
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE YENİ BİR BALATA MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Sırma Nur TOPBAŞOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sırma Nur TOPBAŞOĞLU

19/01/2024

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE YENİ BİR BALATA MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sırma Nur TOPBAŞOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Gelişmekte olan otomotiv endüstrisi ile hızlanan araçlar, etkili bir frenleme sistemi ihtiyacı da ortaya çıkarmıştır. Frenleme sistemlerinin en önemli parçalarından olan fren balataları, yıllar boyunca hep gelişime açık ve ilgi odağı olmuştur. Yapısında birçok bileşen içeren fren balatalarının üretiminde günümüzde en önemli kriterler; günümüz araçlarında etkili bir frenleme performansı gösterebilmesi, çevre ve insan sağlığına zarar vermemesidir. Bu çalışmada bor karbür kullanılarak, üstün tribolojik özelliklere sahip bir fren balata malzemesi tasarlanmıştır. Literatürdeki balata çalışmalarından faydalanarak oluşturulan fren balatası bileşimine 1-3 μm ve 1-10 μm boyutlarında bor karbür %0,5, %1 ve %3 oranlarında eklenerek numuneler üretilmiştir. Numune üretimi toz metalurjisi yöntemi ile yapılmıştır. Üretilen numunelerin Arşimet Prensibi'ne göre yoğunluğu ölçülmüştür. Sürtünme özelliklerinin incelenmesi için pin-on disk triboloji testi yapılmıştır. Numunelerin sertlik özelliklerini görmek için Rockwell sertlik testi yapılmıştır. Numunelerin XRD incelemeleri, aşınma öncesi ve sonrası SEM incelemeleri yapılmış olup, numune dağılımının homojenliği, temas platoları, aşınma çeşitleri, boşluklar, çatlaklar incelenmiştir. Bunlar bor karbürün eklenmesinin etkileri açısından incelenmiştir. Sonuçlar değerlendiğinde uygun bir bileşim ile bor karbürün fren balatalarında sürtünme katsayısını arttırdığı ve kararlı bir sürtünme davranışı sağladığı gözlemlenmiştir. Sertlik ve yoğunluk değerlerinde çok büyük bir etki gözlemlenmemiştir. Bileşimin balata malzemesi olarak kullanımının, fren balatasından beklenen özellikleri sağlayabileceği görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91528
Anahtar Kelimeler	:	Bor karbür, fren balatası, aşınma, toz metalurjisi, triboloji
Sayfa Adedi	:	69
Danışman	:	Prof. Dr. Hakan ATEŞ
İkinci Danışman	:	Doç. Dr. Sedat SÜRDEM

DEVELOPMENT OF A NEW LINING MATERIAL BY POWDER METALLURGY AND INVESTIGATION OF ITS PROPERTIES

(M.Sc. Thesis)

Sırma Nur TOPBAŞOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Vehicles accelerating with the developing automotive industry have also created the need for an effective braking system. Brake pads, one of the most important parts of braking systems, have always been open to development and have been the center of attention for years. Today, the most important criteria in the production of brake pads, which contain many components in their structure, are to be able to show an effective braking performance in today's vehicles and not to harm the environment and human health. In this study, a brake lining material with superior tribological properties was designed using boron carbide. Samples were produced by adding boron carbide at 0.5%, 1% and 3% in 1-3 μm and 1-10 μm sizes to the brake lining composition created by utilizing the lining studies in the literature. Sample production was carried out by powder metallurgy method. The density of the produced samples was measured according to the Archimedes principle. Pin-on disk tribology test was performed to examine the friction properties. Rockwell hardness test was performed to see the hardness properties of the samples. XRD examinations of the samples, SEM examinations before and after wear, homogeneity of the sample distribution, contact plateaus, wear types, voids, cracks were examined. These were analyzed in terms of the effects of the addition of boron carbide. When the results are evaluated, it is observed that boron carbide with a suitable composition increases the coefficient of friction in brake pads and provides a stable friction behavior. No significant effect was observed on hardness and density values. It was observed that the use of the composition as a lining material can provide the properties expected from the brake lining.

Science Code	:	91528
Key Words	:	Boron carbide, brake pad, wear, powder metallurgy, tribology
Page Number	:	69
Supervisor	:	Prof. Dr. Hakan ATEŞ
Co-Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Sedat SÜRDEM

TEŞEKKÜR

Tez boyunca desteklerini benden asla esirgemeyen değerli danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Hakan ATEŞ ve Sayın Doç. Dr. Sedat SÜRDEM hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum. Ayrıca tezimdeki malzemelerin sağlanması, üretim ve testlerin yapılması konusundaki desteklerinden ötürü ülkemizin değerli kurumu TENMAK BOREN'e ve METİSAFE firmasına teşekkür ediyorum. En büyük destekçilerim olan değerli eşime ve aileme de sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. FREN BALATALARI 3

2.1. Otomobil Fren Balatalarının Tarihçesi 5

2.2. Fren Balatalarının Çalışma Prensibi 6

2.3. Fren Balatalarının Çeşitleri 7

2.4. Fren Balatalarının Bileşenleri 8

2.4.1. Bağlayıcılar 9

2.4.2. Yapısal malzemeler ve takviyeler 12

2.4.3. Dolgu malzemeleri 15

2.4.4. Sürtünme düzenleyiciler 17

3. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM YÖNTEMİ 21

3.1. Toz Metalurjisi Üretim Yöntemi Aşamaları 21

3.1.1. Toz üretimi 22

3.1.2. Karıştırma 23

Sayfa

3.1.3. Sıkıştırma 24

3.1.4. Sinterleme 25

4. BOR 27

4.1. Bor Elementi 27

4.2. Bor Mineralleri 28

4.3. Bor Rezervleri ve Bor Üretimi 29

4.4. Borun Kullanım Alanları 30

4.5. Bor Karbür 33

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 35

5.1. Malzeme 35

5.2. Numune Üretimi 36

5.3. Pin-On-Disk Triboloji Testi 38

5.4. Yoğunluk Testi 40

5.5. Sertlik Testi 40

5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 41

5.7. XRD 41

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 43

6.1. Pin-On-Disk Triboloji Testi 43

6.2. Yoğunluk Testi 47

6.3. Sertlik Testi 47

6.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 48

6.5. XRD İncelemesi 51

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 53

KAYNAKLAR 57

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Bağlayıcı malzemelerin avantajları ve dezavantajları 11

Çizelge 4.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri 27

Çizelge 4.2. Bor karbürün genel özellikleri 33

Çizelge 5.1. Bor karbürün %0, %1, %3, %5 oranlarında eklenmesi durumu 36

Çizelge 5.2. Pin-on-disk triboloji testi çalışma verileri 39

Çizelge 6.1. Pin-on-disk triboloji test sonuçları 44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Hidrolik fren sistemi 6

Şekil 2.2. Fren balatası bileşenleri 8

Şekil 3.1. Toz metalurjisi işlem basamakları 21

Şekil 3.2. Toz parçacık şekilleri 22

Şekil 3.3. Farklı karıştırıcı tipleri 23

Şekil 3.4. Toz sıkıştırma prosesinin işlem basamakları 24

Şekil 3.5. Küresel şekilli parçacıklar için sıkıştırma evrelerinin gösterimi 25

Şekil 3.6. Sinterleme işleminin aşamaları 26

Şekil 4.1. Dünya bor rezervlerinin dağılımı 29

Şekil 4.2. Dünya bor üretim ton bazında dağılım 30

Şekil 4.3. Bor tüketiminin kullanım alanlarına göre dağılımı 31

Şekil 5.1. Numune bileşenleri 36

Şekil 6.1. Ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı 44

Şekil 6.2. Ham numunenin frenleme periyotlarındaki sürtünme katsayısı değişimi 45

Şekil 6.3. a)1-3µm, b) 1-10µm B_4C ilavesi yapılmış malzemelerin periyot bazında sürtünme katsayısı değişimi 46

Şekil 6.4. Periyot bazında tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değişimi 46

Şekil 6.5. Bileşimlerin yoğunluk değerleri 47

Şekil 6.6. Bileşimlerin sertlik değerleri 47

Şekil 6.7. Ham numune XRD grafiği 51

Şekil 6.8. Bor karbür içerikli numune XRD grafiği 52

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Temel fren balatası bileşenleri 3

Resim 5.1. Hassas Terazi 37

Resim 5.2. Karıştırıcı 37

Resim 5.3. Pin-on-disk numune kalıbı 38

Resim 5.4. Numuneler 38

Resim 5.5. Pin-on-disk triboloji testi için yerleştirilen numuneler 38

Resim 5.6. Pin-on-disk triboloji test sistemi 39

Resim 5.7. Yoğunluk ölçüm cihazı 40

Resim 5.8. Sertlik ölçüm cihazı 40

Resim 5.9. Tarama elektron mikroskobu (SEM) 41

Resim 5.10. X ışını difraktometresi 41

Resim 6.1. Ham numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü 48

Resim 6.2. 1-3 µm a-b) %0,5, c-d) %1, e-f) %3 B4C ilaveli numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü 49

Resim 6.3. 1-10 µm a-b)%0,5, c-d)%1, e-f)%3 B4C ilaveli numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü 50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
mm	Milimetre
km	Kilometre
s	Saniye
°C	Derece
µm	Mikrometre
g	Gram
cm^3	Santimetre küp
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
J	Joule
kJ	Kilojoule
Pa	Pascal
W	Watt
MPa	Megapascal
S	Watt

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ZrB_2	Zirkonyum diborür
MoS_2	Molibden disülfit
MMK	Metal matris kompozitleri
SiC	Silisyum karbür
Al_2O_3	Alüminyum oksit
SiO_2	Silisyum dioksit
CoF	Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
P	Basınç
F	Kuvvet
SEM	Tarama elektron mikroskobu
XRD	X ışını difraksiyon

1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv sektörü, teknolojik yenilikler ve çevresel sürdürülebilirlik beklentilerinin artması gibi dinamiklerle sürekli bir evrim içerisindedir. Bu değişimde, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve araçların güvenliği, endüstrinin öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Özellikle fren sistemleri, bu değişimde kritik bir role sahip olup, otomobil güvenliği ve performansı için hayati önem taşımaktadır (Jadhav ve Sawant, 2019).

Fren balataları, otomobilin güvenli sürüşü açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin performansı, sürücünün beklenmedik durumlarda aracı güvenle durdurabilmesi için oldukça önemlidir. Etkili bir frenleme sistemi, aracın ani durma taleplerine hızlı yanıt verebilir ve böylece kazaların önüne geçebilir. Bu açıdan, balataların performansı, sürücü ve diğer yol kullanıcılarının güvenliği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Blau, 2001).

Araçların çevresel etkilerini azaltma yönündeki çabalar, fren sistemlerinde de kendini göstermektedir. Sürdürülebilirlik odaklı malzemeler ve tasarımlar, sektörde daha çevre dostu fren balataları geliştirme yönünde bir eğilim oluşturmaktadır. Bu, zararlı atıkların azaltılması ve frenleme sırasında ortaya çıkan aşınma ürünlerinin etkilerinin minimize edilmesi gibi çevresel avantajları da beraberinde getirmektedir (Borawski, Mieczkowski ve Szpica, 2023).

Türkiye, dünya bor rezervlerinin büyük bir bölümüne sahiptir. Bu değerli maden, sadece ekonomik bir varlık olmanın ötesinde stratejik bir kaynaktır. Bor, geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine sahiptir ve pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu maden, elektrikli araçların gelişimi gibi teknolojik ilerlemelerle birlikte, özellikle enerji depolama sistemlerinde ve pille çalışan araçlarda potansiyel bir bileşen olabilir. Ayrıca, borun nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanındaki uygulamaları da üzerinde çalışılan ve gelecekte büyük etkiler yaratabilecek potansiyellere sahiptir (Subramanian, 2010).

Bor, sürtünme malzemeleri alanında önemli bir takviye unsuru olarak dikkat çeker. Özellikle bor karbür, sürtünme malzemelerinde çeşitli avantajlar sunar. Yüksek sıcaklıklarda mükemmel aşınma direnci sağlayarak dayanıklılığı artırır ve termal iletkenliği yüksek özellikleriyle de dikkat çeker. Bu özellikleri, bor karbürünün özellikle fren balataları gibi

yüksek sürtünmeli uygulamalarda etkili bir malzeme olmasını sağlar (I. Mutlu, Oner ve Findik, 2007).

Bor karbürün sürtünme malzemeleri alanındaki potansiyeli, araştırmacıların dikkatini çeken bir konudur. Malzeme bilimi ilerledikçe, bor karbürün mikron ve nano boyutlu parçacıklar halinde kullanılması, sürtünme malzemelerinde yeni bir boyut açabilir. Bu açıdan bakıldığında, bor karbürünün sürtünme malzemelerindeki rolü, hem mevcut teknolojideki kullanım alanlarını genişletebilme hem de gelecekteki yeniliklere öncülük edebilme potansiyeli taşımaktadır. Bor karbürün sunduğu benzersiz özellikler, sürtünme malzemeleri alanında yeni keşiflere ve daha gelişmiş uygulamalara kapı aralayabilir (Kuliiev ve diğerleri, 2020).

Bu araştırma, bor karbür takviyeli toz metalurjisi ile üretilecek fren balata malzemesini, otomotiv endüstrisindeki kritik performans özellikleri açısından değerlendirmeyi hedeflemektedir. Çalışma kapsamında bor karbür takviyeli malzemenin dayanıklılık, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık performansı gibi temel özelliklerini detaylı bir şekilde analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu malzeme, geleneksel fren balatası malzemelerine kıyasla üstün özelliklere sahip olabilir. Özellikle, bor karbürün yüksek sıcaklık stabilitesi ve olağanüstü aşınma direnci, otomobil fren sistemlerinde karşılaşılan zorlu koşullara uygun bir performans sergileyeceğine işaret etmektedir. Bu özellikler, özellikle yüksek hızlarda ve ani frenleme durumlarında, güvenilir ve etkili bir frenleme sağlama açısından kritik öneme sahiptir.

Bu araştırmanın ana hedefi, bor karbür takviyesinin fren balatası performansına olan etkilerini inceleyerek hem otomotiv endüstrisine hem de çevreye yönelik sürdürülebilir çözümler sunmaktır. Bu bağlamda, yerel kaynakların kullanımıyla beraber otomotiv endüstrisinde malzeme geliştirme süreçlerinin yenilikçi çözümlerle desteklenmesi, endüstriyel ve çevresel açıdan önemli bir adım olabilir.

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sırma Nur TOPBAŞOĞLU

19/01/2024

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE YENİ BİR BALATA MALZEMESİ GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sırma Nur TOPBAŞOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Gelişmekte olan otomotiv endüstrisi ile hızlanan araçlar, etkili bir frenleme sistemi ihtiyacı da ortaya çıkarmıştır. Frenleme sistemlerinin en önemli parçalarından olan fren balataları, yıllar boyunca hep gelişime açık ve ilgi odağı olmuştur. Yapısında birçok bileşen içeren fren balatalarının üretiminde günümüzde en önemli kriterler; günümüz araçlarında etkili bir frenleme performansı gösterebilmesi, çevre ve insan sağlığına zarar vermemesidir. Bu çalışmada bor karbür kullanılarak, üstün tribolojik özelliklere sahip bir fren balata malzemesi tasarlanmıştır. Literatürdeki balata çalışmalarından faydalanarak oluşturulan fren balatası bileşimine 1-3 μm ve 1-10 μm boyutlarında bor karbür %0,5, %1 ve %3 oranlarında eklenerek numuneler üretilmiştir. Numune üretimi toz metalurjisi yöntemi ile yapılmıştır. Üretilen numunelerin Arşimet Prensibi'ne göre yoğunluğu ölçülmüştür. Sürtünme özelliklerinin incelenmesi için pin-on disk triboloji testi yapılmıştır. Numunelerin sertlik özelliklerini görmek için Rockwell sertlik testi yapılmıştır. Numunelerin XRD incelemeleri, aşınma öncesi ve sonrası SEM incelemeleri yapılmış olup, numune dağılımının homojenliği, temas platoları, aşınma çeşitleri, boşluklar, çatlaklar incelenmiştir. Bunlar bor karbürün eklenmesinin etkileri açısından incelenmiştir. Sonuçlar değerlendiğinde uygun bir bileşim ile bor karbürün fren balatalarında sürtünme katsayısını arttırdığı ve kararlı bir sürtünme davranışı sağladığı gözlemlenmiştir. Sertlik ve yoğunluk değerlerinde çok büyük bir etki gözlemlenmemiştir. Bileşimin balata malzemesi olarak kullanımının, fren balatasından beklenen özellikleri sağlayabileceği görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91528
Anahtar Kelimeler	:	Bor karbür, fren balatası, aşınma, toz metalurjisi, triboloji
Sayfa Adedi	:	69
Danışman	:	Prof. Dr. Hakan ATEŞ
İkinci Danışman	:	Doç. Dr. Sedat SÜRDEM

DEVELOPMENT OF A NEW LINING MATERIAL BY POWDER METALLURGY AND INVESTIGATION OF ITS PROPERTIES

(M.Sc. Thesis)

Sırma Nur TOPBAŞOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

Vehicles accelerating with the developing automotive industry have also created the need for an effective braking system. Brake pads, one of the most important parts of braking systems, have always been open to development and have been the center of attention for years. Today, the most important criteria in the production of brake pads, which contain many components in their structure, are to be able to show an effective braking performance in today's vehicles and not to harm the environment and human health. In this study, a brake lining material with superior tribological properties was designed using boron carbide. Samples were produced by adding boron carbide at 0.5%, 1% and 3% in 1-3 μm and 1-10 μm sizes to the brake lining composition created by utilizing the lining studies in the literature. Sample production was carried out by powder metallurgy method. The density of the produced samples was measured according to the Archimedes principle. Pin-on disk tribology test was performed to examine the friction properties. Rockwell hardness test was performed to see the hardness properties of the samples. XRD examinations of the samples, SEM examinations before and after wear, homogeneity of the sample distribution, contact plateaus, wear types, voids, cracks were examined. These were analyzed in terms of the effects of the addition of boron carbide. When the results are evaluated, it is observed that boron carbide with a suitable composition increases the coefficient of friction in brake pads and provides a stable friction behavior. No significant effect was observed on hardness and density values. It was observed that the use of the composition as a lining material can provide the properties expected from the brake lining.

Science Code	:	91528
Key Words	:	Boron carbide, brake pad, wear, powder metallurgy, tribology
Page Number	:	69
Supervisor	:	Prof. Dr. Hakan ATEŞ
Co-Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Sedat SÜRDEM

TEŞEKKÜR

Tez boyunca desteklerini benden asla esirgemeyen değerli danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Hakan ATEŞ ve Sayın Doç. Dr. Sedat SÜRDEM hocalarıma sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum. Ayrıca tezimdeki malzemelerin sağlanması, üretim ve testlerin yapılması konusundaki desteklerinden ötürü ülkemizin değerli kurumu TENMAK BOREN'e ve METİSAFE firmasına teşekkür ediyorum. En büyük destekçilerim olan değerli eşime ve aileme de sonsuz teşekkürlerimi iletiyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. FREN BALATALARI 3

2.1. Otomobil Fren Balatalarının Tarihçesi 5

2.2. Fren Balatalarının Çalışma Prensibi 6

2.3. Fren Balatalarının Çeşitleri 7

2.4. Fren Balatalarının Bileşenleri 8

2.4.1. Bağlayıcılar 9

2.4.2. Yapısal malzemeler ve takviyeler 12

2.4.3. Dolgu malzemeleri 15

2.4.4. Sürtünme düzenleyiciler 17

3. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM YÖNTEMİ 21

3.1. Toz Metalurjisi Üretim Yöntemi Aşamaları 21

3.1.1. Toz üretimi 22

3.1.2. Karıştırma 23

Sayfa

3.1.3. Sıkıştırma 24

3.1.4. Sinterleme 25

4. BOR 27

4.1. Bor Elementi 27

4.2. Bor Mineralleri 28

4.3. Bor Rezervleri ve Bor Üretimi 29

4.4. Borun Kullanım Alanları 30

4.5. Bor Karbür 33

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 35

5.1. Malzeme 35

5.2. Numune Üretimi 36

5.3. Pin-On-Disk Triboloji Testi 38

5.4. Yoğunluk Testi 40

5.5. Sertlik Testi 40

5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 41

5.7. XRD 41

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 43

6.1. Pin-On-Disk Triboloji Testi 43

6.2. Yoğunluk Testi 47

6.3. Sertlik Testi 47

6.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 48

6.5. XRD İncelemesi 51

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 53

KAYNAKLAR 57

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Bağlayıcı malzemelerin avantajları ve dezavantajları 11

Çizelge 4.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri 27

Çizelge 4.2. Bor karbürün genel özellikleri 33

Çizelge 5.1. Bor karbürün %0, %1, %3, %5 oranlarında eklenmesi durumu 36

Çizelge 5.2. Pin-on-disk triboloji testi çalışma verileri 39

Çizelge 6.1. Pin-on-disk triboloji test sonuçları 44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Hidrolik fren sistemi 6

Şekil 2.2. Fren balatası bileşenleri 8

Şekil 3.1. Toz metalurjisi işlem basamakları 21

Şekil 3.2. Toz parçacık şekilleri 22

Şekil 3.3. Farklı karıştırıcı tipleri 23

Şekil 3.4. Toz sıkıştırma prosesinin işlem basamakları 24

Şekil 3.5. Küresel şekilli parçacıklar için sıkıştırma evrelerinin gösterimi 25

Şekil 3.6. Sinterleme işleminin aşamaları 26

Şekil 4.1. Dünya bor rezervlerinin dağılımı 29

Şekil 4.2. Dünya bor üretim ton bazında dağılım 30

Şekil 4.3. Bor tüketiminin kullanım alanlarına göre dağılımı 31

Şekil 5.1. Numune bileşenleri 36

Şekil 6.1. Ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı 44

Şekil 6.2. Ham numunenin frenleme periyotlarındaki sürtünme katsayısı değişimi 45

Şekil 6.3. a)1-3µm, b) 1-10µm B_4C ilavesi yapılmış malzemelerin periyot bazında sürtünme katsayısı değişimi 46

Şekil 6.4. Periyot bazında tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değişimi 46

Şekil 6.5. Bileşimlerin yoğunluk değerleri 47

Şekil 6.6. Bileşimlerin sertlik değerleri 47

Şekil 6.7. Ham numune XRD grafiği 51

Şekil 6.8. Bor karbür içerikli numune XRD grafiği 52

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Temel fren balatası bileşenleri 3

Resim 5.1. Hassas Terazi 37

Resim 5.2. Karıştırıcı 37

Resim 5.3. Pin-on-disk numune kalıbı 38

Resim 5.4. Numuneler 38

Resim 5.5. Pin-on-disk triboloji testi için yerleştirilen numuneler 38

Resim 5.6. Pin-on-disk triboloji test sistemi 39

Resim 5.7. Yoğunluk ölçüm cihazı 40

Resim 5.8. Sertlik ölçüm cihazı 40

Resim 5.9. Tarama elektron mikroskobu (SEM) 41

Resim 5.10. X ışını difraktometresi 41

Resim 6.1. Ham numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü 48

Resim 6.2. 1-3 µm a-b) %0,5, c-d) %1, e-f) %3 B4C ilaveli numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü 49

Resim 6.3. 1-10 µm a-b)%0,5, c-d)%1, e-f)%3 B4C ilaveli numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü 50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
mm	Milimetre
km	Kilometre
s	Saniye
°C	Derece
µm	Mikrometre
g	Gram
cm^3	Santimetre küp
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
J	Joule
kJ	Kilojoule
Pa	Pascal
W	Watt
MPa	Megapascal
S	Watt

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ZrB_2	Zirkonyum diborür
MoS_2	Molibden disülfit
MMK	Metal matris kompozitleri
SiC	Silisyum karbür
Al_2O_3	Alüminyum oksit
SiO_2	Silisyum dioksit
CoF	Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar	Açıklamalar
P	Basınç
F	Kuvvet
SEM	Tarama elektron mikroskobu
XRD	X ışını difraksiyon

1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv sektörü, teknolojik yenilikler ve çevresel sürdürülebilirlik beklentilerinin artması gibi dinamiklerle sürekli bir evrim içerisindedir. Bu değişimde, çevresel etkilerin minimize edilmesi ve araçların güvenliği, endüstrinin öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Özellikle fren sistemleri, bu değişimde kritik bir role sahip olup, otomobil güvenliği ve performansı için hayati önem taşımaktadır (Jadhav ve Sawant, 2019).

Fren balataları, otomobilin güvenli sürüşü açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin performansı, sürücünün beklenmedik durumlarda aracı güvenle durdurabilmesi için oldukça önemlidir. Etkili bir frenleme sistemi, aracın ani durma taleplerine hızlı yanıt verebilir ve böylece kazaların önüne geçebilir. Bu açıdan, balataların performansı, sürücü ve diğer yol kullanıcılarının güvenliği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir (Blau, 2001).

Araçların çevresel etkilerini azaltma yönündeki çabalar, fren sistemlerinde de kendini göstermektedir. Sürdürülebilirlik odaklı malzemeler ve tasarımlar, sektörde daha çevre dostu fren balataları geliştirme yönünde bir eğilim oluşturmaktadır. Bu, zararlı atıkların azaltılması ve frenleme sırasında ortaya çıkan aşınma ürünlerinin etkilerinin minimize edilmesi gibi çevresel avantajları da beraberinde getirmektedir (Borawski, Mieczkowski ve Szpica, 2023).

Türkiye, dünya bor rezervlerinin büyük bir bölümüne sahiptir. Bu değerli maden, sadece ekonomik bir varlık olmanın ötesinde stratejik bir kaynaktır. Bor, geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine sahiptir ve pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu maden, elektrikli araçların gelişimi gibi teknolojik ilerlemelerle birlikte, özellikle enerji depolama sistemlerinde ve pille çalışan araçlarda potansiyel bir bileşen olabilir. Ayrıca, borun nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanındaki uygulamaları da üzerinde çalışılan ve gelecekte büyük etkiler yaratabilecek potansiyellere sahiptir (Subramanian, 2010).

Bor, sürtünme malzemeleri alanında önemli bir takviye unsuru olarak dikkat çeker. Özellikle bor karbür, sürtünme malzemelerinde çeşitli avantajlar sunar. Yüksek sıcaklıklarda mükemmel aşınma direnci sağlayarak dayanıklılığı artırır ve termal iletkenliği yüksek özellikleriyle de dikkat çeker. Bu özellikleri, bor karbürünün özellikle fren balataları gibi

yüksek sürtünmeli uygulamalarda etkili bir malzeme olmasını sağlar (I. Mutlu, Oner ve Findik, 2007).

Bor karbürün sürtünme malzemeleri alanındaki potansiyeli, araştırmacıların dikkatini çeken bir konudur. Malzeme bilimi ilerledikçe, bor karbürün mikron ve nano boyutlu parçacıklar halinde kullanılması, sürtünme malzemelerinde yeni bir boyut açabilir. Bu açıdan bakıldığında, bor karbürünün sürtünme malzemelerindeki rolü, hem mevcut teknolojideki kullanım alanlarını genişletebilme hem de gelecekteki yeniliklere öncülük edebilme potansiyeli taşımaktadır. Bor karbürün sunduğu benzersiz özellikler, sürtünme malzemeleri alanında yeni keşiflere ve daha gelişmiş uygulamalara kapı aralayabilir (Kuliiev ve diğerleri, 2020).

Bu araştırma, bor karbür takviyeli toz metalurjisi ile üretilecek fren balata malzemesini, otomotiv endüstrisindeki kritik performans özellikleri açısından değerlendirmeyi hedeflemektedir. Çalışma kapsamında bor karbür takviyeli malzemenin dayanıklılık, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık performansı gibi temel özelliklerini detaylı bir şekilde analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

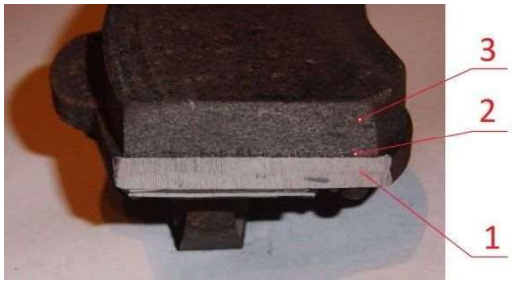
Bu malzeme, geleneksel fren balatası malzemelerine kıyasla üstün özelliklere sahip olabilir. Özellikle, bor karbürün yüksek sıcaklık stabilitesi ve olağanüstü aşınma direnci, otomobil fren sistemlerinde karşılaşılan zorlu koşullara uygun bir performans sergileyeceğine işaret etmektedir. Bu özellikler, özellikle yüksek hızlarda ve ani frenleme durumlarında, güvenilir ve etkili bir frenleme sağlama açısından kritik öneme sahiptir.

Bu araştırmanın ana hedefi, bor karbür takviyesinin fren balatası performansına olan etkilerini inceleyerek hem otomotiv endüstrisine hem de çevreye yönelik sürdürülebilir çözümler sunmaktır. Bu bağlamda, yerel kaynakların kullanımıyla beraber otomotiv endüstrisinde malzeme geliştirme süreçlerinin yenilikçi çözümlerle desteklenmesi, endüstriyel ve çevresel açıdan önemli bir adım olabilir.

2. FREN BALATALARI

İlerleyen teknolojinin etkisi ile ulaşım endüstrisinde hız, yük ve motor gücünde artış ile birlikte iyi bir frenleme sistemi ihtiyacı da ortaya çıkmıştır. Fren sisteminin ana işlevi hareket halindeki bir aracın hızını azaltmak veya tamamen durdurmaktır (Borawski, 2020). Frenler hayati bir önem taşıdığı için araçların en önemli bileşenlerindendir ve güvenilir olmalıdır. Güvenilir olmanın yanında çeşitli atmosfer koşullarında performanslarını koruyabilmelidirler. Bir otomotiv fren sistemindeki sürtünme malzemesi, etkili ve güvenli fren performansı için kilit rol oynamaktadır (M. H. Cho, Kim, Kim ve Jang, 2005). Fren sisteminin ana elemanlarından olan fren diskleri, genellikle gri dökme demirden yapılmaktadır. Bunun sebebi iyi termal iletkenlik ve titreşim sönümleme kapasitesine sahip olmasıdır (Maluf ve diğerleri, 2007).

Fren sisteminin diğer bir ana elemanı olan fren balataları ise çok daha karmaşık bir yapıdadır. Şekil 2.1'deki gibi arka plaka, alt katman ve sürtünme katmanı olarak belirli katmanlardan oluşur (Borawski, 2020). En kritik katman sürtünme katmanıdır. Bu katman genellikle 6-9 mm kalınlığında olur ve bileşimi kullanım amacına göre farklılık gösterir (Singh, 2015). Sürtünme katmanının alt kısmında 1-4 mm kalınlığında alt katman bulunur ve sürtünme malzemesini tutarak yapıştırıcı görevi görür. Bu katman da balatanın tutunmasını sağlayan, genellikle 1mm'nin altındaki kalınlıkta arka plakaya yerleştirilir. Bu sayede belli bir düzeyde termal izolasyon sağlanır ve frenleme sırasında sürtünme ile açığa çıkan aşırı ısının frenleme sıvısına ulaşması önlenir (Borawski, 2018). Bu temel parçalara ek olarak fren balatalarına frenleme sırasında oluşan gürültü miktarını azaltmak için gürültü önleyici özel parçalar yerleştirilmesi de söz konusudur (Ertan ve Yavuz, 2010).



Resim 2.1. Temel fren balatası bileşenleri: 1- arka plaka, 2- alt katman, 3- sürtünme malzemesi (Borawski, 2020)

Fren balataları, her türlü araç için fren sistemlerinde önemli parçalardır. Otomobillerin fren sistemleri, uçakların ana iniş takımları, trenlerin fren sistemleri ve rüzgar türbinleri gibi çeşitli kullanımları vardır. Temas bölgesindeki sürtünme ile arabanın kinetik enerjisini ısı enerjisine dönüştürürler (Ertan ve Yavuz, 2010). Fren balatalarından istenen temel özellikler; yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, diske zarar vermeme, yüksek sıcaklık dayanımı, minimum düzeyde gürültü ve vibrasyon, çevreye ve insan sağlığına zararsız olma, kolay ve ucuz üretilebilme, beklenen ömür süresini sağlayabilmeleridir. Frenleme koşullarının sürtünme ve aşınma davranışı üzerinde karmaşık etkileri vardır. Yüksek sıcaklık, fren basıncı ve ilk frenleme hızı ile aşınma oranı hızla artar. Sürtünme ile üretilen ısı, fren temas yüzeylerinin konveksiyonu ve iletimi yoluyla dağılır (Elzayady ve Elsoeudy, 2021).

Fren balatasının sürtünme kuvvetleri ve aşınma davranışı, sürüş koşulları, balata formülasyonu, üretim parametreleri ve disk ile sürtünme malzemesi arasındaki arayüzde biriken sürtünme filminin özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak frenleme sırasında sürekli olarak değişir. Bu nedenle, özellikle son on yılda, dengeli sürtünme, dayanıklılık, yeterli aşınma direnci, tüm frenleme için düşük gürültü, düşük titreşim ve kabul edilebilir çevre koşulları sağlamak için fren balatalarının farklı bileşimleri üzerinde birçok deneysel çalışma yapılmıştır (Ertan ve Yavuz, 2010).

Bevilacqua ve arkadaşları uçak frenlerinde kullanılan karbon-karbon kompozitlerin katalitik oksidasyonuna odaklanmıştır (Bevilacqua, Babutskyi ve Chrysanthou, 2015). Araştırmacılar benzer bir konuyu çok daha önce ele almışlardır. Bu makalelerde bu malzemelerin avantajları anlatılmış ve uygulanabilirlikleri değerlendirilmiştir (Bevilacqua ve diğerleri, 2015). Modern araçlardaki uygulamalar için fiberle güçlendirilmiş polimerler sürtünme malzemelerinin asbest olmayan liflerle güçlendirilmesinde yeni başarılar sunduğu belirtilmiştir. (Bijwe, 1997). Bu malzeme grubu, insan sağlığı açısından zararlı olan asbestin yerini almak üzere geliştirilmiştir. Kryachek de (2004; 2005) kompozit malzemelerin incelenmesinde yer almıştır (2004; 2005). Çalışmalarında ayrıntılı özellikler, araştırma yöntemleri ve sonuçlarının yanı sıra yeni malzeme alternatifleri de tartışılmıştır. Sürtünme malzemelerini ve bileşenlerini kapsamlı bir şekilde incelemeye karar veren araştırmacılar tarafından yazılmış makaleler de vardır. Araştırmacılar çeşitli geleneksel fren balatası bileşenlerinin etkilerinin araştırma sonuçlarını çok geniş bir şekilde açıklamıştır (N. Kumar, Bharti, Goyal ve Patel, 2021). Yang ve arkadaşları (2016) incelemelerinde modern nano

sürtünme malzemelerini kapsamlı bir şekilde tanımlamıştır. Ancak, hala fren balatası bileşiminin büyük çoğunluğunu oluşturan geleneksel malzemeler ile çalışılması ihmal edilmiştir. Kato, makalesinde kaplamalar, kompozitler, metal alaşımları ve seramiklerden oluşan temsili malzemelerin tipik aşınma davranışlarını sürtünme davranışlarıyla ilişkili olarak tanımlamıştır (Kato, 2000). Ne yazık ki, diğer malzeme özellikleri tanımlanmamıştır. Chan ve Stachowiak (2004) çok iyi bir inceleme yapmıştır. Çalışmalarında sürtünme malzemelerinin etkilerini dikkate almışlar ve özelliklerini tanımlamışlardır. Ne yazık ki makale oldukça uzun zaman önce yayınlanmıştır, bu nedenle yeni çözümler içermemektedir. Aynı durum güncellenmesi gereken diğer çalışmalar için de geçerlidir (Harper, 1998).

Daha önce de belirtildiği gibi, sürtünme malzemesi en önemli fren balatası katmanıdır, çünkü diskle birlikte sürtünme çiftini oluşturur ve bileşimi balatanın sürtünme katsayısını ve dayanıklılığını belirler (Xiao, Yin, Bao, Lu ve Feng, 2016).

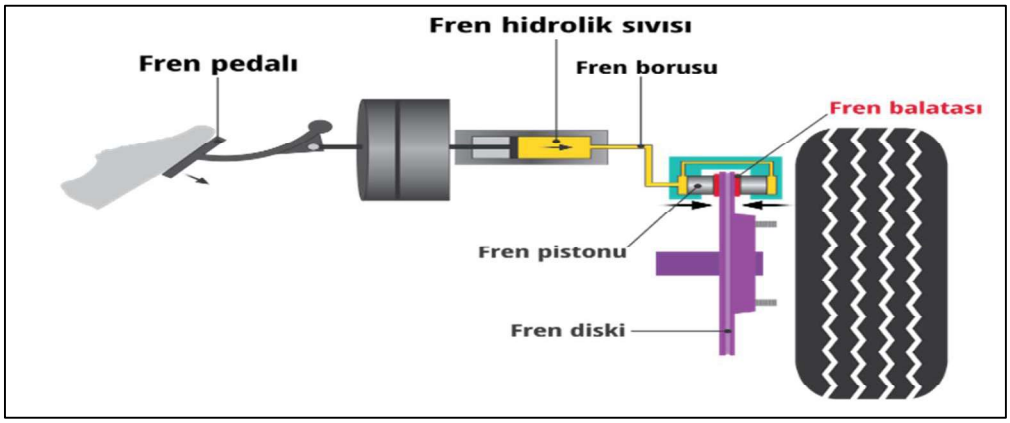
2.1. Otomobil Fren Balatalarının Tarihçesi

1769'da buharla çalışan bir araç geliştiren Nicolas-Joseph Cugnot otomobilin mucidi olarak kabul edilmektedir. Fransız Cugnot yaklaşık 250 yıl önce buharlı aracını 4 km/s hızla bir kışlanın duvarına sürerek ilk trafik kazasını geçirmiştir. Bu olayla beraber bir otomobil için ileriye doğru itmenin gerekliliği kadar etkili bir frenlemenin de gerekli olduğunu anlayarak bir aydınlanma yaşamıştır. Otomotiv endüstrisi 19. yüzyılın sonunda ivme kazanmaya başladığında başlangıçta frenlemeye çok az önem verilmiştir. Bunun sebebi; ilk otomobillerin aktarma organlarındaki sürtünme yüksekti ve o zamanki koşullar altında araçlar frenler olmadan yeterince yavaşlayabiliyordu. Gelişmelerle beraber otomobillerin hızı, motor gücü, ağırlığı artmaya devam etmiştir. Carl Benz'in otomobilinin piyasaya sürülmesinden dört yıl sonra İngiliz mühendis Frederick W. Lanchester, 1902'de patentini aldığı fren diskini icat etmiştir. 1920'de mekanik dört tekerlekli frene sahip ilk otomobiller piyasaya sürülmüştür ve bunlarda tam frenleme gücünü sürücülerin kendisinin oluşturması gerekmekteydi. Dört yıl sonra, hidrolik kampanalı frenler sunuldu. 1950'de ilk fren güçlendiriciler tanıtıldı. Avrupa'da fren diskleri ile donatılmış ilk otomobil, 1952'de Jaguar C-Type, ardından Citroen DS oldu. Bunların ardından 1957'de hidrolik kısmi balatalı disk fren piyasaya sürüldü. ABD'de disk frenler, 60'lı yılların ortalarına kadar standart hale gelmedi ve o zamanlarda çoğu araçta hala isteğe bağlıydı (Maluf ve diğerleri, 2007).

Balatalar başlangıçta asbest içermekteydi. Asbest, sağlam kimyasal ve fiziksel/mekanik özellikleri nedeniyle fren balatalarının üretiminde esas olarak benimsenmişti. Asbest, suda ve organik çözücülerde çözünmeyen, yanıcı olmayan, çeliği aşan mükemmel bir gerilme mukavemetine, muazzam termal stabiliteye, termal ve elektriksel dirence sahiptir (Yashwhanth, Mohan, Anandhan ve Selvaraj, 2021). Ancak asbest tozlarının akciğerlerde kansere sebep olduğu ve çevreye zararı keşfedildi ve bu nedenle kullanımı büyük oranda azalmıştır. Asbest kullanımı günümüzde oldukça nadirleşmiştir. Asbeste alternatif olarak metalik ve karbon esaslı kompozit fren balataları kullanılmaya başlanmıştır (Bijwe, 1997).

2.2. Fren Balatalarının Çalışma Prensibi

Günümüzdeki fren sistemleri hidrolik prensiple çalışmaktadır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, hidrolik fren sisteminde bir sıvı vasıtası ile pedala uygulanan kuvvet kaliperlere aktarılır. Bu sıvının sıkışmazlığı prensibi kullanılarak geliştirilmiş bir mekanizmadır. Frene basıldığında ana silindire bir baskı uygulanır, ana silindirin içindeki hidrolik sıvı tüm tekerlekerdeki silindirlere gider ve hepsini eşit miktarda sıkıştırır. Basınç dördüne birden aktarılmış olur. Basınç ayrımıyla kaliperler sıkışır. Kaliperler balataları, balatalar da diskleri sıkıştırırlar. Balatalar ile diskler arasında oluşan sürtünmeden dolayı ısı açığa çıkar. Böylece aracın kinetik enerjisi bu ısı oluşumu ile atmosfere salınır ve durma işlemi gerçekleşmiş olur. Aşırı ısı plastikten yapılmış süspansiyon elemanlarına veya lastiklere zarar verebileceği için bu ısı salınımı gereklidir (Harper, 1998).



Şekil 2.1. Hidrolik fren sistemi (Yousef, 2023)

2.3. Fren Balatalarının Çeşitleri

Sürtünme malzemeleri genellikle bir fren balatasının baskın bileşenidir. Sürtünme malzemesinin türüne bağlı olarak fren balataları metalik fren balataları, organik fren balataları, seramik fren balataları ve karbon fren balataları olmak üzere dört farklı türe ayrılırlar (Ertan ve Yavuz, 2010).

Metalik fren balataları çelik, bakır veya başka bir metalik matristen oluşur. Genel olarak yüksek dayanım, yüksek ısıl iletkenlik sağlarlar; fakat aşınma hasarı yüksektir, gürültüye sebep olur ve korozyon dirençleri düşüktür (Venugopal ve Karikalan, 2020).

Organik balatalar asbestli, asbestsiz ve yarı-metalik olarak üç grupta incelenmektedir. Asbestli balatalar çok yaygın bir kullanıma sahipti. Fakat sonradan sürtünme ile açığa çıkan asbestli balata tozlarının solunumu ile akciğer kanserine sebep olduğu tespit edildi ve balatalarda asbest kullanımı durduruldu. Asbest içermeyen organik balatalar cam, seramik, aramid elyaflarla takviye edilmiş organik matrislerden oluşmaktadır. Organik balataların metalik balatalara kıyasla aşınma direnci yüksek, düşük gürültülüdür; fakat kırılganlığı yüksektir. Yarımetalik balatalar metalik ve organik malzemelerden oluşmaktadır. Yüksek oranda çelik, demir ve bakır içerirler. Sınırlı kompozisyon aralığında çok iyi sürtünme ve aşınma özellikleri sergilerler, ısıl iletkenlikleri ve sürtünme özellikleri iyidir; metalik balatalara benzerler ancak aşınma daha fazla olacağı için fazla toz açığa çıkar, gürültü yapabilirler (Eriksson ve Jacobson, 2000).

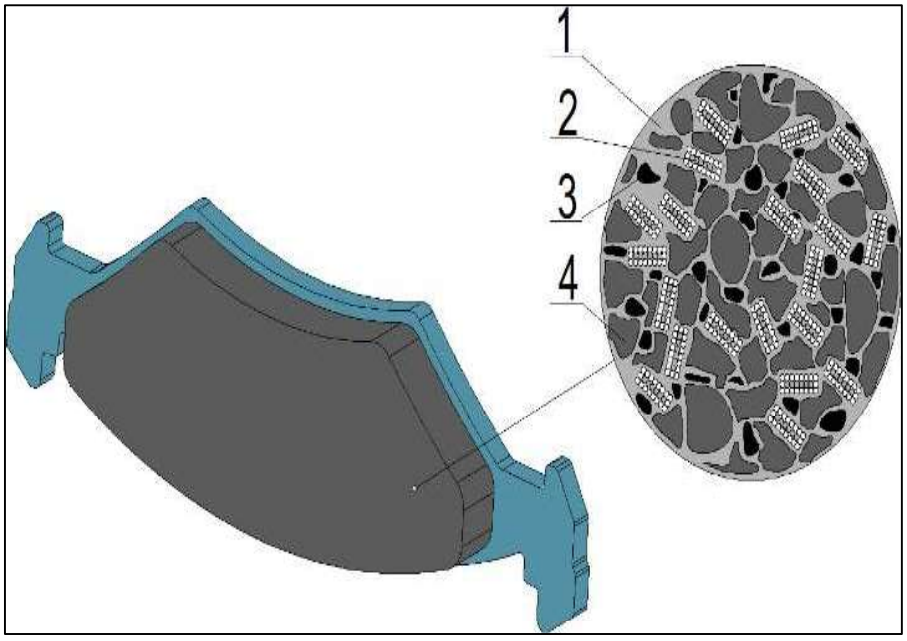
Seramik balatalar seramik ve bakır lifler içerirler. Yarı metalik balatalara göre daha az gürültülü ve titreşimli çalışırlar, daha az toz açığa çıkarırlar, kararlı sürtünme özelliklerine sahiptirler ancak üretimleri maliyetleri yüksektir ve soğuk hava koşullarında performansları düşüktür (Yashwhanth vd, 2021).

Karbon balatalar seramik balatalara benzeseler de daha üstün özelliklere sahiptirler. Bu üstün özellikler; hafiflik, gürültüsüz çalışma, iyi aşınma ve sürtünme özellikleri, yüksek sıcaklık dayanımıdır. Bu üstün özellikler karşısında maliyetleri yüksek olsa da kullanım alanları mevcuttur. Askeri ve ticari uçaklar, yarış araçları gibi performansın ön planda maliyetin ikinci planda olduğu uygulama alanlarında kullanılırlar (Stadler, Krnel ve Kosmač, 2008).

2.4. Fren Balatalarının Bileşenleri

Fren balatalarının çeşitli çevre koşullarında, hızlarda, basınçlarda kararlı bir sürtünme katsayısı ve düşük aşınma oranı göstermesi beklenmektedir. Ayrıca fren balatası titreşim, aşırı aşınma ve gürültünün az olması için fren diski ile uyumlu olmalıdır. Bu beklentiler olabildiğince en uygun maliyetle ve en az çevre zararı ile karşılanmalıdır (Hee ve Filip, 2005). Tüm bu gereksinimlerin sağlanabilmesi için fren balataları polimerler, seramikler gibi birçok farklı bileşen bulundurur ve ortalama 10-20 farklı malzemeden oluşur (Borawski, 2019). Bu nedenle fren balataları en karmaşık kompozit malzemelerden biridir (Seong Jin Kim, Kim ve Jang, 2003). Bileşimler ve bunların mikro yapısı, aşınma direnci, kararlılık gibi özellikler ile frenleme performansını etkiler (Elzayady ve Elsoeudy, 2021).

Fren balatası bileşenleri temel olarak dört gruba ayrılır (Şekil 2.3): Yapısal malzemeler, bağlayıcılar, dolgu malzemeleri, sürtünme düzenleyiciler. Yapısal malzemeler kompozit matrise takviye sağlar, bağlayıcılar bileşenlerin geri kalanını birbirine bağlar, dolgu malzemeleri maliyeti düşürürken fren balatasının hacmini oluşturur, sürtünme düzenleyiciler sürtünme katsayısını kararlı kılar (Mohanty ve Chugh, 2007). Bileşenlerin seçimi genellikle deneyime veya yeni bir formülasyon yapmak için deneme yanılma yöntemine dayanır.



Şekil 2.2. Fren balatası bileşenleri 1- bağlayıcı, 2-takviye ve yapısal malzeme, 3-dolgu malzemesi, 4-sürtünme düzenleyiciler (Borawski, 2020)

2.4.1. Bağlayıcılar

Balata üretiminde kullanılan bağlayıcılar, yapısal bütünlüğün korunmasında kritik bir rol oynar. Isı ve mekanik stres altında, bağlayıcı malzemenin yetersizliği, diğer bileşenlerin, örneğin yağlayıcılar veya takviye fiberleri gibi unsurların dağılmasına neden olarak balatanın performansını etkileyebilir. Bu nedenle, bağlayıcı malzemenin seçimi büyük önem taşır; çünkü yüksek ısıl dirence sahip olması, balatanın dayanıklılığını ve performansını sürdürebilmesi için hayati önemdedir. Doğru bağlayıcı seçimi, fren balatasının uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için temel bir faktördür (Heussaff, Dubar, Tison, Watremez ve Nunes, 2012).

Reçine konsantrasyonu, fren balatasının fiziksel özelliklerini etkileyen önemli bir faktördür. Düşük reçine konsantrasyonu, genellikle fiziksel özelliklerin zayıf olmasına yol açabilir (Yanar, Ayar, Demirtas ve Purcek, 2020).

Diğer yandan, yüksek reçine konsantrasyonu, yüksek sıcaklık dayanımının düşük olmasına neden olabilir. Bu durum, balatanın porozite ve sertlik gibi fiziksel özelliklerini etkileyebilir. Dolayısıyla, istenilen fiziksel özellikleri elde etmek için reçine oranının dikkatlice ayarlanması gerekmektedir. Özellikle porozite ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesi amaçlandığında, reçine oranı üzerinde oynamak önemli bir stratejidir (Ertan ve Yavuz, 2010).

Bağlayıcı, fren balatasının tüm bileşenlerini bir arada tutan kritik bir unsurdur. Bu madde, genellikle balatanın hacminin yaklaşık %20'sini oluşturur. Bağlayıcı, belirli özelliklere sahip olmalıdır: yüksek ve sabit bir sürtünme katsayısı, yüksek ve hızlı değişen sıcaklıklara karşı direnç göstermeli ve düşük bir kütleyle karakterize edilmelidir. Bunun yanı sıra, bağlayıcı malzemenin dayanıklılığı, balatanın performansı ve uzun ömürlü olması için hayati önem taşır. Dolayısıyla, bağlayıcı malzemenin özellikleri, fren balatasının güvenilirliği ve etkinliği açısından belirleyici bir faktördür. (Borawski, Mieczkowski ve Szpica, 2023).

Bağlayıcı olacak malzeme, balatanın diğer bileşenleri ile reaksiyona girmemelidir, çünkü bu durum genel malzeme karakteristiğinde değişikliklere yol açabilir veya kompozitin delaminasyonuna neden olabilir ve frenleme sisteminin verimliliğini büyük ölçüde sınırlayabilir. Bağlayıcı olarak genellikle reçine kullanılır (Mieczkowski, 2016). Az

miktarda reçinenin balatanın dayanımını azalttığı, çok fazla reçinenin ise yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısını düşürdüğü bilinmektedir. (Incesu vd, 2013), (Dureja, Bijwe ve Gurunath, 2008). Frenleme sırasında aşırı ısı oluştuğu durumlarda, reçine balata yapısını olumsuz etkileyebilir. Reçine eğer balatanın çıktığı sıcaklıkta bozunuyorsa bu durum bağlayıcı özelliklerini kaybetmesine neden olur(Veeman, Katiyar ve Ruggiero, 2023). Bu nedenle bir fren balatasının termal stabilitesi, mekanik dayanımı ve uygun olmayan frenleme şartlarında bileşenleri bağlama kapasitesi büyük ölçüde reçine karakterine ve kalitesine bağlıdır. Reçinelerin nominal haldeki mekanik ve termal özelliklerini geliştirmek için, bileşimi değiştirmeye yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır (Nidhi, Bijwe ve Mazumdar, 2006).

Fenolik reçineler, neredeyse yalnızca sürtünme malzemeleri için üretilen ve neredeyse hiç başka kullanım alanı bulunmayan bağlayıcılardır. Fren balatasındaki fenolik reçine ağırlık yüzdesi, hacim olarak genellikle %5 ila %35 arasında değişmektedir. Bu içerik miktarı, sürtünme katsayısı değerini ve aşınma oranını ters yönde etkiler. Reçine içeriğindeki %10'luk bir azalma, sürtünme katsayısında sadece yüzde birkaç değerinde değişikliğe neden olur (Yanar, Ayar, Demirtas ve Purcek, 2020). Otomotiv endüstrisindeki yaygın kullanımı, yüksek mekanik dayanıklılık ve düşük maliyet gibi reçinenin olumlu özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Grzegorz Mieczkowski, 2019). Ayrıca, bu reçine türünün düşük termal genleşmesi de önemlidir. Diğer reçinelere kıyasla, çözücülere, asitlere ve suya daha dayanıklıdır ve yanma sırasında daha az duman oluşturur. Fren balatası bozunması fenolik reçinenin başlangıç bozunma sıcaklığıyla doğrudan ilişkili olduğundan, bu sıcaklık saf reçinenin 354°C'den, kürleşmiş sürtünme malzemesinde 303°C'ye kadar düşer (C. Menapace ve diğerleri, 2019). Ne yazık ki, bu malzeme kırılgandır. Çatlama eğilimi, yağ veya silikon eklenerek azaltılabilir. Bu da silikon reçinesi üretimini sağlar. Ancak, bu süreçte diğer mekanik özellikler zarar görebilir (Blau, 2001).

COPNA reçinesi, diğer reçinelere göre nispeten daha yüksek termal dirence sahiptir. Bozunma sıcaklığı benzer olsa da (400-500°C), önemli ölçüde daha az gaz salmaktadır. Bu, fren bozunma riskini azaltır. Aynı zamanda yapı grafite çok benzediği için, bu iki malzeme birbirine iyi bağlanmakta, bu da balatanın sürtünme direncini artırmaktadır (Borawski, 2020).

Siyanat ester reçineleri, siyanür monomerlerinden oluşmaktadır. Bu reçineler titreşim sönümlerler ve kimyasal olarak nötrdürler. Fakat bunların yanında en önemli özellikleri

yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmalarıdır. Siyanat esterlerin yaklaşık %5 seviyesinde ZrB_2 ile zenginleştirilme işleminin termal stabiliteyi artırdığı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı açısından optimum tribolojik özellikleri sağladığını göstermiştir (Wu, Jia, He ve Yu, 2019).

Epoksi reçineler endüstride yaygın olarak kullanılır. Düşük ısı dirençleri (bozunma ısısı yaklaşık 260°C'de başlar), sürtünme malzemeleri için uygun olmamalarına neden olur. Bazı araştırmacıların sonuçları, 100°C'de bile yaklaşık %7'lik bir ağırlık kaybının gözlemlenebildiğini göstermektedir. Bu kütle kaybı, pişirme sırasında uçucu maddelerin oluşumuyla ilişkili olabilir. 400°C'nin üzerindeki devam eden ısıtma, karbon oluşumuna ve oksidasyonuna yol açmıştır. Ancak, ilginç sonuçlar, epoksi ve fenolik reçinelerin birleştirildiğinde elde edilmiştir. Malzeme, tek başına herhangi bir reçineden daha yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve daha iyi mekanik özelliklere sahiptir (Agunsoye, Bello, Bamigbaiye, Odunmosu ve Akinboye, 2018).

Termoplastik poliimid reçinesi, floresin ve kalsiyum karbonatın bir ürünüdür. Aşınmaya ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Ayrıca ucuz ve üretimi kolaydır. Ancak, reçine iyi bir termal yalıtkandır (fenolik reçineye göre yaklaşık üç kat daha iyidir). Bu nedenle, fren balatalarında kullanımı çok sınırlıdır (Borawski, 2020).

Çizelge 2.1. Bağlayıcı malzemelerin avantajları ve dezavantajları (Borawski, 2020)

Bağlayıcı	Avantajları	Dezavantajları
Fenolik reçine	• Ucuz ve kolay üretim • Yüksek mekanik özellikler • Sıvılara karşı dirençli	• Yüksek sıcaklıklarda bozunma riski • Kırılganlık
Silikon	• Sünekliğiyle kırılganlığın önüne geçmesi	• Kötü mekanik özellikler • Yüksek maliyet
COPNA reçine	• Grafitle benzer bağlayıcı özellikleri • Yüksek aşınma direnci	• Yüksek maliyet

Çizelge 2.1. (devam) Bağlayıcı malzemelerin avantajları ve dezavantajları (Borawski, 2020)

Bağlayıcı	Avantajları	Dezavantajları
Siyanat ester reçine	• Yüksek sıcaklıkta stabilite • Kimyasal olarak nötr	• Yüksek maliyet • Kırılganlık
Epoksi reçine	• Fenolik reçine ile kullanıldığında yüksek mukavemet ve yüksek termal dayanım	• Düşük bozunma sıcaklıkları
Termoplastik poliimid	• Yüksek aşınma direnci • Yüksek sıcaklık direnci • Kolay ve ucuz üretim	• Düşük termal iletkenlik

2.4.2. Yapısal malzemeler ve takviyeler

Takviye elemanları, fren balatasına sürtünme anında uygulanan yükü taşıyarak mekanik dayanımını artırır. Balata yapısında beklenen performansa göre bir veya daha fazla takviye malzemesi kullanabilir. Asbest, fren balatalarında takviye olarak en çok kullanılan malzemedir. Aşınma direnci ve ısı dayanımı özellikleri nedeniyle uzun süre kullanıldı. Bununla birlikte, balatanın aşınması nedeniyle ortaya çıkan asbest tozlarının hem çevreye hem de insan sağlığına zarar vermesi nedeniyle asbest kullanımı sona ermiştir. Bu nedenle, fren balatası için asbest haricinde alternatif bir malzeme arayışı başladı (Lemen, 2004).

Cam fiberler, fren balatasında genellikle kullanılan takviyelerden biridir. E-camı ucuz olması sebebiyle fren balatasında tercih edilmektedir. Bağlayıcı olarak reçine kullanıldığında cam fiberler ıslanarak ciddi mukavemet değerlerine ulaşırlar. Bu takviyelerin ergime noktası 1430 ˚C gibi yüksek bir değerdedir. İletkenliği ise diğer takviye alternatiflerine göre düşüktür (0.04 W/mK). Cam fiberler tek başına çok kırılgandırlar bu sebeple reçine bağlayıcılar ile kullanılması daha uygundur (Chan ve Stachowiak, 2004).

Balatalarda takviye olarak cam fiber kullanıldığında ön şekil verme sırasında problemler oluşmaktadır, bunun sebebi cam fiberlerin kuru olmasıdır bu sebeple harmanlama sonrası %3 alkol içerikli su püskürtülerek problem giderilebilmektedir (Elzayady ve Elsoeudy, 2021).

Takviye olarak kullanılan diğer bir malzeme türü de aramid fiberlerdir. Aramid hafif, ısıl stabilitesi yüksek, tokluğu yüksek bir malzemedir. Aramid hamurumsu bir yapıda kullanıldığında balata harmanı içerisinde homojen dağılımı sağlanır. Aramid aynı zamanda yüksek kopma uzaması özelliği sayesinde yapı içerisinde prosesleme sırasında esnek kalarak yapısını korur (Mutlu ve Sugözü, 2008).

Aramid fiberin yanında potasyum titanat kullanıldığında sürtünme stabilitesinin arttığı ve aşınma direncinin yüksek seviyelere çıktığı görülmüştür (Kim, Cho, Lim ve Jang, 2001). Potasyum titanat yüksek derecede rafine edilen, 1250-1310°C ergime derecesine sahip olan ısıl stabilitesi yüksek, sürtünme özellikleri iyi fiberlerdir (Chan ve Stachowiak, 2004). Bu iki takviye beraber kullanıldığında arada oluşacak sürtünme filminin yüzeye tutunabilme özelliğini geliştirmektedir (Kim ve diğerleri, 2001).

Doğal liflerin fren balatalarında kullanımı, çevre dostu bir üretim süreci sağlayarak biyolojik olarak parçalanabilirlik ve yenilenebilirlik gibi avantajlar sunar. Bu lifler, hafiflik, yüksek mukavemet ve sertlik gibi istenilen özellikleri sağlamanın yanı sıra çevre dostu bir fren balatası üretimine katkıda bulunabilirler. Ancak, doğal lifler genellikle hidrofilik özellik gösterirler ve bu durum matris içindeki lifin bağlanmasını zayıflatabilir. Bu sebeple, bileşenlerin yüzde ağırlıkları ve türleri formülasyonda değiştirildiğinde, geliştirilen fren balatası kompozitinin kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde etkiler görülebilir (Ikpambese, Gundu ve Tuleun, 2016).

Isıl direnç açısından son derece dayanıklı bir malzeme olan kaya yünü, 1000 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda katı halini muhafaza edebilir. Genellikle lif halinde üretilir ve bir bağlayıcı eklenerek yün haline getirilir (Ertan ve Yavuz, 2010) Bu malzemeler ile ses absorbsiyonu da sağlanabilmektedir. Al_2O_3 ve SiO_2 gibi bileşenlere sahip olan ve içerisinde aşındırıcı bir madde içermeyen kaya yünü takviyeli balata malzemeleri hakkında yapılan çalışmalarda, sürtünme katsayısının kuru koşullarda azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kaya yünü takviyeli balata malzemelerinin sürtünme performansıyla ilgili önemli bir bulgudur ve belirli koşullarda sürtünme özelliklerindeki değişimin gözlemlendiği deneysel sonuçları vurgular (Mutlu, Öner, Özdin ve Yıldız, 2006).

Metal takviye olarak genellikle çelik, bakır, pirinç veya alüminyum fiber kullanılmaktadır. Takviye olarak metal malzeme kullanmanın yapıya kazandırdığı en büyük avantaj sürtünme yüzeyindeki ısının, metalin ısıl iletkenliği sayesinde soğurulmasıdır. (Mutlu ve Sugözü, 2008).

Çelik fiberler metal takviyeler içerisinde en fazla kullanılan takviyelerdir. Uzun çelik fiberler yapıyı yüksek seviyede güçlendirirken, kısa fiberler üretim aşamasında kolaylık sağlamaktadır (Mutlu ve Sugözü, 2008) Çelik fiber yüksek oranlarda kullanılırsa disk yüzeyinde aşınmaya yol açmaktadır, bunun sebebi sürtünme katsayısının yükselmesi ve dengeli bir sürtünme katsayısının sağlanamamasıdır. Österle vd. çelik fiber oranının yüksek olduğu yapılardaki sürtünme yüzeyini incelemişlerdir, sürtünme filminin yüksek sürtünme katsayısıyla beraber gittiği ve aşınmaya yol açtığı görülmüştür (Österle, Kloß, Urban ve Dmitriev, 2007). Çelik fiberin bir başka dezavantajı da korozyon direncinin diğer metal takviyelere göre daha düşük olmasıdır, bu sebeple de nemli bölgelerde paslanma durumu yaşanabilmektedir. Bunu engellemek için yapıya çinko katılarak paslanma ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır (Chan ve Stachowiak, 2004).

Bakır, ısıl iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle kullanılmaktadır. Genellikle toz halinde kullanılması tercih edilir. Bakır sürtünme katsayısının düşük olmasını sağlamaktadır. Bunun sebebi yüksek sıcaklık çalışma koşullarında balata arayüzeyinde bakır oksit oluşturmasıdır. Bakırın eklenmesinin en önemli sebebi budur, bu etki sayesinde disk yüzeyinin aşınması geciktirilir ve sürtünme kontrol altına alınır (Blau, 2001).

Pirinç, balata malzemesinin yüzey basıncını ve ısıl iletkenliğini arttırmaktadır. Balatalarda çoğunlukla perçin pirinci adı verilen %62 Bakır - %38 Çinko içerikli pirinç kullanılır ve ıslak sürtünme koşullarındaki özelliklerini geliştirir (Ahmaruzzaman, 2010). Çinko frenleme sonrası sürtünme tabakasında yer almaz. Çünkü çinko balata yüzeyinden disk yüzeyine transfer olur. Ayrıca yapılan çalışmalardaki disk yüzeyleri incelendiğinde çinko ve oksijen dağılımının homojen olduğu görülmüştür (Ganguly ve George, 2008).

Alüminyum fiberler, alüminyum matrisli kompozit malzeme içerikli balatalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Balatada alüminyum fiber olması yapının bakır ve çelik fibere göre kayma hızından daha az etkilenmesini sağlamaktadır. Sürtünme malzemesi içerisindeki metal takviyelerin sürtünme karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemek için pik dökme demir

disk, bakır, çelik ve alüminyum fiber içeren üç farklı sürtünme malzemesi kullanılmıştır. Bakır ve çelik fiber takviye edilmiş sürtünme malzemesinin kayma hızı artınca sürtünme katsayısı düşmüştür. Alüminyum takviye edilmiş malzemede ise kayma hızındaki değişim çok düşüktür (Jang, Ko, Kim, Basch ve Fash, 2004).

2.4.3. Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemeleri, sürtünme malzemesinin özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Genellikle maliyeti düşürmek ve üretilebilirliği artırabilmek amacı ile kullanılırlar. Diğer bileşenler kadar kritik değillerdir; ancak sürtünme malzemesinin karakteristiğini etkilerler. Dolgu malzemesi seçimi, sürtünme malzemesine göre yapılır ve uygulanacak olan kullanım amacına bağlıdır (Kim ve diğerleri, 2008). Örneğin, frenleme sırasında ortaya çıkan yüksek ses seviyeleri olan balatalarda, sesi azaltıcı etkiye sahip dolgu malzemeleri tercih edilir. Bu durumda, ses önleyici malzemelerin, örneğin cashew ve mika gibi, oranı baryum sülfat gibi ısı dengeleyicilerden daha fazla olabilir. Bu, frenleme sırasında oluşan sesin azaltılmasına ve daha sessiz bir frenleme deneyimine katkıda bulunabilir (Chan ve Stachowiak, 2004). Organik ve inorganik dolgular mevcuttur.

Cashew, genellikle yaygın olarak kullanılan bir organik dolgu maddesidir. Bu tür malzemeler, sesi absorbe etme yetenekleri ve viskoelastik davranışlarıyla öne çıkarlar. Yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısındaki kararsızlığı azaltabilme özelliği bulunmaktadır. Fakat, sürtünme yüzeyinden ayrılarak büyük gözeneklerin oluşmasına ve bu gözeneklerin çatlaklara dönüşmesine neden olabilirler. Bu olumsuzluğu engellemek için parçacıklar uygun bir yapışkanla kaplanmalıdır (Akar, Sugözü, Bilgi ve Kumlu, 2013).

Selüloz, ağaçlardan elde edilen organik bir malzemedir. Fren balatalarına genellikle toz halinde eklenir. Fren balatalarının üretimi genellikle yüksek sıcaklıkları içerir ve bu da selülozu yakar. Bu durum, gözenekli bir malzeme oluşturur ve son ürünün yoğunluğunu azaltır. Ayrıca, frenleme sırasındaki gürültüyü azaltır (Incesu ve diğerleri, 2013). Marewad ve arkadaşları, %10 ağırlıkça mikro-selüloz elyaf içeren sürtünme malzemesinin ticari fren balatalarıyla karşılaştırılabilir sonuçlar gösterdiğini belirttiler. Kendileri tarafından hazırlanan malzemenin aşınma hızının 3,7 mg/m olduğu bulunmuştur. Sürtünme katsayısı değeri ise 0,357 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, hazırlanan kompozit örneklerin termal

kararlılığının 500 °C'ye kadar çok iyi olduğunu belirtmişlerdir (Marewad, Singh ve Adivarekar, 2018).

Tipik inorganik dolgulardan baryum sülfat ($BaSO_4$), mika, vermikülit, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) gibi örnekler verilebilir. Bu malzemeler yüksek ergime sıcaklığına sahiptirler. Baryum sülfat veya barit, dünya çapında çeşitli yerlerde maden olarak çıkarılan bir mineraldir. Yüksek yoğunluk gösterir ve sıcaklığın artmasıyla değişen tribolojik özelliklere sahiptir. Bu mineralin bulunabilirliği, maliyetini önemli ölçüde azaltır. Baryum sülfat, bir fren balatası dolgu maddesi olarak kullanılır. Sugözü ve Dağhan (2013), fren balatasındaki barit oranının artmasıyla aşınma hızının azaldığını, mineralin aşınmaya dayanıklılığına rağmen sürtünme katsayısını azalttığını göstermiştir. Ayrıca, El Soeudy ve ekibi (2021), baryum sülfatın balata malzemesinde sürtünme katsayısına negatif etkisinin az olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sürtünme malzemesindeki $BaSO_4$ içeriğinin artışının, sürtünme katsayısının yüksek stabilitesine ve düşük aşınma direncine yol açtığını keşfetmişlerdir. Ayrıca, baritin yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olduğu belirtilmiştir. Laboratuvar testleri, baritin, 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda özelliklerinde önemli bir değişiklik oluşturmadığını göstermiştir (Menapace, Leonardi, Matějka, Gialanella ve Straffelini, 2018). Kalsiyum karbonat, alternatif bir dolgu madde olarak kullanılabilir, fakat yüksek sıcaklıklarda baryum sülfat kadar iyi performans göstermez.

Mika, düşük frekanslı fren sesinin önlenmesinde etkilidir. Vermikülit de benzer bir işlev görür (Borawski, 2020).

Uçucu kül, endüstriyel fabrikalarda ve ısı ve elektrik santrallerinde kömür yanması sonucu oluşan bir yan üründür. İnce mineral tozları şeklinde olup açık gri veya açık kahverengi renge sahiptir ve başlıca olarak silikon, alüminyum ve demirden oluşur. Ayrıca, uçucu kül, doğal kayalar gibi çeşitli iz elementleri içerir ve yanmamış karbonun küçük bir miktarını içerir. Kömürün yanması, çevre üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir; bu nedenle atık ürün yönetimi, özellikle endüstriyel atıklar açısından birçok devlette çevresel bir politika önceliğidir. Farklı kömür türleri ve güç kazanları çeşitleri, farklı özelliklere sahip uçucu kül ile sonuçlanır ve bu da atık yönetim sürecini etkiler (Malhotra, Valimbe ve Wright, 2002). Bu malzeme ucuz olduğundan, bazı durumlarda fren balatalarında dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır (Dadkar, Tomar ve Satapathy, 2009; Natarajan, Rajmohan ve Devarajulu,

2012). Araştırmalar, yüksek uçucu kül içeren fren balatalarının, aracın düşük başlangıç hızları için istikrarlı sürtünme katsayılarına sahip olduğunu gösterdi.

2.4.4. Sürtünme düzenleyiciler

Sürtünme düzenleyiciler balata bileşimine sürtünme katsayısının ve aşınma hızının kontrol edilebilmesi için katılırlar. İki tipi bulunmaktadır; bunlar abrasivler ve yağlayıcılardır. Abrasivler; sürtünme katsayısını yükseltirken, yağlayıcılar sürtünme katsayısını düşürürler. Doğal olarak abrasiv aşınma hızını yükseltmekte, yağlayıcılar da aşınma hızını düşürmektedir. Yağlayıcının bir diğer amacı da yüksek sıcaklıklarda aşınmayı stabilize etmektir. İki düzenleyicinin dengesi yapının aşınma sağlığı açısından çok önemlidir (Österle ve Dmitriev, 2016).

Yapıya abrasiv ilavesi aşınma hızını arttırmaktadır. Çünkü sürtünme katsayısının artışını sağlar. Yüksek abrasiv içeriği dengesiz sürtünme katsayısına sahip balatalara sebebiyet verir. Abrasiv içeriği arttıkça bu katkılar frenleme sırasında sürtünme yüzeyindeki demir oksitleri kopartırlar. Abrasivler genellikle silikat ve metal oksit gibi sert parçacıklardır (Chan ve Stachowiak, 2004).

Silika, ucuzluğu ve uygun sertliği ile sürtünme katsayısını arttırdığı için sürtünme malzemelerinde kullanılan yaygın bir aşındırıcı malzemedir (Kumar ve Kumaran, 2019). Alümina bir diğer kullanılan abrasiv malzemedir. 22 mikron boyutundaki alüminanın %1'lik ilavesi sürtünme katsayısını %15 arttırmıştır. %2'lik ilave sürtünme katsayısını daha da arttırmışken aşınma performansını düşürmüştür (Satapathy ve Bijwe, 2002).

Mullit, bir başka abrasiv malzemedir. Mullit, basma yüklemesi etkisinde parçalanır ve sürtünme filmini yeniler. Bu sayede geniş bir sıcaklık aralığında sürtünme katsayısının stabilitesini sağlar, özellikle demiryolu frenleme durumlarında iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir (Cai, Wang, Wang ve Wang, 2016; Kumar, Kumaran, Dhanalakshmi ve Sivaramakrishnan, 2019).
Silisyum karbür balata üretiminde endüstriyel olarak kullanımı yaygın olan abrasivlerdeki en sert malzemedir (Bian ve Wu, 2015).

Zeolit, bir başka abrasiv malzemedir, doğal olarak oluşmaktadırlar. Özellikleri seramiklere benzemektedir bu sebeple balata malzemesi olarak kullanılmıştır. %5-%35 aralığında değişen oranlarda ilave edilerek test edilmiştir. %10 oranındaki ilavelerde sürtünme katsayısının 0,4-0,45 aralığında stabilize olduğu ve sıcaklık karşısında da bu stabiliteyi koruduğu gözlemlenmiştir (Keskin, 2011). Bu sonuçlar 150-300 °C aralığında yapılan bir başka çalışmada da doğrulanmıştır (Chau, Lee, Yang ve Shih, 2014).

Yağlayıcıların temel amacı, frenleme sürecinde sürtünme katsayısını istikrarlı bir şekilde sürdürmektir. Grafit, molibden disülfür, antimon trisülfür, bakır sülfat gibi katı yağlayıcılar, geleneksel fren balatalarında sıkça kullanılan maddelerdir. Bu katı yağlayıcılar, sürtünme yüzeyinde bir film oluşturarak, yüzeyler arasındaki aşınmayı kontrol etme, titreşimi absorbe etme ve sürtünme katsayısını sabitleme gibi özelliklere sahiptir (Cho, Ju, Kim ve Jang, 2006).

Fren balatalarındaki katı yağlayıcılar, genellikle az miktarda eklenmesine rağmen, aşınma direnci, durma mesafesi, sürtünme istikrarı, tork değişimi ve gürültü gibi çeşitli fren performanslarını güçlü bir şekilde etkiler (Kim, Cho, Cho ve Jang, 2007). Şu anda, pek çok farklı katı yağlayıcı fren balataları için mevcuttur. Grafit ve MoS_2 sıkça kullanılan maddelerdir ve Sb_2S_3, ZnS, PbS ve Cu_2S gibi diğer bileşikler ise genellikle daha iyi fren performansı için eklenir (Chung ve diğerleri, 2019).

Katı yağlayıcıların düşük sürtünme katsayısının (CoF), atomlar arası güçlü bağlantıya ve katmanlı tabakalar arasında zayıf Van der Waals bağlarına dayanan anizotropik özelliklerine atfedildiği bilinmektedir (Gudmand-Høyer, Bach, Nielsen ve Morgen, 1999). Bu yağlayıcılar, sürtünme arayüzünde sürtünme filminin oluşumu ve korunmasında önemli rol oynar. Sürtünen yüzeydeki sürtünme filmi oluşumu, katı yağlayıcıların moleküler düzeydeki polaritesine bağlıdır (Andrey, Werner ve Heinz, 2011). Katı yağlayıcıların etkinliği, sıcaklık, basınç, hız, çevresel koşullar ve benzeri faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenir. Bu nedenle, çeşitli frenleme koşullarında fren performansını desteklemek adına fren balatalarında genellikle birden fazla katı yağlayıcı kullanılır (Gudmand-Høyer ve diğerleri, 1999).
Grafit, endüstriyel olarak en fazla kullanılan yağlayıcıdır (Cho ve diğerleri, 2006). Hem doğal grafit hem de yapay grafit ve genişletilmiş grafit gibi benzer malzemeler kullanılmaktadır (Lin ve diğerleri, 2020). Çok sayıda çalışma, 700°C'ye kadar yükselen (Stadler ve diğerleri, 2008) ilk oksidasyon sıcaklıklarını göstermektedir. Yüksek sıcaklık

direnci, grafitin uçaklar için fren komponentlerinin üretiminde uygun bir seçim haline gelmesine sebep olmaktadır. Uçaklarda frenler neredeyse sadece yüksek sıcaklıklarda çalışır ve bu nedenle diğer özellikler daha az önemlidir (Österle ve Dmitriev, 2016). Otomobil fren balatalarında da grafit sıklıkla kullanılmaktadır. Grafitin yağlama özellikleri, fren diskinin oksidasyonu sırasında açığa çıkan demir oksit parçacıklariyle bağlanma kapasitesinden kaynaklanır ve bu da sürtünme çiftinin yüzeyinde ince bir film oluşturur (Li, Gao, Xing, Wang ve Fang, 2004; Pan, Guo, Ding, Zhang ve Wang, 2010).

Bu nedenle artan sıcaklıklarla birlikte sürtünme katsayısındaki değişikliklerin azaltılmasına katkıda bulunur(Chen, Bi, Yang, Xia ve Hao, 2008; Cho vd, 2008; Su, Gao, Han, Fu ve Zhang, 2015). Aşınma oranı incelediğinde, hem sürtünme malzemesindeki ağırlıkça % grafitten hem de çalışma koşullarından etkilendiği görülmüştür (Wang ve diğerleri, 2018). Grafit iyi bir ısı iletkenidir ve kritik sürtünme alanlarından ısının uzaklaştırılmasını iyileştirir. Bu durum ile genellikle yüksek sıcaklıklara karşı direnci düşük olan bağlayıcı korunur. Aynı zamanda grafit ucuz bir malzemedir. Grafit kullanımının frenleme gürültüsünün azaltılması üzerinde olumlu bir etkisi olduğu da gözlemlenmiştir (Gilardi ve diğerleri, 2012). Grafit parçacık boyutunun da tribolojik özellikleri etkilediği gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının en yüksek değeri (0,62±0,02) 100 μm'lik taneler için kaydedilirken, aşınma oranının en düşük değeri (4,2±0,2 m^2/ N) en küçük olanlar (40 μm'nin altında) için kaydedilmiştir (Leonardi, Alemani, Straffelini ve Gialanella, 2020).

Genellikle, metal sülfürler sürtünmeyi azaltmak için katı yağlayıcı olarak kullanılır (Filip, Weiss ve Rafaja, 2002). Molibden disülfür sürtünme endüstrilerinde kullanılan yaygın bir yağlayıcıdır. Eşleşen parçaya karşı iyi bir şekilde kayabilirler. Molibden disülfür tarafından oluşturulan gövde tabakası 350 °C-400 °C arasında kararlıdır ve yüksek sıcaklıkta sülfür kaybederek molibden okside dönüşür (Chung ve diğerleri, 2019).

Düşük metalli ve yarı metalli formülasyonlar, sürtünmeyi arttırmak için %5 oranında antimon trisülfür içerir, bu nedenle sürtünmeyi arttırıcı katı yağlayıcılar olarak da adlandırılır (Lee, Rhee, Kim ve Jang, 2013). Frenleme işlemi sırasında, bakır-demir sülfür sürtünme ısısının varlığında eşleşen parça ile reaksiyona girer ve sülfürün serbest kalmasıyla ayrışır. Bu reaksiyon, yüzeyde fren sürtünme malzemesinin genel performansını etkileyen bir pirit tabakası oluşturur (Vasconcellos, Hinrichs, da Cunha ve Soares, 2010).

Bakır sülfür ve çinko sülfürün varlığı yük taşıma kapasitesini artırır. Bakır sülfür bozunma ve toparlanma özelliklerini iyileştirmiştir (Fedorchenko, 2002).

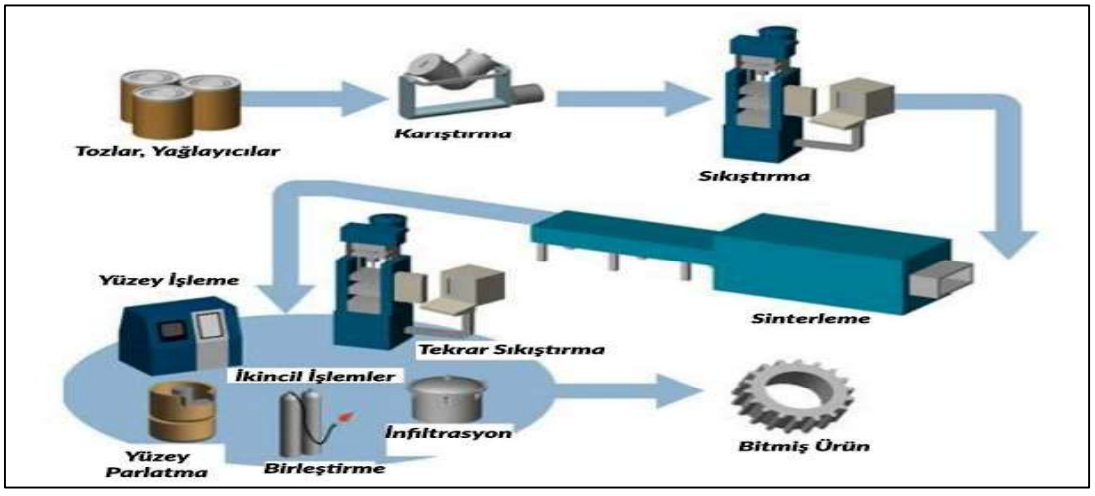
Metal sülfür ailesinden Tungsten sülfür, sürtünme malzemesinde kullanılan önemli katı yağlayıcılardan biridir. Geri kazanım davranışını geliştirir ve tribo tabakasını etkili bir şekilde oluşturarak aşınma oranını azaltır (Antonyraj, Vijay ve Singaravelu, 2019).

3. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM YÖNTEMİ

Toz metalurjisi, sıkıştırılmış metal tozlarını erime noktalarının hemen altında sinterleme adı verilen işlem uygulanarak metal parçalar oluşturma işlemidir. Toz metalurjisi, başka türlü birleştirilmesi genellikle mümkün olmayan karmaşık geometrilere sahip parçaların hızlı üretimi için çok uygundur. Bazı alaşım kombinasyonları, toz formundaki kimyasal bileşimler, malzemelerin sentezi için daha elverişlidir. Bu da toz metalurjisinin çok yönlü olmasını ve malzeme kullanımını en üst düzeye çıkarmasını sağlamaktadır. Net şekil kabiliyeti, işleme gibi ikincil işlemleri doğrudan azaltır veya ortadan kaldırır (Selcuk, 2013). Toz metalurjisi 1950'den bu yana çeşitli endüstriler genişledikçe gelişmiştir. ABD'de otomotiv endüstrisi bunda çok etkili olmuştur. Günümüzde de toz metalürjisi ürünleri %90 oranından fazla ulaşım sektöründe kullanılmaktadır (Harper, 1998; Maluf ve diğerleri, 2007). Otomotiv endüstrisi günümüzde çevresel kaygılar sebebi ile çevre dostu araçlar için daha hafif teknolojiyle motor küçültülmesi gibi yakıt tüketimini azaltmaya yönelik teknolojilere yöneltilmiştir. Bu azalmanın sağlanması için, toz metalürjisi ürünlerinin de daha yüksek performansta olması gerekir (Maluf ve diğerleri, 2007).

3.1. Toz Metalurjisi Üretim Yöntemi Aşamaları

Toz metalurjisi ile parça üretimi 4 aşamadan oluşmaktadır (Fang ve diğerleri, 2018). Bunlar; 1) toz üretimi, 2) karıştırma, 3) sıkıştırma, 4) sinterleme aşamalarıdır. Aşamaların şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.

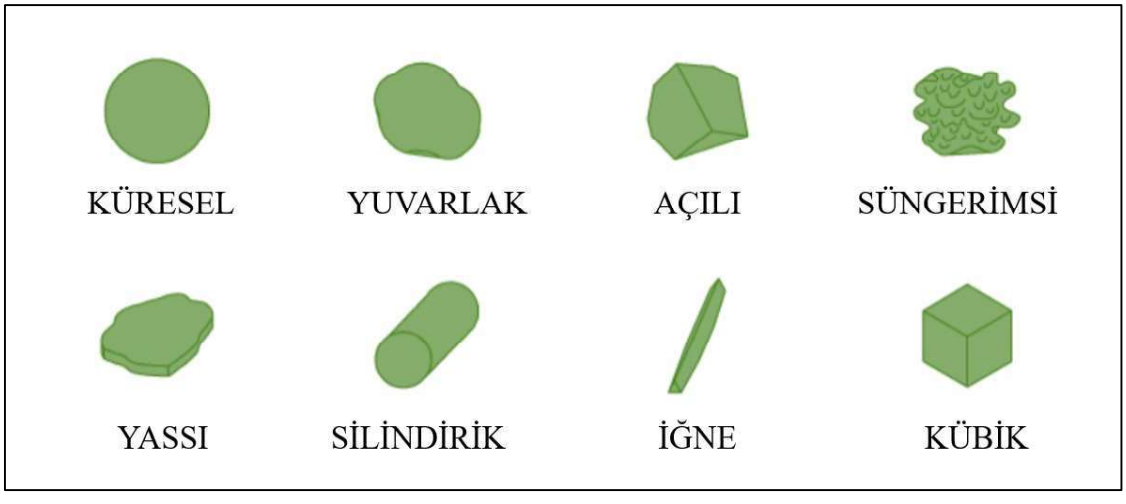


Şekil 3.1. Toz metalurjisi işlem basamakları (Yan, Yin, Luo, He ve Dai, 2019)

3.1.1. Toz üretimi

Toz metalurjisi ile elde edilen parçaların başarısı, kullanılan başlangıç tozlarının özelliklerine dayanmaktadır. Ayrıca, tozların saflığı, boyutu, şekli, boyut dağılımı, kimyasal yapısı ve yüzey özellikleri de sonuçları doğrudan etkiler. Toz üretiminde kullanılan yöntemler, tozların birçok özelliğini belirler. Tozun geometrisi, üretim yöntemine bağlı olarak karmaşık şekillerden küresel yapıya kadar değişebilir (Akkaş ve Elfghi, 2022; Newkirk ve Kohser, 2016). Seçilen başlangıç tozları, toz metalurjisi ile üretilen parçaların özelliklerini belirlemekte etkilidir (Şanlı, 2019). Toz üretim teknikleri genellikle mekanik, kimyasal, elektroliz, atomizasyon, buharlaştırma ve diğer yöntemler olarak sıralanabilir (Schade, 2015).

Toz parçacıklarının boyutları genelde 1 mm'den küçüktür ve 0,1 ile 200 µm arasında değişir. Bu parçacıkların şekilleri farklı olabilir; küresel, yuvarlak, silindirik, süngerimsi, iğne formunda, düz, kübik veya topak şeklinde olabilirler. Parçacık şekilleri Şekil 3.2'de verilmiştir. Parçacıkların şekli, tozların yüzey alanı, akışkanlığı ve sıkıştırma sonrası yoğunluğu gibi özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Liu, Lim, Lu ve Lai, 1994). Şekil, boyut, toz bileşimi, yağlayıcı tipi, basınç, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi faktörler, toz metalin özelliklerini etkiler. Tozların sıkıştırılma sürecinde kullanılan yağlayıcılar, kalıptaki toz basıncı, sıkıştırma hızı ve titreşim, tozun nitelikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu faktörler aynı zamanda üretilen ürünün özelliklerini de belirler (Newkirk ve Kohser, 2016).

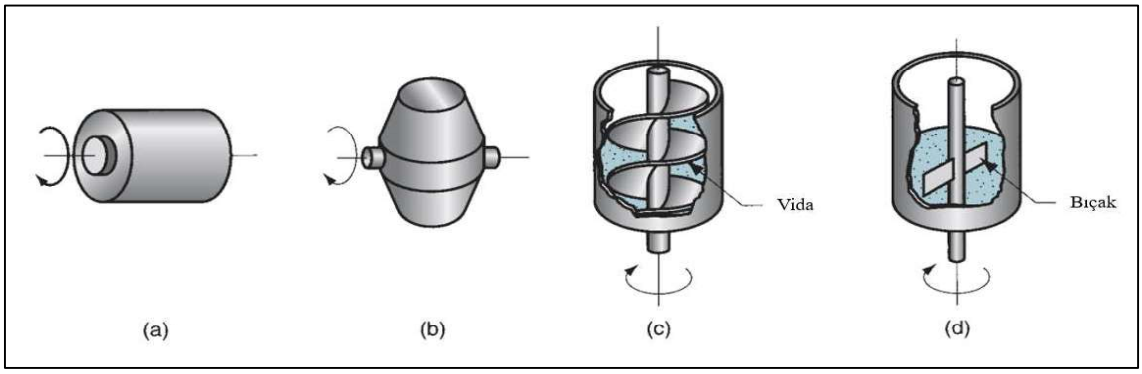


Şekil 3.2. Toz parçacık şekilleri (Brewin, Coube, Doremus ve Tweed, 2007)

3.1.2. Karıştırma

Toz metalurjisi yaklaşımı, ilk aşamada başlangıç tozlarının seçimini takiben, tozların harmanlaması ve karıştırılması aşamalarını içerir. Harmanlama aşamasında aynı kimyasal bileşimde ve farklı boyutlardaki tozlar bir araya getirilir. Karıştırma ise, değişik kimyasal özelliklere sahip ve benzer boyutlara sahip tozların birbirleriyle homojen bir şekilde karıştırılması işlemidir (Groover, 2019). Aynı kimyasal yapılara sahip tozların ortalama tanecik boyutunun eşitlenmesi için harmanlama, karıştırma ise tozların topaklanmasını engellemek ve homojen bir dağılım elde etmek için yapılır (Schade, 2015).

Mekanik karıştırma ve ultrasonik titreşim, sıklıkla tercih edilen yöntemlerdir ve genellikle yüzey aktif madde sıvılarıyla birlikte parçacıkların dağılımı ve özelliklerinin belirlenmesinde etkili bir rol oynar (Groover, 2019). Karıştırma işlemi sırasında, karıştırıcı tipi, tozun hacmi, karıştırıcı devir sayısı ve karıştırma süresi, karışımın kalitesini belirlemede kritik öneme sahiptir. Homojen bir dağılım elde etmek için uygun bir karıştırma süresinin belirlenmesi gereklidir. Ayrıca, zamanı ve maliyeti göz önünde bulundurarak uygun bir karıştırma süresi belirlenmelidir. Uzun süreli karıştırma işlemi, tozların kırılmasına ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinin azalmasına neden olabilir (Taşci, Gökmeşe ve Bostan, 2014). Karıştırıcı tipleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Tozun karıştırıcıya konulan hacmi arttıkça, tozların göreceli hareketliliği azalır. Bu nedenle, etkili bir karışım elde etmek için karıştırıcı hacminin %20-40 aralığına kadar olan bir oranda tozla doldurulması önerilir. Karıştırma sürecindeki dönme hızı da önemlidir. Düşük dönme hızı, etkin karıştırma süresini artırırken, yüksek dönme hızı ise tozların merkezkaç kuvveti nedeniyle akışını ve karışmasını zorlaştırabilir (Şanlı, 2019).

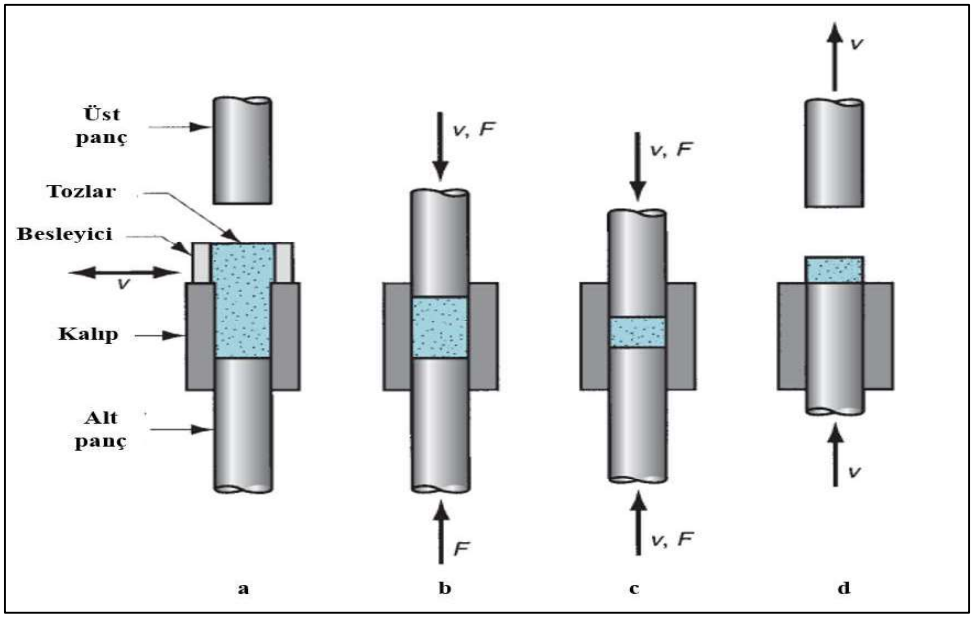


Şekil 3.3. Farklı karıştırıcı tipleri; a) döner karıştırıcı, b) döner çift koni, c) vidalı karıştırıcı, d) bıçaklı karıştırıcı (Groover, 2019)

3.1.3. Sıkıştırma

Sıkıştırma işlemi, karşılıklı pançların bir metal kalıp içindeki tozları sıkıştırmasıyla gerçekleşir. Tozun sıkıştırılabilirliği, kalıp boşluğuna yerleştirilen tozların basınç altında kolayca paketlenebilme ve teorik yoğunluğa yaklaşma yeteneğine bağlıdır (Sethi, Myers ve German, 2008). Parçanın mukavemet özellikleri, toz yapısına ve uygulanan sıkıştırma basıncına bağlıdır. Parçanın şekli, boyutu ve sıkıştırılan toz karışımı, sıkıştırma basıncını belirleyen etmenler arasında yer alır. Örneğin, toz parçacıklarının düzenli bir yapıya veya küresel bir şekle sahip olması, sıkıştırma basıncı ve son ürünün yoğunluğu üzerinde etkili olabilir (Aydın, 2012).

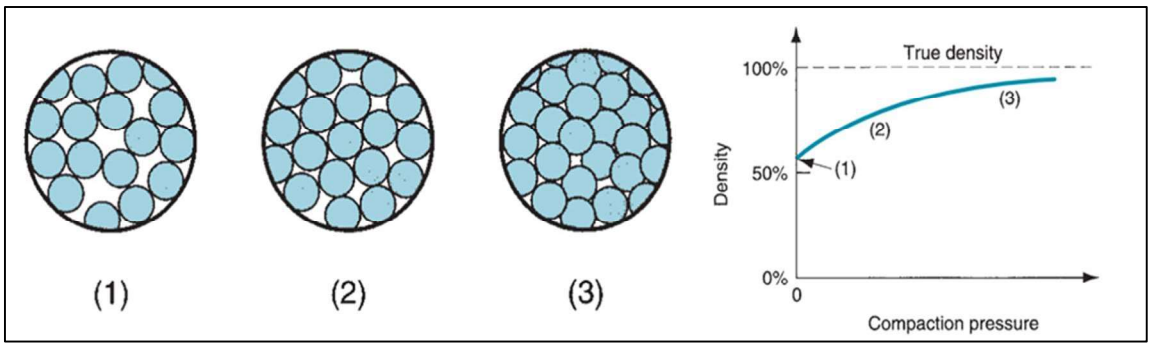
Sıkıştırma sürecinde, tozun kalıp içindeki sürtünmesini azaltmak ve preslenen parçanın kalıptan kolayca çıkmasını sağlamak amacıyla kalıp içine yağlayıcı uygulanır. Sıkıştırma işleminin aşamaları genellikle tozların kalıp boşluğuna yerleştirilmesi, pançların hareket ederek tozları hazırlaması, tozların sıkıştırılması ve sıkıştırma işleminden sonra parçanın kalıptan çıkarılması şeklindedir. Sıkıştırılma işlemi Şekil 3.4'te verilmiştir (Danninger, Calderon ve Gierl-Mayer, 2017; Groover, 2019).



Şekil 3.4. Toz sıkıştırma prosesinin işlem basamakları (Groover, 2019)

Sıkıştırma sonrası yoğunluk, sıkıştırma işlemi sonucunda elde edilen ham yoğunluktur ve başlangıçta gözlemlenen yoğunluktan farklılık gösterebilir. Bu aşamada uygulanan basınç,

tozların yeniden düzenlenmesine, köprülerin kırılmasına, gözeneklerin azaltılmasına ve tanelerin arasındaki temasın artmasına yol açar (Fang ve diğerleri, 2018). Basınç arttıkça, tanelerin plastik veya elastik olarak şekil değiştirmesi ve parçacıklar arası temas alanının genişlemesi gözlemlenebilir. Bu durum gözenek hacminde bir azalmayla birlikte seyreder. Şekil 3.5'te, 1 başlangıçtaki boşluklu toz yapısını, 2 yeniden paketlenmeyi, 3 ise elastik ve plastik deformasyonlar ile tozların yeniden birleşimini göstermektedir, en sağda sıkıştırma basıncına göre yoğunluğun nasıl değiştiği aşama olarak gözükmektedir (Brewin, Coube, Doremus ve Tweed, 2007).



Şekil 3.5. Küresel şekilli parçacıklar için sıkıştırma evrelerinin gösterimi (Groover, 2019)

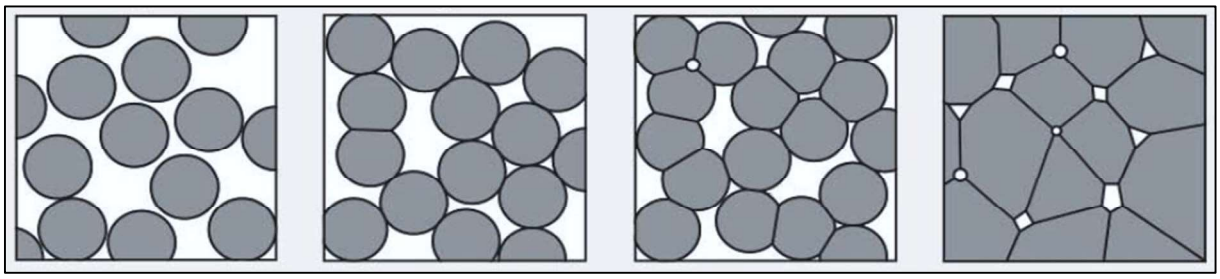
3.1.4. Sinterleme

Sinterleme, sıkıştırılmış toz metalin ergime noktasının %70 ile %90'ı bir sıcaklığa yükseltilmesi ve belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulmasıdır. Bu işlem vakum veya atmosfer ortamında yapılabilir (Vani ve Chak, 2018). Ham parça içindeki bağlanma zayıf durumdadır. Sadece tutulacak kadar yapısal bir bütünlüğü vardır. Sinterleme sırasında oluşan bağlanma, parçaya gerekli dayanımı sağlar. Sinterleme sırasında bireysel yapılar kaybolur ve malzeme bir bütün olarak davranmaya başlar. Sinterleme sonucunda ana hedefin gözeneklilik miktarını minimize etmek olduğu söylenebilir (Wahi, Muhamad, Sulong ve Ahmad, 2016). Ayrıca, sinterlemede önceki proseslerde yapıya atılan topaklanma önleyici, kalıptan çıkarmak için katılan yağlayıcı gibi bileşenler yakılarak yapıdan atılır. Bu sayede bileşimin saflığı maksimize edilmiş olur (Danninger ve diğerleri, 2017).

Sinterleme için birincil itici gücün yüzey enerjisinin azaltılması olduğu araştırmacılar arasında genel olarak kabul görmektedir. Sıkıştırma sonrası toz numune, her biri kendi yüzeyine sahip birçok farklı tanecikten oluşur ve bu nedenle numunenin içerdiği toplam

yüzey alanı çok yüksektir. Sinterleme sırasında ısının etkisi altında, parçacıklar arasında bağların oluşması ve büyümesi yoluyla yüzey alanı azalır ve buna bağlı olarak yüzey enerjisi düşer. Başlangıçtaki toz boyutu ne kadar ince olursa, toplam yüzey alanı o kadar yüksek olur ve sürecin arkasındaki itici güç de o kadar büyük olur (Manohar, Pandey ve Maity, 2021).

Yapı değişimlerinin sinterleme aşamalarına göre gösterimi Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu aşamaları sıralamak gerekirse; ilk olarak toz parçacıklarının temas noktalarında bağlanmalar başlar, sonrasında bu noktalar boyun adı verilen temas bölgelerine dönüşür, ardından boyunlardan büyüyen parçacıklar gözenek boyutlarını küçültür, son olarak da yeterince küçülmüş olan gözenekler üzerinden tane sınırları oluşur (German, 2010).



Şekil 3.6. Sinterleme işleminin aşamaları (German, 2010)

4. BOR

4.1. Bor Elementi

Bor, periyodik tabloda ‘B’ simgesi ile gösterilir. Atom numarası 5, atom ağırlığı ise 10,81’dir. Yarı metal ve yarı iletken özelliktedir. Yaygınlık açısından 51.sıradadır Oksijene olan çekiminden dolayı yer kabuğunda serbest halde bulunamayan bor, yer kabuğunda borat ve borosilikat olarak bulunur, metal ve ametal elementlerle bileşikler oluşturur (Ediz ve Özdağ, 2001). Bu bileşikler çeşitli özellikler sergiler ve böylece bor bileşikleri birçok farklı alanda kullanılabilmektedirler. Bileşiklerinde metal dışı özellik sergileyen bor, saf halde karbon gibi elektrik iletkenliği özelliği sergilemektedir. Bor elementinin fiziksel özellikleri Çizelge 4.1’de görülmektedir (USGS, 2021).

Çizelge 4.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri (USGS, 2021)

Özellik	Değer
Yoğunluk	2,84 g/cm^3
Sertlik	Mohs: 9,5 Vickers: 49 000 MN.m^2
Fiziksel durum	Katı
Görünüm	Sarımsı-kahverengi ametal kristal
Elastik modül	320 GPa
Isıl iletkenlik	0,274 W/cm.K
Ergime sıcaklığı	2075 °C
Kaynama sıcaklığı	4002 °C
Spesifik ısısı	1,02 J/g.K
Elektriksel iletkenlik	1,0 E-12 µS/cm
Atomizasyon entalpisi	573,2 kJ/mol, (25 °C’de)
Buhar basıncı	0,348 Pa (300 °C’de)
Füzyon entalpisi	22,18 kJ/mol
Molar hacmi	4,68 cm /mol
Termal genleşme katsayısı	8,3 µm/(m.K), (0 °C’ de)

Bor elementi kimyasal özellikleri ise tane büyüklüğü ve morfolojiye göre değişmektedir. 1 mikrometre altındaki boyutlarda amorf bor kolay ve hızlı reaksiyona girer. Kristalin bor ise bu şekilde kolay reaksiyona giremez (Özkan, Tombal, Ünver ve Osmanlıoğlu, 2016).

4.2. Bor Mineralleri

Yapılarında farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren doğal bileşikler olan bor mineralleri, doğada 230'dan fazla farklı halde bulunur. Ticari açıdan değere sahip başlıca bor mineralleri; Boraks (Tinkal), Kolemanit, Üleksit, Probertit, Borasit, Pandermit, Kernit ve Hidroborasit'tir (Yenmez, 2011) Bor mineralleri bileşim olarak birbilerine çok benzerdir. Ancak yapılarındaki içerdikleri kristal su miktarı farklılığı sebebiyle farklılıklar gösterirler (Özkan ve diğerleri, 2016).

Boraks ($Na_2B_4O_7.10H_2O$), en önemli bor minerallerindendir. Boraks kütlesel olarak %36,5 bor oksit içermektedir. Genelde saydam haldedir. Kısmen pembemsi sarımsı gibi renklerde olabilmektedir. Suda çözünürlüğü en belirgin özelliklerindendir ve çözünme su sıcaklığı ile doğru orantılıdır. Buharlaşmanın olduğu ortamlarda, özellikle tuzlu göl sularının buharlaşmasıyla kristallenerek oluşur. Boraks Türkiye'de başlıca Eskişehir- Kırka'da bulunmaktadır (Frost, Scholz, Ruan ve Lima, 2016).

Kernit ($Na_2B_4O_7.4H_2O$), boraksın metamorfik fazıdır. Boraksa kıyasla daha fazla bor oksit içerir ancak suda daha yavaş çözünür. Saydam renkte ve uzunlamasına iğne şeklinde kümelenmiş kristaller halinde bulunur. Kernit Türkiye'de Eskişehir-Kırka'da bulunmaktadır.

Üleksit ($NaCaB_5O_9.8H_2O$), beyazımsı, şeffaf renktedir. Çözünürlüğü sıcak suda ve asit içerisinde iyidir, fakat soğuk suda azdır. Boraks yataklarının olduğu bölgelerdeki kayaçlarda, genelde kolemanitle buharlaşma ile pamuk yumağı şeklinde kristallenir. Üleksit Türkiye'de Eskişehir-Kırka, Balıkesir-Bigadiç, Kütahya-Emet bölgelerinde bulunmaktadır (Eskibalci ve Ozkan, 2012).

Probertit ($NaCaB_50_9.5H_2O$), beyazımsı ve sarımsı renktedir. Lifsi kristal şeklindedir. Kütlesel olarak %49,6 bor oksit içermektedir. Probertit Türkiyede Bursa-Kestelek, Kütahya-Emet bölgelerinde bulunmaktadır.

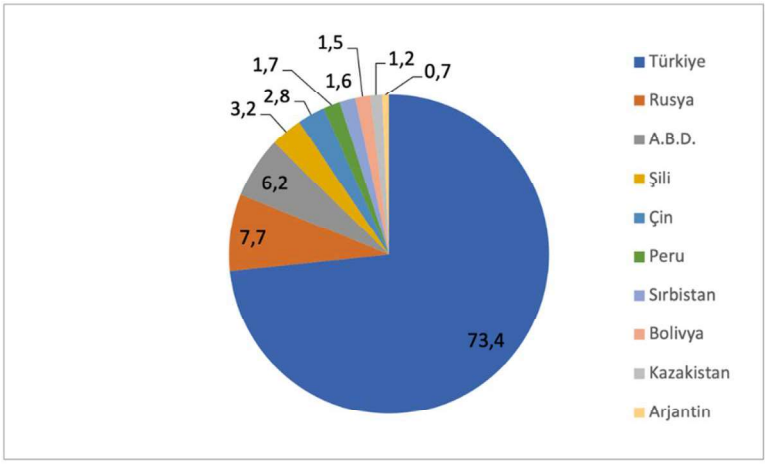
Kolemanit ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$), beyaz-yeşilimsi, şeffaf renklerde bulunabilmektedir. Kolemanitin çözünürlüğü asitte yüksek, suda düşüktür. Kütlece %50,8 bor oksit içermektedir. Dğer minerallere göre daha serttir. Kolemanit Türkiye'de Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç, Bursa-Kestelek bölgelerinde bulunmaktadır. Dünya rezervinin neredeyse tamamı Türkiye'dedir (Celik ve Cakal, 2016).

Pandermit ($Ca_4B_{10}O_{19}.7H_2O$), beyaz renktedir. Kütlece %49,8 bor oksit içermektedir. Sıcak su kaynaklarında aragonitle çökelmeyle, iğnemsi düzensiz parçacıklar halinde oluşur. Pandermit Türkiye'de Balıkesir-Susurluk-Sultançayırı, Balıkesir-Bigadiç bölgelerinde bulunmaktadır.

Hidroborasit ($CaMgB_6O_{11}.6H_2O$), şeffaf renktedir. İğnemsi, prizmatik, lifli gibi çeşitli şekillerdedir. Kütlesel olarak %50,5 bor oksit içermektedir. Hidroborasit Türkiye'de Kütahya-Emet, Doğanlar, İğdeköy ve Bursa-Kestelek bölgelerinde bulunmaktadır.

4.3. Bor Rezervleri ve Bor Üretimi

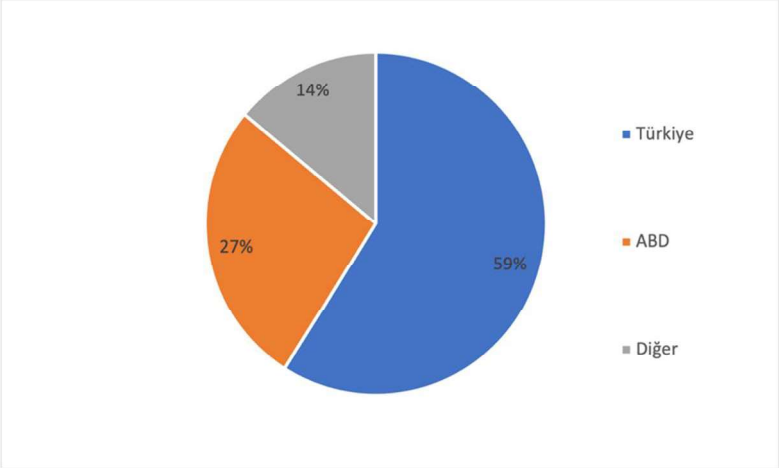
Dünyada Türkiye, en önemli bor yataklarına sahiptir. Ticari olarak bor rezervleri Türkiye'de bulunan Güney-Orta Asya Orojenik Kemeri, ABD'de bulunan Majove Çölü, Güney Amerika'da bulunan And Kemeri ve Doğu Rusya bölgelerindedir. Bor oksit bazında dünya toplam bor rezervi yaklaşık olarak 1,2x109 ton'dur (USGS, 2021) Şekil 4.1'de Dünya bor rezervlerinin dağılımı verilmiştir (Etimaden, 2021).



Şekil 4.1. Dünya bor rezervlerinin dağılımı (Etimaden, 2021)

Türkiye'deki önemli bor yatakları Kırka/Eskişehir, Bigadiç/Balıkesir, Kestelek/Bursa ve Emet/Kütahya bölgelerinde bulunmaktadır. Türkiye'de bor madenlerinin üretimi, işletilmesi ve pazarlanması Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından sürdürülmektedir. Türkiye'deki rezervler değerlendirildiğinde en fazla bulunan mineraller kolemanit ve tinkal'dir. Türkiye'de kolemanit Emet, Bigadiç, Kestelek bölgelerinde bulunmaktadır. Bigadiç bölgesinde kolemanitin yanında üleksit yan ürün olarak da elde edilebilmektedir. Tinkal ise Kırka bölgesinde bulunmaktadır (Ediz ve Özdağ, 2001).

Dünyada bor üretimine yıllara göre bakıldığında, üretimin genel olarak iki ülke tarafından gerçekleştirildiği görülmektedir. Bunlar Şekil 4.2'de verildiği gibi Türkiye ve ABD'dir. (Etimaden, 2021). Geçmiş yıllarda ABD'den az üretim yapan Türkiye, günümüzde bor madeni üretiminde birinci sırada yerini almıştır (Özkan ve diğerleri 2016).

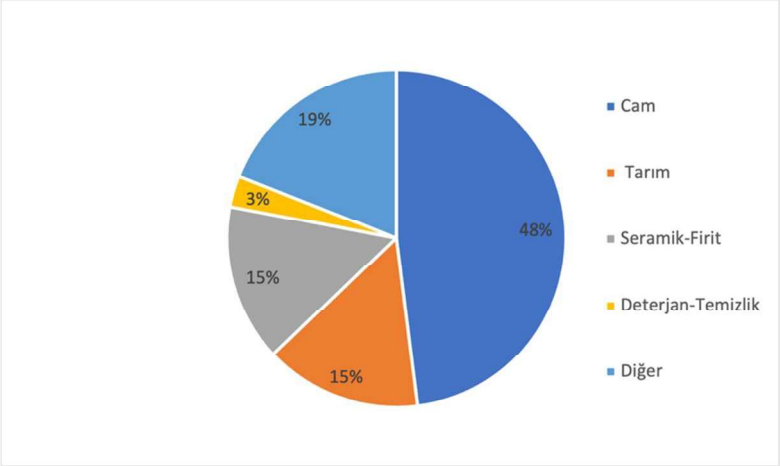


Şekil 4.2. Dünya bor üretim ton bazında dağılım (Etimaden, 2021)

4.4. Borun Kullanım Alanları

Geçmişe baktığımızda bor temizlik, cam yapımı, mumyalama, ilaç yapımı gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktaydı. Günümüzde yapılan çalışmalar ile borun kullanımı hem ülkemiz hem de dünya çapında artmış ve çeşitli dallarda kullanımı artmıştır. Bor günümüzde Şekil 4.3'de verildiği gibi cam, tarım, seramik, temizlik gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bor tüketiminin %48'ini oluşturan camların büyük bir bölümünü borosilikat camlar ve cam elyaflar oluşturmaktadır. Borosilikat camlar; güneş enerji sistem uygulamaları, LCD ekran cam uygulamaları, tıbbi uygulamalar (vücuda yerleştirilen cihazlar, alçı malzemeleri, ilaç

şişeleri, protez göz vb.) gibi çeşitli önemli uygulama alanlarına sahiptir. Cam elyaflar tekstil tipi ve izolasyon tipi cam elyaf olarak iki ana formda ve çeşitli olarak üretilen ince lifsi malzemelerdir. Bor ürünlerinin en fazla kullanımını oluştururlar. Tekstil tipi cam elyaf, plastik, kauçuk, çimento vb malzemelerinin dayanıklılığını arttırmak amacıyla kullanılırlar. İzolasyon tipi cam elyaf, cam yünü olarak da bilinir ve binaların izolasyonunda kullanılır. İzolasyon tipi cam elyaf gözenekli yapısı ile havayı hapseder ve böylece ısıyı hapsetmektedir. Cam elyafın düşük maliyeti ile çeşitli kompozitlerin üretiminde (otomobiller, uçaklar, rüzgar türbinleri vb.) ve yalıtım sektöründe büyük bir katkısı bulunmaktadır (Özkan ve diğerleri, 2016).



Şekil 4.3. Bor tüketiminin kullanım alanlarına göre dağılımı (2020) (Etimaden, 2021)

Seramikler, seramik sırları ve porselenlerdeki kullanımları ile bor tüketiminin %15'inin oluşturmaktadır. (Yılmaz ve Evis, 2016).

Topraktaki varlığı bitkiler için gerekli olan bor tarım alanında kullanılarak bitki büyümesi, gelişmesi, ürün vermesi, çekirdeklenmesinde çok önemli rol alır. Tarımda bor genelde gübre, herbisit (istenmeyen bitkilerin kontrol edilmesi), pestisit (böceklerin kontrol edilmesi), ahşap koruma amaçlarıyla kullanılarak bor kullanımının yaklaşık %15'ini kapsar. Bunların yanında bor mineral ve bileşikleri günümüzde çok farklı dallarda da kullanılmaktadır. Kullanım endüstrileri olarak savunma, elektronik, enerji (gaz türbinleri, ısı enerjisi depolayıcılar, piller, hidrojen depolayıcılar, güneş panelleri vb.), geri dönüşüm, kimya (Tekin, 2004) metalurji (kaplama, sürtünmeye aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler, lehimleme, döküm malzemelerinde katkı maddesi olarak, kesiciler, kompozit malzemeler, zımpara ve aşındırıcılar vb.), otomotiv (titreşim sönümleyici, ısı enerjisi depolayıcılar, hava

yastıklarında, hidroliklerde, plastik aksamda, yağlarda ve metal aksamlarda vb.), spor malzemeleri, tekstil (ısıya dayanıklı kumaşlar, yanmayı geciktirici ve önleyici vb.)(Aydın, Gürü, Ayar ve Çakanyıldırım, 2016) , nükleer (nükleer atık depolama, nükleer teknolojide emniyet malzemeleri, vb.) (Lezhnina ve diğerleri, 2016; Xu ve diğerleri, 2016) gibi birçok örnek verilebilir.

H. Yanar ve ark. (2022) demiryolu uygulamaları için üretilen fren balatalarına hegzagonal bor nitrür ilavesinin etkilerini incelenmişlerdir. Hegzagonal bor nitrürün hacimce %1,5'e kadar eklenmesinin mekanik özelliklerde önemli bir değişikliğe neden olmadığı, %1,5'den fazla eklenmesinin mekanik özelliklerde düşüşe sebep olduğu sonucuna varmışlardır. Buna ek olarak h-BN oranının artışı ile sürtünme katsayısında artış görülmüştür. Fakat yüksek h-BN içeren numuneler yüksek sıcaklıkta kararsız sürtünme davranışı göstermiştir.

P. Kosbe ve ark. (2020) hegzagonal bor nitrür eklenmesinin fren sürtünme malzemelerinin termal özelliklerine etkisi incelemişlerdir. Bu dolgu malzemesi ilavesi ile termal özelliklerde iyileşme gözlenmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak dolgu içeriklerinde artış ile kompozitlerin fiziksel özellikleri, sürtünme performansı, sürtünme kararlılığı ve termal özelliklerinde iyileşme görülmüştür.

G. Akıncıoğlu ve ark. (2018) fren balatası kompozisyonuna bor ve fındık kabuğu tozları eklenmesi ile güçlendirilmiş ve doğa dostu fren balatası üretilerek balatanın tribolojik performansını incelemişlerdir. Bu eklentiler kalkopirit ve petrol kokuna alternatif olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak bu kompozisyon ile üretilen balata numunelerinin sertlik değerleri daha yüksek verilere ulaşılmıştır. Sürtünme katsayısı yükselmiş fakat çok kararlı bir sürtünme görülmemiştir.

I. Mutlu ve ark. (2007) borik asitin fren balatalarının tribolojik etkisini gözlemlemek amaçlı bir çalışma yapmışlardır. Daha önceki çalışmalardaki fren balatalarının performansını iyileştirmek amacı ile kompozitlere borik asit eklenmiştir. Bunun sonucunda borik asit etkisi ile kompozitlerde aşınma direnci artmıştır, sürtünme katsayısı daha kararlı hale gelmiştir böylece borik asit frenleme performansını olumlu olarak etkilemiştir.

4.5. Bor Karbür (B_4C)

Bor karbür en sert üçüncü malzemedir. Bor karbürden daha sert olan malzemeler elmas ve kübik bor nitrürdür. Bor karbür bu üstün sertliği ile çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Bor karbürün bu kadar sert olmasının sebebi karbon ve bor atomları arasında bulunan kuvvetli kovalent bağlardır (Avcıoğlu ve diğerleri, 2020). Bor karbürün genel olarak sahip olduğu özellikler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Bor karbürün genel özellikleri (Yavas, Sahin, Yucel ve Goller, 2015).

Özellik	Değer
Yoğunluk	2,52 g/cm^3
Sertlik	2900-3580 kg.mm^{-2}
Mikrosertlik (Vickers)	31,5 GPa
Ergime sıcaklığı	2445 °C
Kırılma Tokluğu	2,9-3,2 MPa.m$^{0.5}$
Eğme Mukavemeti	345 MPa
Çekme Mukavemeti	155 MPa
Elektriksel İletkenlik	140 S
Elastik Modül	400-450 GPa
Kayma Modülü	186,5 GPa

Kıymetli bileşiklerden olan bor karbürün yüksek sıcaklık kararlılığı, yüksek sertliği, yüksek elastik modülü, düşük yoğunluğu, kimyasal olarak etkin olmaması, yüksek sıcaklıklardaki termoelektrik davranışları en önemli özelliklerindendir. Bu üstün özellikler takibinde bor karbür elektronik, savunma, otomotiv, nükleer, tıp, refrakterler, uzay ve havacılık gibi birçok alandaki uygulamalarda büyük bir önem taşımaktadır (Sasaki ve diğerleri, 2005; Solodkyi ve diğerleri, 2019).

Bor karbür elektronikte diyot, termokupl ve koruyucu kaplamalarda kullanılmaktadır. Yarı iletken özelliği ve yüksek seebeck katsayısı (300μVK^{-1}) ile çok iyi bir termoelektrik malzemedir (Pekdemir, 2021). Yüksek sertlik, elastik modül, darbe direnci ve düşük yoğunluk özellikleri sayesinde bor karbür, savunma sanayisinde hava ve kara araçlarında koruma zırhı, insanlarda vücut zırhı olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sanayisinde bor

karbür alüminyum ile kullanılarak yüksek mukavemetli ve hafif özelliklerde kompozit malzemeler üretilir. Bu malzemeler araç motorlarında kullanılır (Dou, Liu, Liu, Xiong ve Xia, 2014). Nükleer endüstride bor karbür reaktör kontrol çubuğu, nötron dedektörü, koruyucu kılıf gibi yerlerde kullanılır (Kuliiev ve diğerleri, 2020; Subramanian, 2010). Tıp alanında nötron yakalama ile kanser tedavisinde bor karbür tozları kullanımı alternatif bir yöntem olarak kullanılabilmektedir. Yüksek mukavemet, düşük özgül ağırlık, düşük termal genleşme özelliklerinden dolayı uzay ve havacılıkta kullanılmaktadır. Yüksek nötron absorbe edebilmesi sayesinde polimerlerle bileştirilerek uzay araçlarında radyasyon koruyucu kaplama olarak kullanılabilmektedir (Avcıoğlu ve diğerleri, 2020). Erime noktasının ve termal kararlılığının yüksek olması sebebiyle refrakter malzemelerde kullanılabilmektedir.

Bor karbür çeşitli üretim yöntemleri ile üretilebilmektedir. Bunların en sık kullanılanları (Alkan, 2008);

- Karbotermik yöntem,
- Endüstriyel Karbotermik,
- Grafit dirençli ve yüksek sıcaklık fırınlar
- SHS (kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi) yöntemi,
- Gaz fazında Sentezleme yöntemi,
- Magnezyotermik redüksiyon yöntemi,
- Bor elementlerini kullanarak sentezleme yöntemleridir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, insan sağlığına ve çevreye zarar vermeyen, sabit sürtünme katsayısına sahip, beklenen balata performansını sergileyebilecek, Türkiye'deki değerli bor rezervlerinin ekonomik ve teknolojik olarak değerlendirmesini içeren yeni bir balata malzemesinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma malzeme tetrahedronu doğrultusunda yapılmıştır. Malzeme tetrahedronu, yapı, işlem, özellik ve performans arasındaki ilişkiyi belirtmek için kullanılan bir modeldir. Malzeme bilimi ve mühendisliği disiplini bu temel bileşenler üzerinden oluşmaktadır. Çalışmada fren balatası bileşenleri literatürden faydalanılarak uygun amaçlarda ve uygun oranlarda kullanılmıştır. Numunelerin üretimi, bileşenlerin dağılımı homojen olacak şekilde yapılmıştır. Bileşenlerin doğru kullanımı ve homojen dağılımı sayesinde kararlı malzeme yapısı elde edilmiştir. Fren balatalarının üretimi toz metalurjisi yöntemi ile yapılmıştır. Sıcaklık ve basınç etkisi ile yapı bütünlüğü daha iyi sağlanmıştır. Balata özellikleri malzeme yapısında doğru ve orantılı malzemeler kullanılıp homojen dağılımın sağlanması, uygulanan toz metalurjisi yöntemi işlemleri doğrultusunda oluşmaktadır. Bu çalışmanın ana unsuru olan bor karbür ilavesi ile de fren balatası kararlı sürtünme davranışı, yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikler kazanmıştır. Tüm bu yapı, işlem, özellik yolunda fren balatasının performansı belirlenmiştir. Bu çalışmada hazırlanan bor karbür ilaveli, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen fren balata numuneleri, balatalardan beklenen kararlı sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma dayanımı gibi özellikleri karşılayarak fren balatasından beklenen performansı isterlerini sağlayabileceğini göstermiştir.

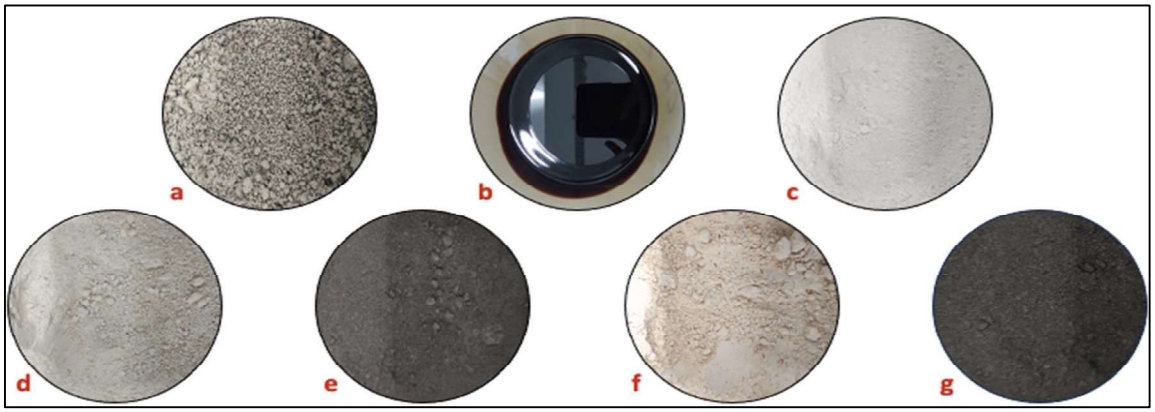
5.1. Malzeme

Borun bileşiklerinden biri olan bor karbür, iyi termal özellikler, yüksek sertlik gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu üstün özelliklerin ışığında, balata bileşiminde aşındırıcı malzeme olarak bor karbürün kullanılmasının balata malzemesinin özelliklerinde olumlu etkiler sağlayacağı düşünülmüştür. Fren balatası bileşimine farklı miktar ve boyutlarda bor karbür ilavesi yapılarak numuneler üretilmiştir ve çeşitli testler ile bileşimin sergilediği davranışlar incelenmiştir.

Numune kompozisyonu literatürdeki çalışmalara göre belirlenmiştir (Baklouti, Cristol, Desplanques ve Elleuch, 2015; Eriksson ve Jacobson, 2000; Sugözü, Buldum ve Sugözü, 2018; Yanar ve diğerleri, 2022). Çizelge 5.1.'de belirtildiği üzere takviye elemanı olarak taşyünü, bağlayıcı olarak fenolik reçine, dolgu malzemesi olarak barit, sürtünme düzenleyici olarak hekzagonal bor nitrür ve bor karbür kullanılmıştır. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalara ilave olarak kütlesel olarak %0,5, %1, %3 bor karbür kullanılmıştır. Bor karbür 1-3 µm ve 1-10 µm olarak iki farklı boyutta ilave edilmiştir. Bor karbürün etkisini görebilmek amacıyla bor karbür ilavesiz ham numune de üretilmiştir.

Çizelge 5.1. Bor karbürün %0, %1, %3, %5 oranlarında eklenmesi durumu

Kullanım	Bileşen	Malzeme Miktarı(%)
Takviye	Taşyünü	35
Bağlayıcı	Fenolik Reçine	12
Sürtünme Elemanları	h-BN	1.5
	Bor Karbür	0-0.5-1-3
	Grafit	10
Dolgu	Barit	37,5-36,5-34,5-32,5
	CNSL (cashew)	4



Şekil 5.1. Numune bileşenleri; a) taşyünü, b) CNSI (cashew), c) h-BN, d) barit, e) grafit, f) fenolik reçine, g) bor karbür

5.2. Numune Üretimi

Numuneler toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Numune üretimine ilk olarak kullanılacak bileşenlerin Resim 5.1'deki hassas teraziyle tartılması ile başlandı. Bileşenlerin tartımı

Çizelge 5.1’deki (bkz.) oranlara göre malzemelerin yoğunluğu göz önünde bulundurularak yapıldı. Çalışmada bor karbürün etkisinin gözlemlenmesi amaçlandığı için, bor karbür kütlesel olarak %0, %0,5, %1, %3 oranında değiştirilerek her orandan üçer numune olacak şekilde tartım yapıldı. Değişen bor karbür oranını telafi etmek için dolgu malzemesi olarak kullanılan barit oranı da aynı ölçüde değiştirildi (37,5-36,5-34,5-32,5). Buna ek olarak bor karbür aynı oranlarda, 1-3 µm ve 1-10 µm olmak üzere iki farklı tane boyutunda eklendi. Bunu amacı tane boyutunun balata üzerindeki etkileri gözlemlemekti. Tartım sonrası hazırlanan bileşenlerden taşyünü ve CNSL homojen oluncaya dek karıştırıldı. Hazırlanan bu karışıma %1,5 hekzagonal bor nitrür, %37,5-%36,5-%34,5-%32,5 barit, %10 grafit, %12 fenolik reçine ve %0-%0,5-%1-%3 bor karbür de eklenerek Resim 5.2’deki bıçaklı karıştırıcıda 5 dakika karıştırıldı. Kullanılan bileşenlerin görüntüleri Şekil 5.1’de verilmiştir.



Resim 5.1. Hassas terazi



Resim 5.2. Karıştırıcı

Resim 5.3’deki pin-on-disk numune kalıbı 80°C’ye ısıtıldı. Hazırlanan karışımdan kalıp kısmına eklendi, sıcaklık 150 °C’ye çıkarıldı ve basınç uygulandı. Sıcaklık değeri 150°C’ye çıktıktan sonra 15 dakika kürlendi. 15 dakika sonrasında Resim 5.4’deki gibi 20x15mm boyutlarında silindir şekildeki numune kalıptan çıkarıldı. Bu şekilde her bileşimden 3 adet olarak toplamda 21 numune üretildi ve her biri numaralandırıldı. Bunlara ek olarak bor karbürün etkisini gözlemleyebilmek amacı ile bor karbür içermeyen üç numune daha üretildi. Pin-on-disk numune kalıbından çıkan numuneler 200°C’de 20 dakika fırına atılarak son kürleme işlemi yapıldı. Bu işlemin amacı ısının etkisi ile reçinenin bağlayıcı etkisini arttırmaktır.



Resim 5.3. Pin-on-disk numune kalıbı



Resim 5.4. Numuneler

5.3. Pin-On-Disk Triboloji Testi

Pin-on-disk triboloji testi NF F 11 292 standardına göre yapılmıştır. Balata numuneleri pin-on-disk triboloji test cihazındaki disk ile temas edecek kısımlara yerleştirilmek üzere Şekil 5.6'daki kalıplara yerleştirildi. Cihazın kapasitesi ile tek seferde üç numune de test edildi. Böylelikle aynı bileşimdeki balata numunelerinin triboloji testi aynı anda yapıldı. Teste balata numunelerinin yüzeylerinin alıştırılma süreci ile başlandı. Test periyodu 90 saniye rölanti ve sonrasında 20 saniye frenleme şeklinde, 0,6 MPa basınç altında olarak belirlendi. Bu işlem numunelerin yüzeyleri parlak düz bir yüzey olana kadar devam ettirildi. Alıştırma süreci, yapılacak triboloji testinde disk ile numune yüzeyinin tam olarak temas sağlayabilmesi amacıyla yapıldı. Numunelere uygulanacak kuvvet Eş. 5.1 kullanılarak 565,2 N olarak belirlendi:

$$P = F / S \tag{5.1}$$

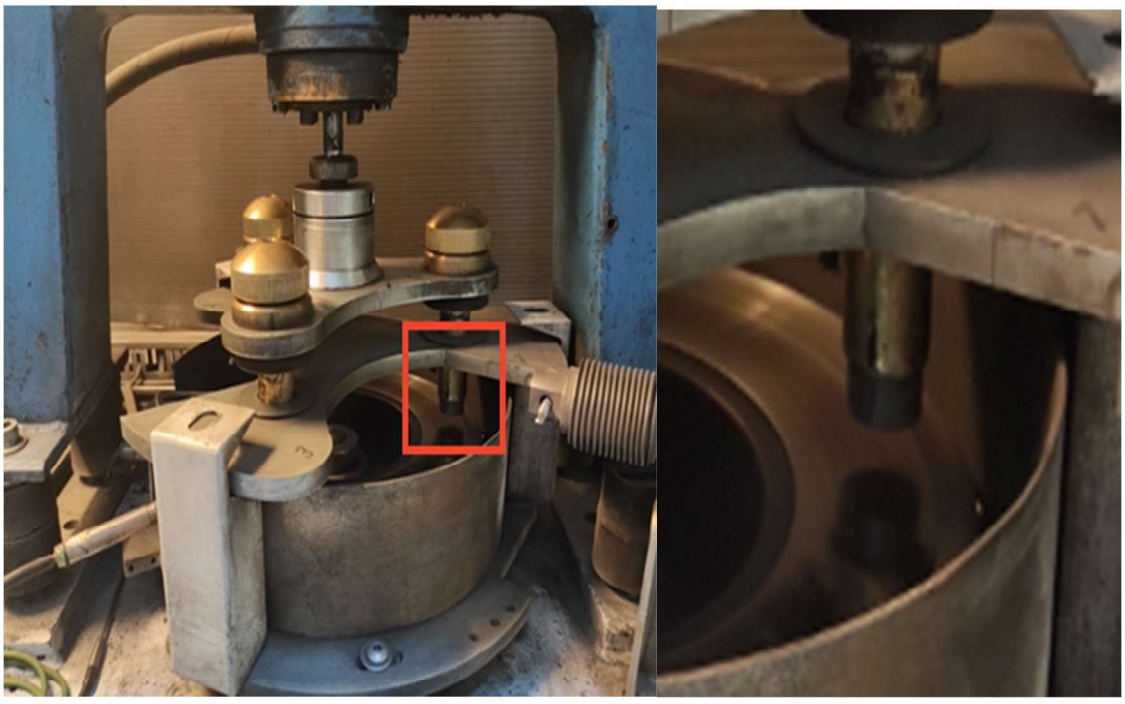


Resim 5.5. Pin-on-disk triboloji testi için yerleştirilen numuneler

Alıştırma sürecinin ardından numuneler kalıplardan çıkarıldı ve aşınma ile oluşan tozlardan temizlendi. Hassas terazide tartıldı ve Resim 5.6'daki gibi tekrar cihaza yerleştirildi. Çizelge 5.2'de verildiği gibi test, 90 saniye rölanti ve 20 saniye frenleme süreleri ile 0,6 MPa basınç altında, 15 periyod olacak şekilde yapıldı. Balatalar rölanti sırasında disk ile temas etmemekte, frenleme sırasında aşağı inen sistem sayesinde disk ile sürtünmektedir. Her numune için aynı işlemler tekrarlandı ve numune değişimleri disk yüzeyi soğuması beklenerek gerçekleştirildi. Test sonunda numuneler temizlenerek tekrar hassas terazide tartıldı ve veriler kaydedildi. Bu veriler ile balata numunelerinin aşınma oranları tespit edildi.

Çizelge 5.2. Pin-on-disk triboloji testi çalışma verileri

Frenleme süresi	20 sn
Rölanti süresi	90 sn
Eksenel kuvvet	565,2
Disk yüzey sıcaklığı	51
Periyot sayısı	15



Resim 5.6. Pin-on-disk triboloji test sistemi

5.4. Yoğunluk Testi

Numunelerin yoğunluğu, Resim 5.7'deki cihazla, ASTM D792'ye göre Arşimet prensibi ile, ile tespit edilmiştir. Görselde de görüldüğü üzere beher su ile doldurulmuştur. Numune askısı takılıp terazinin darası alınmıştır. Numune, numune askısının üst kefesine yerleştirilerek kuru tartım değeri (W) alınmıştır. Sonrasında numune, numune askısının alt kefesine yerleştirilip yaş tartım değeri (G) alınmıştır. Yoğunluk kuru tartım değerinin yaş tartım değerine oranı olarak hesaplanmıştır. Aynı işlemler tüm numunelere yapılmıştır.



Resim 5.7. Yoğunluk ölçüm cihazı

5.5. Sertlik Testi

Balata numunelerinin sertlik testleri Resim 5.8'deki gibi Rockwell sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Testler Rockwell B skalasında 60kgf yükleme ve 1,588 mm çapında bilya ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.8. Rockwell sertlik ölçüm cihazı

5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Numunelerin yüzeylerinin incelenmesi Resim 5.9'daki JEOL JSM-6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapıldı. Numune bileşiminin homojenliği, mikroboşluklar incelendi.



Resim 5.9. Tarama elektron mikroskobu (SEM)

5.7. XRD

Balata numunelerinin XRD incelemeleri Resim 5.10'da verilen Bruker D8 Advance X ışını difraktometresi ile yapılmıştır.



Resim 5.10. X ışını difraktometresi

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Pin-On-Disk Triboloji Testi

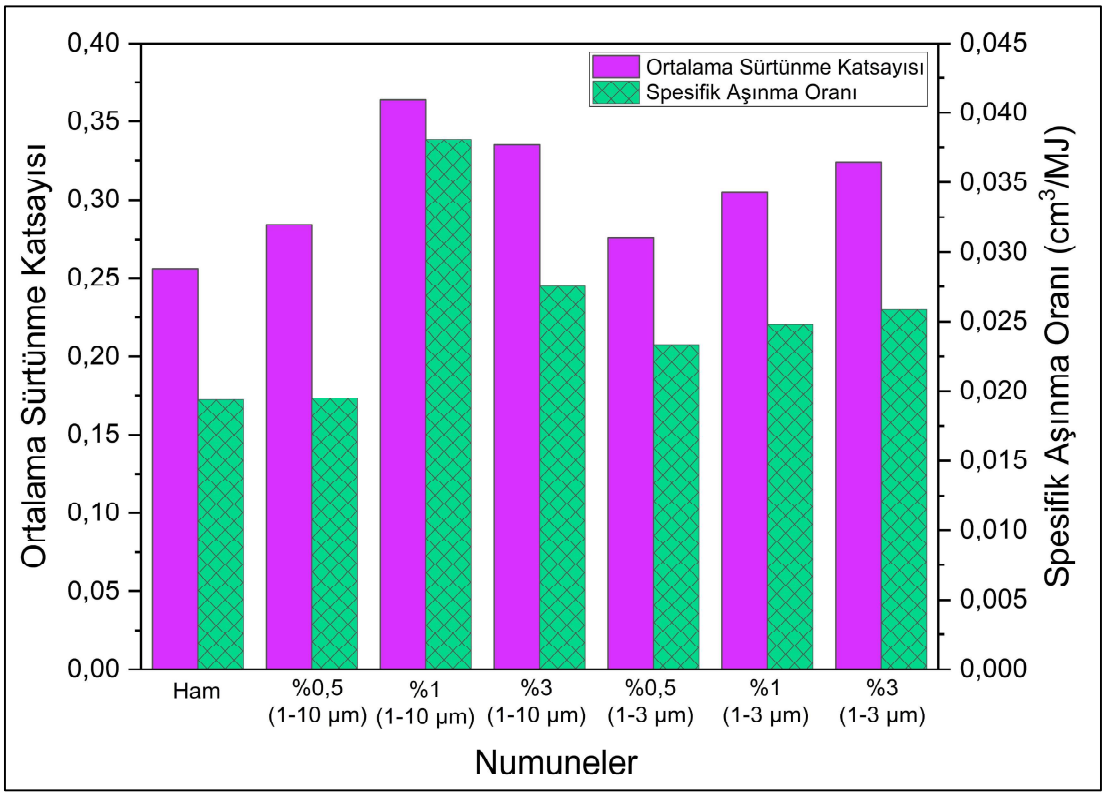
Pin-on disk triboloji testi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 6.1'deki gösterilmiştir. Test sonuçlarına göre bor karbürün 1-10 μm boyutundaki %0,5 ve %3 B_4C ilavesiyle ham malzemenin sürtünme katsayısı 0,2561'den sırasıyla 0,2840 ve 0,3350'ye çıkmıştır. %1 B_4C ilave durumunda sürtünme katsayısı 0,3639 değerine kadar çıkmıştır, bu değer çok yüksek bulunmuştur. Bunun üretim veya karıştırma kaynaklı bir problem olabileceği düşünülmektedir. Bu numunelerdeki spesifik aşınma oranı incelediğinde %0,5 ve %3 için sırasıyla 0,0194 değerinden 0,0195 ve ardından 0,0275'e çıkartarak aşınma değerleri elde edilmiştir. %1 B_4C ilavede ise 0,0381 gibi diğer numunelere kıyasla çok yüksek bir değer gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının artmasıyla doğal olarak yapının daha fazla aşınması beklenmektedir. Çünkü sürtünme katsayısının artması yüzeylerin birbiri üzerinde daha fazla sürtünmesine ve dolayısıyla daha fazla aşınmaya neden olmasına yol açar. Fakat bu durum her zaman geçerli olmayabilir, malzeme bileşimi, yüzeylerin pürüzlülüğü, çalışma koşulları ve yağlayıcıların kullanımı gibi faktörler de aşınma oranını etkileyebilir. %0,5 B_4C ilavesinde sürtünme katsayısı 0,2561 değerinden 0,2840'a çıkmasına rağmen aşınma oranı değişmemiştir. B_4C'ün 1-3 μm boyutunda yapıya ilave edilmesi, eklendiği %0,5 / 1 / 3 oranlarında sürtünme katsayısında sırasıyla %7,8 / 19,1 / 26,5 artış sağlamıştır. Bunun yanında hem sürtünme katsayısı artışında hem de aşınma oranında lineer artış görülmüştür.

Bu lineer artış balata numunesinin kararlı bir sürtünme davranışı gösterdiğini temsil etmiştir. Kararlı sürtünme katsayısı, balataların ani fren ve frenleme sırasında açığa çıkan sıcaklık karşısında sürtünme katsayısında ani düşüş ve yükseliş olmadığı anlamına gelmektedir (Borawski, 2020). Sürtünme katsayısındaki artış ile aşınma oranının artması da beklenen bir sonuçtur. Bu artışın çok yüksek seviyede olmaması balata malzemesinin uzun ömürlü ve mukavemetli olması açsından önemlidir. Bu özellikler balataların istenen performansı gösterebilmesi için gerekli olan en önemli özelliklerdir. 1-3 μm boyutundaki bor karbür eklenmesi durumunda sürtünme katsayısı %0,5'ten %1'e arttırıldığında sürtünme katsayısı %10,5 artarken, aşınma oranı %6 artmıştır, aynı zamanda %1'den 3'e yükseltildiğinde sürtünme katsayısı %6,2 artmış, aşınma oranı ise %4 artmıştır. Bu sonuçlar ışığında 1-3 μm

B_4C başarılı bir tribolojik ilave olmuştur diyebiliriz. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranları Şekil 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Pin-on-disk triboloji test sonuçları

Bileşim (%B_4C)	Spesifik Aşınma Oranı (cm^3/MJ)	Sürtünme Katsayısı
Ham	0,0194	0,2561
0,5% (1-10μ)	0,0195	0,2840
1% (1-10μ)	0,0381	0,3639
3% (1-10μ)	0,0275	0,3350
0,5% (1-3μ)	0,0234	0,2760
1% (1-3μ)	0,0248	0,3050
3% (1-3μ)	0,0258	0,3240

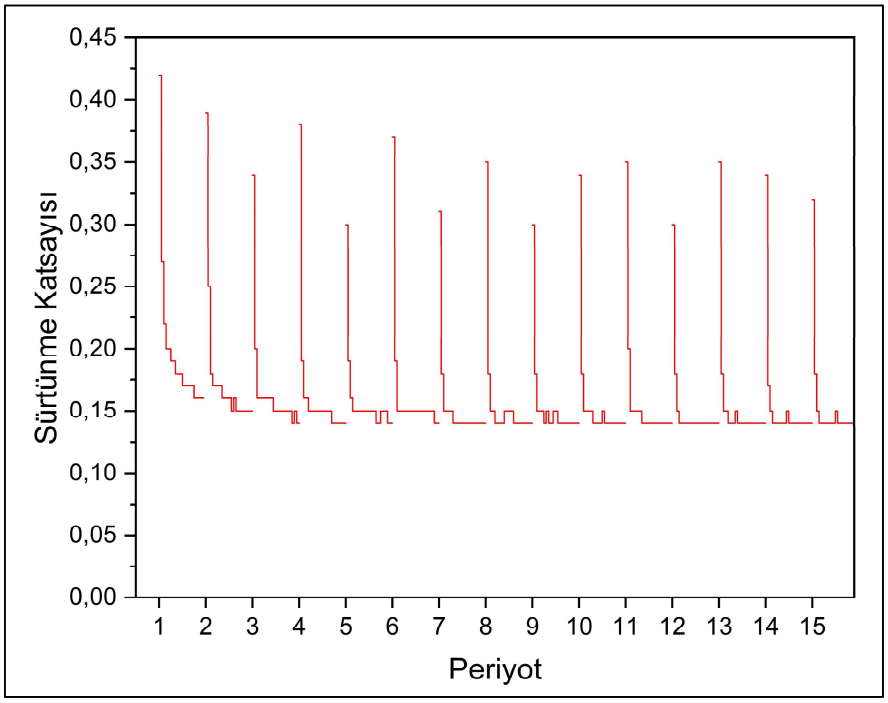


Şekil 6.1. Ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı

Boyutlar karşılaştırıldığında 1-10 µm bor karbür katkısının, 1-3 µm'ye göre %0,5 B_4C ilavesinde %2,9, %3 B_4C ilavesinde %3,4 oranında iyileştirme sağladığı görülmüştür. Bunun

sebebi olarak küçük boyuttaki parçacıkların daha düşük bir arayüzey kuvvetinin olması söylenebilir (Cho ve diğerleri, 2008). Bu durum sebebiyle parçacıkların ayrışması daha kolay olur ve sürtünme yüzeyindeki efektif temas alanı düşer. Sonrasında da bu sürtünme katsayısında yeteri kadar iyileşme sağlanmamasına yol açar (Yanar ve diğerleri, 2022).

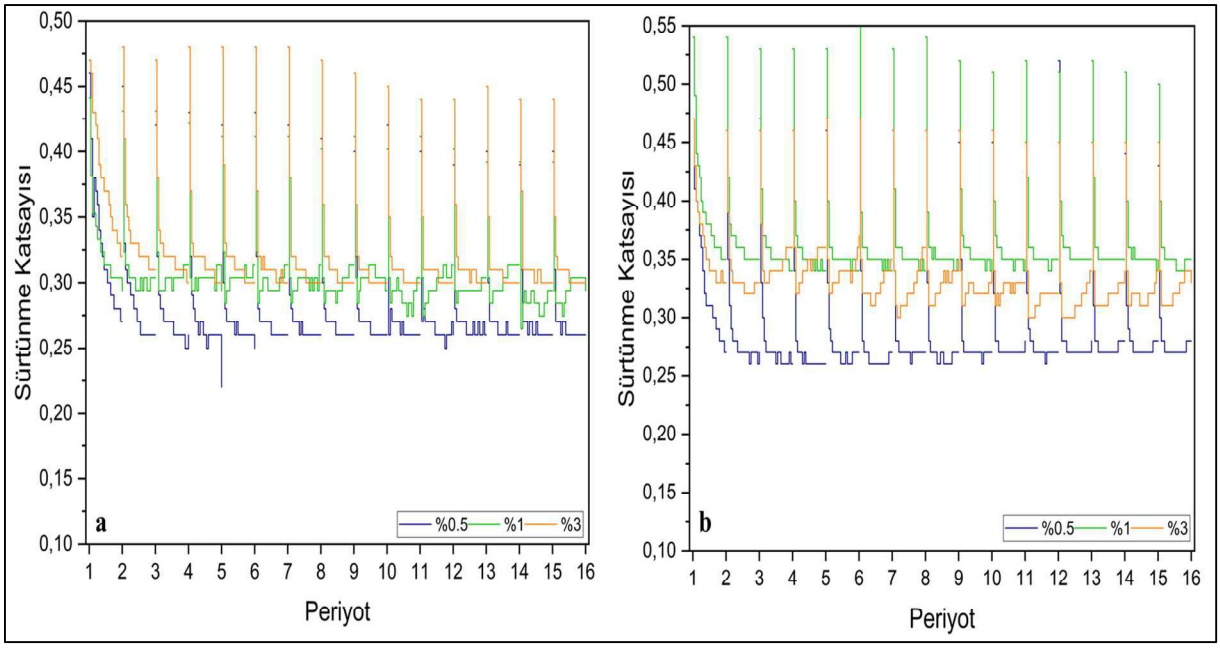
Sürtünme katsayısının frenleme periyodu boyunca olan kararlılığı da balata malzeme seçiminde önemli bir etkendir. Özellikle yapıya B_4C gibi çok sert bir malzemenin ilave edilmesi sürtünme katsayısında stabilite problemine yol açabilir. Bu sebeple periyot bazında sürtünme katsayısı değişimine bakmak gerekmektedir. Ham numuneye ait periyot bazındaki sürtünme katsayısı değişimi Şekil 6.2'de verilmiştir. Ham numunede sürtünme katsayısında stabilite var diyebiliriz.



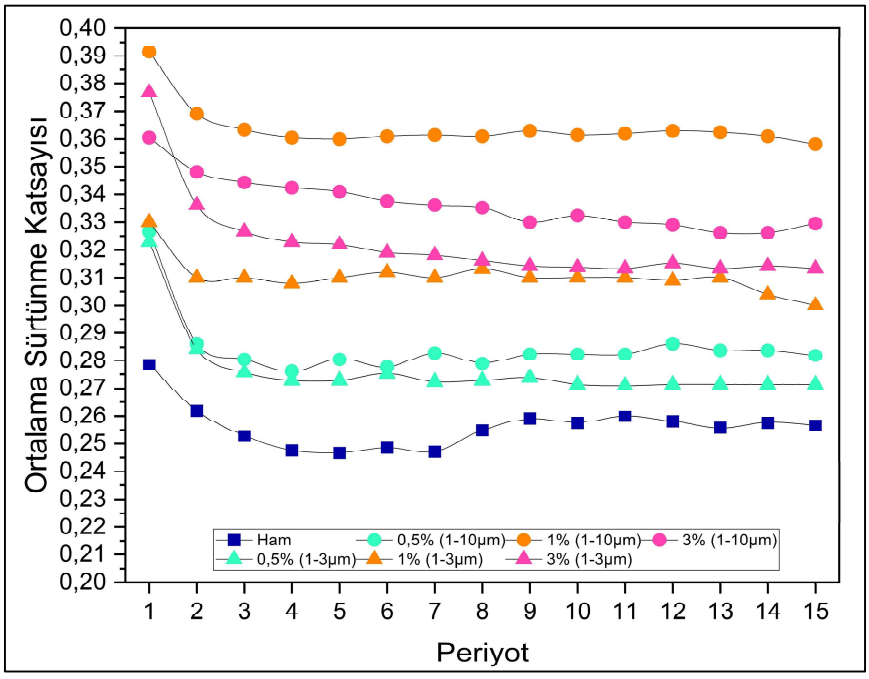
Şekil 6.2. Ham numunenin frenleme periyotlarındaki sürtünme katsayısı değişimi

Şekil 6.3'de 1-3µm ve 1-10µm B_4C ilavesi yapılmış malzemelerin sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir. İki boyuttaki ilavelerde de stabilite gözükmektedir. Periyot ilerledikçe sürtünme katsayısında düşüş veya küçük artışlar gözükebilmektedir. Bunun sebebi, aşınma yüzeyindeki değişiklikler olabilir, örneğin ilerlemiş yüzeyde yüksek miktarda bor karbür veya aşınmadan kalan atıklar denk gelip sürtünme katsayısını arttırmış olabilir veya tam tersi şekilde yüzeyde yüksek miktarda grafit denk gelip daha düşük bir sürtünme katsayısı elde

edilebilir. Bunun tespiti için periyot bazında yüzeysel inceleme yapabilecek bir düzenek gerekmektedir. Şekil 6.4'te de tüm numunelerin periyot bazında ortalama sürtünme katsayısı değişimi verilmiştir.



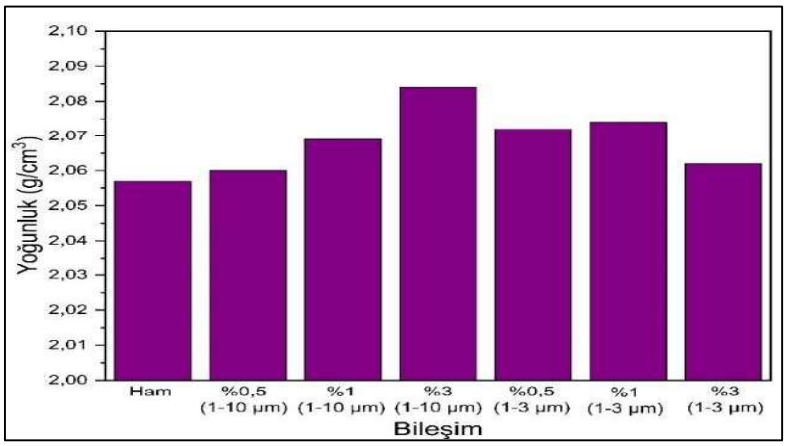
Şekil 6.3. a)1-3µm, b) 1-10µm B_4C ilavesi yapılmış malzemelerin periyot bazında sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 6.4. Periyot bazında tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değişimi

6.2. Yoğunluk Testi

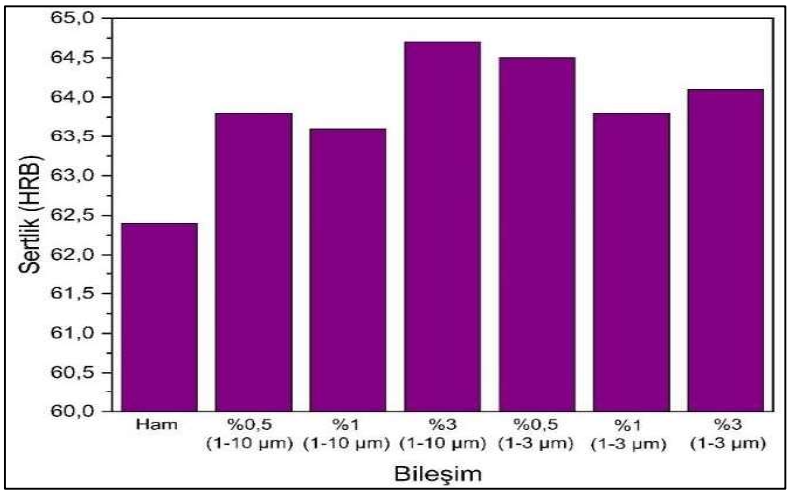
Tüm numunelerin ölçümü yapılarak kuru/yaş ağırlık oranı ile yoğunlukları tespit edilmiştir. Aynı bileşimdeki numunelerin ölçümlerinin aritmetik ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Teorik olarak beklenen yoğunluk 2 g/cm^3'dü, teorik yoğunluğa yaklaşık %3-4 aralığında yaklaşılmıştır.



Şekil 6.5. Bileşimlerin yoğunluk değerleri

6.3. Sertlik Testi

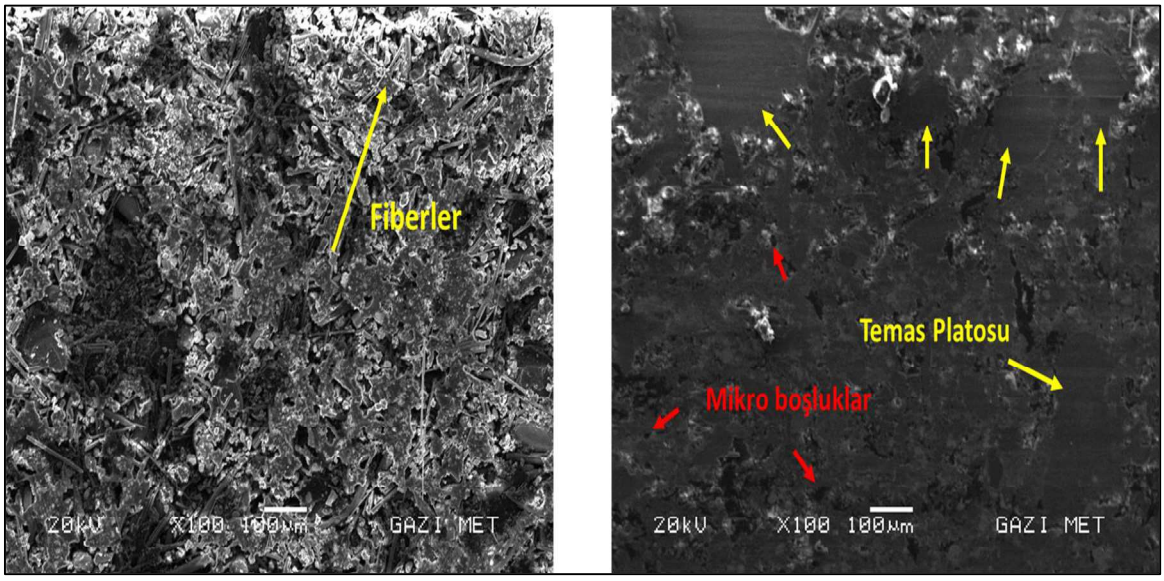
Rockwell B skalasında testler yapılmıştır. Ham numuneye göre B_4C ilavesi küçük bir sertlik artışına sebep olmuştur. Fakat B_4C ilave edilmiş numuneler arasında sertlik konusunda boyutsal veya oransal olarak bir ilişki bulunamamıştır.



Şekil 6.6. Bileşimlerin sertlik değerleri

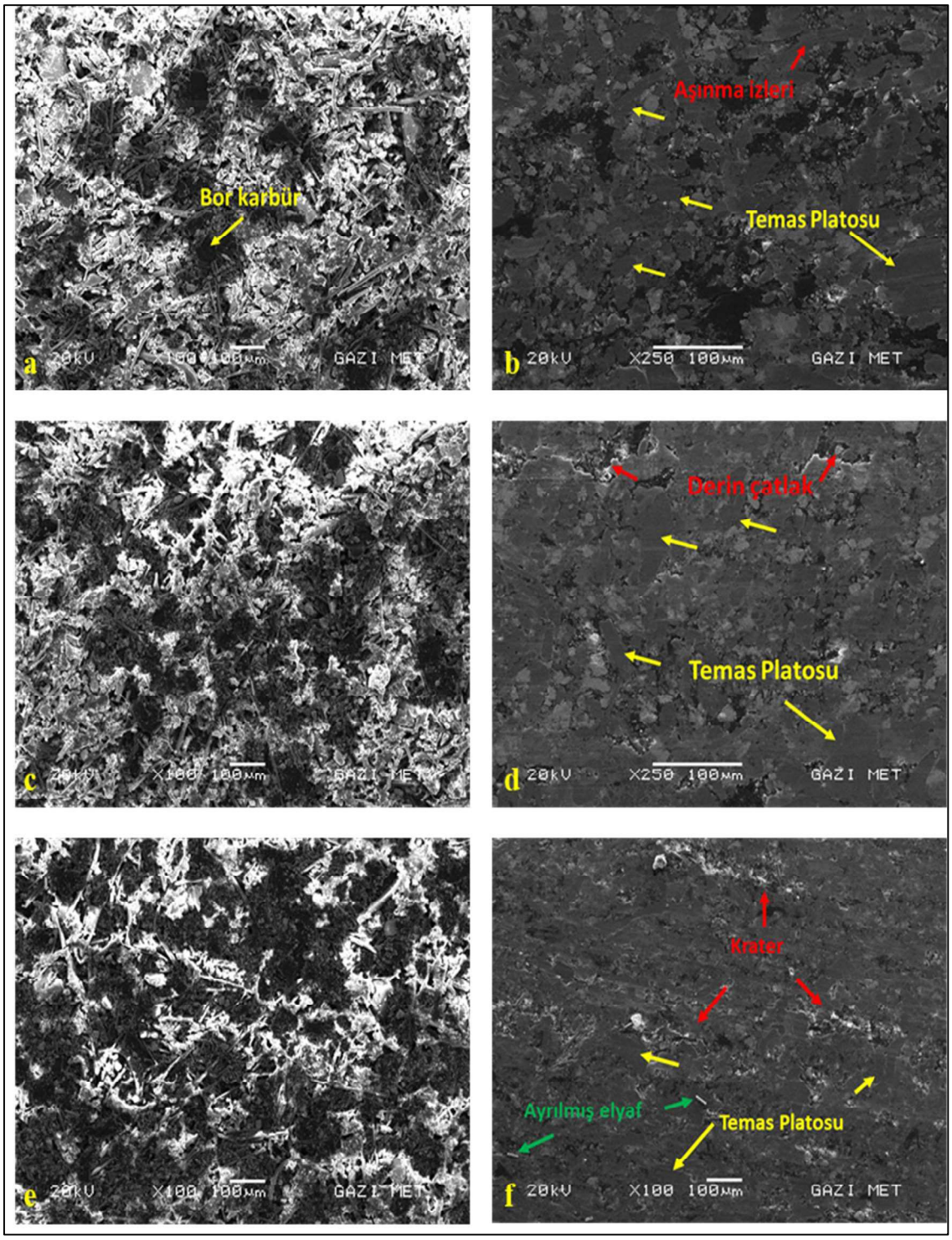
6.4. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM)

Resim 6.1, 6.2, 6.3'te numunelerin aşınma öncesi ve aşınma sonrası çekilen SEM görüntüleri verilmiştir. Resim 6.1'de ham numunenin görüntüleri mevcuttur. Aşınma öncesi görüntüde fiberli yapı ve homojen dağılım net olarak gözlemlenmektedir. Aşınma sonrasındaki yüzey incelendiğinde bileşimin alındığı çalışmadaki yüzeyle benzer bir görüntü elde edilmiştir (Yanar ve diğerleri, 2022).



Resim 6.1. Ham numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü

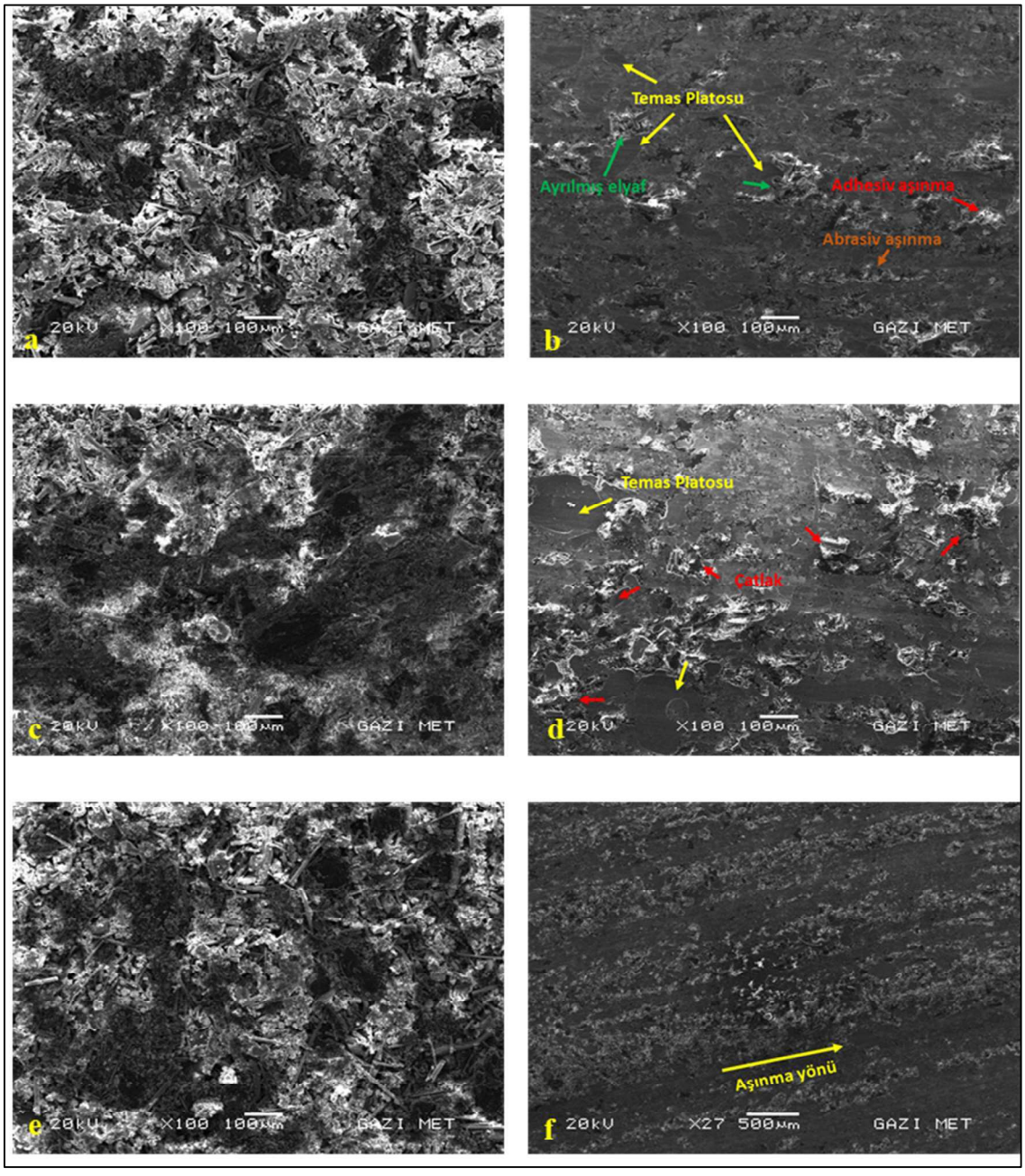
Resim 6.2'de 1-3 µm bor karbür ilave edilmiş numunelerin görüntüleri vardır. Aşınma öncesi görüntülerde (a-c-e) bor karbür oranı arttıkça yapıdaki varlığı (siyahlıklar) net şekilde görülmektedir ve oranın arttığı görüntülerden de belli olmaktadır. Aşınma sonrası görüntülerde aşınma izleri net şekilde görülmektedir. Bor karbür oranı arttıkça temas platosunun genişliğinin arttığı görülmüştür. Bu da sürtünme katsayısının arttığını morfolojik olarak da doğrulamaktadır. Temas platolarının yüksek varlığı ayrıca sürtünme katsayısının da stabilitesini işaret etmektedir. Bor karbür oranı arttıkça ayrıca aşınma yüzeyindeki çatlaklar, abrasif aşınma ve krater yapıları da daha sık görülmüştür. Bunlar bor karbürün çok yüksek sertliğinden kaynaklı olabilir. Diğer bir sebep, bor karbürün küçük boyutta olmasından dolayı matrisle oluşturduğu arayüzeyin zayıf kalması olabilir. %3 bor karbür ilave edilmiş yapının aşınma sonrası görüntüsünde ayrılmış elyaflar görülmektedir. Bunlar diğer parçacıklar ile birleşip abrasif etkiyi arttırırlar (Yanar ve diğerleri, 2022).



Resim 6.2. 1-3 µm a-b) %0,5, c-d) %1, e-f) %3 B_4C ilaveli numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü

1-10 µm bor karbür ilave edilmiş yapılar incelendiğinde %0,5 ve %3 takviyeli görüntülerde homojen bir dağılım görülmektedir. Fakat %1 takviyeli görüntülerde yapıda bor karbürün homojen dağılmadığı görülmüştür. Homojenliğin daha az olduğu numunelerde (Resim 6.3.c) toz karıştırma süresinin yetersiz olması veya matris-takviye arası boyut farkının

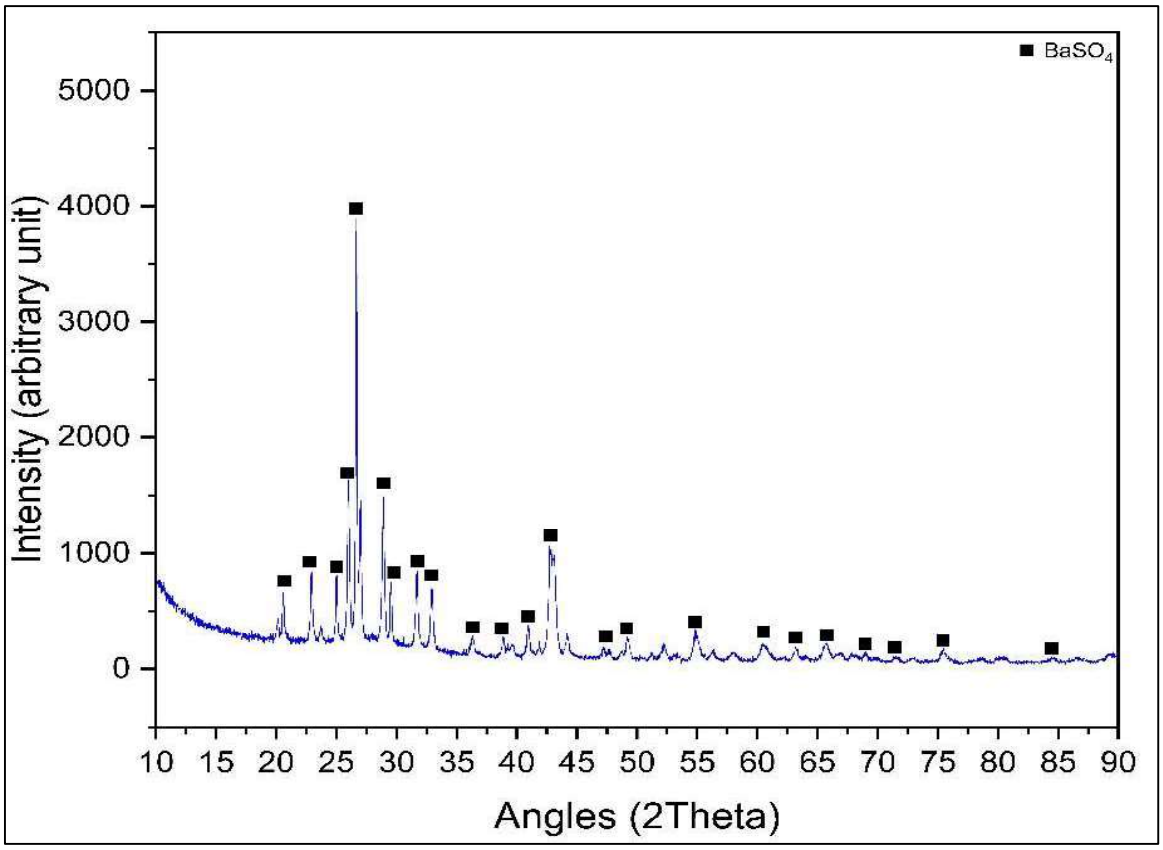
olması bu duruma sebep olmuş olabilir. Bunu önlemek için tozların karıştırılması uygun ekipman ve uygun sürelerde yapılmalıdır. Homojen dağılım olmaması sebebiyle de aşınma yüzeyinde derin çatlaklar çok yüksek sayıdadır, bu sebeple %1 takviyeli 1-10 µm bor karbür yapısının aşınma oranı çok yüksek çıkmıştır. %0,5 takviyeli yapıda ayrılmış elyaflar görülmektedir, ayrıca hem abrasiv, hem adhesiv aşınma aynı yapıda mevcuttur, bunun sebebi aşınmanın olduğu noktalardaki farklı fazlardır. %3 takviyeli yapının aşınma yüzeyi çok düzgün çıkmıştır (Kosbe ve diğerleri, 2020).



Resim 6.3. 1-10 µm a-b) %0,5, c-d) %1, e-f) %3 B_4C ilaveli numune aşınma öncesi ve sonrası SEM görüntüsü

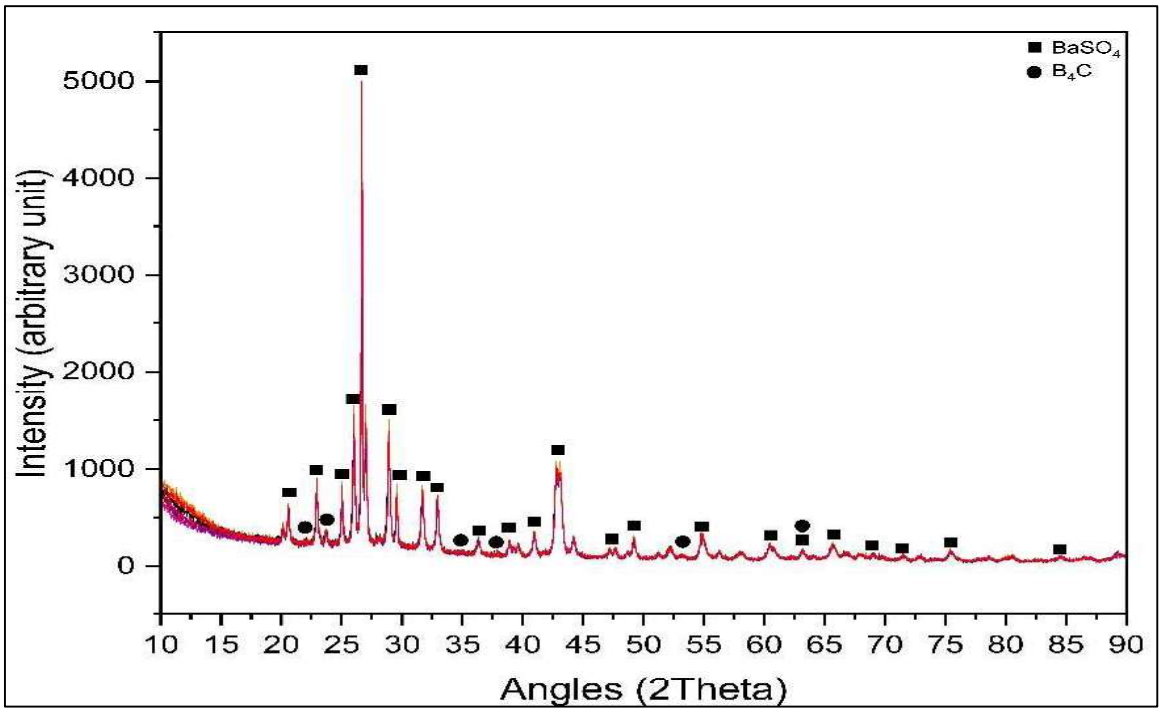
6.5. XRD İncelemesi

Ham haldeki numunelere ait XRD deseni Şekil 6.7'de verilmiştir. Ham numunede dolgu olarak kullanılan ortorombik kristal yapıdaki baritin kristalografisi görülmektedir.



Şekil 6.7. Ham numunenin XRD grafiği

Şekil 6.8'de bor karbür ilave edilmiş numunelerin toplu XRD grafiği verilmiştir. Tüm ilaveli numunelere XRD yapılmıştır, fakat aralarında herhangi bir farka rastlanmamıştır, bu sebeple hepsi bir grafik üzerinde değerlendirilmiştir. Desende B_4C ilavesini kanıtlayacak piklere ihtiyaç bulunmaktadır. Rombohedral yapıdaki B_4C'ün 22/24/34/37/53/63°'de piki görülmüştür. Literatür araştırıldığında bor karbürün 37° haricinde 19/22/23/32/34/53/63/66/72/76 derecelerde pikleri gözlemlenmiştir (Gökmeşe, Bostan, Yılmaz ve Taşçı, 2019; Jiang, 2022; Khorrami, Baharvandi ve Lotfi, 2016). Fakat en yüksek piki 37°'de alınmıştır. Literatürde incelenen çalışmalarda da en yüksek pik bu değerdedir. En net kırınım (021) düzlemindeki 37° kırınımıdır. Diğer kırınımların düzlemleri 22° (003), 24° (012), 34° (110), 53° (101), 63° (303)'dir (Abbas Shafqat ve diğerleri, 2019; Biçer ve diğerleri, 2020; Hamd, Ramizy ve Ismail, 2022).



Şekil 6.8. Bor karbür içerikli numunelerin XRD grafiği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bor karbürün fren balata malzemesi olarak kullanılabilirliği ve bor karbür boyutunun fren balata özelliklerine etkisi araştırılmıştır. 1-10 µm ve 1-3 µm boyutundaki bor karbür %0,5, %1, %3 olmak üzere üç farklı miktarda kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin pin-on disk triboloji test cihazında triboljik testleri yapılmıştır ve testlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- 1-10 µm boyutundaki %0,5 ve %3 ilavesi malzemenin sürtünme katsayısı 0,2561'den sırasıyla 0,2840 ve 0,3350'ye çıkmıştır. %1 ilave durumunda sürtünme katsayısı 0,3639 değerine kadar çıkmıştır. Numunelerdeki spesifik aşınma oranı incelediğinde %0,5 ve %3 için sırasıyla 0,0194 değerinden 0,0195 ve ardından 0,0275'e çıkartarak aşınma değerleri elde edilmiştir. %1 ilavede ise 0,0381 gibi diğer numunelere kıyasla çok yüksek bir değer gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde %1 bor karbür ilave edilmiş numunede homojen bir dağılım olmadığı ve aşınma yüzeyinde çok fazla derin çatlak olduğu görülmüştür. Aşınma değerinin yüksek çıkması bu sebepten olabileceği değerlendirilmektedir (Hassan, 2012).
- 1-10 µm boyutundaki %0,5 ilavede sürtünme katsayısı 0,2561 değerinden 0,2840'a çıkmasına rağmen aşınma oranı değişmemiştir. Bu da başarılı bir tribolojik bir ilave olması olarak yorumlanabilir (Akıncıoğlu ve diğerleri, 2018; I. Mutlu ve diğerleri, 2007; İ. Mutlu ve Sugözü, 2008; Yanar ve diğerleri, 2022)
- 1-3 µm boyutunda bor karbürün yapıya ilave edilmesi eklendiği %0,5, %1, %3 oranlarında sürtünme katsayısını iyileştirmiştir. Her sürtünme katsayısı artışında hem de aşınma oranında lineer artış görülmüştür. Fakat yüzdesel olarak sürtünme katsayısındaki artış, aşınma oranındaki artıştan daha yüksektir, bu sebeple bu oranlardaki 1-3 µm bor karbür başarılı bir tribolojik ilave olmuştur denebilir (Akıncıoğlu ve diğerleri, 2018; I. Mutlu ve diğerleri, 2007; İ. Mutlu ve Sugözü, 2008; Yanar ve diğerleri, 2022).
- 1-10 µm bor karbür katkısının 1-3 µm'ye göre sürtünme özelliklerinde az bir oranla da olsa daha fazla iyileştirme sağladığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak küçük boyuttaki parçacıkların daha düşük bir arayüzey kuvvetinin olması söylenebilir. Bu durum sebebiyle parçacıkların ayrışması daha kolay olur ve sürtünme yüzeyindeki efektif temas alanı düşer. Sonrasında da bu sürtünme katsayısında yeteri kadar iyileşme sağlanmamasına yol açar (Xiao ve diğerleri, 2016).

- Her iki boyuttaki ilave de frenleme periyotları boyunca sürtünme katsayısında stabilite görülmüştür. Periyot ilerledikçe sürtünme katsayısında düşüş veya küçük artışlar gözükebilmektedir. Bunun sebebi, aşınma yüzeyindeki değişiklikler olabilir, örneğin ilerlemiş yüzeyde yüksek miktarda bor karbür veya aşınmadan kalan atıklar denk gelip sürtünme katsayısını arttırmış olabilir veya tam tersi şekilde yüzeyde yüksek miktarda grafit denk gelip daha düşük bir sürtünme katsayısı elde edilebilir (Yanar ve diğerleri, 2022).
- Bor karbür oranı arttıkça temas platosunun genişliğinin arttığı görülmüştür. Bu da sürtünme katsayısının arttığını morfolojik olarak da doğrulamaktadır. Temas platolarının yüksek varlığı ayrıca sürtünme katsayısının da stabilitesini işaret etmektedir. Bor karbür oranı arttıkça ayrıca aşınma yüzeyindeki çatlaklar, abrasif aşınma ve krater yapıları da daha sık görülmüştür. Bunlar bor karbürün çok yüksek sertliğinden kaynaklı olabilir (Sachit, Bongale, Kumar ve Jadhav, 2023). Diğer bir sebep de; bor karbürün küçük boyutta olmasından dolayı matrisle oluşturduğu arayüzeyin zayıf kalması olabilir (Cho ve diğerleri, 2008).
- Sertlik değerlerinde ham numuneye göre az da olsa bir artış görülmüştür; ancak bor karbürlü numuneler arasında çok bir fark görülmedi. Bunun sebebi bor karbürün düşük oranlarda eklenmesi olabilir.
- Bakır, asbest gibi doğaya ve insan sağlığına zararlı olan malzemeler yerine balata bileşiminde bor mineralleri kullanılması, hem ülkemizin bor rezervlerinin değerlendirilmesi ile ülkemize katkı sağlamakta hem de çevre ve insan sağlığını tehtid etmeyen balatalar üretimini sağlamıştır.

Bu çalışma ile bor karbürün bir balata malzemesi sürtünme elemanı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Kompozisyonlar içerisinde değerlendirmeler yapılarak optimum bileşim bulunup bor karbür bu şekilde kullanılabilir. İlerleyen çalışmalar için;

- Bor karbürün yapıdaki homojen dağılımına daha fazla dikkat edilip düzgün ve takip edilebilir karıştırma prosesleri yapılabilir.
- %1-%3 arasındaki oranlarda denemeler yapılabilir ve %3'ten yüksek oranlar denenerek optimum oranlar bulunabilir.
- Yapıdaki dolguların oranı değiştirilerek maliyet çalışmaları yapılabilir.
- Bu çalışmada dinamik tribolojik özellikler ve sıcaklık bazındaki özellikler incelenmemiştir. İlerleyen çalışmalarda bu konular üstüne düşülebilir.

- Yağlayıcı ve aşındırıcı dengesi için bileşim çalışmaları yapılabilir ve optimum denge için istatistiksel bir model üzerine çalışmalar ilerletilebilir.
- Bor karbür ilaveli fren balatalarının ömürleri konusunda bir çalışma yapılabilir. Bu sayede üretilecek olan fren balatasının ne kadar süre ve mesafe boyunca performansını sürdürebileceği öngörülebilir.

KAYNAKLAR

Abbas, Q., Rafi-Ud-Din, Shahzad, M., Khan, M., Mehmood, S., Syed, W. A., Ali, T. (2019). Mechanical, tribological, and electrochemical behavior of hybrid aluminum matrix composite containing boron carbide (B_4C) and graphene nanoplatelets. *Journal of Materials Research*, 34(18), 3116-3129.

Agunsoye, J. O., Bello, Sefiu. A., Bamigbaiye, A. A., Odunmosu, K. A. ve Akinboye, I. O. (2018). Recycled ceramic composite for automobile brake pad application. *Journal of Research in Physics*, 39(1), 35-46.

Ahdy, M. A., Ali, M. K. A., Mourad, M. ve Abd-El-Tawwab, A. M. (2021). Review of automotive brake lining materials and their tribological properties., *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology*, 236(7), 1445-1465.

Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327-363.

Akıncıoğlu, G., Öktem, H., Uygur, I. ve Akıncıoğlu, S. (2018). 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(9), 4727-4737.

Akkaş, M. ve Elfghi, A. (2022). TiB_2 Parçacık Takviyeli AlCuMg Kompozitlerin Üretilebilirliğinin Araştırılması. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 4(2), 118-128.

Alkan, M. (2008). *Kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi yöntemi ile bor karbür tozu üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 32-36.

Andrey, D., Werner, O. ve Heinz, K. (2011). About the influence of automotive brakepad composition on frictional performance. Results of nano-scale modeling. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2(2), 58-64.

Akar, M., Sugözü, İ., Bilgi, G., Kumlu, U. ve Numbers, O. (2023). Analysis of the wear and friction of brake pad added cashew and ulexite using ANSYS. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 12(3), 83-91.

Avcıoğlu, S., Buldu, M., Kaya, F., Üstündağ, C. B., Kam, E., Menceloğlu, Y. Z., Kaya, C. (2020). Processing and properties of boron carbide (B_4C) reinforced LDPE composites for radiation shielding. *Ceramics International*, 46(1), 343-352.

Aydın, D. Y., Gürü, M., Ayar, B. ve Çakanyıldırım, Ç. (2016). Bor Bileşiklerinin Alev Geciktirici ve Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Pigment Olarak Uygulanabilirliği. *Bor Dergisi*, 1(1), 33-39.

Aydın, M. (2022). *Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri* (5. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 205.

Baklouti, M., Cristol, A. L., Desplanques, Y. ve Elleuch, R. (2015). Impact of the glass fibers addition on tribological behavior and braking performances of organic matrix composites for brake lining. *Wear*, 330-331, 507-514.

Bevilacqua, M., Babutskyi, A. ve Chrysanthou, A. (2015). A review of the catalytic oxidation of carbon–carbon composite aircraft brakes. *Carbon*, 95, 861-869.

Bian, G. ve Wu, H. (2015). Friction and surface fracture of a silicon carbide ceramic brake disc tested against a steel pad. *Journal of the European Ceramic Society*, 35(14), 3797-3807.

Biçer, H., Akdoğan, E. K., Şavkllylldlz, I., Haines, C., Zhong, Z. ve Tsakalakos, T. (2020). Thermal expansion of nano–boron carbide under constant DC electric field: An in situ energy dispersive X-ray diffraction study using a synchrotron probe. *Journal of Materials Research*, 35(1), 90-97.

Bijwe, J. (1997). Composites as friction materials: Recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials - A review. *Polymer Composites*, 18(3), 378-396.

Blau, P. (2001). Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives. *OAK*, Tennessee, 20-22.

Borawski, A. (2018). Simulation Study of the Process of Friction in the Working Elements of a Car Braking System at Different Degrees of Wear. *Acta Mechanica et Automatica*, 12(3), 221-226.

Borawski, A. (2019). Common methods in analysing the tribological properties of brake pads and discs-A review. *Acta Mechanica et Automatica*, 13(3), 189-199.

Borawski, A. (2020). Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads - Review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 27(1), 374-396.

Borawski, A., Mieczkowski, G. ve Szpica, D. (2023). Composites in Vehicles Brake Systems-Selected Issues and Areas of Development. *Materials,* (6), 2264.

Brewin, P., Coube, O., Doremus, P. ve Tweed, J. H. (2007). *Modelling of Powder Die Compaction.* (1.Baskı)*,* Londra: Springer, 3-5.

Cai, P., Wang, Y., Wang, T. ve Wang, Q. (2016). Improving tribological behaviors of friction material by mullite. *Tribology International*, 93, 282-288.

Celik, A. G. ve Cakal, G. O. (2016). Characterization of espey colemanite and variation of its physical properties with temperature. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(1), 66-76.

Chan, D. ve Stachowiak, G. W. (2004). Review of automotive brake friction materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, 218(9), 953-966.

Chau, J. L. H., Lee, C. C., Yang, C. C. ve Shih, H. H. (2014). Zeolite-coated steel fibers for friction materials applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 230(1), 35-42.

Chen, B., Bi, Q., Yang, J., Xia, Y. ve Hao, J. (2008). Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites. *Tribology International*, 41(12), 1145-1152.

Cho, K. H., Jang, H., Hong, Y. S., Kim, S. J., Basch, R. H. ve Fash, J. W. (2008). The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials. *Wear*, 264(3-4), 291-297.

Cho, M. H., Ju, J., Kim, S. J. ve Jang, H. (2006). Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb_2S_3, MoS_2) for automotive brake friction materials. *Wear*, 260(7-8), 855-860.

Cho, M. H., Kim, S. J., Kim, D. ve Jang, H. (2005). Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study. *Wear*, 258(11-12), 1682-1687.

Chung, J. O., Go, S. R., Kim, J. H., Choi, J. G., Kim, H. R. ve Choi, H. B. (2019). Effect of MoS2 on transfer film formation and friction coefficients in NAO friction material. *Industrial Lubrication and Tribology*, 71(2), 221-231.

Dadkar, N., Tomar, B. S. ve Satapathy, B. K. (2009). Evaluation of flyash-filled and aramid fibre reinforced hybrid polymer matrix composites (PMC) for friction braking applications. *Materials & Design*, 30(10), 4369-4376.

Danninger, H., Calderon, R. de O. ve Gierl-Mayer, C. (2017). *Powder Metallurgy and Sintered Materials*. Weinheim: John Wiley & Sons, Ltd, 6.

Dou, Y., Liu, Y., Liu, Y., Xiong, Z. ve Xia, Q. (2014). Friction and wear behaviors of B_4C/6061 Al Composite. *Materials & Design*, 60, 669-677.

Dureja, N., Bijwe, J. ve Gurunath, P. V. (2008). Role of Type and Amount of Resin on Performance Behavior of Non-asbestos Organic (NAO) Friction Materials. *The Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(4), 489-497.

Ediz, N. ve Özdağ, H. (2001). Bor Mineralleri ve Ekonomisi. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 2, 133-151.

Elzayady, N. ve Elsoeudy, R. (2021). Microstructure and wear mechanisms investigation on the brake pad. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 2314-2335.

Eriksson, M. ve Jacobson, S. (2000). Tribological surfaces of organic brake pads. *Tribology International*, 33(12), 817-827.

Ertan, R. ve Yavuz, N. (2010). An experimental study on the effects of manufacturing parameters on the tribological properties of brake lining materials. *Wear*, 268(11-12), 1524-1532.

Eskibalci, M. F. ve Ozkan, S. G. (2012). An investigation of effect of microwave energy on electrostatic separation of colemanite and ulexite. *Minerals Engineering*, *31*, 90-97.

Etimaden. (2021). Bor Sektör Raporu. *Etimaden*, Ankara, 5-33.

Fang, Z. Z., Paramore, J. D., Sun, P., Chandran, K. S. R., Zhang, Y., Xia, Y., … Free, M. (2018). Powder metallurgy of titanium – past, present, and future. *International Materials Reviews*, 63(7), 407-459.

Fedorchenko, I. M. (2002). Antifriction and friction cermet materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 41(9-10), 489-497.

Filip, P., Weiss, Z. ve Rafaja, D. (2002). On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*, 252(3-4), 189-198.

Frost, R. L., Scholz, R., Ruan, X. ve Lima, R. M. F. (2016). Thermal analysis and infrared emission spectroscopy of the borate mineral colemanite ($CaB_3O_4(OH)_3 \cdot H_2O$): Implications for thermal stability. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(1), 131-135.

Ganguly, A. ve George, R. (2008). Asbestos free friction composition for brake linings. *Bulletin of Materials Science*, 31(1), 19-22.

German, R. M. (2010). *Sintering of Advanced Materials*. Sawston: Woodhead Publishing, 3-32.

Gilardi, R., Alzati, L., Thiam, M., Brunel, J. F., Desplanques, Y., Dufrénoy, P., Bijwe, J. (2012). Copper Substitution and Noise Reduction in Brake Pads: Graphite Type Selection. *Materials,* 5(11) 2258-2269.

Gökmeşe, H., Bostan, B., Yılmaz, T. A. ve Taşçı, U. (2019). TEM characterization and synthesis of nanoparticle B_4C by high-energy milling. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 3(3), 195-201.

Groover, M. P. (2019). *Fundamentals of Modern Manufacturing* (7. Baskı). New York: Wiley. 315-334.

Gudmand-Høyer, L., Bach, A., Nielsen, G. T. ve Morgen, P. (1999). Tribological properties of automotive disc brakes with solid lubricants. *Wear*, 232(2), 168-175.

Hamd, S. S., Ramizy, A. ve Ismail, R. A. (2022). Preparation of novel B_4C nanostructure/Si photodetectors by laser ablation in liquid. *Scientific Reports,* 12, 16529.

Harper, G. A. (1998). *Brakes and friction materials : the history and development of the Technologies (1. Baskı)*. Edmunds: Mechanical Engineering Publications. 36-38.

Hassan, M. H. (2012). The effect of boron friction modifier on the performance of brake pads. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 7(1), 31-35.

Hee, K. W. ve Filip, P. (2005). Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings. *Wear*, 259(7-12), 1088-1096.

Heussaff, A., Dubar, L., Tison, T., Watremez, M. ve Nunes, R. F. (2012). A methodology for the modelling of the variability of brake lining surfaces. *Wear*, 289, 145-159.

Ikpambese, K. K., Gundu, D. T. ve Tuleun, L. T. (2016). Evaluation of palm kernel fibers (PKFs) for production of asbestos-free automotive brake pads. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 28(1), 110-118.

Incesu, A., Korkmaz, K., Cetintas, O. O., Kubuc, O., Korkmaz, M. ve Karanfil, G. (2013). *Design of Composite Brake Pads for Metro with a Statistical Approach*. 2. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu (ISERSE'13), Karabük, 9-11.

İnternet: Yousef., Hydraulic Brakes: Construction, Types, Working & Differences. https://www.theengineerspost.com/hydraulic-braking-system/ Erişim Tarihi: 26.12.2023.

Jadhav, S. P. ve Sawant, S. H. (2019). A review paper: Development of novel friction material for vehicle brake pad application to minimize environmental and health issues. *Materials Today: Proceedings*, 19, 209-212.

Jang, H., Ko, K., Kim, S. J., Basch, R. H. ve Fash, J. W. (2004). The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials. *Wear*, 256(3-4), 406-414.

Jiang, T. (2022). Investigation of Microstructural Features and Mechanical Characteristics of the Pressureless Sintered B_4C/C(Graphite) Composites and the B_4C-SiC-Si Composites Fabricated by the Silicon Infiltration Process. *Materials* 15(14), 4853.

Justin A., I., Vijay, R. ve Lenin, S., (2019). Influence of WS_2/SnS_2 on the tribological performance of copper-free brake pads. *Industrial Lubrication and Tribology*, 71(3), 398-405.

Kato, K. (2000). Wear in relation to friction — a review. *Wear*, *241*(2), 151-157.

Keskin, A. (2011). Investigation of using natural zeolite in brake pad. *Scientific Research and Essays*, 6(23), 4893-4904.

Khorrami, S. A., Baharvandi, H. R. ve Lotfi, R. (2016). The effect of calcination temperature on synthesis of B_4C-nano TiB_2 composite by co-precipitation method. *Oriental Journal of Chemistry*, 32(4), 2243-2249.

Kim, S. J., Cho, M. H., Lim, D. S. ve Jang, H. (2001). Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material. *Wear*, 251(1-12), 1484-1491.

Kim, S. J., Hyung C. M., Hyung C. K. ve Jang, H. (2007). Complementary effects of solid lubricants in the automotive brake lining. *Tribology International*, 40(1), 15-20.

Kim, Seong Jin, Kim, K. S. ve Jang, H. (2003). Optimization of manufacturing parameters for a brake lining using Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 136(1-3), 202-208.

Kim, Y. C., Cho, M. H., Kim, S. J. ve Jang, H. (2008). The effect of phenolic resin, potassium titanate, and CNSL on the tribological properties of brake friction materials. *Wear*, 264(3-4), 204-210.

Kosbe, P., Patil, P., Manickam, M. ve Ramamurthy, G. (2020). Effect of hexagonal boron nitride (h-BN) inclusion on thermal characteristics of disc brake friction composites. *Diamond and Related Materials*, 107, 107895.

Kryachek, V. M. (2004). Friction composites: Traditions and new solutions (review). I. Powder materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 43(11-12), 581-592.

Kryachek, Viktor M. (2005). Friction composites: Traditions and new solutions (Review). Part 2. Composite materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 44(1-2), 5-16.

Kuliiev, R., Orlovskaya, N., Hyer, H., Sohn, Y., Lugovy, M., Ha, D., Blugan, G. (2020). Spark plasma sintered B_4C-structural, thermal, electrical and mechanical properties. *Materials*, 13(7). 1612.

Kumar, N., Bharti, A., Goyal, H. S. ve Patel, K. K. (2021). The evolution of brake friction materials: a review. *Materials physics and mechanics*, 84(5), 796-815.

Kumar, V. V. ve 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), 082005.

Lee, W. K., Rhee, T. H., Kim, H. S. ve Jang, H. (2013). Effects of antimony trisulfide (Sb2S3) on sliding friction of automotive brake friction materials. *Metals and Materials International*, 19(5), 1101-1107.

Lemen, R. A. (2004). Asbestos in brakes: exposure and risk of disease. *American journal of industrial medicine*, 45(3), 229-237.

Leonardi, M., Alemani, M., Straffelini, G. ve Gialanella, S. (2020). A pin-on-disc study on the dry sliding behavior of a Cu-free friction material containing different types of natural graphite. *Wear*, 442-443, 203157.

Lezhnina, M. M., Kätker, H., Kaiser, M., Stegemann, L., Voss, E., Resch-Genger, U., … Kynast, U. (2016). Chemical behavior and spectroscopic properties of rare earth borates in glazes. *Journal of Luminescence*, 170, 387-394.

Li, X., Gao, Y., Xing, J., Wang, Y. ve Fang, L. (2004). Wear reduction mechanism of graphite and MoS2 in epoxy composites. *Wear*, 257(3-4), 279-283.

Lin, H. Y., Cheng, H. Z., Lee, K. J., Wang, C. F., Liu, Y. C. ve Wang, Y. W. (2020). Effect of Carbonaceous Components on Tribological Properties of Copper-Free NAO Friction Material. *Materials* 13(5), 1163.

Liu, Y. B., Lim, S. C., Lu, L. ve Lai, M. O. (1994). Recent development in the fabrication of metal matrix-particulate composites using powder metallurgy techniques. *Journal of Materials Science*, 29(8), 1999-2007.

Liu, Y., Bao, J., Hu, D., Ge, S., Yin, Y. ve Liu, T. (2016). A Review on the Research Progress of Nano Organic Friction Materials. *Recent Patents on Nanotechnology*, 10(1), 11-19.

Malhotra, V. M., Valimbe, P. S. ve Wright, M. A. (2002). Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites. *Fuel*, 81(2), 235-244.

Maluf, O., Angeloni, M., Tadeu, M., Spinelli, M. D., Wladimir, W. ve Filho, B. (2007). Development of Materials for Automotive Disc Brakes. *Minerva*, 4(2), 149-158.

Manohar, G., Pandey, K. M. ve Maity, S. R. (2021). Effect of sintering mechanisms on mechanical properties of AA 7075/B_4C composite fabricated by powder metallurgy techniques. *Ceramics International*, 47(11), 15147-15154.

Marewad, D. S., Singh, G. ve Adivarekar, R. (2018). Asbestos free brake pad using Micro cellulose fibre for automotive industry. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 4(4), 685-690.

Menapace, C., Leonardi, M., Secchi, M., Bonfanti, A., Gialanella, S. ve Straffelini, G. (2019). Thermal behavior of a phenolic resin for brake pad manufacturing. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(3), 759-766.

Menapace, Cinzia, Leonardi, M., Matějka, V., Gialanella, S. ve Straffelini, G. (2018). Dry sliding behavior and friction layer formation in copper-free barite containing friction materials. *Wear*, 398-399, 191-200.

Mieczkowski, G. (2016). Stress fields at the tip of a sharp inclusion on the interface of a bimaterial. *Mechanics of Composite Materials*, 52(5), 601-610.

Mieczkowski, Grzegorz. (2019). Criterion for crack initiation from notch located at the interface of bi-material structure. *Maintenance and Reliability*, 21(2), 301-310.

Mohanty, S. ve Chugh, Y. P. (2007). Development of fly ash-based automotive brake lining. *Tribology International*, 40(7), 1217-1224.

Mutlu, I., Oner, C. ve Findik, F. (2007). Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings. *Materials & Design*, 28(2), 480-487.

Mutlu, İ., Öner, C., Özdin, K. ve Yıldız, E. (2006). Elyaf Katkılı Asbestsiz Disk Fren Balatalarında Sürekli Frenleme Veriminin İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 98-102.

Mutlu, İ. ve Sugözü, İ. (2008). Fren balata malzemelerinin sürtünme ve aşınmaya etkisinin incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(4), 33-40.

Natarajan, M., Rajmohan, B. ve Devarajulu, S. (2012). Effect of Ingredients on Mechanical and Tribological Characteristics of Different Brake Liner Materials. *International Journal of Mechanical Engineering & Robotic Research*, 1(2), 135-157.

Newkirk, J. W. ve Kohser, R. A. (2016). *Powder Metallurgy Alloys: Designing with*. London: Routledge Handbooks Online, 2602-2620.

Bijwe, J., Nidhi ve Mazumdar, N. (2006). Influence of amount and modification of resin on fade and recovery behavior of non-asbestos organic (NAO) friction materials. *Tribology Letters*, 23(3), 215-222.

Österle, W., Kloß, H., Urban, I. ve Dmitriev, A. I. (2007). Towards a better understanding of brake friction materials. *Wear*, 263(7-12), 1189-1201.

Österle, Werner ve Dmitriev, A. I. (2016). The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials. *Lubricants* 4(1), 5.

Özkan, Ş. G., Tombal, T. D., Ünver, İ. ve Osmanlıoğlu, A. E. (2016). Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi. *Bor Dergisi*, 1(2), 86-95.

Pan, G., Guo, Q., Ding, J., Zhang, W. ve Wang, X. (2010). Tribological behaviors of graphite/epoxy two-phase composite coatings. *Tribology International*, 43(8), 1318-1325.

Pekdemir, D. (2021). Bor'dan Bor Karbür'e. *MTA*. Ankara,5-7.

Sachit, T. S., Bongale, A., Kumar, S. ve Jadhav, P. (2023). Wear performance analysis of B_4C and graphene particles reinforced Al-Cu alloy based composites using Taguchi method. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32, 20220274.

Sasaki, S., Takeda, M., Yokoyama, K., Miura, T., Suzuki, T., Suematsu, H., Yatsui, K. (2005). Thermoelectric properties of boron-carbide thin film and thin film based thermoelectric device fabricated by intense-pulsed ion beam evaporation. *Science and Technology of Advanced Materials*, 6(2), 181-184.

Satapathy, B. K. ve Bijwe, J. (2002). Analysis of simultaneous influence of operating variables on abrasive wear of phenolic composites. *Wear*, *253*(7-8), 787-794.

Schade, C. (2015). *Introduction to Metal Powder Production and Characterization*. Detroit: ASM International 55-57.

Selcuk, C. (2013). *Joining processes for powder metallurgy parts*. Sawston: Woodhead Publishing, 380-398.

Sethi, G., Myers, N. S. ve German, R. M. (2008). An overview of dynamic compaction in powder metallurgy. *International Materials Reviews*, 53(4), 219-234.

Singh, S. P. (2015). Analysis of Brake-Pad Friction Material Formulation. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 2(8). 6-13.

Solodkyi, I., Bezdorozhev, O., Vterkovskiy, M., Bogomol, I., Bolbut, V., Krüger, M., Loboda, P. (2019). Addition of carbon fibers into B_4C infiltrated with molten silicon. *Ceramics International*, 45(1), 168-174.

Stadler, Z., Krnel, K. ve Kosmač, T. (2008). Friction and wear of sintered metallic brake linings on a C/C-SiC composite brake disc. *Wear*, *265*(3-4), 278-285.

Su, L., Gao, F., Han, X., Fu, R. ve Zhang, E. (2015). Tribological Behavior of Copper-Graphite Powder Third Body on Copper-Based Friction Materials. *Tribology Letters*, 60(2), 1-12.

Subramanian, A., (2010). Development of Boron-based materials for nuclear applications. *BARC Newsletter*, 313, 14-22.

Sugözü, B., Buldum, B. ve Sugözü, İ. (2018). Üleksit ve Boraks İçeren Fren Sürtünme Malzemelerinin Tribolojik Özellikleri. *Bor Dergisi*, 3(2), 126-131.

Şanlı, P. (2019). *Farklı oranlardaki takviye elemanlarıyla katkılandırılmış metal matrisli kompozit malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 64-66.

Taşci, U., Gökmeşe, H. ve Bostan, B. (2014). AA 2014 Al Matrisli B_4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mikro Yapı ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1(4), 161-168.

Tekin, G. (2004). Kalsine Uleksit'in Amonyum Klorür Çözeltileri İçinde Çözünürleştirilmesi Kinetiği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 100-114.

USGS. (2021). 2018 Minerals Yearbook BORON. *USGS.* Virginia, 20-21.

Vani, V. V. ve Chak, S. K. (2018). The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy. *Manufacturing Review*, 5, 7.

Vasconcellos, M. A. Z., Hinrichs, R., da Cunha, J. B. M. ve Soares, M. R. F. (2010). Mössbauer spectroscopy characterization of automotive brake disc and polymer matrix composite (PMC) pad surfaces. *Wear*, 268(5-6), 715-720.

Veeman, D., Katiyar, J. K. ve Ruggiero, A. (2023). Tribo-mechanical performance of brake composite material: a comprehensive review. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 17(4), 271-294.

Venugopal, S. ve Karikalan, L. (2020). A review paper on aluminium-alumina arrangement of composite materials in automotive brakes. *Materials Today: Proceedings*, 21, 320-323.

Kumar, V., Kumaran, S., Dhanalakshmi, S. ve Sivaramakrishnan, R. (2019). Tribological performance evaluation of fused mullite-reinforced hybrid composite brake pad for defence application. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(4), 1-10.

Wahi, A., Muhamad, N., Sulong, A. B. ve Ahmad, R. N. (2016). Effect of Sintering Temperature on Density, Hardness and Strength of MIM $Co_{30}Cr_6Mo$ Biomedical Alloy. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 63(7), 434-437.

Wang, Y., Sun, Y., Liu, Z., Wang, Y. B., Li, L., An, J., Chen, H. (2018). Effect of large size graphite on dry friction and wear characteristics of copper-based brake friction lining materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 397(1), 012054.

Wu, J., Jia, Z., He, Y. ve Yu, Z. (2019). Investigation on thermal stability and tribological properties of ZrB_2 particles filling cyanate ester resin composites by experiments and numerical simulation. *Polymer Engineering & Science*, 59(3), 602-607.

Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Lu, L. ve Feng, X. (2016). Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(5), 1-10.

Xu, K., Hrma, P., Rice, J. A., Schweiger, M. J., Riley, B. J., Overman, N. R. ve Kruger, A. A. (2016). Conversion of Nuclear Waste to Molten Glass: Cold-Cap Reactions in Crucible Tests. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(9), 2964-2970.

Yan, Z., Yin, D., Luo, L., He, G. ve Dai, Z. (2019). Integrated product and process development of powder metallurgy hub for automotive clutch. *Powder Metallurgy*, 62(4), 247-257.

Yanar, H., Ayar, H. H., Demirtas, M. ve Purcek, G. (2020). Effect of resin content on tribological behavior of brake pad composite material. *Industrial Lubrication and Tribology*, 72(2), 195-202.

Yanar, H., Purcek, G., Demirtas, M. ve Ayar, H. H. (2022). Effect of hexagonal boron nitride (h-BN) addition on friction behavior of low-steel composite brake pad material for railway applications. *Tribology International*, 165, 107274.

Yashwhanth, S., Mohan, M., Anandhan, R. ve Selvaraj, S. K. (2021). Present knowledge and perspective on the role of natural fibers in the brake pad material. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7329-7337.

Yavas, B., Sahin, F., Yucel, O. ve Goller, G. (2015). Effect of particle size, heating rate and CNT addition on densification, microstructure and mechanical properties of B_4C ceramics. *Ceramics International*, 41(7), 8936-8944.

Yenmez, N. (2011). Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerinin Türkiye İçin Önemi. *Coğrafya Dergisi*, 19(19), 59-94.

Yılmaz, B. ve Evis, Z. (2016). Boron-substituted bioceramics: A review. *Journal of Boron*, 1(1), 6-14.



Gazili olmak ayrıcalıktır