

**BAKIR İÇERMEYEN FREN SÜRTÜNME KOMPOZİTLERİNİN
TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAYRİ TOLGA TUNCEL

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
ŞUBAT- 2022**

**BAKIR İÇERMEYEN FREN SÜRTÜNME KOMPOZİTLERİNİN
TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAYRİ TOLGA TUNCEL
ORCID ID: 0000-0002-0526-0587

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Danışman
Doç. Dr. Banu SUGÖZÜ
ORCID ID: 0000-0002-7798-2677

MERSİN
ŞUBAT - 2022

ÖZET

BAKIR İÇERMİYEN FREN SÜRTÜNME KOMPOZİTLERİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Fren balatalarının içerisinde bulunan çok sayıda malzeme arasından bakır, fren balatasının ısı iletim katsayısını yükseltici, mukavemet arttırıcı ve katı yağlayıcı görevlerini üstlenir. Sürtünme sırasında, sürtünme tabakası oluşumuna katkı sağlar. Bu çalışmada bakırın yerine ikame edecek malzemelerin araştırılması yapılmıştır. Bakırın balata içerisindeki katı yağlayıcılık görevini üstlenebileceği düşünülen, ısı iletim katsayısı yüksek malzemeler seçilmeye çalışılmıştır. Seçilen malzemeler h-BN, Termo Grafit ve WS₂ olmuştur.

Seçilen malzemelerin her birini ağırlıkça %10, %15 ve %20 oranlarında içeren numuneler ile bir tane %15 bakır içeren, toplam 10 adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerle sürtünme deneyleri yapılmıştır. Her numunenin ortalama sürtünme katsayısı, sürtünme stabilitesi, sertliği, özgül aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü, yoğunluğu, optik ve taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme, Aşınma, Bakır, Fren, Bakır içermeyen.

Danışman: Doç. Dr. Banu SUGÖZÜ Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

DESIGN, PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF COPPER-FREE BRAKE FRICTION COMPOSITES

Among the many materials found in the brake pads, copper acts as an increaser of the heat transmission coefficient of the brake pad, an increaser of strength and a solid lubricant. During friction, it contributes to the formation of friction layer. In this study, the materials to replace copper were investigated. It has been tried to choose materials with high heat transmission coefficient, which are thought to be able to assume the role of solid lubricating copper in the lining. The selected materials were h-BN, Thermo Graphite and WS₂.

A total of 10 samples containing 10%, 15% and 20% by weight of each of the selected materials and one containing 15% copper were produced. Friction tests were carried out with the produced samples. The average friction coefficient, friction stability, hardness, specific wear amount, surface roughness, density, optical and scanning electron microscopy images of each sample were determined.

Keywords: Friction, Wear, Copper, Brake, Copper free.

Advisor: Assoc. Prof. Banu SUGÖZÜ Mersin University, Department of Mechanical Engineering, Mersin.

TEŐEKKÜR

Çalıőmalarım süresince engin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, sabır ve hoşgörüsünü esirgemeyen çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Banu SUGÖZÜ' ne ve çalıőmalarım süresince desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. İlker SUGÖZÜ hocama teőekkür ederim. Yapmış oldukları malzeme desteklerinden dolayı Imerys S.A. (Fransa) firmasına ve göstermiş oldukları ilgi için Jerome Crepin Leblond ve Raffaele Gilardi'ye teőekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	ii
ONAY	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜRLER	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	8
3.1. Numune Üretimi	8
3.2. Numune İçeriği	9
3.3. Üretim parametreleri	9
3.4. Deney Numunelerinin Test İçin Hazırlanması	10
3.5. Deney Düzenineğinin Tanıtılması	10
3.5.1. Sürtünme Test Cihazı	10
3.5.2. Bilgisayar Programı	11
3.5.3. Sıcaklık Ölçme Cihazı	12
3.6. Hassas Terazi	13
3.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı	13
3.8. Sertlik Ölçüm Cihazı	14
3.9. Yoğunluk Ölçüm Yöntemi	14
3.10. Aşınma Ölçüm Yöntemi	15
3.11. Yüzey Kaplama Cihazı	15
3.12. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	16
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	17
4.1. Sürtünme Katsayısı Sonuçları	17
4.2. h-BN İlaveli Numuneler	18
4.3. TG İlaveli Numuneler	23
4.4. WS ₂ İlaveli Numuneler	29
4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	35
4.6. Yüzey Karakteristiği Ve Mikro Yapı İncelemeleri	36
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	48
6. KAYNAKLAR	50
7. ÖZGEÇMİŞ	52

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Numunelerde kullanılan malzeme türleri	8
Tablo 3.2. Numune içerikleri	9
Tablo 4.1. h-BN içerikli numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri	22
Tablo 4.2. Termo grafit içeren numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri	27
Tablo 4.3. WS ₂ içeren numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri	32
Tablo 4.4. Numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri	34



ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 3.1.	Sürtünme test cihazı	11
Şekil 3.2.	Sürtünme test cihazı yan görünüş	11
Şekil 3.3.	Sürtünme test cihazı bilgisayar kontrol paneli	12
Şekil 3.4.	Sürtünme test cihazı sonuç ekranı	12
Şekil 3.5.	Hassas terazi	13
Şekil 3.6.	Time TR-110 Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	14
Şekil 3.7.	Quorum Q150R yüzey kaplama cihazı	15
Şekil 3.8.	FEI markalı Quanta 650 Field Emission SEM model taramalı elektron mikroskobu	16
Şekil 4.1.	Ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	18
Şekil 4.2.	Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	19
Şekil 4.3.	Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	20
Şekil 4.4.	Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	20
Şekil 4.5.	h-BN içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi	21
Şekil 4.6.	h-BN içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sıcaklık-sürtünme mesafesi	21
Şekil 4.7.	h-BN içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayıları	22
Şekil 4.8.	h-BN içeren numunelerin sürtünme stabiliteleleri	23
Şekil 4.9.	h-BN içeren numunelerin özgül aşınma oranları	23
Şekil 4.10.	Ağırlıkça %10 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	24
Şekil 4.11.	Ağırlıkça %15 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	25
Şekil 4.12.	Ağırlıkça %20 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	26
Şekil 4.13.	TG içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi	26
Şekil 4.14.	TG içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sıcaklık-sürtünme mesafesi	27
Şekil 4.15.	TG içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayıları	28
Şekil 4.16.	TG içeren numunelerin sürtünme stabiliteleleri	28
Şekil 4.17.	TG içeren numunelerin özgül aşınma oranları	29
Şekil 4.18.	Ağırlıkça %10 WS ₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	30
Şekil 4.19.	Ağırlıkça %15 WS ₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	30
Şekil 4.20.	Ağırlıkça %20 WS ₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi	31
Şekil 4.21.	WS ₂ içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi	31
Şekil 4.22.	WS ₂ içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sıcaklık-sürtünme mesafesi	32
Şekil 4.23.	WS ₂ içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayıları	33
Şekil 4.24.	WS ₂ içeren numunelerin sürtünme stabiliteleleri	33

Şekil 4.25.	WS ₂ içeren numunelerin özgül aşınma oranı	34
Şekil 4.26.	Numunelerin sertlik sonuçları	35
Şekil 4.27.	Numunelerin yoğunluk sonuçları	35
Şekil 4.28.	Numunelerin yüzey pürüzlülüğü sonuçları	36
Şekil 4.29.	Ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	36
Şekil 4.30.	Ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	37
Şekil 4.31.	Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	38
Şekil 4.32.	Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	38
Şekil 4.33.	Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	39
Şekil 4.34.	Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	40
Şekil 4.35.	Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	40
Şekil 4.36.	Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	41
Şekil 4.37.	Ağırlıkça %10 TG içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	41
Şekil 4.38.	Ağırlıkça %10 TG içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	42
Şekil 4.39.	Ağırlıkça %15 TG içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	42
Şekil 4.40.	Ağırlıkça %15 TG içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	43
Şekil 4.41.	Ağırlıkça %20 TG içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	43
Şekil 4.42.	Ağırlıkça %20 TG içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	44
Şekil 4.43.	Ağırlıkça %10 WS ₂ içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	44
Şekil 4.44.	Ağırlıkça %10 WS ₂ içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	45
Şekil 4.45.	Ağırlıkça %15 WS ₂ içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	45
Şekil 4.46.	Ağırlıkça %15 WS ₂ içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	46
Şekil 4.47.	Ağırlıkça %20 WS ₂ içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri	46
Şekil 4.48.	Ağırlıkça %20 WS ₂ içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

KISALTMALAR

TC	: Türkiye Cumhuriyeti
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
IARC	: Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı
NTP	: ABD Ulusal Toksikoloji Programı
EPA	: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
ECOS	: Environmental Council of the States
MEMA	: Motor and Equipment Manufacturers Association
AASA	: Automotive Aftermarket Suppliers Association
BMC	: Brake Manufacturers Council
HDMA	: Heavy Duty Manufacturers Association
ALLIANCE	: Auto Care Association, Alliance of Automobile Manufacturers
EMA	: Truck and Engine Manufacturers Association
AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
NAO	: Asbest İçermeyen Organik
TS 555	: Türk Standardı
TS 9076	: Türk Standardı
RS232	: Seri iletişim standardı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

SİMGELER

"	: İnç
GG-20	: Gri dökme demir
W	: Watt
kW	: Kilowatt
W/mK	: Metre-Kelvin başına Watt
RF	: Radyo Frekansı
km/h	: Saatte gidilen kilometre miktarı
°C	: Derece santigrat
kg-f	: Kilogramkuvvet
N	: Newton
kPa	: Kilopaskal
MPa	: Megapaskal
mohs	: Mohs sertlik skalası
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
ml	: Mililitre
g	: Yer çekimi ivmesi

gr	: Gram
μg	: Mikrogram
h-BN	: Hegzagonal bor nitrür
WS_2	: Tungsten disülfür
Cr_2O_3	: Krom III oksit
BaSO_4	: Baryum sülfat
Fe	: Demir
Zn	: Çinko
Sb_2S_3	: Antimon trisülfür
SnS	: Kalay II sülfür
MoS_2	: Molibden disülfür
Sb	: Antimon
TG	: Termo grafit
B10	: Ağırlıkça %10 h-BN içeren numune
B15	: Ağırlıkça %15 h-BN içeren numune
B20	: Ağırlıkça %20 h-BN içeren numune
T10	: Ağırlıkça %10 termo grafit içeren numune
T15	: Ağırlıkça %15 termo grafit içeren numune
T20	: Ağırlıkça %20 termo grafit içeren numune
W10	: Ağırlıkça %10 WS_2 içeren numune
W15	: Ağırlıkça %15 WS_2 içeren numune
W20	: Ağırlıkça %20 WS_2 içeren numune
ρ	: Balatanın yoğunluğunu
W_h	: Numunenin havadaki ağırlığı
W_s	: Numunenin sudaki ağırlığı
ρ_{su}	: Suyun yoğunluğu
V	: Özgül aşınma oranı
R	: Balatanın merkezi ile diskin merkezi arasındaki mesafe
m_1	: Balatanın test öncesi kütlesi
m_2	: Balatanın test sonrası kütlesi
F	: Ortalama sürtünme kuvveti
FS	: Sürtünme stabilitesi (kararlılığı)
μ_{ort}	: Ortalama sürtünme katsayısı
μ_{max}	: En yüksek sürtünme katsayısı

1. GİRİŞ

Otomobil fren balataları çeşitli malzemelerden oluşan Kompozit yapılardan oluşmaktadır. Yapısında bağlayıcılar, aşındırıcılar, katı yağlayıcılar, takviye elemanları, dolgu malzemeleri gibi farklı gruplarda malzemeler bulunur. Frenleme sırasında aşınan balataların yapısında bulunan maddeler çevreye yayılmaktadır. Günümüzde ulaşımda yaygın olarak kullanılan kara taşıtlarında kullanılan fren balatalarının insan sağlığına ve çevreye zararsız olması istenmektedir. Önceleri fren balatalarında kullanılan asbest, iyi bir sürtünme malzemesi olmasına karşılık fren balatalarından çıkarılmıştır.

Günümüzde fren balatalarından çıkarılması planlanan başka malzemeler de vardır. 21 Ocak 2015'te Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA), Amerika Birleşik Devletleri Çevre Konseyi (ECOS) ve Araç Endüstrisi İmzacıları, Motor ve Ekipman Sanayicileri Derneği (MEMA), Otomotiv Satış Sonrası Tedarikçiler Derneği (AASA), Fren Üreticileri Konseyi (BMC), Ağır Hizmet Sanayicileri Derneği (HDMA), Otomobil Bakım Derneği, Otomobil Üreticileri Birliği (Alliance), Küresel Otomobil Üreticileri Derneği, Kamyon ve Motor Üreticileri Derneği (EMA) arasında imzalanan bir anlaşmaya göre fren balatalarındaki bakır oranı 2021'de ağırlıkça %5'in altına ve 2025'te %0,5'in altına düşürülecektir. [1]

Bakıra ek olarak cıva, kurşun, kadmiyum, asbestiform lifler ve heksavalent krom tuzlarının da fren balatalarında kullanım miktarları 2015'te imzalanan bu anlaşmayla azaltılacaktır [1].

Flemming ve Trevors 1989 yılında yayınladıkları makalelerinde, bakırın çeşitli canlılar üzerinde olan etkilerine yer vermişlerdir. İnsanlar ve evcil hayvanlar üzerinde yapılan klinik araştırmalara göre bakır memeliler için görece zehirli değildir. Tavşanlar, domuzlar ve midilliler hiçbir zehirlenme belirtisi göstermeden, günlük kuru yem başına 300-800 µg/g bakır tüketebilmektedir [2].

Flemming ve Trevors un 1989 yılında yayınlanan makalelerinde "Memelilere kıyasla bakır, su ekosistemi için aşırı derecede toksiktir. Memelilerdeki bakıra karşı olan tolerans sınırları, genellikle balıkların veya kabuklularınkinden, 10 ila 100 kat ve alglerinkinden 1000 kat daha yüksektir" ifadesine yer vermişlerdir [2, 3, 4].

Flemming ve Trevors, bakır sülfatın 1900'lerden itibaren alglerin çoğalmasını önlemek için kullanıldığını ve aktif kullanılan bakır sülfatın etkilerinin kolay ölçülebilir olduğunu bildirmişlerdir [2, 5, 6].

Bakıra karşı dirençli olan mikroorganizmaların bünyelerinde bakır birikimi oluşur. Bakır bu mikroorganizmalardan besin zincirine göre, üst seviye canlılara doğru geçmektedir [7].

McIntyre ve arkadaşlarının 2012'de yayınlanmış makalelerinde, somon balıklarının yaşam sularında çok az dahi bakıra maruz kaldıklarında koku alma duyularını kaybettikleri ve saldırılara karşı savunmasız kaldıklarını göstermişlerdir [8].

Bu çalışmada otomotiv fren balatalarından çıkarılması planlanan bakırın yerine kullanılabilir yeni malzemelerin araştırılması amaçlanmıştır. Bakırın yerine kullanılacak malzemelerin seçilebilmesi için bakırın, balata kompozisyonunda üstlendiği rolleri anlamak gerekir. Bakır iyi bir ısı iletkenidir. Frenleme sırasında sürtünmeye bağlı olarak oluşan ısının balatadan uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Balata mukavemetini artırarak takviye görevi üstlenir. Kayma sırasında film tabakası oluşturur ve gürültü oluşumunu azaltır [9].

Ctirad 2004 yılında yayınlanan kitabında, bakırın ısı iletim katsayısını 402 W/mK olarak vermiştir. Bakırdan yüksek ısı iletim katsayısına sahip tek metal 436 W/mK ile gümüştür. Bakıra en yakın, bakırdan düşük ısı iletim katsayısına sahip metaller sırasıyla 318 W/mK ile altın, 237 W/mK ile alüminyum ve 230 W/mK ile berilyumdur. Diğer sık kullanılan metallere krom, demir ve kalayın ısı iletim katsayıları sırasıyla 95.7 W/mK, 80 W/mK ve 64 W/mK'dir [10].

Bakır metaller arasında gümüşten sonra en yüksek ısı iletim katsayısına sahiptir. Gümüş ve altın değerli madenler arasında olduğundan balata kompozisyonunda yer almazlar. Altından sonra ısı iletim katsayısı bakıra en yakın metal alüminyumdur.

Österle yeni bir fren balatasının sabit sürtünme katsayısına sahip olana kadar alıştırılması gerektiğini bildirmektedir. Bu alıştırma işlemi sırasında balata ile disk arasında bir sürtünme filmi oluşur. Oluşan film kararlı sürtünme katsayısının oluşmasını sağlarken aşınmayı azaltıcı bir etkiye de sahiptir. Film oluşumuna katkı sağlayan grafit ve benzeri karbonlu malzemeler yüksek sıcaklıklara çıktığında yağlayıcı özelliklerini yitirirler. Yüksek sıcaklıklara çıktığında grafitin görevini bakır üstlenir ve film tabakası bakır ile oluşumuna devam eder. Sürtünme katmanlarında grafitin, nano bakır parçacıkları ile birlikte kullanılması, şiddetli frenleme sırasında sürtünme katsayısının kararlı kalabilmesi için önemlidir. Bakırın üç işlevi yerine getirmesi gerekir. Eğer bakırın ısı iletkenliği ayarlaması, birincil temas bölgelerini sağlaması ve şiddetli frenleme koşullarında kayma performansını iyileştirmesi gerekiyorsa, bu bileşenin ikamesinin zor bir görev olacağı oldukça açıktır [11].

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Filip ve arkadaşlarının 1997 yılında yayınlanan makalelerinde, Amerika pazarında bulunan seksen iki ticari balata ile bu balataların analizi sonucu elde edilen bilgileri kullanarak ürettikleri kırk iki balatanın davranışlarını incelemişlerdir. Deneylerin sonunda elde ettikleri bulgulara göre kendi hazırladıkları numunelerde çelik talaşının miktarı hacimce %40'ın üstüne çıktığında diğer sürtünme malzemelerinin etkileri azalmıştır. Çelik talaşı miktarı hacimce %20 olduğunda numunede kullandıkları termo grafit yağlayıcı görevi görmeye başlamıştır. Grafitin yağlayıcı özelliğinde, hacimce %15'ten sonra önemli bir artış gözlemlenmemişlerdir. Hacimce %15'e kadar eklenen grafitin üretim için gereken basıncı düşürdüğü buna ek olarak balata gözenekliliğini azalttığını bildirmişlerdir. NAO balatalara eklenen camsı liflerin miktarı artırıldığında sürtünme katsayısı ve aşınma artmıştır. En düşük aşınma oranını yapısında yüksek miktar aramid lifi bulunduran numunede gözlemlerlerken, en yüksek aşınma oranını cam elyafının fazla olduğu numunelerde gözlemlenmişlerdir. En yüksek camsı lif içeren numuneler en kararsız sürtünme katsayısına sahip olurken düşük sürtünme katsayılı numuneler deney sırasında şişmeye yatkın olmuşlardır. Yine termal iletkenliği düşük malzemelerde şişmenin fazla olduğunu gözlemlenmişlerdir. Sıcaklığın 350 °C'nin üstünde olduğu durumlarda dahi balata içerisine eklenen selüloz aşınmayı düşürücü bir etki göstermiştir. Filip ve arkadaşları aşınmanın fren balatasının sertliği ile orantılı olmadığını belirtmişlerdir [12].

Kumar ve Bijwe 2011 yılında yayınladıkları makalelerinde, NAO fren balatalarında bulunan bakırın işlevini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada, yapısındaki bileşenlerin %60'ı çeşitli sürtünme malzemelerden oluşan kalan %40'ı farklı oranlarda bakır ve baritin oluşturduğu balata numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numunelerin birinci türünde 280-430 µm tanecik boyutunda toz bakır, ikinci türünde ise 2.09-2.35 mm aralığında uzunluğa sahip bakır lifleri kullanmışlardır. Her iki bakır tipi için %0, %10, %20 oranlarında karışımlar hazırlamışlardır. Gerçekleştirdikleri çeşitli deneylerin sonucunda, bakır içermeyen numune ile bakır içeren numune karşılaştırıldığında, bakır eklenen numunelerde frenleme basıncı, sıcaklık ve aşınma direncinde olumlu değişimler olduğunu gözlemlenmişlerdir. Numunelerin bakır oranı arttıkça ısı iletkenlikleri, solma direnci, verimi ve karşı yüzeyi aşındırma miktarları olumlu yönde değişmiştir. Toz bakır miktarının artışı, aşınma direncini arttırmıştır. Toz bakırın, bakır liflerinden daha iyi sonuç verdiğini, %10'luk toz bakır ilavesinin en iyi sonucu verdiğini bildirmişlerdir [13].

Kim ve arkadaşları 2011 yılında, bakırın balata içerisindeki görevlerini araştırmayı amaçlayarak, değişik oranlarda bakır lifi, bakır tozu, bakır oksit ve bakır sülfid içeren numuneler hazırlamıştır. Gerçekleştirdikleri çeşitli deneylerin sonucunda bakır bileşenlerinin balata sertliğine etkisinin az olduğunu, en iyi ısı iletkenliğinin bakır lifleri ile hazırlanan numunelerde olduğunu görmüşler. Bakır lifleri ve bakır sülfid içeren numunelerin sürtünme katsayıları daha

kararlı olmuşlardır. Hiçbir bakır bileşeni içermeyen numune disk üzerinde ciddi bir aşınmaya sebep olmuş ve sürtünme katsayısında ciddi bir düşüş olmuş. Bakır liflerinin miktarının artmasıyla sürtünme katsayısı ve aşınma direnci artmıştır. En iyi aşınma direnci bakır lifleri ile sağlanmıştır. Ancak bakır lifleri 400 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda aşınmayı artırmıştır. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında malzeme içerisinde bulunan bakırlı bileşenler sürtünme filmi oluşturarak kararlı sürtünme sağlanmasına katkı sağlamıştır [14].

Echeberria ve arkadaşları 2014 yılında, hafif araçlarda kullanılması için bakır içermeyen, düşük çelikli balatalar geliştirilmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında kullandıkları numunelerin ağırlıkça %84'ü seçtikleri ana sürtünme malzemelerinden oluşmakta ve tüm numunelerde bu malzemeler aynı oranda kullanılmaktadır. Numunelerde yaygın olarak kullanıldığını belirttikleri iki farklı tip metal sülfür ve ticari metal alaşım tozları ile çeşitli elyaflar kullanmışlardır. Deneylerin sonucunda üretilen numunelerle, bakır içeren balata performansına yakın bir performans elde etmişlerdir. Bakırın, ticari alaşım ile değiştirilmesi balata sertliğinde düşüşe neden olmuştur. Ticari alaşım sürtünme katsayısını arttırmıştır ancak yüksek sıcaklıklarda kararlılık azalmıştır [15].

Aranganathan ve Bijwe 2015 yılında yayınlanan çalışmalarında, fren balatalarında ısıl iyileşmeler sağlamak amacıyla işlem görmemiş grafit yerine ticari olarak geliştirilmiş bir termo-grafit kullanmışlardır. Ürettikleri numunelerde ağırlıkça %5, %10, %15 oranında termo-grafit kullanmışlardır. Üretilen bu üç numunenin ağırlıkça %71 diğer sürtünme malzemelerinden oluşmakta olup termo-grafit eklendikten sonra kalan boşluklar barit ile doldurulmuştur. Üretilen numunelerin çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri tespit edildikten sonra drum on chase makinesi üzerinde sürtünme testlerini yapmışlardır. Deneylerin sonunda %10 TG içeren numunede solma %33 olmuştur. %15 TG içeren numune de solma %19 olmuştur. Ancak TG oranındaki bu artış sürtünme katsayısının düşmesine sebep olmuştur. Beklenildiği gibi TG oranının artması termal özellikleri iyileştirmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı ağırlıkça %10 TG içeren numunede olmuştur. TG oranının artması geri kazanım performansının düşmesine sebep olmuştur [16].

Zanon ve arkadaşları 2016 yılında yayınladıkları çalışmalarında, Echeberria ile birlikte yayınladıkları çalışmalarında kullandıkları numuneleri tekrar üreterek aynı testleri gerçekleştirip aynı tür dinamometre ile deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Hazırladıkları dört numunede ağırlıkça %84 oranında ana balata malzemeleri kullanılmıştır. Balata içeriğinin geri kalan kısmında katı yağlayıcı olarak Sb_2S_3 , SnS , bakır tozu, metal dışı fiberler ve demir-çinko-bismut alaşımı kullanmışlar. Çalışmanın sonucunda sülfürlü yağlayıcıların, sıcaklığın etkisiyle, metallerle reaksiyon verdiğini ve sürtünme bileşenlerinin yapısını değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Argon gazı altında yaptıkları testlerde bakırın 200 °C, Fe ve Zn gibi diğer metallerin 350-400 °C civarında antimonla tepkimeye girdiklerini gözlemlemişlerdir. Katı yağlayıcılardan Sb_2S_3 'ün, SnS 'den daha iyi özellikler gösterdiğini görmüş ve buna sebep olanın antimonun diğer metallerle yapmış olduğu tepkimeye bağlı olduğunu düşünmüşlerdir [17].

Aranganathan ve Bijwe 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında bakır içermeyen, çevreye zararsız fren balatası geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bakırın çıkarıldığı numunelerde, iletken kaya yünü ve termo-grafit kullanmışlar. Geliştirdikleri balataların ağırlıkça %51'i önceden belirledikleri sürtünme malzemelerinden oluşup, tüm numunelerde aynıdır. Geriye kalan %49'luk kısımda bakır, doğal ve termo grafit, iletken kaya yünü ve bariti farklı oranlarda karıştırarak beş farklı numune üretmişlerdir. Deneylerin sonucunda, neredeyse tüm özelliklerde bakır içerikli balataların önemli olmayan bir miktar daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bakır içermeyen numunelerin daha düşük aşınma, daha yüksek ısı iletkenlik, daha düşük yoğunluk, disk ve balata ısısında daha yavaş artış gibi özelliklere sahip olduklarını bildirmişlerdir. Bakırın yüksek sıcaklarda yağlama etkisi yaptığının bilinmesine karşın deney sonucunda bakır, şiddetli çalışma koşullarında daha yüksek sürtünmeye sebep olmuştur. Termo grafitin ve iletken taş yününün ısı iletimi açısından bakırın yerini alabileceğini, ancak sürtünme katsayısını artırmak için ve yüklenme hızına bağlı ısı artışına duyarlılığın azaltılması için başka maddelerin de eklenmesi gerektiğini bildirmişlerdir [18].

Antanaitis ve Shenberger 2017 yılında, bakır içermeyen yüksek performanslı balata geliştirmek için yaptıkları çalışmada, üç farklı balata tipi kullanmışlar. Referans olarak yüksek bakır içerikli bir numune ve hiç bakır içermeyen iki farklı numune ile solma testleri yapmışlardır. Dinamometre testlerini, ilk sıcaklık değeri 800 °C'ye kadar, başlangıç hızı 100-250 km/h ve 0,6-1,2 g yavaşlatma oranında yapmışlardı. Deneyler sonucunda, bakır içermeyen numuneler daha fazla solmaya maruz kalmışlardır. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, bakır içermeyen numunelerde daha yüksek aşınma ve daha düşük sürtünme katsayıları gözlemlenmiştir [19].

Barros ve Arkadaşları 2019 yılında, bakırın fren balatalarındaki görevinin daha iyi anlaşılması için yapmış oldukları çalışmalarında, ağırlıkça %0, %10 ve %30 bakır içeren numuneler üretmişlerdir. Laboratuvar ölçekli bir tribometrede, 100, 200, 300 °C sıcaklıklarda gerçekleştirdikleri testlerde, sürtünme katsayısı, fren balatası ve diskin aşınmasını ölçmüşlerdir.

Straffelini ve arkadaşlarının 2015 tarihli çalışmasına dayanarak, bakır içeriğindeki artışın, sürtünme katsayısının düşmesine neden olduğunu ifade etmiştir. Straffelini çalışmasında bakır ve antimonun sürtünme filmi oluşturduğunu buna bağlı olarak da sürtünme katsayısının düştüğünü bildirmiştir [20]. Barros sürtünme ile bakır içeriği arasında ters bir davranış olduğunu ağırlıkça %10'a kadar eklenen bakırın belirgin bir değişikliğe yol açmazken, bu değer %30'a yükseldiğinde sürtünme katsayısının azaldığını bildirmiştir. Sürtünme katsayısındaki bu azalışın 200 °C'den sonra belirginleşip sıcaklık artışına bağlı olarak azalmaya devam ettiğini söylemiştir. Bakır oranının artması disk aşınmasını ve sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısındaki değişimleri azaltmıştır [21].

Antonyraj ve Singaravelu 2019 yılında yayınlanan çalışmalarında, dört farklı katı yağlayıcı kullanarak (sentetik grafit, tungsten disülfür, kalay disülfür ve molibden disülfür), bakır

içermeyen fren balatası geliştirmişlerdir. Numunelerin ağırlıkça %86'sı daha önce belirlenmiş olan sürtünme malzemeleridir. Hazırladıkları bu dört numunede %14 Sentetik grafit, %6 tungsten disülfür, %6 kalay disülfür ve %6 molibden disülfür bulunmaktadır. Eksik kalan oranları tamamlamak için dolgu maddesi barit kullanmışlardır. Yaptıkları deneylerin sonuçlarında, sentetik grafitin 700 °C'ye kadar ağırlıkça %35'lik bir kayba uğradığını ve bunun grafitin oksidasyonundan kaynaklandığını bildirmişlerdir. Fenolik reçine 140-175 °C'de, nitril kauçuğun 200 ile 220 °C arasında, parça kauçuğun 300 °C'de ve selüloz elyafın 250 °C'de, aramid liflerinin 400-600 °C'de bozunduğunu bildirmişlerdir. Mika, kalay tozu, kalsiyum oksit, sentetik baritler, kalsiyum karbonat ve vermikülit oldukça kararlıdır ve 800 °C'ye ulaşmadan ayrışmaz. Tungsten disülfür esaslı numuneler yüksek sertlik, yüksek termal stabilite özellikleri göstererek iyi sürtünme performansı sağlamıştır. Molibden disülfür iyi gözeneklilik ve daha iyi yağlama özelliği ve buna bağlı olarak yüksek aşınma direnci göstermiştir. Kalay disülfür içeren numuneler ve sentetik grafit içeren numuneler her açıdan zayıf özellikler göstermiştir [22].

Mahale ve Arkadaşlarının 2019 yılında yayınlanan çalışmalarında, paslanmaz çelik talaşını ağırlıkça %0'dan, %20'ye kadar %5'lik aralıklarla arttırarak beş farklı deney numunesi ile paslanmaz çelik talaşı yerine ağırlıkça %10 bakır içeren bir de referans numune üretmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çeşitli deneylerin sonucunda paslanmaz çelik talaşının balata içerisindeki miktarının artışı aşınma direnci ve diğer özelliklerin çoğunda iyileşmeye sebep olmuştur. Ağırlıkça %10 bakır içeren numunenin ısıl iletim katsayısı, yoğunluğu ve sertliği, diğer tüm numunelerden yüksek olmuştur. Solma direncine karşı bakır içeren numune paslanmaz çelikten iyi performans göstermiştir, ancak solma sonrası geri kazanımda paslanmaz çelik içerikli numune daha iyi performans sergilemiştir. Paslanmaz çelik miktarındaki artış aşınmayı azaltmıştır ancak ağırlıkça % 10 bakır ve %10 paslanmaz çelik içeren numuneler karşılaştırıldığında, bakır içerikli numunede aşınma %11 kadar az olmuştur. Bunun sebebi olarak paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan Cr_2O_3 tabakasının reçineyle düşük yapışma göstermesinin sebep olabileceğini düşünmüşlerdir. Yine paslanmaz çeliğin, bakırdan çok daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olması veya paslanmaz çelik tanelerinin büyük boyutunun yüksek aşınmaya sebep olabileceğini düşünmüşlerdir [23].

Mahale ve Bijwe 2019 yılında yayınladıkları çalışmalarında, plazma da işlenen paslanmaz çelik talaşının fren balatalarında kullanılmasını incelemişlerdir. Hazırladıkları numunelerde, karşılaştırmak için ayrı ayrı işlenmemiş paslanmaz çelik talaşı ve plazmada işlenmiş paslanmaz çelik talaşını %10 oranında kullanmışlardır. Hazırladıkları iki balata içeriğinde de bağlayıcı olarak ağırlıkça %6 fenolik reçine, %16 elyaf (taş yünü, aramid, Poliakrilonitril), % 12 sürtünme düzenleyiciler (alümina ve termo-grafit), % 26 fonksiyonel dolgu maddeleri (kaju tozu, promakson, sulu kireç, kırıntı kauçuğu, vermikülit) ve % 30 $BaSO_4$ bulunmaktadır. Plazma temizleme işleminde çelik talaşları önce aseton ile yıkanıp fırında kurutulmuştur. Daha sonra 18

W'lık RF gücü bulunan bir cihazla vakum altında 500 saniye süreyle plazmaya maruz bırakılmıştır. Bu işlem ile talaş yüzeyinde bulunan Cr_2O_3 'ün parçalanmasını, bu sayede talaşlar ile reçine arasında daha yüksek yapışma oranı elde etmeyi amaçlamışlardır. Plazma sonra Cr_2O_3 'ün tekrar oluşmasını önleyebilmek için plazmadan çıkan talaşları, 100 ml aseton, 4 gr fenolik reçine solüsyonuna daldırarak talaş yüzeylerini reçine ile kaplamışlardır. Deneylerin sonuçlarında, plazma işlemi sonrası reçine ile talaş arasında daha kuvvetli yapışma sağlandığını ispat etmişlerdir. İşlem görmüş talaş ile hazırlanan numunelerde yoğunluk ve aşınma direnci daha yüksek olmuştur. Aşınmada %10 civarı bir azalma gözlemlenmiştir. Ve plazma ile işlem gören talaşlarla hazırlanan numunelerde sürtünme duyarlılığı daha düşük olmuştur [24].

Vijay ve Arkadaşları 2020 yılında yayınladıkları çalışmalarında, kalay disülfür ve demir disülfür karışımının, bakır içermeyen fren balatası içerisinde antimon trisülfidin yerine kullanmasını amaçlamışlardır. Deneylerde kullanılmak üzere ağırlıkça %16 antimon trisülfür ve ağırlıkça %16 kendi hazırladıkları metal disülfür karışımıyla iki farklı numune hazırlamışlar. Deneylerin sonucunda ikili metal sülfür karışımı daha düşük özgül ağırlık, sertlik, kürlenmemiş reçine ve daha yüksek gözeneklilik ile daha yüksek kesme mukavemeti, daha iyi termal kararlılık göstermiştir. Gözenekliliğinin fazla olması sebebiyle düşük fade ve yüksek sürtünme değerleri elde edilmiştir. İkili metal sülfür karışımı daha iyi yağlama ve buna bağlı olarak daha düşük aşınma göstermişlerdir [25].

Kalel ve arkadaşları 2020 yılında farklı standartlardaki paslanmaz çelik talaş ve parçacıklarının balata içerisindeki davranışını incelemişlerdir. 2020 yılında Mahale ve Bijwe tarafından yapılan çalışmada bakır ve paslanmaz çelik parçacıklarının boyutlarının farklı olmasının, aşınma oranının ilişkilendirilmesinde yanıtıcı olduğunu düşünerek, kendi çalışmalarında kullandıkları bakır ve paslanmaz çelik taneciklerinin boyutlarının aynı olmasını sağlamışlardır. Numune içeriğinde 30-45 μm tanecik boyutunda dört farklı standartta paslanmaz çelik ve karşılaştırma amaçlı ürettikleri aynı tanecik boyutunda bakır içeren numune ve daha önce Mahale ve Bijwe tarafından üretilmiş olan paslanmaz çelik talaşı içeren numuneyi üretmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çeşitli deneylerin sonucunda paslanmaz çelik içerikli numuneler bakır içeren numuneye göre daha düşük yoğunluk termal iletkenlik ve kesme mukavemeti göstermiştir. Sertlik değerlerinde büyük farklılıklar olmamıştır. Sürtünme katsayısında tüm paslanmaz çelik içeren numuneler benzer performans göstermişlerdir, fakat bakır içerikli numuneye kıyasla bir miktar daha fazla solma göstermişlerdir. Bakır içerikli numune %10-15 oranında daha iyi solma direnci göstermiştir [26].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Numune Üretimi

Bu tez çalışmasında bakırın yerine ikame edecek maddelerin araştırılması amaçlanmıştır. Bakır, fren balatası içerisinde ısı iletim katsayısını yükseltici, yüksek sıcaklıklarda katı yağlayıcı ve mukavemet artırıcı görevler üstlenir. Bakırın ikamesinin tek bir malzeme ile sağlanması mümkün görülmemektedir [18]. Bu sebeple bakırın yerine ikame edecek malzemeler seçilirken balata kompozisyonunda bulunan diğer malzemelerin türlerinde değişiklik yapılması öngörülmüştür. Malzeme seçimi yapılırken daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip katı yağlayıcılar seçilmeye çalışılmıştır. Seçilen malzemeler, ısı iletim katsayısı bakırdan 1.5 kat daha yüksek olan katı yağlayıcı özelliğiyle bilinen h-BN, katı yağlayıcı özellikte WS₂ ve termo grafit olmuştur. Seçilen bu üç malzemedan tek başlarına bakırın yerini tutmaları beklenemez. Ancak balata numunesinde kullanılan farklı malzemelerin bu yeni malzemelerle değiştirilmesi ile bakır içermeyen fren balatalarının üretilmesi mümkün olabilecektir.

Her numune için ağırlıkça %10, %15 ve %20 oranında katkı maddesi içeren toplam 9 numune ve bir adet ağırlıkça %15 bakır içeren baz numune üretilmiştir. Numune içerisinde kullanılacak WS₂, Nanografi Nano Teknoloji A.S. firmasından, h-BN, Nanokar Kimyevi Maddeler San. Ve Tic. Ltd. Şti. firmasından alınmıştır. Diğer malzemeler Mersin Üniversitesi Makine Mühendisliği malzeme laboratuvarından temin edilmiştir. Numunelerde kullanılan malzemelerin fonksiyonları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Numunelerde Kullanılan Malzeme Türleri

Fonksiyon		Malzeme
Bağlayıcı Malzeme		Fenolik Reçine
Takviye Malzemesi		Çelik Yünü
		Alüminyum
		Bakır
		Cam Elyafı
		Taş Yünü
Sürtünme Ayarlayıcı	Aşındırıcılar	Silika
	Aşındırıcı Olmayanlar	Çinko
		Grafit
		Cashew
		WS ₂
		Termo grafit
h-BN		
Dolgu Malzemesi		Barit

3.2. Numune İçeriği

Numune üretiminde kullanılacak parametrelerin belirlenmesinde literatürden faydalanılmıştır. Tüm numunelerde içeriğin ağırlıkça %60'ını Fenolik Reçine, Çelik Yünü, Alüminyum, Taş Yünü, Cam Elyafı, Çinko, Grafit, Cashew ve Silika oluşturmaktadır. Geri kalan %35'lik kısımda ağırlıkça %10, %15, %20 oranlarında WS₂, h-BN ve TG kullanılmıştır. Kalan boşluklar uygun miktarda barit konularak doldurulmuştur. Baz ile birlikte toplam on adet numune üretilmiştir. Numune içerikleri Tablo 3.2.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Numune içerikleri

Ağırlıkça %										
	BAZ	W10	W15	W20	B10	B15	B20	T10	T15	T20
Fenolik Reçine	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Çelik Yünü	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Alüminyum	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Taş Yünü	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Cam Elyafı	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Çinko	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Grafit	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Cashew	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Silika	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Barit	20	25	20	15	25	20	15	25	20	15
Bakır	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WS ₂	-	10	15	20	-	-	-	-	-	-
h-BN	-	-	-	-	10	15	20	-	-	-
TG	-	-	-	-	-	-	-	10	15	20

3.3. Üretim parametreleri

Numunelerde kullanılacak malzemeler 0.001 hassasiyetinde hassas tartı kullanılarak tartılmıştır. Ardından karıştırılan malzemelere 100 bar basınçta, oda sıcaklığında, 2 dakika süreyle ön şekillendirme yapılmıştır. Soğuk presleme işleminin ardından, 130 bar basınçta, 130 °C sıcaklıkta, 10 dakika boyunca sıcak presleme işlemi yapılmıştır. Sıcak presleme sırasında dört dakika ara ile kalıp açılarak gaz çıkışı sağlanmıştır. Soğuk pres kalıbında her seferinde bir numune preslenmektedir. Sıcak pres kalıbında aynı anda 4 numune preslenebilmektedir.

3.4. Deney Numunelerinin Test İçin Hazırlanması

Deney numuneleri kalıptan çıkarıldığında kenarlarında ince bir zar şeklinde kabuklar bulunmaktadır. Bu kabuklar ince bir zımparayla, balata yüzeyini bozmadan temizlenmiştir. Deney öncesinde numunelerin yüzeyleri USB Mikroskop ile incelenmiş ve görüntüleri alınmıştır. Her numune için 5 dakika alıştırma yapılmıştır. Alıştırma öncesi, deney öncesi ve deney sonrası tartılarak değerler kaydedilmiştir. Alıştırma ve deney öncesi disk yüzeyi eğe yardımıyla temizlenerek önceki deneyden kalan artıklar disk yüzeyinden uzaklaştırılmıştır.

3.5. Deney Düzeneğinin Tanıtılması

3.5.1. Sürtünme Test Cihazı

Deneylerde kullanılan sürtünme ve aşınma test cihazı Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülmektedir. TS 555 ve TS 9076'da belirtilen şartlara uygun h-BN, WS₂ ve termo grafit katkılı balata üretimi yapılmış, balata numunelerinin tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla sürtünme ve aşınma test cihazı kullanılmıştır. Test cihazı ile balataların, farklı devir, sıcaklık, basınç vb. gibi faktörlerin etkisinde sürtünme katsayısı incelenebilmektedir.

Deneylerde kullanılan fren diski GG-20 gri dökme demirden üretilmiştir. Test cihazının çalışması sırasında balatalar fren diskine bastırılır. Balataların bağlı bulunduğu kaliper, yük hücrelerine baskı uygular. Bu baskının ölçülmesi ile fren kuvveti hesaplanır. Hesaplanan değerler istenilen miktarda hafızaya kaydedilir. Kaydedilen verilerden Sürtünme Katsayısı-Sıcaklık, Yük-Zaman grafikleri oluşturulacaktır. Üretilen fren balatalarının sürtünme sonrası yüzeyleri SEM görüntülemesi ile incelenecektir.

Sürtünme testleri öncesi 5 dakika süreyle, 5 bar basınçta, 616 devir/dakika ile alıştırma yapılmıştır. Daha sonra deneyler 10 dakika süre ile tekrarlanmıştır. Deneylerin yapıldığı ortam sıcaklığı 32 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.1. Sürtünme test cihazı



Şekil 3.2. Sürtünme test cihazı yan görünüş

3.5.2. Bilgisayar Programı

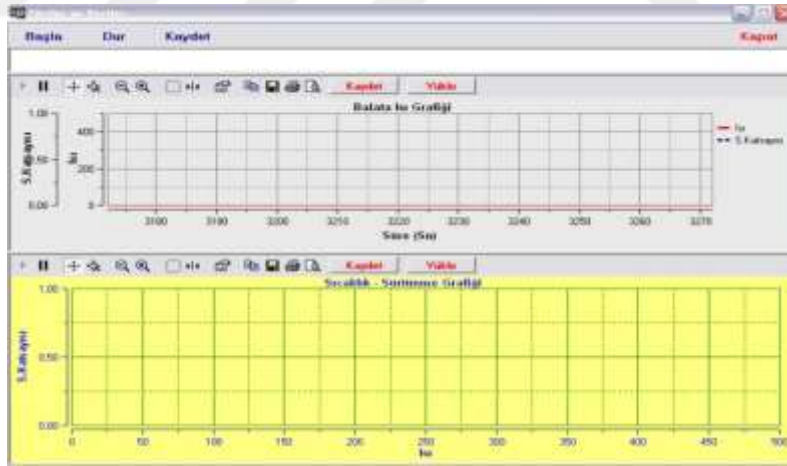
Yapılacak olan deneyin süresi, fren balatasına uygulanacak basınç, disk devri gibi parametreler bilgisayar üzerinde çalışan programın arayüzüne girilmektedir. Arayüzde moment farkı balata yüzey alanının yük hücrelerine olan mesafedir. Alan kısmına fren balatasının yüzey alanı yazılmaktadır. Eğri başlat kutucuğu işaretlenmişse istenilen devire belli bir ivme ile ulaşılması sağlanabilir. Deney süresi dakika cinsinden yazılmalıdır. Deney düzeneği belirlenen parametrelere göre tüm işlemleri otomatik olarak gerçekleştirmektedir. İstenilirse manuel olarak çalıştırılması için bir arayüze de sahiptir. Basınç aralığı 0-40 MPa, devir sayısı 0-1400 devir/dakika aralığında seçilebilmektedir. Şekil 3.3'de fren balata test cihazının bilgisayar kontrol

paneli görülmektedir. Sürtünme ve aşınma test cihazının yazılımı Delphi yazım dilinde kodlanmıştır.



Şekil 3.3. Sürtünme test cihazı bilgisayar kontrol paneli

Sürtünme test cihazı deney süresince elde ettiği verileri metin dosyası olarak kaydetmektedir. Bu veriler daha sonra Excel programına aktarılmaktadır. İstenirse program üzerinde de grafikler çizilebilmekte ve önceden çizilmiş grafikler deney sırasında canlı olarak yeni yapılacak deney grafikleri ile karşılaştırılabilmektedir.



Şekil 3.4. Sürtünme test cihazı sonuç ekranı

3.5.3. Sıcaklık Ölçme Cihazı

Deneyler sırasında balatanın fren diskine sürtünmesi sonucunda sürtünme yüzeyi sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklık artışının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla balatanın diske sürtünme yüzeyinden 2 cm ilerisinden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümünde her saniye veri alabilen, -50 - +500 °C aralıklarında çalışabilen, hafızasına 6000 saniye

veri kaydedebilen Extech 42582 İnfrared termometre kullanılmıştır. Sıcaklık değerleri RS232 veri aktarma yolu ile bilgisayara aktarılabilmektedir.

3.6. Hassas Terazi

Aşınma deneyleri kütle kaybı esasına göre yapılmıştır. Kütle kaybını ölçmek için DESIS marka 0,001 gr hassasiyetinde dijital terazi kullanılmıştır. Ölçümler sırasında sonuçların hava akımından etkilenmemesi için terazinin üstü camlı bölme ile kapatılmıştır. Her ölçüm öncesinde terazinin kalibrasyonu yapılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Hassas terazi

3.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı

Sürtünme deneyleri öncesinde ve sonrasında, balata yüzeylerinde meydana gelen pürüzlülük değerlerini belirlemek için, hareket mesafesi 6 mm, hareket hızı 1 mm/s ve ölçüm aralığı $R_a = 0.05-15 \mu\text{m}$ olan Time TR-110 marka model numaralı yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Her numune yüzeyinin 5 farklı bölgesinde ölçüm yapılmıştır. Cihazın cut-off uzunlukları aşağıda belirtilmiştir.

Cut-off uzunlukları:

0.25 mm ($R_a = 0.02 - 0.32 \mu\text{m}$)

0.8 mm ($R_a = 0.32 - 2.50 \mu\text{m}$)

2.5 mm ($R_a = 2.5 - 15.00 \mu\text{m}$)



Şekil 3.6. Time TR-110 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

3.8. Sertlik Ölçüm Cihazı

Üretimi gerçekleştirilen numunelerin sertlik değerleri Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarında bulunan, BMS 200-RB marka analog Rockwell&Brinell sertlik ölçme cihazı ile ölçülmüştür.

Sertlik ölçme işlemlerinde batıcı uç olarak, çapı 1/4" olan çelik bilye uç kullanılmıştır. Uygulanan yük 62.5 kg-f (612.9 N) olarak alınmıştır. Sertlik ölçümleri, numunelerin sürtünme testlerinde sürtünen yüzeyleri üzerinde yapılmıştır. Numunelerin ortasından ve kenara yakın dört farklı noktasından toplam beş farklı ölçüm yapılmıştır. Bulunan değerlerin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

3.9. Yoğunluk Ölçüm Yöntemi

Yoğunluk ölçümünde Arşimet yöntemi kullanılmıştır. Her numunenin su içerisindeki ağırlığı tespit edilmiştir. Numuneler su içerisinde bulunan bir kaba konularak suya daldırılmış ve iki dakika beklenmiştir. Her ölçüm öncesi numuneler kuru tartılmıştır. Elde edilen veriler denklem (1) ile hesaplanarak yoğunluk değerine dönüştürülmüştür.

$$\rho = \frac{W_h}{W_h - W_s} \rho_{su} \quad (1)$$

Burada,

ρ : balatanın yoğunluğunu

W_h : numunenin havadaki ağırlığını

W_s : numunenin sudaki ağırlığını

ρ_{su} : suyun yoğunluğunu göstermektedir.

3.10. Aşınma Ölçüm Yöntemi

Aşınma oranının hesaplanmasında kütle kaybı yöntemi kullanılmıştır. Numuneler sürtünme deneyleri öncesi ve sonrası tartılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, denklem (2) kullanılarak özgül aşınma oranı hesaplanmıştır.

$$V = \frac{1}{2\pi R} \frac{m_1 - m_2}{nF\rho} \quad (2)$$

Burada,

V : özgül aşınma oranını,

R : balatanın merkezi ile diskin merkezi arasındaki mesafeyi,

m_1 : balatanın test öncesi kütlesini,

m_2 : balatanın test sonrası kütlesini,

F : ortalama sürtünme kuvvetini,

ρ : balatanın yoğunluğunu göstermektedir.

3.11. Yüzey Kaplama Cihazı

Yüzey kaplama için Quorum Q150R cihazı kullanılmıştır. SEM görüntülemesi öncesi numune yüzeyleri altın ile kaplanmıştır.



Şekil 3.7. Quorum Q150R yüzey kaplama cihazı

3.12. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Sürtünme ve aşınma deneyleri sonrasında numune balataların mikro yapısını incelemek amacıyla FEI markalı Quanta 650 Field Emission SEM model taramalı elektron mikroskobunda (SEM) görüntüleri alınmıştır. Her numunenin iki farklı bölgesinden, birer görüntü alınmıştır. Görüntüler 500x yakınlaştırma ile alınmıştır.



Şekil 3.8. FEI markalı Quanta 650 Field Emission SEM model taramalı elektron mikroskobu

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Sürtünme Katsayısı Sonuçları

Bu çalışmada farklı oranlarda h-BN, WS₂ ve TG içeren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen balataların performanslarının karşılaştırılması için ağırlıkça %15 bakır içeren bir adet baz numune üretilmiştir. Numuneler aşınma deneyine tabi tutularak sürtünme katsayıları, deney sırasında oluşan ısı ve aşınma oranları belirlenmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı tüm deney süresince elde edilen sürtünme katsayılarının aritmetik ortalamasıdır. Sürtünme stabilitesi (kararlılığı) denklem (3) ile hesaplanmıştır.

Sonuçlar kullanılan malzemenin türü ve oranı bakımından değerlendirilmiştir.

$$FS = (\mu_{ort} / \mu_{max}) \cdot 100 \quad (3)$$

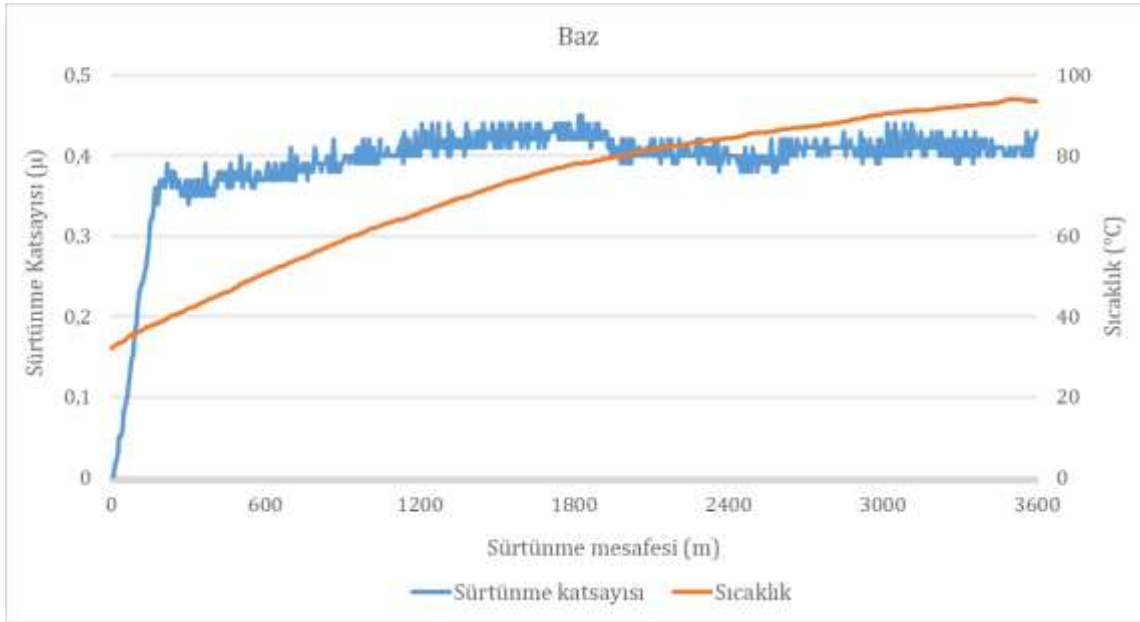
Burada,

FS : sürtünme stabilitesini,

μ_{ort} : ortalama sürtünme katsayısını,

μ_{max} : en yüksek sürtünme katsayısını göstermektedir.

Sürtünme deney sonuçları incelendiğinde en düşük ortalama sürtünme katsayısı 0,29 ile ağırlıkça %20 Termo grafit içeren T20 numunesinde görülmüştür. En yüksek sürtünme katsayısı 0,41 ile ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunesinde görülmüştür. En düşük kararlılık %62,9 ile B20 numunesinde, en yüksek kararlılık %84,5 ile %15 bakır içeren baz numunesinde görülmüştür. Aşınma direnci en iyi numuneler WS₂ içeren numuneler olmuştur. Sürtünme deneyleri sonrası en iyi yüzey pürüzlülüğü baz numunede görülmüştür. Kumar ve Bijwe 2010 yılında yayınladıkları makalelerinde bakır içeren numuneler ile deneyler gerçekleştirmiş ve bakır içeren numunelerde daha iyi solma direnci, daha yüksek ısıl iletkenlik, yüksek aşınma direnci olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada WS₂ içerikli numuneler bakır içeren numuneye göre daha yüksek aşınma direncine sahip olmuşlardır. Kim ve arkadaşlarının 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada, Bakır lifleri içeren numunelerin sürtünme katsayılarının daha kararlı olduğunu ve bakır lifi miktarının artmasıyla sürtünme katsayısının ve aşınma direncinin arttığını bildirmişlerdir [14]. Deney sonuçları bu bilgiyi doğrular nitelikte olmuştur. Ağırlıkça %15 bakır içeren numunenin sürtünme katsayısı- sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi grafiği Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

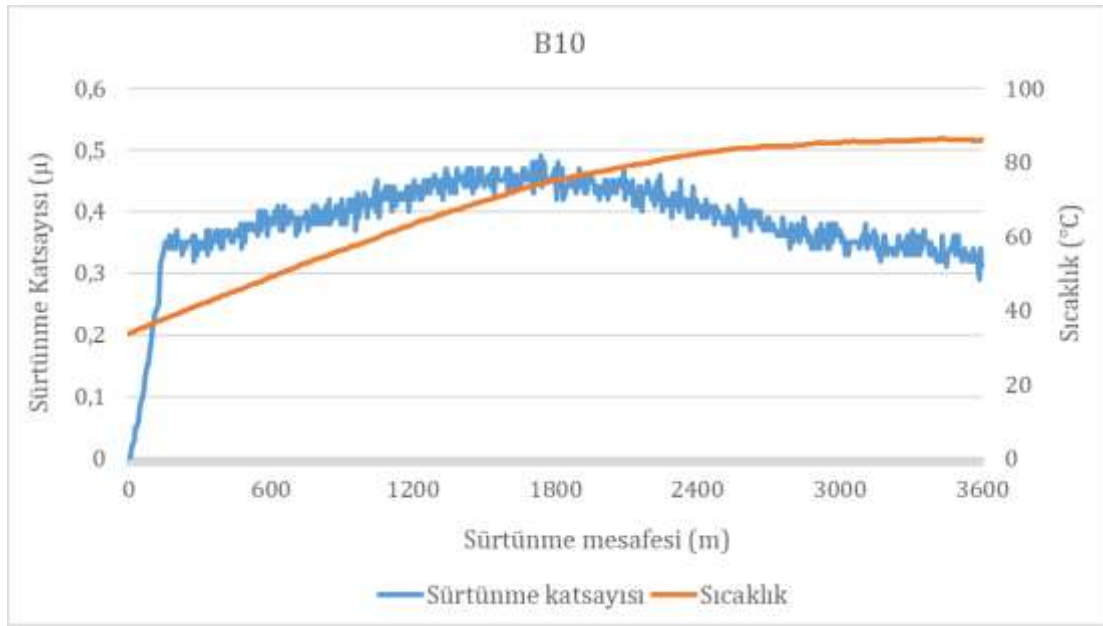
4.2. h-BN İlaveli Numuneler

Numunelerde kullanılan h-BN oda sıcaklığında 600 W/mK ısı iletim katsayısına sahiptir ve mohs skalasında 1,65 sertlik derecesine sahiptir [27]. Zehirleyici değildir ve yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Numune içerisinde h-BN kullanılarak balatanın ısı iletim katsayısının yükseltilebileceği düşünülmüştür. Kim ve arkadaşları 2010 yılında yayınlanan makalelerinde h-BN'nin, Sb_2S_3 and MoS_2 ikamesi olarak kullanılabilceğini söylemişlerdir [27]. Antonyraj ve Singaravelu 2019 yılında yayınlanan çalışmalarında katı yağlayıcı olarak MoS_2 'yi kullanmışlardır. MoS_2 içeren sürtünme balatalarında iyi gözeneklilik ve iyi yağlama özelliği ve buna bağlı olarak yüksek aşınma direnci gözlemlemişlerdir [22]. Roy L. Cox'un 2011'de yayınlanan kitabının, katı yağlayıcılar bölümünde, Sb_2S_3 'ün yapısında bulundurduğu Sb bileşiklerinin sağlığa zararları etkileri ile ilgili endişeler nedeniyle, ABD'de ve AB'de fren balatası üreticileri Sb içermeyen fren balatası üretimine zorlanmaya başladığından bahsetmektedir [28]. Bu açıdan h-BN balata içerisinde bulunan katı yağlayıcıların yerini alabilir, balatanın ısı iletim katsayısının yükseltilmesinde rol oynayabilir.

Yanar ve arkadaşlarının 2021 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, tribolojik testlerden elde edilen sonuçlara göre, fren balatası numunelerinin sürtünme özellikleri üzerinde sıcaklığa bağlı olarak iki farklı etki göstermektedir. Düşük disk yüzey sıcaklıklarında h-BN ilavesi numunelerin sürtünme katsayısını arttırırken, yüksek sıcaklıklarda tersi bir etki gösterir [29]. Bu çalışma bu bilgiyi doğrular niteliktedir. Yanar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada sıcaklıklar 300 °C'ye kadar çıkmaktadır. Bu çalışmada deneyler 100°C altında gerçekleşmiştir. Bu durum

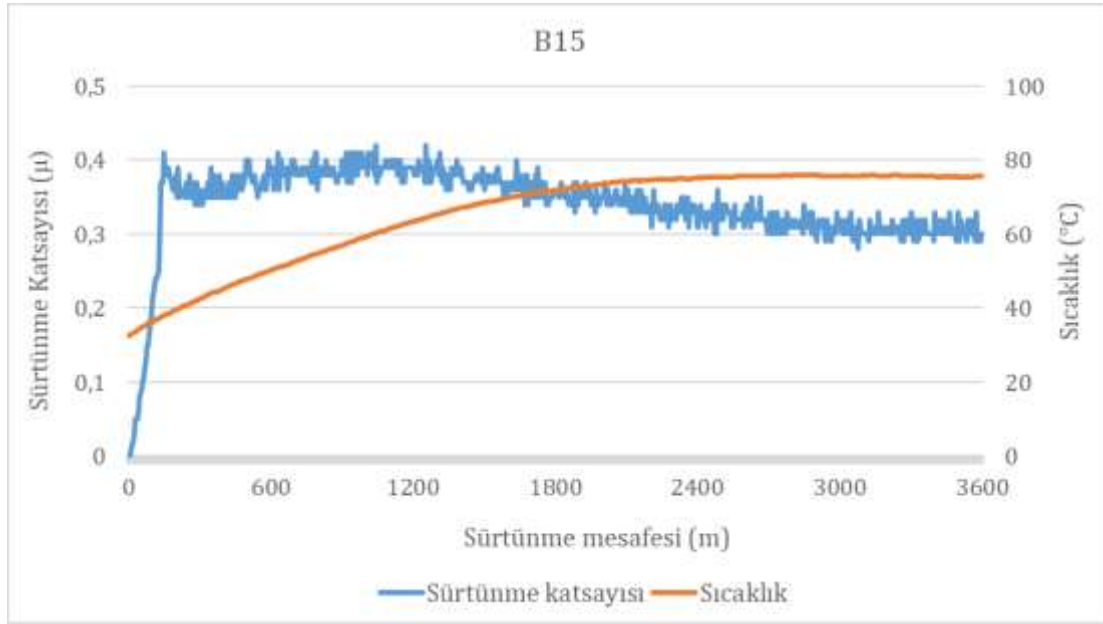
Yanar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarla ilişki kurulmasını zorlaştırmaktadır. Yanar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada h-BN ilavesinin oranının artması sürtünme katsayısını artırırken bu çalışmada düşürücü bir etki göstermiştir. Numunelerde h-BN oranının artmasıyla ortalama sürtünme katsayısı, sürtünme stabilitesi ve aşınma direnci azalmıştır.

Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,38, sürtünme stabilitesi %78,5 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 86,3 °C ve ortalama sıcaklık 70,7 °C olmuştur. Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.2'de görülmektedir.



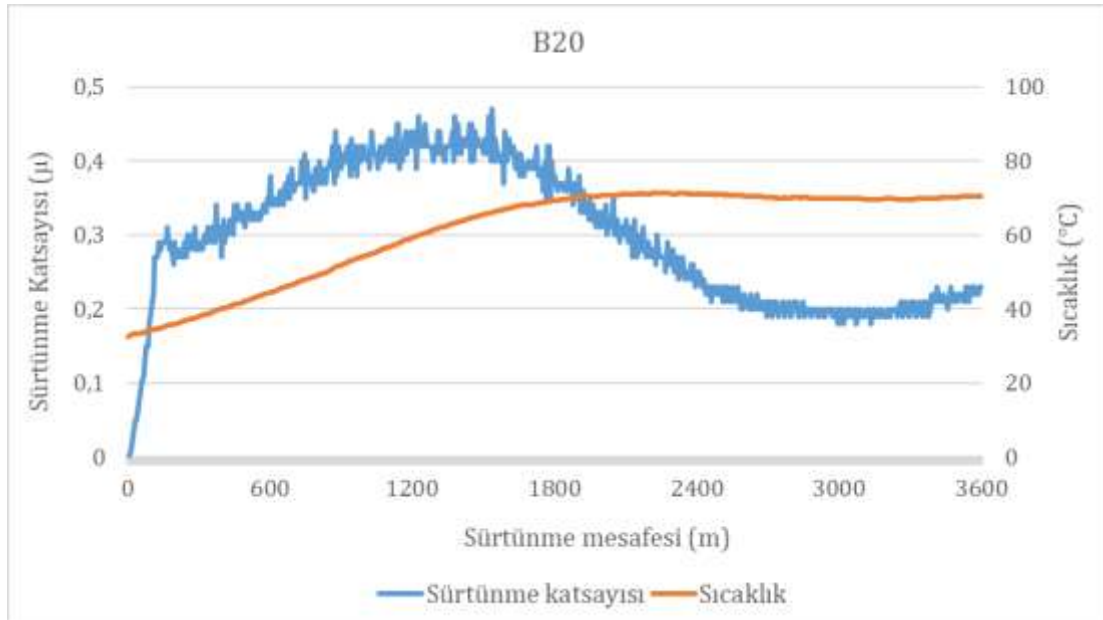
Şekil 4.2. Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,42, sürtünme stabilitesi %81,5 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 76 °C ve ortalama sıcaklık 66,2 °C olmuştur. Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.3'de görülmektedir.



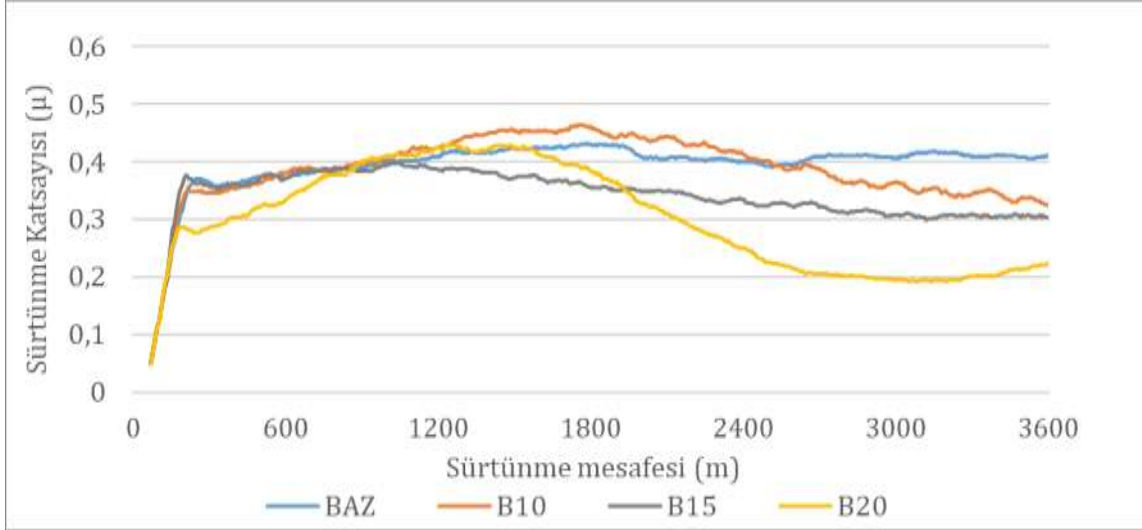
Şekil 4.3. Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,29, sürtünme stabilitesi %62,9 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 71,5 $^{\circ}\text{C}$ ve ortalama sıcaklık 61,9 $^{\circ}\text{C}$ olmuştur. Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.4'te görülmektedir.

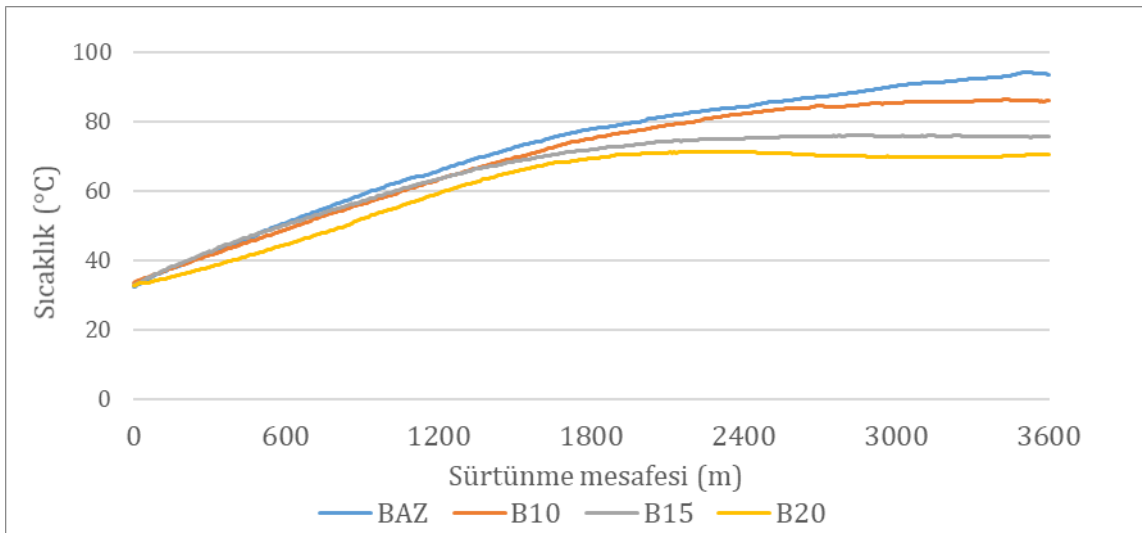


Şekil 4.4. Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Şekil 4.5'te h-BN içeren 3 numune ile baz numunenin sürtünme katsayısı mesafe grafiği görülmektedir. Şekil 4.6'da aynı numunelerin sıcaklık mesafe grafiği bulunmaktadır. Numunelerin sürtünme katsayılarının mesafe ve sıcaklığa göre değişimi izlendiğinde bakır içeren numunenin deney süresince kararlı davrandığı görülmektedir. Numunelerin sürtünme katsayısı h-BN oranının artmasıyla azalma göstermiştir.



Şekil 4.5. h-BN içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi



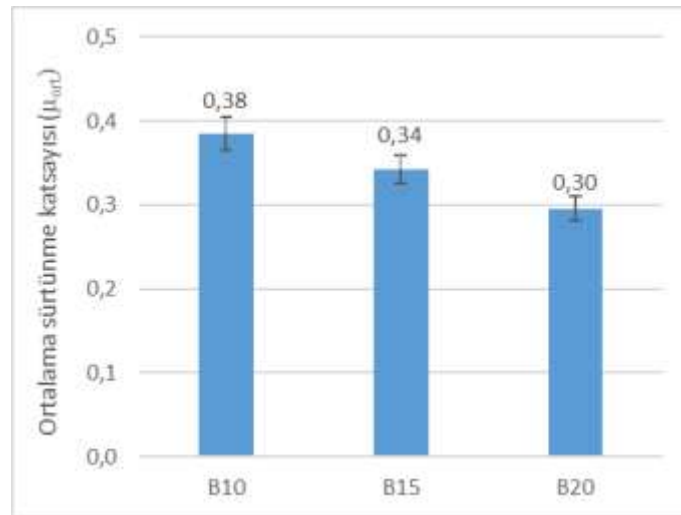
Şekil 4.6. h-BN içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sıcaklık-sürtünme mesafesi

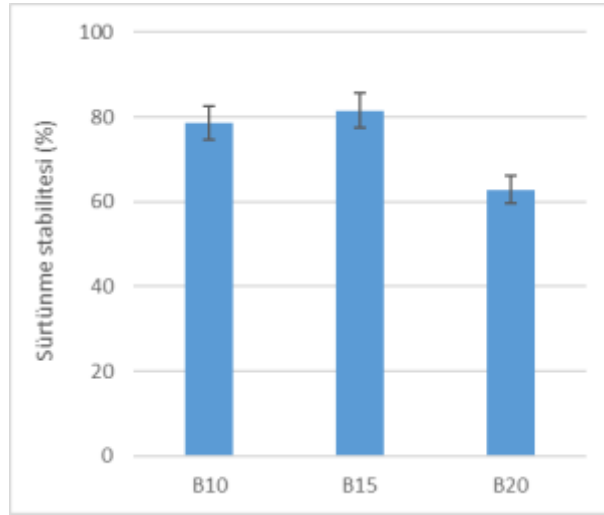
Tablo 4.1. h-BN içerikli numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri

Numune Kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HRL)	Özgül aşınma oranı x10 ⁻⁶ (cm ³ /Nm)	Ortalama sürtünme katsayısı	Balata sınıfı	Sürtünme stabilitesi (%)
B10	1,921	65,0	2,03	0,38	F	78
B15	2,001	76,2	2,54	0,34	E	81
B20	1,873	65,7	4,17	0,30	E	62
BAZ	2,323	81,0	1,64	0,41	F	84

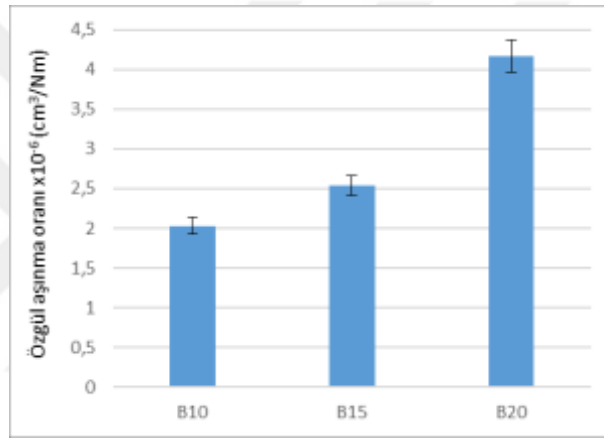
Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı deney başlangıcında 0,34 iken sıcaklık 75 °C'ye yükselene kadar düzgün bir şekilde artarak 0,45 olmuştur. Bu sıcaklıktan sonra sürtünme katsayısı azalmaya başlamış ve sıcaklığın 85 °C olduğu noktada 0,26 olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı deney başlangıcında 0,36 olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın 66 °C derece olduğu noktaya kadar fazla değişiklik göstermemiştir. Ancak bu sıcaklık aşıldığında yavaşça azalmaya başlamış ve sıcaklığın 75 °C olduğu noktada 0,28 olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin sürtünme katsayısı deney başlangıcında 0,28 olarak belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı sıcaklığın 65 °C olduğu ana kadar artarak 0,43'e kadar yükselmiştir. Bu sıcaklıktan sonra hızla azalarak sıcaklığın 69 °C olduğu anda 0,19'a düşmüştür.

Şekil 4.7'de h-BN içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayıları, Şekil 4.8'de aynı numunelerin sürtünme stabilite ve Şekil 4.9'da özgül aşınma oranları görülmektedir.

**Şekil 4.7.** h-BN içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayıları



Şekil 4.8. h-BN içeren numunelerin sürtünme stabilitesi (%)



Şekil 4.9. h-BN içeren numunelerin özgül aşınma oranları

Numunelerde h-BN oranının artması sürtünme katsayısını olumsuz yönde etkilemiştir. Daha düşük oranlarda h-BN kullanımı sürtünme katsayısının daha dar bir aralıkta değişmesini sağlarken, oranın fazlaşması bu durumu tersine çevirmiştir.

4.3. TG İçeren Numuneler

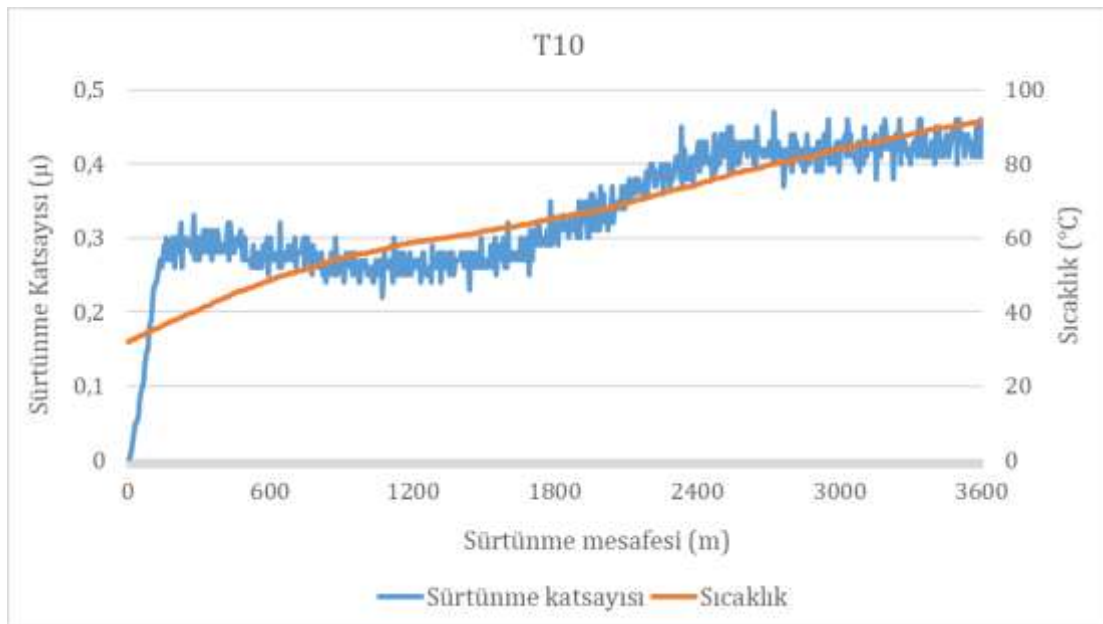
Filip ve arkadaşlarının 1997 yılında yayınlanan makalelerinde, termo grafitin yağlayıcı görevi gördüğünden bahsetmişlerdir. Grafitin yağlayıcı özelliğinde, hacimce %15'ten sonra önemli bir artış gözlemlenmemişlerdir. Hacimce %15'e kadar eklenen grafitin üretim için gereken basıncı düşürdüğü buna ek olarak balata gözenekliliğini azalttığını bildirmişlerdir [12].

Aranganathan ve Bijwe 2016 yılında yaptıkları çalışmalarında bakır içermeyen, çevreye zararsız fren balatası geliştirmeyi amaçlamışlardır. Numunelerinde bakır, doğal ve termo grafit içeren numuneler kullanmışlardır. Deneylerin sonucunda, neredeyse tüm özelliklerde bakır içerikli balataların önemli olmayan bir miktar daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Bakır içermeyen numunelerin daha düşük aşınma, daha yüksek ısıl iletkenlik, daha düşük yoğunluk, disk ve balata ısısında daha yavaş artış gibi özelliklere sahip olduklarını bildirmişlerdir. Bakırın yüksek sıcaklarda yağlama etkisi yaptığının bilinmesine karşın deney sonucunda bakır, şiddetli çalışma koşullarında daha yüksek sürtünmeye sebep olmuştur. Termo grafitin ısı iletimi açısından bakırın yerini alabileceğini, ancak sürtünme katsayısını artırmak için ve yükleme hızına bağlı ısı artışına duyarlılığın azaltılması için başka maddelerin de eklenmesi gerektiğini bildirmişlerdir [18].

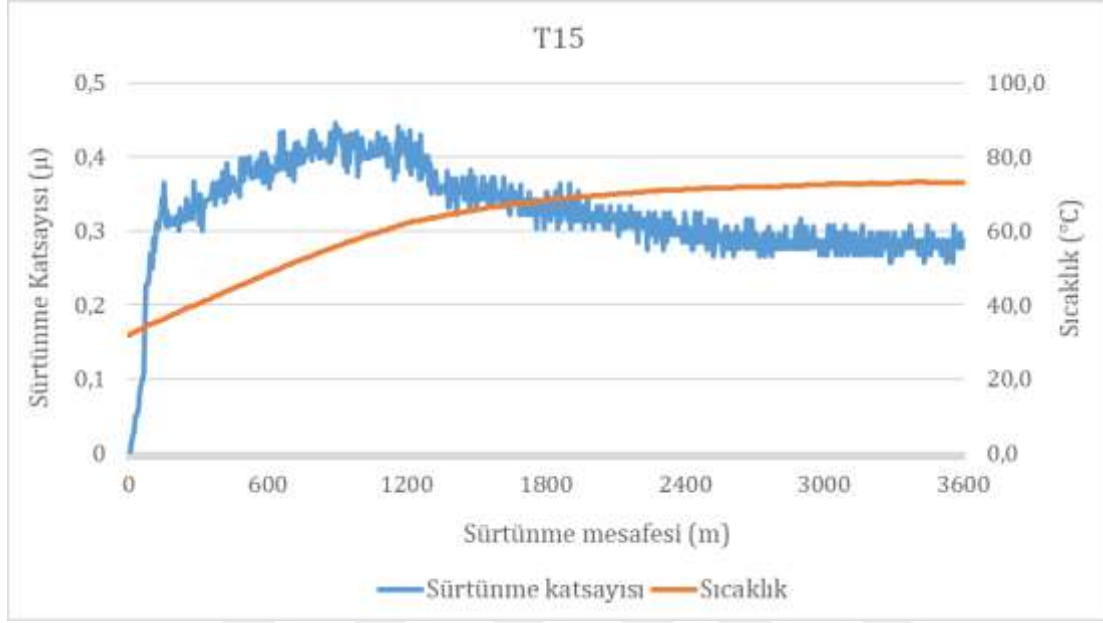
Bu çalışmada Termo grafit içeren numunelerde, kullanılan TG oranı arttıkça ortalama sürtünme katsayısında düşüş görülmüştür. Kullanılan orandaki artış ortalama sürtünme katsayısında iyileşmeye sebep olmuştur. Ortalama sürtünme katsayısı %10 oranından %15 oranına geçildiğinde sabit kalırken %20 oranına çıkıldığında artmıştır. Ağırlıkça %10 oranında termo grafit içeren numunede başlangıçta sürtünme katsayısı düşükken, sıcaklığın artmasıyla sürtünme katsayısında artış görülmüştür. Termo grafit oranı ağırlıkça %15'e çıkarıldığında sürtünme katsayısı 56°C sıcaklığına kadar artmış, sonrasında düşüğe geçmiştir. Yine termo grafit oranı %20 seviyesine çıktığında ortalama sürtünme katsayısı 49°C sıcaklığına kadar artmış, bu sıcaklıktan sonra düşüş göstermiştir. Termo grafit oranının artmasıyla aşınma oranında artış gözlenirken yüzey pürüzlülüğünde azalma görülmüştür.

Ağırlıkça %10 Termo grafit içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,35, sürtünme stabilitesi %73,3 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 96,1 °C ve ortalama sıcaklık 68,1 °C olmuştur. Ağırlıkça %10 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.10'da görülmektedir.



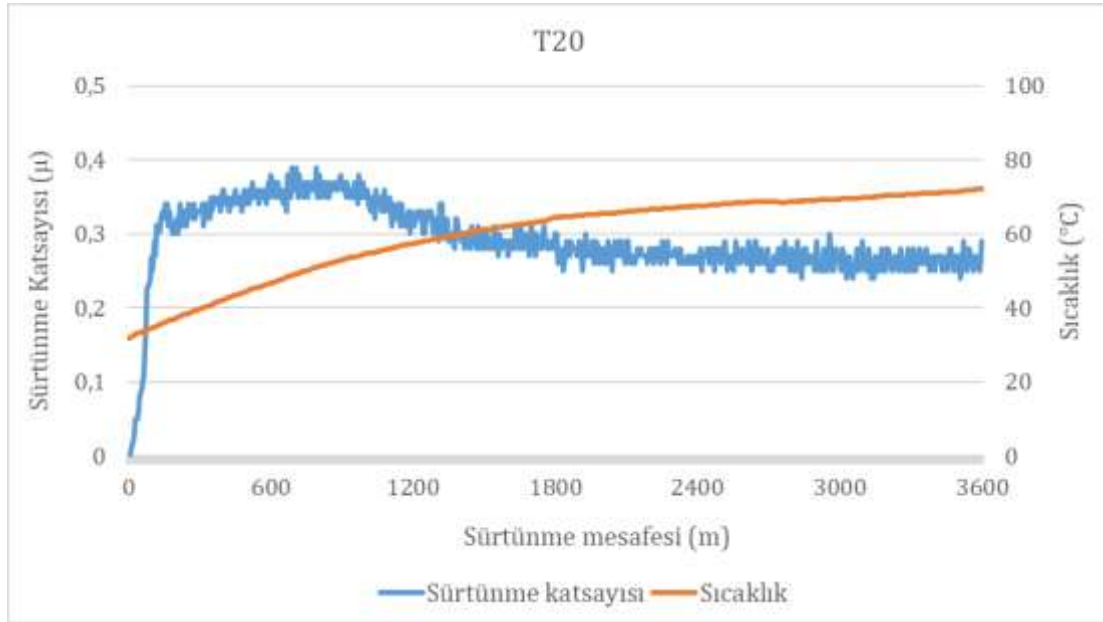
Şekil 4.10. Ağırlıkça %10 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Ağırlıkça %15 Termo grafit içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,33, sürtünme stabilitesi %73,1 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 73,6 °C ve ortalama sıcaklık 63,6 °C olmuştur. Ağırlıkça %15 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.11’de görülmektedir.



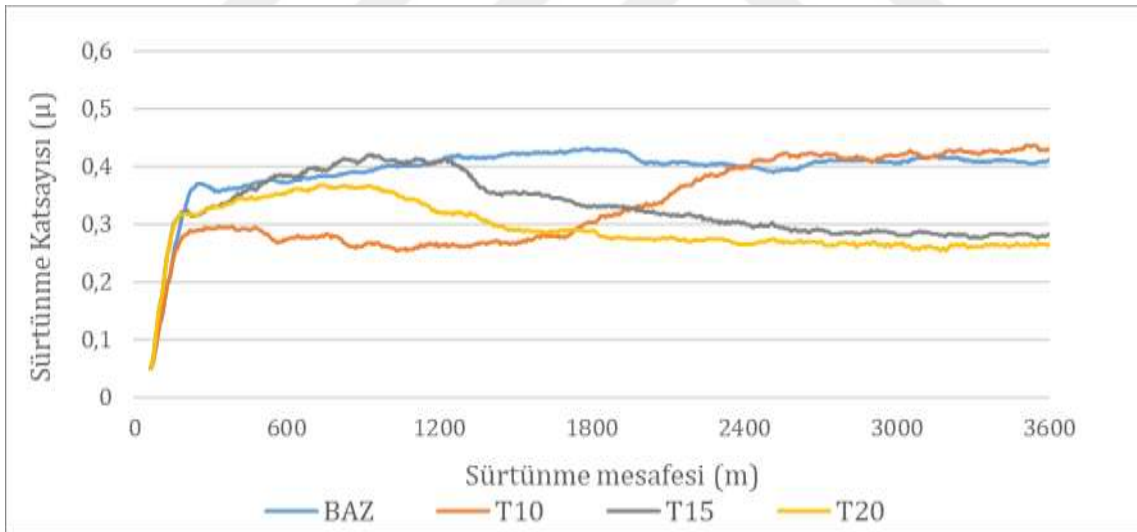
Şekil 4.11. Ağırlıkça %15 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Ağırlıkça %20 Termo grafit içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,29, sürtünme stabilitesi %75 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 74,5 °C ve ortalama sıcaklık 62,5 °C olmuştur. Ağırlıkça %20 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.12’de görülmektedir.

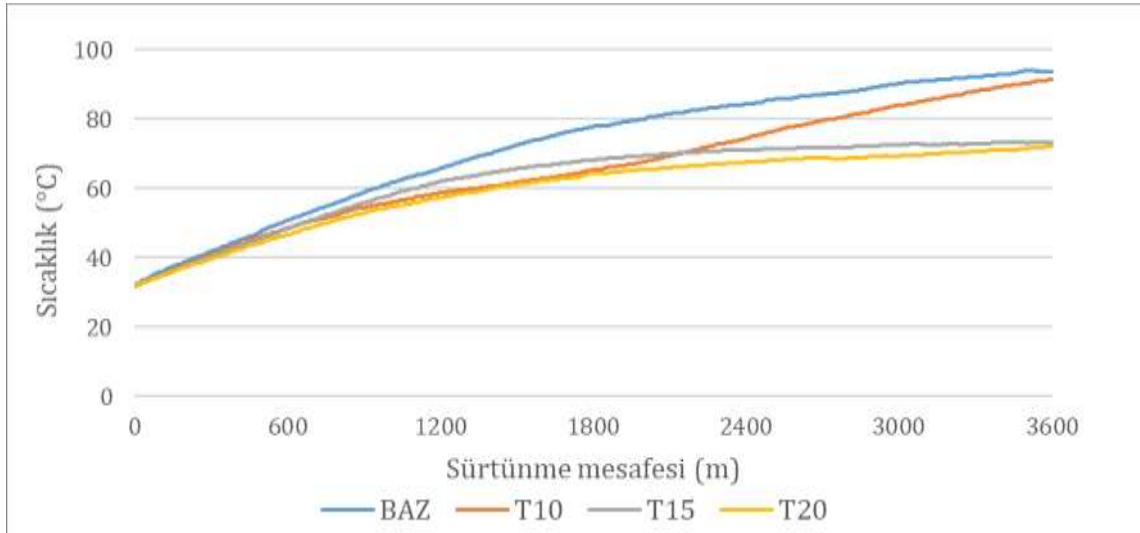


Şekil 4.12. Ağırlıkça %20 TG içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Şekil 4.13'te Termo grafit içeren 3 numune ile baz numunenin sürtünme katsayısı mesafe grafiği görülmektedir. Şekil 4.14'te aynı numunelerin sıcaklık mesafe grafiği bulunmaktadır.



Şekil 4.13. TG içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi



Şekil 4.14. TG içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sıcaklık-sürtünme mesafesi

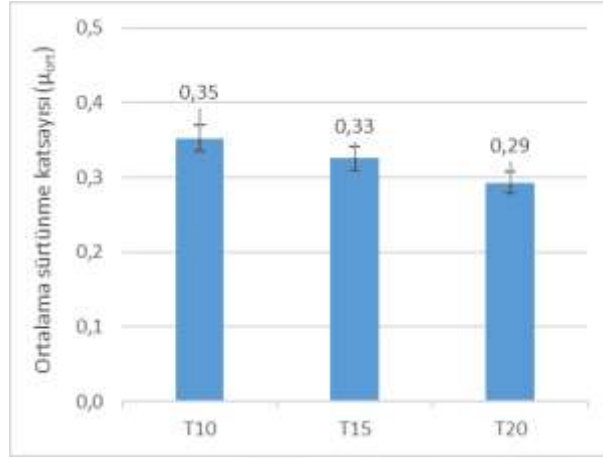
Tablo 4.2. Termo grafit içeren numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri

Numune Kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HRL)	Özgül aşınma oranı x10 ⁻⁶ (cm ³ /Nm)	Ortalama sürtünme katsayısı	Balata sınıfı	Sürtünme stabilitesi (%)
T10	2,075	77,5	2,40	0,35	F	73
T15	2,104	79,1	2,67	0,33	E	73
T20	2,133	77,6	3,81	0,29	E	75
BAZ	2,323	81,0	1,64	0,41	F	84

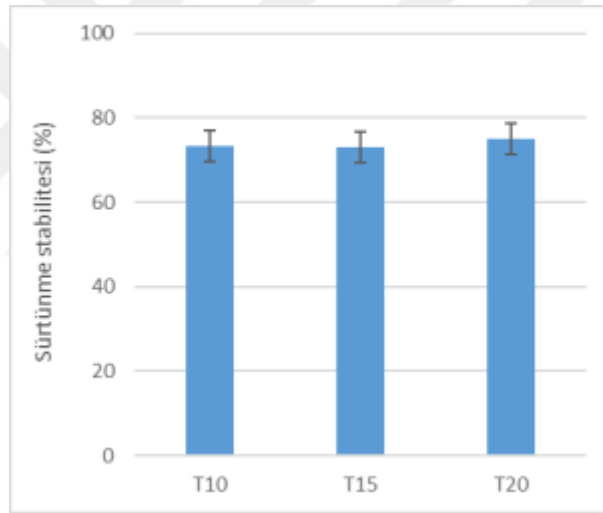
Numunelerin sürtünme katsayılarının mesafe ve sıcaklığa göre değişimi incelendiğinde ağırlıkça %20 Termo grafit karışımı içeren numunenin en kötü sürtünme davranışı gösterdiği görülmektedir. Yine ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunenin en iyi sürtünme davranışı gösterdiği gözlemlenebilmektedir. %10 termo grafit içeren numune sıcaklığın artmasıyla daha yüksek sürtünme katsayıları göstermiştir. %10 termo grafit içeren numunenin sürtünme sonuçları incelendiğinde, sıcaklığın 70 °C olduğu noktadan itibaren ki sürtünme stabilitesi %88,3 olarak bulunmaktadır. Numune içerisindeki Termo grafit oranının artması yüksek sıcaklıklarda sürtünme katsayısının düşmesine ve kararlılığın azalmasına sebep olmaktadır. Balata içerisinde katı yağlayıcı olarak görev yapan Termo grafit ağırlıkça %10 içeren numunenin sürtünme deneyi sırasında sürtünme katsayısı başlangıçta bir miktar düşmüştür. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte sürtünme katsayısı da yükselmeye başlamıştır. Bu durum ağırlıkça %15 ve %20 termo grafit içeren numunelerde tam tersi olarak görülmektedir. Sürtünme katsayıları başlangıçta artmış fakat sıcaklığın yükselmesiyle birlikte azalmaya başlamıştır.

Şekil 4.15'te Termo grafit içeren numune grubunun ortalama sürtünme katsayıları ve Şekil 4.16'da aynı numunelerin sürtünme stabilitesi gösterilmektedir. Numune içerisinde Termo

grafit miktarının artması ortalama sürtünme katsayısını azalmasına sebep olurken sürtünme stabilitesinde olumlu etkiler görülmesini sağlamıştır.

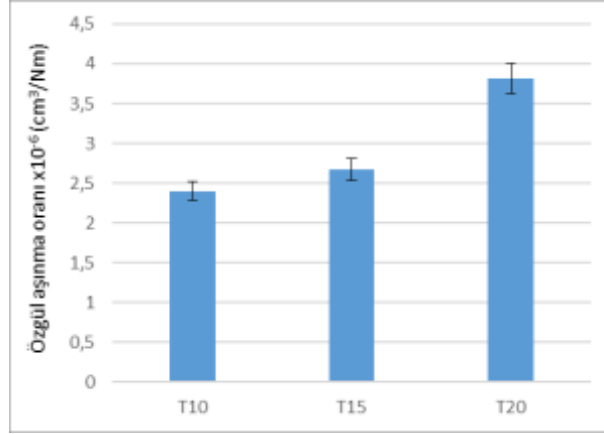


Şekil 4.15. TG içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayıları



Şekil 4.16. TG içeren numunelerin sürtünme stabilite (%)

Şekil 4.17'de numunelerin özgül aşınma oranları görülmektedir. Grafikte termo grafit miktarında artış numunelerdeki aşınma oranını olumsuz etkilediği görülmektedir.



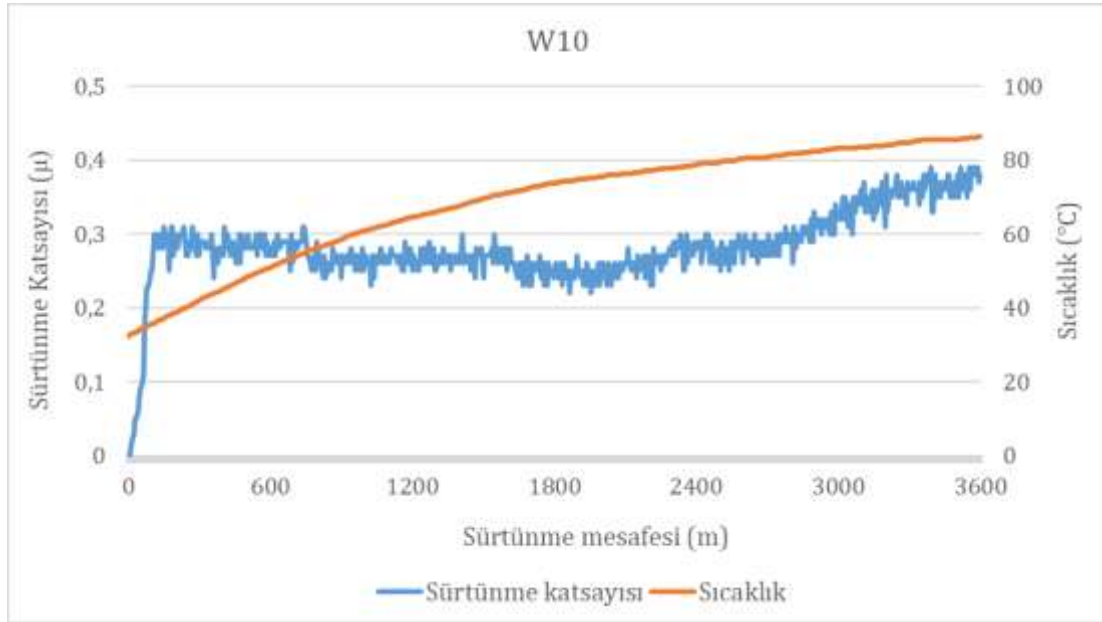
Şekil 4.17. TG içeren numunelerin özgül aşınma oranları

4.4. WS₂ İçeren Numuneler

Antonyraj ve Singaravelu 2019 yılında yayınlanan çalışmalarında, dört farklı katı yağlayıcı kullanarak kullandıkları WS₂ esaslı numunelerin yüksek sertlik ve yüksek termal kararlılık özellikleri gösterdiğini ve buna bağlı olarak iyi sürtünme performansı sağladığını bildirmişlerdir. Yapmış oldukları deneyler 800 °C'ye kadar çıkmaktadır.

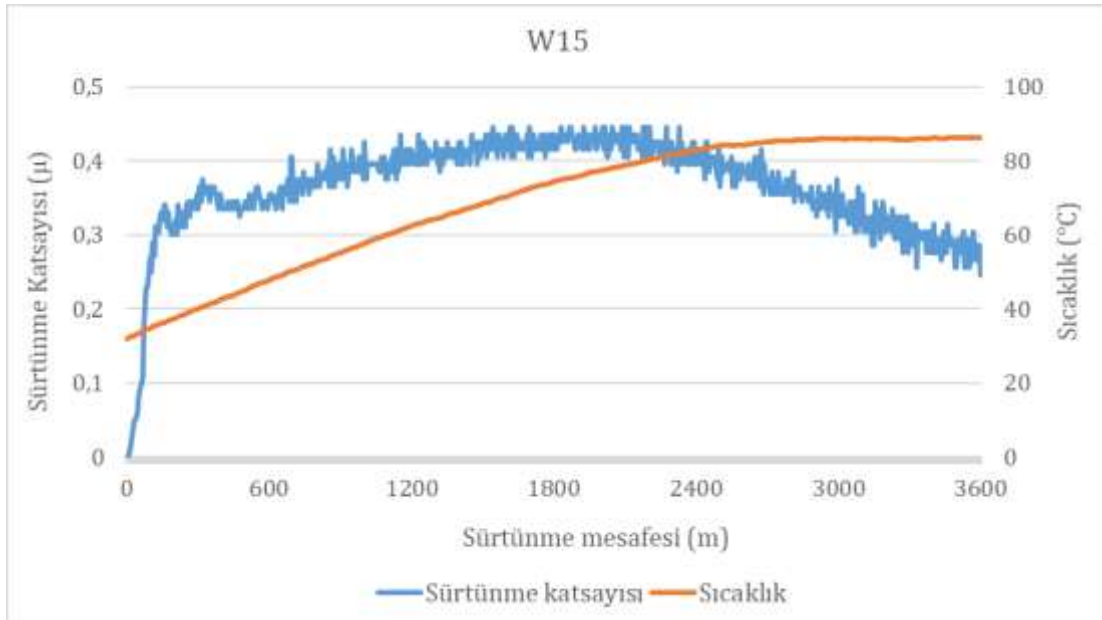
Bu çalışmada sıcaklık aralığı çok daha düşüktür. Numunelerde WS₂ oranı arttıkça ortalama sürtünme katsayısı, sürtünme stabilitesi, aşınma oranı artmıştır ve WS₂ oranındaki değişiklikler yüzey pürüzlülüğünde belirgin değişikliğe sebep olmamıştır [21].

Ağırlıkça %10 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,29, sürtünme stabilitesi %66,4 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 88 °C ve ortalama sıcaklık 70,2 °C olmuştur. Ağırlıkça %10 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.18'de görülmektedir.



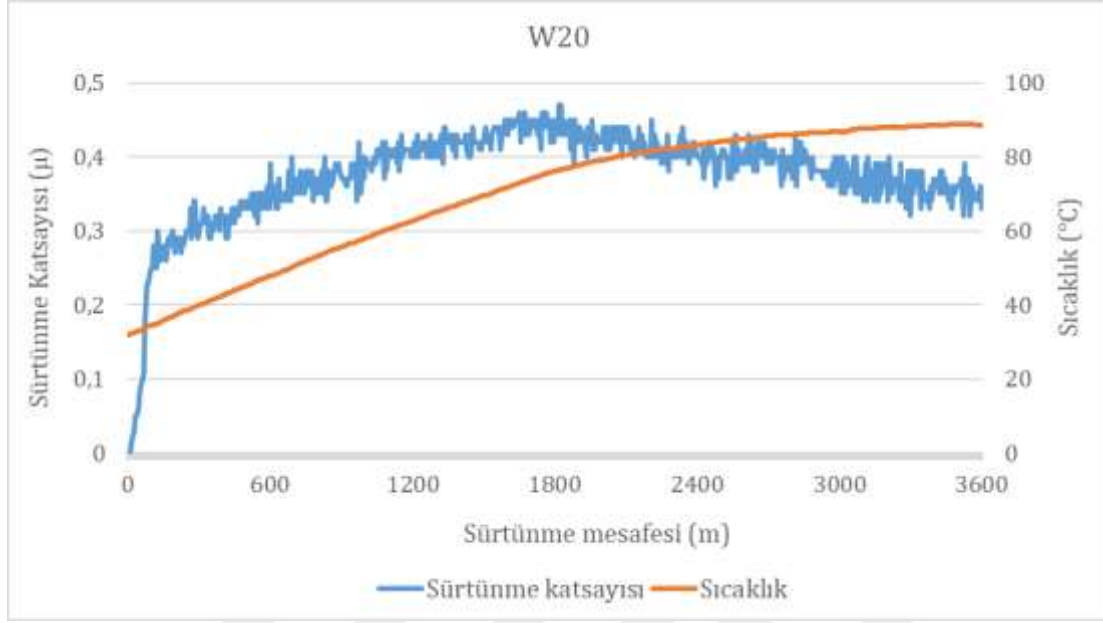
Şekil 4.18. Ağırlıkça %10 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Ağırlıkça %15 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,36, sürtünme stabilitesi %80,7 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 86,3 °C ve ortalama sıcaklık 70,3 °C olmuştur. Ağırlıkça %15 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.19'da görülmektedir.



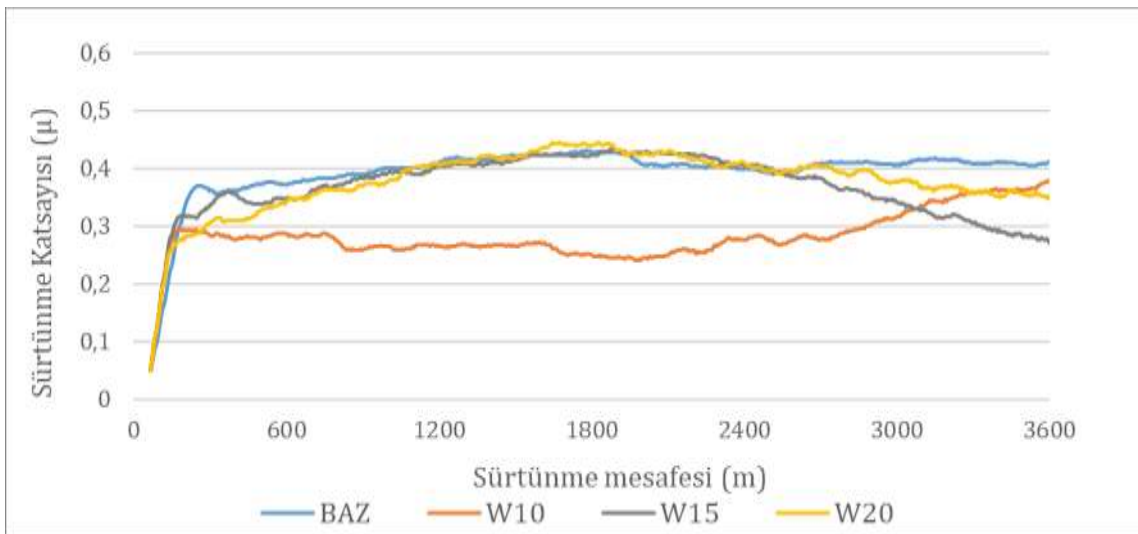
Şekil 4.19. Ağırlıkça %15 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Ağırlıkça %20 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı 0,38, sürtünme stabilitesi %81 olarak bulunmuştur. Deney süresince en yüksek sıcaklık 88,8 °C ve ortalama sıcaklık 70,6 °C olmuştur. Ağırlıkça %20 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı, sıcaklık grafiği Şekil 4.20'de görülmektedir.

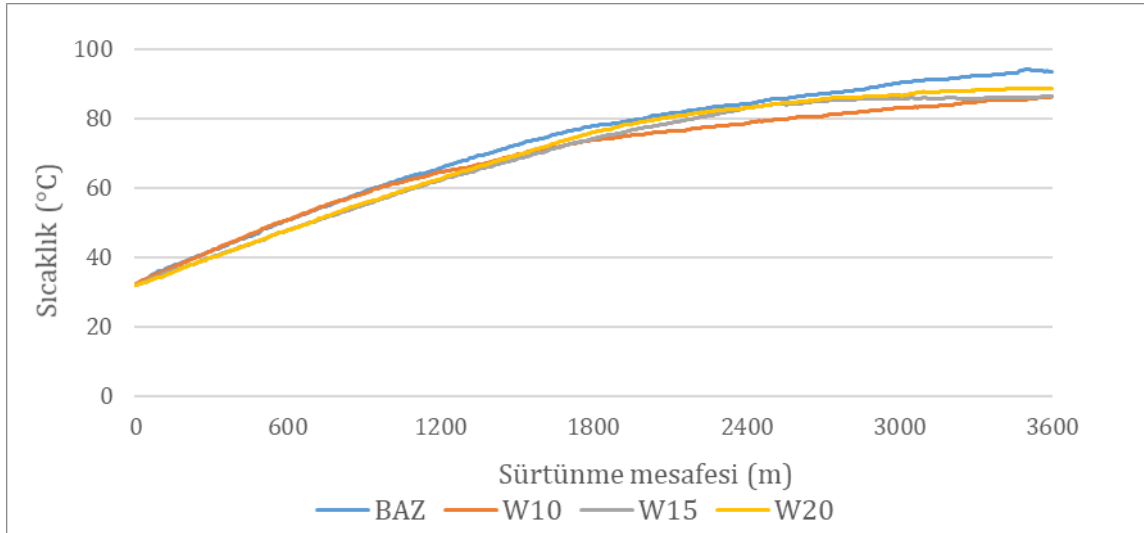


Şekil 4.20. Ağırlıkça %20 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi, sıcaklık-sürtünme mesafesi

Şekil 4.21'de WS₂ içeren 3 numune ile baz numunenin sürtünme katsayısı mesafe grafiği görülmektedir. Şekil 4.22'de aynı numunelerin sıcaklık mesafe grafiği bulunmaktadır.



Şekil 4.21. WS₂ içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sürtünme katsayısı-sürtünme mesafesi



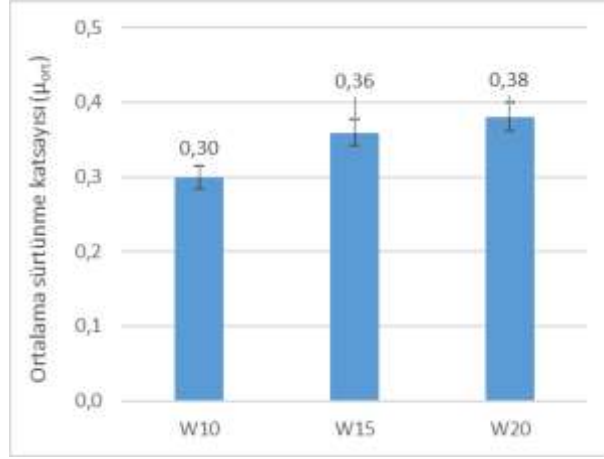
Şekil 4.22. WS₂ içeren numunelerin baz ile birlikte verildiği sıcaklık-sürtünme mesafesi

Tablo 4.3. WS₂ içeren numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri

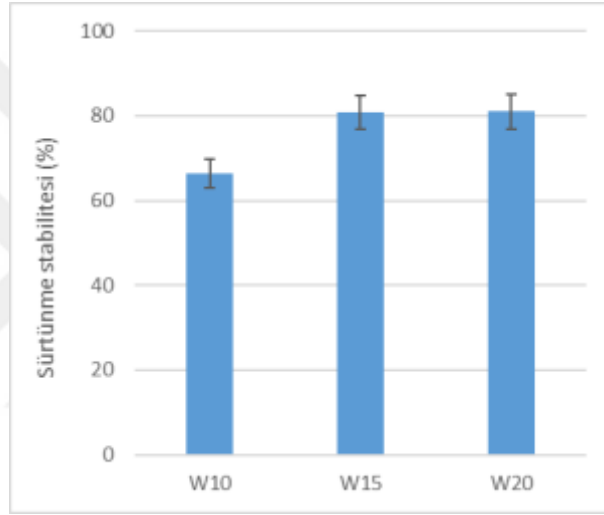
Numune Kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HRL)	Özgül aşınma oranı x10 ⁻⁶ (cm ³ /Nm)	Ortalama sürtünme katsayısı	Balata sınıfı	Sürtünme stabilitesi (%)
W10	2,182	77,2	1,67	0,30	E	66
W15	2,277	76,3	2,01	0,36	F	80
W20	2,374	89,9	1,57	0,38	F	80
BAZ	2,323	81,0	1,64	0,41	F	84

Numunelerin sürtünme katsayılarının mesafe ve sıcaklığa göre değişimi incelendiğinde ağırlıkça %15 ve %20 WS₂ içeren numunelerin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. Her iki numunede de sürtünme katsayısı, sıcaklığın 75 °C ye kadar arttığı zamanda yükselmiş bu sıcaklıktan sonraki üst sıcaklıklarda azalmaya başlamışlardır. %20 WS₂ içeren numune %15 içeren numuneye göre daha iyi sonuçlar göstermiştir. WS₂'den balata numunesi içerisinde katı yağlayıcı görevini üstlenmesi beklenmektedir. Bir başka katı yağlayıcı olan termo grafit numunelerinde olduğu gibi burada da ağırlıkça %10 WS₂ içeren numunenin sürtünme katsayısı, %15 ve %20 içerikli numunelerden farklı olarak başlangıçta sıcaklıkla birlikte bir artış göstermemiş ancak sıcaklığın 75 °C'yi geçmesiyle birlikte artmaya başlamıştır.

Şekil 4.23 WS₂ içeren numune grubunun ortalama sürtünme katsayısını ve Şekil 4.24 aynı numunelerin sürtünme stabilitesini göstermektedir. Numune içerisinde WS₂ miktarının artması ortalama sürtünme katsayısının azalmasına sebep olurken sürtünme stabilitesinde olumlu etkiler görülmesini sağlamıştır.

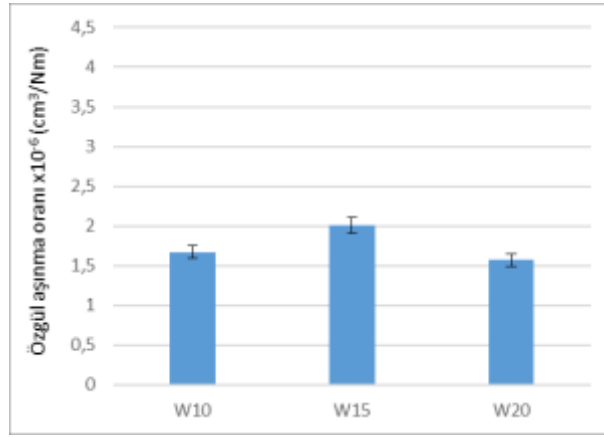


Şekil 4.23. WS_2 içeren numunelerin ortalama sürtünme katsayıları



Şekil 4.24. WS_2 içeren numunelerin sürtünme stabilitesi (%)

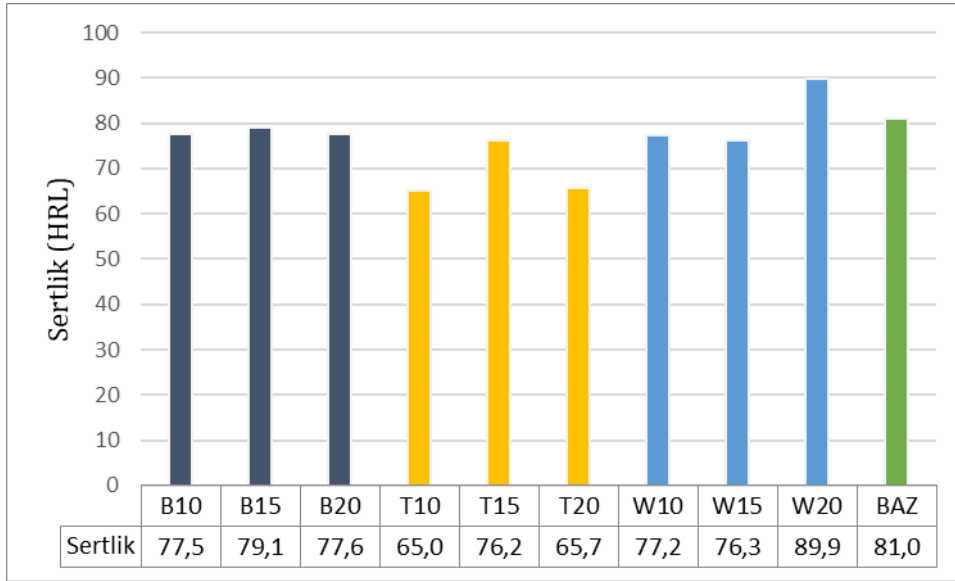
Şekil 4.25'de numunelerin aşınma oranları görülmektedir. Grafikte WS_2 miktarında artış numunelerdeki aşınma oranını olumsuz etkilediği görülmektedir. Ancak WS_2 oranındaki artış sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Sürtünme katsayısının yüksek olması aşınmayı hızlandırıcı bir etkiye sebep olabilmektedir.

Şekil 4.25. WS₂ içeren numunelerin özgül aşınma oranı

Tablo 4.4. Numunelerin fiziksel ve tribolojik özellikleri

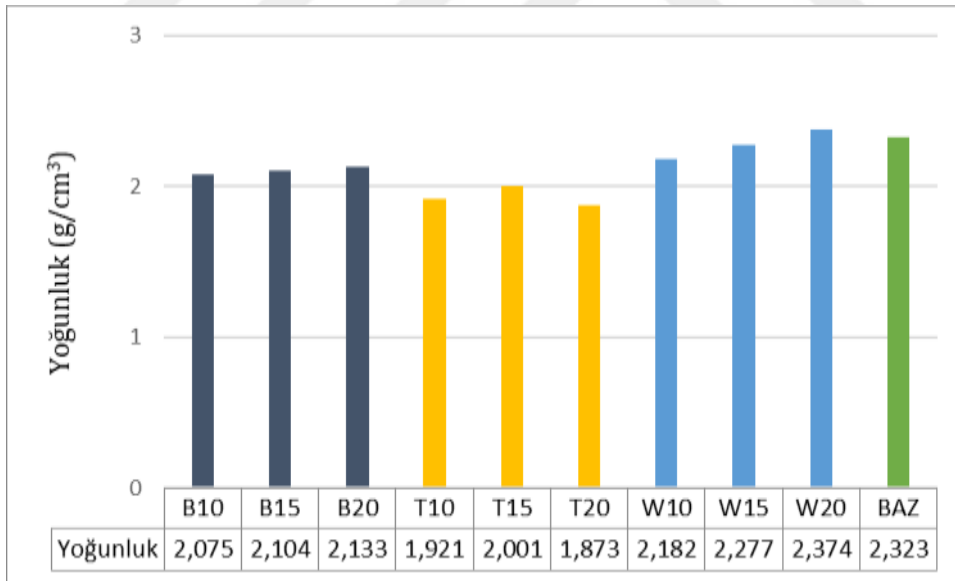
Numune Kodu	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (HRL)	Özgül aşınma oranı x10 ⁻⁶ (cm ³ /Nm)	Ortalama sürtünme katsayısı	Balata sınıfı	Sürtünme stabilitesi (%)
B10	2,075	77,5	2,03	0,38	F	78
B15	2,104	79,1	2,54	0,34	E	81
B20	2,133	77,6	4,17	0,30	E	62
T10	1,921	65,0	2,40	0,35	F	73
T15	2,001	76,2	2,67	0,33	E	73
T20	1,873	65,7	3,81	0,29	E	75
W10	2,182	77,2	1,67	0,30	E	66
W15	2,277	76,3	2,01	0,36	F	80
W20	2,374	89,9	1,57	0,38	F	80
BAZ	2,323	81,0	1,64	0,41	F	84

Şekil 4.26'da numunelerin sertlik miktarları görülmektedir. Numunelerde h-BN ilavesinin sertliği pek değiştirmedeği %15 oranında h-BN içeren numunenin, %10 oranında h-BN içeren numuneden bir miktar daha sert olduğu, oranın %20'ye çıkmasıyla sertliğin tekrar azaldığı görülmektedir. Bu durum TG içerikli numunelerde daha belirgin şekilde görülmektedir. TG ilavesi %10'dan %15'e çıktığında sertlik belirgin şekilde artmıştır. Oran %15'den %20'ye çıktığında bu durum tersine dönerek sertliği azaltıcı bir etki göstermiştir. WS₂ içeren numunelerde WS₂ ilavesinin başta sertliği pek değiştirmedeği %15 oranında WS₂ içeren numunenin, %10 oranında WS₂ içeren numuneye göre sertliğinin bir miktar azaldığı görülmektedir. Oranın %20'ye çıkmasıyla sertliğin %10 WS₂ içeren numuneden de sert bir hale geldiği görülmektedir. Tüm numuneler içerisinde baz numuneden daha sert olan tek numune %20 WS₂ içeren numune olmuştur.



Şekil 4.26. Numunelerin sertlik sonuçları

Şekil 4.27’de numunelerin yoğunlukları görülmektedir. B grubu numunelerde, numune içeriğindeki h-BN oranı yükseldikçe yoğunluk da artmıştır. W grubu numunelerde sertlik önce sabit kalmış daha sonra artış göstermiştir.

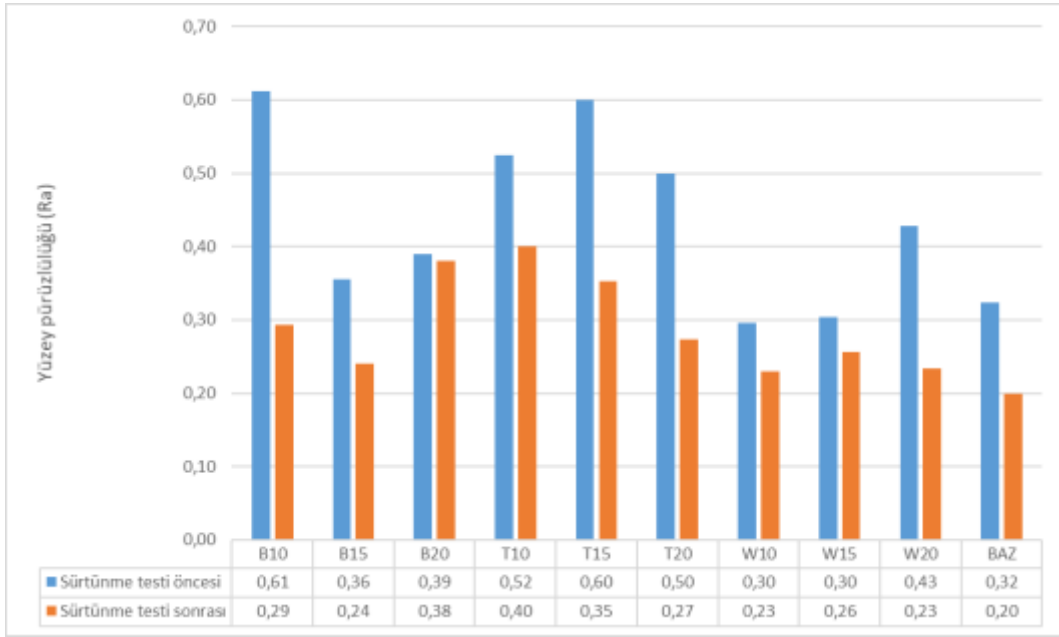


Şekil 4.27. Numunelerin yoğunluk sonuçları

4.5. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Şekil 4.28’de numunelerin deney öncesi ve deney sonrası yüzey pürüzlülükleri görülmektedir. Numunelerin yüzey pürüzlülükleri, deney öncesinde kalıptan çıktıkları halleri ile

ölçülmüşlerdir. Deney sonrası ölçülen yüzey pürüzlülükleri balata numunesi ile diskin etkileşimine bağlı gelişmiştir.



Şekil 4.28. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü sonuçları

4.6. Yüzey Karakteristiği ve Mikro Yapı İncelemeleri

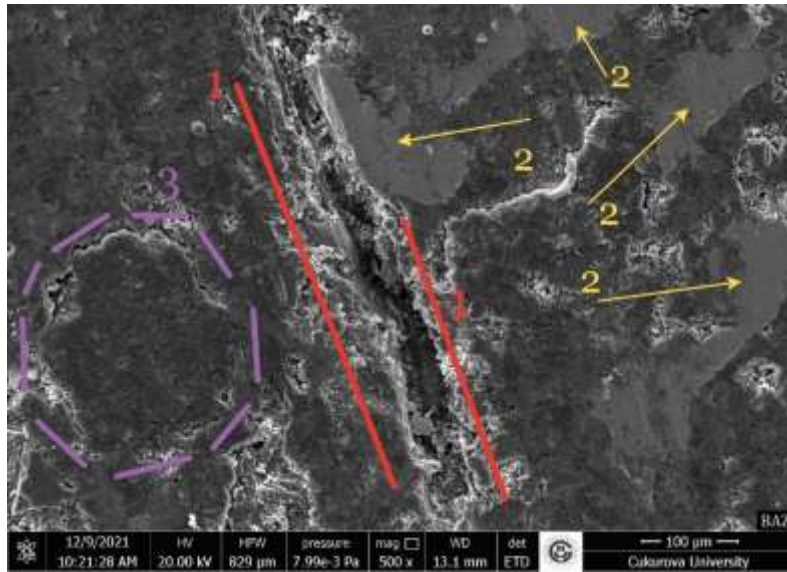
Numuneler sürtünme deneyleri öncesi ve sonrası USB mikroskop ile görüntülenmiştir. Sürtünme deneyleri sonrası tüm numunelerin sürtünen yüzeyleri SEM ile görüntülenmiştir.

Şekil 4.29'da %15 bakır içeren baz numunesinin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.30'da %15 bakır içeren baz numunesinin SEM görüntüleri bulunmaktadır.



Şekil 4.29. Ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.29 incelendiğinde sürtünme deneyi sonrası numune yüzeyinde aşınma çizgileri olduğu görülmektedir. 1 ile numaralandırılmış oklar ile gösterilen bölgelerde boşluklar olduğu görülmektedir. Oluşan boşlukların adeziv aşınma sonucu olduğu düşünülebilir. Parçaların koparak bölgeden uzaklaşması sırasında bir sürtünme tabakası oluşur. Oluşan bu ara tabaka sürtünme katsayısı düşürücü ve sürtünme katsayısının kararlılığını azaltıcı bir etki gösterebilir. 2 ile numaralandırılmış bölgelerde sürtünme sonucu abrasif aşınmaya uğramış bakır parçacıkları görülmektedir. Balata yüzeyinden ayrılmamış ancak aşınmaya uğramış bakır parçaları, disk yüzeyine yapışarak aşınma azaltıcı ve sürtünme katsayısının kararlılığını arttırıcı bir rol üstlenebilir. 3 ile numaralandırılmış bölgelerde henüz sürtünme deneyine girmemiş yüzeyde görülen bakır parçaları görülmektedir. 4 ile numaralandırılmış çizgilere paralel olan aşınma çizgileri fren diskinin balata yüzeyinde oluşturduğu aşınma çizgileridir. Disk yüzeyi başlangıçta silinmekte ve pürüzsüzleştirilmektedir. Ancak disk yüzeyi mikro düzeyde pürüzlülükler içermektedir. Bu pürüzlülüklerin sürtünme deneyi sırasında balata yüzeyiyle temasına bağlı olarak derinleştiği ve balata yüzeyinde sürtünme çizgileri oluşturduğu düşünülmektedir. Balata ile disk arasındaki sürtünme sırasında kopan parçaların disk yüzeyini çizdiği oluşan çiziklerin derinleşerek çizgiler oluşturduğu düşünülmektedir. Şekil 4.30'da 1 ile numaralandırılmış çizgilerin arasında bir boşluk görülmektedir. Boşluğun adeziv aşınmaya bağlı olarak bölgeden ayrılmış bir bakır lifine bağlı olarak olduğu düşünülmüştür. Şekil 4.30'da 2 ile numaralandırılmış bölgelerde sürtünme tabakaları görülmektedir. 3 ile numaralandırılmış alanda balata kompozisyonunu oluşturan parçacıklardan birinin çevresinde oluşan çatlaklar görülmektedir. Aşınmanın ileri safhalarında bu parçacığın koparak balata yüzeyinden ayrılacağı düşünülebilir.



Şekil 4.30. Ağırlıkça %15 bakır içeren baz numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.31'de %10 h-BN içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.32 aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır.



Şekil 4.31. Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.31'de 1 ile numaralandırılmış bölgelerde boşluklar görülmektedir. Boşlukların Çelik yünü ve alüminyumun yüzeyden ayrılmasıyla oluştuğu düşünülmektedir. %10 h-BN içeren numunede baz numunesinde olanın aksine geniş sürtünme tabakaları görülmemektedir. 2 ile numaralandırılmış çizgilere paralel aşınma çizgileri görülmektedir. Şekil 4.32'de 2 ile gösterilen kısımda çevresinde oyuklar görünen bir parça görülmektedir. Bu parçacığın balata kompozisyonu içerisinde aşındırıcı olarak bulunan silika parçacığı olabileceği düşünülmüştür. 1 ile gösterilen bölgelerde aşınma tabakaları ve bölgelerin çevresinde beyaz renkte adezif ve erozif aşınma ile aşınmış bölgeler görülmektedir.

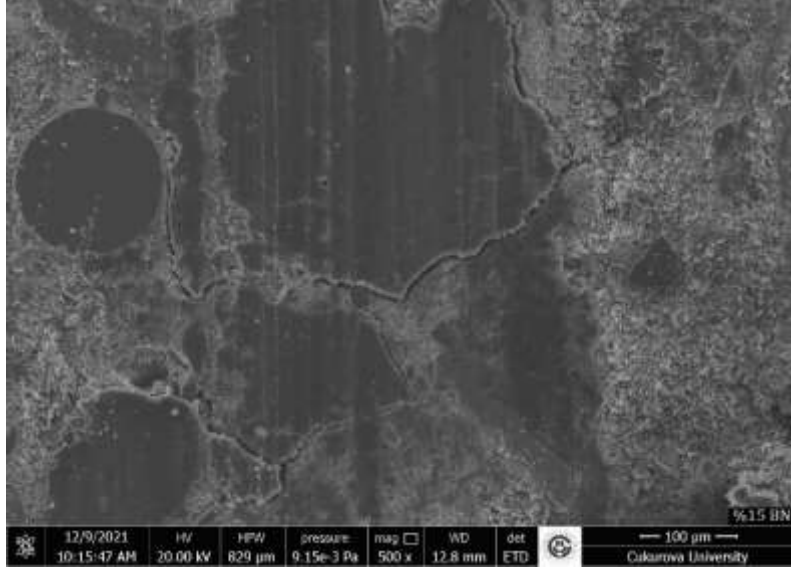


Şekil 4.32. Ağırlıkça %10 h-BN içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.32’de %15 h-BN içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.34’de aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.33’de ok ile gösterilen bölgelerde geniş boşluklar görülmektedir. Oluşan bu boşluklar kötü karışım sonucu veya iyi yapışmanın olmamasından kaynaklanmış olabilirler. Yine oluşan boşlukların balatanın kenar bölgesinde olması erozif aşınmaya bağlı olarak oluşmuş olabileceğini düşünmeye itmiştir. Yüzeyde çok sayıda küçük sürtünme tabakaları görülmektedir. Sürtünme tabakaları tüm yüzeye homojen dağılmıştır. Sürtünme çizgileri çok az bellidir. Şekil 4.34’de sürtünme tabakaları görülmektedir. Şekil 4.34’de sürtünme tabakalarının çevrelerinde çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Bu çatlaklar aşınmanın ilerleyen safhalarında sürtünme tabakasını oluşturan parçanın tamamen yerinden çıkmasına sebep olan oluşumlar olabilir. Şekil 4.33’de oklar ile gösterilmiş boşluklar bu şekilde aşınıp yüzeyden ayrılmış parçacıkların boşlukları olabilir. Şekil 4.34’de görülen yuvarlak kesitli yüzey, balata yüzeyine dik şekilde bulunan bir alüminyum lifinin düzgün aşınmış yüzeyi olabilir.

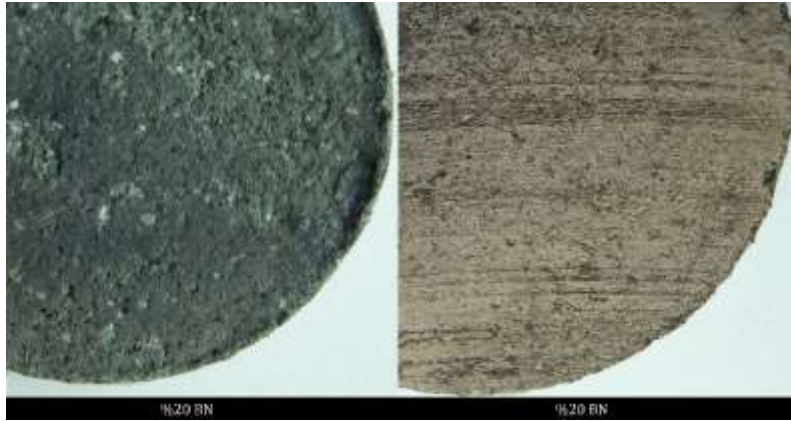


Şekil 4.33. Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

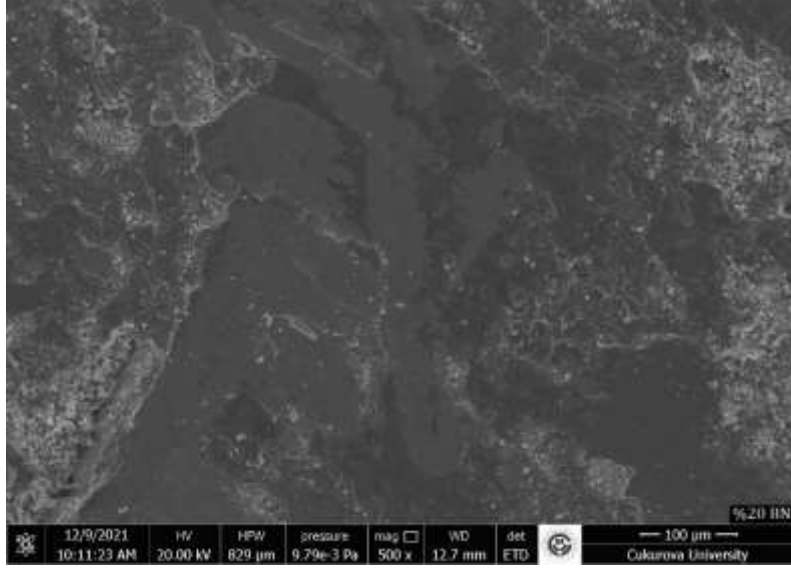


Şekil 4.34. Ağırlıkça %15 h-BN içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.35'te ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.36'da aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.35'te çok küçük aşınma tabakaları görülmektedir. Aşınma çizgileri belirgindir. Yüzeyden adeziv aşınma sonucu ayrılmış parçacıkların küçük boşlukları görülmektedir. Şekil 4.36'da geniş sürtünme tabakaları görülmektedir. Aşınma yüzeyleri küçük taneciklidir ve sürtünme tabakaları ve aşınma yüzeyleri belirsiz çizgilerle birbirlerinden ayrılmışlardır.



Şekil 4.35. Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

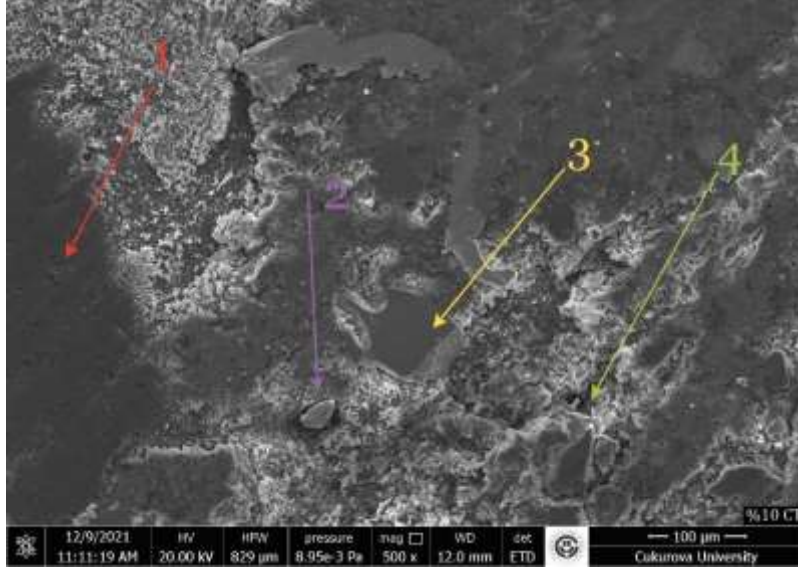


Şekil 4.36. Ağırlıkça %20 h-BN içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.37’de %20 h-BN içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.38’de aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.37’de 1 ile gösterilen bölgelerde adeziv aşınma ile kopan parçaların boşlukları görülmektedir. Boşlukların bazıları alüminyum liflerine aitken, bazılar daha belirsiz şekillidirler. 2 ile numaralandırılmış bölgede sarı renkli lifler alüminyum lifleridir. Bölgede yoğunlaşmış şekilde bulunmaktadır. Numune yüzeyinde sürtünme çizgileri belirgin değildir. Şekil 4.38 incelendiğinde 1 numaralı bölgede geniş sürtünme tabakası görülmektedir. 2 numaralı bölgede çevresi aşınmış bir parçacık görülmektedir. Deney devam etmiş olsaydı muhtemelen yüzeyden koparak ayrılacak ve yerinde 4 ile gösterilen bölgedeki boşluğa benzer bir şekil oluşacaktı. 3 ile numaralandırılmış bölgede küçük bir sürtünme tabakası görülmektedir. Görüntüde geniş sürtünme tabakaları ve bu tabakaların çevrelerinde oluşan çatlaklar görülmektedir.



Şekil 4.37. Ağırlıkça %10 TG içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

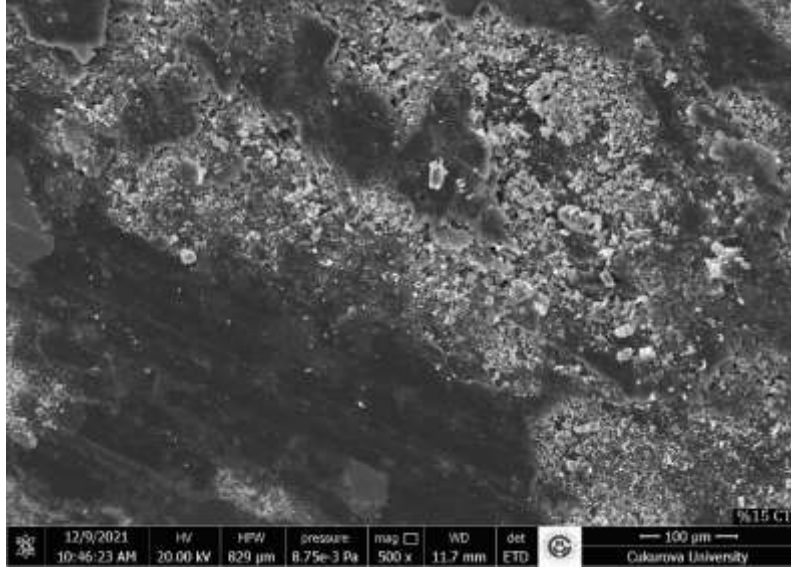


Şekil 4.38. Ağırlıkça %10 TG içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.39'da %15 Termo grafit içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.38 ve Şekil 4.40'ta aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.39'da sürtünme tabakaları ve aşınma çizgileri görülmektedir. Şekil 4.38 ve Şekil 4.40 incelendiğinde sürtünme tabakaları ve aşınan yüzeyler görülmektedir.



Şekil 4.39. Ağırlıkça %15 TG içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

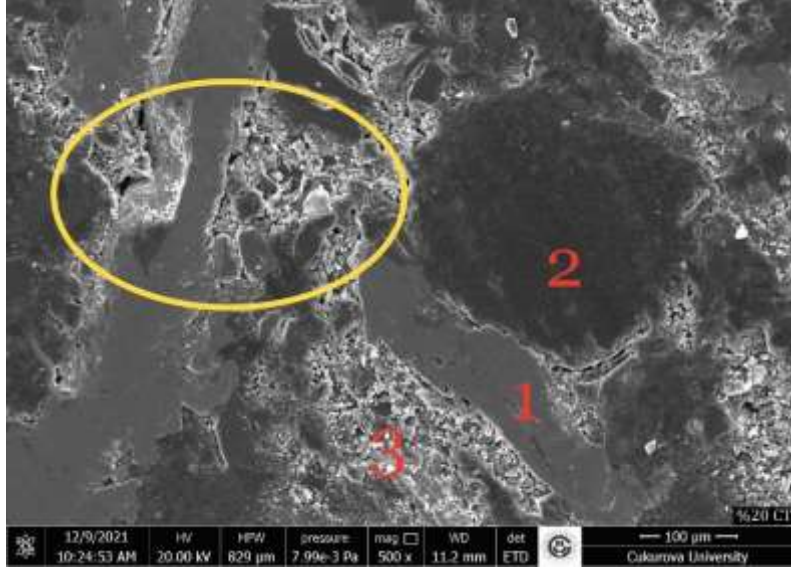


Şekil 4.40. Ağırlıkça %15 TG içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.41'de %20 Termo grafit içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.42'de aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.41'de sürtünme tabakaları ve aşınma çizgileri görülmektedir. Şekil 4.42'de 1 ve 2 ile numaralandırılmış bölgelerde iki farklı malzemeden oluşan sürtünme tabakaları görülmektedir. 3 ile numaralandırılmış bölgede aşınmaya bağlı boşluk oluştuğu görülmektedir. 1 ve 2 numaralı aşınma tabakalarının ve çember içerisine alınmış bölgede bulunan aşınma tabakasının çevresinde çatlaklar ve boşluklar oluştuğu görülmektedir. SEM görüntüsünde farklı tip sürtünme tabakaları ve çevrelerinde oluşan çatlaklar görülmektedir.

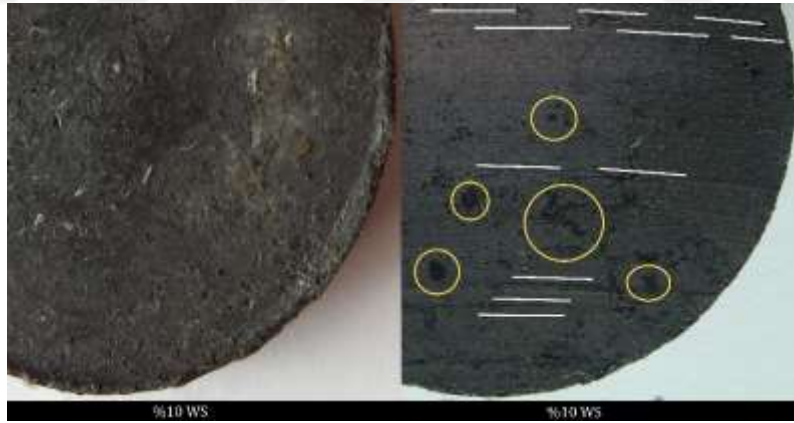


Şekil 4.41. Ağırlıkça %20 TG içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

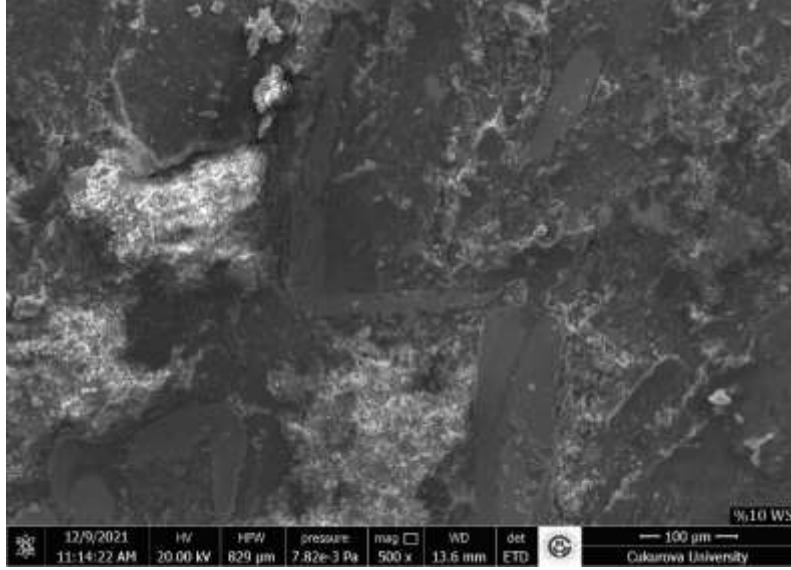


Şekil 4.42. Ağırlıkça %20 TG içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.43'te %10 WS₂ içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.44'te aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.43'te çember ile gösterilen bölgelerde siyah sürtünme tabakaları görülmektedir. Çizgi ile gösterilen yerlerde çizgilere paralel sürtünme çizgileri görülmektedir. Şekil 4.44'de aşınma tabakaları, aşınarak oyulmuş bölgeler görülmektedir.



Şekil 4.43. Ağırlıkça %10 WS₂ içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri

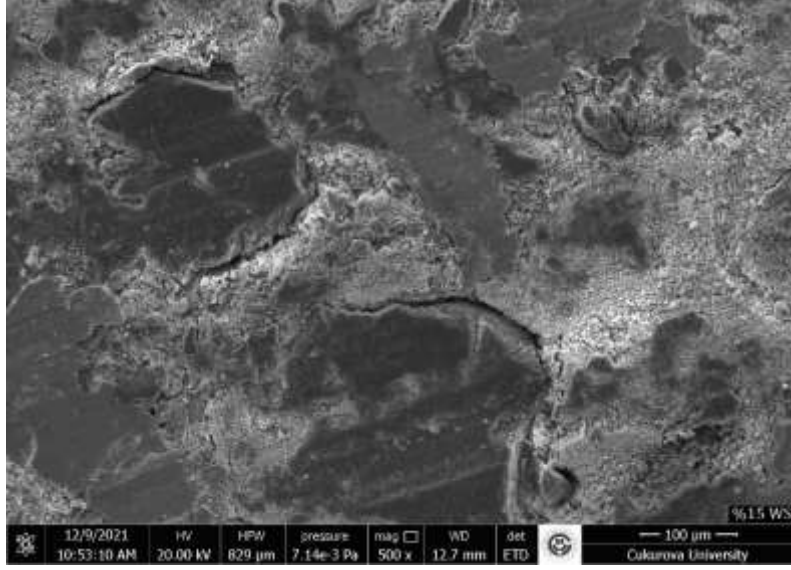


Şekil 4.44. Ağırlıkça %10 WS₂ içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.45'te %15 WS₂ içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.46'da aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.45'te aşınma çizgileri görülmektedir. Çember içerisine alınmış bölgede küçük parçalar halinde aşınma bölgeleri bulunmaktadır. Şekil 4.46'da farklı tip sürtünme tabakaları görülmektedir. Bazı sürtünme tabakalarının sınırlarında çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 4.45. Ağırlıkça %15 WS₂ içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri



Şekil 4.46. Ağırlıkça %15 WS₂ içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.47’de %20 WS₂ içeren numunenin deney öncesi ve sonrası görselleri bulunmaktadır. Şekil 4.48 aynı numunenin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 4.47’de aşınma çizgileri görülmektedir. Çember ile gösterilen alanlarda aşınma tabakaları görülmektedir. Yüzeyde mikro boşluklar bulunmaktadır. Şekil 4.48’de 1 ile gösterilen aşınma tabakasının yüzeyinde parçacıklar görülmektedir. Bu parçacıklar sürtünme sırasında yüzeyden koparak ara tabaka oluşumunu teşkil eden parçalardan olabilirler. Deney sonunda diskin durmasıyla sürtünme tabakasına kaynak olmuş ve yüzeyde sabit kalmış olabilirler. Şekil 4.48’de aşınan yüzeyler ve aşınma tabakaları görülmektedir. 1 ve 2 ile numaralandırılmış yüzeyler aynı malzemeden oluşmakta iken 1 ile numaralandırılmış aşınma yüzeyi farklı bir malzemeden oluşmuştur. 1 numaralı aşınma yüzeyini oluşturan parçacığın etrafında çatlaklar bulunmazken 1 numaralı yüzeylerin çevresinde aşınma yüzeyleri bulunmaktadır.



Şekil 4.47. Ağırlıkça %20 WS₂ içeren numunenin test öncesi ve test sonrası optik mikroskop görüntüleri



Şekil 4.48. Ağırlıkça %20 WS₂ içeren numunenin deney sonrası SEM görüntüleri

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sağlığa zararlı olan asbestin otomobil balatalarından çıkarılmasıyla fren balata kompozisyonları yeniden şekillenmiştir. Bakırın fren balatalarında kullanılmasının kısıtlanmasıyla bu değişim bir kez daha yaşanmaktadır [18, 19].

Bu çalışmada bakır içermeyen fren balatalarında bakırın yerine ikame edecek malzemelerin araştırılması amaçlanmıştır. Bakırın yüksek sıcaklıklarda sürtünme tabakası oluşumunda rol oynadığı bilinmektedir [14]. Bu çalışmada seçilen 3 malzeme katı yağlayıcı olarak bilinmektedir.

Seçilen katı yağlayıcılardan en yüksek ısı iletim katsayısına sahip h-BN'nin balata numunesi içerisindeki oranı arttıkça ortalama sürtünme katsayısında, aşınma direncinde, sürtünme stabilitesinde düşüş yaşanmıştır. h-BN ilavesinin artması sertlik üstünde belirgin bir değişikliğe sebep olmamıştır ancak yoğunluğu bir miktar arttırmıştır.

Kullanılan termo grafitin oranındaki artış ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma direncini olumsuz etkilerken, sürtünme stabilitesi az miktarda değişiklik göstermiştir. Termo grafit sertlik ve yoğunluğu, numune içerisinde ağırlıkça bulunma oranı %15 olana kadar arttırmış, oran %15'i geçtiğinde sertlik ve yoğunlukta azalma gözlenmiştir. Yine oran %10'dan %15'e geçtiğinde özgül aşınma oranı artarken, oran %20'ye geçtiğinde özgül aşınma oranı azalmıştır.

Kullanılan üçüncü madde olan WS₂'nin balata içerisindeki oranı arttıkça ortalama sürtünme katsayısı artmıştır. WS₂ oranı %10'dan %15'e geçtiğinde sürtünme stabilitesi artış gösterirken, oran %20'ye yükseldiğinde bu artış daha az olmuştur. WS₂ oranının artması aşınma direncini düşürücü bir rol oynamıştır. Numunelerde WS₂ oranının artması yoğunluğu düzgün şekilde arttırmıştır. Ancak sertlikteki artış %10'dan %15'e geçişte düşüken oran %20'e yükseldiğinde sertlik de belirgin şekilde yükselmiştir.

Numuneler baz numune ile karşılaştırıldığında h-BN içeren numuneler arasından en iyi sonucu %10 h-BN içeren numune, Termo grafit içeren numuneler arasından %10 Termo grafit içeren numune ve WS₂ içeren numuneler arasından %20 WS₂ içeren numune en iyi sonuçları vermişlerdir.

Yapılan deneyler ve testlerden edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Hazırlanan numuneler arasında belirgin olarak en iyi sonuçları veren bakır ilaveli numune olmuştur.
- h-BN oranının artması, ortalama sürtünme katsayısını ve aşınma direncini düşürücü bir etki gösterirken, yoğunluk ve sertlik üzerinde belirgin bir etki göstermemiştir.
- Termo grafit oranının artması sürtünme katsayısını ve aşınma direncini düşürücü bir etki göstermiştir. Ancak sertlik ve yoğunluk üzerinde doğrudan etkili olmamıştır.

- WS_2 , seçilen malzemeler arasında bakıra en yakın sonuçları veren numune olmuştur. WS_2 oranının artması ortalama sürtünme katsayısını, sertliği ve yoğunluğu arttırmıştır. Yine WS_2 oranının artması %10'dan %15'e geçildiğinde aşınmayı arttırırken %15'ten sonra eklenen WS_2 aşınma üzerinde belirgin bir etki yapmamıştır.
- Numunelerin SEM görüntülerinin incelenmesi sonucu, numunelerde benzer aşınma tiplerinin olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde abrazif aşınma, adezif aşınma ve erosif aşınma birlikte görüntülenmiştir.
- Yüksek miktarda TG kullanımı ortalama sürtünme stabilitesinde iyileşmeye sebep olmuştur. WS_2 oranının %15'e kadar artması ortalama sürtünme katsayısını iyileştirirken, bu orandan sonra eklenen WS_2 belirgin bir etki göstermemiştir. h-BN oranının artması ortalama sürtünme katsayısını azaltıcı bir rol oynamıştır.
- h-BN oranındaki artış ortalama sürtünme katsayısını azaltırken, özgül aşınma oranını arttırmıştır. Benzer bir durum TG içeren numuneler için de geçerlidir. %15'e kadar eklenen WS_2 özgül aşınma oranını arttırırken bu orandan sonra eklenen WS_2 özgül aşınma oranında belirgin bir değişikliğe sebep olmamıştır. WS_2 oranındaki artış sürtünme katsayısını iyileştirdiği göz önüne alındığında daha yüksek sürtünme katsayılarında, diğer numunelerden daha iyi aşınma davranışı göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1]. McCarthy, G., Martineau jr., R.J., Wilson, A., Long, B., Hanvey, B., Schmatz, K., Bainwol, M., Kraus, T., Bozzella, J., Blubaugh, T. A., (2015). Memorandum Of Understanding On Copper Mitigation In Watersheds And Waterways.
- [2]. Flemming C. A., Trevors J. T., (1989). *Copper Toxicity And Chemistry In The Environment: A Review*. University of Guelph Department of Environmental Biology, Chemistry-Microbiology Bldg.
- [3]. Forstner, U., Wittmann, G.TW. (1983). *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer-Verlag
- [4]. Hodson, R., Borgmann, U., & Shear, H. (1979). Copper in the Environment: Part II: Health Effects.
- [5]. Effler, S. W., Litten, S., Field, S. D., Tong-Ngork, T., Hale, F., Meyer, M., Quirk, M., (1989). *Whole Lake Responses To Low Level Copper Sulfate Treatment*. Water Research dergisi, 14, 1489-1499.
- [6]. Eider, J. F., Home, A. J. (1978). *Copper cycles and CuSO₄ algicidal capacity in two California lakes*. Environmental Management dergisi, 2 (1), 17-30.
- [7]. Wikfors, G. H., Ukeles, R. (1982). *Growth and Adaptation of Estuarine Unicellular Algae in Media with Excess Copper, Cadmium or Zinc, and Effects of Metal-Contaminated Algal Food on Crassostrea virginica Larvae*. Marine Ecology dergisi, 7 (2), 191-206.
- [8]. McIntyre, J. K., Baldwin, D. H., Beauchamp, D. A., Scholz, N. L. (2012). *Low-level copper exposures increase visibility and vulnerability of juvenile coho salmon to cutthroat trout predators*. Ecological Applications, 22 (5), 1460-1471.
- [9]. Gilardi, R., Alzati, L., Thiam, M., Brunel, J. F., Desplanques, Y., Dufrénoy, P., Sharma, S., Bijwe, J. (2012). *Copper Substitution and Noise Reduction in Brake Pads: Graphite Type Selection*. Materials dergisi, 5, 2258-2269.
- [10]. Uher C. (2005). *Thermal Conductivity Theory, Properties, and Applications*. Switzerland A.G.: Springer Science & Business Media.
- [11]. Österle, W., Dmitriev, A. I. (2016). *The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials*. Lubricants dergisi, 4 (1), 5.
- [12]. Filip, P., Kovarik, L., Wright, M. A. (1997). *Automotive Brake Lining Characterization*. Annual Brake Colloquium And Engineering Display (ss 21). Carbondale: Southern Illinois University
- [13]. Kumar, M., Bijwe, J. (2010). *Non-asbestos organic (NAO) friction composites: Role of copper; its shape and amount*. Wear, 270 (3-4), 269-280.
- [14]. Kim, S. J. K., Lee, J. Y., Han, J. M., Kim, Y. C., Park, H. D. (2011). *The Role of Copper on the Friction and Wear Performance of Automotive Brake Friction Materials*. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 5 (1), 9-18.
- [15]. Jon, E., Ane Maite, M., Antonio, D., Matteo, Z., Ilaria, R. (2014). *Joint Development Of Copper-Free Low Steel Brake Pads For Light Vehcles*. Eurobrake.
- [16]. Aranganathan, N., & Bijwe, J. (2015). *Special grade of graphite in NAO friction materials for possible replacement of copper*. Wear, 300-331 (C), 515-523.
- [17]. Zanon, M., Rampin, I., Martinez, A., & Etxeberria, J. (2016). *Development of Iron-Based Alloys for Copper-Free Organic Brake Pads*. World PM. Hamburg.
- [18]. Aranganathan, N., & Bijwe, J. (2016). *Development of Copper-free Eco-Friendly BrakeFriction Material using Novel Ingredients*. Wear 352-353 , 79-91.
- [19]. Antanaitis, D., Votteler, M., & Shenberger, M. (2017). *Sizing Next Generation High Performance Brake Systems with Copper Free Linings*. Brake Colloquium & Exhibition - 35th Annual.
- [20]. Giovanni, S., Rodica, C., Alessandro, C., & Stefano, G. (2015). *Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment*. Environmental Pollution, 207, 211-219.
- [21]. Barrosa, L., Polettoa, J., Neisa, P., Ferreiraa, N., & Pereira, C. (2019). *Influence of copper on automotive brake performance*. Wear 426-427, 471-749.

- [22]. Antonyraj, I., & Singaravelu, D. (2019). *Tribological characterization of various solid lubricants based copper-free brake friction materials – A comprehensive study*. *Materials Today: Proceedings*, 3 (27), 2650-2656.
- [23]. Mahalea, V., Bijwea, J., & Sinhab, S. (2019). *A step towards replacing copper in brake-pads by using stainless steel swarf*. *Wear* 424-425, 133-142.
- [24]. Mahale, V., & Bijwe, J. (2020). *Exploration of plasma treated stainless steel swarf to reduce the wear of copper-free brake-pads*. *Tribology International* (144).
- [25]. Vijay, R., Manoharan, S., Nagarajan, S., & Singaravelu, D. (2020). *Influence of premixed dual metal sulfides on the tribological performance of copper-free brake friction materials*. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2 (73), 266-274.
- [26]. Navnath, K., Bhatt, B., Darpe, A., & Bijwe, J. (2020). *Copper-free brake-pads: A break-through by selection of the right kind of stainless steel particles*. *Wear* 464-465.
- [27]. Wu, H., & Kessler, M. (2015). *Multifunctional Cyanate Ester Nanocomposites Reinforced by*. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, 5915-5926.
- [28]. Cox, R. (2011). *Engineered Tribological Composites*. Pennsylvania: sae international.
- [29]. Yanar, H., Purcek, G., Demirtaş, M., & Ayar, H. (2021). *Effect of Hexagonal Boron Nitride (h-BN) Addition on Friction Behavior of Low-Steel Composite Brake Pad Material for Railway Applications*. *Tribology International*, 165,