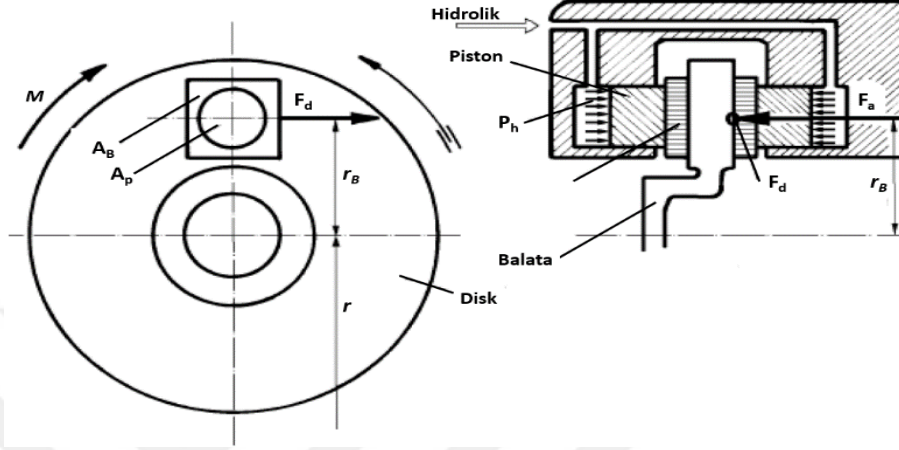
Etkili fren yarıçapı olan r_B , (aks merkezinden yaklaşık olarak balatanın ortasına kadar olan mesafe) ile denklem 2.7 de hesaplanan sürtünme kuvvetinin bağıntılı ilişkisinden fren momenti ortaya çıkar.

$$M = F_d * r_B \quad (Nm) \quad (2.7)$$

Denklem (2.4) ve (2.6) ifadelerinden de yararlanarak P_h hidrolik basıncı ile F_f fren kuvveti arasındaki denklem 2.8 de gösterilen bağıntı elde edilir.

$$F_f = F_d * r_B / r = \mu * z * P_h * A_p * r_B / r \quad (N) \quad (2.8)$$

Formülde gösterilen r ise, tekerlek yarıçapını göstermektedir (Eken, 2011). Formül ve denklemleri ile anlatılan frenleme mekaniğinde oluşan kuvvet ve momentler şekil 2.5'te detaylı olarak izah edilmeye çalışılmıştır.



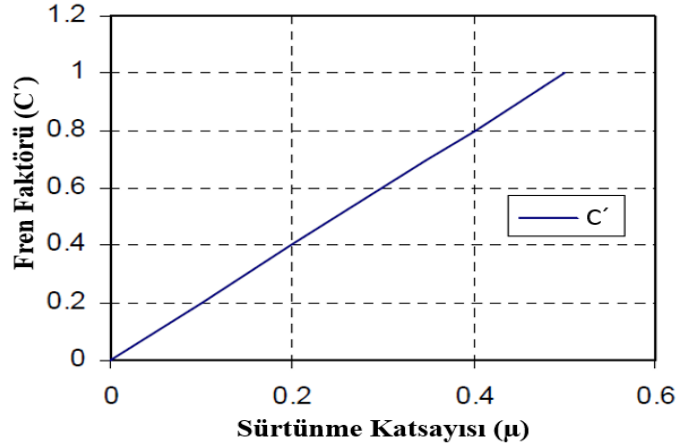
Şekil 2.5. Disklerdeki frenleme kuvvet analizi (Eken, 2011)

Mevcut fren sistemlerinde, genellikle fren sürtünme katsayısı olan μ değeri 0.3 ile 0.4 aralığında yer almaktadır. Balata yüzeyine uygulanan ortalama fren basınçları olarak bilinen basınç değeri ise 600 ile 800 N/cm² arasında bulunur. Bu değer, bazen 1200 N/cm²'ye kadar yükselebilmektedir. Diskli fren sistemlerinde tekerlek torku aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Kocabaş, 2012).

Literatüre göre r_B / r için 0.4 kabulü yapılır (Kocabaş, 2012). Frenleme esnasında oluşan frenleme momenti ile tekerleği yavaşlatma torku ve/veya momenti birbirine eşit olacaktır. Öncelikle Newton'un ikinci yasasına göre, hareket eden nesneye (araç) uygulanan bir sürtünme kuvveti orantılı bir yavaşlama üretecektir. Frenleme etkin olan bir diğer unsur olan fren faktörü ise çevresel kuvvet ile baskı kuvveti arasında orantılı bir bağlantıya sahiptir. Böylece, F_d / F_a oranı fren faktörü olarak adlandırılır. Disk frenler için fren faktörü denklem (2.6) bağıntısından yararlanarak denklem 2.9 şeklinde formülün nihai hali oluşmaktadır.

$$C' = F_d / F_a = \mu * z \quad \dots \quad z=2 \text{ olduğu için de; } C' = 2 \mu \quad (2.9)$$

Sürtünme katsayısına bağlı olarak değişim gösteren frenleme faktörü Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi yer almaktadır (Eken, 2011).



Şekil 2.6. Disk frenlerde fren faktörü ile sürtünme katsayısının değişimi (Eken, 2011)

2.1.2.2. Fren Gücünün İletim Sistemine Göre Fren Çeşitleri

Fren gücü iletim sistemine göre dört farklı fren türüne sahiptir. Bunları sırasıyla; mekanik frenler, havalı frenler, hidrolik frenler ve elektrikli frenlerdir. Mekanik Frenler, temel bir fren sistemi olup, kullanıcının ayak kuvvetini mekanik bağlantılar aracılığıyla tekerleğe ileterek aracın durdurulmasını sağlayan bir mekanizmadır. Şu zamanlarda araçların durağan halde iken olası kontrol dışı bir hareketini engellemek amaçlı el freni olarak kullanılmaktadırlar. Otomobillerde genellikle hidrolik fren sistemi kullanıldığı görülmektedir. Fren kuvvetinin iletiminde akışkan ürün olarak hidrolik sıvı yer aldığından ismini de buradan almaktadır. Hidrolik frenlemede, uygulanan mekanik kuvvetin değişimi öncelikle hidrolik basınçtan kaynaklı kuvvete daha sonrasında da mekanik kuvvete dönüştürülerek tekerleklere etki ettirilir.

Araç bünyesinde yer alan kompresör desteğiyle, basınçlı hava üreterek bu durumun tetiklenmesiyle birlikte basınçlı havanın frenlere gelmesiyle frenlemeyi sağlayan sistemlere havalı frenler denir. Bu tip frenlerde, düşük düzeyde kuvvet etkisiyle üst seviyede frenleme kuvveti elde etmesi, kısaca optimum frenlemeyi sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Bu tip frenler, genellikle ağır vasıtalarda tercih edilmektedir (Kurt, 2019).

Elektrikli fren sistemleri, sürücü aracı durdurmak veya cihazlar arasında bağlantı kurmak için frene bastığında elektrik gücüyle çalışan cihazlara sahip sistemleri içerir. Elektrikli servis frenleri ve elektrikli park frenleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Elektrikli servis freni, hidrolik basınç yerine doğrudan motor tahrikli disk fren balatasını fren rotoruna bastıran bir mekanizmaya sahip fren sistemidir. ECU (elektronik bilgisayar ünitesi), fren pedalından gelen elektronik sinyalleri ve araç sensörlerinden gelen araç dinamik bilgilerini değerlendirir ve fren kuvvetini kontrol etmek için elektrikli aktüatörü çalıştırır. Elektrikli park fren sistemi ise, el frenini elektrikselsel olarak çalıştırırken, servis freni geleneksel hidrolik tipte kalır (www.akebono-brake.com/english/product_technology/technology/electro_mechanical.html).

2.2. Fren Balataları

Motorlu taşıtların frenlemelerinde kritik bir göreve sahip olan balatalar, aslında sürtünme işinin gerekli olduğu tüm makine elemanlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Balatalarda kullanılan sürtünme malzemeleri, 10 ile 15 aralığında değişen farklı malzeme içeriklerinin bir araya geldiği kompozit malzemelerdir. Otomotivde istenilen beklentileri yerine getirmek gayesiyle çok değişik kompozisyon yapılarına sahiplerdir. Balata, farklı hava koşulları, çevre şartı ve yük etkisi altında yüksek sürtünme katsayı değerine sahip olan, aşınma dayanımı da üstün malzemedir. (Amarnath vd., 2006; Algan, 2015; Can, 2019).

Frenlerde en kritik bileşenlerden biri olan balatalar, süreç döngüsü içerisinde aşınmasına bağlı olan yıpranma, sadece disk ve miller de olduğu gibi mekanik parçalara sorun oluşturmakla kalmayacak aynı zamanda hayatî tehlikeler seviyesindeki problemlerinde ortaya çıkmasına sebep olabilecektir (Amarnath vd., 2006; Algan, 2015; Can, 2019).

Fren balatalarından yüksek sıcaklık dayanıklılığı, yüksek aşınma dayanımı, yüksek sertlik, korozyona dayanıklılık, hafiflik ve en önemlisi de kararlı bir düzeyde olan yüksek sürtünme katsayısına sahip olmaları beklenmektedir (Singh vd., 2015; Algan, 2015). Ticari piyasada tercih edilen ve kullanılan balatalar incelendiğinde farklı şekilde, boyutta ve içerikte olan türleri karşımıza çıkmaktadır. Bu duruma etki eden faktörler olarak, balataların kullanıldığı taşıtın hızı, yük hacmi, boyutları ve frenleme esnasında sönmülediği enerji miktarına bağlıdır. Genellikle fren balataları, içeriğinde yer alan bileşenlerin kompozisyonuna göre organik esaslı, metalik esaslı ve karbon esaslı balatalar olmak üzere 3 kategoriye ayrılmaktadır (Bijwe, 1997).

2.2.1. Organik Esaslı Fren Balataları

Organik esaslı balataların bileşenlerinde bir veya birden fazla bağlayıcı etkisi olan yumuşak ve kolay aşınma özelliğine sahip reçineler, sert ve aşınmaya dayanıklı fiberlere, dolgu malzemelerine ve aşındırıcı özellikteki partiküllere kadar geniş bir aralığı kapsayan malzemelerden oluşmaktadır. Genellikle birçok farklı türdeki (10 ile 20 arasında değişen) tozların sıkıştırılmasıyla elde edilir (Can, 2019; Yılmaz, 2022). Ham maddeleri kolayca elde edilebilen organik esaslı balatalar, düşük gürültü, iyi aşınma direnci ve toz özellikleri ile otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanıma uygundur. Yüksek sıcaklıklarda frenleme zayıflığı (fade), diğer yapıdaki balatalara göre daha fazla ve iyi performans göstermemektedir (Sundarkrishna, 2012; Hassain vd., 2014). Organik (reçine bağlı) esaslı fren balatası malzemeleri üç çeşit olarak bilinmektedir. Sırasıyla, asbest katkısız organik içerikli balatalar, asbest katkılı organik içerikli balatalar ve yarı metalik organik balatalardır.

Ancak yapılan çalışmalardan asbestin sağlamış olduğu mekanik özelliklerin yanı sıra çevreye ve insan sağlığına olan zararlı etkiler, bu takviye malzemesinin kullanımı 1989 yılında tamamen yasaklama yoluna götürmüştür (Yılmaz, 2022). Doğal bir silikat mineral yapısına sahip olan asbest, 500 °C sıcaklığın üstüne çıktığında termal kararlılık göstermektedir. Sürtünme yüzeyinin kendisini yenilemesiyle birlikte termal yalıtıma da katkı da bulunur (Algan, 2015). Esnek yapıda, maliyeti düşük ve üretilen silikatların aşındırma ve sertliği yüksek düzeyde olan özellikleri mevcuttur. 1400 °C sıcaklığa kadar bozulmayan lifli bir yapıya sahiptir. Asbest oranı, fren balatası kompozisyonunda % 30 ile 70 aralığında değişmektedir (Algan, 2015). Yakın bir döneme kadar da en çok kullanılan balatalar arasında asbest içeren balatalar yer almıştır (Yılmaz, 2022).

Asbest liflerinin, özellikle insan sağlığında üst solunum yollarında yol açtığı kanserojen etkilerin tespit edilmesi sonucunda, Avrupa Birliği 1999 yılında asbestin balatalardaki kullanımı yasaklanarak, asbestin yerini alabilecek nitelikte malzemeler araştırılmaya başlanmıştır. Bu sebeple camın, metalin, seramik malzemelerin, grafitin, kauçuk ve mineral fiberler gibi malzemeler kullanılarak yeni nesil balata içeriğine sahip kompozisyonlar geliştirilmiştir (Maleque vd., 2012; Algan, 2015). Örneğin asbest yerine tercih edilen ve sıklıkla oluşturulan içerikte yer alan kevlar; sert, lifli ve yeterince hafif olmasına ek olarak üstün termal kararlılıkta göstermektedir.

Karbon fiberler ve kevların, asbest ile karşılaştırıldığında üstün anti-frenleme zayıflığı özelliği sergilemesi de ortaya çıkmıştır (Maleque vd., 2012; Algan, 2015). Yarı-metalik organik balatalar ise sentetik ve organik fiberlerin karışımından oluşmaktadır. Bu tip balatalar, diğer organik balatalara göre fade dayanımı ve sertlik etkisini yüksek seviyede göstermektedir. Yarı-metalik formu oluşturan sürtünme malzemeleri genellikle % 20 ile 80 oranlarında metalik katkı içerirler. Oluşturulan malzemelerin bünyesinde metaller olarak daha ziyade çelik, demir tozu, bakır tozu ve pirinç fiberler olarak yer edinmişlerdir (Kukutschova vd., 2009; Algan, 2015).

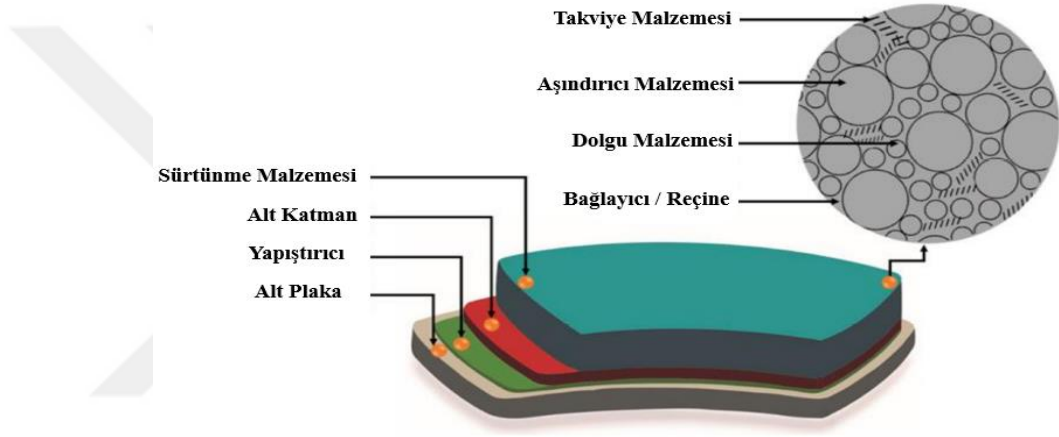
2.2.2. Metalik Esaslı Fren Balataları

Metalik yoğunluğu fazla olan balatalar, sinterlenmiş balatalar olarak ta bilinmektedir. İçeriğini oluşturan bileşenler metal matris, katı yağlayıcılar, sürtünme düzenleyiciler ve aşındırıcı malzeme gruplarını kapsamaktadır. Bileşenlerin, homojen bir şekilde karıştırılarak preslenmesi ve birleşip yoğun bir heterojen katı oluşturma kadar sinterlenmesiyle elde edilirler. Bu malzemeler, olağanüstü termal stabiliteye ve termal kopma mukavemetine sahiptir. İçerdikleri matris türüne göre kendi içlerinde 3 gruba ayrılabilir. Bu gruplar, bakır esaslı, demir esaslı ve bakır demir esaslı balatalardır. Yüksek ısı iletkenliğine ve aşınma direncine sahip olan bakır esaslı balatalar, hızlı trenlerde, uçaklarda ve otomobillerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 2022).

Bu tür malzemeler, “fade” durumuna göre üstün seviyede bir dayanım sağlamalarına karşın yüksek seviye değerinde pedal basıncına da ihtiyaç duymaktadır. Gürültülü bir seviyede çalışan metal formulu balatalar, belirli bir ısınmaya kadar zayıf bir davranış modeli sergilese de sıcaklıkları artıp yüksek seviyelere geldiğinde performansları gayet iyidir (Algan, 2015). Pahalı ve ağır olmalarından dolayı metal matrisli sürtünme malzemeleri, organik yoğunluktaki sürtünme malzemelerine göre dezavantaj oluşturur (Selamat, 2005).

Belirli katmanlara sahip olan metal matrisli balatalarda, en kritik düzeydeki katman balatanın üst kısmında yer almakta ve sürtünme tabakası olduğu belirtilmektedir (Singh, 2015). 6 ile 9 mm aralığında değişkenlik gösteren kalınlığa sahip olan sürtünme katmanının içerdiği malzeme kapsamı balatanın kullanılacağı taşıt türüne göre farklı seviyelerde değişiklik göstermektedir (Borawski, 2020).

Sürtünme katman düzeylerinin alt kısmında yer alan ve alt katman olarak adlandırılan yapıştırma tabakası yer almaktadır. Sürtünme malzemesinin tutunmasını sağlayan bu tabaka, 1-4 mm arasında değişen bir kalınlığa sahiptir. Alt katman, arka plakanın üzerine iyi bir şekilde tutunması için çoğunlukla 1 mm'nin altında bir taban kaplama ile gerçekleştirilmektedir. Arka plaka sahip olduğu profilli kenarları sayesinde balatanın kaliper kılavuzu boyunca hareket etmesine yardımcı olmaktadır (Borawski, 2020). Şekil 2.7'de fren balatalarının sahip olduğu farklı tabakaların kademeli görünümü yer almaktadır.



Şekil 2.7. Fren pedalının katmanlı yapıları (Irawan vd., 2022)

2.2.3. Karbon Esaslı Fren Balataları

Karbon fiberler, otomotiv, havacılık, demiryolu gibi çeşitli endüstrilerde kullanılan kompozit yapıların içerisinde takviye malzemesi olarak yer almıştır (Krenkel vd., 2002). Karbon türevli (C/C) kompozitler, karbon fiber takviye edilmiş karbon matrisinden oluşmaktadır. C/C kompozit fren balataları, diğer türdeki balatalardan farklı olarak düşük yoğunluk (yaklaşık 2 g/cm³), mükemmel ısı dayanımı ve yüksek aşınma direnci özelliklerine sahiptir. Bu balataların üretiminde yer alan içerikler, fiberler poliakrilonitril (PAN) ve zifttir (Algan, 2015; Yılmaz, 2022).

2.3. Fren Balatası Malzeme Bileşenleri

Fren sisteminde performans ve sürtünme balata içeriği ile değişmektedir. Balatayı oluşturan içerikler, fren etkisi altında optimum performansı sağlayabilmesi adına disk malzemesine ait yüzey alanının yaklaşık % 10 ile %15'ine etki etmesi beklenmektedir. Bu özellikler, yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı, aşınmaya

yönelik dayanıklılığı, disk için avantajlı, düşük sıkıştırılabilirliğe sahip olması, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması, gürültü ve titreşimin en düşük seviyelerde olması, çevreci olması, kolay ve ucuz üretilebilir olması, hedeflenen servis ömrü süresini yerine getirebilmelidir. Bu belirtilenlere ek olarak balata malzemelerinin belirli bir düzeyde korozyon mukavemetine de sahip olması istenir. Aşınma direncine ve farklı operasyon koşullarına bağlı olarak sürtünme balataları uzun bir zaman (birkaç soğuk mevsim boyunca) yerinde kalır. Yazın toza, kışın rutubet ve suya maruz kalan balatalar, farklı mevsim koşullarında uzun bir zaman sabit durmaktan dolayı sürtünme yüzeyinin fren diskine yapışma problemi sadece uygun bir kompozisyon içeriği ile üstesinden gelinir (Ertan, 2008). Balata kompozisyonunu oluşturan malzeme bileşenleri, fonksiyonlarına göre **takviye, bağlayıcı, sürtünme düzenleyici ve dolgu maddesi** olarak sınıflandırılır (Mohanty vd., 2007; Verma vd., 2015).

2.3.1. Bağlayıcı Malzemeleri

Sürtünme malzemelerinin yapısal bütünlüğünü korumak amacıyla eklenen bağlayıcı malzemeler mekanik ve termal gerilmelerin etkisi altında, sürtünme malzemesini oluşturan diğer içeriklerin bütünlük halde tutma görevi üstlenir (Öztürk vd., 2013).

Yüksek sıcaklıklara dayanıksız olmasından dolayı sürtünme malzemesi kompozisyonu içerisinde etkisi en az anlaşılan malzemedir. Sürtünme malzemesinin yapısında bağlayıcı olarak yer alan termoset fenolik reçine, sönümlemeyi arttırmak için lastik malzeme ile bütünlük olarak kullanılmaktadır. Ürün türüne göre sıvı veya katı halde bulunabilmektedir. Genellikle sürtünme malzemeleri kompozisyonunda, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olan novolac tipteki fenolik reçineler tercih edilmektedir. Bağlayıcının bozulma sıcaklığının üstündeki sıcaklık koşullarında ara yüzeyde oluşan sürtünme filminin sürekli olarak korunması, sürtünme malzemesinin frenleme performansı ve aşınma mukavemeti için büyük önem taşır. Çünkü frenleme esnasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar, reçinenin yapısını bozarak ayrışmasına ve kömürleşerek bağlayıcılık özelliğini kaybetmesine yol açar (Ertan, 2008).

Bu durum, sürtünme kuvvetlerinde ciddi bir kayıp olduğundan, frenler için bu durum fren zayıflaması (fade) olarak bilinmektedir. Sıcaklığın yüksek olduğu değerlerde frenlerin tutmama durumunun en başlıca sebepleri arasındadır. Fenolik

reçinenin seçimi ve miktarı fren balatasının yeni nesil geliştirilmesinde etkili olmaktadır. Üstün mukavemet ve sürtünme performansı için sürtünme malzemesi genellikle iki veya üç farklı bağlayıcı malzemeden oluşmalıdır. Balata bünyesinde reçine miktarının düşük olması fiziksel özelliklerin zayıflığına, yüksek miktarda olması ise yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının düşmesine yol açmaktadır (Ertan, 2008). Bağlayıcı olarak görev alan diğer reçineler ise, COPNA, silikon, siyanat ester, epoksi ve termoplastik polimid bilinmektedir (Chan vd., 2004; Bijwe vd., 2005).

2.3.2. Takviye Malzemeleri

Takviye malzemeleri, balatanın sürtünme-aşınma davranışında doğrudan etkili olup, balatanın performansında ciddi katkı sunarlar (Algan, 2015). Sürtünme malzemelerinde mekanik yönden mukavemet sağlamada destek olurlar (Öztürk vd., 2013). Fren balatalarında kullanılan takviye malzemeleri; çelik yünü, keklar, kaya yünü, cam elyaf, cam fiberi, bor elyaf, seramik fiberler, karbon, metal ve çeşitli mineral gibi birçok malzemelerdir (Kim vd., 2001; Luo vd., 2010).

Cam elyafı, yüksek ısı dayanımı ve mekanik yönden mukavemeti nedeniyle diğer malzemelere katılarak (özellikle reçine ile bağlanabilir olması) kompozit malzeme üretiminde kullanılır (Chan vd., 2004; Akıncıoğlu, 2018). Kırılgan özelliğe sahip olması, balata bileşiminde tek başına takviye elemanı olarak yeterli değildir (Chan vd., 2004). Balata kompozisyonunda yer alan diğer bileşenlerle birlikte kullanıldığında frenleme esnasında balataların ısıl şişmesini önlemesinin yanı sıra aşınma dayanımını arttırmada da etkili olmaktadır (Satapathy vd., 2005a; Baklouti vd., 2015). Cam elyafının takviye elemanı olarak yer aldığı balatalarda işletme şartlarına uyum gösterse de uygulamalarda ses çıkardığı gözlemlendiği belirtilmektedir. Balatalardaki ses etkisi, balata bileşenleri ve imalat süreci ile ilişkilidir. Literatürde Phenolformaldehit reçine miktarının düşürülmesi ile iyi yönde düzelmenin olabileceği de belirtilmiştir (Kocabaş, 2012). Çok fazlı malzemeler grubuna giren bor elyaflarda, faz yapılarının bir veya birkaçı kristal yapıdadır. Epoksi veya polimit gibi reçine matrisler ile bor elyaflar arasında birleşme bağlarının mukavemeti yüksektir (Perettie vd., 1998).

Mutlu ve ark. elyafa alternatif olarak bakır tozu, borik asit, kaşhev, alümina, barit, grafit kullanarak sürtünme içeriğine sahip bir form oluşturmuşlardır. Borik asit

eklenmiş balatalarda frenleme üzerine olumlu etkilerin olduğunu görmüşlerdir (Mutlu vd., 2007).

Fren balataları için asbestin yerine tercih edilen karbon (grafit) elyaflar ise, içerisinde küçük çapta karbon atomlarından oluşan fiberler bulunan malzemelerdir (Krenkel, 2004). Karbon fiberlerinin etkisiyle ortaya çıkan fren balataları da düşük yoğunluklu, yüksek ısı dayanıma sahip, düşük termal genleşme ve iletkenlik özelliklerine sahip olmuşlardır (Windhorst vd., 1997). Yapılan bir çalışmada balata içeriğinde yer alan karbon elyaf miktarı arttıkça, sürtünme katsayısı ve aşınma oranının da artış olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca fren balatasında sıcaklık 100°C'den-300°C'ye doğru artış gösterdiğinde karbon elyaflı balatanın (μ) sürtünme katsayısında da artış olduğunu gözlemlemişlerdir (Guan vd., 2004).

Yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilen çelik yünleri, sürtünme malzemelerinde elyaf olarak yer almaktadır. Karıştırma esnasında parçalanmaya karşı dirençli bir malzemedir (Lu vd., 2002; Lu, 2006; Mandal vd., 2008). Çelik yünü katkısıyla oluşturulan kompozitteki yoğunluğun artan bir eğilim gösterdiğini belirten Bijwe ve ark., çelik yününün artmasıyla boşluk içeriği artarken, mekanik özelliklerin bozulduğunu buna karşın ise aşınma da herhangi bir değişim göstermediğini fark etmişlerdir (Bijwe vd., 2007). Taş (kaya) yünü, düşük yoğunluklu olması ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruması nedeniyle kompozit malzemelerin içerisinde elyaf olarak kullanılmıştır. Çeşitli formlarda piyasada yer alan taş yünü, fren balatalarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Isı, titreşim, korozyon ve akustiğe karşı mükemmel direnç sağlamasının yanı sıra yüksek mekanik mukavemete de sahiptir (Satapathy vd., 2006; Öztürk vd., 2013). Hafif karbon kökenli sağlam liflerden oluşan kevlar, ticari olarak en mukavemetli, rijit ve aşınma dayanımı iyi olan organik elyaftır. Kevlar, tescilli marka olup para aramid elyaflara Du-Pont firmasının verdiği ticari addır (Kocabaş, 2012; Akıncıoğlu, 2018).

Sıcaklığın artması ile bu özelliklerin kademeli olarak azaldığı görülse de bu durumun 425°C sıcaklıkta bir dönüm noktası oluşturduğu ve kısa süre içinde 530°C dereceye kadar rahatlıkla dayanabilme özelliklerine sahiptirler (Kocabaş, 2012). Balataların preslenmesi sürecinde şeklinin korunmasına katkı sağlayan aramid fiberlerin, doldurma özelliği yüksek olması sebebiyle kompozisyon içerisinde miktarları arttıkça

balatanın ısı mukavemetini de arttırmaktadır (Jang vd., 2000; Akıncıoğlu, 2018). Yapılan bir çalışmada, %10 aramid katkısının olduğu fren balatasında optimum sürtünme ve aşınma değerlerini elde ettiklerini belirtmişlerdir (Aranganathan vd., 2016; Akıncıoğlu, 2018).

Metalik elyaflara göre daha yeni tercih edilmeye ve kullanılmaya başlanan seramik elyaflar, yüksek ısı direncine sahiplerdir (Langhof vd., 2016). Fren balatalarında tercih edilen seramikler için düşük gürültü ve mükemmel aşınma dayanımına sahip özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar (Sundarkrishnaa, 2012). Hafif olması ve yüksek mukavemeti sebebiyle takviye malzemesi olarak kullanılmaya çok yatkın olan seramik elyafların fren balatalarının yanı sıra fren disklerindeki kullanımlarında da tercih edilmektedir (Han vd., 2006). Seramik ile aramid elyaflarının etkisinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, seramik katkısının yüksek olduğu numunede fade etkisinin meydana gelmediği buna karşın aramid katkı miktarının arttığı numunelerde ise sürtünme katsayısının daha stabil düzeyde olduğu belirtilmiştir (Kumar vd., 2012). Çeşitli seramik elyaflar içersinde potasyum titanat ve aramid hamuru ile alüminyum-silikon elyafları yer almaktadır (Han vd., 2008). En çok kullanılan metalik takviye malzemelerinden birisi olan pirinç talaşı, bakır çinko alaşımı bir yapıya sahiptir. Mekanik dayanıma sahip olması ve ucuz olması sebebiyle tercih edilir (Akıncıoğlu, 2018). Bakır ve bakır alaşımli bu tip malzemelerin katkısındaki temel amacın sürtünme ara yüzeylerinde termal difüzyonu sağlamanın yanı sıra karşı yüzeyin agresif özelliğini önleyerek sürtünme katsayısını da kontrol altında tutmayı sağlamaktır (Jang vd., 2003).

2.3.3. Dolgu Malzemeleri

Fren sürtünme malzemesinin özelliklerini değiştirmede önemli katkı sağlayan dolgu malzemelerinin doğru tercihinin yapılması, sürtünme malzemesinin ek yapılacak katkı bileşenlerine bağlıdır (Akıncıoğlu, 2018). Dolgu malzemeleri, ürün maliyetini düşürmenin yanı sıra üretimin elde edilebilirliğini arttırmada da etkili olurlar. Baryum sülfat (barit), kalsiyum karbonat, potasyum titanat, mika, kauçuk ve vermikülit gibi farklı mineraller yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen dolgu malzemeleri olarak bilinmektedir (Eriksson vd., 2000; Eriksson vd., 2002; Akıncıoğlu, 2018).

Baryum sülfattan oluşan bir mineral olan Barit ($BaSO_4$), genellikle beyaz ya da renksizdir. Bazen de sarı ve gri renklerde de olabilir. Isı kararlılığı, frenleme

karakteristiğine önemli düzeyde etkisi ve maliyeti az olduğu için balata endüstrisinde dolgu malzemesi olarak tercih edilmekte ve yaygın olarak ta kullanılmaktadır. Baryum, yoğunluğu yüksek olması münasebetiyle balatanın yoğunluğunu da arttırmaktadır (Akıncıoğlu, 2018). Genellikle sürtünme katsayısına etkisinin olmadığı kabul edilmektedir (Kocabaş, 2012). Baryum sülfatla aynı özellikleri taşıyan ve bir başka alternatif dolgu maddesi olan kalsiyum karbonat (CaCO_3), barite göre daha ucuz olsa da yüksek sıcaklıklarda barit kadar kararlı olmadığı da belirtilmektedir (Chan vd., 2004; Akıncıoğlu, 2018). Dolgu malzemesi olarak sık tercih edilen malzemelerden biriside mikadır. Öyle ki düşük frekanslı frenleme gürültüsünü önlemeyle birlikte katmanlı modelinden dolayı frenleme gücünün yükseldiği durumlarda katmanlar birbirinden ayrılabilir (Akıncıoğlu, 2018). Endüstriyel öneme sahip olan ana minerali ise muskovittir (Kocabaş, 2012).

Frenleme esnasında oluşan gürültüyü önlemede mika gibi göreve sahip olan vermikülit, katmanlı bir forma sahip olmasına rağmen gözenekli hali ve aşınma dayanımı daha yüksektir. Yalıtkan özelliği ve asbeste alternatif olması sebebiyle fren balatasındaki yapıya dolgu malzemesi olarak Potasyum titanat malzemesi de kullanılmaktadır. Balataların ısı dayanımını da arttırmaktadır. Fren balataları ile ilgili yapılan çalışmalarda, balataların sürtünme aşınma performanslarına pozitif yönde etki ettiği belirtilmiştir (Akıncıoğlu, 2018). Viskoelastik özelliğe sahip olmasından dolayı fren malzemelerini oluştururken sık tercih edilen kauçuk, ses oluşumunu azaltma etkili olurken, balatanın sıkıştırılabilirlik özelliğini de değiştirebilmektedir (Akıncıoğlu, 2018). Frenleme performansına kauçuk bileşenlerinin etkisinin incelendiği bir çalışmada, fenolik reçineli ve kauçuk içerikli kompozitler geliştirmişlerdir. Kauçuk bazlı malzemelerde sürtünme katsayısının yüksek olurken reçine bazlı malzemelerde ise aşınma dayanımının yüksek olduğunu saptamışlardır (Saffar vd., 2012).

2.3.4. Sürtünme Düzenleyici Malzemeler

Bu grupta yer alan malzemeler, sürtünmeye bağlı temas eden yüzeyleri arasındaki pirolize sürtünme tabakasını kaldırarak balatadaki aşınma davranışını ve sürtünme katsayısını kontrol altında tutan bileşenler olarak bilinmektedir.

Balata bünyesinde aşındırıcılar ve yağlayıcılar olmak üzere yer alırlar. Aşındırıcı malzemeler, balatada sürtünme katsayısını artırırken, yağlayıcılar tam tersi yönde etki

yaparak sürtünme katsayısını azaltmayı sağlamaktadır (Eriksson vd., 1999; Sundarkrishnaa, 2012). Aşındırıcı olarak balata yapısında görev alan malzemeler, sürtünme yüzeyini temizleme ve sürtünme filminin oluşumunu kontrol ederler. Kayma ara yüzeylerindeki yüksek sıcaklıkların etkisiyle termal bir ayrışma sonucu oluşan sürtünme filmlerinin yüzeyden bertaraf edilmesine katkı sağlayıcıdır (Cho vd., 2008). Aşındırıcı (abrasiv) parçacıkların malzeme içerisindeki dizaynında boyutlarına, şekillerine, sertliğine, aşınma direncine yaptığı etki göz önüne alınır (Öztürk vd., 2013). Fren balatalarında aşındırıcı olarak, kuvars, alüminyum oksit (Alümina), demir oksit, metal oksit, boron karbit, bor oksit, boraks, zirkonyum oksit, titanyum oksit, zirkonyum silikat yanı sıra organik esaslı meyve kabuğu tozlarının da kullanımı tercih edilmektedir (Öztürk vd., 2013; Akıncıoğlu vd., 2018b; Kumar vd., 2019). Bu tür malzemelerin hatalı seçimleri ise frenlerde gürültü ile beraber disk kalınlığında değişime ve titreşim gibi problemlere yol açmaktadır (Ertan, 2008). Sürtünme ayarlayıcı malzemelerin yapısında bulunan yağlayıcılar ise, kuru ve yağ yağlayıcı olarak iki gruba ayrılır (Dönmez, 2000). Sıcaklığın artmasıyla birlikte yüksek değerlerde sürtünme katsayısını stabil edebilme, aşınma seviyesini kontrol altına tutma, gürültüyü sönmüleme, balata ile disk temas yüzeyinde kararlı ve yüksek elastik özelliklere sahip tribo film oluşmasını sağlama ve titreşimi sönmüleme amacıyla kullanılmaktadır (Ouyang vd., 2004). Grafit ve molibden disülfid yaygın olarak kullanılan kuru yağlayıcılardır. Kurşun ise önceleri yaygın olarak kullanılan yağ bir yağlayıcı (kurşun 327 °C sıcaklıkta ergidiği için yağ yağlayıcı olarak sınıflandırılır, çünkü bu sıcaklık sürtünme yüzeyinde oluşan sıcaklığın oldukça altındadır) olmasına rağmen son yıllarda çevreye etkisi ve sağlık riskinden dolayı kullanımı terk edilmiştir (Dönmez, 2000).

Kuru yağlayıcı olan grafit, çok yapılı karbon şekilleri ve tabakalı bir form haline sahiptir. Hegzagonal düzendeki karbon atomları, kuvvetli düzeyde kovalent bağlarla bağlıdır. Tabakalar kendi aralarında zayıf düzeyde ikincil bağlarla bağlı olduğundan birbirleri üzerinde rahatça kaymaktadır. Tabakalardaki kayma rahatlığı, grafitte yağlayıcılık özelliği katmaktadır. Katmış olduğu bu özelliğinden dolayı da fren balatalarda sürtünme ayarlayıcı olarak kullanımı tercih edilir (Öztürk, 2004).

Ayrıca sürtünme yüzeylerinde küçük temas alanları oluşturarak, buna bağlı yüzeylerden yırtılmanın az olmasını sağlamakta ve makaslama değerinin düşük olması

sonucu sürtünmenin azaltılmasında da etkin rolü bulunmaktadır (Toros, 2011). Yüksek sıcaklık, iyi ısı iletkenliği, ısı şok dayanımı ve korozyona olan mukavemeti nedeniyle sürtünme malzemelerinde yağlayıcı olarak tercih edilmektedir (Öztürk, 2004).

Bor karbür ve/veya borik asitten yüksek sıcaklıklarda sentezlenerek üretilen hegzagonal yapıda bor nitrür (h-BN), hem oksidasyon mukavemeti yüksek hem de yüksek sıcaklığa dayanıklı bir malzemedir. Toz formunda imal edilen bu malzeme, yüksek sıcaklıklarda yağlama malzemesi davranışında da çok geniş kullanım alanlarına sahiptir (Sugözü, 2009). Sentetik bir katı yağlayıcı olarak ta bilinir. Ayrıca katı yağlayıcı olarak bor oksit B_2O_3 ve boraksın ($Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$) kullanılmasının etkili ve verimli olduğunu aşınmaya karşı dayanımı arttırdığını yapmış olduğu çalışma ile ortaya koymuştur (Kılıçay, 2012). Yine bir başka bir çalışmada da, bor oksitlerin yüksek sıcaklıklarda yağlama özelliğinin daha da iyi olduğunu belirtmişlerdir (Hu vd., 2007). Bor oksitin, katı yağlayıcı olarak sürtünme performansında yüksek termal esneklik sunduğu da bildirilmiştir (Takadom, 2008).

2.4. Sürtünme ve Aşınma Mekanizması

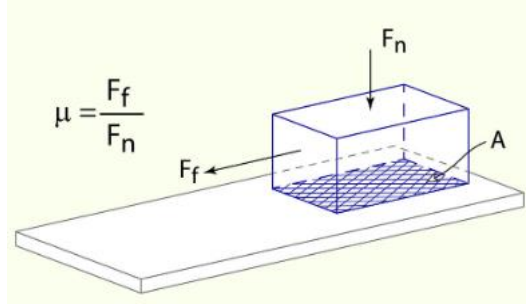
2.4.1. Sürtünme

Temas eden cisimler arasındaki sürtünme, hareketi başlatmak veya sürdürmek için üstesinden gelinmesi gereken kuvvet ve bağıl hareket sırasında dağılan enerji olarak kendisini gösterir (Bogdanovich vd., 2009). Sürtünme terimi, göreceli hareket halindeki malzemeler veya cisimler için kademeli kinetik enerji kaybını tanımlarken (Röder vd., 2000), malzemelerin kuru sürtünmesi için ise, temas halindeki iki yüzey arasındaki göreceli harekete karşı direnç olarak tanımlanabilir (Czichos, 1978; Bushan, 2001; Jiménez vd., 2011). Buna ek olarak sürtünme ile yapılan iş, deformasyona, aşınmaya ve ısıya dönüşebilir (Mang vd., 2010).

Mühendislik açısından bakıldığında sürtünme, ısı olarak yayılan enerji israfının ve bileşenlerin ve ekipmanların arızalanmasının ana nedenidir (Bayer, 2002; Jiménez vd., 2011). Sürtünme kuvveti ise, birbiri ile temas eden yüzeyler arasında gerçekleşen teğetsel kuvvetlere denir (Aras, 2019).

Yüzey çiftlerinin ortaya çıkardığı sürtünme kuvveti, numuneye etki eden normal kuvvet (N) ve yüzeyin sürtünme katsayısı (μ) ile doğru orantılıdır ($F = \mu \cdot N$). Katılar çok iyi polisaj yapılsalar bile sürekli olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri ortalama ve/veya

yaklaşık ($\cong 0,1\text{mm}$) sahiptir. Parçaların dokunmasıyla oluşan temas, yüzeylerinde var olan mikro pürüzlülüklerin varlığıyla gerçekleşmektedir (Ertan, 2008). Sürtünmenin sayısal etkisi, pürüzlülüğe sahip olmayan yüzeylerde hesaba katılamayacak kadar az bile olsa, etkileşim halindeki tüm yüzeylerde kaçınılmazdır. Öyle ki, temas halinde bulunan ilişkili yüzeylerde belli bir değer aralığında olmalıdır. Mevcut frenleme konusuna en yakın bir örnekleme verilecek olursa, taşıt frenlerinde sürtünmenin zayıflığı ile taşıtın istenilen mesafe ve sürede kontrolünü sağlayamaması veya tam tersi sürtünmenin yüksek olması nedeni ile frenlerde kilitleme şeklinde olabilecek durum gibi değerlendirilir (Sugözü, 2009). TS 555 standardına göre, fren balatası ile disk veya kampana arasında ortaya çıkan sürtünme kuvvetinin, sürtünme düzlemine dik olarak etki eden normal kuvvete oranı sürtünme katsayısı olarak tanımlanır (Akıncioğlu, 2018). Sürtünmeyi karakterize eden, sürtünme katsayısı μ , statik durumlarda statik sürtünme katsayısı iken dinamik durumlarda ise dinamik sürtünme katsayısı (DSK) olarak tanımlanır. Statik sürtünme katsayısı (SSK), dsk'dan biraz daha büyüktür (Kocabaş, 2012). Şekil 2.8'de sürtünme kuvvetinin şematik görünümü görülmektedir.



Şekil 2.8. Sürtünme kuvvetinin şematik görünümü

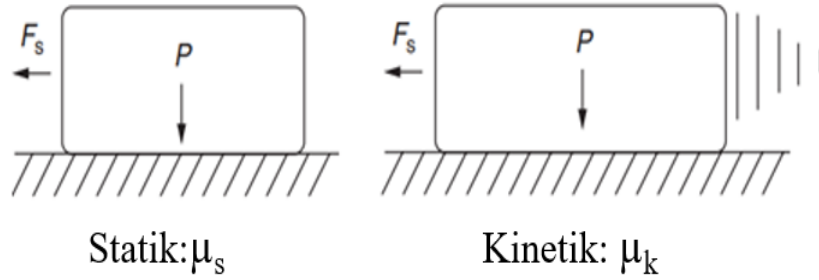
(<https://www.lehigh.edu/~intribos/tribodesign.html>)

DeneySEL çalışmalarına göre, DSK kayma hızına bağlıdır. Hızın artması ile beraber azda olsa değerinde bir düşme görülür. SSK ise temas eden süreye bağlı olup bu süresinin artmasıyla, sürtünme katsayısı da artar (Kocabaş, 2012).

Genel olarak Coulomb Yasası olarak bilinen sürtünme yasası denklem 2.10 da olduğu gibi, sürtünme katsayısını (μ), sürtünme kuvveti F_s (teğetsel kuvvet) ile normal kuvvet F_N (yük) arasında birbirileri ile orantılı olarak tanımlanır (Sundarkrishnaa, 2012).

$$\mu = F_S / F_N \quad (2.10)$$

Kayma sürtünmesini Bowden ve Tabor modelinde, en basit haliyle, sürtünme kuvvetinin iki kaynaktan ortaya çıktığını varsayımlardır. Bunlardan birisi, yüzeyler arasındaki gerçek temas alanlarında geliştirilen yapışma kuvveti veya teğetsel kuvvet (F_s), diğeri ise daha sert yüzeyin pürüzlerini daha yumuşak olandan geçirmek için gereken bir (S) deformasyon kuvvetidir (Hutchings vd., 2017). Toplam sürtünme kuvveti $F = F_s + S$ 'dir. Genellikle "S" kuvveti ihmal edilir ve böylece $F = F_s$ olarak yazılabilir. Sürtünme kuvvetleri uygulanan kuvvetlerin bileşkesine eşit ve ters yönde olur, böylece herhangi bir yatay hareket oluşmayacaktır. Buna göre bağıl hareket eden ve normal bir kuvvetin (F_N) etkisi altında bulunan iki cismin temas etkisindeki yüzeyleri arasında harekete karşı bir F_s sürtünme kuvveti oluşur. Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_N) arasında; $F_s = \mu_s \times F_N$ bağıntısı mevcuttur. Burada, μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur (F_k). Bu durumda; $F_k = \mu_k \times F_N$ ilişkisi geçerlidir. Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısıdır (Sugözü, 2009; Ashby vd., 2012). Şekil 2.9'da statik ve kinetik sürtünme durumlarındaki şematik görünüşleri görülmektedir.

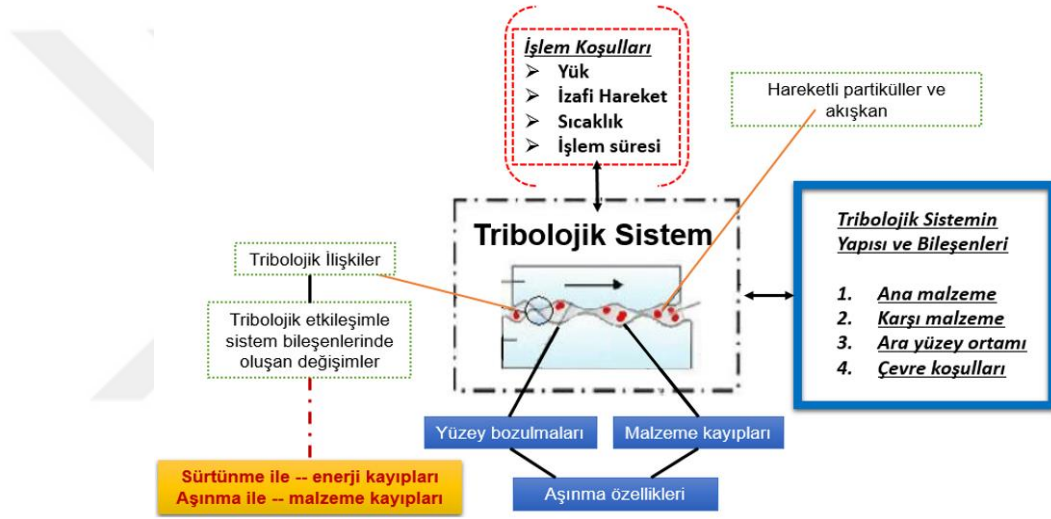


Şekil 2.9. Statik ve kinetik sürtünme katsayıları (Ashby vd., 2012)

2.4.2. Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları

Aşınma, temas halindeki katı yüzeylerin birbirleri ile buluşmaları sonucu mekanik esaslı bir harekete bağlı olarak malzemede istenmeyen parça kopmaları ve malzeme kaybı şeklinde bilinmektedir (Akgün, 2012; Akıncıoğlu, 2018). Aşınmaya bağlı olarak çalışan yüzeyler arasında meydana gelen boşlukların çalışma süresince istenilmeyen durumlara yol açarak, istenilen fonksiyonların yerine getirilmesinde sıkıntılar yaşanabilmektedir (Sugözü, 2009). Bu sebeple imal edilmiş ürünlerin değişimine neden olan kusurların da başında gelmektedir (Akgün, 2012). Aşınma, DIN

50320 ve ASTM G4093 standartlarında belirtilenlere göre "kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerden kaynaklı yüzeyden küçük boyutlarda parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması" şeklinde tanımlanmaktadır (Ulutan, 2007; Akgün, 2012). Aşınma aynı zamanda tribolojiyi oluşturan unsurların karşılıklı etkileşimlerinin (ısıl şartların durumunu, hız ve yükün etkisi) ortak bir ürünü olarak karşımıza çıkmaktadır (Kocabaş, 2012; Akıncıoğlu, 2018). Tribolojik bir sisteme ait geometrik yapı halinin durumu ise Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. DIN 50320 normuna göre tribolojik gelişim (Akgün, 2012)

Mekanik sistemlerin genelinde görülen aşınma; kesici uç ve ağızlarda, yataklarda, pistonlarda, dişlilerde, subaplarda, tekerleklerde, frenlerde, kırma ve öğütme değirmenlerinde, türbin kanatlarında vb. yerlerde meydana gelmektedir (Akgün, 2012).

Herhangi bir yerde aşınma olgunlaşması ve sürekliliği adına sürtünme varlığı gereklidir. Aşınma esnasında yüzeylerin esasında birbirleri ile bağlantı etkisi kurdukları alan, görünen temas alanından çok daha küçük olduğu bilinmektedir. Çok hassas işlenen yüzeylerde bile mikron düzeyinde pürüzler oluşabilmektedir. Parçaların temas kontaklarını sağlamaları yüzeylerinin sahip oldukları pürüzlülükler ile oluşmaktadır. Bu pürüzler arasında boşluklarda ise etkileşim olmayıp temas alanı dışında kalmaktadır. Etkileşim halinde olan yüzeylerin bağlantı kurduğu temas alanı ve uygulama yükü aşınmayı etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak bilinir (Gnecco vd., 2015). Sürtünme sırasında kuvveti kaldıramayan pürüzler plastik deformasyona maruz kalırlar.

Aşınma sürecindeki malzemenin deforme olma kabiliyeti fazla ise, mikro adhezyon alanları hızlı bir şekilde temas edilen yüzeyin geneline yayılır (Akgün, 2012). Tatbik edilen kuvvetin değeri arttıkça gerçek temas alanı da artacağından, aşınma miktarını da arttıracaktır (Gnecco vd., 2015).

Fren sistemlerinde ise en fazla aşınma tehlikesi gösteren parça olarak "balatalar" yer almaktadır. Frenleme esnasında ortaya çıkan sürtünme ve aşınma sonucunda disk ile balata yüzeyinde bir sürtünme filmi meydana getirmektedir. Genel olarak oluşan film yapısı diskin yüzeyi üzerinde yağlayıcı olarak çalışır. Balatadan kaynaklı aşındırma etkilerine karşı diski koruyan bir işlev görmektedir. Frenleme sırasında çevresel koşullar da büyük bir rol oynar. Tozlanma, su, hava ortam şartları gibi etkenler tribolojik davranışı ve buna bağlı frenleme performansını da etkiler. Öyle ki kuru temas bu sistemlerde genel olarak yüksek hız, yüksek temas basıncı ve balata malzemesini de kapsayıcı yönde kompleks bir şekilde gerçekleşir. Özellikle kayma esnasında iki sürtünen yüzeyler için meydana gelen sürtünme tabakası, tribolojik kontak yapısını belirleyici olmaktadır. Balata ve disk ikilisinin tribolojik etkisi sürtünme, aşınma, gürültü ve titreşim gibi özelliklerin belirlenmesinde kritik bir öneme sahiptir (Ertan, 2008).

Sürtünme davranışına bağlı olarak malzemeler arasında oluşan aşınma, hareket tipi, hızı, yağlayıcı tipi, sıcaklığı, yük durumu, sertliği ve süre gibi faktörel unsurlardan etkilenir. Bu yüzden aşınmalar çalışma ortam koşullarına göre farklılıklar göstermekte olup çeşitli isimlerle anılmaktadır (Aras, 2019). Temas eden yüzeyler arasında ortaya çıkan aşınmanın temelinde dört farklı türde aşınma mekanizması mevcuttur. Bu aşınma türleri; Adhesiv aşınma, abrasif aşınma, yorulma aşınması ve korozif aşınma olarak görülmektedir (Akgün, 2012). Malzeme yüzeylerinin birbirleri üzerinde kaymasıyla meydana gelen sürtünme sonucu yüzeyden ayrılan küçük parçacıkların neden olduğu aşınma, adhesiv aşınma olarak ifade edilir. (Aras, 2019).

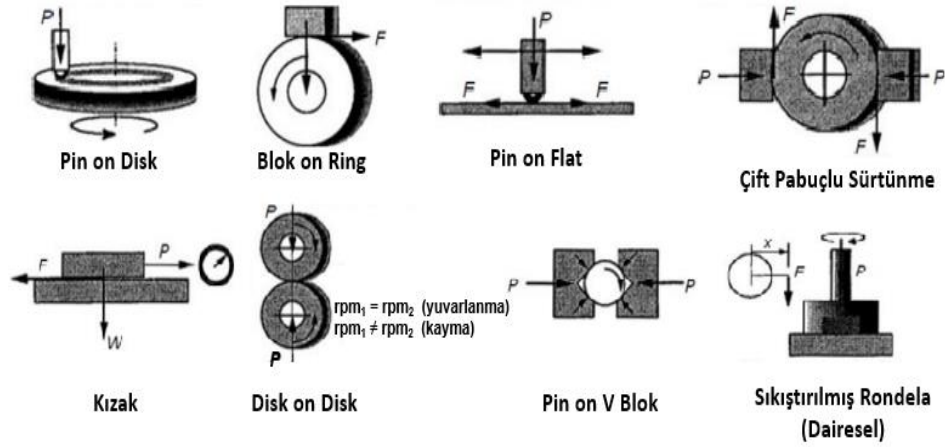
Sürtünen yüzeylerin arasına dış ortamdan giren veya oksitlenme sonucu meydana gelen sert bir madde, yüzeylere zarar vererek ortaya çıkardığı hasara abrasiv aşınma olarak bilinmektedir. Sürtünmeye bağlı olarak aşınma yüzeylerinde sıcaklığın etkisi ile oluşan oksit tabakası, metalik teması keser ve adezyona set oluşturur gibi aşınmayı azaltır. Fren diskleri veya kampanalarında oluşan oksidatif aşınma, sıcaklığın

180 °C'nin üzerine çıktığı anlarda kendisini göstermektedir. Oluşan film tabakası sayesinde disk aşınmasında azalma ve çoğunlukla da sürtünen parçalar arasındaki tetiklenmeden dolayı balatada da aşınmanın azalmasına katkı sağlamaktadır (Ertan, 2008).

Metalik malzemeler, içerdikleri alaşım elementinin türü ve miktarına bağlı olarak doğal bir oksit tabakası içerirler. Bu sayede korozif ortamlara mukavemet etkisi gösterirler. Sürekli bir formda etki eden kuvvetlerin devam etmesi durumunda koruyucu tabakayı oluşturan elementlerin zamanla kaybolarak yeni tabaka oluşması engellenir ve korozyon aşınması oluşur (Sarıkaya, 2007). Sabit veya değişken dinamik sürekli zorlamaların etkisiyle malzemenin yüzeyine yakın bölgelerinde yorulma meydana gelir. Bu durumda, temas yüzeyinin altında veya yakınındaki bölgelerin yıpranması ve parçacıkların yüzeyden ayrılması gözlenir (Aras, 2019).

2.4.3. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Yöntemleri

Makine elemanlarında beklenen özelliklerden birisi de servis ömürleridir. Makinelerde ortaya çıkan hızlı aşınma ile makine ömürleri kısalarak maliyeti arttırmakta ve onarılması için geçen zamanda da üretim önemli ölçüde aksamalar oluşturmaktadır. Bu gaye ile parça ve/veya cihaz imalatında aşınmaya sonucu etkilenen yerler için aşınma dayanımı üstün nitelikte malzemeler tercih edilmelidir. Bu malzemelerin belirlenmesi için kesinlikle laboratuvar deneylerine tabi tutulmalıdır. Laboratuvar ortamındaki deneylerde ana malzemenin bir modeli basit bir geometrik tasarıma sahip olup, yüksek masraflara gerek kalmadan üretilebilmektedir. Sonrasında ise bir deney sisteminde farklı türlerdeki aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde gerçekleştirilebilmektedir (Akgün, 2012). Şekil 2.11'de en sık tercih edilen çeşitli geometrilere sahip sürtünme test yöntemleri yer almaktadır (Blau, 2009).



Şekil 2.11. Kullanımı yaygın sürtünme test tipleri (Blau, 2009)

Sürtünen malzemelerde meydana gelen aşınmanın ölçümü, malzeme kaybı olarak adlandırılır. Bu miktar, temas eden parçalardan birinde veya her ikisindeki hacim veya ağırlık kaybı hesaplanarak belirlenir. Aşınma hesabı için çok fazla yöntem olsa da en çok tercih edilen yöntemlerin başında ağırlık fark metodu, kalınlık fark metodu, iz değişim metodu ve özgül aşınma gelmektedir. Bunların içerisinde ağırlık farkı metodundan yararlanılarak yaygın olarak tercih edileni ise aşınma oranı, özel aşınma oranı, kütleli aşınma oranları olarak ön plana çıkmaktadır. Ağırlık farkı metodu hassas terazi ile ölçümü gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı olarak görülen bir nokta, her ölçüm için deney numunelerinin yerinden çıkarılması ve ölçüm yapılması gerekliliğidir. Yani, numune aşınma cihazının üzerindeyken doğrudan ölçüm alınamamasıdır. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr. hassasiyetinde hassas terazi ile yapılmaktadır. Ağırlık kaybı tekniğiyle en sık kullanılan iki farklı aşınma oranı hesabı denklem eşitlikleri (2.11 ve 2.12) ile hesaplanır (Öztürk vd., 2007; Akıncıoğlu, 2018).

Özel aşınma oranı:

$$SWR = \Delta G / \rho \cdot F_N \cdot S \quad (\text{mm}^3 / \text{Nm}) \quad (2.11)$$

Aşınma oranı:

$$W_a = \Delta G / \rho \cdot S \quad (\text{mm}^3 / \text{m}) \quad (2.12)$$

Buradaki teknik ifadelerin anlamları ise; SWR: Özel aşınma oranı (mm^3 / Nm), W_a : Aşınma oranı (mm^3 / m), ΔG : Ağırlık kaybı farkı (gr), F_N : Yükleme ağırlığı (N), S :

Aşınma yolu (m), ρ : Aşınan malzemenin (gr/cm^3) yoğunluğunu belirtmektedir (Akgün, 2012; Rodríguez vd., 2017; Banijamali vd., 2022). Kalınlık farkı metodu uygulanarak aşınma hesabı uygulamalarında ise, kalınlık farkı belirlenerek, hacimsel azalma değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanarak bulunması sağlanır. Kalınlık ölçümleri, hassas ölçme aletleri kullanılarak $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçümünün yapılması sağlanır. İz değişim metodu kullanılarak yapılan ölçümde ise, aşınmanın gerçekleştirildiği yüzeyde, plastik deformasyon etkisiyle geometrisi belirgin iz oluşturulması sağlanır. Deney süresince, oluşturulan izin karakteristik bir boyutundaki (çapının) değişim ölçülür. İz bırakıcı olarak tercih edilen aletlerin başında, Vickers veya Brinell sertlik ölçme uçları gelmektedir. Elmas piramit veya bilyenin oluşturdukları iz değişimleri, mikroskop kullanılarak saptanır (Akgün, 2012).

2.5. Mekanik Alaşımlama ve Mekanokimyasal Sentez

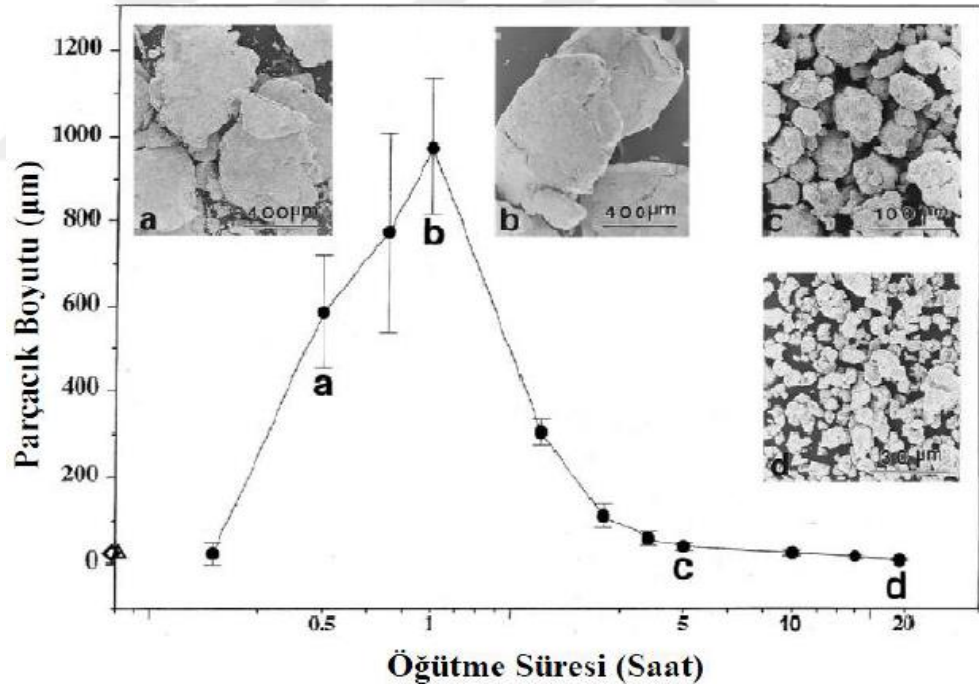
Toz metalurjisinde istenilen bir üretimin hedeflenmesinde önemli bir adım olan tozların hazırlanması için kimyasal, fiziksel ve mekanik işlem operasyonları gerektirmektedir. Üretim hattında en sık tercih edilen ve kullanılan yöntemler olarak mekanik alaşımlama, atomizasyon, kimyasal indirgeme ve elektrolitik biriktirmedir (Angelo vd., 2009; Çankaya, 2022).

Mekanik alaşımlama (M.A.), yüksek enerjili bilyalı değirmene yerleştirilen bir toz karışımının dinamik bir davranış gösteren bilyeler ile ortaya çıkan çarpışma kuvvetlerinin etkisinde oluşan mekanik öğütme işlemidir (Suryanarayana, 2001). Genellikle yeni nesil alaşımların geliştirilmesinde kendini ortaya koyan mekanik alaşımlama yöntemi (Milli, 2017), inert bir atmosfer ortamında katı hal reaksiyonu şeklinde gerçekleşir. İnce ve homojen mikro yapıların elde edilmesini sağlayan toz malzemelerin şiddetli bir formda öğütme işlemiyle sürekli olarak kırılma ve soğuk kaynaklanmaya hemen ardından tekrar kırılma ile yeniden birleşimine maruz bırakılan düşük sıcaklıkta yapılan alaşım oluşturma yöntemi olarak ta bilinmektedir (Erdem, 2007; Akgün, 2012).

Alaşımlama işleminde kaynaklanma hızı, kırılma oranını dengelerse ve tozların ortalama parçacık boyutları daha ziyade kaba formda kalırsa devam edilebilir.

Faz diyagramlarını esas alarak yeni nesil malzemelerin üretilmesindeki özgün etkisi nedeniyle farklı element kombinasyonlarına sahip alaşımlar başarıyla sentezlenmektedir (Lü vd., 1998).

Öğütme esnasında çelik bilyaların çarpışması sonucunda bilyalar arasında sıkışan tozların, çarpışmanın etkisinde total ağırlıklarının ortalama 0,2 mg ve yaklaşık 1000 partikülden meydana geldiği bilinmektedir. Çarpışmaya bağlı etki eden basma kuvveti sonucu, toz partiküllerinde plastik deformasyon ile sertleşme ve kırılmalar oluşmaktadır (Suryanarayana, 2001). Daha sonra toz partikülleri ezilir ve sert oksit partikülleri matris içerisine nüfuz eder (Akgün, 2012). Şekil 2.12’ de mekanik alaşımlama gerçekleştirilirken toz boyutunun zamana bağlı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. MA uygulamasında toz boyutunun öğütme süresi ile ilişkisi

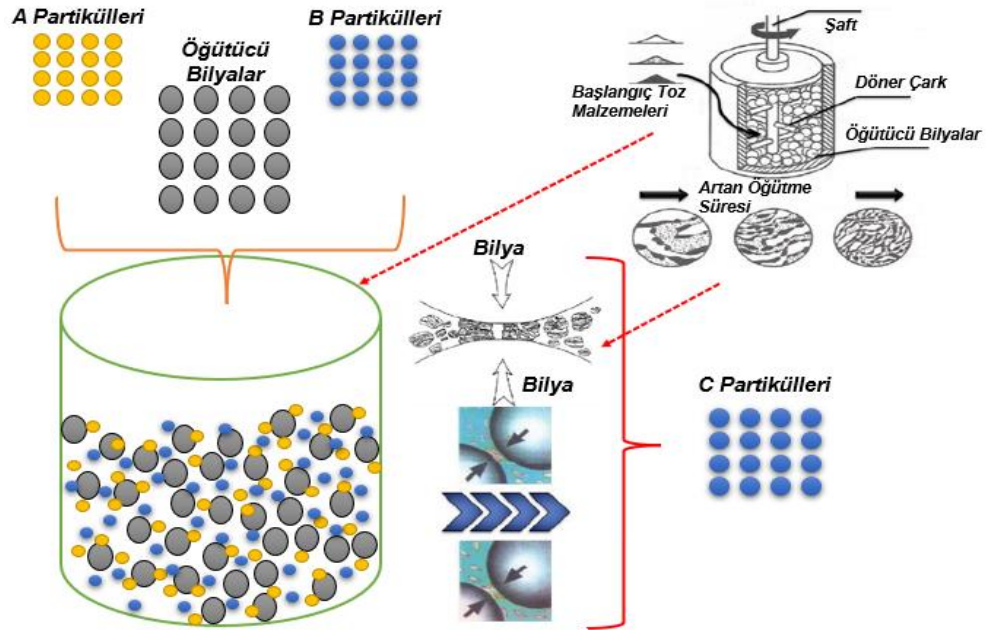
(Erdem, 2007; Akgün, 2012)

Bu süreç ilerledikçe tozlarda aglomerasyon, parçalanma ve birleşme de devam edecektir. Kısa süre içinde bile karışım hazır hale gelir, fakat tam anlamıyla homojenliği olmayabilir (Akgün, 2012).

Mekanik öğütme işleminin başlangıç safhasında, parçacıkların yumuşak olmasından dolayı partiküller birbirleriyle sorunsuz şekilde kaynaklanabilmekte ve yapraklanma etkisi oluşturma eğilimindedir.

Kompozit parçacıkların başlangıç halindeki bileşen yapıları, farklı içeriklerden oluşan karakteristik bir katmanlı yapıya sahiptir. Ortaya çıkan deformasyon süreciyle parçacıklar, yorulma kırılması mekanizması ve/veya kırılma pulların parçalanması ile sertleşmekte ve kırılmaktadır.

Bu mekanizma tarafından üretilen parçalar, güçlü aglomerasyon kuvvetlerinin yokluğunda boyut olarak küçülmeye devam edebilir. Bu safhada, kırılma yatkınlığı soğuk kaynaklanmaya göre daha dominanttır. Sürekli öğütme formunun devamında, parçacıkların yapısı sürekli bir formda rafine edilir, ancak parçacık boyutu aynı olmaya devam eder. Sonuç olarak, parçacıktaki katman sayısı artarken katmanlar arası boşluk ta azalmaktadır (Suryanarayana, 2001). Tozların karışımı, öğütme sürelerine göre yapıları ve mekanik alışım mekanizmasının tamamını betimleyen sistematik halin durumu şekil 2.13' de ayrıntılı olarak izah edilmiştir.



Şekil 2.13. Mekanik alaşımlama mekanizmasının sistematik yapısı

(Kılınç, 1999; Erdem, 2007; Söyler, 2008; Akgün, 2012)

Mekanik alaşımlama sürecinde öğütme bilyalarının malzeme cinsleri (seramik, paslanmaz çelik, ve tungsten karbür), öğütme malzemelerinin türleri (bilyalar veya çubuklar), öğütücü işlemin olduğu kap, öğütme işlem hızı, öğütmenin gerçekleştirildiği atmosferi (hava, azot ve inert gaz), öğütme gerçekleştirildiği ortam (kuru öğütme veya ıslak öğütme), öğütücü bilya/toz ağırlık oran ilişkisi, öğütme sıcaklığı, öğütme süresi ve değirmen tipi (yüksek enerjili veya düşük enerjili değirmenler) nihai ürünü etkileyen parametreler olarak önemli yer edinir.

Öğütme sırasındaki dinamik kuvvet etkisi altında öğütme kabının iç duvarlarından kopan parçacıklar tozun yapısına karışır ve tozun kirlenmesine neden olabilmektedir. Bu sebeple öğütücü kabin malzemesi ile tozlar çok farklı ise sistem içerisinde bazı çözümlere neden olabilir. Ortaya çıkan bu farklılıktan dolayı oluşan kirlenmeyi azaltmak için mekanik alaşımlama sisteminde uygun malzemeler seçilmelidir.

Öğütme hızı için belirli bir maximum hız sınırlaması vardır. Kritik bir hızın üstünde bilyeler öğütme kabının duvarlarına tutunarak sabitlenirler ve tozlara etkileyen basma kuvveti uygulamada dinamik hareket edemezler. Öğütme süresinin uzaması kontaminasyon seviyesini artırmaktadır. Bu durum ortaya istenmeyen fazların oluşumuna neden olacaktır. Öğütücü bilya/toz ağırlık oranı ne kadar yüksek ise öğütme süresi de o derecede orantılı bir şekilde düşecektir (Suryanarayana, 2001; Çankaya, 2022). Mekanik alaşımlama da kirlenme çok önemli bir parametredir. Öyle ki oluşturulan tozun yapısında istenmeyen farklılıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Öğütme işlemine tabi tutulan toz partiküllerinin kirlenmesinde öğütme atmosferi büyük bir etkiye sahiptir. Bundan dolayıdır ki tozlar öğütülmesinde havası boşaltılmış ya da argon veya helyum gibi bir soy gazla doldurulmuş düzeneklere ihtiyaç vardır. Yüksek saflıkta argonun, oksidasyonunu ve/veya kontaminasyonunu önlemede çok etkili olduğu ve en sık tercih edilen sistemlerin başında gelmektedir (Suryanarayana, 2001; Çankaya, 2022).

Mekanik alaşımla işleminin gerçekleştirilmesini sağlamada çok farklı ticari olarak üretilmiş bilyalı değirmen türleri karşımıza çıkmaktadır. Laboratuvar kapsamında hızlı ve temiz çalışmada en yaygın olarak kullanılan değirmen tipleri olarak gezegensel bilyalı değirmen, atritör ve SPEX değirmenidir.

Bu değirmenlerin ortak özelliklerine bakıldığında yüksek enerjili yapıya sahip olmalarıdır (Sherif El-Eskandarany, 2001; Upadhyaya, 2002; Çankaya, 2022).

Bilyalı değirmenlerdeki çarpışma kuvvetine bağlı olarak oluşan bu enerjinin öğütme hızı ile olan bağlantısı olması sebebiyle, yüksek çarpışma enerjisine sahip frekans oluşturulmalıdır.

Öğütücü değirmenlerin çalışma mekanizmalarına bakıldığında, SPEX için sekiz sarmalını ifade eden yörüngeyi takip eden ileri-geri titreşimli bir sisteminin mevcut olduğu görülmektedir.

Gezegen tip için ise evrendeki gezegenlerin dönme yörüngesi referans alınarak hareketlerini sağlamaktadır. Son olarak atritör tipi değirmenlerde ise karıştırıcılar ve dikey transmisyon milinin yer aldığı tambur düzeneğinin dönmesi ile öğütme işlemi sağlanmaktadır.

Tozların öğütülmesinde etkin rol oynayan değirmenler arasında SPEX tipi cihazların en yüksek enerjide toz öğüttüğü, atritörlerin ise miktar olarak en fazla düzeyde toz öğütme işlemi yaptıklarıdır (Sherif El-Eskandarany, 2001; Upadhyaya, 2002; Çankaya, 2022). Şekil 2.14’de sırasıyla; gezegen, spex ve atritör tip değirmenlerin türleri gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Öğütücü değirmen türleri

2.6. Literatürdeki Fren Balatası ile İlgili Çalışmalar

Motorlu taşıtlarda fren sistemi, sürtünme sistemi ve onu hareketlendiren hidrolik veya pnömatik sistem kombininden oluşur. Sürtünme sistemini ise disk veya kampana ile balata gibi bileşenlerden oluşur (Bijwe, 1997; Kurt, 2019)

Balatalar; uygulanan fren kuvvetinin aracın tekerlekleriyle bağlantılı disk veya kampanalara sürtünme yolu ile aktarılmasını sağlayan elemanlardır (Kurt, 2019).

Yüksek frenleme kuvveti neticesinde oluşacak etkili bir sürtünme momentinin sağlanmasında yüksek sürtünme kalitesine sahip balata yüzeylerine ihtiyaç vardır. Çoğu fren balatası 10'nun üzerinde katkı maddesini kapsayan bileşik bir yapıdan oluşmaktadır. Bu katkı maddeleri arasında bağlayıcılar, takviye, sürtünme düzenleyicileri ve dolgu maddeleri bulunmaktadır. Fren balatalarında istenen özellikler arasında stabil sürtünme katsayısı, düşük aşınma hızı, çevreye zarar vermeme, hafiflik, uzun ömür, düşük ses seviyesi, korozyon direnci ve uygun maliyet ile uyumlu performans karakteristikleri bulunmaktadır (Akagündüz, 2014).

Fren balataları, özellikle otomotiv, demiryolu ve havacılık gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde de balataların tasarımı ve üretim kriterleri ise TS 555'teki standartlarınca belirlenmiştir. Balata alanındaki üreticiler için temel esas alınan kriterler bu standartta yer almaktadır (Akagündüz, 2014; Kurt, 2019). Literatürde yer alan fren balataları ile ilgili yapılan çalışmalar ve fren balatası testlerine ilişkin detaylar şu şekildedir.

Akincioğlu vd., (2018a), bor oksit tozu ekledikleri balata malzemeleri üzerinde sertlik, sıkıştırılabilirlik ve sürtünme testleri gerçekleştirmişlerdir. Bor oksit içeren numunenin sertlik, sıkıştırılabilirlik ve soğuk, sıcak sürtünme katsayıları ticari balatanın değerlerinden daha yüksek çıkmıştır.

Akincioğlu vd., (2018b), bor oksit (%6) ve fındık kabuğu (%7) tozlarından ve diğer 17 bileşenden üretilen 2 asbestsiz otomotiv fren balatası setini değerlendirmişlerdir. Numuneler üzerinde sertlik, gözeneklilik, sıkıştırılabilirlik, kesme ve aşınma testleri yapmışlardır. Daha sonra test sonuçlarını ticari balataların sonuçları ile karşılaştırmışlardır. HS ve BS numunelerinin sertlik değerleri ticari numunenin sertlik değerlerine benzer ve daha yüksek çıktığını gözlemlemişlerdir. Sertliği etkileyen en önemli faktörün, balata bileşiminde bulunan toz malzemelerin fındık ve B₂O₃ tozları ile değiştirilmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. HS, BS ve CO balata numunelerine ait ortalama sürtünme katsayı değerleri sırasıyla 0,548, 0,508 ve 0,418 µm olarak ölçülmüşlerdir.

Burada fındık tozu ile güçlendirilmiş balatanın sürtünme katsayısının en yüksek olduğunu ve bunun fındık takviyeli balataların daha sert yapısından kaynaklandığı düşünülmüştür. Her üç örnek için de fren balatasın da sürekli dalgalanan sürtünme katsayıları eğilimini ortaya koymuşlardır.

Abutu vd., (2018), gri ilişkisel analiz yöntemini kullanarak yerel kaynaklı tehlikeli yapısal etki içermeyen hammaddelerden fren balataları üretmişlerdir. Kullanmış oldukları malzemeler arasında deniz kabuğu, epoksi reçine, grafit ve alüminyum oksit bulundurmışlardır. Proses parametreleri üzerinde değişime gidilerek takviye malzemesi olarak deniz kabuğu olacak şekilde 27 farklı numune üretmişlerdir. 14 MPa kalıplama basıncı, 160 C kalıplama sıcaklığı, 12 dakika kür süresi ve 1 saat ısıtma işlem süresi ile optimum fren balatası performansının elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Aleksendri'c (2010), fren sürtünme malzemelerinin aşınmasını tahmin etmek için yapay sinir ağlarından yararlanmıştır. Sürtünme malzemelerinin aşınmasının sinirsel modelinin doğruluğu, girdi parametreleri değişim aralıklarının kısaltılması ve farklı aşınma testlerinde sürtünme malzemelerinin aşınmasıyla ilgili çıktı verilerinin sayısının artırılmasıyla daha da iyileştirilebileceğini belirtmiştir.

Azam vd., (2019), kaplamasız ve Ni kaplı kübik bor nitrür ile güçlendirilmiş alümina bazlı nano kompozitlerin tribolojik davranışını incelemişlerdir. Takviye partiküllerinin kompozitler içindeki benzersiz kombinasyonuna ve homojen dağılıma sahip yapı gösterdiğini belirtmişlerdir. Ni kaplı cBN partiküllerinin, esas olarak nikel kaplamanın sağladığı mükemmel ara yüzey bağlanması nedeniyle yüksek aşınma dayanımı sergilediğini vurgulamışlardır. Geliştirilen malzemelerin fren balatalarında tercih edildiğinde de etkili olacağını belirtmişlerdir.

Başar vd., (2018), kolemanit ve boraks katkısı yapılmış fren balata numunelerine ait sürtünme performansını incelemişlerdir. Numuneleri üç farklı oranda (kütüğe %4, %8 ve %12) üretmişlerdir. Numunelerin sürtünme ve aşınma karakteristikleri pin-on-disk tipi aşınma test cihazını kullanarak tespit etmişlerdir. Sürtünme katsayısı bakımından en düşük sonucu %4 kolemanit ve boraks takviyeli sürtünme malzemesinde olduğunu saptamışlardır.

Üretilen balataların standartlara uygun olmasının yanı sıra takviye etmiş oldukları oranının frenleme performansında da etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Cai vd., (2015), novolak fenolik reçine ve boronla yeni nesil modife edilmiş rezol fenolik reçineyi hacimce toplam numune içeriğinin %23,6 olacak şekilde karıştırarak 5 farklı numune elde etmişlerdir. Daha sonra geliştirdikleri ürünün termal, mekanik ve tribolojik özelliklere etkisini detaylı olarak analiz etmişlerdir. Yaptıkları testler ve analizlerin sonucunda, reçinelerin oranlarındaki değişimin sertliğe çok az etki yaptığını, diğer özellikler üzerinde ise karmaşık düzeyde bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları testler ve analizlere göre, reçine oranındaki değişimin sertliği neredeyse etkilemediğini, ancak diğer özellikler üzerinde karmaşık bir düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Elhilali vd., (2021), asbest lifleri ve karbon lifleri gibi mineral ve sentetik organik liflerin risklerinden kaçınmak için, özellikle doğal lifli kompozit malzemeden yapılmış fren balatalarının incelenmesi olmak üzere, fren sistemlerinin çevresel etkisi en az olan optimum malzemeyi incelemeyi amaçlamışlardır. Fren balatalarının sertliğini ve verimini artırmak için jüt lifi gibi doğal lifleri seçmişlerdir. Ayrıca, fren sistemini daha güçlü, verimli ve dayanıklı hale getirmek amacıyla tasarım ve analiz araçları olarak ANSYS ve SOLIDWORKS gibi yazılımları kullanarak fren balatasının hacmini optimize etmeye çalışmışlardır.

Hendre vd., (2020), asbestsiz fren balatası malzemesinin tribolojik davranışını incelemişlerdir. Asbestin kanserojen etkisinden dolayı alternatif olarak sentetik nitril bütadien kauçuğu ile yüksek miktarda ince pirinç elyafından oluşan bir sürtünme malzemesi, yani CL-3003 isimli numune malzemesi hazırlamışlardır. Sürtünme Katsayısı, bu malzeme için 0.20 ile 0.59 arasında değiştiğini ve frenleme işlemleri için uygun olan iyi sürtünme özelliklerini gösterdiğini belirtmişlerdir. Optimum durma mesafesini değerlendirmek için simülatif test şartları altında daha detaylı çalışmalarla genişletilebileceğini de ifade etmiştir.

Jeganmohan vd., (2020), fonksiyonel bir dolgu malzemesi olan kalsiyum sülfat iplikli yapılarını otomotiv fren sürtünme malzemeleri ile birlikte kullanarak tribolojik performanslar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kalsiyum sülfat iplikli yapılarının

eklenmesi fren sürtünme malzeme kompozitlerinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği saptamışlardır.

Kalsiyum sülfat ipliksi yapılarının dhil olduğu sürtünme malzemelerinin daha az aşınma yaşadığı ve ağırlıkça %10 kalsiyum sülfat ipliksi yapılı kompozitlerin, yüksek kayma hızlarında bile en kararlı sürtünme katsayısını sergilediğini belirtmişlerdir.

Kalel vd., (2020), fren balatalarından bakırın değiştirilmesi olasılığını araştırmak için çeşitli tiplerde paslanmaz elik parçacıklar ile evre dostu fren balataları gelitirmilerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, aşınma dahil neredeyse tüm zelliklerin Cu içeren balatalardan üstün olduğunu ve ortalama sürtünme katsayısının tüm balatalar için neredeyse aynı çıktığını belirtmişlerdir.

Kara vd., (2011), karbon elyaf takviye malzeme boyutunun ve barit ilavesinin fren balatası numunelerindeki sürtünme katsayısına etkisini aratırmılardır. Gerçekleştirilen alımalar sonucunda karbon elyaf boyutunun artması, sürtünme katsayısının azalmasına neden olurken barit ilave etkisi ise numunelerin sürtünme katsayısında artıa sebep olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca numunelerde sürtünme deneyi sonrasında meydana gelen aşınma kayıplarının karbon elyaf boyutlarının artması ile doğru orantılı olarak arttığını da ortaya koymuşlardır.

Kumar vd., (2020), iyi miktarda gözeneklilik açısından dolgu malzemesi olarak Nikel Sülfat (NiSO₄) içeren fren balatası için metal matrisli kompozitin geliştirilmesi ve performansı üzerine alımılardır. Numunedeki element dağılımını tespit etmek için enerji dağıtıcı x-ışını (EDX) ve taramalı transmisyon elektron mikroskobu (STEM) kullanmışlardır. Termal zellik analizryle, geliştirilen fren balatasının termal iletkenliğinin ve termal yayılımının piyasada bulunan fren balatalarından daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. İletken ve konvektif ısı transferi için faydalı olan ve fren balata sisteminin aşırı ısınmasını engelleyen gaz sorpsiyon analizörü (GSA) ile yeterli miktarda porozite saptamışlardır. Geliştirdikleri fren balatasının sertlik, termal özellik, gözeneklilik dağılımı ve tribolojik performans analizi temelinde piyasada bulunan seçilmiş kompozit fren balatalarından daha iyi olduğunu ortaya koyduklarını vurgulamışlardır.

Ma vd., (2021), C / C – SiC disk için kullanılan demir ve bakır bazlı toz metalurjisi ile üretilen fren balataları arasındaki frenleme davranışlarının karşılaştırmasını gerçekleştirmişlerdir.

Sürtünme yüzeyinin analizine göre, Fe bazlı toz metalurjisi ile ürettikleri balataların aşınma mekanizmasının esas olarak aşınma tarafından baskın olduğunu, Cu bazlı çiftin ise yapışma ve yorulma karşı dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca Cu elementinin fren balatalarına eklenmesinin de iyi bir seçim olduğunu vurgulamışlardır.

Mahale vd., (2019), fren balatalarında partiküllü Cu dolguyu paslanmaz çelik talaş ile değiştirme olasılığını araştırmışlardır. Paslanmaz çelik talaş miktarındaki artışla birlikte, aşınma direnci de dahil olmak üzere fren balatalarının hemen hemen tüm özelliklerinin önemli ölçüde iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile aşınmış yüzey analizi, paslanmaz çelik talaşlı olanın, Cu dolgulu balatalara göre paslanmaz çelik talaşlı dolgulu balataların daha yüksek aşınmasına yol açan matris ile zayıf ara yüzey yapışmasına sahip olduğunu doğrulamışlardır.

Österle vd., (2014), otomotiv fren balatası formülasyonları için hammadde seçimine yönelik tribolojik tarama testleri gerçekleştirmişlerdir. Tribofilm ve sürtünme katsayısının gelişimi üzerinde demir oksit ve grafit malzemelerinin etkili olduğunu belirtmişlerdir. Vakum ve havada gerçekleştirilen testlerin karşılaştırılmasında, grafit ve metal sülfürlerin, katı yağlayıcılar veya sürtünme artırıcılar olarak işlevsellikleri açısından ne kadar tamamlayıcı olduklarını görmüşlerdir. Bu durumu, farklı çevre koşulları altında iyi fren performansı için her iki bileşenin bir kombinasyonunun gerekli olduğunu açıklayıcı olduğunu vurgulamışlardır. Bu önemli sorunu doğrulamak için kontrollü ortamlar ve farklı sıcaklıklarla daha sistematik çalışma gerekli olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca deneysel olarak diski yapay olarak ısıtarak gelecekte daha da basit bir şekilde yapılabileceğini de aktarmışlardır.

Selvam vd., (2020), Ti alaşımı sınıf 5'in sürtünme aşınma davranışını ve performansını araştırmayı amaçlamışlardır. Fren balatalarını Titanyum Alüminyum Nitrür (TiAlN) ile kaplayarak daha da geliştirmeyi planlamışlardır. TiAlN kaplı Ti alaşımlı fren balatalarının Sürtünme Katsayısı (COF), kaplanmamış Ti alaşımlı fren balatalarına kıyasla iki kat azaldığını belirtmişlerdir. Geliştirilmiş yüzey özelliklerinin

ve mikro termal etkilere karşı daha iyi direnç sağladığını, TiAlN kaplı Ti alaşımlı fren balatalarının gelişmiş aşınma dirençleri oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Sugözü vd., (2018), farklı miktarlarda (kütlece %4, %8 ve %12) boraks ve üleksit içeren üç fren balata numunesi üreterek, tam ölçekli bir fren balata cihazında test etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre üleksit ve boraksın sürtünme gösteren malzemeler üzerinde optimal sonuçlar verdiği ve sürtünme malzemeleri için yeni nesil formda düzenleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Yang vd., (2020), toz metalürjisi yöntemi ile farklı çinko tozu içeriklerine (% 0, 2, 4, 6, 8 ağırlık) sahip fren balata malzemeleri üretmişlerdir. Artan çinko tozu içeriği ile malzemelerin yoğunluğunun ve ısı iletkenliğinin kademeli olarak arttığını, sertliğin ise monoton bir şekilde azaldığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, artan çinko içeriği ile sürtünme malzemesinin aşınma oranı ve frenleme gürültüsünün monoton olarak azaldığını da belirtmişlerdir.

Xiao vd., (2018), yüksek hızlı trenlerin fren balataları için yeni geliştirilen bir bakır metal matris kompoziti (Cu-MMC), toz metalürjisi yolu ile üretmişlerdir. Bakır esaslı metal matrisli kompozitlerin mükemmel özellikler sergilediğini ve teknik gereksinimleri karşılayabildiğini, bu nedenle de yüksek hızlı trenlerdeki uygulamalar için büyük umut vaat ettiğini belirtmişlerdir.

Wang vd., (2020), simülasyon sonuçlarına dayalı olarak farklı kayma genlikleri altında ve farklı aşınma döngülerinde numunelerin aşınma özelliklerini tahmin etmek için Radyal Temel Fonksiyonlu Uygun Ortogonal Ayrışmaya (POD-RBF) dayalı bir model azaltması kullanmışlardır. POD-RBF'nin avantajlarını ve dezavantajlarını göstermek için, tek parametrelili tahmin için POD-RBF'yi doğrulamak için Gri Model ve Eğri Uydurma kullanılırken, üç parametre tahmini için POD-RBF'yi doğrulamak için Yapay Sinir Ağını kullanmışlardır.

POD-RBF'nin yaklaşımının, farklı döngülerde farklı kayma genlikleri ve normal yükler altında aşınma özelliklerini yüksek doğruluk ve yüksek hesaplama verimliliği ile tahmin edebileceğini belirtmişlerdir.

WanNik vd., (2012), bor katkılı fren balatalarının sürtünme performansını araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda bor katkılı balatalar ile ticari balata arasında sürtünme katsayıları ve sertliklerinde büyük bir fark gözlemlenmiştir.

Zhang vd., (2020), farklı karbon fiber içeriği içeren bakır esaslı fren balatalarının frenleme performansını, azaltılmış ölçekli bir dinamometre üzerinde değerlendirmişlerdir. Karbon fiber eklenmesinin tribo filmin mikro sertliği ve plastik deformasyon direnci üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Mutlu vd., (2007), takviye edici elyaflar kompozitlerin maliyetini arttırdığı için çalışmalarında elyaf yerine; bakır tozu, borik asit, barit, alümina, cashev ve grafit kullanarak kompozisyonu oluşturmuşlardır. Borik asit eklenmiş balataların frenleme üzerine olumlu etkiler yaptığını ortaya çıkarmışlardır.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde genel olarak sürtünme düzenleyici ve takviye malzemesi olarak bor türevli malzemelerin kullanıldığı görülmüştür. Daha iyi bir sürtünme düzenleyici olarak ithal edilen bor karbür malzemenin yanı sıra bor oksit, kolemanit ve boraks malzemelerinin ayrı ayrı kullanıldığı görülmüştür. *Yapılacak çalışmada ise, daha ziyade pahalı bor türevi olan bor karbürü baskılayabilecek ülkemiz rezervlerinde üretimi çıkan bor türevli kolemanit, bor oksit ve boraks malzemelerinin bir arada mekanik alaşımlarının oluşturularak etkili bir kombinasyonun fren balatası malzemelerinde kullanılması sağlanacaktır.*

3. MATERYAL VE METOD

Üretilen fren balatalarının mekanik özelliklerinin ortaya konulması amacıyla makro sertlikleri, yoğunlukları ölçülerek ve mikro yapılarının da görüntü analizleri gerçekleştirilmiştir. Yeni nesil üretimi gerçekleştirilen fren balatası numunelerinin aşınma sürtünme testleri ise Pin-on disk tipi test cihazında uygulanmıştır. Balatalarda, aşınma ve sürtünmeye bağlı testlerin etkilerini görmek ve bunları değerlendirmek amacıyla EDX ve SEM analizleri uygulanmıştır. Yapılan tüm testler, otomotivde kullanılan herhangi bir ticari fren balatası referans alınarak değerlendirilmesi sağlanmıştır.

3.1. Fren Balatası Numunelerinin Seçimi ve Üretimi

Yeni nesil fren balatası kompozit malzemelerinin oluşturulmasına katkı sunacak olan çalışmada, ülkemiz bünyesinde maden rezerv hacmi yüksek ve göz bebeği olan bor malzemelerine ve türevlerine odaklanılmıştır. Fren balatası kompozit numunelerinin üretiminde asbest katkısı içermeyen takviye malzemeleri ve yüksek sıcaklıkta termal bozulmayı önleyecek, mekanik ve tribolojik özelliklerini kuvvetlendirecek şekilde bileşenlerin seçilmesine dikkat edilmiştir. Bu bileşenler seçilirken literatür, ticari balata firmalarından alınan görüşler, maliyet ve temin etme gibi durumlarda göz önüne alınmıştır. Fren balatası malzemeleri için takviye, dolgu, bağlayıcı ve sürtünme düzenleyici malzemeler belirlenmiştir. Hem takviye edici hem de sürtünme düzenleyici malzeme olarak bor türevli (bor oksit B_2O_3 , boraks (boraks pentahidrat- $Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$), kolemanit ($2CaO \cdot 3 B_2O_3 \cdot 5H_2O$), bor karbür ve bunlarında dışında mekanik alaşımlanmış bor türevleri kombinesi (bor oksit, boraks, kolemanit) olan malzeme grubu kullanılmıştır. Dolgu, bağlayıcı ve sürtünme düzenleyici malzemeler ise literatürde yer alan güncel malzemelerden ekonomik olacak şekilde sürtünmeye ve ısınmaya karşı dayanıklı malzemelerden seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla dolgu malzemeleri olarak barit, vermikülit, lastik tozu, potasyum titenat, bağlayıcı malzemesi olarak novalak reçine, sürtünme düzenleyici malzeme olarak ise bor türevli malzemeler, pirinç talaşı, cashew (kaju kabuğu) tozu ve grafit (katı yağlayıcı) seçilmiştir. Bor türevli takviye malzemelerinin dışında fren balatalarının dayanımını arttırmak amacıyla ek takviye malzemeleri ise Çelik elyaf (yünü), Kevlar, Kaya Yünü kullanılmıştır. Belirtilen malzemeler, üretim yapan firmalardan ve tedarikçilerden temin edilmiştir.

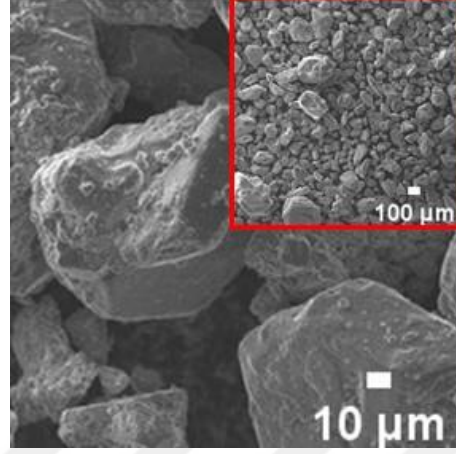
3.1.1. Fren Balatalarının Üretiminde Balata Tozlarının Hazırlanması

Fren balatalarının üretim sürecinin ilk adımı, balata içerisinde kullanılacak toz malzemelerin öğütülerek istenilen tanecik boyutuna getirilmesidir. Numunelerin üretiminde çelik yünü, taş yünü ve kevlar kırılmış halde takviye elemanı olduklarından ön öğütme işlemlerine tabi tutuldular. Bu işlemin yapılmasında yaklaşımın amacı, kompozisyonda yer alan diğer tozları daha sağlam bir şekilde bir arada tutarak ve aşınma direncini düzenleyerek önemli bir etkisi olduğunu ifade edebiliriz. Bunun dışında diğer hazır bir şekilde temin edinilen tozlar ise istenen tanecik boyutu aralıklarında olmalarından dolayı herhangi bir ön öğütme işlemine tabi tutulmamışlardır. Üretimi gerçekleştirilecek olan fren balatası kompozitleri; toz tanecik boyutu, tozların karıştırılma hızı, tozların karıştırılma süresi, sıcak presleme basıncı, sıcak presleme süresi, sıcak presleme sıcaklığı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi gibi parametreler etkisi altında üretilmiştir.

Fren balatası üretiminde kullanılmak amacıyla, bor partiküllü mekanik alaşımlı malzemelerin üretimi için yüksek enerjili ve sıvı soğutmalı bilyalı değirmende oda sıcaklığı sabit, 300 dev/dk hız 6:1 (tungsten karbür) bilya toz oranı ve %1 işlem kontrol katkısı (methanol) ile ağırlıkça eşit miktarda olacak şekilde bor oksit, kolemanit ve boraks partikülleri kullanılarak 60 saat bilyalı öğütme işlemine tabi tutulmuşlardır. Tozların mekanik alaşımlama yapılmadan önceki boraks (ince), bor oksit ve öğütülmüş kolemanit malzemeleri ile mekanik alaşımlama yapıldıktan sonraki malzemelerin morfolojik görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak karakterize edilmiştir. Tozlara ait partikül boyutunun tayini de yine SEM cihazından alınan görüntüler üzerinden yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Mekanik alaşımlama uygulanmış malzemenin alaşım içeriğinin belirlenmesi için Enerji Yayımlı X-Işını Analizi (EDX) cihazından yararlanılmıştır. Yapılan analizler Süleyman Demirel Üniversitesi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Araştırma Merkezlerinden hizmet alımı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Mekanik alaşımlama yapılmadan önceki boraks (ince), bor oksit ve öğütülmüş kolemanit malzemeleri ile MA. uygulanmış malzemelere ait SEM görüntüleri sırasıyla şekil 3.1 ile şekil 3.5 arasında verilmiştir.

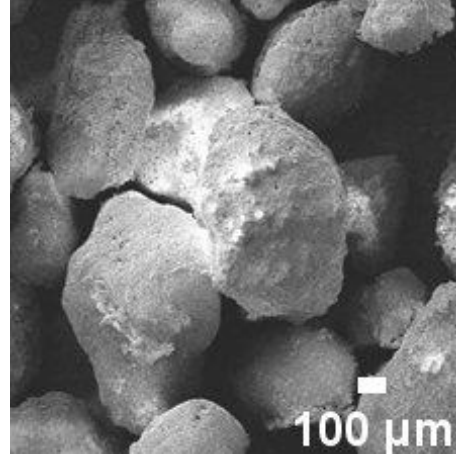
Şekil 3.1 de boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) malzemesine ait SEM görüntüsü incelendiğinde boyutların düzensiz şekilli 60 ile 90 μm arası geniş bir partikül boyut aralığında olduğu

görülmektedir. Bu durum boraks malzemesinin doğası gereği sert ve gevrek morfoloji yapısı ile uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) malzemesine ait SEM görüntüsü

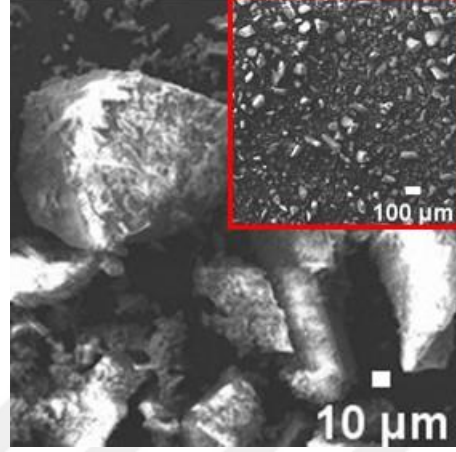
Şekil 3.2 de ise bor oksit (B_2O_3) malzemesine ait morfolojik görüntüleri incelediğinde boraks yapıya benzer şekil yapısına sahip olup boyutsal olarak (yaklaşık 250µm mertebesinde) daha büyüktür. Büyük boyuttaki oksit yapıların mekanik alaşımlama yapılması daha yüksek hız ve sürede işlem gerektireceğini göstermektedir.



Şekil 3.2. Bor oksit (B_2O_3) malzemesine ait SEM görüntüsü

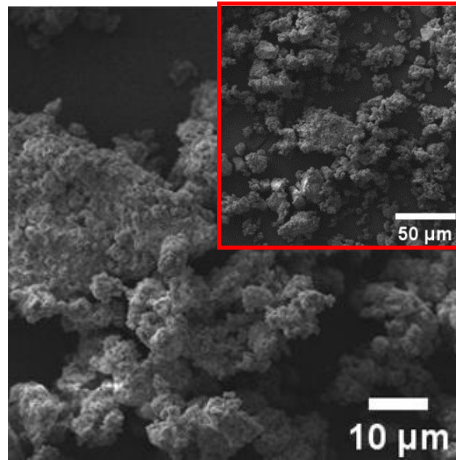
Şekil 3.3 de öğütülmüş kolemanit ($2\text{CaO}_3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) malzemesinin arzu edilen dar partikül boyut dağılımı gösterdiği ve yaklaşık 20-50µm boyut aralığına sahip olduğu görülmüştür.

Her üç bor esaslı malzemenin mekanik alaşımlama öncesi tekil partikül boyut göstermesi mekanik alaşımlamadan beklenen dar partikül boyut aralığı şartını sağlayacağını göstermektedir.



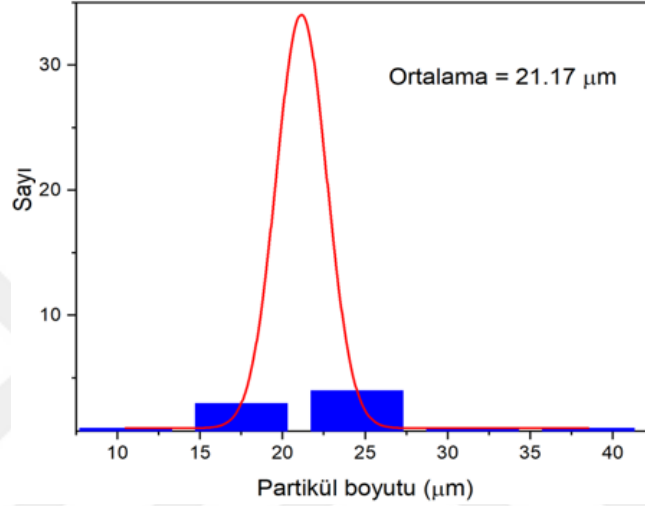
Şekil 3.3. Öğütülmüş Kolemanit ($2CaO_3B_2O_3 \cdot 5H_2O$) malzemesine ait SEM görüntüsü

Şekil 3.4’de eşit oranlarda karıştırılmış olan boraks, bor oksit ve kolemanit malzemelerin mekanik alaşımlama sonrası morfolojik görüntüleri yer almaktadır. Şekil 3.4’de görseller incelediğinde büyük boyutlara sahip bor oksit yapıların yeterince boyutlarının küçülmediği gibi mekanik alaşımlama sonucu partiküller arasındaki ısı kaynaklı etkileşim nedeni ile topaklanma oluşumu görülmüştür. Ayrıca topaklanmış partiküller dışında tekil partikül varlığının da görülmesi mekanik alaşımlamanın bor esaslı kompozit üzerinde etkili bir sonuç ortaya koyduğunu göstermiştir.



Şekil 3.4. Mekanik alaşımlanmış bor malzemelerine ait SEM görüntüsü

Şekil 3.5’de Şekil 3.4’e ait SEM görüntülerine ait partikül boyut dağılımı verilmektedir. Mekanik alaşımlama sonrası öğütülmüş olan bor esaslı tozların ortalama 21,17µm boyuta sahip olduğu ve dar bir partikül boyut dağılımı sergilediği görülmüştür. Bu durum mekanik alaşımlama sonrası partikül boyutlarının 15-30µm aralıklarında yoğunlaştığını göstermiştir.



Şekil 3.5. Mekanik alaşımlanmış bor malzemelerine ait SEM görüntüsünden boyut tayini

Literatürdeki çalışmalar, ticari balata firmalarının görüşü ve diğer parametrik faktörlerin odağındaki değerlendirmelerin sonucunda balata kompozit malzemesinin üretim oranlarına ve içeriklerine karar verilmiştir. Oluşturulan yeni nesil balata kompozisyona ait ağırlıkça oranları ve içerikleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Belirlenen oranlardaki toz karışımları 0.001g hassasiyetindeki hassas terazide tartılarak, homojen bir yapıya kavuşması için literatürde önceden yapılan çalışmalar dikkate alınarak 300 dev/dk hız ve 10 dakika boyunca öğütücüde karışımları sağlanmıştır. Her bir deney grubu için bu işlem ayrı ayrı yapılmıştır. Mekanik alaşımlama ve homojen öğütme işlemleri Iğdır Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Fren Balatası Numunelerinin Toz Karışım İçeriği

Üretilen Numune İçeriği	Tanecik Boyutu	Gruplara Göre Genel Ağırlıkça Oranları			
		% 5 Oranlı Grup	% 10 Oranlı Grup	% 15 Oranlı Grup	
Genel Numune İçeriği	Novalak Reçine	72 µm	15	15	15
	Çelik Yünü	1.5-2.5 mm	10	10	10
	Taş Yünü	1-1.5 mm	7	7	7
	Kevlar	1-2 mm	1	1	1
	Vermikülit	100-300 µm	7	7	7
	Lastik Tozu	150-350 µm	3	3	3
	Barit	10 µm	25	20	15
	Doğal Grafit	95 µm	6	6	6
	Pirinç Talaşı	70 µm	5	5	5
	Organik Kaju Kabuğu Tozu	75 µm	6	6	6
	Potasyum Titanat	18 µm	10	10	10
Her Biri Ayrı Numune Grubu	Bor Oksit	250 µm	5	10	15
	Boraks	60-90 µm	5	10	15
	Kolemanit	20-50 µm	5	10	15
	Bor Karbür	100 µm	5	10	15
	(Bor Oksit + Boraks + Kolemanit) Üçlü Bor Mekanik Alaşım	15-30 µm	5	10	15

3.1.2. Fren Balatası Numunelerinin İmalatı

Fren balatası numunelerinin yapılması için TS 9046 da ki numune kriterlerine uygun boyutlarda 25,4x25,4x20 mm olacak şekilde üretimi planlanmıştır. İlk etapta fren balatalarının üretimi için sıcak iş takım çeliği malzeme yapısında kalıplar üretilerek, bu kalıplara 26 gram miktarında dökülen homojen karışımı yapılmış fren balatası karışım tozları 100 tonluk presleme cihazlarında preslenerek fren balatası tozlarının katı hale gelmesi sağlanmıştır. Fakat uygulamada kullanılan pres amaçlı cihazlarımızın sorunları ve yetersizliğinden dolayı başarısız olunmuştur. Literatürde belirtilen soğuk kalıplama ve sıcak kalıplama uygulamaları tekrar değerlendirilerek, üretimi yapılacak balataların sıcak pres işleminde daha kararlı bir yapıya sahip olunacağı anlaşılmıştır. Bu amaçla

Ticari Fren Balatası Fabrikasından destek alınarak, kamyon balatası kalıplarında üretimin planlanması yapılmıştır. Bu sebeple de kendi bünyelerinde kullanmış oldukları balata hacimleri referans alınarak balata kütlesi hesaplanmıştır. Hem literatürdeki yapılan çalışmalarda (Öztürk vd., 2006; Algan, 2015; Şavk, 2015; Başar vd., 2018; Faga vd., 2019; Aras, 2019; Ma vd., 2021), hem de ticari balatalardan alınan yoğunluk verilerine göre genel olarak balata yoğunluklarının 2-2,5 g/cm³ aralıklarında olduğu görülse de 2 g/cm³ yoğunluğuna daha yakın değerlerin olduğu da görülmüştür. Bu sebeple planlanan balata üretimleri için ort 2.1 g/cm³ yoğunluğuna sahip olmalarına karar verilmiştir. Balata numuneleri için belirtilen kütle miktarı literatürdeki ortalama yoğunluk bilgileri esas alınarak oluşturduğumuz kalıp hacmi (firmaya ait balata hacmi 459,3 cm³) ile arasındaki bağlantıya göre hesaplanmıştır. Yeni bir kalıp boyutu hacminden dolayı da malzeme miktarı 964,53 gr olarak belirlenmiştir.

Fren balatalarının imalatları toz metalürjisi yöntemiyle yapılmaktadır. Bu yöntemle göre balatalar, metal ve metal olmayan tozların bağlayıcılarla harmanlandıktan sonra belirlenen kalıplara dökümü yapılarak sıcak presleme işlemine tabi tutulur. Ardından ısı ile kürlenerek ve/ veya sinterlenerek şekillendirilmesi neticesinde ortaya çıkar (Kumar ve Bijwe 2010; Kalel vd., 2020). Bu amaçla preslenen malzemeler kullanılacak bağlayıcı reçine sıcaklığı dayanımına göre değerlendirilecektir. Fren balatasında kullandığımız bağlayıcı malzeme olarak literatürde ve ticari otomotiv fren balatası üretimde sıklıkla tercih edilen novalak reçine olmuştur. Kullanılan novalak reçinenin firma tarafından, maksimum dayanım sıcaklığının 250°C olduğu belirtilmiştir.

Fren Balatası üretimleri genel olarak 150°C sıcaklıkta 180 bar basınçta sıcak presleme cihazında 8 Dakika 41 Saniye boyunca preslenmiştir. Presleme işlemi boyunca 8 defa pres kalıptan çekilerek kalıp içerisindeki hava alım işlemi sağlanmaya çalışılmıştır. Her hava alma işleminde farklı bir basınç işlemi uygulanmıştır. 100 Bar dan başlayıp kademeli olarak (100 Bar-120 Bar -140 Bar -140 Bar -160 Bar -160 Bar -180 Bar -180 Bar) 180 Bar a kadar basınç işlemine tabi tutulmuştur. Sıcak preslemeden üretilen numuneler daha sonra 8 saat lik fırında kürlenme işlemine alınmıştır. 100°C ile başlanarak 200°C de nihai bitimi sağlanan bu kürlenme işlemi de beş kademedir oluşmuştur.

Bu beş kademenin uygulama periyodu ise, 100°C de 60 dakika, 125°C de 60 dakika, 150°C de 120 dakika, 190°C de 120 dakika ve son olarak 200°C de 120 dakika şeklinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen fren balataları gruplarına göre ayrı ayrı Şekil 3.6 da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Üretilen Fren Balataları Numuneleri

- a) Bor Oksit Numune Grubu, b) Boraks Numune Grubu, c) Kolemanit Numune Grubu
d) Bor Karbür Numune Grubu, e) Mekanik Alaşımlama Numune Grubu

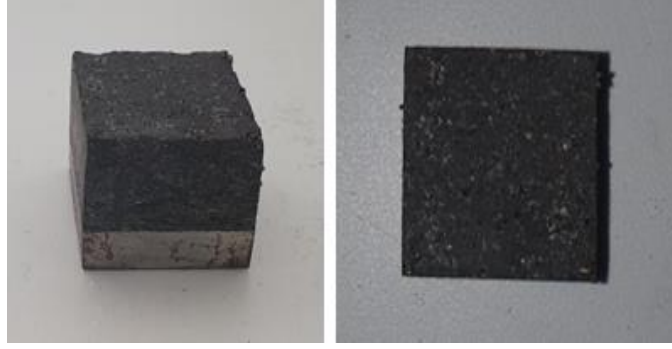
Deneylerde test edilen ticari balatalar ile üretilen fren balatalarının isimlerinin çok uzun olması sebebiyle kısaltılmış kodlamaları oluşturulmuştur. Bu kodlamalar Tablo 3.2' de yer almaktadır.

Tablo 3.2. Deneyleerde kullanılan fren balatalarının kısaltılmış kodlamaları

Deneyleerde Kullanılan Numuneler	Kodlanmış Yeni İsimleri
Ticari Balata	TB
Bor Oksit %5 Takviyeli Numune	B5
Bor Oksit %10 Takviyeli Numune	B10
Bor Oksit %15 Takviyeli Numune	B15
Boraks %5 Takviyeli Numune	BR5
Boraks %10 Takviyeli Numune	BR10
Boraks %15 Takviyeli Numune	BR15
Kolemanit %5 Takviyeli Numune	K5
Kolemanit %10 Takviyeli Numune	K10
Kolemanit %15 Takviyeli Numune	K15
Bor Karbür %5 Takviyeli Numune	BK5
Bor Karbür %10 Takviyeli Numune	BK10
Bor Karbür %15 Takviyeli Numune	BK15
(Bor Oksit + Boraks + Kolemanit) Üçlü Bor M.A %5 Takviyeli Numune	BTMA5
(Bor Oksit + Boraks + Kolemanit) Üçlü Bor M.A %10 Takviyeli Numune	BTMA10
(Bor Oksit + Boraks + Kolemanit) Üçlü Bor M.A %15 Takviyeli Numune	BTMA15

3.1.3. Fren Balatası Numunelerinin TS Standart Boyutlarına Getirilmesi

Üretilen Fren Balataları Numunelerinin, TS 9046 da ki numune kriterlerine uygun boyutlarda 25,4x25,4x20 mm olması için hassas kesim makinesinde belirlenen boyutlara getirilmesi sağlanmıştır. TS 9046'daki kritere uygun numune boyutlarına örnek olarak ticari balatadan kesimi yapılarak oluşturulan numunenin son hali Şekil 3.7'deki gibidir.



Şekil 3.7. TS 9046 Numune boyutuna indirgenmiş örnek balata

3.2. Fren Balatalarının Sertlik Testleri

Üretimi gerçekleştirilen fren balataları ve deneylerde kullanılan fren diskinde ait sertlik değerleri, Iğdır Üniversitesi Makine mühendisliği laboratuvarında yer alan TIME 6102DT marka ve masaüstü model tipindeki cihazda oda sıcaklığında ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri Rockwell- M (1/4" bilye 10kgf ön yük, 100kgf toplam yük) cinsinden hem de TRONIC marka -PD801 modeli olan Shore D tipi ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Hem balata (her numune türünde 3 numuneden) hem de fren diski yüzeyi üzerinden 5 farklı noktadan ölçümleri alınarak ortalaması hesaplanmıştır. Sertlik ölçümlerinde 25x25x20 mm boyutlarında numune kullanıldı. Şekil 3.8 de sertlik cihazları ve numunelerin ölçüm anları görülmektedir.

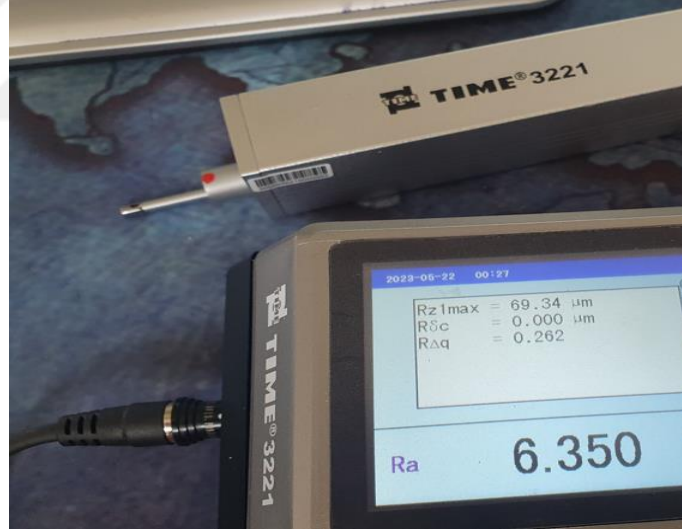


Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan makro sertlik test cihazı ve Shore D test aleti

3.3. Fren Balatalarının Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçümü

Aşınma testleri öncesi ve sonrasında fren balatası numunelerinin temas eden yüzeylerine ait pürüzlülük değerlerini ölçmek için TIME marka 3221 modeli olan yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey ölçümlerinin yapıldığı cihaz Şekil 3.9’da görülmektedir.

Pürüzlülük değerlerinin ölçümleri 2,5 mm’lik (Lc) bir doğru ekseni boyunca iğne uçlu bir sensörün ilerleme hareketiyle elde edilmektedir. Üretilen balata malzemelerinin yüzeyleri çok pürüzlü olmasından dolayı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmadan önce yüzeyin parlatılması sağlandı. Daha sonra sürtünme öncesi numune yüzeyinden ve sürtünme sonrasında aşınmış yüzey üzerinden yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ölçümlerinin alınması gerçekleştirilmiştir. Kayma yönüne dik bir şekilde ölçülen pürüzlülük değerleri, her bir numune için 3 farklı bölge belirlenerek yapıлып ortalamaları alınmıştır.



Şekil 3.9. Deneilerde kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

Yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinden (Ra: Ortalama yüzey pürüzlülüğü, Rq:, kuadratik ortalama pürüzlülük, Rku: Yüksek dağılımın genişliği, Rv: en derin profil derinliği, Rp: en geniş profil tepesi, Rsk: Asimetrik yüksek dağılım, Rt: profilin en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki dikey mesafe, Rz: maksimum Pürüzlülük Derinliği) değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünde ortalama yüzey pürüzlülüğü referans alındığından Ra değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

3.4. Fren Balatalarının Yoğunluk Ölçümleri

Üretilen ve ticari olarak temin edilen fren balatalarının yoğunluk değerlerinin ölçümleri, balatanın geometrik şeklinin belirgin bir dikdörtgenler prizmasına uygun olduğundan geometrik hacim boyutları hesaplanmıştır. Daha sonra hassas terazi de ölçümü sağlanan balatalarının ağırlıklarının, hesaplanan geometrik hacimlerine oranları sağlanarak yoğunlukları belirlenmiştir. Üretilen ve ticari olarak temin edilen fren balatalarının yoğunluk ölçümleri Tablo 3.3'te belirtilmiştir.

Tablo 3.3. Deneilerde kullanılan fren balatalarının yoğunluk değerleri

Deney Numunesi	Yoğunluk (g/ cm ³)
TB	2,027
B5	2,136
B10	2,020
B15	1,913
BR5	2,039
BR10	1,952
BR15	2,003
K5	2,098
K10	2,180
K15	2,232
BK5	2,156
BK10	2,063
BK15	2,172
BTMA5	2,052
BTMA10	2,083
BTMA15	2,139

3.5. Fren Balatalarının Aşınma Performansı Testleri

Frenleme sürecinde sürtünmeye bağlı etkileşimlerinden dolayı termo-mekanik ve kayma gerilmelerinin de varlığıyla birlikte fren balatası yüzeyinden sürekli bir formda malzeme kaybı meydana gelmektedir (Singh vd., 2016; Akıncıoğlu, 2018). Malzemelerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesi ise, malzemelerin bileşen içerikleri (fiziksel ve kimyasal mekanik özellikleri), test şartları (yük, hız, yol) ve aşınma test sistemi türüne (pin-on disk, dinamometre, chase test gibi) göre farklılık göstermektedir (Uyyuru vd., 2006; Akıncıoğlu, 2018). Sürtünme katsayısı belirlenirken, soğuk (normal) ve sıcak sürtünme katsayısı olarak 2'ye ayrılır.

Soğuk sürtünme katsayısında yapılan ölçümlerde uygulama sıcaklıkları 100 °C, 150 °C ve 200 °C'de gerçekleştirilmektedir. Sıcak sürtünme katsayısında ise, ölçümlerdeki uygulama sıcaklıkları sırasıyla 300 °C, 350 °C ve 400 °C'de yapılmaktadır (Akıncıoğlu, 2018).

TS 9046 da ki numune kriterlerine uygun 25,4x25,4x20 mm boyutlarında oluşturulan fren balatalarının sürtünme performansı ve sürtünme katsayısı testleri Pin-on-disk tipi test cihazında uygulanmıştır. Sürtünme ve/veya aşınma performansının belirlenmesinde kullanılan pin on disk tipi deney cihazında fren balatalarının basma kuvveti pnömatik yük kontrollü bir uygulama ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistem için kompresör olarak KL Pro marka KKL100 modelinde 3 BG gücünde ve 300 lt/dk hava debisine sahip 8 bar basınçta çalışan kompresör kullanılmıştır. Deney süresince basıncı sabit bir değerde tutmak için 0-10 bar arası çalışan basınç kontrol valfi kullanıldı. Bununla birlikte silindirin ileri ve geri hareketini sağlamak için 63mm çapında WINMAN marka pnömatik silindir ve WINMAN marka 104431 modelinde yön valfi kullanılmıştır. Deneylerde ortaya çıkan sürtünme kuvvetini ölçmek için Esit marka BB200 modeli olup 200kg kapasiteli yük hücresi (loadcell) kullanıldı.

Yük hücresi, bir ucu sabitlenmiş bir parçaya diğer ucu ise zemine döner mafsal ile bağlı pnömatik piston ile ilişkili olacak şekilde konumlandırılmıştır. Yük hücresi ile birlikte Esit Smart marka 1g hassasiyetindeki indikatör cihazı da kullanılmıştır. Yük hücresinin hem üretimi yapılan firma tarafından uluslararası geçerliliği olan test normlarınca kalibrasyonu yapıldı hem de deney cihazı üzerinde belirli ağırlıklarda 1, 2, 5 ve 10kg yükler kullanılarak kalibrasyonun kontrolü sağlanmıştır. Balata test

deneylerinde sadece sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarının ortaya çıkarılması yeterli olmamaktadır. Bu ölçüm tespitlerinin yanında sürtünmeye bağlı olarak aşınma testi boyunca sıcaklığın etkisi de özellikle balatada etkili bir faktör olarak yer almaktadır. Bu sebeple sistem de yer alan fren diskinin sıcaklığını istenilen değerler seviyesine getirebilmek için 2.2 kw gücünde plaka tip rezistans kullanılmıştır. Diskin n yüzeyine 5 mm mesafede konumlandırılan bu plaka rezistans ardino kontrol kartı ile otomatik sıcaklık kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla plaka rezistansa konumlandırılan termokupl ile sıcaklığın artışının değeri ölçülerek ardino karta sıcaklık verisinin gitmesi sağlandı.

Daha sonra yapılan program sayesinde drag testleri için 400 °C maksimum sıcaklığa çıkılırsa ısıtma işleminin devreden çıkması, 390 °C düşerse tekrar ısıtmanın devreye girmesi şeklinde döngü oluşturulmuştur. Yine aynı programlama da 200°C sabit sıcaklıkta deneylerin gerçekteştirilmesi için de ± 5 sıcaklık tolerans payında çalışması için 203°C ye çıkınca ısıtma iptal, 197 °C ısı düştüğünde ise ısıtma aktif edilmiştir. Ani ısınmanın yükselmemesi için ayrıca fren diski kademeli olarak fan cihazı ile soğutulması sağlanmıştır. Ayrıca deneylerde fren diskinde oluşan sıcaklığın ölçülmesinde de Optris CS marka kızılötesi (infrared) termometre de kullanılmıştır. Termometre, -40°C ila 1030°C sıcaklık değerleri aralığında ölçüm yapabilen, $\pm 1,5\%$ hata payına ve 15ms tepki süresine sahip bir cihazdır. Diskin yüzeyine 50mm uzaklığa sabitlenen ve disk üzerindeki 13mm çaplı bir alandan sıcaklık değerlerini ölçmeyi sağlayan termometre sayesinde, sıcaklık verileri deney süresince kaydedilerek bir usb bağlantısıyla ara yüz programına aktarımı yapılmıştır. Bu sayede balata yüzeyinin temas ettiği disk sıcaklığa ile aşınma ve sürtünme katsayısı arasında ilişkiyi ortaya koyan grafiklerin oluşturulması amaçlanmıştır. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda tasarlanmış olan deney sisteminde yapılacak olan testler için 5.5kW gücünde ve 0-1400 dev/dk değerleri aralığında çalışan trifaz AGM 132 S 4 tipinde elektrik motoru kullanılmıştır.

Dizaynı gerçekteştirilen deney düzeneği sayesinde ticari ve üretilen balataların, TS 555 ve TS 9076 standartlarına uygun olarak, farklı hız, basınç ve sıcaklık şartlarında sürtünme katsayısı ve aşınma deneylerinin yapılabilmesi sağlanmıştır.

Mühendislik tasarım hesaplamalarıyla yapılan pin on disk deney düzeneği sayesinde farklı hız, basınç ve sıcaklık koşullarında fren balatalarının sürtünme katsayısı-zaman ve sürtünme katsayısı-sıcaklık ilişkilerini grafiksel olarak gözlemlemek mümkün hale gelebilmiştir. Aşınma deneylerinde meydana gelen aşınma miktarını ve balataların yoğunluk ölçümlerini belirleyebilmek için Precisa 205 A SCS marka/model 0,0001 gr hassasiyetinde olan hassas terazi kullanılmıştır. Her ölçüm öncesinde terazinin kalibrasyon ayar işlemi yapılarak ölçümler yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca deneylerdeki verilerden özgül aşınma miktarı ise literatürde (Öztürk vd., 2007; Akıncıoğlu, 2018) yer edinmiş olan denklem 2.11' de gösterilen formül ile hesaplanmıştır. Test öncesi ve sonrasında numunelerin kütlesi hassas terazide ölçülmüştür.

Deneylerde aşınma testleri 3 farklı basınç yüklemelerinde olan sırasıyla 0.5 MPa, 0.75 MPa ve 1 MPa yani 322,58 N, 483,87 N ve 645,16 N normal yükler uygulanmıştır. Aşınma hızı sabit 6,7 m/s çizgisel hızı belirlenmiştir. Deneyler iki farklı kategoride uygulanmıştır. Bunlardan birincisi drag testleri olup, sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısının değişiminin de incelendiği sabit hız ve basınçta sürekli yüklemenin olduğu sürtünme testleri olarak yer almıştır. Bu uygulamada genel olarak en düşük 50°C sıcaklıktan başlanılarak ölçümler alınmaya çalışılmıştır. Bu testlerde aşınma mesafesi 10000 metre olarak belirlenmiştir. Birinci test ile artan sıcaklık ve yola bağlı olarak balata numunesindeki sürtünme katsayısının değişiminin incelenmesi hedeflenmiştir. Aşınma testlerinde ikinci test olarak ise sabit sıcaklıkta test protokolünün uygulanması olmuştur. Bu test aşamasındaki deneyde, 200°C sabit sıcaklıkta $\pm 5,5^{\circ}\text{C}$ tolerans kapsamında yine aynı yüklemelerde ve 6000 metre aşınma mesafesi ile üretilen fren balatalarının testleri yapılmıştır. Böylece yola bağlı olarak hem sürtünme katsayısı hem de aşınma kaybının analizi hakkında değerlendirmenin yapılabilmesi hedeflenmiştir. Daha sonra deneylerdeki ölçümler neticesinde ortaya çıkan veriler analitik olarak toparlanıp balata numunelerinin özgül aşınma değerleri hesaplanacaktır.

Fren balatalarında yapılan testlerden önce balataların yüzey temasının en az % 95 oluncaya kadar ön bir alıştırmaya tabi tutulması hakkında literatürde yer alan önemli bir detay mevcuttur. Buna göre alıştırmaya aşamasında fren balatası numunelerinin

700 kPa basınç değeri yüklemesi altında, ihtiyaç olduğunda soğutma işlemleri de uygulanarak 200 °C sıcaklık değerinde numune yüzey teması en düşük %95'i sağlayana dek sürekli olarak teste tabi tutulmalıdır.

Aralıklı olarak 100 °C sıcaklık değerinde 10 saniye yük etkili, 20 saniye yük etki etmeksizin 1050 kPa basınç değeri yüklemesi altında gerçekleştirilmelidir. Yine bunlara ek olarak, 700 kPa basınç değeri yüklemesi altında 100 °C sıcaklık değerinde balata numunelerinin sürtünme katsayısı sabit oluncaya kadar ve yüzey temasında en düşük %95'i sağlayana dek 310dev/dk testlerinin uygulanması gerçekleştirilir (Pektaş, 1995; Kocabaş, 2012). Literatürdeki mevcut bu test protokolüne bağlı kalınarak yapılan fren balatası testlerinden önce ön alıştırma testleri de bu formatta uygulanmıştır.

SAE J661 standartlarına göre sürtünme katsayılarının harflerle ifadesi tablo 3.4'te yer almaktadır.

Yapılacak deneylerin sonucunda elde edilecek sürtünme katsayısı verilerine göre üretilen balata numuneleri de burada yer alan harflendirmeye göre sembolize edilecektir.

Tablo 3.4. Sürtünme katsayılarının harflendirilmesi (Akıncıoğlu, 2018)

Sürtünme Katsayısı Aralığı	Harf Sınıfı
<i>0,25-0,34</i>	<i>E</i>
<i>0,35-0,44</i>	<i>F</i>
<i>0,45-0,54</i>	<i>G</i>
<i>0,55-</i>	<i>H</i>

Sürtünme katsayısının harf ile belirtilmesiyle ifade edilen tabloya göre bir fren balatasının soğuk sürtünme katsayısı “F”, sıcak sürtünme katsayısı ise “E” olarak tespit edildiyse bu iki harfin bütünleşik olarak kullanımıyla “EF” olarak belirtilmesi sağlanır. Burada yer alan ilk harf sıcak sürtünmeyi belirtirken ikinci olan harf ise soğuk sürtünme katsayısını belirtmektedir (Akıncıoğlu, 2018).

3.6. Fren Balatası Numunelerine Uygulanan SEM ve EDX Analizleri

Balataların detaylı incelemeleri için önemli bir ihtiyaç olan bu analizler, hem mikro yapısının incelenmesi hem de balata yüzeyinde ortaya çıkan aşınma etkilerinin değerlendirilebilmesi gayesiyle oldukça gereklilik arz etmektedir. Fren balatalarının karakteristik özelliklerinin ortaya çıkarılmasında, mikro yapı incelemeleri önemli bir analizdir. Özellikle yeni üretilen fren balatalarında elementlerin birbirleriyle uyumu ve balata içerisindeki homojen dağılımının belirlenmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca aşınma sonrası yüzeyde oluşan aşınma davranışını ve yüzeydeki karakterizasyonu belirlemede de mevcut analizler kullanılmıştır. Fren balatası numunelerinin SEM (Taramalı Elektronik Mikroskopu) görüntüleri Süleyman Demirel Üniversitesi'nde bulunan YETEM'de (Yenilikçi Teknolojiler Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi) çekilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Fren Balatası Numunelerinin Sertlik Testi Sonuçları

Sertlik değerleri her numune tipinden üç adet olmak üzere Rockwell M skalasında ve Shore D ile her numunenin 5 farklı noktasından ölçümü yapılarak ortalaması alınmıştır. Sertlik ölçümlerinde her numunenin alt ve üst yüzeylerinden ölçümlerinin alınması sağlandı. Sertlik değerleri 72-100 HRM değerleri ile 76,4-94,3 Shore D değerleri arasında değişmektedir. Ticari ve üretilen fren balatalarının sertlik değerleri yapılan ölçümler neticesinde Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’ de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Deneyde kullanılan ticari fren balatasının sertliği

	HRM	Shore D
Ticari Fren Balatasının Sertliği	72	76,4

Tablo 4.2. Üretimi yapılan ve Deneylerde kullanılan fren balatalarının sertlik değerleri

Deney Numunesi	%5 Takviyeli Grup		%10 Takviyeli Grup		%15 Takviyeli Grup	
	HRM	Shore D	HRM	Shore D	HRM	Shore D
B	72,8	82,8	76,8	84,1	78,4	84,6
BR	78,7	86,4	78,9	86,8	84,5	92,1
K	80,3	83,1	82,8	85	83,9	87,2
BK	84	87,8	85,1	90,4	87	91,5
BTMA	88,2	90	92,3	91	100	94,3

280 mm çap değerine ve 13 mm kalınlığına sahip olan deneylerde kullanılan fren diski, ticari bir otomobil markasına ait olup iki farklı ölçme ucuyla elde edilen değerlerin, 225 HB ve 114,7 HRM sertliğine sahip olduğu ölçülmüştür. Üretilen balatalar içerisinde en düşük sertlik %5 takviyeli bor oksit numunesinde, en yüksek sertlik ise %15 takviyeli mekanik alaşımlı bor türevli numunelerde olduğu görülmüştür.

Fren balatalarındaki sertliklerinin değişiminde balataların oluşmasını sağlayan birleşimdeki içerikler ve oranların etkisi görülmektedir. Balataların sertlik değerlerinin ölçümü ve değerlendirilmesi aşınmaya yönelik ana fikir oluşturabilmektedir. Bu sebeple balata sertlik ölçümlerinin yapılarak belirlenmesi üretilen balata modelleri için yüksek öneme sahiptir.

Üretilen balataların sertlikleri incelendiğinde deney numuneleri arasında belirgin farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu durum numune bazındaki gruplar arası takviye oranında değerlendirildiğinde ise birbirine yakın aralıklarda olduğu fark edilmektedir. Fren balatası numuneleri içerisinde en yüksek sertlik değerine sahip olan numune ve grubu, tezin de özgünlüğü olarak görülen bor türevli mekanik alaşımlı numuneler içerisinde %15 takviyeli grup olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum sertlikleri normalde de yüksek olan boraks, bor oksit ve kolemanitin bütünleşik olarak bir arada yer aldığı kompozit balata yapısında takviye oranının da fazlalığı ile yüksek sertlik oluşturması şeklinde değerlendirilmiştir. %15 takviyeli BTMA numunelerinin yapılan sertlik ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanan değerleri 100 HRM ve 94.3 Shore D olduğu belirlenmiştir. Yine aynı numune türevinde yer alan farklı oranlardaki gruplarda da sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu, %5 oranlı BTMA numune grubunun ise BTMA numuneleri içerisinde en düşük sertliğe sahip olduğu görülmüştür.

Üretilen fren balatası numunelerinin içerisinde en düşük sertliğe sahip numune ve grubu olarak ise bor oksit numuneleri olan (B) % 5 takviyeli grubun olduğu görülmüştür. Yapılan sertlik ölçümlerden elde edilen ortalama hesaplamalar sonucunda 72.8 HRM ve 82.8 Shore D değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

%15 takviyeli BTMA numunesi ile % 5 takviyeli B numunesi arasında Shore D cinsinden %13 lük, HRM cinsinden ise % 37 lik fark olduğu ortaya çıkmıştır. Deney numunelerinde sertliklerin değişimi büyükten küçüğe doğru sırasıyla BTMA numunelerinden başlayarak, BK, K, BR ve son olarak B numunelerinin olduğu şekilde konumları oluşmuştur. Ayrıca her bir numune grubunda da takviye oranının artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı ya da birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. İşlem yapılmamış bor malzemeleri arasında, bor karbür takviyeli balataların diğer bor bileşenli balatalara göre daha sert olduğu belirlenmiştir. Fakat boraks ve kolemanit

katkılı balataların bor karbür takviyeli olan balataların sertliğine çok yakın olduğu da görülmüştür.

Ticari balatadan alınan sertlik (72 HRM ve 76.4 Shore D) değerleri bor takviyeli üretilen balataların sertliklerine göre en alt sıralamada kaldığı görülmüştür.

Literatürdeki bor takviyeli yapılan çalışmalar da incelendiğinde, yapılan çalışmadan üretilen balataların diğer çalışmalarda yer alan sonuçlara göre yakın ve uyumlu olduğu görülmüştür. Akıncıoğlu vd., (2019), bor katkılı yapmış oldukları çalışmadaki balataların sertlik değerlerinin 92 Shore D değerlerinde olduğunu, Kosbe ve vd., (2020) ise hegzagonal BN katkılı fren balatası malzemesinin etkisini incelemek üzere yapmış oldukları çalışmada katkı yüzdesi arttıkça sertliğinin de doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir.

Hem yapılan deneyler sonucunda hem de literatürdeki çalışmaların değerlendirilmesine göre balata içeriğinin bileşimi, oranı, üretim metodu ve içeriğinde yer alan tozların boyutları da ortaya çıkarılacak balata numunelerin sertliğini belirlemede önemli kriterler arasında yer almaktadır (Aigbodion vd., 2010; , Maleque vd., 2012).

4.2. Fren Balatası Numunelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Yüzey pürüzlülüğünün aşınma sonrasında tribolojik etkisinin değerlendirilebilmesi için aşınma öncesi ve sonrasında ölçümleri yapılarak karşılaştırılması yapılmaya çalışılmıştır.

Aşınma davranışında çok etkili olan yüzey pürüzlülüğü, yüksek olduğu yüzey yapılarında temas etki alanının küçük fakat birim yüzeye etki edecek olan kuvvetin büyük olduğu bilinmektedir. Öyle ki yüzey pürüzlülük değeri yüksek seviyede olan malzemelerin aşınma kaybının da daha çok olacağı nitelendirilmiştir (Kocabaş, 2012; Aras, 2019)Balata içeriğinin de nasıl etkilemiş olabileceği değerlendirilecek olan bu kısımda balataların aşınma öncesindeki yüzey pürüzlülük ortalama (Ra) ölçüm değerleri ile pin-on disk aşınma test uygulamalarının sonucunda tekrar ölçümleri gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ortalama (3 ayrı numunenin her biri için 3 farklı noktadan) nihai değerleri sırasıyla tablo 4.3, tablo 4.4, tablo 4.5 ve tablo 4.6' da yer almıştır.

Tablo 4.3. Farklı Yükler altındaki ticari fren balatalarının (Ra) değerleri

Deney Numunesi	0.5 MPa Yük Uygulamalı Numune		0.75 MPa Yük Uygulamalı Numune		1 MPa Yük Uygulamalı Numune	
	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası
Ticari Balata	6,198	2,576	5,174	2,398	5,857	2,543

Tablo 4.4. Üretilen fren balatalarının 0.5MPa basınç yükü altındaki (Ra) değerleri

Deney Numunesi	%5 Takviyeli Grup		%10 Takviyeli Grup		%15 Takviyeli Grup	
	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası
B	6,457	3,098	8,202	5,272	7,500	5,194
BR	4,929	2,718	5,310	2,415	6,373	5,328
K	3,841	1,416	4,859	1,470	3,856	1,529
BK	5,518	1,693	6,727	1,711	8,644	1,771
BTMA	6,702	1,945	4,594	2,599	4,705	3,609

Tablo 4.5. Üretilen fren balatalarının 0.75 MPa basınç yükü altındaki (Ra) değerleri

Deney Numunesi	%5 Takviyeli Grup		%10 Takviyeli Grup		%15 Takviyeli Grup	
	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası
B	7,834	4,152	8,431	5,630	8,240	5,419
BR	6,469	3,320	5,038	2,291	6,485	4,959
K	4,098	2,380	4,246	2,009	5,081	1,897
BK	5,378	3,933	6,561	1,706	8,371	1,232
BTMA	5,415	2,407	4,133	1,583	4,355	1,360

Tablo 4.6. Üretilen fren balatalarının 1 MPa basınç yükü altındaki (Ra) değerleri

Deney Numunesi	%5 Takviyeli Grup		%10 Takviyeli Grup		%15 Takviyeli Grup	
	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası	Aşınma Öncesi	Aşınma Sonrası
B	6,936	3,428	8,509	5,903	8,195	4,885
BR	3,616	1,416	5,042	1,862	6,014	5,034
K	3,639	1,007	4,764	2,002	4,946	2,350
BK	6,364	3,407	7,748	1,182	8,244	1,268
BTMA	3,996	2,067	5,397	2,083	4,677	2,015

Tüm numune grupları içerisinde, yüzey pürüzlüğü ortalama (Ra) değerlerinin aşınma öncesi 3,616 μm ile 8,644 μm aralığında iken aşınma sonrasında ise 1,007 μm ile 5,903 μm aralığında olduğu ölçülmüştür.

Numuneler bazında her bir numune hem takviye durumlarına göre ve hem de numune grupları arasında yüzey pürüzlülüklerinin durumları değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılan tüm balata numune grupları arasında, yükleme öncesindeki genel olarak en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip balata grubunun kolemanit takviyeli balata grubu iken en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip numunelerin ise bor oksit ile bor karbür numune gruplarının olduğu görülmüştür. Bu durum balata kompozisyonunda yer alan malzeme içeriklerinin yüzey pürüzlülüğünün değişiminde etkili olduğunu da göstermiştir. Her ne kadar üretimi gerçekleştirilen balata numuneleri arasında sertliği en düşük numuneler arasında yer alsa da genel olarak bor oksit malzemesinin mevcut olan sert morfolojik yapısının etkisi karışım kompozisyonunda yüzde olarak arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerinin giderek arttığı şekilde yönelim gösterdiği de görülmektedir. Bu durum tablo 4.4, tablo 4.5 ve tablo 4.6 ya bakıldığında genel olarak tüm balata numune grupları arasında da katkı yüzdesinin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı şeklinde görülmektedir. Ayrıca boraks, kolemanit ve bor türevli mekanik alaşımlanmış katkı içerikli numune gruplarının ise daha yüksek sertliklere sahip iken daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip olduğu da görülmüştür.

4.3. Fren Balatalarının Aşınma Performansı Testlerinin Sonuçları

Mevcut çalışmamızda, bor türevlerine sahip üretimi gerçekleştirilen balata numuneleri ile ticari olarak temin edilen balata numuneleri (TB, B5, B10, B15, BR5, BR10, BR15, BK5, BK10, BK15, K5, K10, K15, BTMA5, BTMA10, BTMA15) pin-on disk düzeneğinde yapılan sürtünme testlerinin değerlendirme sonuçları bu bölümde yer almaktadır.

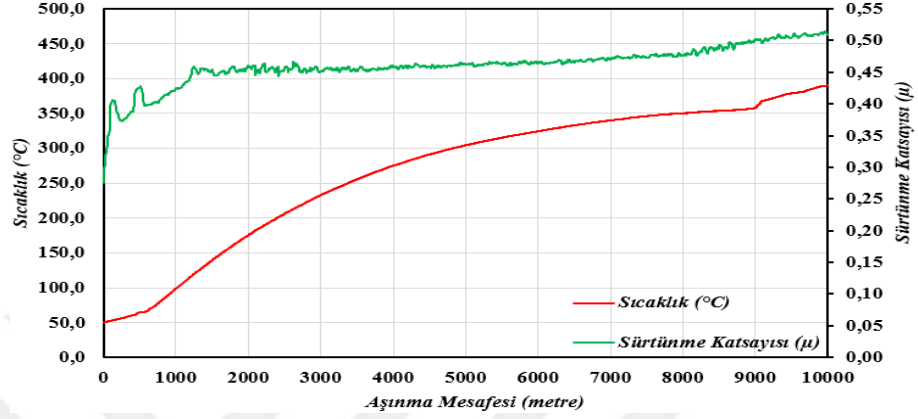
Üretilen fren balatası numunelerine ait sonuçlar, referans olarak alınan ticari otomobil balatası ile mukayese edilmiştir. Bu çalışma ile, farklı bor türevli tozların yine farklı oranlardaki katkısı ile mekanik alaşımli bor türevli tozların farklı oranlarındaki olan katkılarının fren balatasının değerlendirmesinde etkili olan parametrelerden sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle hem aşındırıcı hem de yağlayıcı özelliklere sahip bor malzemelerinin farklı türevleri arasında değerlendirmeler yapılmıştır.

Balata kompoziti oluşturulurken dolgu malzemelerinin yerini alması şeklinde oranlanmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmadaki ilk deneyler, drag testleri olarak geçmektedir. Bu testler ile sıcaklığa ve yola bağlı olarak balata numunelerinin sürtünme katsayılarındaki değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.1 de ticari balata numunelerine ait sıcaklıkla sürtünme katsayısının değişimleri gösterilmiştir.

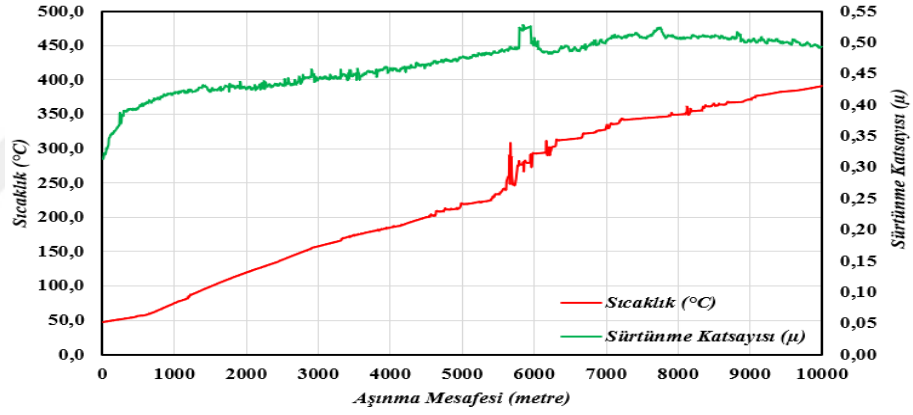
Şekil 4.1 de ticari balataların analizlerinin yer aldığı grafikler incelendiğinde yükün artışına bağlı olarak sürtünme (μ) katsayısı değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Ticari balatalar da sürtünme (μ) katsayısı değerlerinin 0,45 μ ile 0,55 μ arasında değişmiş olsa da ortalama sürtünme katsayısının 0,5 μ değerlerinde olduğu görülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte sürtünme katsayılarında da kısmi bir artmaya yönelik eğim gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu duruma yüzeydeki partiküllerin sürtünme boyunca tekrarlı olarak koparak sıcaklık ve baskı kuvvetlerinin etkisiyle tekrar kaynaması sonucu aşınma yüzeyi ara tabakasında farklı yükseltilerin oluşmasından kaynaklı olduğu da düşünülmektedir. Ayrıca aşınma boyunca yüzeyden kalkan tabakanın yerini alan diğer partiküllerin daha sert bir malzeme içeriğine de rastlanmış olması muhtemel nedenleri arasında yer alabilir.

Hatta mevcut ticari fren balatası numunelerinin hem 483,87 N'luk yükleme deneylerinde hem de 645,16 N'luk yükleme deneylerindeki sürtünme katsayılarının kararsız bir formda olması da genel olarak frenleme performansı açısından düşük

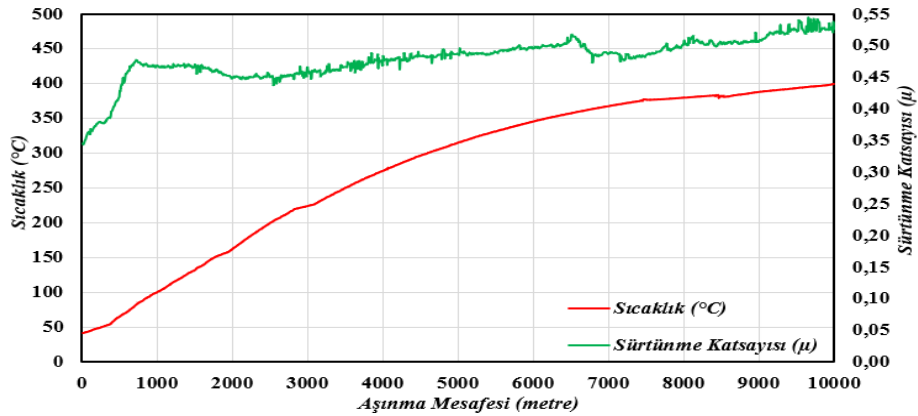
kalabileceği kanaatini çıkarımı ortaya koymaktadır. Deneyleeri gerçekleştirilen ticari fren balatası numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır.



a)



b)



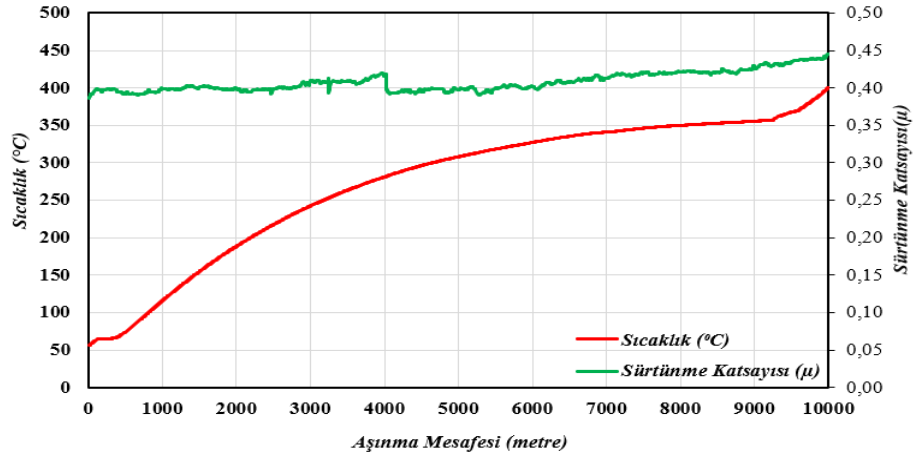
c)

Şekil 4.1. Sıcaklığa bağlı olarak ticari balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

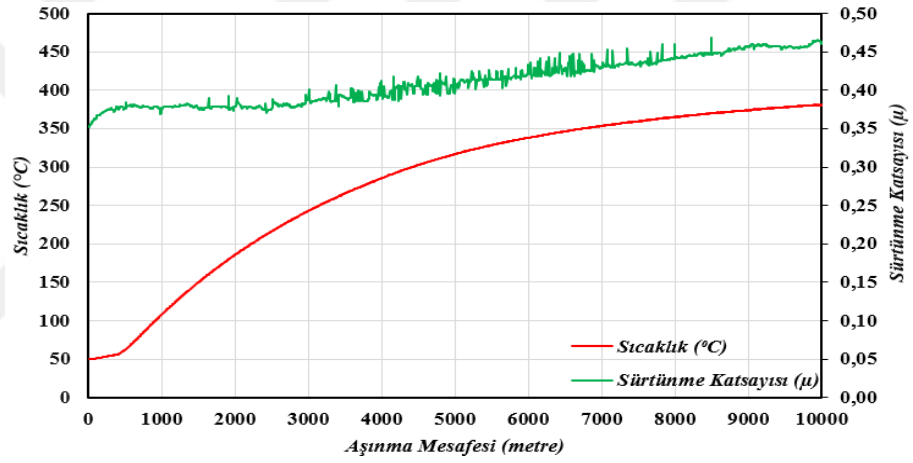
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N

Şekil 4.2’de yer alan grafiklerde % 5 takviyeli bor oksit katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Yapılan sürtünme testlerinde her üç grafik için de ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin $0,41 \mu$ olarak çıktığı hesaplanmıştır. $483,87 \text{ N}$ ’ luk yükte grafiksel olarak $322, 58 \text{ N}$ ’ luk yüke göre daha yukarı yönde artış olsa da genel ortalama sürtünme katsayısında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Şekil 4.2 -b)’ de yer alana grafikte 5000 metreden sonra balatanın sürtünme katsayısında artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum hem yükün etkisi hem de aşınma yüzeyindeki tabakalarda mevcut partiküllerin zayıflayarak kopması ile sürtünme ara yüzeyinde ikinci bir baskı oluşturabileceği şeklinde anlaşılmaktadır. Şekil 4.2 c’ de ise hem yükün artması hem de sıcaklığın etkisiyle takviye edilen bor oksidin, özellikle 7000 metreden sonra yağlayıcı özelliği sayesinde aşınmadaki sürtünme davranışının negatif yönde etkileyici bir davranış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca yine aynı yükteki ($645,16 \text{ N}$) deneysel uygulamalardan elde edilen sürtünme katsayılarının düzensiz olması mevcut bir kararlılığa sahip olmamasından dolayı balatalardan beklenen frenleme performansı da olumsuz etkileyebileceğidir. %5 takviyeli bor oksit katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre F sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır

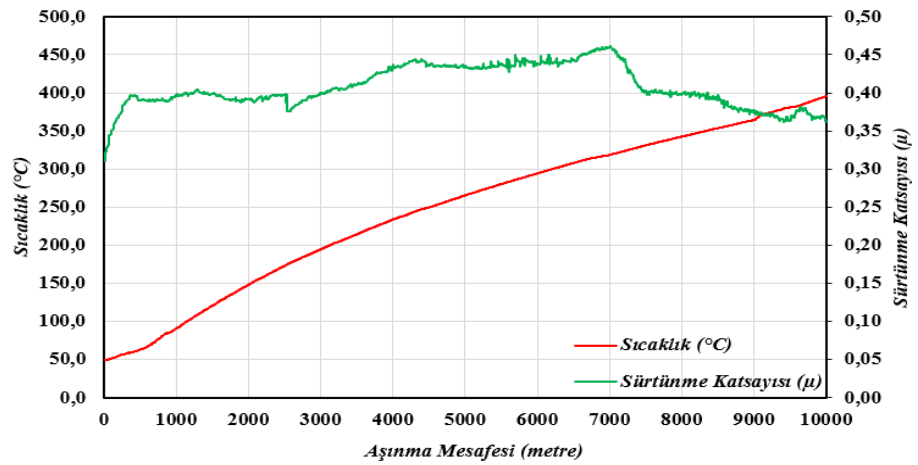
Şekil 4.3 de yer alan grafiklerde ise %10 takviyeli bor oksit katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla $322, 58 \text{ N}$ yükte $0,43 \mu$, $483,87 \text{ N}$ yükte $0,48 \mu$ ve $645,16 \text{ N}$ yükte de $0,49 \mu$ olarak çıktığı belirlenmiştir. Artan normal kuvvet ile beraber ortalama sürtünme katsayısı değerinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca %5 takviyeli bor oksit katkılı balata numunelerine göre de sürtünme katsayısının arttığı görülmüştür. Bu durum balata içerisinde yer alan bor oksit katkısındaki yüzde etkisini çok net göstermektedir. Öyle ki sertliğinin de artışının olmasının yanı sıra aşındırıcılık yönünden de artış mevcut olmuştur. $645,16 \text{ N}$ yükteki deneysel uygulamalarından elde edilen sürtünme katsayılarının düzensiz olması ve mevcut bir kararlılığa sahip olmamasından dolayı balatalardan beklenen frenleme performansını da olumsuz yönde etkileyebileceği durumu kapsamaktadır. %10 takviyeli bor oksit katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır.



a)



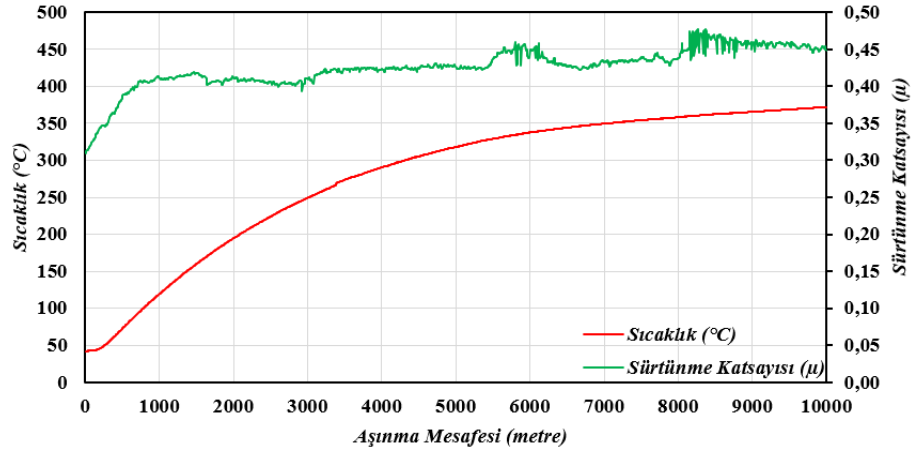
b)



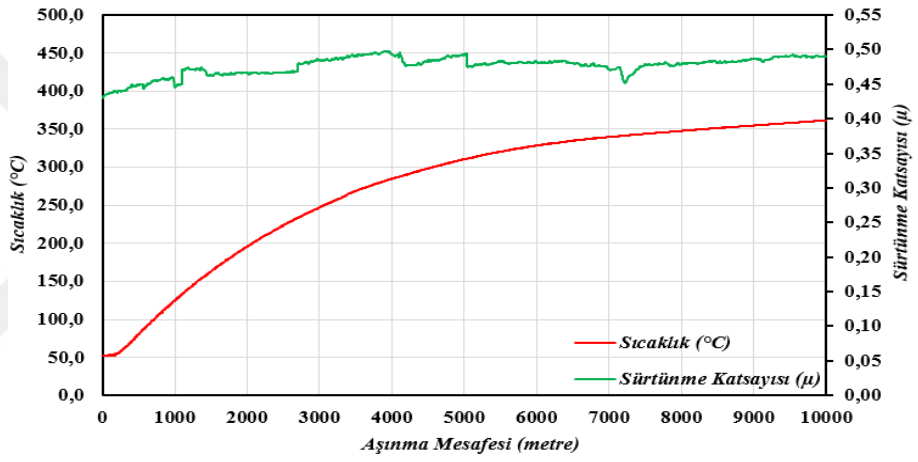
c)

Şekil 4.2. Sıcaklığa bağlı olarak %5 bor oksit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

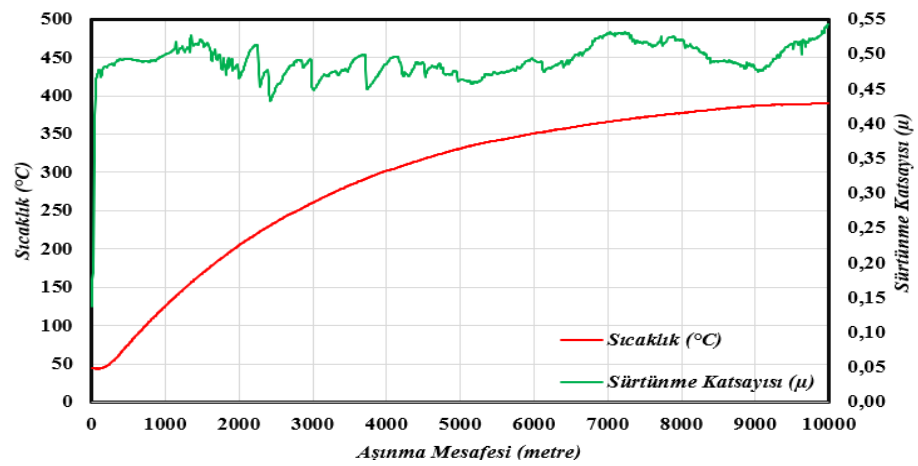
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



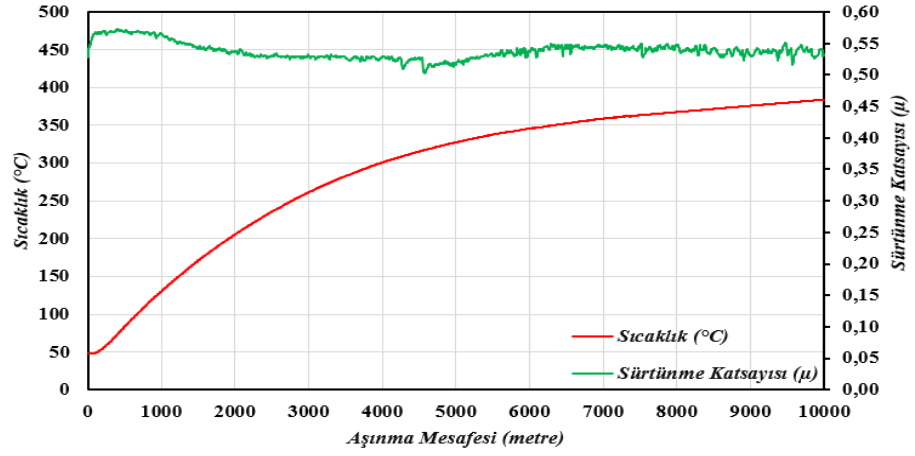
b)



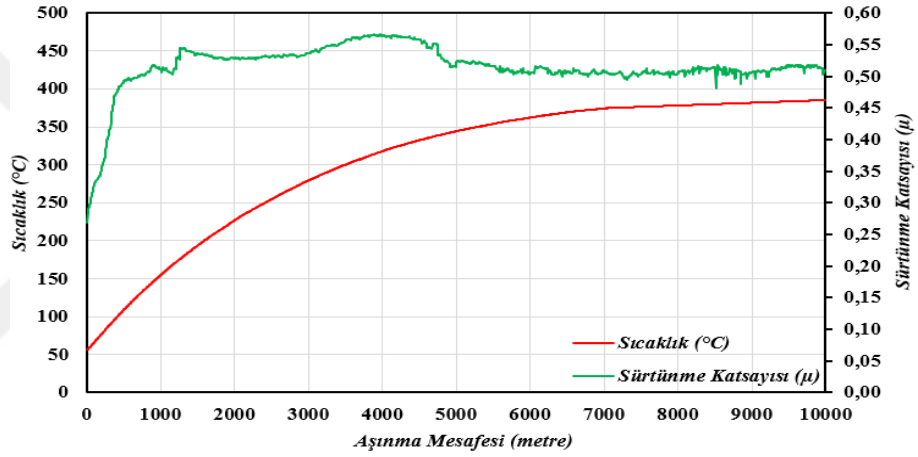
c)

Şekil 4.3. Sıcaklığa bağlı olarak %10 bor oksit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

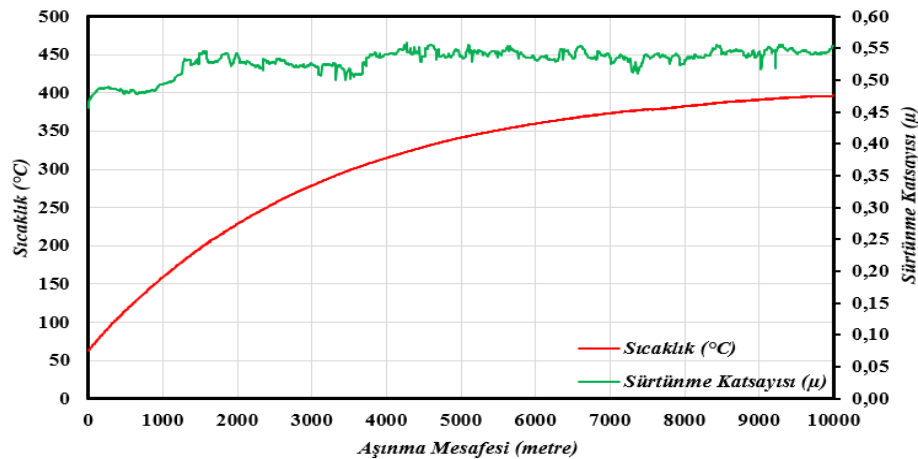
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



b)



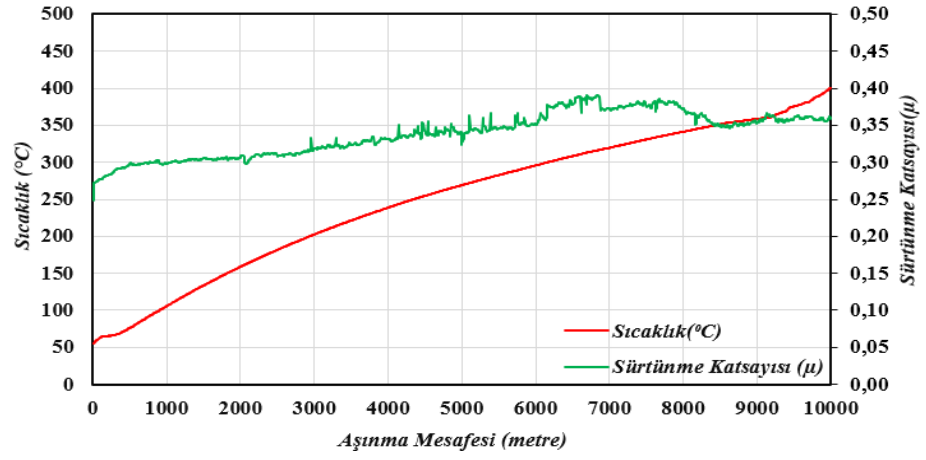
c)

Şekil 4.4. Sıcaklığa bağlı olarak %15 bor oksit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

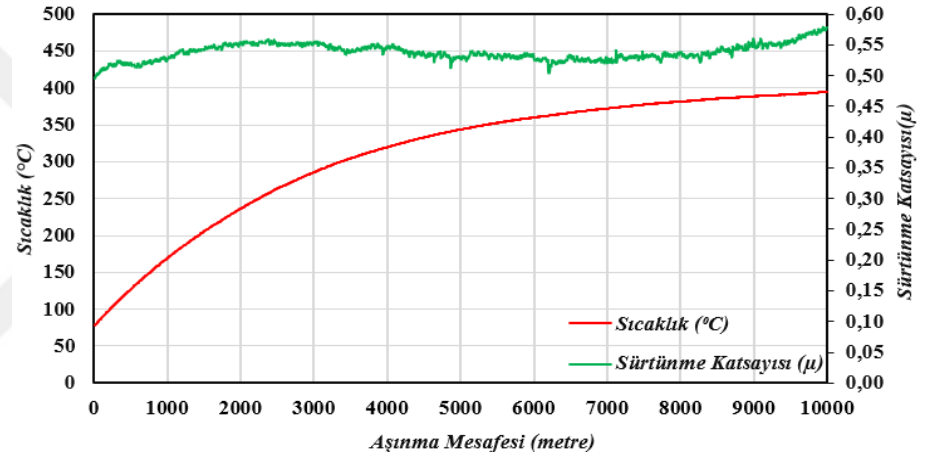
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N

Şekil 4.4’de % 15 takviyeli bor oksit katkılı balata numunelerinin analizlerinin yer aldığı grafikler incelendiğinde genel olarak ortalama sürtünme (μ) katsayısı değerlerinin 0,5 ile 0,55 μ aralığında olduğu görülmüştür. 483,87 N’ luk yükleme deneylerinde balatadaki bor oksit katkı malzemelerinin yağlayıcı özelliğinin daha aktif bir şekilde etki ederek sürtünme katsayısını diğer yüklemelerdeki deneylere göre negatif yönde 0,01 μ ve 0,02 μ değerlerinde değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum mevcut yükleme deneyindeki balata numunelerinin kararsız sürtünme katsayısından dolayı frenleme performansında da olumsuz yönde etkisinin olacağını göstermektedir. % 15 takviyeli bor oksit balata numunelerinin sıcaklıkla olan sürtünme davranışı değişimden tüm yüklemelerde genel olarak 5000 metreden itibaren daha kararlı bir sürtünme katsayısının olduğu görülmüştür. Artan bor oksit yüzdesi miktarı ile % 5 ve % 10 bor oksit katkılı balata numunelerine göre sürtünme katsayısı değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. Bor oksit katkısının artmasıyla sürtünme katsayısındaki artış literatür ile de uyumludur (Akıncıoğlu, 2018). %15 takviyeli bor oksit katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır.

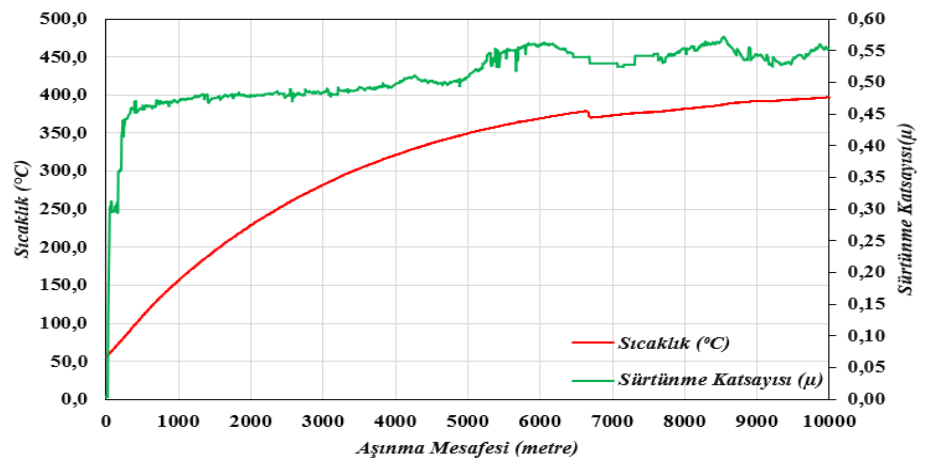
Şekil 4.5’ de yer alan grafiklerde ise %5 takviyeli boraks katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,34 μ , 483,87 N yükte 0,54 μ ve 645,16 N yükte de 0,51 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. 322, 58 N ve 645,16 N yüklemelerde artan sıcaklıkla birlikte sürtünme katsayısının giderek arttığı ve diskteki sıcaklığın 350°C yi bulduktan sonra daha kararlı bir form da devam ettiği görülmüş olsa da genel olarak bu iki yüklemedeki numunelerin deney boyunca dalgalı bir sürtünme katsayısı sergilemiş olmalarından dolayı frenleme performansı açısından olumsuz yönde olduğu etkilenebileceği ön görülmüştür. Yine aynı grafiklerde yer alan verilerden 483,87 N yüklemedeki deneylerde ise boraks katkılı numunelerin deney boyunca kararlı bir sürtünme katsayısına sahip oldukları da anlaşılmaktadır. % 5 takviyeli boraks katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre 322, 58 N yükteki sürtünme davranışı için E sınıfı olduğu görülürken, 483,87 N ve 645,16 N’ luk yüklemelerdeki sürtünme davranışına göre de G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır.



a)



b)



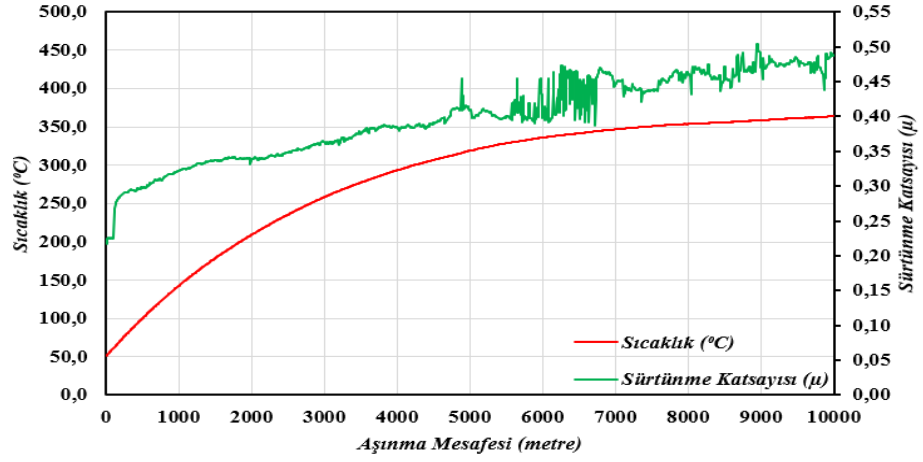
c)

Şekil 4.5. Sıcaklığa bağlı olarak %5 boraks katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

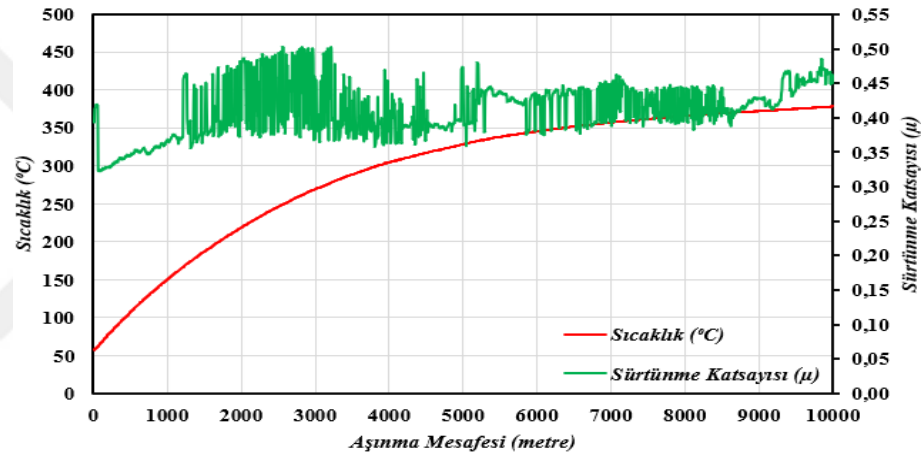
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N

Şekil 4.6 da yer alan grafiklerde %10 takviyeli boraks katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,40 μ , 483,87 N yükte 0,41 μ ve 645,16 N yükte de 0,48 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Artan normal kuvvet ile beraber ortalama sürtünme katsayısı değerinin de arttığı görülmüştür. 645,16 N yüklemdeki deneylerde ise boraks katkılı numunelerin daha kararlı bir sürtünme katsayısına sahip oldukları görülse de deney boyunca sürtünme katsayısının net bir formda olmaması frenleme performansı açısından da uygun olmadığını göstermektedir. Aynı durum 322, 58 N ve 483,87 N yüklemelerinin olduğu balata numunelerinin sürtünme testlerinden alınan kararsız sürtünme katsayısı değerlerinde de geçerlidir. % 10 takviyeli boraks katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre 322, 58 N ve 483,87 N 'luk yüklemelerdeki sürtünme davranışlarına göre F sınıfı olduğu görülürken, 645,16 N 'luk yüklemdeki sürtünme davranışına göre de G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır.

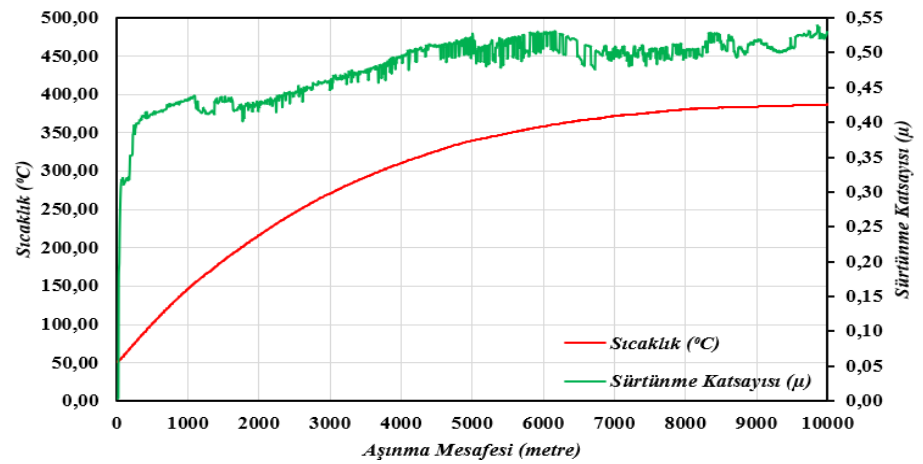
Şekil 4.7 de yer alan grafiklerde ise %15 takviyeli boraks katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla tüm yük değerlerinde 0,47 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. 483,87 N 'luk yüklemdeki deneylerde ise %15 boraks katkılı numunelerin diğer yüklem deney numunelerine göre daha kararlı bir sürtünme katsayısına sahip oldukları görülse de deney boyunca sürtünme katsayısında değişimlerin olması frenleme performansı açısından olumlu olmadığını göstermektedir. %15 takviyeli boraks katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca boraks yüzde takviye miktarına göre takviye oranı arttıkça (322, 58 N yüklemeler hariç) sürtünme katsayısı değerlerinde de düşüş gözlemlendiği görülmüştür. Boraks katkılı deneylerde sıcaklık arttıkça sürtünme katsayısının artış göstermesi balata kompozisyonunda yer alan reçinenin yüksek sıcaklıklarda göstermiş olduğu viskoelastik davranışı ve balatanın bünyesindeki malzemeler arasındaki bağların dayanımları ile ilgili olduğu literatürde de vurgulanmaktadır (Ertan vd., 2006; Hong vd., 2009; Algan, 2015). Ayrıca yine literatürde, boraks katkısının sürtünme katsayısını arttırmada olumlu yönde etki göstermediği de bildirilmiştir (Algan, 2015).



a)



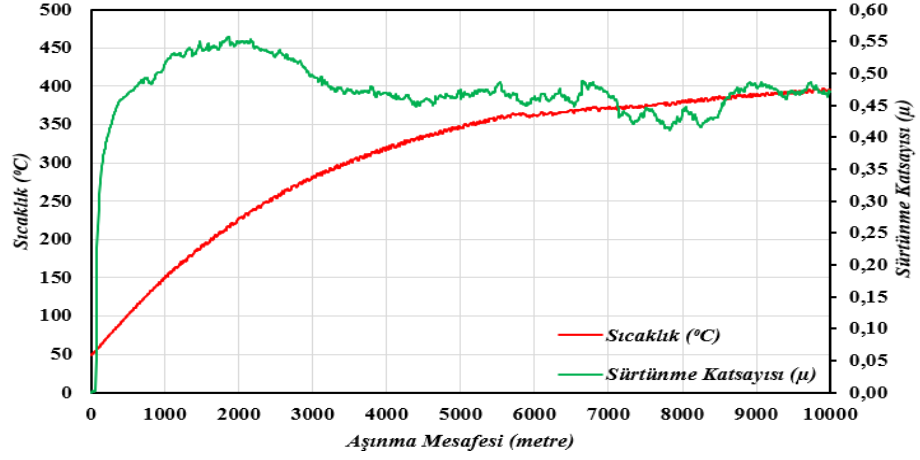
b)



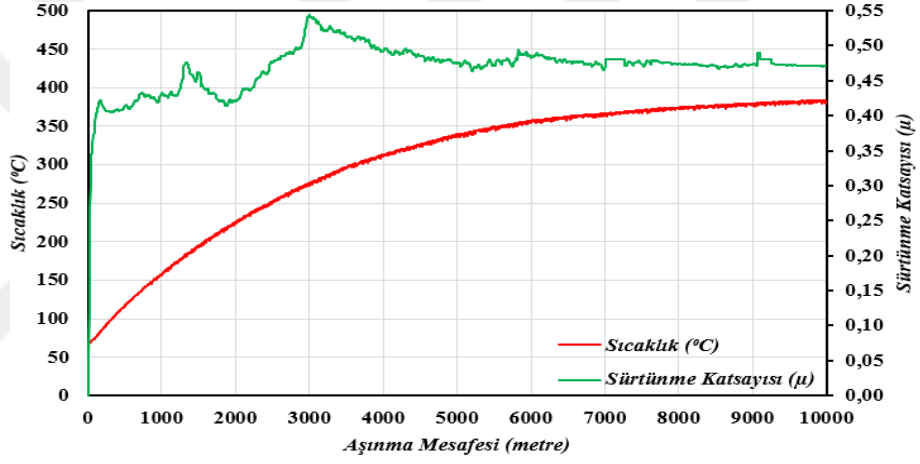
c)

Şekil 4.6. Sıcaklığa bağlı olarak %10 boraks katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

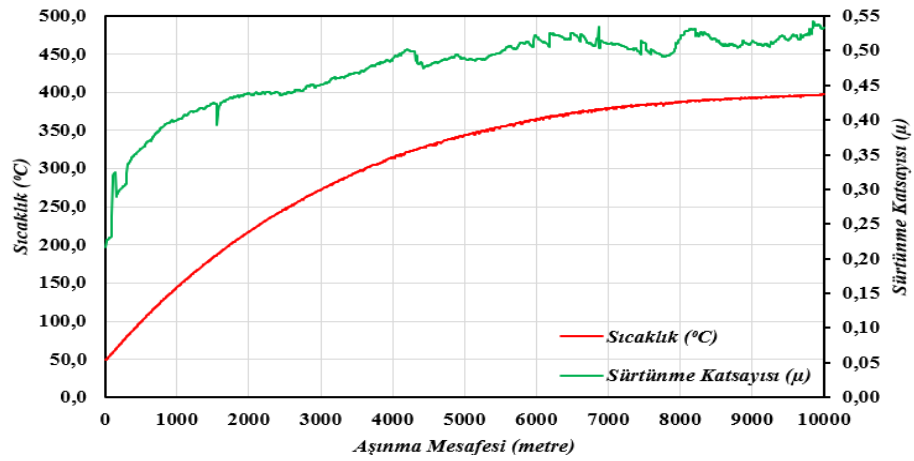
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



b)



c)

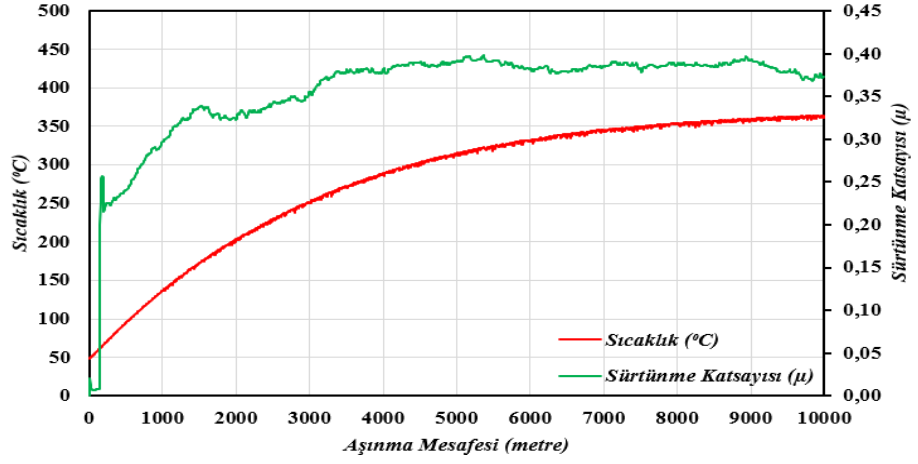
Şekil 4.7. Sıcaklığa bağlı olarak %15 boraks katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N

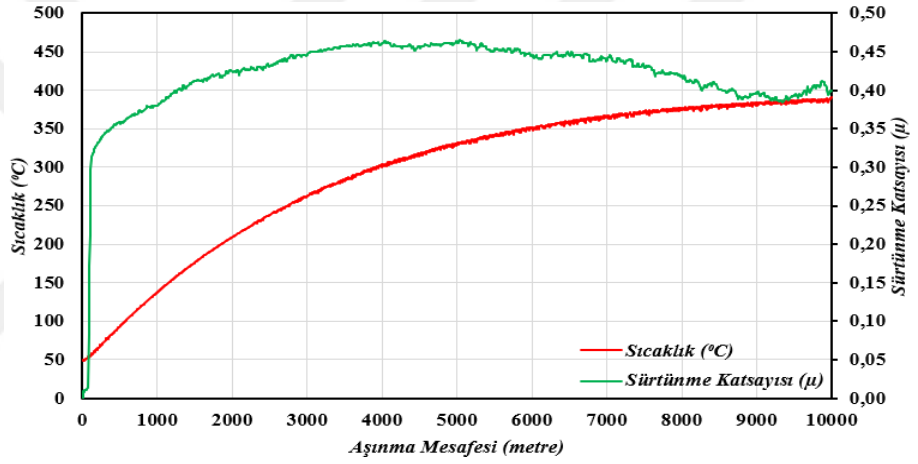
Şekil 4.8' de yer alan grafiklerde %5 takviyeli kolemanit balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,36 μ , 483,87 N yükte 0,42 μ ve 645,16 N yükte de 0,45 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Artan yükleme birlikte sürtünme katsayısının giderek arttığı görülmüştür. Genel olarak tüm yüklemelerde (322, 58 N yüklemesindeki balata numuneleri hariç) diskteki sıcaklığın 400°C ye yaklaşmasıyla birlikte sürtünme katsayılarında kısmi bir düşüş olduğu da gözlenmiştir. Özellikle bu durumun her bir yüklemesinde benzer davranış göstermesi mevcut malzeme kompozisyonunda yer alan katı yağlayıcı etkisinin olmasına ve kompozit içerikli bileşenlerinde yer alan bazı malzemelerde ise (örneğin; grafit gibi) ergimelerin oluşmasından kaynaklı olabileceğini de göstermektedir. Tüm yüklemesindeki deney numunelerinin ortalama sürtünme katsayıları incelendiğinde deney boyunca kararsız bir forma sahip olmalarından dolayı frenleme performanslarının da düşük olabileceği ön görülmektedir. %5 takviyeli kolemanit katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılması, deneylerde uygulanan yüke bağlı olarak (en alt yükten en yüksek yüke doğru) sırasıyla E, F ve G sınıfı türlerinde oldukları anlaşılmaktadır.

Şekil 4.9' da yer alan grafiklerde %10 takviyeli kolemanit balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,39 μ , 483,87 N yükte 0,45 μ ve 645,16 N yükte de 0,47 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Artan yükleme ile birlikte sürtünme katsayısının da giderek arttığı görülmüştür. Şekil 4.9-a 'da yer alan 322, 58 N yüklemesindeki balata deney numunelerinin daha kararlı bir sürtünme katsayısına sahip oldukları görülmüştür. 483,87 N ve 645,16 N yüklemelerdeki fren balata numunelerinin ortalama sürtünme katsayıları incelendiğinde deney boyunca kararsız bir forma sahip olmalarından dolayı frenleme performanslarının da düşük olabileceği ön görülmektedir. %10 takviyeli kolemanit katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılması, deneylerde uygulanan yüke bağlı olarak 322, 58 N yükte F sınıfında olduğu görülürken 483,87 N ve 645,16 N yüklemesindeki deney balata numunelerinin ise G sınıfı türlerinde oldukları anlaşılmaktadır.

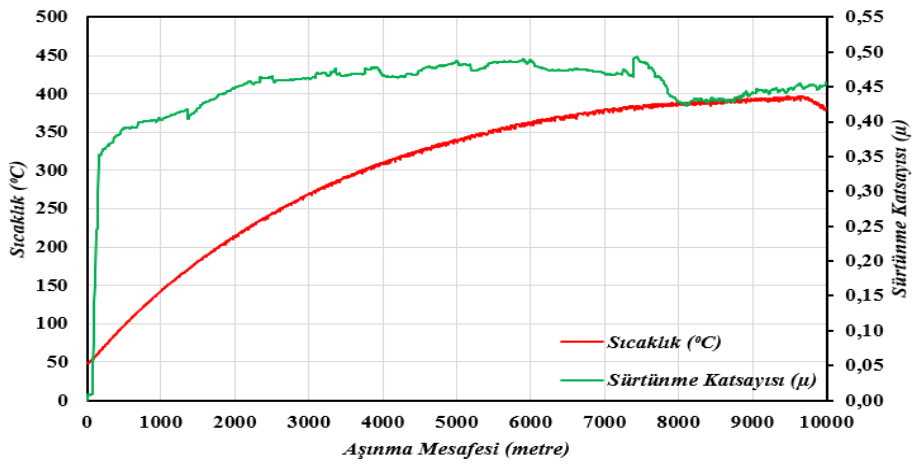
Şekil 4.10' da yer alan grafiklerde %15 takviyeli kolemanit balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,36 μ , 483,87 N yükte 0,44 μ ve 645,16 N yükte de 0,47 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Artan yükleme ile birlikte sürtünme katsayısının da giderek arttığı görülmüştür. Şekil 4.10-c'de yer alan grafik incelendiğinde 645,16 N yük altındaki %15 takviyeli kolemanit balata numunesinin deneylerinde 8000 metre ye kadar karalı bir formda sürtünme katsayısı belirgin iken 8000 metre den sonra sürtünme katsayısı verilerinde düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum o noktada oluşan sıcaklık değişiminin ani olarak değişiminden de kaynaklı olabileceğini göstermektedir. 322, 58 N ve 483,87 N yüklemelerdeki fren balata numunelerinin ortalama sürtünme katsayıları incelendiğinde deney boyunca kararsız bir forma sahip olmalarından dolayı frenleme performanslarının da düşük olabileceği ön görülmektedir. % 15 takviyeli kolemanit katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre 322, 58 N ve 483,87 N 'luk yüklemelerdeki sürtünme davranışlarına göre F sınıfı olduğu görülürken, 645,16 N 'luk yüklemedeki sürtünme davranışına göre de G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca kolemanit yüzde takviye miktarına göre takviye oranı arttıkça sürtünme katsayısı değerlerinde de belirgin bir değişikliğin gözlemlenmediği görülmüştür. Bu durum kolemanit grubu için takviye oranının sürtünme katsayısının değişiminde etkili olmadığını da ortaya koymuştur.



a)



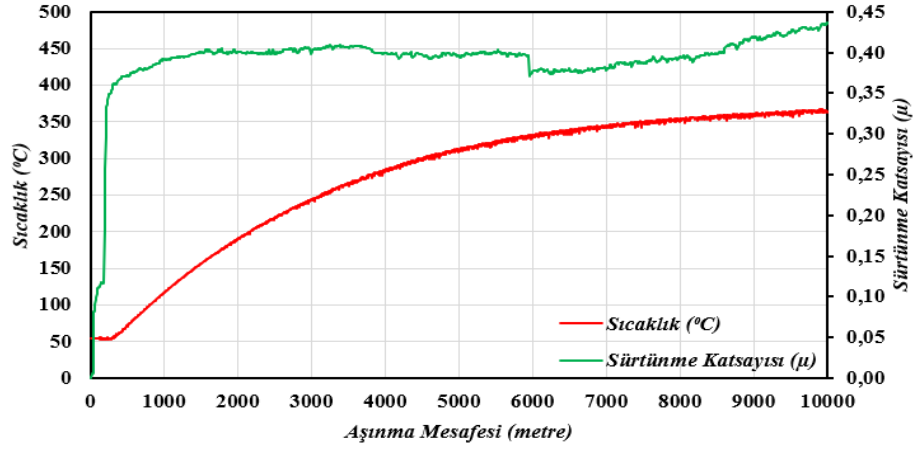
b)



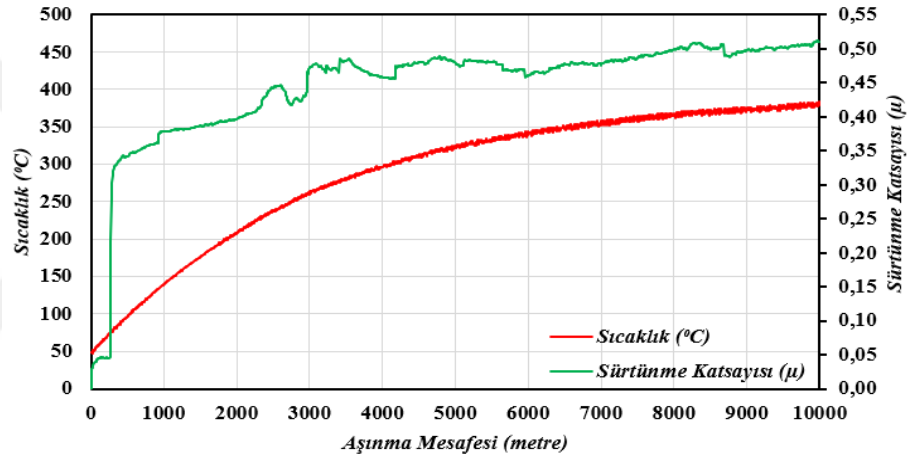
c)

Şekil 4.8. Sıcaklığa bağlı olarak %5 kolemanit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

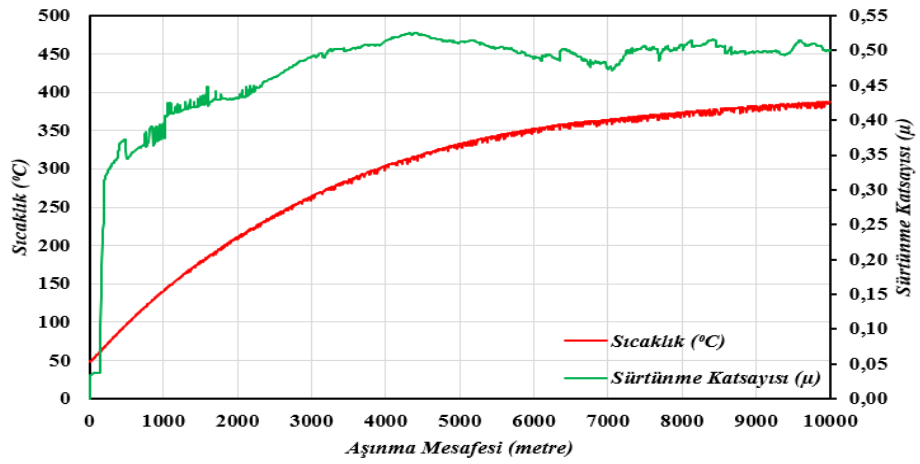
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



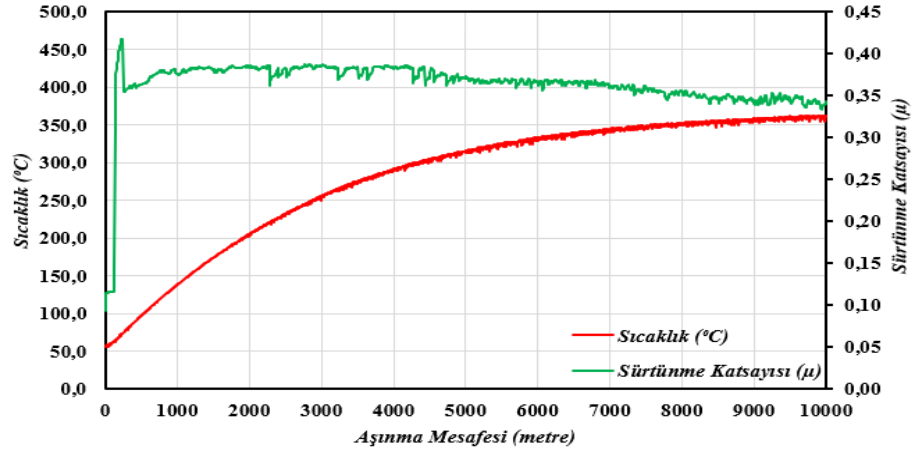
b)



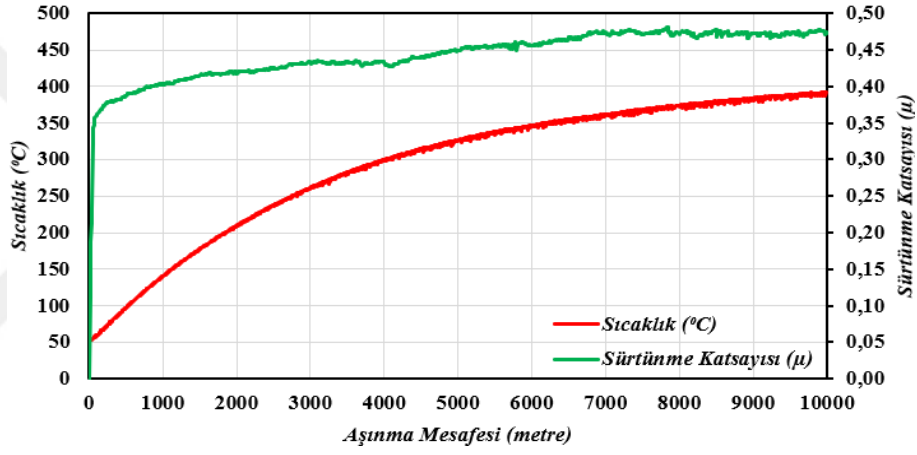
c)

Şekil 4.9. Sıcaklığa bağlı olarak %10 kolemanit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

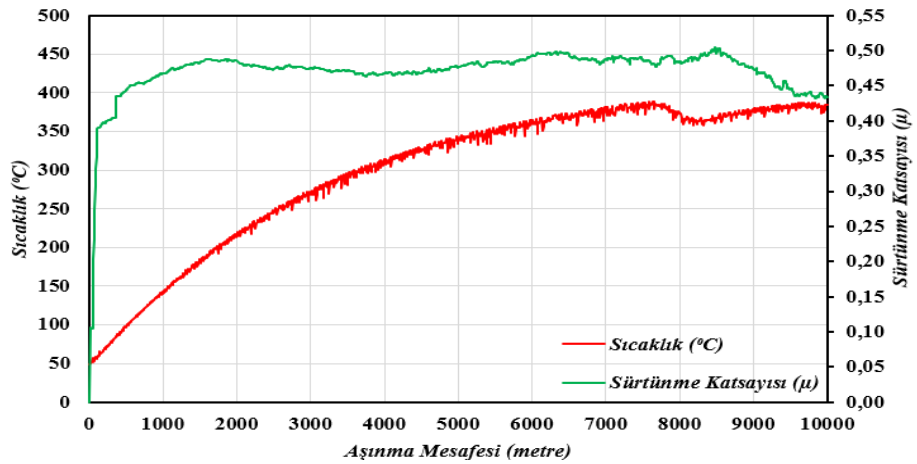
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



b)



c)

Şekil 4.10. Sıcaklığa bağlı olarak %15 kolemanit katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N

Şekil 4.11’de yer alan grafiklerde % 5 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Yapılan sürtünme testlerinde her üç grafik için de ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin 0,46 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. En kararlı sürtünme katsayısının 645,16 N yükteki deney numunelerinin sahip olduğu görülmüştür. % 5 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinde yüke bağlı olarak ortalama sürtünme katsayılarında kendi aralarında önemli bir farklılık görülmemiştir. %5 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır. 322, 58 N ve 483,87 N yüklemelerindeki balata numunelerinin deney boyunca göstermiş olduğu kararsız sürtünme katsayısı davranışından dolayı frenleme performansı açısından değerlendirildiğinde daha düşük düzeylerde olabileceği ön görülmektedir.

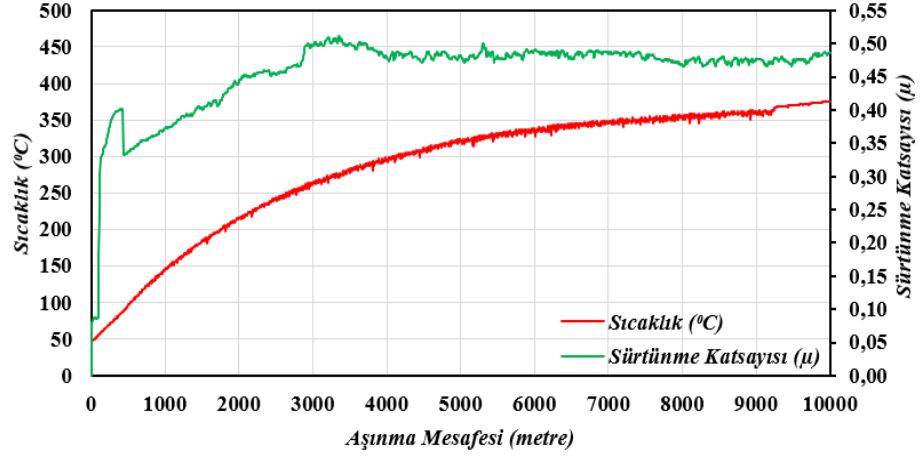
Şekil 4.12’deki grafiklerde % 10 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinin analizleri incelenmiştir. Yapılan sürtünme testlerindeki en yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerinin 322, 58 N yükleme değerinde 0,54 μ iken, en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerinin ise 483,87 N yükleme değerinde ve 0,48 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Mevcut %10 takviye oranındaki tüm deneylerden elde edilen grafikler incelendiğinde en kararlı sürtünme katsayısının 322, 58 N yüklemedeki deneylerde gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 4.12-c’deki grafikte 350°C sıcaklık ve 5000 metreden itibaren sürtünme katsayısında düşüş olduğu görülmüştür. %10 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 4.13’de yer alan grafiklerde ise % 15 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,44 μ , 483,87 N yükte 0,52 μ ve 645,16 N yükte de 0,48 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Grafiklere göre en kararlı sürtünme katsayısına 322, 58 N yüklemedeki deneylerin sahip olduğu görülürken diğer yüklemeler altındaki balata numunelerinin deney boyunca göstermiş olduğu sürtünme katsayısındaki önemli

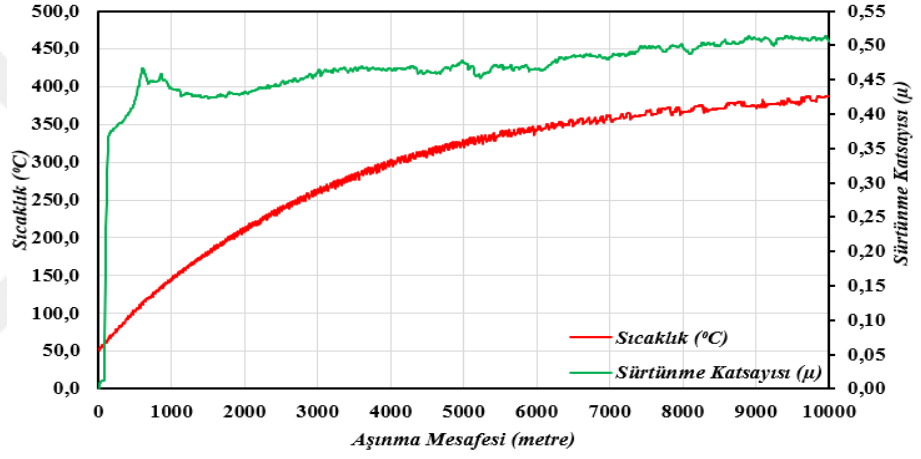
orandaki değişimden dolayı frenleme performansı açısından avantajlı olmayacağı kanaati oluşturmuştur.

Fakat 483,87 N ve 645,16 N yüklerindeki balata numunelerinin ortalama sürtünme katsayılarının durumu ise balatalar için bilinen standart sürtünme katsayısı değerlerinin üzerinde olduğunu da göstermiştir. %15 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır.

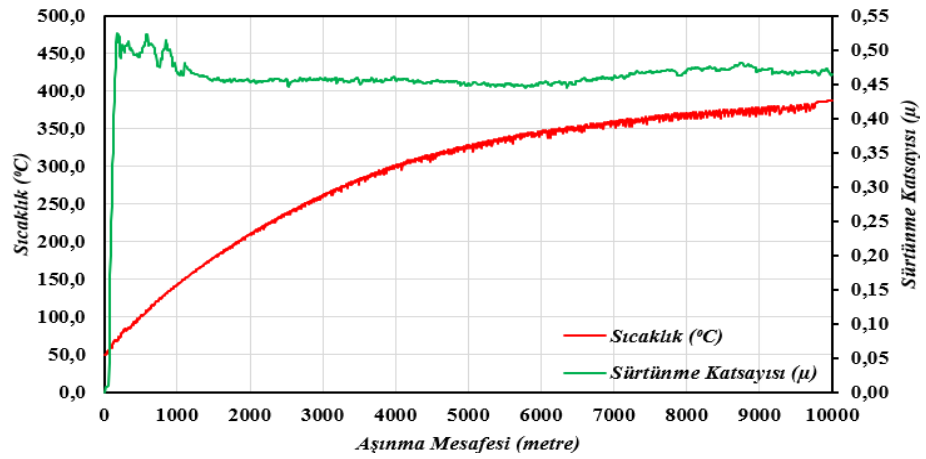
Bor karbür grubu kendi içerisinde değerlendirildiğinde yapısında ihtiva eden sert fazlardan dolayı deneysel uygulamalardaki sürtünme katsayısı değerleri diğer bor türevli madenlerin katkısıyla oluşturulan balatalara göre daha yüksek düzeylerde yer almıştır. Yine bor karbür grubu içerisinde en yüksek sürtünme katsayısının % 10 takviyeli bor karbür katkılı balata numunelerinin olduğu anlaşılmıştır. Ticari fren balatası numunelerine göre kıyaslandığında %10 ve %15 takviyeli grubun ticari balatanın ortalama sürtünme katsayısı değerinden daha yüksek değerlere sahip iken % 5 takviyeli grubun ise benzer değerlerde ve yakın ortalama sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bor karbür de artan takviye oranı ile sürtünme katsayısının da arttığı literatürde yer alan çalışmalarla uyumludur (Zhang, 2020).



a)



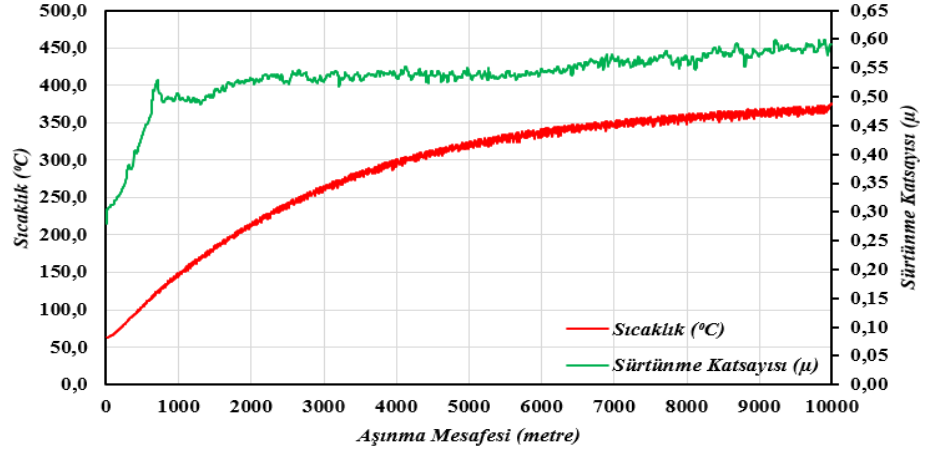
b)



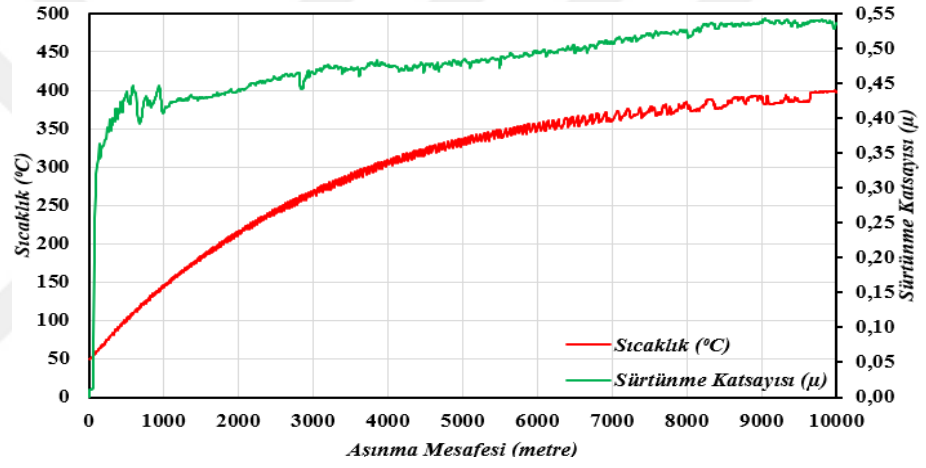
c)

Şekil 4.11. Sıcaklığa bağlı olarak %5 bor karbür katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

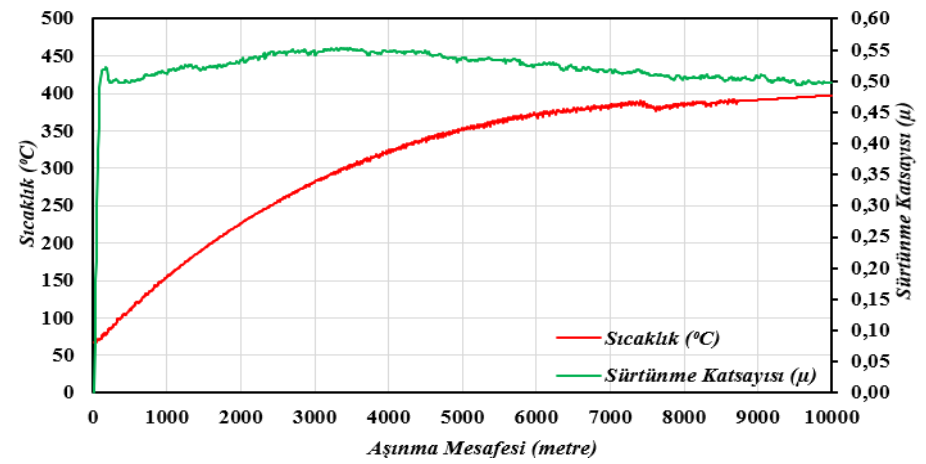
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



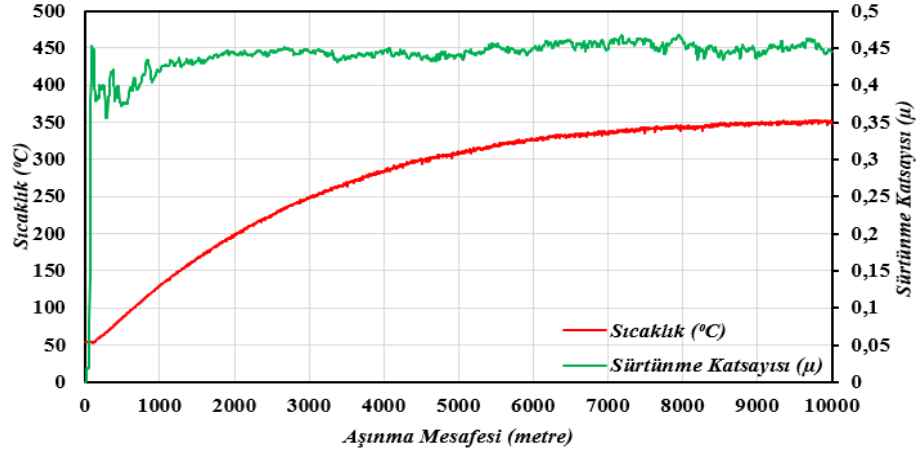
b)



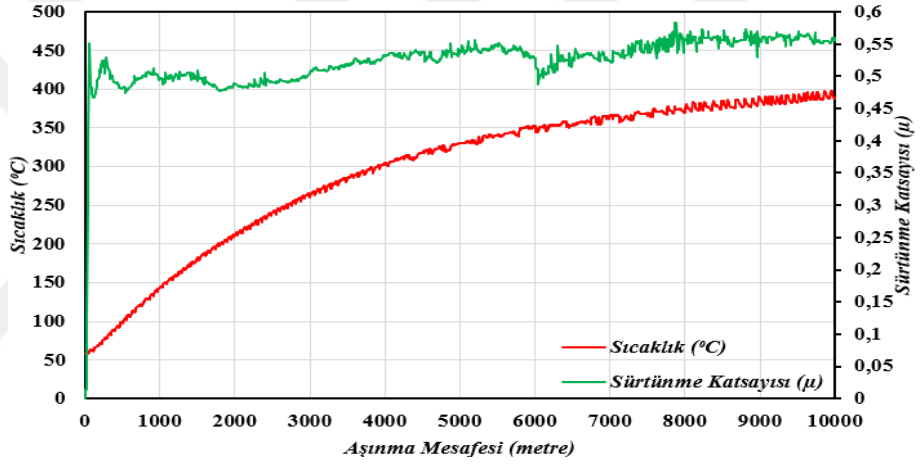
c)

Şekil 4.12. Sıcaklığa bağlı olarak %10 bor karbür katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

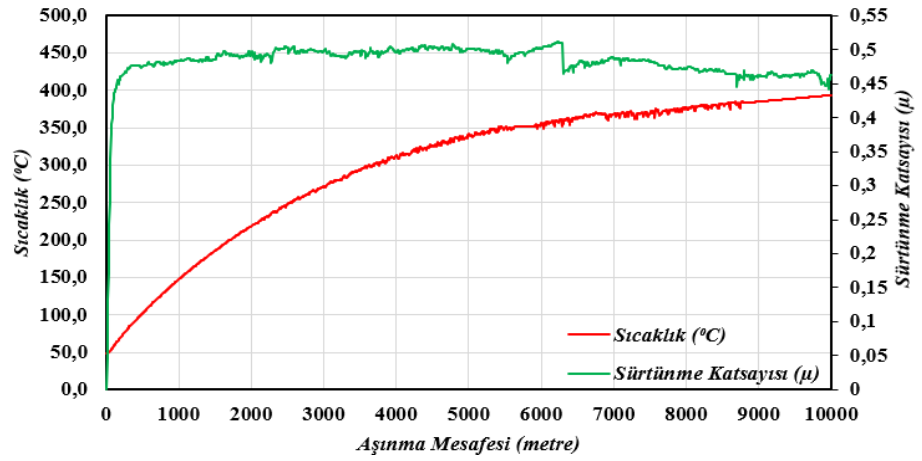
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



b)



c)

Şekil 4.13. Sıcaklığa bağlı olarak %15 bor karbür katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

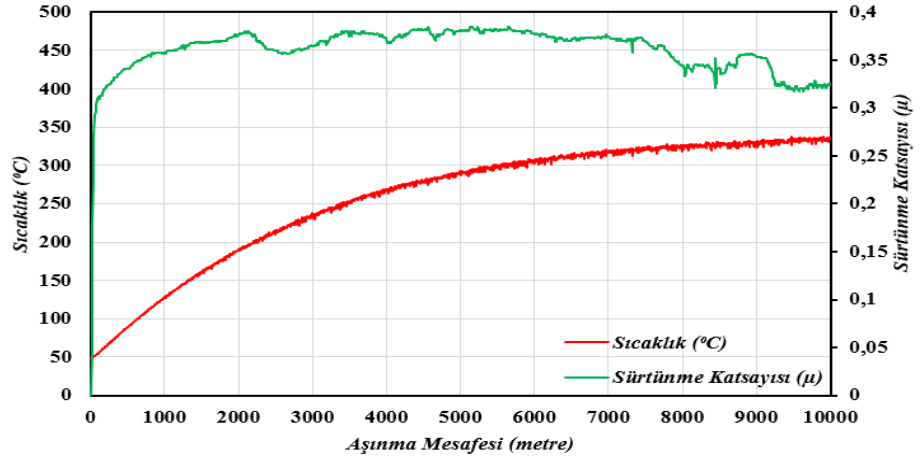
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N

Şekil 4.14'de yer alan grafiklerde % 5 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,36 μ , 483,87 N yükte 0,44 μ ve 645,16 N yükte de 0,42 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. En kararlı sürtünme katsayısının 483,87 N yükteki deney numunelerinin sahip olduğu görülmüştür. Ticari fren balata numuneleri ile kıyaslandığında sürtünme katsayısı değerlerinin yakın olduğu görülmüştür. %5 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır. 322, 58 N yükteki balata numunelerinin deney boyunca sıcaklığın artmasıyla birlikte 7000 metreden sonra sürtünme katsayısında genel bir düşüş eğilimi gösterdiği gözlenmiştir. Bu durum deney boyunca sürtünme katsayısının süreksizliği olarak gözükeneğinden frenleme performansı açısından düşük etki oluştursa da standart sürtünme katsayısı aralığı içerisinde yer alması sayesinde avantajlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca %5 btma katkılı balataların deneylerdeki verilerine göre sürtünme katsayısı değerlerinin %5 katkılı kolemanit testlerindeki değerlerle yakınlık gösterdiği dikkat çekmiştir.

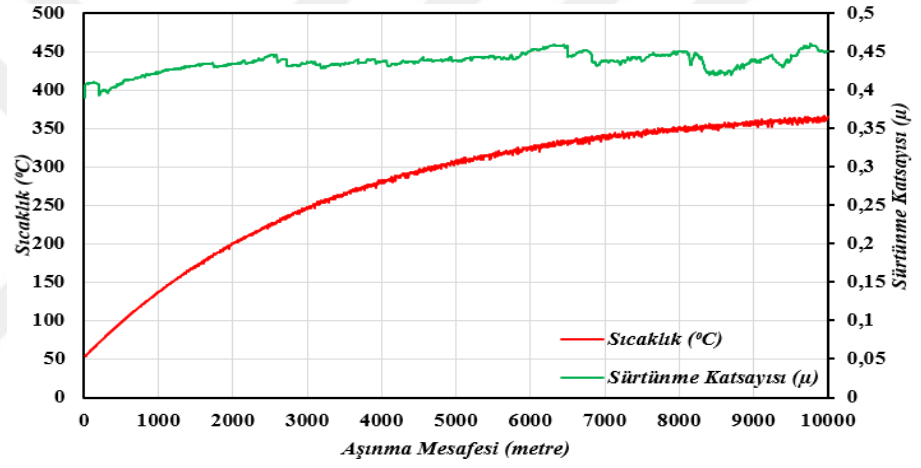
Şekil 4.15'deki grafiklerde % 10 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin analizleri incelenmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,48 μ , 483,87 N yükte 0,45 μ ve 645,16 N yükte de 0,49 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Mevcut %10 takviye oranındaki tüm deneylerden elde edilen grafikler incelendiğinde en kararlı sürtünme katsayısının 322, 58 N yüklemedeki deneylerde gerçekleştiği görülmüştür. Ticari fren balata numuneleri ile kıyaslandığında sürtünme katsayısı değerlerinin benzer bir yakınlık seviyesindeki değerlerde olduğu görülmüştür. %10 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır. % 10 takviyeli deney grubunda 483,87 N yükteki balata numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin düzensiz ve süreksizliği frenleme performansı açısından dez avantajlı olarak yer alacağını göstermektedir. Aynı zamanda standart sürtünme katsayısı değerlerinin aralığında da yer almaktadır.

Şekil 4.16'da yer alan grafiklerde ise % 15 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin analizleri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki veriler incelendiğinde, sıcaklık artışına ve yük değişimine bağlı olarak ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 322, 58 N yükte 0,43 μ , 483,87 N yükte 0,46 μ ve 645,16 N yükte de 0,50 μ olarak çıktığı belirlenmiştir. Artan yükleme birlikte sürtünme katsayısının giderek arttığı görülmüştür. Grafikler incelendiğinde en kararlı sürtünme katsayısının 645,16 N yüklemedeki deneylerde gerçekleştiği görülmüştür. Ticari fren balata numuneleri ile kıyaslandığında sürtünme katsayısı değerlerinin benzer bir yakınlık seviyesindeki değerlerin olduğu görülmüştür. %15 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin, literatürde yer alan ortalama sürtünme katsayılarının harf sınıflandırılmasına göre genel olarak G sınıfı türünde olduğu anlaşılmaktadır. 483,87 N yükte deneyleri gerçekleştirilen balata numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerinde ani pik dalgalanmalarının olması ve süreksizliği ile frenleme performansı açısından dezavantajlı olacağı ön görülmektedir. Buna rağmen mevcut yükteki sürtünme katsayısı değerlerinin standart sürtünme katsayısı değerlerinin aralığında yer aldığı da gözlemlenmiştir.

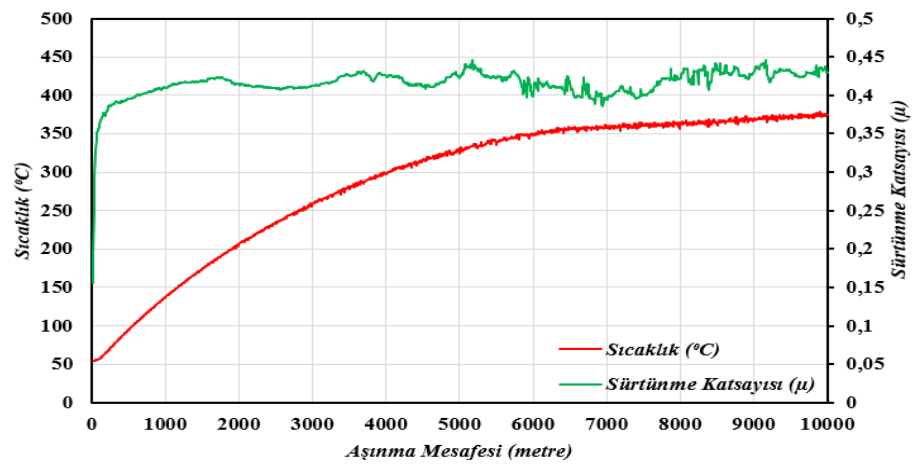
Bor türevli mekanik alaşımlı grup içerisinde balata deney numunelerinin genel olarak maksimum 350°C sıcaklığın üzerine çıkmadığı görülmüştür. Bu durum balataların ısınmaya karşı avantajlı olabileceği kanaatini olgunlaştırmıştır.



a)



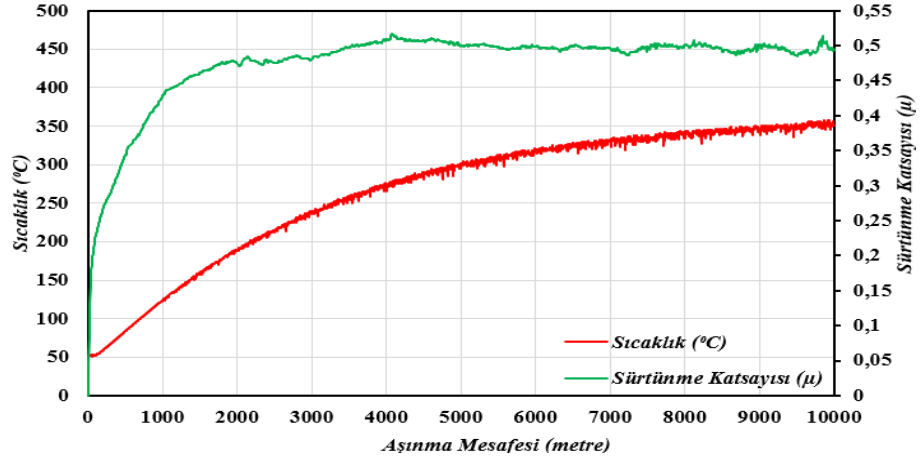
b)



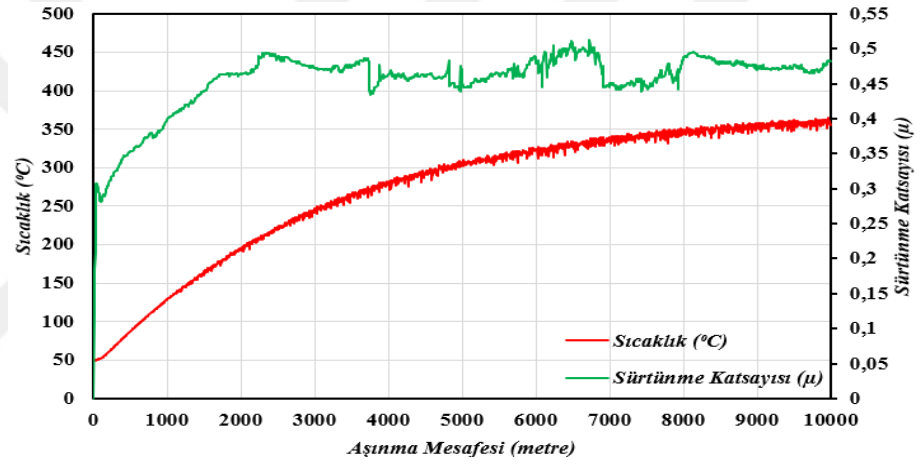
c)

Şekil 4.14. Sıcaklığa bağlı olarak %5 btma katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

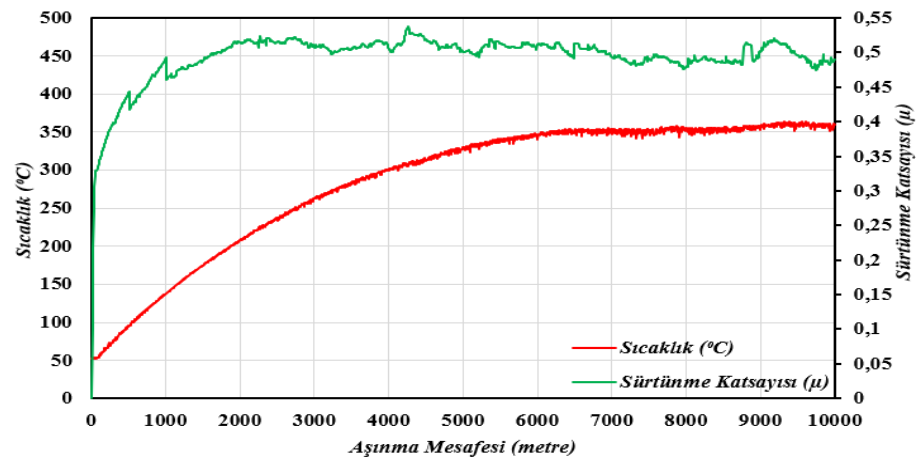
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



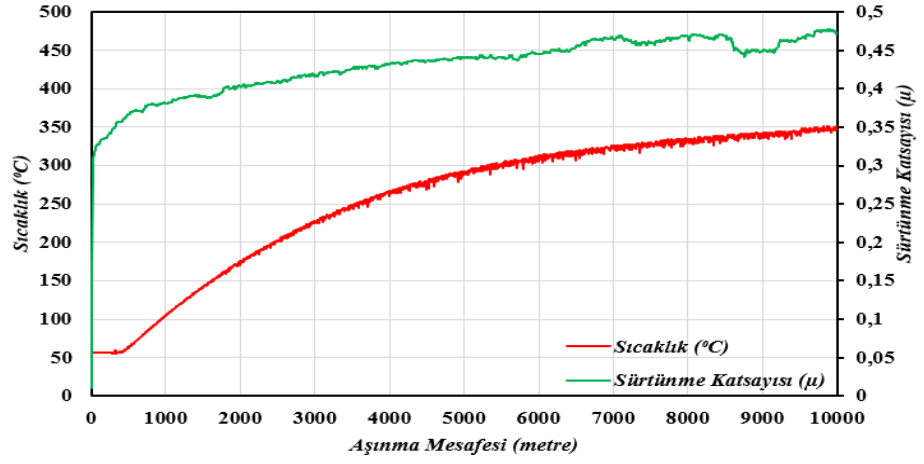
b)



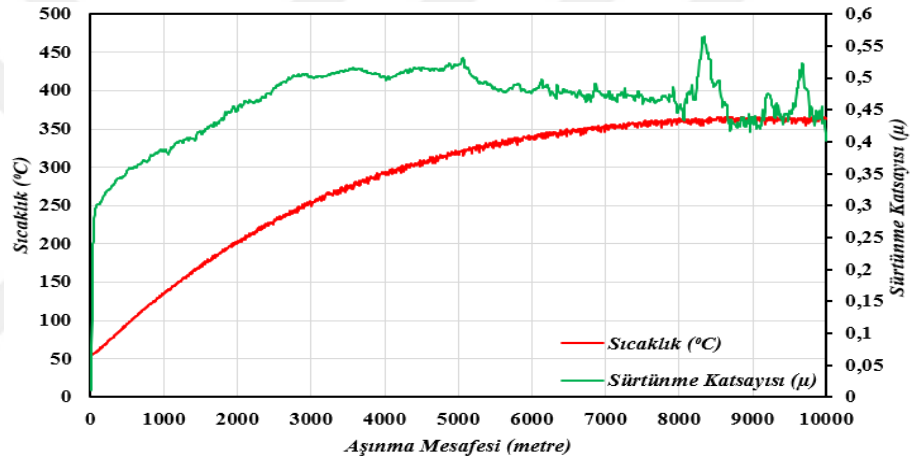
c)

Şekil 4.15. Sıcaklığa bağlı olarak %10 bta katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

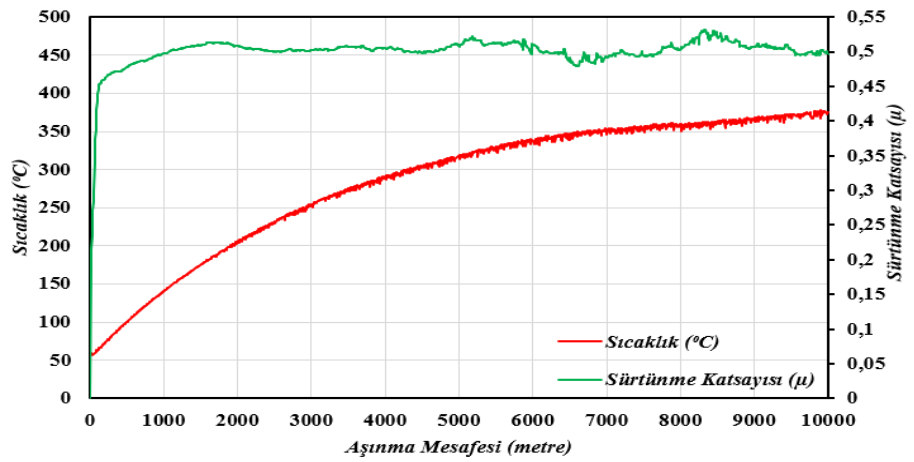
a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



a)



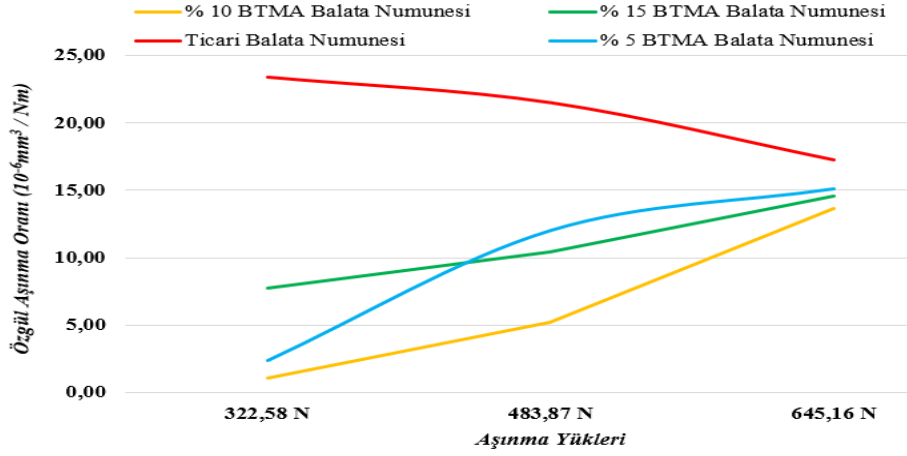
b)



c)

Şekil 4.16. Sıcaklığa bağlı olarak %15 btm katkılı balata numunesinde sürtünme katsayısının değişimi

a) 322,58 N, b) 483,87 N, c) 645,16 N



Şekil 4.17. Özgül aşınma oranında aşınma yükünün etkisi (200°C sabit sıcaklık)

Aşınma testlerinin ikinci kısmı olan deneysel çalışmalarda 200°C sabit sıcaklıkta yapılan balataların sürtünme testleri ile özgül aşınma oranları, aşınma kaybı miktarları ve sürtünme katsayılarındaki değişimleri belirlenmeye çalışılmıştır.

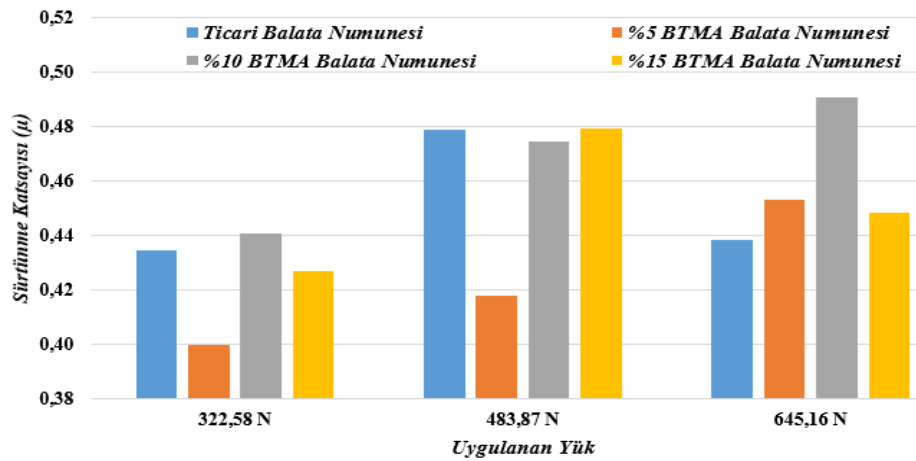
Şekil 4.17 deki grafikte de ticari balatalar ile yeni geliştirilen btma balata numunelerinin 200°C sabit sıcaklıktaki deneysel verilerinden hesaplanarak belirlenen özgül aşınma oranları yer almaktadır. En yüksek özgül aşınma ticari balata numunelerinde gözlemlenmiştir. Ayrıca yük arttıkça düştüğü de görülmüştür. Yeni üretilen bor türevli mekanik alaşımlı balata numunelerinin ise ticari balataya göre daha düşük özgül aşınma oranına sahip oldukları belirlenmiştir. Yağlayıcı özellik gösteren bor türevli malzemelerin etkisiyle btma katkılı balata numunelerinin özgül aşınma oranı daha düşük çıkmıştır.

Farklı katkı oranlarındaki btma balata numunelerinin 645,16 N yüklemdeki aşınmalarda benzer yakınlıkta özgül aşınma oranlarına sahip olmuşlardır. Grafikteki verilere göre en iyi aşınma direncini % 10 btma katkılı balata numuneleri göstermiştir.

BTMA balata numunelerinin ticari balataya göre özgül aşınma oranlarının düşük olmasının bünyesindeki yağlayıcı etkisi yüksek bor türevli mekanik alaşımlanmış malzemelerin katkısının olmasıdır. Öyle ki katkı olarak yer alan btma kompozisyonu sadece mekanik alaşımlama olmamış aynı zamanda boyutsal olarak partikül düzeyinde de indirgenerek malzemelerin kayma kuvveti etkisi altında oluşan gerilmelerin homojen ve daha kararlı bir formda dağılmasına da destek olmuştur.

Genel olarak birçok balata katkı takviyesinde ve farklı yükleme testlerinde, sürtünmeye bağlı olarak disk yüzeyinde sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısı olan μ ' nün değeri azalır. Literatürde bu duruma "tipik sürtünme davranışı" ya da "termal fade" denilmektedir. Frenleme performansındaki zayıflama veya düşme sebebi, balata ara yüzeyinde oluşan piroliz sonucu (oksijenin bulunmadığı veya azalmasıyla birlikte ortamda sıcaklık etkisiyle meydana gelen yanma olayı) gaz indirgenmesidir. Sıcaklık değerinin yüksek olduğu balata içeriğinde yer alana malzemelerde meydana gelen indirgenme sonucunda, uygulanan kuvvet azalmakta ve sürtünme katsayısı yani μ değerinin de azalmasına sebep olmaktadır (Filip vd., 2002; Satapathy vd., 2005b; Algan, 2015; Adıgüzel, 2015).

Mekanik alaşımlanmış ve boyutsal olarak indirgenmiş partiküllerin iç yapıdaki tutunma bağ kuvvetlerinin yüksek olması sayesinde partiküllerin kopma veya ayrılması için çok daha yüksek gerilmelere ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır. Yapılan testlerin neticesinde, üretilen ve hazır temin edilen (ticari) fren balatası numunelerine ait değerlere bakıldığında, Pin-on disk cihazından elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları TS 555 standartlarına göre makul ve kabul edilen değerler aralıklarındadır (TSE, 1992; Akıncıoğlu, 2018).



Şekil 4.18. Sürtünme katsayısının uygulanan yük ile değişimi (200°C sabit sıcaklık)

Şekil 4.18 de yer alan grafikte ticari balatalar ile yeni geliştirilen btma balata numunelerinin 200°C sabit sıcaklıktaki sürtünme katsayısı değerlerinin uygulanan yük

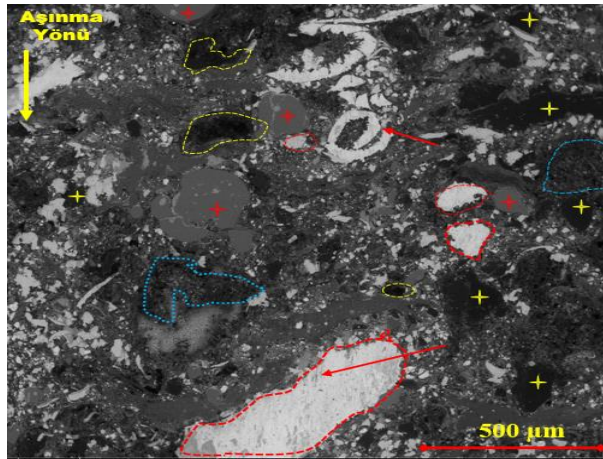
ile değişiminin incelenmesi değerlendirilmiştir. Bu sayede mevcut yapılan deneyler sonucunda test edilen balata numunelerinin aynı zamanda soğuk sürtünme katsayısı değerleri de belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre genel olarak %10 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin sürtünme katsayısı değerleri en yüksek iken (483,87N yüklemedeki hariç) en düşük değerin ise yine genel olarak % 5 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin sürtünme katsayısı değerleri olarak grlmştir. Tüm deneylerdeki sürtünme katsayısı verileri değerlendirildiğinde hem ticari balata numunelerinin hem de btma katkılı balata numunelerinin F ve G sınıfı türlerinde oldukları belirlenmiştir. Btma katkılı balata numunelerinin 483,87N yüklemedeki değerleri incelendiğinde katkı yüzdesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerinin artış gösterdiği fark edilmiştir. Mevcut yüklemede ticari balata numunesine göre sadece %10 ve %15 takviyeli btma katkılı balata numuneleri benzer sürtünme katsayısı değerlerine sahip olmuştur.

4.3. Fren Balatalarının SEM ve EDS Analizlerinin Değerlendirilmesi

Aşınma testleri gerçekteştirilen numunelerin, aşınma yüzeyinde oluşan mikro yapının değerlendirmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınarak incelenmiştir. Aşınma test numuneleri içerisinde görüntü analizlerinin değerlendirilmesi için bazı numunelere odaklanılmıştır. Bunlar 483,87 N yükleme ve sıcaklığın sabit olmadığı şartlar altındaki gerçekteştirilen testlerin minimum düzeyde katkı yapılan her bir malzeme grubundaki %5 orandaki numuneler olmuştur. Mekanik alaşımlama numunelerinin de her bir yüzde katkısının (%5-10-15) görüntüleri analiz edilmiştir. Karşılaştırma numunesi olarak deneylerde yer alan ticari balatanın da görüntü analizleri yine 483,87 N yükleme koşulları ve değişken sıcaklık şartları altındaki test numunesi üzerinden analiz edilmiştir. Elden edilen görüntülerin hepsi 500 µm yani 250x büyütme ile gerçekteştirilmiştir. şekil 4.19 da % 5 bor oksit katkılı deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Aşınmış numune yüzeyinin incelenen görüntüsüne göre bazı bölgelerde abrasiv aşınma etkisinin görüldüğü, aşınma etkisine bağlı olarak sürtünme yüzeyi üzerinde kopan partiküllerin sıvama davranışıyla yapışmaların olduğu gözlemlenmektedir.

Özellikle kırmızı oklarla gösterilen kısımlarda abrasif aşınma etkisi ile oluşan aşınma çizgilerinin varlığına rastlanılmaktadır. Yine aynı bölgeleri kapsama altına alan

ve ayrıca kırmızı kesik çizgilerle markalanan bölgelerde de aşınma sıvanması ve yapışmaların olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sürtünme yüzeylerinde bölgesel olarak platoların oluştuğu da görülmektedir. Öyle ki bu durum aşınma yüzeyindeki kademeli olarak çukurların ve yükseltilerin varlığı kendisini ispatlar niteliktedir. Bu konuda Ma ve arkadaşları da yaptıkları çalışmalarında sürtünme yüzeylerinde çukurların dışında düz bölgesel formda platoların oluştuğunu belirtmişlerdir. Yine aynı şekilde Mateja ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da platoların varlığına rastlanılmıştır (Mateja vd., 2017; Ma vd., 2021). Sürtünme yüzeyinde oluşan bu platoların fren disk aşınma yüzeyinde balata numune yüzeylerinin fren diski ile daha fazla temas ettiğini de gösterir niteliktedir. Aşınan numune yüzeyi kapsamlı olarak incelendiğinde sarı kesikli çizgilerle kapsama altına alınan bölgelerin yüzeylerde oluşan çukurları temsil ettiği, açık mavi renk formunda kesikli çizgilerle kapsama altına alınan bölgelerin ise aşınma esnasında kopan ince formdaki partiküllerin aşınma yığılması oluşturduğu düşünülmektedir. Sürtünme yüzeyine yapılan eds analizlerinin sonucunda yüzeyde ortaya çıkan elementlerin varlığı da belirginleşmiştir. Sarı artı formundaki siyah bölgelerin grafit olduğu, kırmızı artı formunda gösterilen koyu gri bölgeler ile kırmızı kesikli bölgeler içerisinde yer alan açık gri renkteki bölgelerin demir ve demir oksit parçacıkları etkisi altındaki bölgeler olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.19. %5 Bor oksit katkılı numunenin SEM görüntüsü

Tablo 4.7 de ise %5 Bor oksit katkılı numuneye ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.

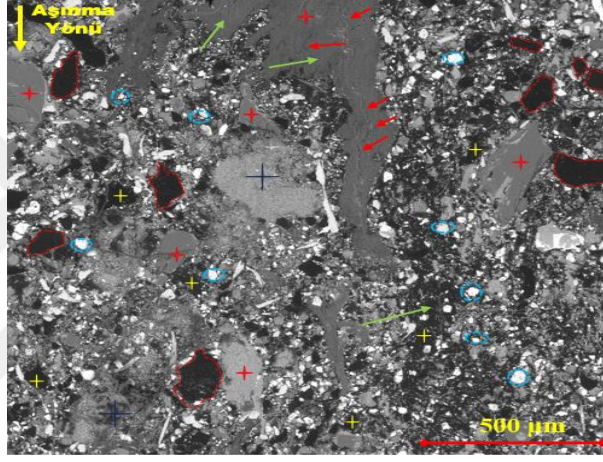
Tablo 4.7. %5 Bor oksit katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	B	O	Fe	C	Na	Mg	S
Element	5,40	45,23	3,71	30,96	0,33	0,36	0,98
% wt	Ca	Al	Ba	Ti	Si	K	
Element	0,89	0,42	3,03	5,54	1,17	1,99	

Şekil 4.20 de % 5 boraks katkılı deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Aşınmış numune yüzeyinin incelenen görüntüsüne göre bazı bölgelerde abrasiv aşınma etkin olsa da, sıvanma yani sürtünmeden kaynaklı yüzeyden kopan partiküllerin yapışması da mevcuttur. Sürtünme yüzeyinde özellikle demir partikül katkısının yüksek olduğu bölgelerde (kırmızı oklarla belirtilen) mikro çatlakların varlığına rastlanılmıştır. Bu durum sürtünme yüzeyinde ciddi bir gerilme deformasyonuna yönelik fikir vermektedir. Hatta bazı mikro çatlakların giderek genişleme yönünde büyümeye başladığı da anlaşılmaktadır. Literatürde de mikro çatlakların aşınma temas yüzeyinin hemen altında belirli bir derinlikte olgunlaşarak yayılabildiği ve bunun da çukurların oluşmasına etki ettiği bildirilmektedir (Yao vd., 2011; Xiao vd., 2018). Özellikle açık yeşil oklarla gösterilen kısımlarda abrasif aşınma etkisi ile oluşan aşınma çizgilerinin ve oluklaşmaların varlığına rastlanılmaktadır. Aşınmanın etkisi ile sürtünme yüzeyinde bölgesel olarak çukurların ve yükseltilerin oluştuğu, bunun sonucunda geniş platoların oluştuğu da görülmektedir. Sürtünme yüzeyinde oluşan bu platoların bor oksit katkılı numune grubuna göre daha fazla olduğu gözlenmektedir. Ayrıca sürtünme yüzeyinde oluşan bu plato bölgelerinin, fren diski aşınma yüzeyinde balata numune yüzeylerinin fren diski ile daha fazla temas ettiğini de gösterir niteliktedir. Aşınan numune yüzeyi kapsamlı olarak incelendiğinde sarı artı formundaki bölgelerin yüzeylerde oluşan çukurları temsil ettiği, açık mavi renk formunda kesikli çizgilerle kapsama altına alınan bölgelerin ise boraks partikülleri ve oksitleşmelerin olduğu düşünülmektedir.

Literatürde de boraks pentahidrat tanelerinin renginden dolayı çok iyi anlaşılabilirliğinin de vurgusu yapılmaktadır (Akıncıoğlu, 2018). Ortaya konan elementsel analiz bilgileri, sürtünme yüzeyine yapılan EDS analizlerinin sonucunda

yüzeyde ortaya çıkan elementlerin varlığı ile belirginleşmiştir. Kırmızı kesikli bölgeler içerisinde yer alan siyah bölgelerin grafit olduğu, kırmızı artı formunda gösterilen koyu gri bölgeler ile açık gri renkteki bölgelerin demir ve demir oksit parçacıkları etkisi altındaki bölgelerden olduğu düşünülmüştür. Koyu artı formunda gösterilen bölgelerin ise aşınma esnasında kopan ince formdaki partiküllerin aşınma yığılması oluşturduğu düşünülmektedir. Belirtilen analiz yaklaşımlarının tüm yüzeyde dağılmış bir yapıda olduğu da gözlenmektedir. Tablo 4.8 de ise %5 Boraks katkılı numuneye ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.



Şekil 4.20. %5 Boraks katkılı numunenin SEM görüntüsü

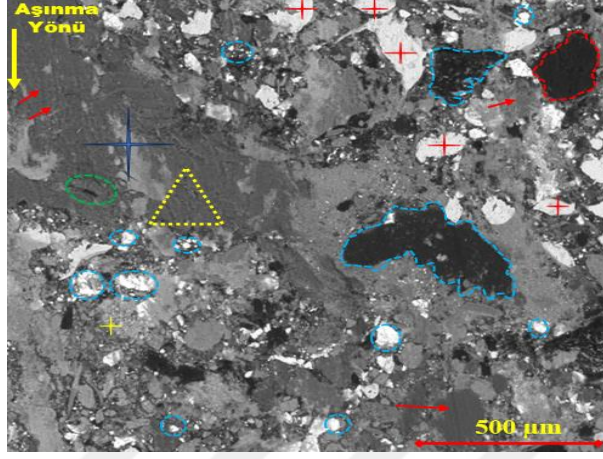
Tablo 4.8. %5 Boraks katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	B	O	Fe	C	Na	Mg	S
Element	4,82	20,40	21,08	39,52	1,27	1,65	1,09
% wt	Ca	Al	Ba	Ti	Si	K	
Element	0,93	0,85	3,16	2,07	2,04	1,12	

Şekil 4.21 de % 5 kolemanit katkılı deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır.

Aşınmış numunesinin yüzey yapısı incelendiğinde, bazı bölgelerde abrasiv aşınmanın etkisinde aşınma çizikleri ve oluklanmaların oluştuğu, sürtünmeden kaynaklı yüzeyden kopan partiküllerin yapışmalarının olduğu, bölgesel olarak plastik

deformasyona uğrayan kısımlarda yırtılmaların meydana geldiği, mikro çatlakların yer aldığı, çukurların ve aşınma yığıntılarının oluştuğu da görülmektedir.



Şekil 4.21. %5 Kolemanit katkıli numunenin SEM görüntüsü

Aşınma yüzeyi ayrıntılı olarak incelendiğinde, kırmızı oklarla gösterilen kısımların aşınma çizgileri ve aşınma olukları olduğu, kırmızı kesik çizgili bölgeler içerisinde yer alan siyah bölgelerin grafit olduğu, açık mavi kesikli çizgilerle markalanmış siyah bölgelerin ise sürtünme yüzeyindeki çukurları temsil ettiği, yine açık mavi daireli formdaki kesikli çizgilerle markalanmış bölgelerde de kalsiyum, oksit ve bor elementlerine rastlanıldığı görülmüştür. Kırmızı artı formunda gösterilen açık gri renkteki bölgelerin demir oksit parçacıkları etkisi altındaki bölgelerden oluşurken, mavi büyük artı formunda markalanmış bölgenin ise yani koyu gri renkli olarak görülen kısımların ise demir elementinin yer aldığı şekilde düşünülmüştür. Analiz görüntüsünde sarı artı formunda gösterilen bölge için ince formdaki partiküllerin kümelenerek aşınma yığılması oluşturduğu düşünülmürken, sarı kesikli üçgen formda kapsama altına alınan bölge için de mikro çatlaklara rastlanıldığı görülmektedir. Yeşil kesikli çizgilerle markalanmış kısmi bölgede de mikro çatlak etkisi altında bir yarılmaların olduğu düşünülmektedir.

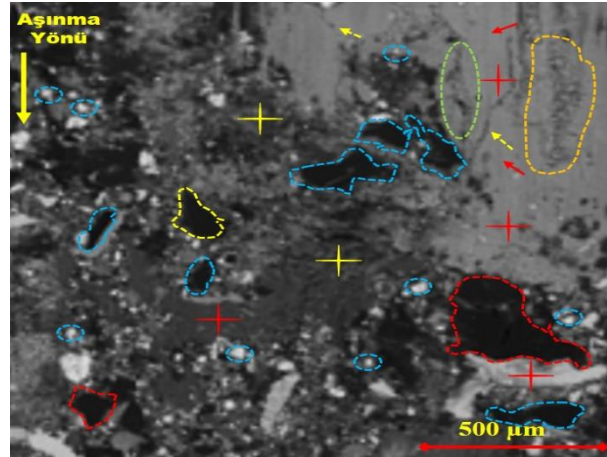
Tablo 4.9 da ise %5 Kolemanit katkıli numuneye ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.

Tablo 4.9. %5 Kolemanit katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	B	O	Fe	C	Cu	Mg	S
Element	3,29	28,62	5,85	42,05	0,43	2,76	0,71

% wt	Ca	Al	Ba	Ti	Si	K
Element	4,14	1,73	2,73	2,22	4,23	1,24

Şekil 4.22 de % 5 bor karbür katkılı deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Aşınmış numunesinin yüzey yapısı incelendiğinde, bazı bölgelerde abrasiv aşınmanın etkisinde aşınma çizikleri ve oluklanmalar oluştuğu, sürtünmeden kaynaklı yüzeyden kopan partiküllerin yüzeyde aşınmanın ve basıncın etkisiyle yüzeyde vadi yapısı oluşturacak bölgeleri oluşturduğu ve hem buna bağlı olarak hem de yüzeyin genelinde oluşan çukurlardan kaynaklı sürtünme yüzeyinde platoların yoğunluğu da mevcuttur. Sürtünme yüzeyinde bölgesel olarak plastik deformasyona uğrayan kısımlarda yırtılmaların meydana geldiği, mikro çatlakların yer aldığı ve aşınma yığıntılarının oluştuğu da görülmektedir.



Şekil 4.22. %5 Bor karbür katkılı numunenin SEM görüntüsü

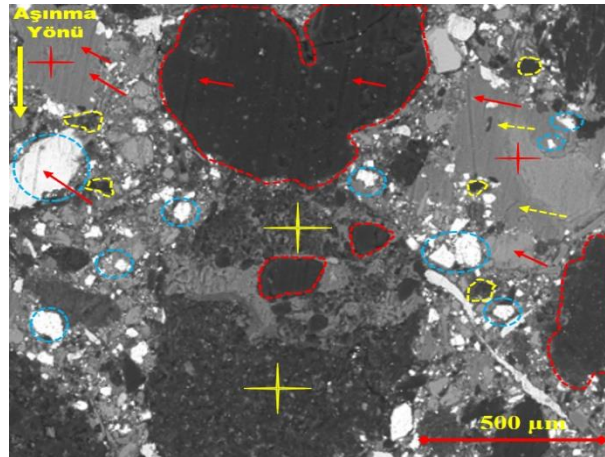
Bor karbür katkılı numuneye ait aşınma yüzeyi ayrıntılı olarak incelendiğinde, kırmızı oklarla gösterilen kısımların aşınma çizikleri olduğu, sarı oklarla gösterilen kısımlarda da mikro çatlakların yer aldığı görülmektedir. Kırmızı kesik çizgili bölgeler içerisinde yer alan siyah bölgelerin grafit olduğu, açık mavi kesikli çizgilerle markalanmış siyah bölgelerin ise sürtünme yüzeyindeki çukurları temsil ettiği, yine açık

mavi dairesel formdaki kesikli çizgilerle markalanmış bölgelerde de oksit ve bor elementlerine rastlanıldığı görülmüştür. Kırmızı artı formunda gösterilen açık gri renkteki bölgelerin demir oksit parçacıkları etkisi altındaki bölgelerden oluşurken, sarı artı formunda markalanmış bölgenin ise aşınma sırasında sürtünme yüzeyinden kopan ve ufalanan partiküllerin yani ince formdaki partiküllerin kümelenerek aşınma yığılması oluşturduğu düşünülmüştür. Yeşil kesikli çizgilerle markalanmış kısmi bölgede de mikro çatlak etkisi altında bir yarılmanın olduğu görülürken, turuncu kesikli çizgilerler kapsama altına alınmış bölgenin ise aşınma etkisi altında sürtünme yüzeyinde içe doğru çukur ve vadi yapısı oluşturduğu gözlenmektedir. Tablo 4.10 da ise %5 bor karbür katkılı numuneye ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.

Tablo 4.10. %5 Bor karbür katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	B	O	Fe	C	Zn	Mg	S
Element	3,08	22,69	5,57	47,16	0,49	0,72	1,83
% wt	Ca	Al	Ba	Ti	Si	K	Na
Element	1,67	0,92	6,64	3,77	2,19	2,82	0,45

Şekil 4.23 de % 5 MA. katkılı deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Aşınmış numunesinin yüzey yapısı incelendiğinde, bazı bölgelerde abrasiv aşınmanın etkisiyle aşınma çizikleri ve oluklu formların oluştuğu, sürtünme yüzeyinin genelinde oluşan çukurlardan kaynaklı platoların da oluştuğu görülmüştür.



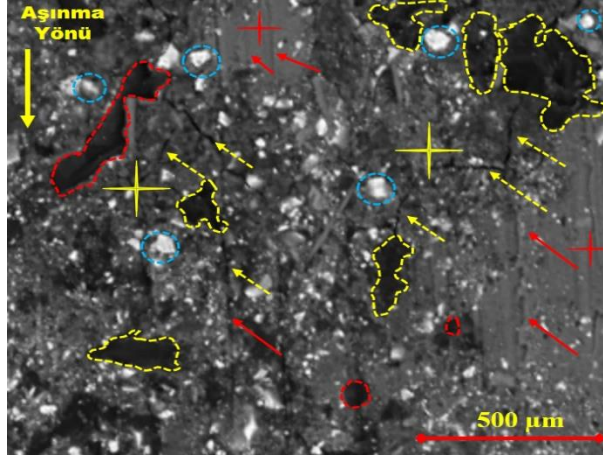
Şekil 4.23. %5 MA. katkılı numunenin SEM görüntüsü

% 5 Mekanik alaşım katkılı numuneye ait aşınma yüzeyi ayrıntılı olarak incelendiğinde, kırmızı oklarla gösterilen kısımların aşınma çizgileri olduğu, sarı kesikli oklarla gösterilen kısımlarda da mikro ve makro boyutlarda çatlakların yer aldığı görülmektedir. Kırmızı kesik çizgili bölgeler içerisinde yer alan siyah bölgelerin grafit olduğu görülmüştür. Analiz görüntülerinde sarı kesikli çizgilerle markalanmış siyah bölgelerin ise sürtünme yüzeyindeki çukurları temsil ettiği, açık mavi dairesel formdaki kesikli çizgilerle markalanmış bölgelerde de oksit elementlerine rastlanıldığı görülmüştür. Kırmızı artı formunda gösterilen açık gri renkteki bölgelerin demir oksit parçacıkları etkisi altındaki bölgelerden oluşurken, koyu gri renkteki olanların ise demir elementi yoğunluklu olduğu düşünülmüştür. Sarı artı formunda markalanmış bölgenin ise aşınma sırasında sürtünme yüzeyinden kopan ve ufalanan partiküllerin yani ince formdaki partiküllerin kümelenerek hem aşınma yığılması oluşturduğu hem de mevcut bölgede çukurlaşmaları oluşturduğu da görülmüştür. Tablo 4.11 da ise %5 MA. katkılı numuneye ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.

Tablo 4.11. %5 MA. katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	B	O	Fe	C	Cu	Mg	S
Element	4,43	29,87	5,98	43,73	2,12	0,82	0,38
% wt	Ca	Al	Ba	Ti	Si	K	
Element	3,06	0,38	4,88	1,71	1,86	0,78	

Şekil 4.24 de % 10 MA. katkılı deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Aşınmış numunesinin yüzey yapısı incelendiğinde, abrasiv aşınmanın etkisinin yoğun olduğu bu sebeple de aşınma çizikleri ve oluklu formlarında geniş bir alanda yer aldığı görülmektedir.



Şekil 4.24. %10 MA. katkılı numunenin SEM görüntüsü

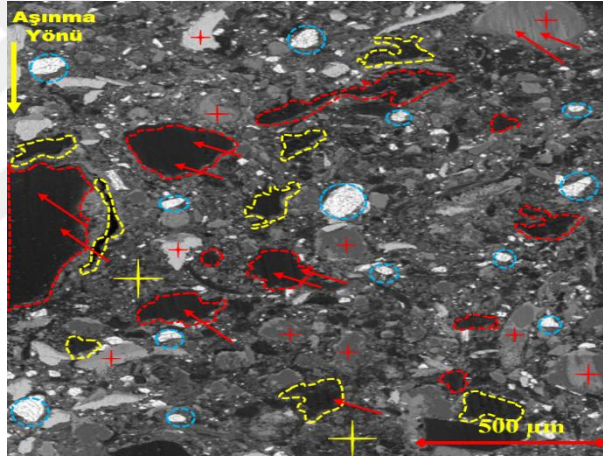
% 10 Mekanik alaşım katkılı numuneye ait aşınma yüzeyi ayrıntılı olarak incelendiğinde, sürtünme yüzeyinin genelinde oluşan çukurlardan kaynaklı platoların da yer aldığı görülmüştür. Kırmızı oklarla gösterilen kısımların aşınma çizgileri olduğu, sarı kesikli oklarla gösterilen kısımlarda da mikro ve makro boyutlarda çatlakların yer aldığı hatta bazı makro çatlakların aşınma yarıkları oluşturduğu görülmektedir. Kırmızı kesik çizgili bölgeler içerisinde yer alan siyah bölgelerin grafit olduğu, sarı kesikli çizgilerle markalanmış siyah bölgelerin ise sürtünme yüzeyindeki çukurları temsil ettiği, açık mavi dairesel formdaki kesikli çizgilerle markalanmış bölgelerde de oksit ve bor elementlerine rastlanıldığı görülmüştür. Kırmızı artı formunda koyu gri renkteki olanların ise demir elementi yoğunluklu olduğu düşünülmüştür. Sarı artı formunda markalanmış bölgenin ise aşınma sırasında sürtünme yüzeyinden kopan ve ufalanan, ince formdaki partiküllerin kümelenerek aşınma yığılması oluşturduğu görülmüştür.

Tablo 4.12 da ise % 10 MA. katkılı numuneye ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.

Tablo 4.12. % 10 MA. katkılı numunenin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	B	O	Fe	C	Cu	Mg	S
Element	6,89	28,44	5,59	41,91	1,83	0,96	0,41
% wt	Ca	Al	Ba	Ti	Si	K	
Element	4,18	0,29	4,76	1,84	1,97	0,93	

Şekil 4.25 de % 15 MA. katkılı deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Aşınmış numunesinin yüzey yapısı incelendiğinde, abrasiv aşınmanın etkili olduğu bu sebeple de aşınma çizikleri ve oluklu formların geniş bir alanda yer aldığı görülmektedir. Aşınma yüzeyi ayrıntılı olarak incelendiğinde, sürtünme yüzeyinin genelinde oluşan çukurlardan kaynaklı platoların da yer aldığı görülmüştür. Kırmızı oklarla gösterilen kısımların aşınma çizgileri ve aşınmadan kaynaklı oluklu formların olduğu görülmektedir. Kırmızı kesik çizgili bölgeler içerisinde yer alan siyah bölgelerin grafit olduğu, sarı kesikli çizgilerle markalanmış siyah bölgelerin ise sürtünme yüzeyindeki çukurları temsil ettiği, açık mavi dairesel formdaki kesikli çizgilerle markalanmış bölgelerde de oksit ve bor elementlerine rastlanıldığı görülmüştür.



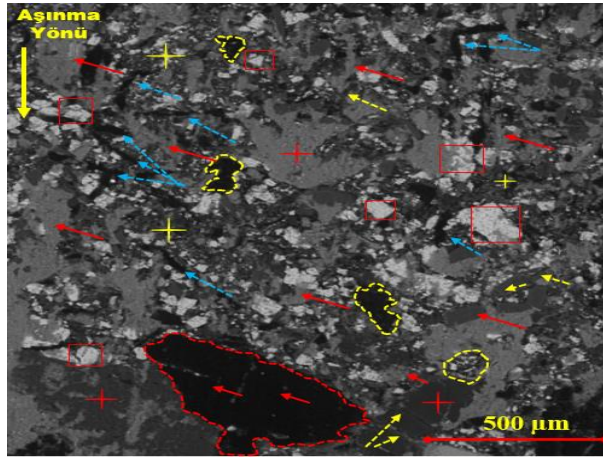
Şekil 4.25. %15 MA. katkılı numunenin SEM görüntüsü

Kırmızı artı formunda koyu gri renkteki olanların ise demir elementi yoğunluklu olduğu, açık gri renkteki bölgelerin ise demir oksit parçacıkları etkisi altında olduğu düşünülmüştür. Sarı artı formunda markalanmış bölgenin ise aşınma sırasında sürtünme yüzeyinden kopan ince formdaki partiküllerin kümelenerek aşınma yığılması oluşturdukları görülmüştür. Tablo 4.13 de ise % 15 MA. katkılı numuneye ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.

Tablo 4.13. % 15 MA. katkıli numunenin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	B	O	Fe	C	Cu	Mg	S
Element	8,86	30,26	6,55	33,02	0,27	1,97	0,95
% wt	Ca	Al	Ba	Ti	Si	K	Na
Element	4,98	1,29	5,82	2,21	2,36	0,54	0,92

Şekil 4.26 da ticari deney numunesinin aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Aşınmış numunesinin yüzey yapısı incelendiğinde, abrasiv aşınmanın etkili olduğu bu sebeple de aşınma çizikleri ve oluklu formların geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Aşınma yüzeyi ayrıntılı olarak incelendiğinde, sürtünme yüzeyinin genelinde oluşan çukurlardan kaynaklı platoların da yer aldığı görülmüştür. Ayrıca aşınmanın etkisi ile sürtünme yüzeyinde oluşan mikro çatlakların büyüyerek makro çatlak ve yarık bölgeleri oluşturduğu da görülmüştür. Kırmızı oklarla gösterilen kısımların aşınma çizgileri ve aşınmadan kaynaklı oluklu formların olduğu görülmektedir. Kırmızı kesik çizgili bölgeler içerisinde yer alan siyah bölgelerin grafit olduğu, sarı kesikli çizgilerle markalanmış bölgelerin ise sürtünme yüzeyindeki çukurları temsil ettiği görülmüştür.



Şekil 4.26. ticari deney numunenin SEM görüntüsü

Kırmızı artı formunda koyu gri renkteki olanların ise demir elementi yoğunluklu bölgelerin olduğu, açık gri renkteki bölgelerin ise demir oksit parçacıkları etkisi altında olduğu düşünülmüştür. Sarı artı formunda markalanmış bölgenin ise aşınma sırasında sürtünme yüzeyinden kopan ince formdaki partiküllerin kümelenerek aşınma yığılması oluşturdukları gözlemlenmiştir. Sürtünme yüzeyinde satı kesikli okların mikro çatlakların varlığını belirtirken, açık mavi kesikli oklar ise makro çatlakların ve bunun eşliğinde ortaya çıkan aşınma yüzeyi yarıklarını göstermektedir. Sürtünme yüzeyinde kırmızı kare formunda kapsama altına alınan kısımların ise yoğunluklu olarak oksit elementinin yanı sıra kalsiyum elementine de rastlanılmıştır. Tablo 4.14 de ise ticari deney numunesine ait sürtünme yüzeylerinin EDS analizlerine yer verilmiştir.

Tablo 4.14. ticari deney numunesinin EDS elementsel analiz sonuçları

% wt	Zn	O	Fe	C	Cu	Mg	S
Element	2,04	26,74	17,72	28,52	1,90	1,15	3,13
% wt	Ca	Al	Ba	Si	K	Zr	
Element	3,23	1,79	10,74	2,28	0,44	0,31	

Tüm numuneler için genel olarak elde edilen analiz verileri literatürde yer alan fren balatası eds sonuçları ile de benzer yaklaşımları göstermiştir (Zhang vd., 2020; Ma vd., 2021).

Görüntü analizleri gerçekleştirilen aşınma numunelerinin sürtünme yüzeylerine bakıldığında mekanik alaşımlı olmayan numuneler arasında (bor oksit, boraks, kolemanit ve bor karbür) en fazla aşınma kalıntılarının yüzeyde sıvanarak zorlamalar oluşturduğu numunenin bor karbür olarak gözükmürken, mekanik alaşımlı numuneler arasında da MA % 5 katkılı numune ile MA % 10 katkılı numunenin genel dağılım olarak benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Bu durumu numunelerin sertlikleri göz önünde tutularak değerlendirildiğinde, numunelerde sertlik değeri arttıkça kopan partiküllerin daha fazla kazıma ve basma kuvveti etkisi altında daha fazla kırılarak ufalanma etkisi gösterdiği anlaşılmıştır. Öyle ki literatürde de yapılmış bir çalışma, basma kuvvetinin artmasının yüzey de oluşan pürüzleri kıracağı ve matrisin deformasyonunun hızlandırarak aşınma kalıntılarının sıkışmasını da arttıracığı şeklinde bildirilmiştir (Xiao vd., 2018). Bu kapsamda ilgili literatürde belirtilenlerin çalışmamızdaki durumu destekleyici yöndedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yurtdışı katma değerine alternatif fren balatası malzemesi geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmamızda, bor oksit, boraks, kolemanit, bor karbür ve yeni ar-ge çalışması olarak nitelendirdiğimiz bor türevli (bor oksit + boraks + kolemanit) malzemelerin mekanik alaşımlandırılması yapılarak farklı oranlardaki katkılarının balata numunelerindeki sürtünme ve aşınma davranışına olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel testlerden elde edilen verilerin kendi aralarındaki karşılaştırmaları sonucunda ortaya çıkan tespitler şunlardır:

1. Yapılan sabit hız ve yükteki sürekli yükleme testlerinde sıcaklığın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu testlerde en yüksek ve kararlı sürtünme katsayısına (0,54 μ) sahip balata numunesinin 322, 58 N yükleme testlerindeki % 10 takviyeli bor karbür katkılı olan balata numunesi olduğu görülmüştür. Bu balata numunesinin bu testteki sürtünme katsayısı durumuna göre G sınıfı özelliğinde olan balata olarak sınıflandırılmıştır. Bu durum bor karbürün içerisindeki sert fazların ve aynı zamanda sert partiküllerin kendi aralarında kopmaya etki eden kuvvetlere karşı da yüksek bir bağ kuvvetinin varlığı ile nitelendirilebilir.

Yine aynı yapılan sabit hız ve yükteki sürekli yükleme testlerinde, yeni geliştirilen bor türevli mekanik alaşım katkılı balata numunelerinin arasından %15 takviyeli btma katkılı olan balata numunesinin 645,16 N yükleme testlerinde en yüksek ve kararlı sürtünme katsayısına (0,50 μ) sahip balata numunesi olarak çıktığı görülmüştür. Sürtünme katsayısı değeri olarak bor karbüre olan yakınlığı ticari balata numunelerine benzer değerlerde de sürtünme katsayısına sahip olması yeni geliştirilen balata numunesinin avantajlı olabileceğini göstermiştir. Bu durum ülkemiz ekonomisi açısından da katma değeri yüksek bir değer olacaktır. Öyle ki bor madenleri arasında en nitelikli olarak bilinen bor karbür bileşiğine alternatif yeni bir alaşımın yerel olarak kullanılması balata maliyetine de olumlu yönde katkı sunacaktır.

2. Fren balatası numunelerinin sertlik ölçümlerinde yeni geliştirilen fren balatalarının hem diğer balatalar içerisinde hem de yurtdışından ithal gelen bor karbür katkılı balata numunelerine göre daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.

3. Balataların aşınma miktarı hakkında bilgi veren sabit sıcaklıkta gerçekleştirilen aşınma testlerinde ise özellikle yeni geliştirilen fren balatası numuneleri ile ticari balata numunelerinin özgül aşınma oranları belirlenerek karşılaştırması sağlanmıştır. Yapılan karşılaştırmalar neticesinde %10 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin özgül aşınma miktarlarının en az olduğu görülmüştür. Aynı zamanda mevcut testlerdeki sürtünme katsayısı değerlerinin de yükleme türlerine göre en kararlı ve optimum davranış ile %10 takviyeli btma katkılı balata numunelerinin sahip olduğu gözlemlenmiştir.

4. Hem sıcak sürtünme davranışında hem de soğuk sürtünme davranışında btma katkılı fren balatalarının sürtünme katsayısı açısından avantajlı oldukları ve ticari balatalar ile karşılaştırıldığında alternatif olarak düşünülebilecek yerli bir gelişim balata numunesi olduğu kanaatine varılmıştır.

Öneriler;

1. Yapılan test uygulamalarına ek olarak mevcut balata numunelerinin farklı hızlardaki sürtünme davranışları da incelenebilir.
2. Bor türevli malzemeleri sürtünme ayarlayıcı tozlar yerine kullanarak alternatif sürtünme ayarlayıcı malzeme olduğu hakkında daha net sonuçlar elde edilebilir.
3. Bor türevli malzemeleri ağır metal tozlar olarak bilinen malzemelerin yerine almaya alternatif olarak değerlendirilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Abutu, J., Lawal, S.A., Ndaliman, M.B., Lafia-Araga, R.A., Adedipe, O., Choudhury, I.A., (2018). *Effects of process parameters on the properties of brake pad developed from seashell as reinforcement material using grey relational analysis*, Engineering Science and Technology, an International Journal, 21, 787–797.
- Adıgüzel, A.A., (2015). *Katı Yağlayıcı ve Aşındırıcı Bileşenlerin Fenolik Reçine Esaslı Fren Balatalarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon. 84.
- Akagündüz, E., (2014). *Kompozit Sürtünmeli Fren Balatalarında Yerli Uçucu Kül Katkısının Raylı Taşıt Balata Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi ve Kullanılabilirliğinin Saptanması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 191.
- Akıncıoğlu, G., Akıncıoğlu, S., Uygur, İ., Öktem, H., (2018a). *Bor Oksit Tozunun Fren Balatalarının Tribolojik Özelliklerine Etkisi*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22 (2), 755-760.
- Akıncıoğlu, G., Öktem, H., Uygur, İ., Akıncıoğlu, S., (2018b). *Determination of Friction-Wear Performance and Properties of Eco-Friendly Brake Pads Reinforced with Hazelnut Shell and Boron Dusts*. Arabian Journal for Science and Engineering, 43:4727–4737.
- Akıncıoğlu, G., (2018). *Ticari Araç Balatalarına Ceviz ve Fındık Kabuğu Tozu Katkılarının Aşınma ve Sürtünme Davranışına Etkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce. 209.
- Akıncıoğlu, G., Akıncıoğlu, 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.

- Akgün, G., (2012). *Aısı 1045 Çeliğinin Mekanik Alaşımlanmış Demir Esaslı Tozlar ile Kaplanması ve Aşınma Davranışının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Aleksendrić, D., (2010). *Neural network prediction of brake friction materials wear*. *Wear*, 268, 117-125
- Algan, İ. B., (2015). *Organik Fren Balatalarında Kullanılan Metal Tozlarının Aşınma ve Sürtünme Performansının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 92.
- Amarnath, M., Rizal, M.S., Kamely, A., (2006). *An investigation toward development of economical brake lining wear alert system*. *International Journal of Engineering & Technology*, 251-256.
- Angelo P.C., Subramanian R., (2009). *Powder Metallurgy: Science, Technology, Applications*. New Delhi :PHI Learnig.
- Aigbodion, V. S., Akadike, U., Hassan, S.B., Asuke, F., Agunsoye, J. O., (2010). *Development of asbestos -free brake pad using bagasse*. *Tribology in industry*, vol. 32, pp. 12-18.
- Aranganathan, N., Mahale, V., Bijwe, J., (2016). *Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests*. *Wear*, vol. 354, pp. 69-77.
- Aras, S., (2019). *Organik Malzeme Esaslı Hibrit Sürtünme Kompozitlerinin Balata Üretiminde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Azam, M.U., Ahmed, B.A., Hakeem, A.S., Irshad, H.M., Laoui, T., Ehsan, M.A., Patel, F., Khalid, F.A., (2019). *Tribological behaviour of alumina-based nanocomposites reinforced with uncoated and Ni-coated cubic boron nitride*. *Journal of materials Research and Technology*, 8(6), 5066–5079
- Ashby, M.F., Jones, D.R.H., (2012). *Engineering materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design*, 4nd edition. Elsevier- Butterworth-Heinemann, 482.

- Baklouti, M., Cristol, A. L., Desplanques, Y., Elleuch, R., (2015). *Impact of the glass fibers addition on tribological behavior and braking performances of organic matrix composites for brake lining*. *Wear*, vol. 330–331, pp. 507-514.
- Banijamali, S.M., Najafi, S., Sheikhan, A., Palizdar, Y., (2022). *Dry tribological behavior of hot-rolled WE43 magnesium matrix composites reinforced by B₄C particles*. *Wear*, 508-509, 1-14.
- Başar, G., Buldum, B. B., Sugözü, İ., (2018). *Kolemanit ve Boraks Takviyeli Fren Balatalarının Sürtünme Performansı*. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt: 5, No: 2, (635-644).
- Bayer, R.G., (2002). *Wear Analysis for Engineers*. HNB Publishing, New York.
- Blau, P.J., (2009). *Friction science and technology from concepts to applications-2 nd edition*, United States of America: CRC Press Taylor & Francis Group, 420.
- Bijwe, J., (1997). *Composites as Friction Material: Recent Developments In Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Review*. *Polymer Composites*, 18, 3, 378-396.
- Bijwe, J., Majumdar, N., Sapathy, B.K., (2005). *Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials*. *Wear*, 259, 1068-1078.
- Bijwe, J., Kumar, M., (2007). *Optimization of steel wool contents in non-asbestos organic (NAO) friction composites for best combination of thermal conductivity and tribo-performance*. *Wear*, vol. 263, pp. 1243-1248.
- Borawski, A., (2020). *Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads—Review*. *Sci. Eng. Compos. Mater.* 27, 374–396.
- Bogdanovich, P.N., Tkachuk, D.V., (2009). *Thermal and thermomechanical phenomena in sliding contact*. *J. Friction and Wear* 30: 153–63.
- Bushan, B., (2001). *Modern Tribology Handbook*. CRC Press, Boca Raton.
- Can, İ., (2019). *Taşıtlarda Kullanılan Fren Balata Malzemelerinde Tanecik Boyutunun Frenleme Performansı Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak*

Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 72.

Czichos, H., (1978). ***Tribology – A Systems Approach.*** Elsevier.

Cho, K.H., Jang, H., Hong, Y.S., Kim, S.J., Basch, R.H., Fash, J.W., (2008). ***The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials.*** *Wear*, 291-297.

Chan, D., Stachowiak, G.W., (2004). ***Review of automotive brake friction materials.*** *Journal of Automobile Engineering*, 953-958.

Cai, P., Wang, Y., Wang, T., Wang, Q., (2015). ***Effect of resins on thermal, mechanical and tribological properties of friction materials,*** *Tribology International*, 87, 1-10.

Çocalak, H.H., (2019). ***Seramik, Karbon ve Seramik-Karbon Kaplı Fren Disklerinin Frenleme Performansına Etkisinin Araştırılması.*** Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mersin. 88.

Çavuşlu, M.A., Becerikli, Y., Karakuzu, C., (2012). ***Levenberg-Marquardt algoritması ile YSA eğitiminin donanımsal gerçekleştirilmesi.*** *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 5(1), 41-47.

Çankaya, K., (2022). ***Yerli Grafen Nano Plakalarla Takviye Edilmiş Al-Cu Esaslı Alaşım Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi, Isıl İşlemi ve Karakterizasyonu.*** Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bursa.

Day, A. (2014). ***Brake Design Analysis. Braking of Road Vehicles,*** Andrew Day. Butterworth-Heinemann, 225 Wyman Street, Waltham MA 02451 USA, 97-148.

Dönmez, A. G., (2000). ***Asbest dışı elyaflarla üretilen balata malzemelerinin özelliklerinin incelenmesi.*** Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Ekingen, O., (2012). *Ağır Ticari Taşıtlarda Kullanılan Kampanalı Frenlerde Fren Titreşimleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 45.
- Eken, Ö., (2011). *Ticari Araçlarda Frenleme Dinamiği Ece Regülasyonları Kapsamında Test Ayrıntıları*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 88.
- Elhilali, F., Fihri-Fassi, H., Ourihi, R., (2021). *Towards the development of an optimized numerical model of the brake system pad with natural material*, Materials Today: Proceedings, *45 (6)*, 5419-5425.
- Ertan, R., Yavuz, N., (2006). *Polimer Matriksli Fren Balata Malzemelerinin Kompozisyon ve Üretim Parametreleri Açısından Değerlendirilmesi*. Mühendis ve Makina, *47*, 553.
- Ertan, R., (2008). *Fren Balata Malzemelerinin Optimizasyonu ve Üretim Parametrelerinin Analizi*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 144.
- Erdem, M., (2007). *Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Ni Esaslı bir Süper Alaşımın Üretilmesi ve Mikro Yapı, Mekanik ve Oksitlenme Özelliklerinin Araştırılması*. Doktora Tezi, G.U. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Eriksson, F.B.M., Jacobson, S., (1999). *Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions*. Wear, vol. 232, pp. 163-167.
- Eriksson, S.J.M., (2000). *Tribological surfaces of organic brake pads*. Tribology International, vol. 33, pp. 817-827.
- Eriksson, F.B.M., Jacobson, S., (2002). *On the nature of tribological contact in automotive brakes*. Wear, vol. 252, pp. 26-36.
- 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.

- Filip, P., Weiss, Z., Rafaja, D., (2002). *On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications*. *Wear*, 189-198.
- Guan, Q., Li, G., Wang, H., An, J., (2004). *Friction-wear characteristics of carbon fiber reinforced friction material*. *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp. 641-643.
- Gopal P., L. R. Dharani, F. D. Blum, (1996). *Hybrid Phenolic Friction Composites Containing Kevlar Pulp. Part I. Enhancement Of Friction and Wear Performance*. *Wear*, 193. 199-206.
- Gnecco, E., Meyer, E., (2015). *Fundamentals of Friction and Wear: 2th ed.*, London, England: Springer, 704.
- Han, L., Huang, L., Zhang, J., Lu, Y., (2006). *Optimization of ceramic friction materials*. *Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 2895-2906.
- Han, Y., Tian, X., Yin, Y., (2008). *Effects of ceramic fiber on the friction performance of automotive brake lining materials*. *Tribology Transactions*, vol. 51, pp. 779-783.
- Hassain, S., Abdul Hamid, M.K., Mat Lazim, A.R., Abu Bakar, A.R., (2014). *Brake wear particle size and shape analysis of non-asbestos organic (NAO) and semi metallic brake pad*. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 129-134.
- Hendre, K., Bachchhav, B., (2020). *Tribological behaviour of non-asbestos brake pad material*. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.560>.
- Hong, U.S., Jung, S.L., Cho, K.H., Cho, M.H., Kim, S.J., Jang, H., (2009). *Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resins matrices*. *Wear*, 739-744.
- Hu, Z.B., Li, H.J., Fu, Q.G., Xue, H., Sun, G.L., (2007). *Fabrication and tribological properties of B₂O₃ as friction reducing coatings for carbon-carbon composites*. *New Carbon Materials*, 22, 2, 131-134.

- Hutchings, I., Shipway P., (2017). *Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials-2nd edition*. Elsevier- Butterworth-Heinemann, 388.
- Irawan, A.P., Fitriyana, D.F., Tezara, C., Siregar, J.P., Laksmidewi, D., Baskara, G.D., Abdullah, M.Z., Junid, R., Hadi, A.E., Hamdan, M.H.M., Najid, N., (2022). *Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads*. *Polymers*. 14, 1180.
- Jang, H., Kim, S. J., (2000). *The effects of antimony trisulfide Sb_2S_3 and zirconium silicate $ZrSiO_4$ in the automotive brake friction material on friction characteristics*. *Wear*, 229-236.
- Jang, H., Ko, K., Kim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W., (2003). *The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials*. *Wear*, 406-414.
- Jiménez, A.E., Bermúdez, M.D., 2011. *Tribology for Engineers A practical guide*. J. Paulo Davim, Woodhead Publishing, 328.
- Jeganmohan, S.R., Christy, T.V., Solomon, D.G., Sugoza, B., (2020). *Influence of calcium sulfate whiskers on the tribological characteristics of automotive brake friction materials*, *Engineering Science and Technology, an International Journal*,23, 445-451.
- Kara, F., Kara, R., Mutlu, İ., (2011). *Fren Balatasında Karbon Elyaf Boyutunun Sürtünme Katsayısına Etkisi*. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey*.
- Kılınç, Y., (1999). *Demir Bazlı Süper Alaşımların Mekanik Alaşımlama Metodu ile Üretilmesi ve Özelliklerinin Araştırılması Yüksek Lisans Tezi*, G.U. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kılıçay, K., (2012). *AISI 1020 Çeliğinin Frezelenmesinde Katı Yağlayıcı Kullanımının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Kocabaş, İ., (2012). *Kompozit Malzemelerin Fren Balatalarında Kullanılabilirliğinin ve Frenleme Performansının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 142.
- Kalel, N., Bhatt, B., Darpe, A., Bijwe, J., (2020). *Copper-free brake-pads: A breakthrough by selection of the right kind of stainless steel particles*, Journal Pre-Proof, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203537>.
- Kosbe, P., Patil, P., Muthukumar, M., Gurunathan, R., (2020). *Effect of hexagonal boron nitride (h-BN) inclusion on thermal characteristics of disc brake friction composites*, *Diamond & Related Materials*.
- Kurt, H.A., (2019). *Bor Karbür Takviyeli Fren Balatalarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir. 77.
- Krenkel, W., (2004). *Carbon fiber reinforced CMC for high-performance structures*. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 1, pp. 188-200, 2004.
- Kim, S.J., Cho, M. H., Lim, D. S., Jang, H., 2001. *Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material*. *Wear*, vol. 251, pp. 1484-1491, 2001.
- Krenkel, W., Heidenreich, B., Renz, B., (2002). *C/C-SiC Composites for Advanced Friction Systems*. *Advanced Engineering Materials*, 4, 7, 427-436.
- Kukutschova, J., Roubicek, V., Maslan, M., Jancik, D., Slovak, V., Malachova, K., Pavlickova, Z., Filip, P., (2009). *Wear performance and wear debris of semimetallic automotive brake materials*. *Wear*, 268, 86–93.
- Kumar, M., Satapathy, B. K., Patnaik, A., Kolluri, D. K., Tomar, B. S., (2012). *Evaluation of fade-recovery performance of hybrid friction composites based on ternary combination of ceramic-fibers, ceramic-whiskers, and aramid-fibers*. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 124, pp. 3650-3661.

- Kumar, V.V., Kumaran, S.S., (2019). *Friction Material Composite: Types of Brake Friction Material Formulations and Effects of Various Ingredients on Brake Performance—A Review*. Materials Research Express, 6, 8.
- 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.
- Langhof, N., Rabenstein, M., Rosenlöcher, J., Hackenschmidt, R., Krenkel, W., Rieg, F., (2016). *Full-ceramic brake systems for high performance friction applications*. Journal of the European Ceramic Society, vol. 36, pp. 3823-3832.
- Lu, Y., Tang, C. F., Wright, M. A., (2002). *Optimization of a commercial brake pad formulation*. Journal of Applied Polymer Science, vol. 84, pp. 2498-2504.
- Lu, Y., (2006). *A combinatorial approach for automotive friction materials: effects of ingredients on friction performance*. Composites Science and Technology, vol. 66, pp. 591-598.
- Luo, J., Meng, Y., Shao, T., Zhao, Q., (2010). *Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTtoMM2008*, Beijing: Springer Science & Business Media, 720-721.
- Lü, L., Lai, M.O., (1998). *Mechanical Alloying*. Boston : Springer
- Ma, X., Luan, C., Fan, S., Deng, J., Zhang, L., Cheng, L., (2021). *Comparison of braking behaviors between iron- and copper-based powder metallurgy brake pads that used for C/C–SiC disc*. Tribology International, 154 (106686).
- Mandal, D., Dutta, B. K., Panigrahi, S. C., (2008). *Wear properties of copper-coated short steel fiber reinforced stir cast Al–2Mg alloy composites*. Wear, vol. 265, pp. 930-939.
- Mahale, V., Bijwe, J., Sinha, S., (2019). *A step towards replacing copper in brake-pads by using stainless steel swarf*. Wear, 424–425. 133–142.

- Maleque, M.A., Atiqah, A., Talib, R.J., Zahurin, H., (2012). *New natural fibre reinforced aluminium composite for automotive brake pad*. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 166-170.
- Mang, T., Bobzin, K., Bartels, T., 2010. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany, 672.
- Matějka, V., Metinöz, I., Wahlström, J., Alemani, M., Perricone, G., (2017). *On the running-in of brake pads and discs for dyno bench tests*, *Tribology International*, vol. 115, pp. 424-431.
- Milli, A., (2017). *Mekanik alaşımlama yöntem ile (B4C +FeTi) takviyeli Fe esaslı kompozit üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Mohanty, S., Chugh, Y.P., (2007). *Development of fly ash-based automotive brake lining*. *Tribology International*, 1217-1224.
- Mutlu, I., Oner, C., Findik, F., (2007). *Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings*. *Materials & Design*, vol. 28, pp. 480-487.
- Pektaş, İ., (1995). *21. Yüzyıl Malzemeleri, Karbon-karbon Kompozit Malzemeler*. *Teknik Gelişim*, Sayı 11-12-13.
- Perettie, D., Fox, R., Pyzik, A., Han, C., Macioce, P., Nashif, A., (1998). *Dynamic response and fatigue characterization of aluminum boron carbide ceramic composite materials for disk drive actuator applications*. *Advances in Information Storage Systems*, vol. 8, pp. 135-146.
- Rodrígueza, S.G., Torresa, B., Marotob, A., Lópeza, A.J., Oteroa, E., Ramsa, J., (2017). *Dry sliding wear behavior of globular AZ91 magnesium alloy and AZ91/SiCp composites*. *Wear*, 390–391, 1–10.
- Röder, J., Bishop, A.R., Holian, B.L., Hammerberg, J.E., Mikulla, R.P., (2000). *Dry friction: modelling and energy flow*. *Physica D* **142**: 306–16.

- Ouyang, J.H., Sasaki, S., Murakami, T., Umeda, K., (2004). *Evaluation of solid lubricant materials for use under extreme environmental conditions review*. Recent research developments in materials science, S.G. Pandalai, Vol. 5, pp. 85–103.
- Owen, C.E., (2004). *Classroom Manual for Automotive Brake Systems (Third Edition)*. United States of America: Cengage Learning, 145-147.
- 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.
- Öztürk, B., (2004). *Hibrid Kompozit Kavrama Balatası Üretimi ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öztürk, B., Öztürk, S., Adigüzel, A. A., (2013). *Effect of type and relative amount of solid lubricants and abrasives on the tribological properties of brake friction materials*. *Tribology Transactions*, vol. 56, pp. 428-441.
- Saffar, A., Shojaei, A., (2012). *Effect of rubber component on the performance of brake friction materials*. *Wear*, vol. 274–275, pp. 286-297.
- Satapathy, B.K., Bijwe, J., (2005a). *Influence of operating parameters on the performance of friction composites based on combinations of rock fibers and organic fibers*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 579-595.
- Satapathy, B.K., Bijwe, J. (2005b). *Fade and recovery behavior of non-asbestos organic (NAO) composite friction materials based on combinations of rock fibers and organic fibers*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 563-577.
- Satapathy, B. K., Bijwe, J., (2006). *Composite friction materials based on organic fibres: Sensitivity of friction and wear to operating variables*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, pp. 1557-1567.
- Selamat, M., (2005). *Friction Materials for Brakes Application*. *Journal of Industrial Technology*, p. 9-25.

- Selvam, P.T., Pugazhenti, R., Dhanasekaran, C., Chandrasekaran, M., Sivaganesan, S., (2021). *Experimental investigation on the frictional wear behaviour of TiAlN coated brake pads*. Materials Today: Proceedings, Volume 37, Part 2, 2419-2426.
- Singh, S., (2015). *Analysis of Brake Pad Friction Material Formulation*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, vol 2, 8.
- Singh, T., Patnaik, A., Chauhan, R., (2016). *Optimization of tribological properties of cement kiln dust-filled brake pad using grey relation analysis*. Materilas and Design, 89, 1335-1342.
- Singh, T., Patnaik, A., Gangil, B., Chauhan, R., (2015). *Optimization of tribo-performance of brake friction materials: effect of nano filler*. Wear, 10-16.
- Sugözü, İ., (2009). *Bor Katkılı Asbestsiz Otomotiv Fren Balatası Üretim ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Sarıkaya, Ö., (2007). *Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri*. (Birinci baskı). Sakarya, 1-90.
- Sherif El-Eskandarany, M., (2001). *Mechanical Alloying For Fabrication of Advanced Engineering Materials*. New York: Noyes Publications.
- Söyler, A.U., (2008). *Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al-Fe Tabanlı SiC ve Y₂O₃ Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.U Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sugözü, B., Buldum, B.B., Sugözü, İ., (2018). *Üleksit ve boraks içeren fren sürtünme malzemelerinin tribolojik özellikleri*. Journal of BORON, 3 (2), 125 – 131.
- Sundarkrishnaa, K.L., (2012). *Friction Materials Composites: Materials Perspective (First edition)*. New York: Springer Science & Business Media, 329 pp.
- Suryanarayana, C., (2001). *Mechanical alloying and milling*. Progress in Materials Science, 46(1-2), 1-184.

- Takadoum, J., (2008). *Materials and Surface Engineering in Tribology*. Wiley-ISTE, USA, 242.
- Toros, M., (2011). *Fren Balatalarında Nano Malzeme Kullanımının Frenleme Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- TSE, (1992). *Karayolu Taşıtları -Fren Sistemleri- Balatalar- Sürtünmeli Frenler için, TS 555*. Ankara: TSE, pp. 2-8.
- Ulutan, M., (2007). *AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması*. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Upadhyaya, G.S., (2002). *Powder Metallurgy Technology*. England: Cambridge International Science Publishing.
- Uyyuru, R. K., Surappa, M. K., Brusethaug, S., (2006). *Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al composite/brake pad tribo-couple*. *Wear*, vol. 260, pp. 1248-1255.
- Verma, P. C., Menapace, L., Bonfanti, A., Ciudin, R., Gialanella, S., Straffelini, G., (2015). *Braking pad-disc system: wear mechanisms and formation of wear fragments*. *Wear*, vol. 322, pp. 251-258.
- Yang, Y., Liang, L., Wu, H., Liu, B., Qu, H., Fang, Q.H., (2020). *Effect of Zinc Powder Content on Tribological Behaviors of Brake Friction Materials*. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 30. 3078–3092.
- Yao, P.P., Xiao, Y.L., Deng, J.W., (2011). *Study on space copper-based powder metallurgy friction material and its tribological properties*. *Adv Mater Res*. 284–286:479–87.
- Yavuzaslan, N., (2006). *Otomobillerde Fren Sistemleri ve İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 155.

- Yılmaz, İ., (2022). *Bakır Matrisli Kompozit Fren Balatalarının Üretim Koşulları ve Bileşiminin, Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Olan Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir. 70.
- Xiao, Y., Zhang, Z., Yao, P., Fan, K., Zhou, H., Gong, T., Zhao, L., Deng, M., (2018). *Mechanical and tribological behaviors of copper metal matrix composites for brake pads used in high-speed trains*. Tribology International, 119, 585-592.
- Wang, S., Khatir, S., Wahab, M.A., (2020). *Proper Orthogonal Decomposition for the prediction of fretting wear characteristics*. Tribology International, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106545>.
- Wannik, W., Ayob, A., Syahrullail, S., Masjuki, H., Ahmad, M., (2012). *The effect of boron friction modifier on the performance of brake pads*. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, vol. 7, 31-35.
- Windhorst, T., Blount, G., (1997). *Carbon-carbon composites: a summary of recent developments and applications*. Materials & Design, vol. 18, pp. 11-15.
- Zhang, P., Zhang, L., Wu, P., Cao, J., Shijia, C., Wei, D., Qu, X., (2020). *Effect of carbon fiber on the braking performance of copper-based brake pad under continuous high-energy braking conditions*. Wear, 458-459, 203408.
- Zhang, W., (2020). *A review of tribological properties for boron carbide ceramics*. Progress in Materials Science, 116.

İnternet Kaynakları

<https://avtotachki.com/en/chto-nuzhno-znat-o-tormoznoj-sisteme-avtomobilya/>,
(08.02.2023)

www.akebono-brake.com/english/product_technology/technology/electro_mechanical.html,
(08.02.2023)

<https://www.lehigh.edu/~intribos/tribodesign.html>, (12.02.2023).