

**NANO VE MİKRO PARTİKÜLLÜ NADİR TOPRAK OKSİT TAKVİYELİ
KOMPOZİT FREN BALATALARININ TARIM ARAÇLARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yavuz ŞÜKÜROĞLU

Danışman

Doç. Dr. Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman

Doç. Dr. Hicri YAVUZ

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Ocak 2026

Bu tez çalışması 25.FEN.BİL.03 numaralı proje ile AKÜ-BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO VE MİKRO PARTİKÜLLÜ NADİR TOPRAK OKSİT TAKVİYELİ
KOMPOZİT FREN BALATALARININ TARIM ARAÇLARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİ

Yavuz ŞÜKÜROĞLU

Danışman

Doç. Dr. Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman

Doç. Dr. Hicri YAVUZ

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Ocak 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Yavuz ŞÜKÜROĞLU tarafından hazırlanan “Nano ve Mikro Partiküllü Nadir Toprak Oksit Takviyeli Kompozit Fren Balatalarının Tarım Araçlarında Kullanılabilirliği” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 08 / 01 / 2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı’nda** **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman : Doç. Dr. Hicri YAVUZ

Başkan : Prof. Dr. Yusuf KAYALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ersan MERTGENÇ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon MYO

Üye : Doç. Dr. Hicri YAVUZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon MYO

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Rıza KARA
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Fatih ÇOLAK
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

08/01/2026

Yavuz ŞÜKÜROĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO VE MİKRO PARTİKÜLLÜ NADİR TOPRAK OKSİT TAKVİYELİ KOMPOZİT FREN BALATALARININ TARIM ARAÇLARINDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Yavuz ŞÜKÜROĞLU

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ersan MERTGENÇ

İkinci Danışman: Doç. Dr. Hicri YAVUZ

Nadir toprak oksit takviyeli malzemeler üzerine yapılan çalışmalar artmakla birlikte, özellikle fren sürtünme malzemeleri konusunda literatürde bir boşluk bulunmaktadır. Tez çalışmasında; %5 ve %10 nano ve mikro boyutta CeO₂ takviyeli fren balatasının performansı incelenerek, tarım araçlarında kullanılabilirliği kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Balata örneklerinin sürtünme karakteristiklerinin yanı sıra, fren diskindeki yüzey pürüzlülüğüne etkileri de incelenmiştir. Üretilen balata örneklerinde X-ışını kırınım analizi (XRD) kullanılmış, deneyler sonrası aşınma mekanizmalarının analizinde ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Balata örnekleri kararlı bir sürtünme katsayısı sergilemiş olup, sürtünme katsayıları nano boyutlu %5 ve %10 CeO₂ içeren numunelerde 0,25, mikro boyutlu %5 içeren numunede 0,26 ve mikro boyutlu %10 içeren numunede ise 0,27 olarak belirlenmiştir. CeO₂ takviyeli nano boyutlu balata örneklerine nazaran mikro boyutlu balata örneklerinde daha düşük aşınma oranları tespit edilmiştir. Numunelerin ortalama sertlik değeri 94 Shore D olup, takviye edilen CeO₂ oranı arttıkça hem mikro hem de nano boyuttaki balata örneklerinin sertlik değerleri de artmıştır. Yüzey pürüzlülüğü analizlerine göre CeO₂ katkı maddesinin disk yüzeyindeki çizik ve girinti yoğunluğunu önemli ölçüde azaltmıştır. Aşınma yüzeylerine ait SEM analizlerine göre ise aşınma yüzeylerinde birincil ve ikincil platolar, mikro çatlaklar ve sürtünme kaynaklı çizikler belirlenmiştir.

Tez çalışması ile nadir toprak oksit takviyeli fren balatalarının performans optimizasyonu ve aşınma davranışlarının anlaşılması açısından önemli katkılar sunmanın yanında CeO₂ katkısının disk yüzey pürüzlülüğünü minimize etmesi endüstriyel uygulamalar için bu malzemenin potansiyelini de vurgulamaktadır.

2026, xi + 43 sayfa

Anahtar Kelimeler: Nadir toprak oksit, Nano partikül, Tarım araçları, Fren balatası, Triboloji.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

USABILITY OF NANO AND MICRO PARTICLE RARE EARTH OXIDE REINFORCED COMPOSITE BRAKE PADS IN AGRICULTURAL VEHICLES

Yavuz ŞÜKÜROĞLU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Supervisor: Assoc. Prof. Ersan MERTGENÇ

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Hicri YAVUZ

While studies on rare earth oxide-reinforced materials are increasing, there is a gap in the literature, particularly on brake friction materials. This thesis study examined the performance of brake pads containing 5% and 10% nano-sized and micro-sized CeO₂, comprehensively assessing their usability in agricultural vehicles. In addition to the friction characteristics of the pad samples, the effects on the surface roughness of the brake disc were also investigated. X-ray diffraction analysis (XRD) was used on the produced pad samples, and scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the wear mechanisms after the experiments. The pad samples exhibited a stable coefficient of friction, with coefficients of friction determined as 0,25 for nano-sized samples containing 5% and 10% CeO₂, 0,26 for micro-sized samples containing 5%, and 0,27 for micro-sized samples containing 10%. Lower wear rates were observed in micro-sized pad samples compared to nano-sized pad samples containing CeO₂. The average hardness of the samples was 94 Shore D, and as the CeO₂ content increased, the hardness values of both micro- and nano-sized pad samples also increased. Roughness analyses revealed that the CeO₂ additive significantly reduced the scratch and indentation density on the disc surface. According to SEM analysis of the wear surfaces, primary and secondary plateaus, microcracks and friction-induced scratches were determined on the wear surfaces.

This thesis study not only contributes significantly to the performance optimization and

understanding of wear behavior of rare earth oxide-enhanced brake pads, but also highlights the potential of this material for industrial applications due to the CeO₂ additive's ability to minimize disc surface roughness.

2026, xi + 43 pages

Keywords: Rare earth oxide, Nano particle, Agricultural vehicles, Brake pads, Tribology.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yanımda olan, rehberliği ve değerli katkılarıyla bu çalışmanın her aşamasında bana yol gösteren danışmanım Doç. Dr. Ersan MERTGENÇ, ikinci danışmanım Doç. Dr. Hicri YAVUZ ve tezimin şekillenmesinde bilgi ve fikirlerinden faydalandığım Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Bahadır KOCA ile Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Oğuz GÖLE'ye içten teşekkür ederim. Son olarak bu araştırma boyunca ve aynı zamanda tüm hayatım boyunca yanımda hep var olan sevgili eşim Nazike ŞÜKÜROĞLU'na ve çocuklarım Nail Tuna ve Nimet Doğa'ya çok teşekkür ederim.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne 25.FEN.BİL.03 numaralı proje desteğinden dolayı teşekkür ederim

Yavuz ŞÜKÜROĞLU
Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Fren Sistemlerinin Önemi ve Tarihi Gelişimi	1
1.2 Fren Balataları	2
1.2.1 Bağlayıcılar	2
1.2.2 Dolgu malzemeleri	3
1.2.3 Yağlayıcı Malzemeler	4
1.2.4 Sürtünme düzenleyiciler.....	4
1.2.5 Takviye Edici Malzemeler	4
1.3 Kompozit Fren Balataları Üretim metotları	5
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	7
2.1 Kompozit fren balataları bileşenlerinde tane boyutunun etkisi.....	7
2.1 Nadir toprak elementleri.....	7
2.2 Nadir toprak oksitleri (NTO'lar)	8
2.2 Seryum oksit (CeO ₂)	10
3. MATERYAL ve METOT	13
3.1 Numune Üretimi.....	13
3.1.1 Numune İçeriği.....	13
3.1.2 Üretim Süreci	15
3.1.2.1 Numune İçeriğinin Hazırlanması	15
3.2 Fren balataları özelliklerinin belirlenmesi.....	17
3.2.1 Yoğunluk Ölçüm Yöntemi	17
3.2.2 Fren Balataları Sertlikleri Ölçüm Yöntemi	18
3.2.3 Numune sürtünme katsayısı (μ) ve aşınma oranları Ölçüm Yöntemi.....	19
3.2.4 Fren diski Pürüzlülük Ölçüm Yöntemi	20

3.2.5 Numunelerin Mikroskopik ve mineralojik analizleri	22
4. DENEYSEL BULGULAR	25
4.1 Karakterizasyon	25
4.2 Sürtünme Katsayısı (μ)	26
4.3 Disk sürtünme yüzeyi Ra ve Rz yüzey pürüzlülük farkları	29
4.4 X-Işınları Kırınım Analizi (XRD)	30
4.5 SEM ve EDX analizleri	30
5. SONUÇLAR	34
6. KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	43

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	Yüzde
°	Derece
°C	Santigrat Derece
μ	Sürtünme Katsayısı
μ_m	Maksimum sürtünme katsayısı
μ_o	Ortalama sürtünme katsayısı
d	Yoğunluk
F	Deney numunesine uygulanan basma kuvveti
f	Dinamometrede okunan sürtünme kuvveti
g	Gram
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri
Rz	Maksimum yüzey pürüzlülük değeri
SK	Sürtünme katsayısı kararlılığı
Wa	Aşınma oranı
ρ_b	Balata numunesinin yoğunluğu
g_h	Balata numunesinin havadaki ağırlığı
g_s	Balata numunesinin sudaki ağırlığı
ρ_s	Saf suyun yoğunluğu

Kısaltmalar

ASMT	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
CeO ₂	Seryum Oksit
EDX	X-ışınları spektroskopisi
NTE	Nadir Toprak Elementi
NTO	Nadir Toprak Oksiti
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
ÜB4	%4 oranında Üleksit ve Baroks malzemesine sahip balata numunesi
XRD	X-Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Fren balatalarında takviye elemanı çevresinde oluşan temas platosu.....	5
Şekil 1.2 Fren sürtünme malzemesinde tribolojik sistemin yapısı.....	6
Şekil 2.1 Nadir Toprak elementleri kullanım alanları.....	8
Şekil 3.1 Fren balatası kompozitini oluşturan malzemeler	17
Şekil 3.2 Fren balatası test cihazı, a) Şematik görünüm, b) Tasarım görünümü.....	20
Şekil 3.3 Disk yüzeyi pürüzlülük ölçüm noktaları	22
Şekil 4.1 M5 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği ...	27
Şekil 4.2 M10 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği .	27
Şekil 4.3 N5 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği....	28
Şekil 4.4 N10 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği..	28
Şekil 4.5 Disk sürtünme yüzeyi Ra ve Rz yüzey pürüzlülük farkları	29
Şekil 4.6 M10 ve N10 kodlu numunelere ait XRD analizleri	30

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Fren balata test cihazı özellikleri.....	19
Çizelge 3.2 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı teknik özellikleri	21
Çizelge 4.1 Numunelerin karakteristik değerleri	25

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 1.1 Fren sistemi elemanları (A) Kampanalı fren, (B) Diskli fren, (C) Tarım aracı kampanalı fren	1
Resim 3.1 600x büyütme yapılmış mikro boyuta sahip CeO ₂ ye ait SEM görüntüsü...	13
Resim 3.2 2500x büyütme yapılmış mikro boyuta sahip CeO ₂ ye ait SEM görüntüsü.	14
Resim 3.3 600x büyütme yapılmış nano boyuta sahip CeO ₂ ye ait SEM görüntüsü	14
Resim 3.4 2500X büyütme yapılmış nano boyuta sahip CeO ₂ ye ait SEM görüntüsü .	15
Resim 3.5 Yoğunluk ölçüm düzeneği.	18
Resim 3.6 Numune sertlikleri ölçümünde kullanılan Shore D ölçüm standı.....	18
Resim 3.7 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.	21
Resim 3.8 Karbon Kaplama Cihazı.....	23
Resim 3.9 X-Işını Kırınımı cihazı (XRD).....	24
Resim 4.1 N5 kodlu numuneye ait CeO ₂ SEM ve EDX analizleri	32
Resim 4.2 N10 kodlu numuneye ait CeO ₂ SEM ve EDX analizleri	32
Resim 4.3 M5 kodlu numuneye ait CeO ₂ SEM ve EDX analizleri.....	33
Resim 4.4 M10 kodlu numuneye ait CeO ₂ SEM ve EDX analizleri.....	33

1. GİRİŞ

1.1 Fren Sistemlerinin Önemi ve Tarihi Gelişimi

Tekerlekli taşıtlarda güvenlik unsurlarının başında yer alan ve kritik rol oynayan fren sistemleri, araçların durdurulması, yavaşlatılması ve hızlarının sabitlenmesinde kullanılmaktadır. Temelde sürücünün araç içindeki fren pedalına basarak uyguladığı kuvvet, mekanizmada arttırılarak merkez silindiri vasıtasıyla hidrolik basıncına dönüştürülmektedir. Hidrolik üniteler sayesinde balataların fren diski veya kampanalara uyguladığı sürtünme ile tekerlerde frenleme gerçekleşmektedir. Fren balataları ise günümüzde modern ulaşım sistemlerinin vazgeçilmez ve en önemli unsurlarındandır. Araçlarda hareketle elde edilen kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek frenlemeyi sağlayan bu sistem bileşenlerinin aşınma dirençleri ve sürtünme katsayılarının yüksek, gürültü seviyelerinin düşük ve termal stabiliteye de sahip olmaları beklenmektedir. Beklenen üstün performans özelliklerini sağlayan ve çevresel uyumluluğa sahip kompozit fren balataları otomotiv endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Yavuz 2022a). Günümüzde çoğunlukla tekerlekli kara taşıtların ön tekerlerinde diskli frenler kullanılırken, arka tekerlerde ise yine diskli frenler ya da kampanalı fren sistemleri kullanılmaktadır. Şekil 1.1 A’da kampanalı fren, B’de diskli fren C’de tarım araçlarına ait diskli fren balatası resimleri verilmiştir.



Resim 1.1 Fren sistemi elemanları (A) Kampanalı fren, (B) Diskli fren, (C) Tarım aracı kampanalı fren

1.2 Fren Balataları

Balatalar, fren sisteminde yüksek miktarlarda aşınmaya maruz kalan ve çalışma koşulları oldukça zor olan parçalardır. Bunlar taşıt bileşenleri içerisinde oldukça ufak bir parça olarak nitelendirilse de bunlar, yıllar süren mühendislik çalışmalarının ürünleridir (Kuş 2014). Fren balataları içeriklerinde farklı bileşenler içerdiğinden benzer sürtünme özellikleri göstermezler. Tasarım mühendisleri fren balatası imalatında, balatayı oluşturan sürtünme elamanlarının bileşenlerini belirlerken, performanslarını test etmekte ve en uygun kompozisyonu belirlemektedirler (Halderman ve Mitchell 2004, Yun vd. 2010).

Fren balataları bütün kara taşıtlarında kullanılmasına rağmen, taşıt özelliklerine bağlı olarak farklı boyut ve içeriktedirler. Ani ve sert frenleme, yumuşak kademeli frenleme, dur kalk trafiğinin yoğun olduğu şartlar ile fren balatası yapısını oluşturan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak fren sisteminde kullanılan balataların değişim zaman aralığı genellikle 40 000 ila 50 000 kilometre arasındadır (Yavuz 2022).

Balata malzemeleri genellikle üreticilerin geçmiş tecrübeleri eşliğinde deneme yanılma yöntemi ile geliştirilmektedir (Hee ve Filip 2005, Yun vd. 2010). Fren balataları birçok farklı bileşenin karışımından oluşmaktadır. Bundan dolayı fren balataları aynı zamanda kompozit malzeme özelliğindedir. Kullanımları sahada genellikle ticari olduğu için üretici firmalar tarafından da ticari sır niteliği taşıdığı ön görülerek içerik miktarları paylaşılmamaktadır. Fakat kompozit fren üretiminde literatürde ve ticari olarak kullanılan bileşenler isimleri belli olup genel olarak bunlar; bağlayıcılar, dolgu malzemeleri, yağlayıcı malzemeler, sürtünme düzenleyiciler ve takviye edici malzemeler olmak üzere 5 gruptan oluşmaktadırlar (Adsoy 2025).

1.2.1 Bağlayıcılar

Bağlayıcılar temelde, sürtünme malzemesindeki tüm bileşenleri bir arada tutarlar. Balatalarda kullanılan bağlayıcılardan beklenen temel özellikler ise yüksek termal kararlılığa, yüksek sıcaklıklarda çalışma koşullarında iyi oksidasyon direncine, yüksek

esnekliğe, su itme özelliğine sahip ve aynı zamanda da yapıştırıcı özelliğe sahip olmaları beklenmektedir. Sürtünme esnasında meydana gelen yüksek sıcaklık koşullarından dolayı reçinelerin yapısı termoplastikten, yoğun ve çapraz bağlı termoset matrise dönüşürler ve bu sayede yüksek ısı direnci özelliğine sahip olurlar (Uygun 2024).

Kompozit balatalarda kendinden talep edilen özellikleri karşıladığı ve hammaddeye ulaşılabilirliği kolay olduğu için genellikle fenolik reçine kullanılmasına rağmen, sektörde sentetik türevli reçineler, maun cevizi kabuğu sıvısı bazlı fenolikler ve ısı ile sertleşen fenolik reçineler de yoğun olarak kullanılmaktadır. Titreşimi sönümleme özelliklerinden dolayı da zaman zaman kauçuk da ilave edilmektedir (Eriksson vd. 2002, Sugözü 2016).

1.2.2 Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemeleri genel olarak, kompozit fren balatalarının maliyetini düşürmek, ısı iletkenliği arttırarak eşit bir ısı yayılım sağlamak, sürtünme katsayısını dengelemek, balatanın yoğunluğu dengelemenin yanında balatanın pürüzlü yapısının oluşmasının sağlanması için kullanılmaktadır (Yavuz 2022).

Kompozit fren balatalarının üretiminde birçok malzeme bu amaçla kullanılmasına rağmen, literatürde kullanılan bazı malzemeler; kalsit (Ünaldı ve Kuş 2018), barit (Che vd. 2020), Granit tozu (Ojha ve Biswal 2019), Kalsiyum karbonat (Ikpambese vd. 2016), Ananas elyaf (Singh vd. 2020), Bakır elyaf (Tavangar vd. 2020), Cam elyaf (Ahlawat vd. 2021), Çelik elyaf (Lertwassana vd. 2019), Karbon fiber (Mutlu vd. 2016, Che vd. 2020), Mısır sapı lifi (Ma vd. 2019), Muz kabuğu lifi (Amirjan 2019), Pirinç (Neis vd. 2017), Selüloz lifi (Tavangar vd. 2020), Çinko oksit (Leonardi vd. 2020), Çinko stearat (Ma vd. 2019), Halloysit (Saha ve Satapathy 2019), Kalsiyum hidrooksit (Tavangar vd. 2020, Wei vd. 2021), Kalsiyum karbonat (Ma vd. 2019, Leonardi vd. 2020), Kalsiyum oksit (Antonyraj ve Singaravelu 2020), Kalsiyum sülfat (Sudhan Raj vd. 2020), Magnezyum oksit (Leonardi vd. 2020, Tavangar vd. 2020) ve Talk tozudur (Che vd. 2020).

1.2.3 Yağlayıcı Malzemeler

Frenleme esnasında balata – disk ve kampana sistemlerinde sürtünme kuvvetinden kaynaklı yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Yağlayıcı malzemeler ise kompozit balatanın karşı elemana yapışmasını engellemeye yönelik olarak kullanılmaktadır. Yağlayıcı malzemeler genellikle arayüzeyde ince film tabakası oluşturarak, hem kompozit balatanın yapışmasını engellerken aynı zamanda da frenleme esnasında en optimum frenleme işleminin gerçekleşmesi görevini de üstlenmektedir (Uygun 2024). Kompozit balata sistemlerinde yağlayıcı malzeme olarak genellikle grafit, grafen, sentetik grafit, termo grafit, çinko sülfür, tungsten disülfür, Kalay disülfür, molibden disülfid kullanılmaktadır (Sugözü 2016).

1.2.4 Sürtünme düzenleyiciler

Sürtünme düzenleyiciler ara yüzeyde oluşan ince film tabakasını kaldırarak, sürtünme katsayısının stabil bir seviyede kalmasını sağlamak için kullanılan malzemelerdir. Sürtünme düzenleyicilerin yanlış seçilmesi durumunda disk kalınlığında azalma, gürültülü frenleme, direksiyonda sarsıntı gibi sürüş ve seyahat konforunu etkileyen olumsuz durumlarla karşılaşılabilir (Yahşi 2024). Aynı zamanda aşındırıcı malzeme olarak da nitelendirilen en yaygın sürtünme düzenleyiciler, alüminyum oksit, demir oksit, krom oksit, silisyum karbür, kuvars gibi malzemelerdir.

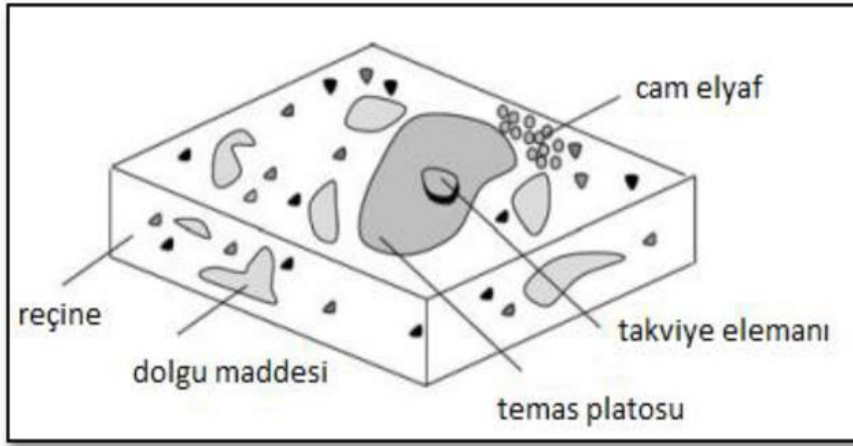
1.2.5 Takviye Edici Malzemeler

Kompozit fren balatasından talep edilen özelliği elde etmek için kullanılan karbon elyaf, çelik elyaf, keten lifleri, cam elyaf, bitkisel esaslı lifler ile seramik ya da mineral lifleri gibi takviye malzemeleridir. Bu malzemeler kompozit fren balatasında termal kararlılık, sertlik, mekanik yönden dayanım, kararlı sürtünme katsayısı ve uygun aşınma direnci gibi özellikleri optimum seviyeye taşımalarının yanında malzemelerin bir arada tutulmasını da sağlamaktadırlar (Eriksson vd. 2002).

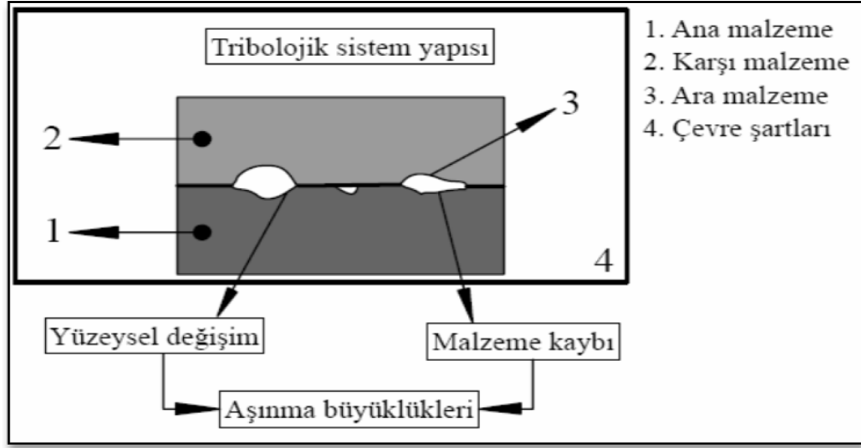
1.3 Kompozit Fren Balataları Üretim metotları

Genel olarak kompozit malzemeler en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bileşenlerin karıştırılmasıyla tek başına sahip olduklarından daha üstün özelliklere sahip özellikler sergilemektedirler. Kompozit fren balataları farklı dolgu malzemelerinin (bağlayıcılar, metalik tozlar, seramik lifler, aşındırıcılar vb.) matris malzeme (genellikle fenolik reçine) içine eklenip homojen dağıtılmasıyla elde edilmektedirler. Böylelikle fren balatalarının sürtünme, aşınma, ısı iletimi ve mekanik dayanım gibi özelliklerinin daha üstün performans göstermelerini sağlamaktadır. Aynı zamanda geleneksel metalik fren balatalarına göre daha düşük yoğunluğa sahip, daha sessiz çalışma, daha uzun ömürlü olma potansiyeline sahiptir. Bundan dolayı da daha konforlu sürüş ve güvenli seyahat imkânı sağlamaktadırlar. Bu tarz üstün özelliklere sahip ve özelleştirilebilir olmaları da bu malzemelerin esnekliğini artırarak, otomotiv, demiryolu, havacılık gibi sektörlerde de kullanımlarını sağlamaktadır (Adıgüzel 2015).

Şekil 1.1’de Otomotiv fren balatasında takviye elemanı etrafında oluşan temas platosunun görünümü verilmiştir. Şekil 1.2’de Tribolojik sistemin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Fren balatalarında takviye elemanı çevresinde oluşan temas platosu (Chan ve Stachowiak 2004).



Şekil 1.2 Fren sürtünme malzemesinde tribolojik sistemin yapısı (Yılmaz 1997).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kompozit fren balataları bileşenlerinde tane boyutunun etkisi

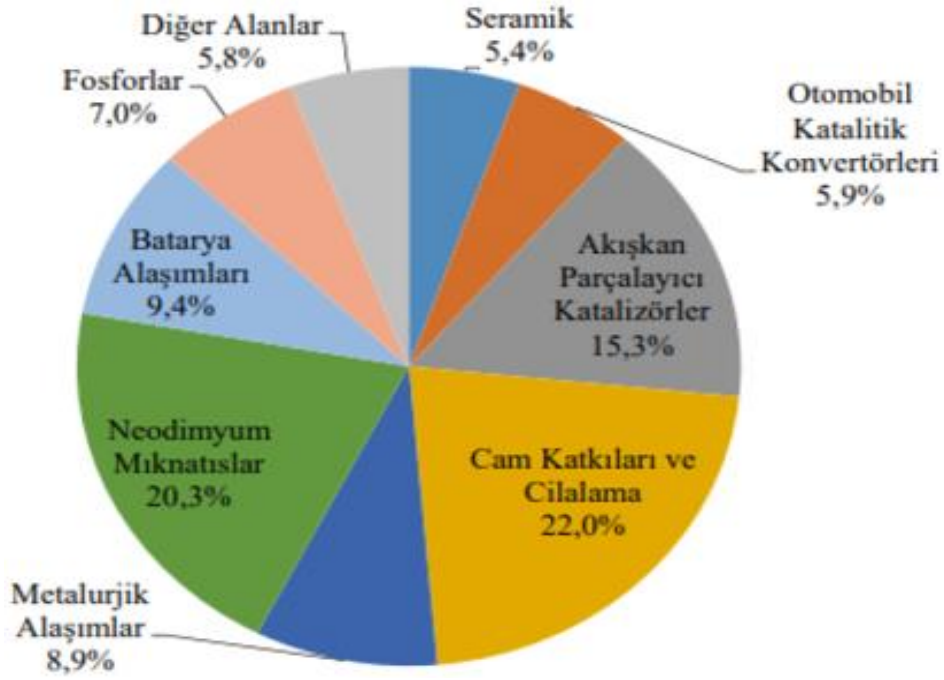
Genel olarak kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bileşenlerin tane boyutu küçüldükçe yüzey alanı/hacim oranı artmaktadır. Bu da küçük tane boyutuna sahip malzeme özelliklerinin, daha büyük tane boyutuna sahip aynı malzemelerden üretilen kompozitlere nazaran farklı ve mekanik olarak da üstün özellikler sergilemelerine neden olmaktadır. Ayrıca küçük tane boyutu ile yapılan üretimlerde porozite hacim oranlarının da daha düşük seviyelerde olduğu ve daha homojen yapıların elde edildiği de tespit edilmiştir (Selvaraj vd. 2021). Bununla beraber parçacık boyut dağılımı, şekil ve yüzey özelliklerinin sürtünme-aşınma özelliklerini etkilemektedir. Kompozit balata bileşenlerini oluşturan malzemelerin takviye tane boyutu arttıkça fren balatasının yoğunluk ve sertliği artarken aşınma direnci ise azalmaktadır. Yine tane boyutundaki artışla beraber aşınma direncinin azalırken, tanelerin yüzeyden daha kolay koptuğu görülmektedir. Diğer taraftan tane boyutu artışı kararlı bir sıcaklığa ulaşma süresini de azaltmaktadır (Adıgüzel 2015, Karaca ve Can 2021).

2.1 Nadir toprak elementleri

Nadir toprak elementleri (NTE'ler), 3B grubunda yer alan skandiyum ve itriyumunda dahil edilerek atom numaraları 57 (La) ile 71 (Lu) arasındaki toplam 17 elementle tanımlanmaktadır (Gupta ve Krishnamurthy 1992, Baştürkcü 2023). NTE'ler birbirlerine benzer şekilde metalurjik, fiziksel ve kimyasal özellikler gösterirler ki buda son derece benzer iyon yarıçapı, atomik yapı ve elektron konfigürasyonuna sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (Özer 2023).

Nadir toprak elementlerinin sektörel kullanımları ve çevresel etkileri dikkate alındığında, NTE'ler televizyon, rüzgâr türbinleri, LED ampuller ve cep telefonları gibi teknolojilerinin gelişmesinde oldukça önemlidir. Nadir toprak elementleri ve alaşımları, son özellikle otuz yılda bilgisayar belleği, şarj edilebilir piller, süper mıknatıslar, cep telefonları, LED aydınlatma, süper iletkenler, cam katkı maddeleri, floresan malzemeler,

fosfat bağlayıcı maddeler, güneş panelleri malzemeleri dahil olmak üzere çeşitli teknolojik cihazlarda kullanımda artış göstermiştir. Bu elementler, tüm yüksek teknoloji cihazlarında önemli bileşenlerdir. Bu elementler, benzersiz fiziksel, kimyasal, manyetik ve ışık özellikleri sayesinde daha düşük enerji tüketimi, daha yüksek verimlilik, küçülme, hız, dayanıklılık ve termal kararlılık gibi birçok avantajları vardır. Son yıllarda insanoğlunun ihtiyaçları doğrultusunda, özellikle daha hızlı, daha hafif, daha küçük, daha verimli ve enerji tasarrufu sağlayan cihazlara (yeşil teknoloji) olan talep artmıştır. Diğer taraftan bu teknolojiler cihazların boyutunun ve verimliliğinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadırlar (Balaram 2019, Patil vd. 2022). NTE kullanım alanları Şekil 2.1’de grafikte gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Nadir Toprak elementleri kullanım alanları (Baştürkcü 2023).

2.2 Nadir toprak oksitleri (NTO'lar)

Nadir toprak elementleri ile beraber bunların oksitleri de son dönemde yoğun olarak çalışılmaktadır ve nadir toprak oksitleri ismi ile nitelendirilmektedir. Özellikle metal oksit yarı iletkenleri, nadir toprak sülfürleri, nadir toprak hidroksitleri ve bunların kompozitleri, şu anda en çok araştırılan nadir toprak bazlı malzemelerdir. Çevresel olarak güvenli,

uygun maliyetli ve ölçeklenebilir sentetik teknikler, önemli elektrokimyasal özelliklere sahip nadir toprak elementlerine dayalı malzeme ve nanomalzemeler üretmek için kullanılabilir (Liang vd. 2020).

Nadir toprak elementi bazlı nanomalzemeler, diğer geçiş metali oksitlerine kıyasla düşük özgül kapasitansa sahiptir. Ayrıca, nadir toprak elementi bazlı nanomalzemelerin düşük iletkenlik, küçük özgül yüzey alanı ve zayıf çevrim kararlılığı gibi özellikleri, süperiletkenlerde kullanımlarını kısıtlamaktadır. Neyse ki, nadir toprak elementi bazlı nanomalzemelerin elektronik iletkenliği, yalnızca form ve boyutlarını değiştirerek artırılabilirken, diğer metal oksitler iletken bir faza ihtiyaç duyar. Dahası, nano yapıları nadir toprak elementi bazlı bir malzeme, yüzey alanı/hacim oranını artırarak ek aktif alanların açığa çıkmasını sağlar. Aktif bölgeler ve yüksek enerjili kristal düzlemler belirli bir şekilde açığa çıkar, bu da malzemenin kolayca indirgenip oksitlenmesini sağlayarak daha uzun bir çevrim ömrü sağlar. İnce ve kalın filmler olarak nadir toprak malzemeleri ilgi çekici bir araştırma konusudur. Çeşitli uygulamalar için uygun nadir toprak geçiş elementi alaşımlarının kalın ve ince filmleri hakkında çok sayıda makale yayınlanmıştır. Yüksek reaktivite nedeniyle, saf nadir toprak metal ince filmleri üretmenin son derece zor olduğu kanıtlanmıştır. Saf nadir toprak metal ince filmleri yerine nadir toprak hidritleri ve nadir toprak oksitlerinden oluşan ince filmler oluşturulmuş ve bunlar zaman zaman metallerle karıştırılmıştır. Ancak kimyasal sorun çözüldüğünde, üretilen gerçek malzemelerin, hidritler ve oksitlerin, başlı başına oldukça ilgi çekici araştırma konuları olduğu ortaya çıkmıştır. Bu malzemelerin birçok ilgi çekici özelliği olduğundan, literatürdeki sonuçların çoğu bunlara odaklanmıştır (Patil vd. 2022).

Hidrit ve oksit ince filmleri, elektron kırınımı ve elektron mikroskobu çalışmaları için idealdir. Özellikle oksitler, polimorfizmleri nedeniyle faz geçişleri, kusurlar ve ikizlenme mekanizmaları gibi konularda birçok yeni bilgi sağlamıştır. Bu refrakter malzemelerin ince filmlerinin olağanüstü kalitesi, kararlılıkları, düzenli kalınlıkları ve iyi tanımlanmış dokuları ile bunların bir elektron ışınıyla ısıtılabilme ve doğrudan elektron mikroskobu içinde darbeli tavlama veya diğer yöntemlerle faz geçişleri üretebilme yeteneği, diğer malzemelerle mümkün olmayan bir dizi doğrudan gözlem yapılmasına olanak sağlamıştır. Yüksek çözünürlüklü elektron mikroskoplarının ortaya çıkmasıyla, bu

malzemelerdeki kristal potansiyelini $2A^\circ$ kadar düşük çözünürlüklerde doğrudan yansıtan kafes görüntüleri elde etmek mümkün olmuş ve tane sınırları, ikiz düzlemler, kusur mekanizmaları ve farklı fazların veya kimyasal bileşiklerin tutarlı iç içe büyümesi gibi ayrıntıları ortaya çıkarmıştır (Gasgnier vd. 1974).

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan ve araştırmaları halen devam eden nadir toprak oksitleri; Yttrium oksit (Y_2O_3), Lantan oksit (La_2O_3), Seryum oksit (CeO_2), Praseodimyum oksit (Pr_6O_{11}), Neodimyum oksit (Nd_2O_3), Samaryum oksit (Sm_2O_3), Europium oksit (Eu_2O_3), Adolinyum oksit (Gd_2O_3), Terbiyum oksit (Tb_4O_7), Disprozyum oksit (Dy_2O_3), Holmium oksit (Ho_2O_3), Erbiyum oksit (Er_2O_3), Ytterbiyum oksit (Yb_2O_3), Lutesyum oksit (Lu_2O_3), Skandyum oksit (Sc_2O_3) ve Tulium oksittir (Tm_2O_3). Bu oksitler güneş hücresi, optik, kataliz, seramik, hassas yatırım dökümü, cam füzyonu ve cam parlatma, fotokataliz gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Markose vd. 2018, Zakaly vd. 2020, Ghosh vd. 2021).

2.2 Seryum oksit (CeO_2)

Nadir toprak oksitlerinin sadece malzeme olarak kullanılmamalarına rağmen, diğer malzemelere katkı eleman olarak belirli miktarlarda eklenildiğinde kompozit malzemelerin özelliklerini arttırdığı ispatlanmıştır. Tane boyutu ne kadar küçük kullanılırsa, elde edilen özelliklerinde daha üstün olduğu da yapılan bilimsel çalışmalarda kaydedilmiştir. Nadir toprak oksitlerinden olan CeO_2 özellikle son 10 yılda araştırmacılar tarafından özellikleri ve kullanım alanlarının yaygınlaştırılmasına yönelik olarak yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Yapılan çalışmalarla da CeO_2 partiküllerinin aşındırıcı olarak aşınma direnci, kimyasal aşınma direnci ve iyi parlatma etkisi gibi özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bunun temel sebebi ise özellikle nano partiküllü CeO_2 'nin yağlanmış yüzeylerde kendi kendini onaran tribo filmler oluşturma yeteneğinden kaynaklanmaktadır. CeO_2 nanopartikülleri, Ce^{3+} ve Ce^{4+} oksidasyon durumları arasında geçiş yapabildikleri için sürtünme stresi altında koruyucu tabakalar oluşturarak hasarlı yüzeyleri onarmalarını sağlamaktadırlar (Yadav 2022).

Seryum oksit (CeO_2) nanopartikülleri, seryum oksit olarak da bilinirler ve farklı kimyasal özellikleri ve geniş uygulama alanları nedeniyle mühendislik ve endüstride büyük beğeni

toplarlar. Özellikle araç emisyonlarını azaltmadaki üstün katalitik performanslarıyla bilinirler; karbon monoksit ve hidrokarbonların oksidasyonuna yardımcı olarak katalitik konvertörlerde önemli bir rol oynarlar. Oksijen depolama kapasiteleri, katalitik reaksiyonlar sırasında oksijen seviyelerinin düzenlenmesinde kritik öneme sahiptir ve bu da onları otomotiv egzoz sistemlerinde vazgeçilmez kılar. Katalitik uygulamalarının yanı sıra, CeO₂ partikülleri malzeme biliminde de hayati önem taşır; termal kararlılıkları ve korozyon dirençleri, türbin kanatlarındaki kaplamalar gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için faydalıdır. Elektronik sektöründe, mükemmel kimyasal kararlılıkları ve mekanik özellikleri nedeniyle yakıt hücrelerinde ve yarı iletkenler için parlatma maddesi olarak kullanılırlar. Biyomedikal alanı, özellikle oksidatif stresle ilişkili hastalıkların tedavisinde ve ilaç iletim sistemlerinde CeO₂ nanopartiküllerinin antioksidan özelliklerinden yararlanarak, biyoyumluluklarından ve benzersiz farmakolojik özelliklerinden yararlanmaktadır. Ayrıca, UV ışığını emme ve yansıtma yetenekleri onları güneş kremlerinde ve koruyucu kaplamalarda kullanışlı kılmaktadır. Bu nedenle, seryum oksit nanopartikülleri, katalitik verimlilikleri, kararlılıkları ve işlevsel çok yönlülükleri sayesinde çeşitli endüstriyel ve mühendislik ortamlarında kritik öneme sahiptir (Karmakar ve Das 2025).

Çalışmalar, bu uyarlanabilir tribofilm oluşumunun, yüzey hasarlarını onarmaya yardımcı olduğunu ve esnek bir koruyucu tabaka oluşturarak yüzey stabilitesini artırdığını göstermektedir (Song vd. 2021). Yağlayıcı yağlara takviye edilerek kullanıldıklarında da yüksek bir yüzey alanı sağlandığı için; etkileşimi kolaylaştırır ve nano skalada sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmaktadırlar (Younis vd. 2016). Sonuçta, tribolojik olarak CeO₂ nanopartiküllerinin matrise takviyesinde; CeO₂ nanopartiküllerinin sürtünmeyi azaltmaya ve aşırı basınç performansı sağlamaya elverişli nitelikler sergilediğini göstermektedir (Pena-Paras vd. 2018). Yapılan çalışmalarda optik sektöründe çizik giderici olarak (Krishna vd. 1998), otomotiv sektöründe dizel ve dizel-biyodizel-etanol karışımli yakıtlarda kullanılmasında motor performansının arttırarak emisyon değerlerini de düşürmektedir (Le vd., 2023). Bununla beraber enerji kullanımı, otomotiv termal yönetimi, havacılık ve uzay teknolojisi, akustik, savunma, mikroakışkanlar, deniz mimarisi, nükleer güvenlik, güneş enerjisi, askeri teknoloji, ilaç, elektronik soğutma, süper bilgisayar ve sensör teknolojileri gibi çeşitli mühendislik ve endüstriyel alanlardaki

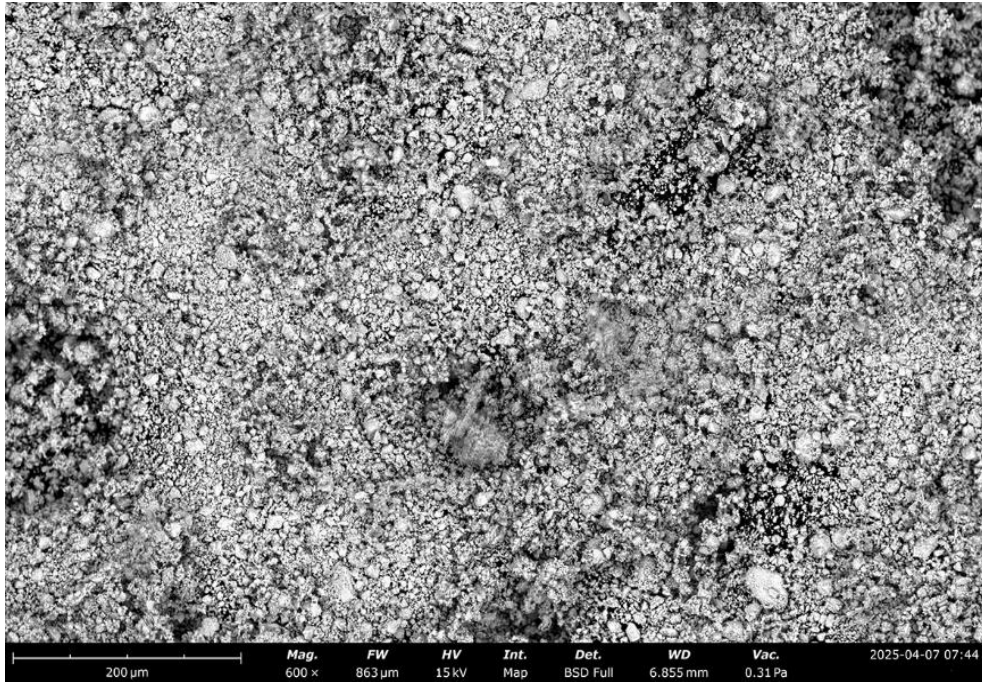
geniş uygulamaları nedeniyle ilgi görmüştür (Sarkar vd. 2015, Karmakar ve Das 2025). Kompozit fren balatalarının üretiminde çeşitli aşındırıcı malzemeler kullanılsa da nadir toprak oksitlerinden CeO₂ kullanımı ile ilgili bir çalışmanın olmaması, literatürde önemli bir eksiklik olarak değerlendirilmiştir. Bu alışmada, CeO₂'nin tane boyutu (mikro ve nano) ve konsantrasyonunun (ağırlıkça %5 ve %10) frenleme özelliklerine olan etkisi sistematik olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar, tarım aletlerinde yaygın olarak kullanılan ticari bir balata ile karşılaştırılmıştır. Üretilen kompozitlerin mikroyapısal karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımı X-ışınları spektroskopisi (EDS), X-ışını kırınımı (XRD) ve sertlik ölçümleri gibi ileri analiz yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, frenleme testleri sırasında ölçülen sürtünme katsayıları, aşınma davranışları ve CeO₂ takviyesinin karşı yüzeyde oluşturduğu pürüzlülük değişimleri titizlikle değerlendirilerek, malzemenin tribolojik performansına dair kapsamlı bir analiz sunulmuştur. Bu kapsamlı incelemeler, CeO₂ ilavesinin fren balatalarının aşınma direncini ve sürtünme kararlılığını nasıl etkilediğini ortaya koyarak, endüstriyel uygulamalar için optimize edilmiş kompozit tasarımlarına yönelik önemli veriler sağlamaktadır.

3. MATERYAL ve METOT

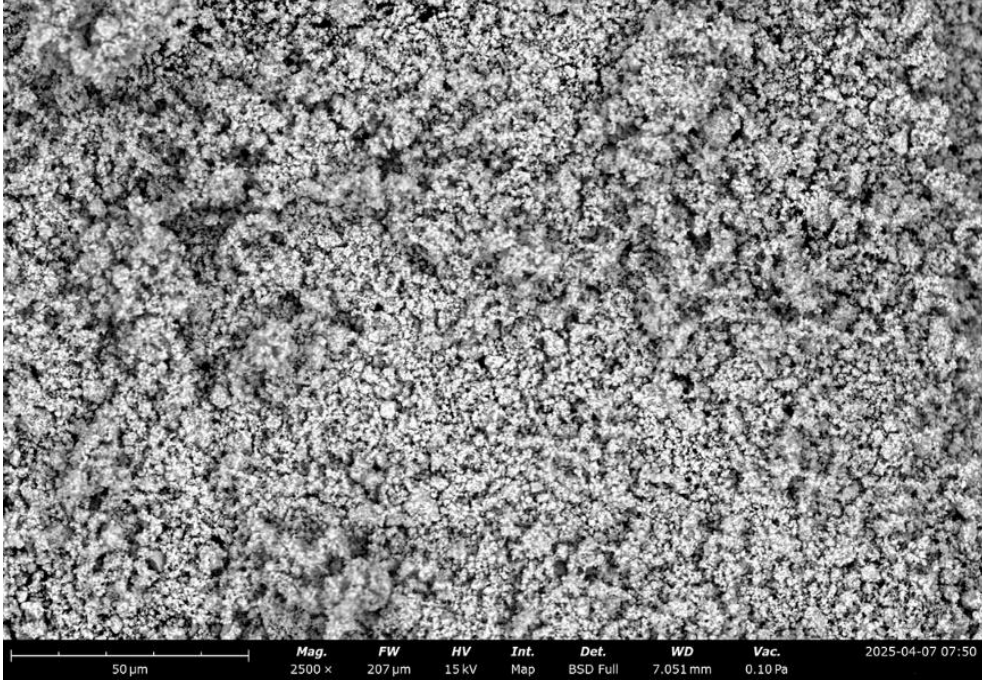
3.1 Numune Üretimi

3.1.1 Numune İçeriği

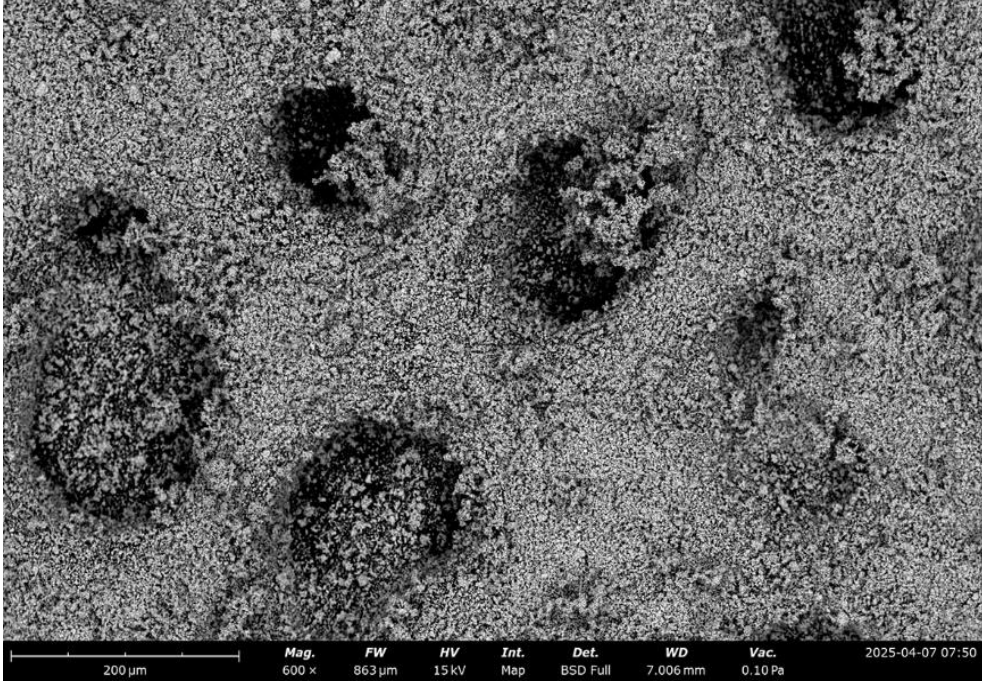
Aşağıdaki resimlerde farklı büyütme oranlarında çekilmiş nano ve mikro nano partikül boyutlu CeO_2 'e ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir. Resim 3.1 600X büyütmede alınan mikro partikül boyutlu CeO_2 görüntüsünü, Resim 3.2 2500X büyütmede mikro partikül boyutlu CeO_2 görüntüsünü, Resim 3.3 600X büyütmede nano partikül boyutlu CeO_2 görüntüsünü, Resim 3.4 ise 2500X büyütmede nano partikül boyutlu CeO_2 partiküllerinin görüntüsünü temsil etmektedir. Ölçümler sonucunda, nano CeO_2 partiküllerinin ortalama tanecik boyutu 19 nm, mikro CeO_2 partiküllerinin ortalama tanecik boyutu ise 44 μm olarak belirlenmiştir.



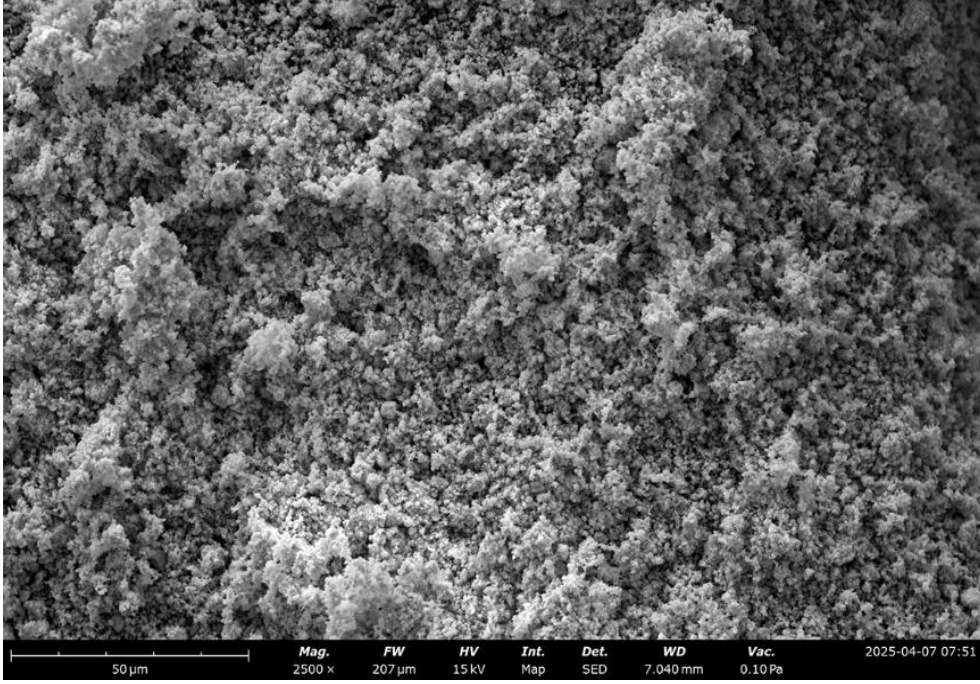
Resim 3.1 600x büyütme yapılmış mikro boyuta sahip CeO_2 ye ait SEM görüntüsü



Resim 3.2 2500x büyütme yapılmış mikro boyuta sahip CeO2 ye ait SEM görüntüsü



Resim 3.3 600x büyütme yapılmış nano boyuta sahip CeO2 ye ait SEM görüntüsü



Resim 3.4 2500X büyütme yapılmış nano boyuta sahip CeO₂ ye ait SEM görüntüsü

3.1.2 Üretim Süreci

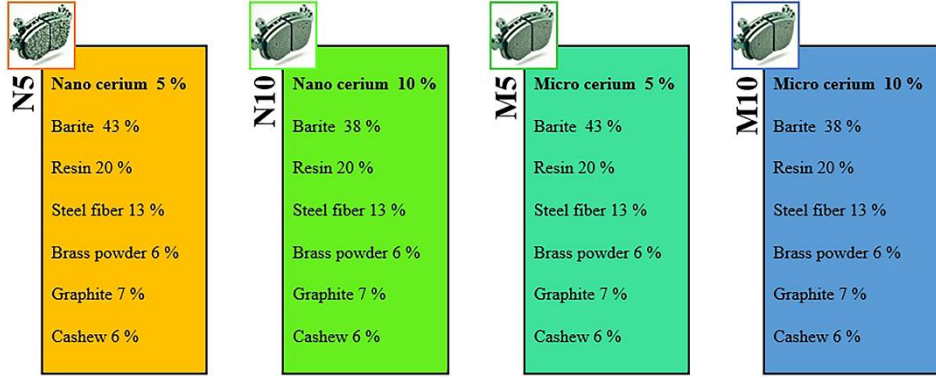
3.1.2.1 Numune İçeriğinin Hazırlanması

Fren balatası kompozit numunelerinin geliştirilmesi, kontrollü ve tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek amacıyla sıcak kalıplama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Raghunathan vd. 2024). Numunelerin geliştirilmesi sürecinde uygulanan üretim parametreleri, konuyla ilgili literatürdeki kapsamlı çalışmalar ve araştırmacıların deneysel bulguları (Sugözü vd. 2022, Akbulut vd. 2023) doğrultusunda optimize edilmiştir. Özellikle kompozit malzeme formülasyonunda kullanılan bileşen oranları, karıştırma süreleri, basınç ve sıcaklık değerleri gibi kritik üretim parametreleri, benzer uygulamalarda kanıtlanmış performans kriterleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Yavuz ve Bayrakçeken 2025). Bu yaklaşım, fren balatası numunelerinin performans özelliklerinin kontrol edilebilir şekilde geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Üretim süreci, kompozit karışımını oluşturan tüm bileşenler Şekil 3.1'de belirtilen ağırlıkça yüzdelik oranlara göre ± 1 mg hassasiyetinde dijital hassas terazi kullanılarak tartılmıştır. Tartılan malzemeler, homojen bir karışım elde etmek için kinetik tip karıştırıcı ile 60 1/min hızda ve 20 dakika boyunca karıştırılmıştır. Homojen hale

getirilen karışım, her bir numune için 10 gram olacak şekilde yeniden hassas terazide tartılarak kontrol edilmiştir. Tartılan karışım, 25 mm çapında standart silindirik numune boyutlarına sahip sıcak kalıbın her bir gözüne dikkatle deşarj edilmiştir. Kalıp içindeki karışım, 30 MPa basınç altında, 150 °C sıcaklıkta ve 15 dakikalık presleme süresi ile şekillendirilmiştir. Presleme işlemi sonrasında numuneler kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığında kontrollü soğumaya bırakılmıştır.

Fren balatası kompozitlerinin üretimi için nano ve mikro boyuttaki CeO₂ malzemeleri ile Şekil 3.1'de sunulan ağırlıkça yüzdesel oranlar dikkate alınarak diğer malzemeler kullanılmıştır. Fren balatası numunelerinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan reçine kompozitin mekanik mukavemetini ve aşınma direncini artırmak için sabit oranda kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan reçine fren balataları için kullanılan toz novalak reçinedir. Çelik elyaf, sürtünme performansını ve ısıl iletkenliği iyileştirmek amacıyla eklenmiştir. Pirinç Tozu, yoğunluk ve sürtünme katsayısını optimize etmek için karışıma dahil edilmiştir. Grafit katı yağlayıcı olarak yağlamayı sağlamak ve termal stabiliteyi desteklemek için sabit miktarda kullanılmıştır. Cashew tozu, sürtünme modifikasyonu ve titreşim emilimi için standart oranda karışım içerisine eklenmiştir. Yukarıda belirtilen bu malzemelerin tüm numunelerdeki yüzdeleri değiştirilmemiş olup, yalnızca barit ve bu çalışma için araştırma konusu olan CeO₂ (seryum oksit) oranları değişken oranlarda fren balatası kompozitlerinde kullanılmıştır. Değişken oranlarda kullanılan katkılardan barit dolgu maddesi olarak maliyet düşürücü olarak kullanılmıştır. Nano ve mikro CeO₂ katkıları ise nano ve mikro boyuttaki CeO₂ için %5 ve %10 ağırlıkça değişken oranlar da kullanılmıştır. Bu değişken oranlar, sürtünme performansı, aşınma direnci ve fren balatası numunelerinin disk pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla belirlenmiştir. Farklı oranlarda geliştirilen numunelerle optimal CeO₂ boyutu ve yüzdesinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3.1 Fren balatası kompozitini oluşturan malzemeler (ağırlıkça yüzdesel karışım oranları)

3.2 Fren balataları özelliklerinin belirlenmesi

3.2.1 Yoğunluk Ölçüm Yöntemi

Geliştirilen fren balatası numunelerinin yoğunlukları, Arşimet prensibi kullanılarak hassas bir şekilde belirlenmiştir. Bu yöntemde numunelerin yoğunlukları hassas terazide ($\pm 0,1$ mg) yoğunluk ölçüm kiti ile ölçülmüştür. Her numune grubu için en az 3 ölçüm yapılarak hesaplanan ortalama değerler rapor edilmiştir. Arşimet prensibine göre belirlenen Denklem 3.1 yoğunluk ölçümünde kullanılmıştır. Resim 3.5’de gösterimi yapılan hassas terazi ve yoğunluk ölçüm aparatı ile ölçüm yapılmıştır. Arşimet prensibinde göre numunelerin havada ve suda ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümleri tamamlanan numunelerden ortalama değerler kullanılarak yoğunluk değeri elde edilmiştir (Denklem 3.1).

$$\rho_b = \frac{g_h}{g_h - g_s} \rho_s \quad (3.1)$$



Resim 3.5 Yoğunluk ölçüm düzeneği.

3.2.2 Fren Balataları Sertlikleri Ölçüm Yöntemi

Resim 3.3’de sertlik ölçümü için kullanılan Shore D ölçüm standı gösterilmiştir. Numune sertlikleri her bir numune grubundan 3 adet numunenin 5 farklı noktasından alınan ölçümlerin ortalaması dikkate alınarak ASTM D2240 standardında Shore D sertlik ölçüm cihazı ile belirlenmiştir (Bayrakçeken ve Yavuz 2024).



Resim 3.6 Numune sertlikleri ölçümünde kullanılan Shore D ölçüm standı

3.2.3 Numune sürtünme katsayısı (μ) ve aşınma oranları Ölçüm Yöntemi

Fren balatası numunelerinin sürtünme katsayısı (μ) ve aşınma oranları TS555 (TS555, 2019) fren balatası standardında 1 MPa yük, 6 m/s disk hızı ve 10800 m kuru kayma mesafesinde belirlenmiştir. Şekil 3.2’de test cihazında deneyler gerçekleştirilen fren balatası deney cihazı görüntüleri verilmiştir. Çizelge 3.1’de fren balatası test cihazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Fren balata test cihazı özellikleri (Yavuz 2022).

Parça Grubu	Özellik
Elektrik Motoru	Toplam gücü 11 kW
Disk Grubu	Yarıçapı 200-300 mm arasındaki diskler ile kullanılabilir.
Numune Tutucu	Numune geometrisine göre tutucu üretilerek kullanılabilir.
Sıcaklık Sensörü	Maksimum 500 °C
Yük Grubu	Pnömatik basınç sistemi ile 1200 N’a kadar yük uygulanabilir.
Yazılım ve Kontrol Ünitesi	Sıcaklık, sürtünme katsayısı ve devir değerlerini kayıt altına almak için kullanılmaktadır.

Test cihazında üretilen tüm balata numune testleri yapılmıştır. Test sonucunda elde edilen sonuçlara göre aşağıda belirtilen sürtünme katsayısı ve sürtünme katsayısı kararlılık denklemleri kullanılmıştır (Denklemler 4.1 ve 4.2).

$$SK = \frac{\mu_o}{\mu_m} \cdot 100 \quad (4.1)$$

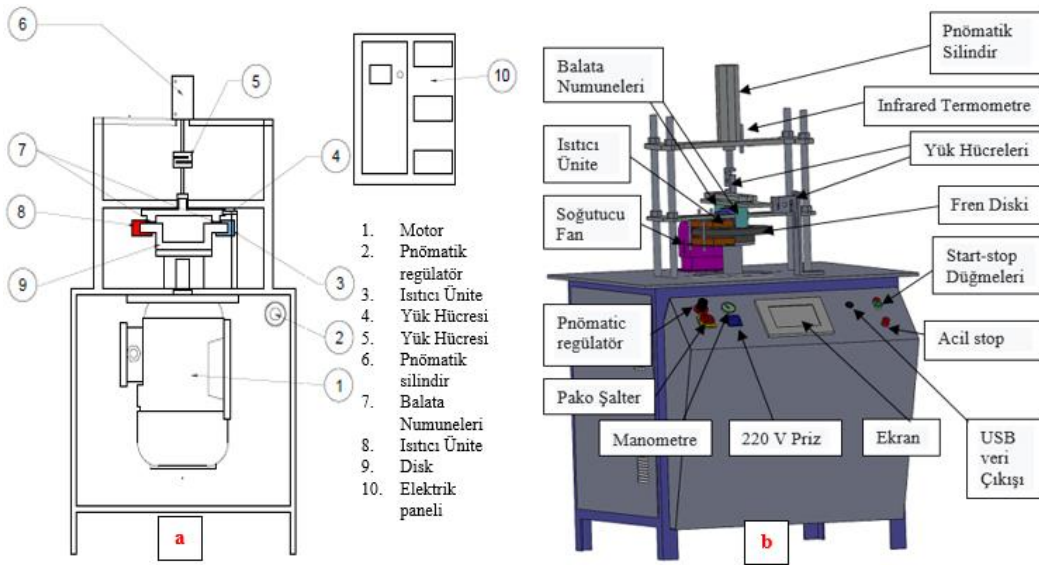
$$\mu = \frac{f}{F} \quad (4.2)$$

Denklemler 4.1 ve 4.2’ye göre;

SK: Sürtünme katsayısı kararlılığı

- μ : Sürtünme katsayısı
 μ_o : Ortalama sürtünme katsayısı
 μ_m : Maksimum sürtünme katsayısı
 f : Dinamometrede okunan sürtünme kuvveti
 F : Deney numunesine uygulanan basma kuvveti

Test boyunca anlık olarak μ değerleri kaydedilmiştir. Ortalama μ , tüm test mesafesi boyunca alınan ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Numunelerin test öncesi ve sonrası kütle kayıpları hassas terazide (± 0.1 mg) ölçülerek aşınma oranları hesaplanmıştır.



Şekil 3.2 Fren balatası test cihazı, a) Şematik görünüm, b) Tasarım görünümü (Yavuz 2022).

3.2.4 Fren diski Pürüzlülük Ölçüm Yöntemi

Balata numunelerinde, pürüzlülük ölçümünde kararlı bir değer elde edilemediği için disk üzerinden ölçüm yapılmasına karar verilmiştir. Pürüzlülük ölçüm cihazı ile disk yüzeyinden pürüzlülük değerleri alınmıştır. Deney öncesinde ve sonrasın 120 derecedeki aynı noktalardan Ra ve Rz değerleri elde edilmektedir. Hatalı sonuçların önüne geçmek için her kontrolde 3 kez değer alınmıştır. Resim 3.7’de gösterimi yapılan Time TR220 test cihazı disk yüzeyinde pürüzlülük testi için kullanılmış olup, Çizelge 3.2’de cihaza ait teknik katalog verileri yer almaktadır.



Resim 3.7 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

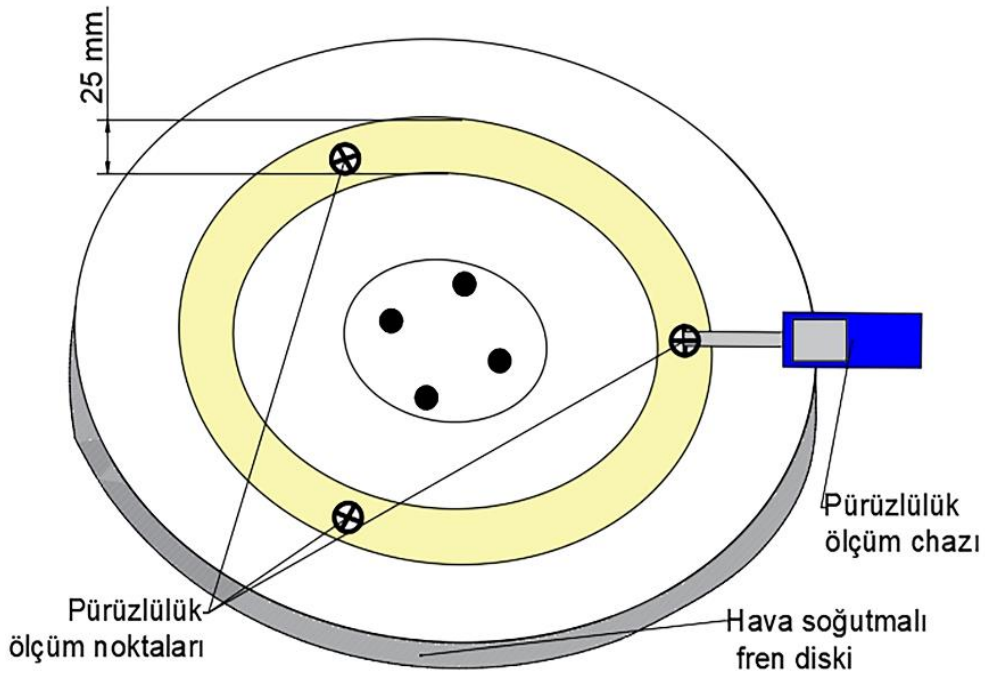
Çizelge 3.2 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı teknik özellikleri (İnt. Kyn. 1).

Ölçüm Parametresi	Ra, Rz
Ölçüm Aralığı	Ra: 0,025-12,5 μ m Rz: 0,02-160 μ m
Z Eksenli Ölçüm aralığı	\pm 20 μ m, \pm 40 μ m, \pm 60 μ m
Ekran Çözünürlüğü	0,001 μ m
Birim	μ m
Ölçüm Uzunlukları	0,25mm (Ra: 0,02- 0,32 μ m) 0,8 mm (Ra: 0,32- 2,50 μ m)
Minimum / Maksimum Ölçme Boyu	1,3mm / 17,5
Hassasiyet	\leq \pm 10%

Disk yüzeyinde oluşan Ra ve Rz pürüzlülük değerleri, 6 m/s disk hızında deney öncesi ve bir saatlik çalışmadaki deney sonrasında disk üzerindeki 120° açı ile bölünmüş üç farklı ölçüm noktasından ölçülmüştür. Ölçümler 40 μ m ölçüm aralığında ve 2,5 mm ölçüm uzunluğunda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre deney öncesi ve deney sonrasındaki üç ölçüm noktasından alınan ortalama disk pürüzlülük değerleri karşılaştırılmıştır (Yavuz ve Bayrakçeken 2022).

Fren testleri sırasında disk yüzeyinde oluşan pürüzlülük değişimlerin değerlendirilmesi

için Time TR220 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu analiz, sürtünme kaynaklı aşınmanın disk yüzeyi üzerindeki etkisini Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) ve Rz (maksimum yükseklik farkı) parametreleri ile karakterize etmektedir (Yavuz, 2024). Ölçüm noktaları disk üzerinde 120° aralıklarla dağıtılmış Şekil 4'de gösterilen standart ölçüm noktalarında gerçekleştirildi. Pürüzlülük ölçüm cihazında ölçüm uzunluğu 2,5 mm, ölçüm çözünürlüğü 40 µm tarama aralığı şartlarında ölçümler gerçekleştirildi. Temizlenmiş disk yüzeyinde diskin test öncesi Ra ve Rz değerleri, Şekil 4'de gösterimi yapılan her noktadan alınan ölçümlerin alınması ile başlamıştır. Test sonrası ölçümler frenleme performansı testi sonrası, disk soğutularak test öncesinde ölçümler yapılan aynı noktalardan ölçümler tekrarlanmıştır. Termal genleşme etkisini minimize etmek için ölçümler oda sıcaklığında (23 ± 2 °C) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3 Disk yüzeyi pürüzlülük ölçüm noktaları

3.2.5 Numunelerin Mikroskobik ve mineralojik analizleri

SEM analizi yapılmadan önce numune yüzeyleri iletken bir malzeme ile kaplanması Resim 3.5'de gösterimi yapılan Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ait Bal-Tek marka SCD005 model karbon kaplama cihazı ile

kaplama işlemi yapılmıştır.



Resim 3.8 Karbon Kaplama Cihazı

Hakkâri Üniversitesine ait Thermo Fisher Phenom XL markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında üretilen numunelerin incelemesi yapılmıştır. Cihaz görüntü üzerinde nokta, çizgi, alan ve haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak elementer analizleri yapabilmektedir. Numunelerin kristal yapı ve faz kompozisyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Ruker Marka D8 Advance Model (Resim 3.9) X-Işını Kırınımı cihazı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) ile aşınma yüzeyindeki elementel dağılım haritalanmıştır.



Resim 3.9 X-Işını Kırınımı cihazı (XRD)

4. DENEYSEL BULGULAR

4.1 Karakterizasyon

Fren balata numunelerinin karakteristik özellikleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Mikro ve nano boyutlu numunelerde, CeO₂ katkı oranının artmasıyla birlikte yoğunluk (d) değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, CeO₂'nin (d = 7,22 g/cm³) yerini aldığı barit (d = 4,45 g/cm³) malzemesine kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, mikro boyutlu numunelerin yoğunluk değerlerinin nano boyutlu numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Benzer şekilde, CeO₂ katkı oranının artmasıyla numunelerin sertlik değerlerinde de belirgin bir artış meydana gelmiştir. Nano boyutlu kompozitlerde, %5 ve %10 CeO₂ içeren karışımların ortalama sürtünme katsayısı 0,25 olarak ölçülmüş ve bu değer her iki kompozisyon için de aynı olduğu görülmüştür. Mikro boyutlu numunelerde ise, %10 CeO₂ içeren numunenin ortalama sürtünme katsayısı, %5 CeO₂ içeren numuneye kıyasla %1 daha yüksek çıkmıştır.

Aşınma performansı açısından, numunelerdeki CeO₂ oranı arttıkça aşınma direncinin arttığı ve aşınma oranlarının azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bu davranış, artan sertlik değerleriyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca, nano boyutlu karışımların aşınma direncinin mikro boyutlu numunelere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

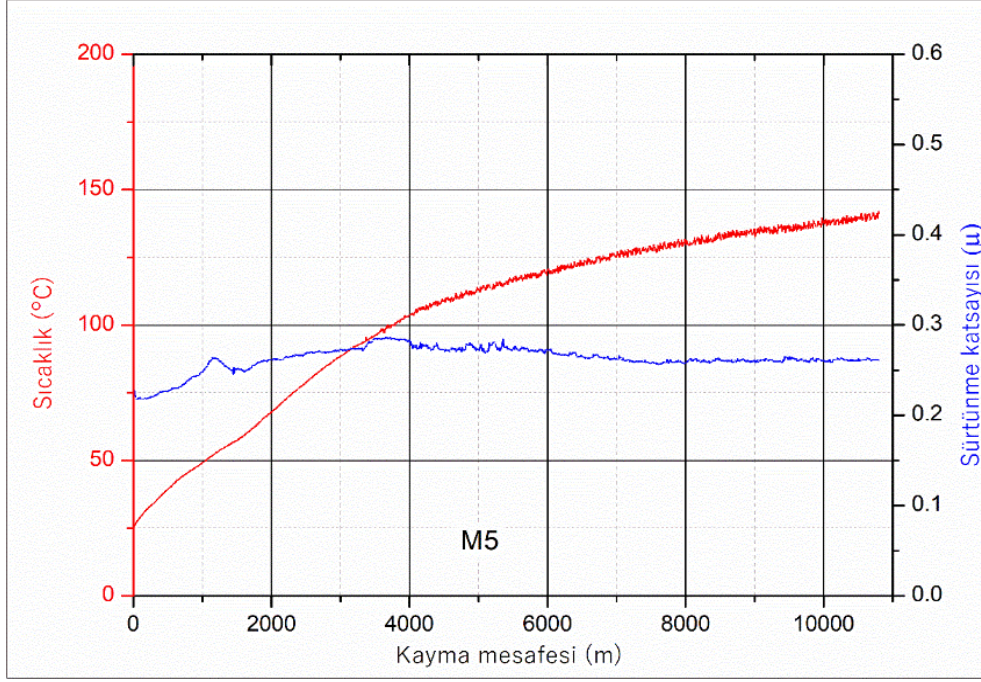
Çizelge 4.1 Numunelerin karakteristik değerleri

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Shore D)	Sürtünme katsayısı (Ortalama)	Aşınma oranı (cm ³ /Nm)
N5	2,581 ± 0,0175	93,87 ± 3,09	0,25 ± 0,013	9,28 X 10 ⁻⁸
N10	2,602 ± 0,0143	95,33 ± 2,33	0,25 ± 0,025	8,74 X 10 ⁻⁸
M5	2,618 ± 0,0118	93,27 ± 2,54	0,26 ± 0,013	3,67 X 10 ⁻⁸
M10	2,650 ± 0,0098	94,43 ± 1,98	0,27 ± 0,025	3,56 X 10 ⁻⁸

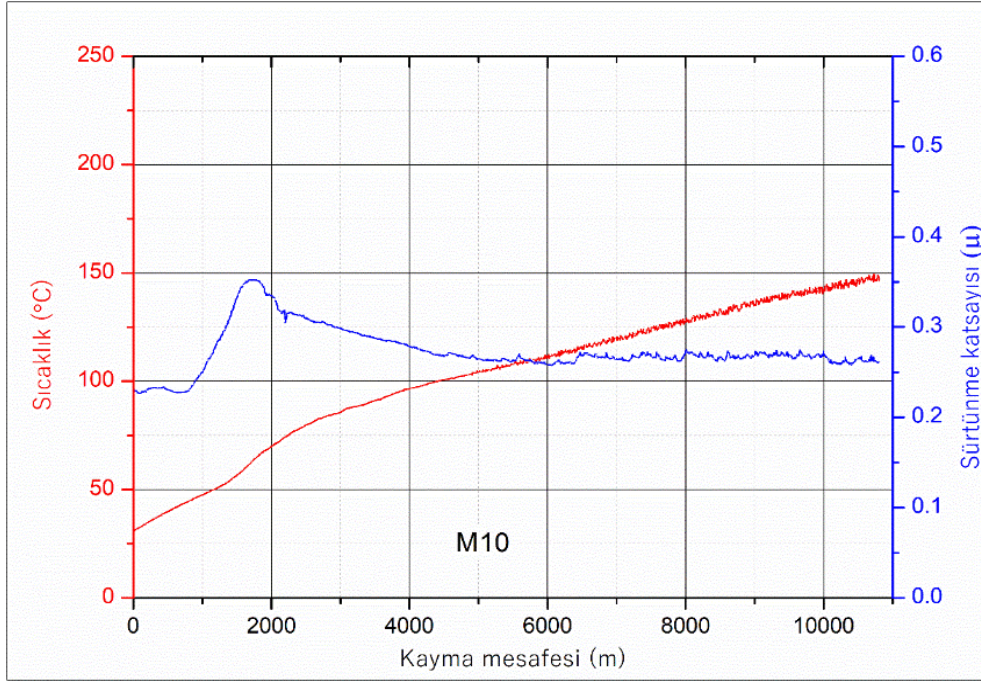
4.2 Sürtünme Katsayısı (μ)

Şekil 4.1 M5, Şekil 4.2 M10, Şekil 4.3 N5 ve Şekil 4.4 N10 kodlu numunelerin 10 800 metre kuru kayma mesafesindeki anlık sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimleri grafiksel bir şekilde sunulmuştur. Tüm numunelerde, sürtünme katsayısı değerleri ilk 4500 metre boyunca bir dalgalanma göstermiştir. Bu dalgalanmanın nedeni, numunelerin başlangıç aşamasında disk yüzeyiyle tam temas sağlayamaması ve yüzey pürüzlülüğünün zamanla değişmesi olarak yorumlanabilir. Ancak, 4 500 metreden sonra sürtünme katsayısı değerlerinin kararlı bir seviyeye ulaşması, numunelerin disk yüzeyine optimal uyum sağladığını ve aşınma dinamiklerinin dengelendiğini göstermektedir.

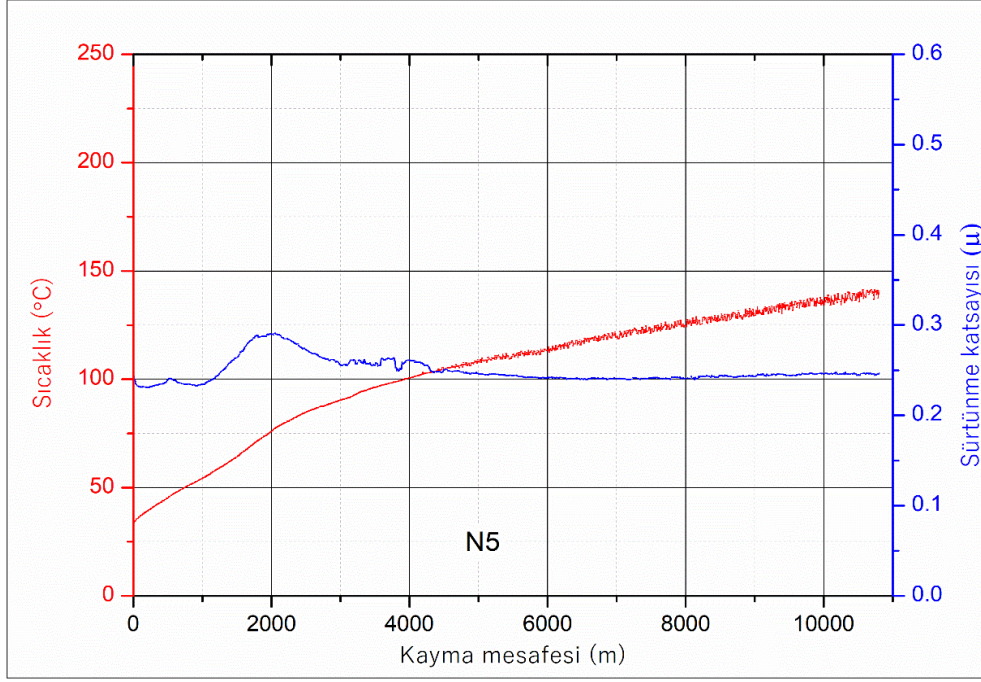
Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de numunelerin kayma mesafesine göre sıcaklık değerleri incelendiğinde ise, artan kayma mesafesiyle birlikte sürtünme kuvvetine bağlı olarak termal enerjinin birikmesi sonucunda istikrarlı bir yükselme eğilimi gözlemlenmiştir. Numunelerin sürtünme katsayıları, test süresince 0,20 ile 0,35 aralığında değişkenlik göstermiş olup, bu değerler TS555 (TS555, 2019) standardının belirlediği 0,25 – 0,70 aralığına uygunluk göstermektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen fren balatalarının sadece endüstriyel standartları karşılamakla kalmayıp, aynı zamanda dengeli bir sürtünme performansı sergilediğini ortaya koymaktadır.



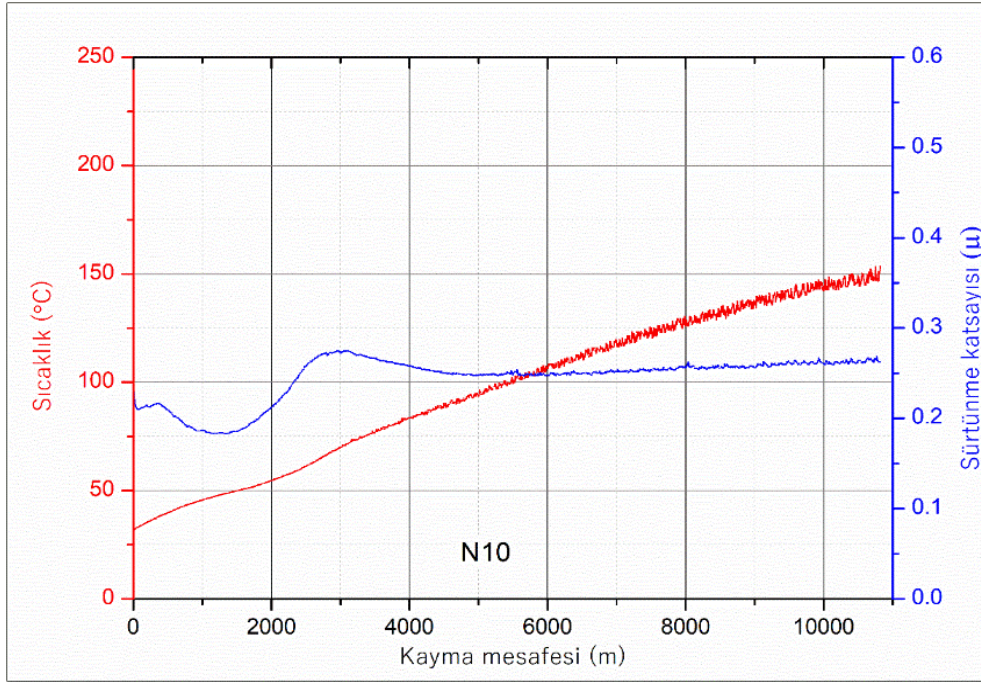
Şekil 4.1 M5 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği



Şekil 4.2 M10 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği



Şekil 4.3 N5 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği

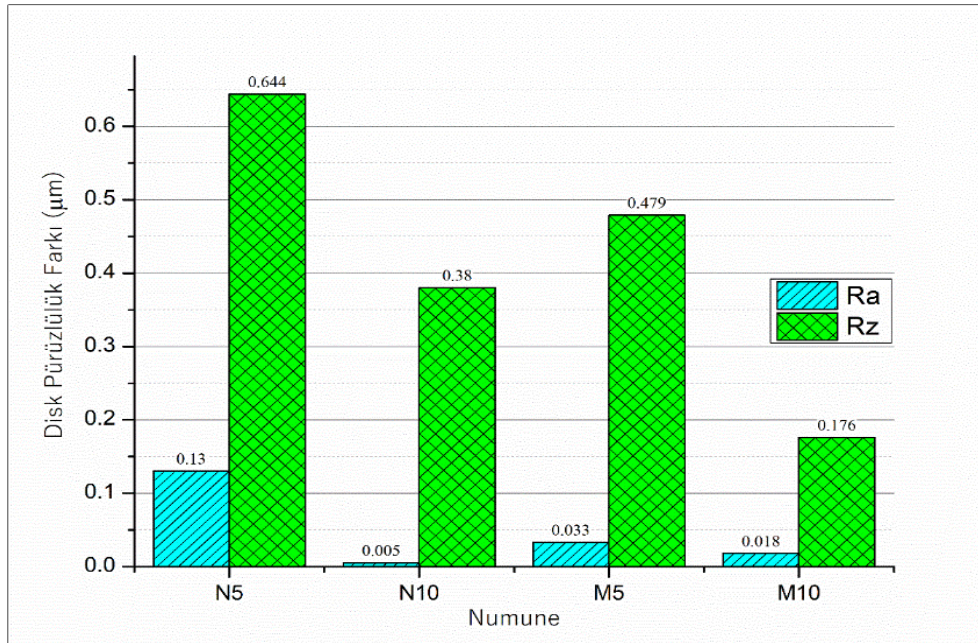


Şekil 4.4 N10 numunesi kayma mesafesine göre sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği

4.3 Disk sürtünme yüzeyi Ra ve Rz yüzey pürüzlülük farkları

Şekil 4.5’de numunelerin tribolojik testler öncesi ve sonrasında llen Ra (ortalama yüzey przllg) ve Rz (maksimum profil yksekligi) parametrelerindeki değişimler gösterilmiştir. 10 800 m mesafeli kuru kayma testi sonrasında, CeO₂ katkı oranı arttıkça disk yüzeyindeki pürüzlülük artışının önemli ölçüde sınırlandığı gözlemlenmiştir. Özellikle CeO₂ oranının artması ile bu farkın azaldığı tespit edilmiştir

Optik endüstrisinde polisaj malzemesi olarak yaygın kullanılan CeO₂, fren sistemleri bağlamında da önemli avantajlar sunmaktadır. Yapılan pürüzlülük analizleri, CeO₂ katkılı numunelerde disk yüzeyinde oluşan çizik ve girinti yoğunluğunun belirgin şekilde azaldığını doğrulamaktadır. Bu durum, bileşenlerin servis ömrünü uzatmasının yanı sıra, frenleme sırasında titreşimleri azaltarak sürüş konforunu artırmaktadır. Bundan dolayı ısı dağılımını iyileştirerek termal çarpılma riskini düşüreceği ve aynı zamanda da sürtünme katsayısının daha stabil kalmasını sağlamaya yardımcı olabileceği öngörülmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, özellikle tarımsal alanda kullanılan fren sistemleri için nano ve mikro ebatlarda %5 ile %10 CeO₂ katkısının disk yüzey przllg değişiminde optimal bir denge sağladığını göstermektedir.

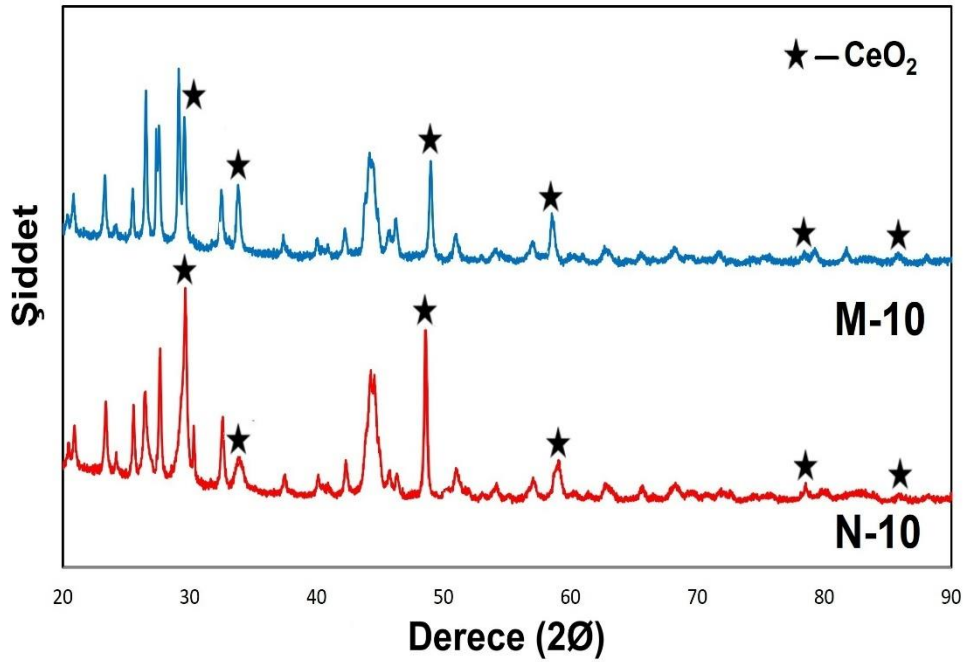


Şekil 4.5 Disk sürtünme yüzeyi Ra ve Rz yüzey pürüzlülük farkları

4.4 X-Işınlari Kırınım Analizi (XRD)

Şekil 4.6'da N-10 ve M-10 kodlu kompozit balara örneklerine ait XRD desen analizi yer almaktadır. Bu çalışmada kompozit balataya CeO₂'nin katkısının ve tane boyutunun etkisi incelendiği için, X-ışınları analizinde yüksek NTO oranına sahip örnekler incelenmiştir. X-ışınları kırınım analizi incelendiğinde hem nano hem de mikro tane boyutunda REO takviye edilen örneklerde 28.548°, 48.485°, 56.344°, 33.082°, 75.704°, 88.433° açılarında CeO₂ (PDF Code: 01-075-9470) pikleri mevcuttur.

Nano takviyeli örneklerde mikro takviyelilere nazaran pik yoğunluklarının yüksek olduğu görülmektedir. Eklenen malzemenin tane boyutunun küçülmesi ile kompozit içerisinde kapladığı yüzey alanı artarak pik şiddetlerini de arttırmaktadır (Hinrichs vd. 2011, Xiao vd. 2023). SEM bulguları, XRD'deki amorf içerik artışı ile korelasyonlu olarak yorumlanmıştır.



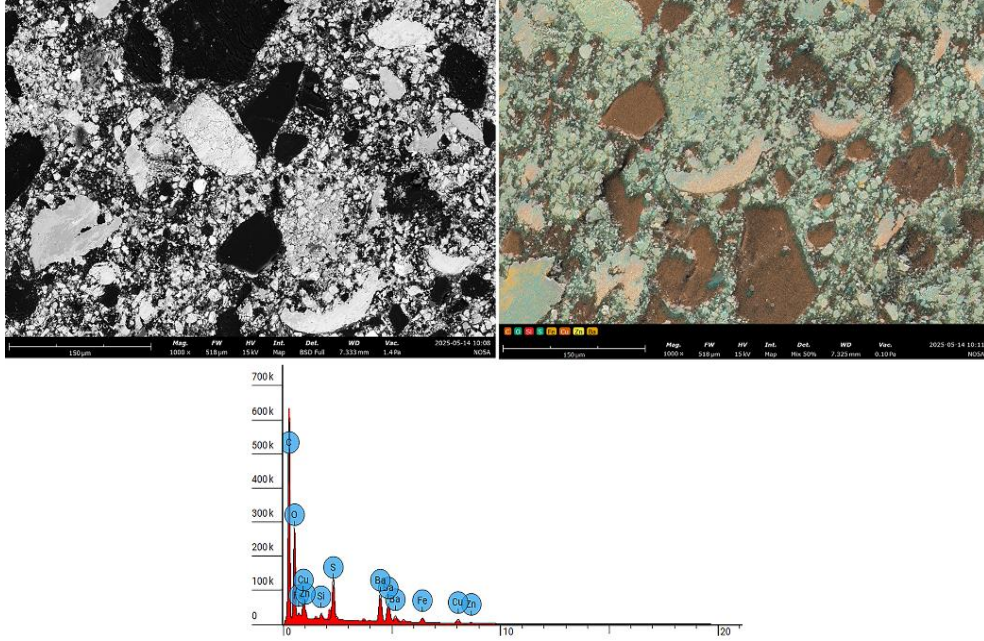
Şekil 4.6 M10 ve N10 kodlu numunelere ait XRD analizleri

4.5 SEM ve EDX analizleri

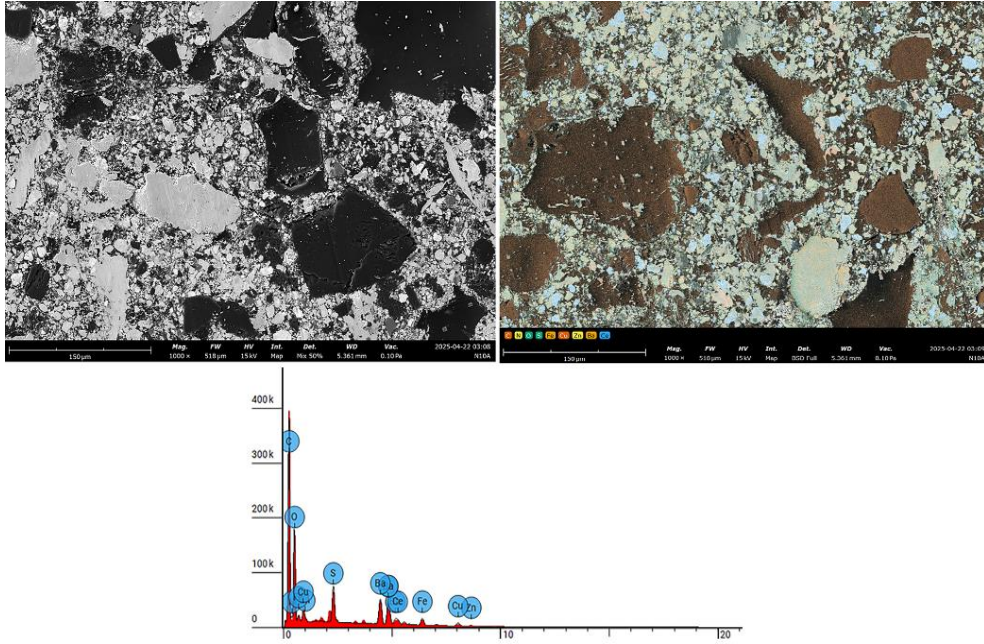
Aşağıdaki şekillerde farklı 5% ve 10% karışım oranlarında ve nano ile mikro boyutlarda CeO₂ partikülleri içeren fren sürtünme malzemelerinin aşınma sonrası yüzey

morfolojileri ve elementel dağılımları SEM analizleri, EDX haritaları ve grafikleri ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.7 %5 nano partikül boyutlu CeO₂ içeren numunenin aşınma sonrası mikro yapısal özelliklerini, Şekil 4.8 %10 nano partikül boyutlu CeO₂ içeren numuneyi, Şekil 4.9 %5 mikro partikül boyutlu CeO₂ içeren numuneyi ve Şekil 4.10 ise %10 mikro partikül boyutlu CeO₂ içeren numunenin mikroskobik analizleri gösterilmiştir.

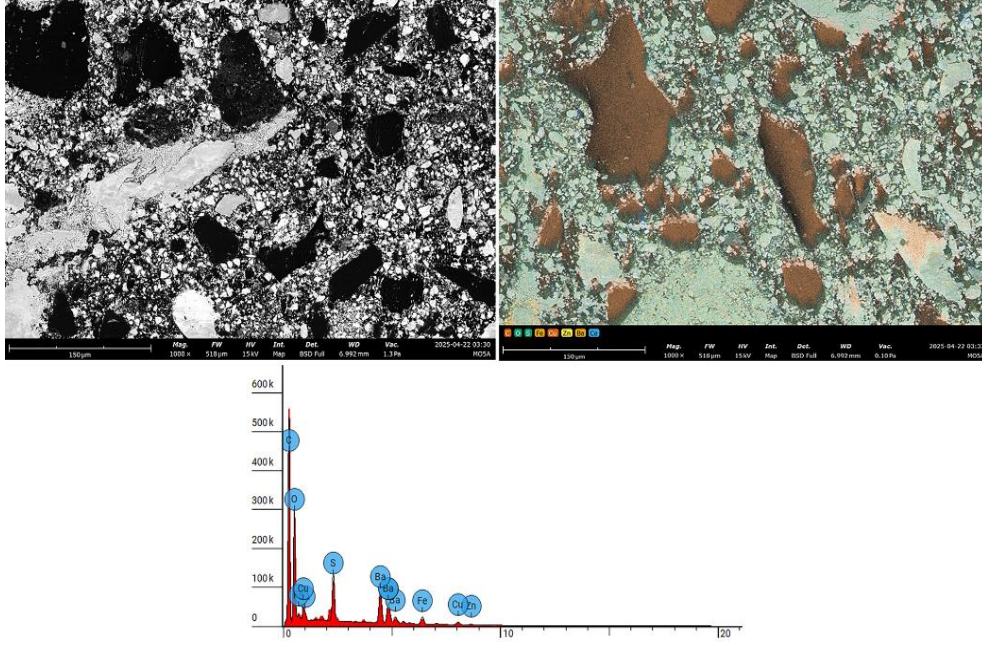
Yapılan SEM analizinde sürtünme yüzeylerinden fren sürtünme malzemesi içeriğinde bulunan tüm malzemelerin sürtünmeye aktif olarak katıldığı tespit edilmiştir. Nano boyutta malzeme kullanımı ile sürtünme tabakası oluşumuna katkı sağlayan adhezif aşınma artmıştır (Sugozu, 2019). Ek olarak aşınma sonucu oluşan yüzey morfolojileri incelendiğinde, disk-balata temas yüzeylerinde birincil ve ikincil platolar, mikro çatlaklar ve sürtünme kaynaklı çizikler gözlemlenmiştir. Abrasiv aşınma izleri nano boyutlu numunelerde daha az görülmüştür. Nano boyutlu CeO₂ partikülleri içeren numunelerde, ikincil plato alanlarının mikro boyutlu partiküllere kıyasla daha az yer kapladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, EDX analizleri, tüm numunelerde elementel dağılımın homojen olduğunu doğrulamıştır. Özellikle, %10 nano-CeO₂ içeren numunelerde (B1), disk yüzeyindeki pürüzlülük farklarının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, nano partiküllerin sürtünme performansını iyileştirmedeki etkinliğini ortaya koymaktadır.



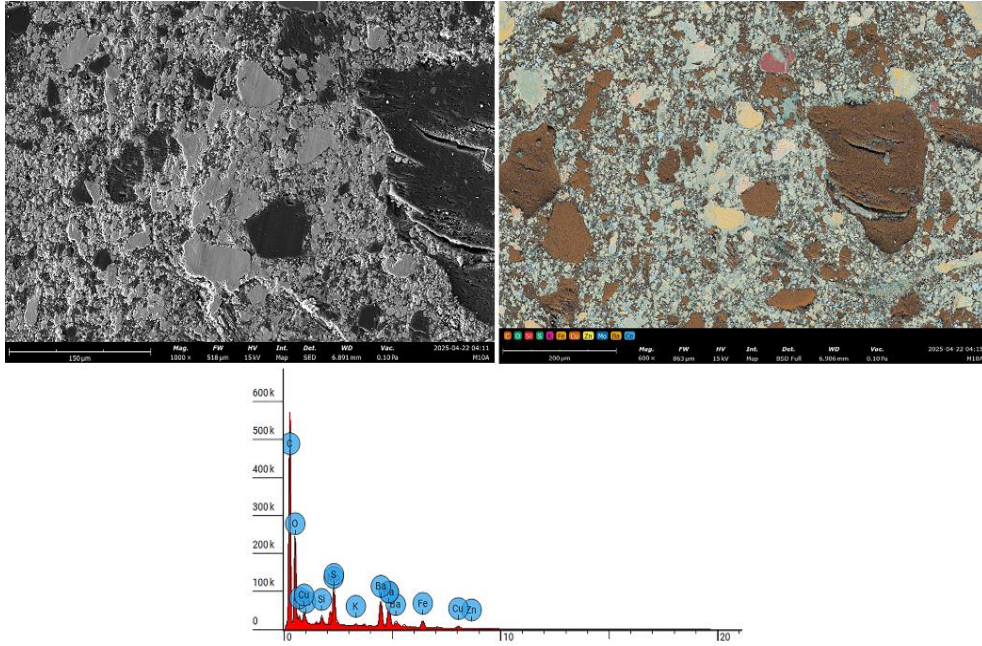
Resim 4.1 N5 kodlu numuneye ait CeO₂ SEM ve EDX analizleri



Resim 4.2 N10 kodlu numuneye ait CeO₂ SEM ve EDX analizleri



Resim 4.3 M5 kodlu numuneye ait CeO₂ SEM ve EDX analizleri



Resim 4.4 M10 kodlu numuneye ait CeO₂ SEM ve EDX analizleri

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, %5 ve %10 oranlarında nano ve mikro boyutta CeO₂ nadir toprak elementi takviyeli polimer bazlı fren balataları geliştirilmiş ve performansları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Numunelerin frenleme performansının yanı sıra, fren diski üzerindeki pürüzlülük değişimleri analiz edilmiş; XRD ve aşınma mekanizmalarının karakterizasyonu için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deneysel sonuçlar, nano boyutta %5 ve %10 CeO₂ içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayısının 0,25, mikro boyutta ise sırasıyla %5 ve %10 CeO₂ içeren numunelerde 0,26 ve 0,27 olduğunu göstermiştir. Sürtünme katsayısı eğrilerinin analizi, tüm numunelerin yaklaşık 4200 m kayma mesafesinden sonra kararlı bir sürtünme davranışı sergilediğini ortaya koymuş olup, bu durum CeO₂ takviyesinin sürtünme kararlılığı üzerindeki olumlu etkisini kanıtlamaktadır. Ayrıca, disk pürüzlülüğü ölçümlerinde, CeO₂ konsantrasyonunun artmasıyla disk yüzeyindeki pürüzlülük farklarının azaldığı tespit edilmiş ve bu bulgu, CeO₂'nin aşınma kaynaklı yüzey bozulmalarını minimize etmedeki etkinliğini desteklemektedir. SEM analizlerinde, aşınmış yüzeylerde birincil ve ikincil platolar, mikro çatlaklar ve abrasif aşınma izleri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, CeO₂ takviyesinin hem fren balatalarında sürtünme kararlılığını artırdığını hem de fren diski pürüzlülüğünü önemli ölçüde azaltarak sistemin kullanım ömrünü uzattığını deneysel verilerle ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, nadir toprak oksitlerin fren sistemlerindeki performans iyileştirici etkilerini vurgulayarak, gelecekteki akademik çalışmalara ve endüstriyel uygulamalara önemli bir referans sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Adıgüzel A A, 2015, Katı Yağlayıcı ve Aşındırıcı Bileşenlerin Fenolik Reçine Esaslı Fren Balatalarının Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkileri, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Trabzon.
- Adsoy A, 2025, Transport Tekniğinde Kullanılan Kompozit Fren Balatalarının Geliştirilmesi ve Bulanık Mantık Metodu ile Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, 110s, İstanbul.
- Ahlawat V, Anuradha P, Kajal S, 2021, Preference selection of brake friction composite using entropy-VIKOR technique, *Materials Today: Proceedings*, 46, 9573-9579.
- Akbulut F, Kılıç H, Mutlu İ, Öztürk F S, Çaşın E, Seyrek M, Karaköse A, 2023, Investigation of Tribological Properties of Brake Friction Materials Developed from Industrial Waste Products, *International Journal of Automotive Science And Technology*, 7(4), 309-315.
- Amirjan M, 2019, Microstructure, wear and friction behavior of nanocomposite materials with natural ingredients, *Tribology International*, 131, 184-190.
- Antonyraj I J, Singaravelu D L, 2020, Tribological characterization of various solid lubricants based copper-free brake friction materials – A comprehensive study, *Materials Today: Proceedings*, 27, 2650-2656.
- Balaram V, 2019, Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact, *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285-1303.
- Baştürkcü E, 2023, Eskişehir Beylikahır Cevherinden Nadir Toprak Metallerinin Uç Ürün Olarak Üretilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, 117s, İstanbul.
- Bayrakçeken H, Yavuz H, 2024, Investigation of the effects of halloysite nanoclay on

- friction and wear behavior of automotive brake pads, *Materials Testing*, 66(1), 111-116.
- Chan D, 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.
- Che Q, Li H, Zhang L, Zhao F, Li G, Guo Y, Zhang J, Zhang G, 2020, Role of carbon nanotubes on growth of a nanostructured double-deck tribofilm yielding excellent self-lubrication performance, *Carbon*, 161, 445-455.
- Eriksson M, Bergman F, Jacobson S, 2002, On the nature of tribological contact in automotive brakes, *Wear*, 252(1-2), 26-36.
- Gasgnier M, Ghys J, Schiffmacher G, La Blanchetais Ch H, Caro P E, Loier C B Ch, Pardo B, 1974, Rare-earth hydrides and rare-earth oxides in and from thin films of rare-earth metals, *Journal of the Less Common Metals*, 34(1), 131-142.
- Ghosh D, Choudhury N, Balaji S, Dana K, Dhar A, 2021, Synthesis and characterization of Tm₂O₃-doped Lu₂O₃ nanoparticle suitable for fabrication of thulium-doped laser fiber, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(4), 4505-4514.
- Gupta C K, Krishnamurthy N, 1992, Extractive metallurgy of rare earths, *International Materials Reviews*, 37(1), 197-248.
- Halderman J D, Mitchell C D, 2004, *Automotive brake system*, Pearson/Prentice Hall.
- Hee K W, Filip P, 2005, Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings, *Wear*, 259(7-12), 1088-1096.
- Hinrichs R, Soares M R F, Lamb R G, Soares M R F, Vasconcellos M A Z, 2011 Phase characterization of debris generated in brake pad coefficient of friction tests, *Wear*, 270(7-8), 515-519.

- Ikpambese K K, Gundu D T, Tuleun L T, 2016, Evaluation of palm kernel fibers (PKFs) for production of asbestos-free automotive brake pads, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 28(1), 110-118.
- Karaca F, Can İ, 2021, Effects of grain size on the performance of brake linings with Al₂O₃ additives, *Materials Testing*, 63(9), 822-828.
- Karmakar P, Das S, 2025, AI-powered computational analysis of dynamic responses in a vibrating Riga sensor within a reactive platinum -cerium oxide-water mixture, *Sensors and Actuators A: Physical*, 381, 116028.
- Krishna M G, Hartridge A, Bhattacharya A K, 1998, Temperature and ionic size dependence of the properties of ceria based optonic thin film, *Materials Science and Engineering: B*, 55(1-2), 14-20.
- Kuş H, 2014, Bronz Esaslı Seramik Takviyeli Fren Balatalarının Performansının Geliştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 162s, Ankara.
- Le T T, Venugopal I P, Truong T H, Cao D N, Le H C, Nguyen X P, 2023, Effects of CeO₂ nanoparticles on engine features, tribology behaviors, and environment, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(3), 8791-8822.
- Leonardi M, Alemani M, Straffelini G, 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.
- Lertwassana W, Parnklang T, Mora P, Jubsilp C, Rimdusit S, 2019, High performance aramid pulp/carbon fiber-reinforced polybenzoxazine composites as friction materials, *Composites Part B: Engineering*, 177, 107280.
- Liang S, Wang H, Li Y, Qin H, Luo Z, Huang B, Zhao X, Zhao C, Chen, 2020, Rare-earth based nanomaterials and their composites as electrode materials for high performance supercapacitors: a review, *Sustainable Energy & Fuels*, 4(8), 3825-

3847.

- Ma Y, Wu S, Zhuang J, Tong J, Qi H, 2019, Tribological and physio-mechanical characterization of cow dung fibers reinforced friction composites: An effective utilization of cow dung waste, *Tribology International*, 131, 200-211.
- Markose K K, Anjana R, Antony A, Jayaraj M K, 2018, Synthesis of Yb³⁺/Er³⁺ co-doped Y₂O₃, YOF and YF₃ UC phosphors and their application in solar cell for sub-bandgap photon harvesting, *Journal of Luminescence*, 204, 448-456.
- Mutlu İ, Malak A, Bayrakçeken H, Aysal F E, Yavuz İ, 2016, The Investigation of Brake Linings Reinforced With Carbon Fiber, *Electronic Journal of Machine Technologies (C. 13)*. Geliş tarihi gönderen www.teknolojikarastirmalar.com
- Neis P D, Ferreira N F, Fekete G, Matozo L T, Masotti D, 2017, Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads, *Tribology International*, 105, 135-147.
- Ojha A R, Biswal S K, 2019, Thermo physico-mechanical behavior of palm stalk fiber reinforced epoxy composites filled with granite powder, *Composites Communications*, 16, 158-161.
- Özer O C, 2023, Nadir Toprak Element Oksitlerinden Ergimiş Tuz Elektrolizi Yöntemiyle Nadir Toprak Elementlerinin Sentezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, İstanbul.
- Patil A S, Patil A V, Dighavkar C G, Adole V A, Tupe U, 2022, Synthesis techniques and applications of rare earth metal oxides semiconductors: A review, *Chemical Physics Letters*, 796, 139555.
- Pena-Paras L, Maldonado-Cortes D, Taha-Tijerina J, Irigoyen M, Guerra J, 2018, Experimental evaluation of the tribological behaviour of CeO₂ nanolubricants under extreme pressures, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 400, 072003.

- Raghunathan, V, Gnanasekaran S, Ayyappan V, Devanathan L S, Mavinkere Rangappa S, Sienghcin S, 2024, Sustainable characterization of brake pads using raw/silane-treated *Mimosa pudica* fibers for automobile applications, *Polymer Composites*, 45(11), 10204-10219.
- Saha D, Satapathy B K, 2019, Friction hysteresis and subsequent wear mechanism of clay-based phenolic composites under cyclic load, *Materials Today: Proceedings*, 19, 196-204.
- Sarkar J, Ghosh P, Adil A, 2015, A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 164-177.
- Selvaraj S K, Ramesh R, Narendhra T M V, Agarwal I N, Chadha U, Paramasivam V, Palanisamy P, 2021, New Developments in Carbon-Based Nanomaterials for Automotive Brake Pad Applications and Future Challenges, *Journal of Nanomaterials*, 2021, 1-24.
- Singh T, Pruncu C I, Gangil B, Singh V, Fekete G, 2020, Comparative performance assessment of pineapple and Kevlar fibers based friction composites, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1491-1499.
- Song H, Lee S, Lee K, 2021, Thermodynamic parameters, microstructure, and electrochemical properties of equiatomic TiMoVWCr and TiMoVNbZr high-entropy alloys prepared by vacuum arc remelting, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 99.
- Sudhan Raj J, Christy T V, Darius Gnanaraj S, Sugoza B, 2020, Influence of calcium sulfate whiskers on the tribological characteristics of automotive brake friction materials, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(2), 445-451.
- Sugoza I, 2019, Effect of Nano boron on braking performance of composite brake pads, *International Journal of Research in Engineering*, 1(3), 09-13.

- Sugözü B, 2016, Nano Silika, Nano Alümina ve Nano Zirkon Aşındırıcı Parçacık Katkısının Fren Balata Özelliklerine Etkisi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,105s, Konya.
- Sugözü İ, Öner C, Mutlu İ, Sugözü B, 2022, Production of boric acid added brake friction composite and the effect of heat treatment on braking characterization, *Industrial Lubrication and Tribology*, 74(10), 1132-1139.
- Tavangar R, Moghadam H A, Khavandi A, Banaeifar S, 2020, Comparison of dry sliding behavior and wear mechanism of low metallic and copper-free brake pads, *Tribology International*, 151, 106416.
- TS555, Road vehicles - Brake linings and pads for friction type brakes, TSE, Ankara, Turkey. [https://intweb.tse.org.tr/Standart/Standart/StandartAra.aspx](https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standart/StandartAra.aspx). 2019. Ankara, Turkey.: Road vehicles - Brake linings and pads for friction type brakes.
- Uygun A B, 2024, Bağlayıcıların Fren Balatalarının Sürtünme-Aşınma Performansı Üzerine Etkisi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 51s, İzmir.
- Ünalı M, Kuş R, 2018, The Determination of the Effect of Mixture Proportions and Production Parameters on Density and Porosity Features of Miscanthus Reinforced Brake Pads by Taguchi Method, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7(1), 48-57.
- Wei L, Choy Y S, Cheung C S, Chu H K, 2021, Comparison of tribology performance, particle emissions and brake squeal noise between Cu-containing and Cu-free brake materials, *Wear*, 466-467, 203577.
- Xiao J K, Li T T, Chen J, Zhang C, 2023, Effects of oxidation temperature on the microstructure and tribological performance of Cu-based brake pad for high-speed train, *Wear*, 514-515.
- Yadav N, 2022, Cerium oxide nanostructures: properties, biomedical applications and surface coatings, *3 Biotech*, 12(5), 121.

- Yahşi B Y, 2024, Aşındırıcıların Fren Balatalarının Sürtünme Performansı Üzerine Etkileri, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 61s, İzmir.
- Yavuz H, 2022, Huntit Katkılı Kompozit Fren Balatası Üretimi ve Tribolojik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 98s, Afyonkarahisar.
- Yavuz H, 2024, Friction, wear, and hardness properties of hybrid vehicle brake pads and effects on brake disc roughness, *Materialpruefung/Materials Testing*, 66(8), 1145-1152.
- Yavuz H, Bayrakçeken H, 2022, Investigation of Friction and Wear Behavior of Composite Brake Pads Produced with Huntite Mineral, *International Journal of Automotive Science And Technology*, 6(1), 9-16.
- Yavuz H, Bayrakçeken H, 2025, The effect of huntite and barite mineral-based polymer composite brake materials on friction and braking performance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 239(2), 687-695.
- Yılmaz F, 1997, Sürtünme ve Aşınma, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 2-4 Haziran, İstanbul, 229-247.
- Younis A, Chu D, Li S, 2016, Cerium oxide nanostructures and their applications, *Funct. Nanomater*, 3, 53-68.
- Yun R, Filip P, Lu Y, 2010, Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials, *Tribology International*, 43(11), 2010-2019.
- Zakaly H M, Abouhaswa A S, Issa S A M, Mostafa M Y A, Pyshkina M, El-Mallawany R, 2020, Optical and nuclear radiation shielding properties of zinc borate glasses doped with lanthanum oxide, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 543, 120151.

İnternet Kaynakları

1-<https://www.salutron.de/en/surface-roughness-tester/tr200-tr220/>,04.12.2025.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yavuz ŞÜKÜROĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul - 14/05/1980
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : ysukuroglu@yahoo.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Melikgazi Lisesi (1994 – 1997)
Lisans : Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri
Bölümü (2000 – 2005)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı (2023 - 2026)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Tarım Kredi Kooperatifleri (2008 – Devam Ediyor)

Yayımları (SCI ve diğer) : Şüküroğlu Y, Mertgenç E, Yavuz H, 2025, Effect of application of nano and micro particle rare earth oxide reinforced composite brake pads on braking performance in agricultural vehicles, Journal of the Australian Ceramic Society, <https://doi.org/10.1007/s41779-025-01303-y>.