

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

## ÖNSÖZ

Endüstride makine elemanlarının yorulmasına ve atıl hale gelmesine neden olan sürtünme ve aşınmayı en aza indirmek için ideal yöntemlerden biri katkı yağlardır. Ancak katkı yağ ile ilgili çalışmaların büyük bir bölümünde, petrol esaslı yağlar ve ağır metal içeren katkı maddelerinin kullanımı çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Yükselen çevresel farkındalık ve petrol fiyatındaki artışlar ile dünya genelinde çevre dostu olan yağ ve katkılara yönelik çalışmalar gelişmeye devam etmektedir. Ayrıca literatürde, katkı yağlar ile ilgili araştırmaların genellikle noktasal ve çizgisel temas geometrisinde gerçekleştirildiği ve yüzeysel temas geometrisinde çalışmaların az olduğu görülmüştür.

Bu tez kapsamında, ağır metal içeren molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve alkali metal bir tuz olan kalsiyum florür ( $\text{CaF}_2$ ) katkılarının baz yağ olarak kullanılan SAE 20W50 motor yağı üzerindeki tribolojik etkileri incelenmiştir ve alkali metal tuzların ağır metaller yerine kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur. Bununla birlikte temiz katkılar sınıfında yer alan ultra düşük sülfatlı toz ve granül borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) katkılarının baz yağ olarak kullanılan biyoçözünürlüğü yüksek ve zehirlilik oranı az fındık yağı karıştırılarak çevre dostu yağlayıcı oluşturulmuş ve tribolojik etkileri araştırılarak mineral yağlar yerine kullanılabilirliği incelenmiştir. Ayrıca fındık ve bor türevlerinin Türkiye’de üretilmesi ve ihracat ürünleri olması nedeniyle, bu konudaki bir gelişmenin ülke ekonomisine katkı sağlaması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmanın yürütülmesi sırasında bilgi ve tecrübesi ile yol gösterici olan danışman hocam sayın Doç. Dr. Hasan BAŞ’a, çalışma arkadaşım sayın Onur ÖZEN’e ve desteklerinden ötürü tüm KTÜ Makine Mühendisliği çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda kullanılan fındık yağı ve bor ürünlerini temin eden Çotanak (Altaş Yağ Sanayi) firmasına ve Eti Maden İşletmelerine teşekkür ederim.

Çalışmalar boyunca desteklerini esirgemeyen değerli eşim Gamze BEŞİRBEYOĞLU’na ve değerli arkadaşım Ahmet Can YILMAZ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Üzerimde emeği çok büyük olan ve beni yetiştiren sevgili annem Aysel BEŞİRBEYOĞLU ve sevgili babam İbrahim BEŞİRBEYOĞLU’na ve bütün destekleri için sevgili kardeşim Elif Kübra KEFELİOĞLU’na teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammet Ali BEŞİRBEYOĞLU

Trabzon, 2023

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Nanoparçacık Katkılı Sıvı Yağların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Hasan BAŞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10.01.2023

Muhammet Ali BEŞİRBEYOĞLU

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XVII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Triboloji ile İlgili Temel Bilgiler .....	3
1.2.1. Sürtünme .....	4
1.2.2. Yüzey Parametresi .....	7
1.2.3. Aşınma .....	8
1.2.3.1. Adhezyon Aşınması .....	9
1.2.3.2. Abrasyon Aşınması.....	9
1.2.3.3. Yorulma (Pitting) Aşınması .....	10
1.2.3.4. Mekanik Korozyon (Kimyasal) Aşınması .....	11
1.2.4. Yağlama ve Yağlayıcılar.....	12
1.2.4.1. Katı Yağlayıcılar .....	12
1.2.4.2. Sıvı Yağlayıcılar .....	14
1.2.4.3. Yarı Katı Yağlayıcılar (Gresler) .....	16
1.2.4.4. Gaz Yağlayıcılar .....	16
1.2.5. Stribeck Eğrisi ve Yağlama Rejimleri .....	16
1.2.6. Baz Yağlara Eklenen Katkı Maddeleri .....	18
1.3. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı .....	19
1.3.1. Molibden Disülfür ( $MoS_2$ ) ve Kalsiyum Florür ( $CaF_2$ ) Katkı Maddelerinin Baz Yağlarda Kullanımı ile İlgili Çalışmalar .....	19
1.3.2. Borik Asit ( $H_3BO_3$ ) Katkı Maddesinin Baz Yağlarda Kullanımı ile İlgili Çalışmalar .....	29
1.3.3. Yağlayıcı Olarak Kullanılan Fındık Yağı ile İlgili Çalışmalar .....	36
2. MATERYAL VE YÖNTEMLER .....	38
2.1. Deneylerde Kullanılan Baz Yağlar ve Özellikleri .....	38
2.1.1. SAE 20W50 Motor Yağı ve Özellikleri.....	38

2.1.2.	Fındık Yağı ve Özellikleri.....	38
2.2.	Deneylerde Kullanılan Katkı Maddeleri ve Özellikleri .....	41
2.2.1.	Molibden Disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) Katkısı ve Özellikleri.....	41
2.2.2.	Kalsiyum Florür ( $\text{CaF}_2$ ) Katkısı ve Özellikleri .....	43
2.2.3.	Toz Borik Asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) Katkısı ve Özellikleri .....	45
2.2.4.	Granül Borik Asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) Katkısı ve Özellikleri.....	47
2.3.	Yağ Karışımlarının Hazırlanması .....	49
2.4.	TE53 Multi-Purpose Sürtünme ve Aşınma Test Cihazı ve Detayları.....	50
2.4.1.	Disk ve Numune Özellikleri .....	53
2.5.	Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçülmesi.....	54
2.6.	Yağlama Rejimlerinin Teorik Olarak Belirlenmesi .....	56
2.7.	Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi.....	58
2.8.	Aşınma Miktarının Belirlenmesi.....	58
2.9.	Yağ Sıcaklığının Ölçülmesi ve Şartlandırılması.....	59
2.10.	Mikroyapısal Özelliklerin İncelenmesi.....	60
3.	BULGULAR VE İRDELEME .....	62
3.1.	Baz Yağ Olarak Kullanılan Motor Yağı ile İlgili Çalışmalar .....	62
3.1.1.	Motor Yağının Sürtünme Davranışı.....	63
3.1.1.1.	Molibden Disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) Katkısının Motor Yağı Üzerindeki Sürtünme Etkileri.....	66
3.1.1.2.	Kalsiyum Florür ( $\text{CaF}_2$ ) Katkısının Motor Yağı Üzerindeki Sürtünme Etkileri.....	72
3.1.2.	Optimum Koşullarda Sürtünme, Aşınma ve Yağ Sıcaklığı Davranışları .....	78
3.1.3.	Optimum Koşullarda Yüzey Pürüzlülüğü ve Mikroyapısal Özelliklerin İncelenmesi .....	92
3.2.	Baz Yağ Olarak Kullanılan Ham Fındık Yağı ile İlgili Çalışmalar .....	96
3.2.1.	Ham Fındık Yağının Sürtünme ve Aşınma Davranışları .....	97
3.2.1.1.	Granül Borik Asit Katkısının Fındık Yağı Üzerindeki Sürtünme ve Aşınma Etkileri.....	99
3.2.1.2.	Toz Borik Asit Katkısının Fındık Yağı Üzerindeki Sürtünme ve Aşınma Etkileri.....	108
3.2.2.	Borik Asidin Baz Yağa Etkilerinin İrdelenmesi ve Uygun Çalışma Koşullarının Belirlenmesi .....	117
3.2.3.	Uygun Çalışma Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğü ve Mikroyapısal Özelliklerin İncelenmesi .....	121
3.2.4.	Fındık Yağı ile SAE 20W50 Motor Yağı ile Kıyaslanması .....	129
4.	SONUÇLAR .....	131

4.1.	SAE 20W50 Motor Yağı ile Kullanılan Molibden Disulfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve Kalsiyum Florür ( $\text{CaF}_2$ ) Katkıları ile İlgili Çalışmalar .....	132
4.2.	Ham Fındık Yağı ile Kullanılan Granül ve Toz Borik Asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) Katkıları ile İlgili Çalışmalar .....	133
5.	ÖNERİLER.....	135
6.	KAYNAKLAR .....	136
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

NANOPARÇACIK KATKILI SIVI YAĞLARIN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ

Muhammet Ali BEŞİRBEYOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Hasan BAŞ  
2023, 158 Sayfa

Bu tez çalışmasında SAE 20W50 motor yağı içerisinde  $MoS_2$  ve  $CaF_2$  katkılarının ve ham fındık yağı içerisinde farklı morfolojilerde sahip borik asit katkılarının tribolojik etkileri araştırılmıştır. Deneyler yüzeysel temas geometrisinde tasarlanmış block-on-ring deney düzeneği kullanılarak farklı çalışma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Testler sonunda aşınmış numune yüzeylerinin mikroyapısal incelemeleri yapılmıştır.

Motor yağı üzerinde  $MoS_2$  ve  $CaF_2$  katkılarının sürtünme ve aşınmayı azaltıcı etki göstermiştir ve sınır sürtünme bölgesinde motor yağının çalışmasını iyileştirmiştir. Ağır metal içeren katkı maddeleri yerine alkali metal tuzların yağ katkısı olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Granül ve toz borik asit katkıları, ham fındık yağının sürtünme ve aşınma davranışları üzerinde düşürücü etkiler göstermiştir. ve sınır yağlama bölgesinde baz yağın çalışmasını iyileştirmiştir. Bunun yanında borik asit morfolojisinin yağlayıcılık özelliklerini etkilediği görülmüştür. Çevre dostu ve yenilenebilir borik asit katkılı fındık yağının mineral esaslı yağlayıcılara alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme, Aşınma, Motor yağı, Fındık yağı, Yağ katkısı,  
Molibden disülfür, Kalsiyum florür, Borik asit

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LIQUID OILS WITH  
NANOPARTICLES

Muhammet Ali BEŞİRBEYOĞLU

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Hasan BAŞ  
2023, 158 Pages

In this thesis, the tribological effects of MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> additives in SAE 20W50 engine oil and boric acid additives with different morphologies in raw hazelnut oil were investigated. Experiments were carried out under different operating conditions using a block-on-ring experimental setup configured in surface contact geometry. At the end of the tests, microstructural analysis of the worn sample surfaces were examined.

MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> additives showed friction and wear-reducing effects on engine oil and improved the operation of engine oil in the boundary friction region. It was concluded that alkali metal salts can be used as oil additives instead of heavy metal-containing additives.

Granular and powdered boric acid additives showed reducing effects on the friction and wear behavior of raw hazelnut oil, and improved the operation of the base oil in the boundary lubrication zone. In addition, the effects boric acid morphology on lubricating properties were investigated. It was concluded that environmentally friendly and renewable boric acid added hazelnut oil can be used as an alternative lubricant to mineral based lubricants.

**Key Words:** Friction, Wear, Engine oil, Hazelnut oil, Oil additive,  
Molybdenum disulfide, Calcium fluoride, Boric acid

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	(a) Kayma sürtünmesi ve (b) yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma sürtünmesi.....	5
Şekil 1.2.	Sürtünme türleri: (a) Kuru sürtünme, (b) sıvı sürtünme ve (c) yarı sıvı (sınır) sürtünme .....	5
Şekil 1.3.	Kuru sürtünme hali .....	6
Şekil 1.4.	Yarı sıvı (sınır) sürtünme hali .....	7
Şekil 1.5.	(a) Uyumlu (konformal) ve (b) uyumsuz (nonkonformal) yüzeyler .....	8
Şekil 1.6.	Adhezyon aşınması model gösterimi .....	9
Şekil 1.7.	İki boyutlu abrazyon aşınması model gösterimi .....	10
Şekil 1.8.	Yorulma aşınması modeli: (a) makine elemanı yüzeyinin tekrarlı yüke maruz kalması, (b) yüzeyin hemen altında kusurların (küçük boşluklar ve çatlaklar) oluşması, (c) kusurların birleşerek büyümesi ve yüzeye doğru hareketive (d) aşınma parçacığının yüzeyden ayrılması ve yüzeyde çukurcukların oluşması .....	11
Şekil 1.9.	Grafitin (C) moleküler düzeni .....	14
Şekil 1.10.	Stribeck eğrisi ve yağlama rejimleri .....	17
Şekil 2.1.	Molibden disülfüre ( $\text{MoS}_2$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi.....	41
Şekil 2.2.	Molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) moleküler düzeni .....	42
Şekil 2.3.	Kalsiyum florüre ( $\text{CaF}_2$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi.....	43
Şekil 2.4.	Kalsiyum florürün ( $\text{CaF}_2$ ) moleküler düzeni .....	44
Şekil 2.5.	Toz borik aside ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi .....	46
Şekil 2.6.	Borik asidin ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) moleküler düzeni .....	47
Şekil 2.7.	Granül borik aside ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi.....	48
Şekil 2.8.	Motor yağı çalışmasındaki deneyler öncesinde yağ karışımlarının görünümü: (a) SAE 20W50, (b) ağırlıkça %0,25 $\text{MoS}_2$ katkılı yağ ve (c) ağırlıkça %0,25 $\text{CaF}_2$ katkılı yağ.....	49
Şekil 2.9.	Fındık yağı çalışmasındaki deneyler öncesinde yağ karışımlarının görünümü: (a) ham fındık yağı, (b) ağırlıkça %1 tBA katkılı yağ ve (c) ağırlıkça %1gBA katkılı yağ .....	50
Şekil 2.10.	(a) TE53 Multi-Purpose test cihazı ve (b) kontrol ünitesi .....	51
Şekil 2.11.	Disk, numune ve sensör grubunun yakın görüntüsü.....	51
Şekil 2.12.	Deney sisteminde kullanılabilen farklı yüzey geometrileri: (a) disk-disk, (b) pin-disk, (c) silindir-disk ve (d) bilya-disk .....	52
Şekil 2.13.	Sürtünme kuvvetinin ölçümü.....	52

Şekil 2.14. (a) Disk ve (b) numune fiziksel özellikleri .....	54
Şekil 2.15. Profilometrenin görünümü.....	54
Şekil 2.16. Baz motor yağı ile ilgili deneylerin başlangıcındaki (a) disk ve (b) numune yüzey pürüzlülükleri .....	55
Şekil 2.17. Baz fındık yağı ile ilgili deneylerin başlangıcındaki (a) disk ve (b) numune yüzey pürüzlülükleri .....	56
Şekil 2.18. Elektronik hassas terazinin görünümü.....	59
Şekil 2.19. Deneylerin başlangıcında numune yüzeyinin SEM görüntüsü.....	60
Şekil 2.20. Deneylerde kullanılan AISI 4140 numune yüzeyine ait başlangıç kompozisyonu.....	61
Şekil 3.1. 300 d/dk ve farklı yüklerde katkısız motor yağının sürtünme katsayısı.....	64
Şekil 3.2. 600 d/dk ve farklı yüklerde katkısız motor yağının sürtünme katsayısı.....	64
Şekil 3.3. 900 d/dk ve farklı yüklerde katkısız motor yağının sürtünme katsayısı.....	65
Şekil 3.4. 300 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	66
Şekil 3.5. 300 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	67
Şekil 3.6. 300 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	67
Şekil 3.7. 600 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	68
Şekil 3.8. 600 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	69
Şekil 3.9. 600 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	69
Şekil 3.10. 900 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	70
Şekil 3.11. 900 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	71
Şekil 3.12. 900 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	71
Şekil 3.13. 300 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	72
Şekil 3.14. 300 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	73
Şekil 3.15. 300 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	73
Şekil 3.16. 600 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	74

Şekil 3.17. 600 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	75
Şekil 3.18. 600 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	75
Şekil 3.19. 900 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	76
Şekil 3.20. 900 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi .....	77
Şekil 3.21. 900 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi4 .....	77
Şekil 3.22. Farklı yük, hız ve katkı oranlarında MoS <sub>2</sub> katkılı yağların sürtünme katsayısı ortalama değerleri .....	79
Şekil 3.23. Farklı yük, hız ve katkı oranlarında CaF <sub>2</sub> katkılı yağların sürtünme katsayısı ortalama değerleri .....	80
Şekil 3.24. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının baz yağın sürtünme katsayısına etkisi .....	81
Şekil 3.25. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının yağ sıcaklığına etkisi .....	82
Şekil 3.26. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkı oranının baz yağın aşınma davranışına etkisi .....	83
Şekil 3.28. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının baz yağın sıcaklığına etkisi .....	86
Şekil 3.29. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkı oranının baz yağın aşınma davranışına etkisi .....	87
Şekil 3.30. Optimum şartlarda, sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklıklarının değişimi .....	90
Şekil 3.31. Optimum şartlarda, yağ sıcaklığının şartlandırılması (50-55°C) ile sürtünme katsayısının değişimi.....	91
Şekil 3.32. Optimum şartlarda (600 d/dk, 353 N), katkısız motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü.....	93
Şekil 3.33. Optimum şartlarda (600 d/dk, 353 N), katkısız motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi.....	93
Şekil 3.34. Optimum şartlarda (600 d/dk, 353 N), ağırlıkça %0,25 MoS <sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü.....	94
Şekil 3.35. Optimum şartlarda (600 d/dk, 353 N), ağırlıkça %0,25 MoS <sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi .....	94
Şekil 3.36. Optimum şartlarda (600 d/dk, 353 N), ağırlıkça %0,25 CaF <sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü .....	95
Şekil 3.37. Optimum şartlarda (600 d/dk, 353 N), ağırlıkça %0,25 CaF <sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi .....	96
Şekil 3.38. 300 d/dk ve farklı yüklerde ham fındık yağının sürtünme katsayısının değişimi.....	97

Şekil 3.39. 300 d/dk ve farklı yüklerde ham findık yağı sıcaklığının değişimi.....	98
Şekil 3.40. 300 d/dk ve farklı yüklerde ham findık yağının özgül aşınma oranının değişimi.....	98
Şekil 3.41. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	100
Şekil 3.42. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	100
Şekil 3.43. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	101
Şekil 3.44. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	102
Şekil 3.45. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	103
Şekil 3.46. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	103
Şekil 3.47. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	104
Şekil 3.48. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	104
Şekil 3.49. 300 d/dk ve farklı yüklerde, baz yağa çeşitli oranlarda granül borik asit katkısının özgül aşınma oranına etkisi.....	105
Şekil 3.50. 300 d/dk ve farklı yüklerde, granül borik asit katkılı baz yağın ortalama sürtünme katsayısının değişimi.....	107
Şekil 3.51. 300 d/dk ve farklı yüklerde, granül borik asit katkılı baz yağın sıcaklık ortalamalarının değişimi .....	108
Şekil 3.52. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	109
Şekil 3.53. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	109
Şekil 3.54. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	110
Şekil 3.55. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	111
Şekil 3.56. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	112
Şekil 3.57. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	112
Şekil 3.58. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi.....	113
Şekil 3.59. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi .....	113

Şekil 3.60. 300 d/dk ve farklı yüklerde, baz yağa çeşitli oranlarda toz borik asit katkısının özgül aşınma oranına etkisi.....	114
Şekil 3.61. 300 d/dk ve farklı yüklerde, toz borik asit katkılı baz yağın ortalama sürtünme katsayısının değişimi.....	116
Şekil 3.62. 300 d/dk ve farklı yüklerde, toz borik asit katkılı baz yağın sıcaklık ortalamalarının değişimi .....	117
Şekil 3.63. 100 N temas yükünde katkısız fındık yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü .....	121
Şekil 3.64. 150 N temas yükünde katkısız fındık yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü .....	122
Şekil 3.65. Katkısız baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin pürüzlülüğü: (a) 100 N ve (b) 150 N.....	122
Şekil 3.66. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü .....	124
Şekil 3.67. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi.....	124
Şekil 3.68. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü .....	124
Şekil 3.69. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi .....	125
Şekil 3.70. 100 N temas yükünde gBA katkılı yağ ile çalışan numune yüzeyinin pürüzlülüğü: (a) ağırlıkça %1 ve (b) ağırlıkça %1,5 katkı oranı .....	125
Şekil 3.71. 150 N temas yükünde ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin farklı bölgelerindeki SEM görüntüleri.....	126
Şekil 3.72. 150 N temas yükünde ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi .....	127
Şekil 3.73. 150 N temas yükünde ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin pürüzlülüğü .....	127
Şekil 3.74. Granül borik asit katkılı yağın film parametresi değerleri.....	128
Şekil 3.75. Toz borik asit katkılı yağın film parametresi değerleri .....	129
Şekil 3.76. Fındık yağı ile 20W50 motor yağının sürtünme katsayısı değerlerinin kıyaslanması .....	130
Şekil 3.77. Fındık yağı ile 20W50 motor yağının yağ sıcaklık değerlerinin kıyaslanması .....	130
Şekil 3.78. Fındık yağı ile 20W50 motor yağının aşınma değerlerinin kıyaslanması ....	131

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1. MoS <sub>2</sub> katkısının baz yağlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar.....	25
Tablo 1.2. CaF <sub>2</sub> katkısının baz yağlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar.....	29
Tablo 1.3. H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> katkısının baz yağlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar.....	35
Tablo 1.4. Yağlayıcı olarak fındık yağı kullanımı ile ilgili çalışmalar.....	36
Tablo 2.1. Super Diesel SAE 20W50 motor yağına ait teknik özellikler.....	38
Tablo 2.2. Ham fındık yağına ait yapısal özellikler.....	40
Tablo 2.3. Toz (ultra düşük sülfatlı) ortoborik asidin teknik özellikleri.....	45
Tablo 2.4. Granül (ultra düşük sülfatlı) ortoborik asidin (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ) teknik özellikleri.....	48
Tablo 2.5. Disk ve numuneye ait kimyasal özellikler.....	53
Tablo 3.1. Motor yağı çalışmalarına ait deney şartları.....	63
Tablo 3.2. Farklı devir ve katkı oranlarında MoS <sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ).....	78
Tablo 3.3. Farklı devir ve katkı oranlarında CaF <sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ).....	79
Tablo 3.4. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ).....	81
Tablo 3.5. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri.....	82
Tablo 3.6. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS <sub>2</sub> katkılı yağa ait özgül aşınma oranı değerleri.....	83
Tablo 3.7. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ).....	84
Tablo 3.8. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri.....	85
Tablo 3.9. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF <sub>2</sub> katkılı yağa ait özgül aşınma oranı değerleri.....	87
Tablo 3.2. Optimum koşullardaki film parametreleri.....	92
Tablo 3.3. Fındık yağı çalışmalarına ait deney şartları.....	97
Tablo 3.4. Granül borik asit katkılı yağa ait özgül aşınma oranı değerleri.....	105
Tablo 3.5. Granül borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ).....	106
Tablo 3.6. Granül borik asit katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri.....	107
Tablo 3.7. Toz borik asit katkılı yağa ait özgül aşınma oranı değerleri.....	114
Tablo 3.8. Toz borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ).....	115
Tablo 3.9. Toz borik asit katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri.....	116

Tablo 3.10. Yağ film parametreleri ( $\lambda$ ) ..... 128



## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

FY	: Fındık Yağı
gBA	: Granül Borik Asit
tBA	: Toz Borik Asit
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Birliği
ATC	: Avrupa Petrol Katkı Maddesi Üreticileri Teknik Komitesi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-ışını Kırınım
EDS	: Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi
XPS	: X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi
SWR	: Özgül aşınma oranı (Specific Wear Rate)
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
$\lambda$	: Yağ film parametresi
Hmin	: Boyutsuz yağ filmi kalınlık parametresi
hmin	: Minimum yağ filmi kalınlığı [m]
$R_{a1}$ , $R_{a2}$	: Numune ve diskin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri
$R'$	: Eş değer eğrilik yarıçapı [m]
$R_x$ , $R_y$	: Numune ve disk temas yüzeylerinin yarıçapları [m]
U	: Boyutsuz hız parametresi
u	: Ortalama kayma hızı [m/s]
$u_1$ , $u_2$	: Numune ve diskin dönme hızlarını [m/s]
$\eta_0$	: Yağ viskozitesi [Pa.s]
$E'$	: Eş değer Young modülü [Pa]
$E_1$ , $E_2$	: Numune ve diskin Young modülleri [Pa]
$\nu_1$ , $\nu_2$	: Numune ve diske ait Poisson oranları
G	: Boyutsuz malzeme parametresi
$\alpha$	: Akışkanın basınç – viskozite katsayısı [ $m^2/N$ ]
k	: Eliptiklik parametresi
W	: Boyutsuz yük parametresi
F, $F_N$	: Temas yükü [N]
$F_S$	: Sürtünme Kuvveti [N]

$\mu$	: Sürtünme katsayısı
$V_w$	: Ortalama aşınma hacmini [ $\text{mm}^3$ ]
L	: Toplam kayma mesafesi [mm]
$\text{MoS}_2$	: Molibden disülfür
$\text{CaF}_2$	: Kalsiyum florür
$\text{H}_3\text{BO}_3$	: Borik asit
$\text{B}_2\text{O}_3$	: Bor oksit
$\text{TiO}_2$	: Titanyum dioksit
$\text{BaF}_2$	: Baryum florür
hBN	: Hegzagonal bor nitrür
ZDDP	: Çinko dialkilditiofosfat
C	: Grafit
PTFE	: Politetrafloroetilen
$\text{WS}_2$	: Tungsten disülfür
PA	: Poliamid
POM	: Poliasetal
IF	: İnorganik fulleren
PAO	: Polialfaolefin
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
$2\theta$	: Saçılma açısı
HRC	: Rockwell C sertlik değeri

### **Alt İndisler**

ort : Ortalama değer

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Teknolojik gelişmeler ve endüstrileşen dünyada, makine elemanlarında oluşan mekanik kayıplar ve etkileri, bu alandaki bilimsel çalışmaların temel konusu olmuştur. Bu yöndeki bilimsel çalışmaların amacı, sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan mekanik kayıpların en aza indirilmesi ve ortadan kaldırılmasına yöneliktir [1]. Sürtünmenin neden olduğu aşınma, malzemenin tahrip olmasının ve mekanik performans kaybının başlıca nedeni olarak öne çıkmaktadır. Sürtünme ve aşınma nedeniyle eş çalışan makine parçalarının yüzeylerinde meydana gelen kusurlar (çizik, boşluk vb.) parçaların yorulmasına ve çalışma ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Kırılan veya kullanılamaz hâle gelen makine elemanları yerine yeni parçaların imalatı ve hammadde gibi unsurlar enerji sarfiyatını arttırmaktadır ve ekonomik olarak üretim endüstrisini olumsuz yönde etkilemektedir. Başta ulaşım ve sanayi olmak üzere, dünyadaki toplam enerji üretiminin yaklaşık %20'sinin sürtünmenin üstesinden gelmek için kullanıldığı düşünülmektedir [2]. Bir başka ifade ile çeşitli biçimlerdeki sürtünmenin üstesinden gelebilmek için dünyanın enerji kaynaklarının yaklaşık üçte birinin kullanıldığı tahmin edilmektedir. Mevcut durum düşünüldüğünde, makine elemanlarının kullanımda iyileştirilmiş sürtünme kontrolü ve buna bağlı olarak aşınmadaki herhangi bir azalma önemli ölçüde tasarruf sağlayabilmektedir. Bu amaçla mekanik sistemlerde özellikle göreceli hareket etkileşiminde bulunan yüzeylerde (kayma, yuvarlanma, yüzey ayrılması veya normal yaklaşıma) yağlama, aşınmayı kontrol etmenin ve sürtünmeyi azaltmanın etkili bir yöntemidir [3]. Son zamanlarda tribolojik araştırmaların artması, yüksek hız, sıcaklık ve yüklerde çalışmaya maruz kalan makine bileşenlerinin (dişliler, kamlar vb.) yağlanması konusundaki gelişmelere büyük katkı sağlamıştır [4]. Uygun yağ seçimi ve iyi bir yağlama makinelerin verimini ve ömrünü olumlu yönde etkilemektedir ve enerji sarfiyatını azaltmaktadır. Ayrıca, yağların üretimi maliyetli olduğu için, tekrar kullanılabilmesi ve değişiminin az olması da enerji tasarrufuna pozitif katkı sağlamaktadır. Ancak makinelerin veya çeşitli sistemlerin çalışma koşulları nedeniyle yağ seçimi zorlaşmakta ve çoğu durumda yağ tek başına yeterli olamamaktadır. Bu gibi durumlarda yağa çalışma şartlarına uygun özelliklerin kazandırılması ve istenmeyen özelliklerin azaltılması amacıyla katkı maddesi eklenmesi endüstride sıkça başvurulan bir

yöntemdir [5]. Katkı maddelerinin aşınma önleyici, sürtünme azaltıcı, pas ve korozyon önleyici, köpük önleyici, aşırı basınç katkıları, viskozite geliştirici, deterjan ve dispersan, antioksidan ve akma noktası düşürücü olarak literatürde ve endüstride sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [6]. Ancak kullanılan katkı maddelerinin büyük bir bölümünün ağır metaller içermesi [7] ve çevreye zararlı etkileri, çevre ve canlı sağlığı açısından tartışmalara neden olmaktadır [8]. Yağlayıcılarda kullanılan katkı maddeleri, örneğin çinko dialkilditiyofosfatlar, molibden disülfür ve diğer organometalik bileşikler çevrede birikmeleri halinde toksik etkilerini arttırabilir. Katkılı yağlayıcılar motor, dişli kutusu, hidrolik sistem, türbin ve hava kompresörleri gibi yapılardan boşaltıldığında yağ, aşınma kalıntılarıyla kirlenmiş, bozulmuş ve asitlere dönüşmüş ve katkı maddeleri farklı kimyasal türlere evrilmiş olabilir. Kullanılmış yağın kazara veya başka bir şekilde çevreye herhangi bir şekilde salınması, toprak ve yer altı sularını kirleterek içme suyu teminini zorlaştırmakta ve suda yaşayan organizmaları tehlikeye atmaktadır [9]. Bu nedenle yağlayıcı ve katkılarının çevrede olumsuz etkilere neden olma potansiyelleri açısından değerlendirilmesi gerekir. Bu hususta, Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency, EPA), Temiz Su Yasası (Clean Water Act) kapsamında kirletici olmayan katkı maddelerini belirlemiştir [10, 11].

Marketlerde satılan yağlayıcıların çoğu, çevre için toksik olan ve kullanımdan sonra geri dönüşümü ve yok edilmesi zor olan petrol bazlı içeriklere sahiptir. Biyoçözünürlüğü düşük ve zehirlilik oranı yüksek petrol bazlı yağlayıcılar ve ağır metal içeren katkı maddelerinin çevreye dönüşü, dünyamızda büyük ölçüde kirliliğe neden olmaktadır. Kullanılan mineral yağların yaklaşık üçte birinin Avrupa, Amerika ve Asya gibi insan yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde tüketildiği ve yaklaşık %50'sinin değişen fiziksel ve kimyasal özelliklerle çevreye geri döndüğü düşünülmektedir [12]. Bu durum, çevre kirliliği ile ilgili endişeleri artırmış ve yağların ve katkı maddelerinin üretimi, kullanımı, yok edilmesi ile ilgili kısıtlamaların artmasını beraberinde getirmiştir. Yükselen çevresel farkındalık ile, dünya genelinde çevre dostu olan yağlayıcılara yönelim gün geçtikçe artmaktadır [13, 14]. Ayrıca petrol rezervlerinin azalması, petrol fiyatındaki artışlar ve petrol bazlı yağlayıcı kullanımının azaltılması, bu yönelimi hızlandırmıştır. Tüm bu durumlar, alternatif baz yağlar olarak bitkisel yağların kullanılmasına ve geliştirilmesine yönelik araştırmaları teşvik etmiştir [15]. Bitkisel yağlar, çeşitli uygulamalarda tatmin edici performansın yanında biyolojik olarak parçalanabilirlik ve yenilenebilirlik açısından önemli çevresel avantajlar sunabilir [16]. Biyoçözünürlüğü yüksek olan bitkisel yağlar petrol bazlı yağlayıcılarla karşılaştırıldığında, daha yüksek kayganlık, kesme kararlılığı, viskozite

indeksi, yük taşıma kapasitesine, daha düşük uçuculuğa ve üstün temizleme ve dağıtma özelliğine sahiptirler, bu nedenle petrol bazlı yağlara alternatif olabileceği düşünülmektedir. Bu hususta, literatürde çevre dostu yağ, katkı veya katkılı yağ kullanımının yeni bir alan olduğu ve gelişmeye açık olduğu görülmüştür [15, 17].

Bu tez çalışmasında sıvı yağ olarak kullanılan petrol ve bitkisel esaslı iki farklı baz yağ seçilmiştir ve baz yağlara çeşitli özelliklerdeki farklı katkı maddeleri eklenerek alternatif sıvı yağ kombinasyonları oluşturulmuştur ve tribolojik performansları incelenmiştir. Bu çalışma, ağır metal içeren katkı maddelerine alkali metal tuzların alternatif olabileceğine katkıda bulunmak; petrol bazlı yağlayıcılara alternatif olabilecek çevre dostu bir yağlayıcı karışımının geliştirilmesi ve katkı maddesi morfolojisinin yağlayıcılık özelliklerine etkisine katkıda bulunma amacı taşımaktadır. Ayrıca katkıların baz yağlar üzerindeki etkilerinin genellikle çizgisel ve noktasal temas geometrisinde araştırıldığı ve yüzeysel temas geometrisinde literatürdeki çalışmaların nispeten daha az olduğu görülmüştür [18, 19]. Bu tez çalışması literatürdeki bu durumdan yola çıkarak, hazırlanan katkılı yağ kombinasyonlarının tribolojik etkilerini yüzeysel temas geometrisinde incelemiştir ve bu yönüyle de özgün bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tüm bunların yanında katkı maddesi olarak kullanılan bor bileşikleri ve baz yağ olarak seçilen fındık yağının ülkemizdeki zenginliği nedeniyle, çalışmalar bu alana yoğunlaştırılmış olup bu konudaki herhangi bir gelişmenin Türkiye ekonomisine katkı sağlayacağı düşünülmüştür.

## 1.2. Triboloji ile İlgili Temel Bilgiler

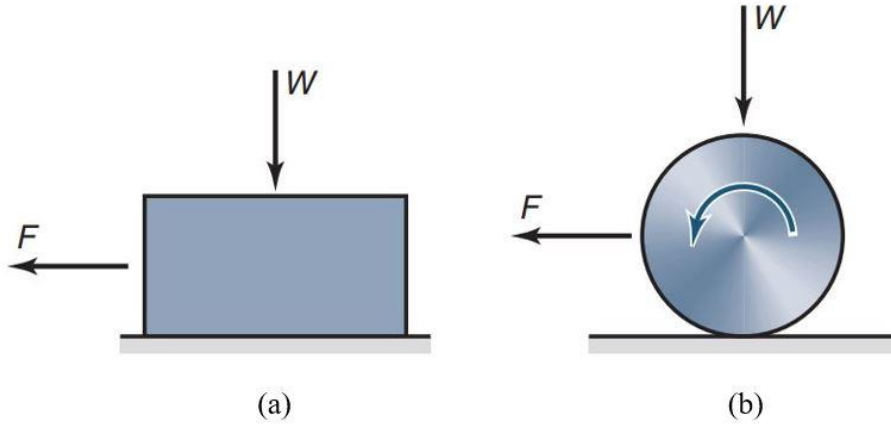
Triboloji, sürtünme, aşınma, yağlama ve yatak tasarım çalışmalarını içeren izafi/görel/göreceli hareket halindeki etkileşimli yüzeylerin bilimi ve teknolojisi olarak tanımlanabilir. Triboloji kelimesi, "sliding" veya "rubbing" anlamına gelen Yunanca *tribos* kelimesinden türetilmiştir, bu nedenle kelimenin tam anlamıyla çevirisi "sürtünme bilimi" olarak yapılmaktadır [1]. Triboloji terimi, ilk olarak Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü'nün bir komitesi tarafından 1967 yılında tanımlanmıştır [3]. Tribolojik bir arayüzdeki yüzey etkileşimleri fazlasıyla karmaşıktır ve bunların anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi disiplinler arası bilgi ve çalışma gerektirir. Ayrıca yüzeylerin birbirine kaymadığı veya yuvarlanmadığı mekanik sistemler nadirdir ve bu nedenle triboloji çok geniş uygulama alanına sahip anahtar bir teknolojidir. İlaveten canlı organizmaları ilgilendiren biyotriboloji bağlamında, disiplin daha da genişler ve tıp ve biyolojik bilimlerini de içerir [14].

Triboloji, uzay aracından ev aletlerine kadar uzanan teknik ekipmanların güvenilirliği, bakımı ve aşınması gibi büyük ekonomik öneme sahip sorunlara çözüm arar. Dünyanın toplam enerji tüketiminin %20'si sürtünmenin üstesinden gelmek için, %3'ü ise aşınma ve aşınmaya bağlı arızalar nedeniyle aşınmış parçaların ve yedek ekipmanların yeniden üretilmesi için kullanılır [20]. Aşınma, malzeme israfının ve mekanik performans kaybının başlıca nedenidir. Dünya üzerindeki makine elemanlarının yaklaşık %70'inin aşınmadan dolayı kullanılamaz hale geldiği düşünülmektedir [21] ve bu durum büyük bir enerji kaybına ve maddi zarara neden olmaktadır. Bu nedenle aşınmadaki herhangi bir azalma önemli ölçüde tasarruf sağlayabilir. Sürtünme, aşınma ve enerji kaybının başlıca nedenidir. Şu veya bu şekildeki sürtünmenin üstesinden gelmek için dünyada kullanılmakta olan enerji kaynaklarının yaklaşık üçte birinin gerekli olduğu tahmin edilmektedir. Yağlama, sürtünmeyi azaltmanın ve dolayısıyla aşınmayı kontrol etmenin etkili bir yoludur. Sonuç olarak, iyileştirilmiş bir sürtünme kontrolü ile ekonomik olarak önemli tasarruflar sağlanabilir [3].

Bu bölümde tribolojinin çalışma alanları olan ve birbirlerine bağlı olan sürtünme, aşınma ve yağlama ile ilgili temel bilgiler verilecektir.

### **1.2.1. Sürtünme**

Sürtünme, birbiri ile temas halindeki cisimlerin izafi hareketi esnasında temas yüzeylerinin karşılaştığı direnç olarak tanımlanabilir. Hareket yönünün tam tersi yönde etki eden bu direnç, sürtünme kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Statik sürtünmede etkileşimdeki yüzeyler arasında izafi bir hareket söz konusu değilken, dinamik sürtünmede temas eden yüzeyler birbirine göre hareket halindedir. Temas halindeki hareketli parçalar için (kinematik/dinamik bakımdan) iki önemli sürtünme durumu vardır: kayma ve yuvarlanma (Şekil 1.1). Dinamik sürtünmede birbirine temas eden yüzeylerin her ikisi de birbiri üzerinde kayarak öteleme hareketi yapıyorsa kayma sürtünmesinden; eşleşen cisimler birbirleriyle farklı temaslar halinde olup birbirleri üzerinde yuvarlanıyorsa yuvarlanma sürtünmesinden bahsedilebilir. Kayma ve yuvarlanma sürtünmesi arasında net bir ayırım yapılabilir ancak yuvarlanma her zaman bir miktar kayma içerdiği için kayma-yuvarlanma sürtünmesi olarak da tanımlanabilmektedir [22].

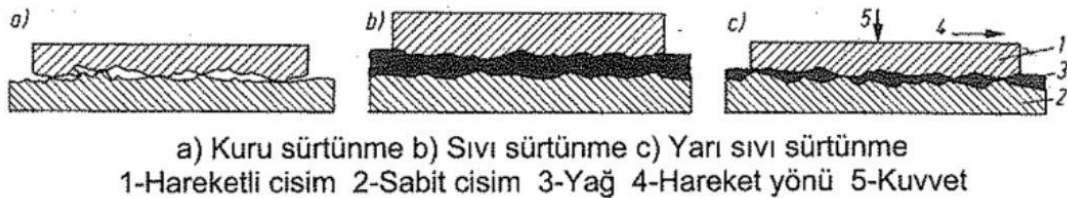


Şekil 1.1. (a) Kayma sürtünmesi ve (b) yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma sürtünmesi [23].

Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, hem yuvarlanma hem de kayma sürtünmesinde üst gövdeyi sabit karşı yüzey üzerinde hareket ettirmek için hareket yönünde teğetsel bir  $F_T$  kuvvetine ihtiyaç vardır. Teğetsel kuvvet,  $F_T$  ve uygulanan normal yük,  $W$  arasındaki oran, sürtünme katsayısı olarak bilinir ve genellikle  $\mu$  sembolü ile gösterilir [23]:

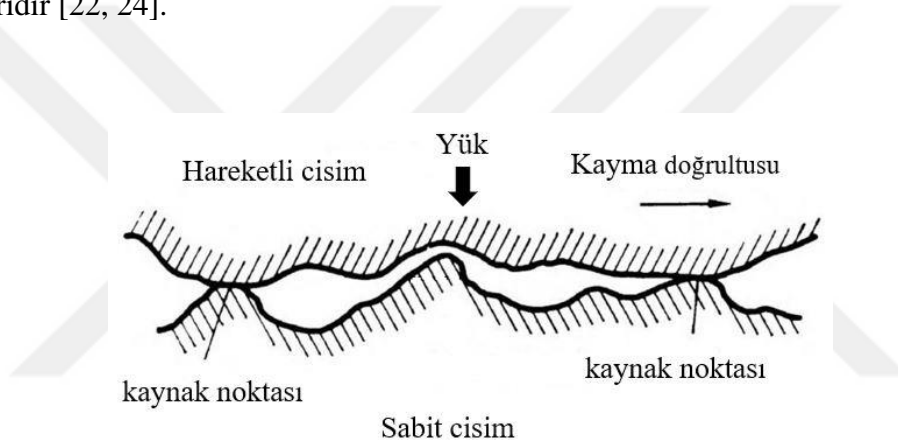
$$\mu = \frac{F_T}{W}$$

Sürtünmenin kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olmak üzere üç hali vardır (Şekil 1.2). Yüzeyler arasında hiçbir yağlayıcı madde yoksa kuru sürtünme; yüzeylerin teması bir yağlayıcı madde tarafından tamamen önleniyorsa sıvı sürtünmesi; yüzeyler arasında yağlayıcı bir madde olmasına rağmen yüzeyler yine de birbirine temas ediyorsa sürtünme yarı sıvı veya sınır sürtünmesi olarak adlandırılmaktadır.



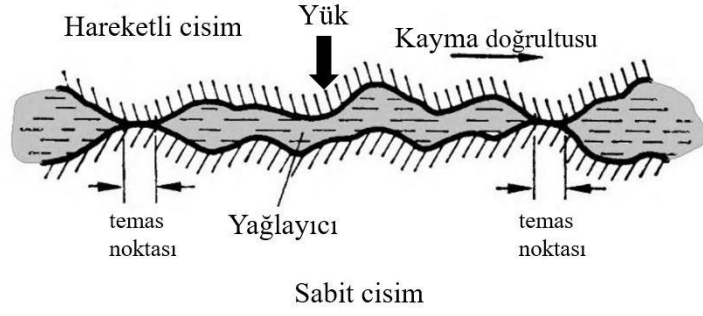
Şekil 1.2. Sürtünme türleri: (a) Kuru sürtünme, (b) sıvı sürtünme ve (c) yarı sıvı (sınır) sürtünme [22].

Kuru sürtünme, temas yüzeyleri arasında hiçbir şekilde yağlayıcı bulunmayan iki katı cisim birbiri üzerinde kayma hareketi yaptığı esnada meydana gelen sürtünme halidir (Şekil 1.2 ve 1.3). Her türlü yüzey işleminde dahi yüzey pürüzleri mevcut olacağından, yüzeyler yük altında değilken bazı pürüz tepcikleri birbirlerine temas etmektedirler ve bu temas alanları oldukça küçüktür. Yük etki ettiğinde bu temas noktalarının sayısı artar ve bu noktalarda ortalama basınçtan daha büyük basınçlar meydana gelir. Basınç altında sürtünme bu noktalarda 1000 °C'ye varan ve çok kısa süren sıcaklıklar meydana getirir. Bu yüksek basınç, temas eden tepcikliğin plastik deformasyona uğrayarak birbirleriyle mikroskobik kaynak bağları oluşturmasına sebep olur. Yüzeyler arasında izafi hareketin olabilmesi için bu bağların kopması, kesilmesi gerekir ve sürtünmeyi oluşturan başlıca etken de bu kesme kuvvetleridir [22, 24].



Şekil 1.3. Kuru sürtünme hali [25].

Sıvı sürtünme halinde, iki katı elemanın temas yüzeyleri arasında sürekli bir yağlayıcı mevcuttur ve yüzeyler yağ ile temasa geçtiklerinde, adsorpsiyon olayının sonucu olarak yüzeyleri birkaç molekül kalınlığında düzgün bir yağ tabakası (yağ filmi) kaplar. Böylece iki katı arasında hiçbir yüzey pürüzü karşı tarafa temas etmeyecek şekilde yağ filmi oluşturulmuştur. Eğer yağ filmi yeterli kalınlıkta oluşmadıysa farklı yüksekliklerdeki pürüz tepcikleri yağın varlığına rağmen birbirine doğrudan temas edebilir ve aşırı basınç noktaları oluşur. Bu noktalardaki aşırı basınç ve sürtünmeden kaynaklanan sıcaklığın etkisi ile yağ filmi kopar, metal-metal teması meydana gelir ve mikroskobik kaynak bağları oluşur. Bu durum yarı sıvı (sınır) sürtünme hali (Şekil 1.4) olarak adlandırılmaktadır [22, 24].



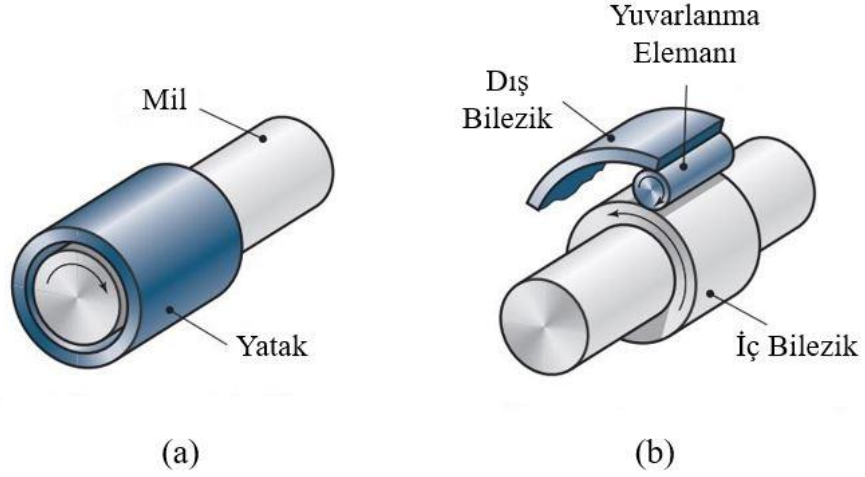
Şekil 1.4. Yarı sıvı (sınır) sürtünme hali [25].

### 1.2.2. Yüzey Parametresi

Makine elemanlarının tasarımında yüzeylerin direkt teması veya akışkan filmi ile ayrılması söz konusu olabilir ve her iki durumda da bileşenlerin ömrü açısından yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyin temas durumu büyük önem arz eder.

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde hassas işlemlerin daha kaba işlemlere göre yavaş ve pahalı olması nedeniyle, işlem süresi ve maliyet gibi unsurlar da göz önünde bulundurulmaktadır. Bu hususta, ortalama yüzey pürüzlülük değeri,  $R_a$  tasarımcılar için en önemli parametredir.

Eş çalışan makine elemanlarının yüzey temas durumu ise, uyumlu (konformal) ve uyumsuz (nonkonformal) yüzeyler olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Şekil 1.5). Uyumlu yüzeyler yüksek derecede geometrik uygunluk içindedir ve yük geniş bir yüzey alanında taşınır. Uyumsuz yüzeylerde temas alanı oldukça düşüktür ve yük artışı ile temas alanı genişler. Kaymalı yataklar uyumsuz yüzeylere sahipken, uyumsuz yüzeylere kamlar, dişliler ve rulmanlar örnek olarak verilebilir [26].



Şekil 1.5. (a) Uyumlu (konformal) ve (b) uyumsuz (nonkonformal) yüzeyler [23].

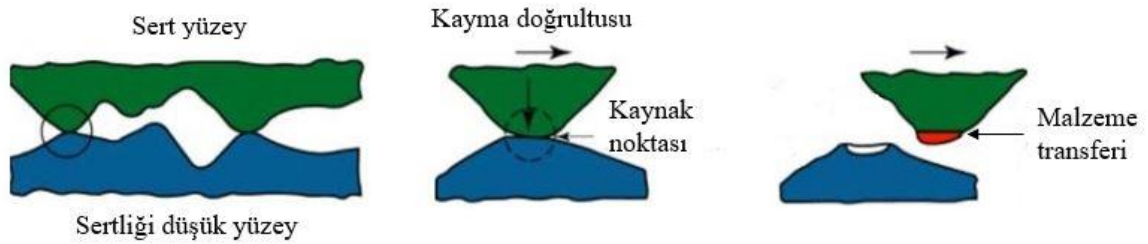
### 1.2.3. Aşınma

Aşınma, temas halinde olan ve birbirine göre izafi hareket (kayma, yuvarlanma veya çarpma) yapan iki katı yüzeyin herhangi birinde veya her ikisinde sürtünme etkisiyle meydana gelen malzeme kaybı veya yüzey hasarıdır. Aşınma, sürtünmenin kaçınılmaz bir sonucudur. Yalnızca parçacık kopması halinde olmamakla birlikte, sürtünme süreci esnasında yüzeyde kaynak yapma, yapışma, bağlanma, şekil değiştirme, ergime, oksitlenme, yapı dönüşümü vb. yüzey etkileşimleri şeklinde de aşınma gerçekleşebilmektedir [1, 27]. Aşınma sonucunda makine elemanları fonksiyonlarını tam olarak yerine getiremez ve makinanın verimi ve görev kalitesi düşer.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin bir sonucu olarak tanımlanabilir ve dış etkilerin çokluğu nedeniyle birçok aşınma türü mevcuttur. Mekanik bir parçanın arızalanması, adhezyon, abrazyon, yorulma (pitting) ve mekanik korozyon aşınması olmak üzere dört ana grupta toplanabilir [24, 27].

### 1.2.3.1. Adhezyon Aşınması

Yağlanmış olsun veya olmasın, temas halinde olan iki katı yüzeyin yüklenmesi ile bazı pürüzlülükler arasında yüksek basınç noktaları oluşur. Bu noktalarda pürüzlülükler, plastik deformasyona uğrayarak kısa menzilli van der Waals kuvvetlerinin de etkisi ile gerçek temas alanında mikroskobik kaynak bağları oluştururlar. İzafi hareket gerçekleştiğinde, bu noktalarda yüksek sıcaklıkların oluşması ile kaynak bağları kopar ve büyük bir plastik deformasyon meydana gelir. Mukavemeti düşük olan yüzeyden diğerine malzeme aktarımı veya her iki yüzeyin malzeme kaybına uğraması olayı adhezyon aşınması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1.6). Yumuşak malzeme sert yüzeye yapışabilir veya kaymanın devam etmesi ile gevşek bir aşınma kalıntısı üretebilir. Sürtünme katsayıları, aşınma biçimleri ve aşınma oranları farklı olsa da, malzeme aktarımı ortak özelliştir ve çizikler her zaman kayma yönü boyunca olur [1, 23, 28].



Şekil 1.6. Adhezyon aşınması model gösterimi [29].

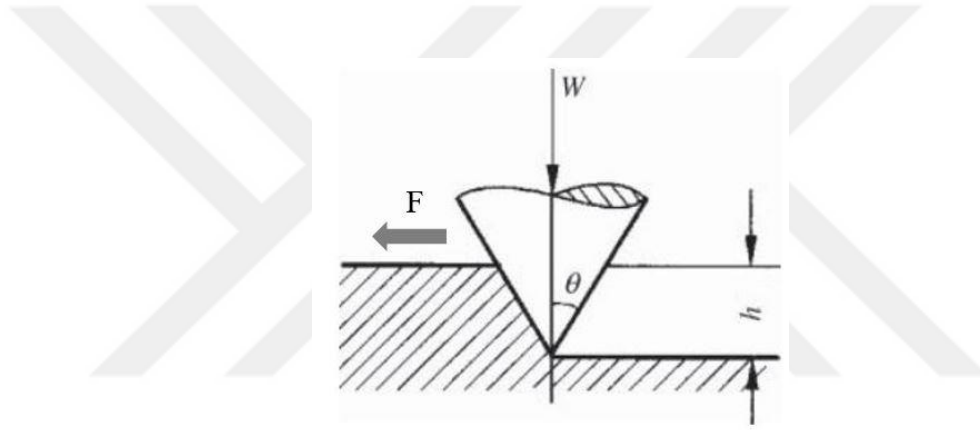
Basınç ve kayma hızlarının çok büyük olduğu veya yağlamanın eksik veya yetersiz olduğu durumlarda veya malzeme seçimi nedeniyle çok şiddetli mikroskobik kaynak bağları meydana gelebilir. Parçalar kitlenir veya hareket devam ettiği için yüzeyler tamamen bozulur. Adhezyon aşınmasının bu şiddetli türüne yenme veya yalama adı verilir [24].

### 1.2.3.2. Abrazyon Aşınması

En genel anlamıyla abrazyon aşınması, eş çalışan yüzeylerin sert parçacıklar tarafından aşındırılması olayıdır. Sert parçacıklar; dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş gibi küçük parçacıklar, yüzeylerde etkileşim esnasında meydana gelen oksidasyon tabakasının kırılması veya mikro kaynakların kopması ile oluşan parçacıklar olabilirler [24].

Hem serbest akan partiküller hem de karşı gövdeye bağlı aşındırıcılar şiddetli abrazyon aşınmaya neden olabilirler ve bu aşınmalar hem plastik akışı hem de gevrek kırılmayı içerebilir [30].

Fiziksel etkileşimde olan iki yüzeyden daha sert olanının pürüzleri veya araya giren sert parçacıklar uygulanan normal yük nedeniyle yumuşak yüzeye batması ve izafi hareketin etkisiyle kayarak yumuşak yüzeyden micro talaş kaldırma işlemi gerçekleştirmesi abrazyon aşınması olarak adlandırılır. Kayma yönünde sürtünme kuvveti,  $F$  etkisiyle ve normal kuvvet,  $W$  altında yüzeye  $\theta$  eğim açısı yapan koni şeklindeki abrazyon ucun yumuşak yüzeyden malzeme kaldırması, Şekil 1.7’de iki boyutlu aşındırma modeli şeklinde verilmiştir [24, 31].



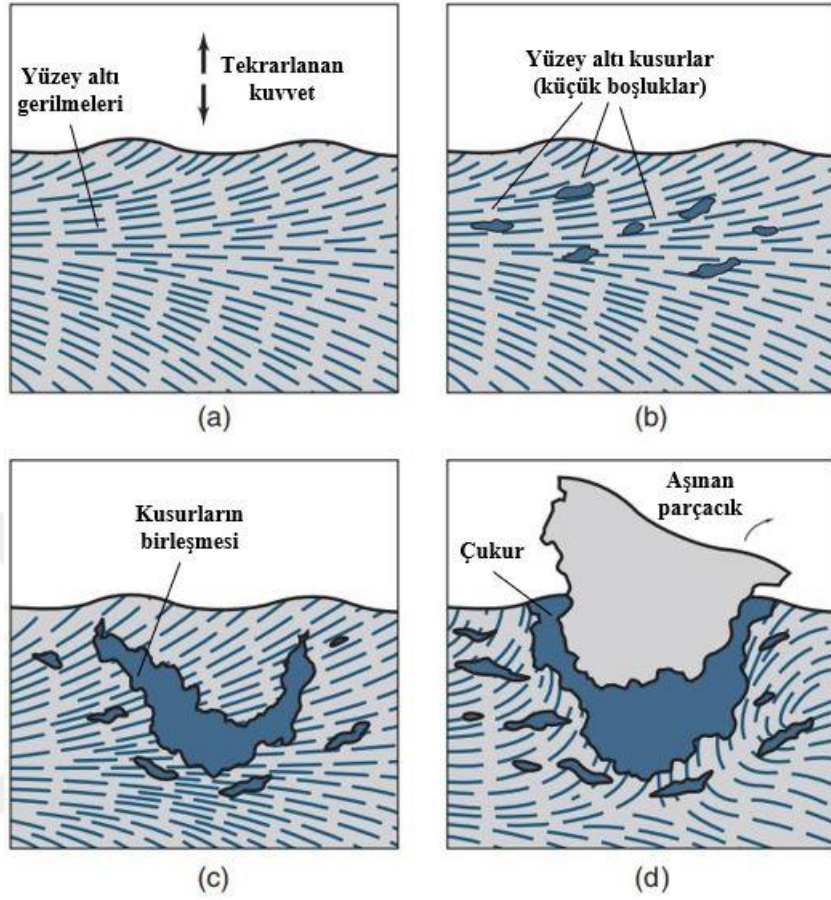
Şekil 1.7. İki boyutlu abrazyon aşınması model gösterimi [31].

### 1.2.3.3. Yorulma (Pitting) Aşınması

Kam mekanizmaları, rulmanlı yataklar, dişli çarklar, sürtünmeli çark sistemleri gibi birbirleriyle sürekli temas halinde olan ve yuvarlanma hareketi yapan makine elemanlarının yüzeylerinde sıklıkla görülen bir aşınma türüdür [23, 24].

Bu makine elemanlarının çalışma temas alanları küçük olduğu için yüzeylerinde Hertz tipi yüksek basınçlar oluşur. Bu basınç etkisinde yüzeylerde ve yüzeyin hemen altında değişken zorlamalar veya kayma gerilmeleri meydana gelir ve yorulma başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin meydana geldiği bölgelerde plastik deformasyon ve dislokasyonlar sebebi ile çok küçük boşluklar oluşur. Bu boşluklar zamanla büyür ve yüzeye doğru hareket ederek zamanla yüzeyde küçük çukurcuklar oluşturur. Bu olaya yorulma (pitting) aşınması adı verilir (Şekil 1.8). Çalışma bölgesindeki yağın da yüksek basınç altında çatlaklara

girmesi çukurcukların büyümesine neden olmaktadır [1, 21, 24].



Şekil 1.8. Yorulma aşınması modeli: (a) makine elemanı yüzeyinin tekrarlı yüke maruz kalması, (b) yüzeyin hemen altında kusurların (küçük boşluklar ve çatlaklar) oluşması, (c) kusurların birleşerek büyümesi ve yüzeye doğru hareketi ve (d) aşınma parçacığının yüzeyden ayrılması ve yüzeyde çukurcukların oluşması [23].

#### 1.2.3.4. Mekanik Korozyon (Kimyasal) Aşınması

İzafi harekete sahip yüzeylerin küçük temas alanlarında daima plastik deformasyonlar meydana gelir ve kristal kafes bozulur. Bu durumun sonucunda yüzey kimyasal bakımdan aktifleşir ve ortamla kimyasal reaksiyon kabiliyeti artar. Yüksek sıcaklıklarda, oksijen, karbon, nitrojen, kükürt vb. elementler ile reaksiyonlar gerçekleşir ve bu durum yüzeyde oksitlenmiş, karbonlaşmış, nitrürlenmiş, sülfürlenmiş veya cüruf tabakasının oluşmasına neden olur. Ancak yüzeyde oluşan ince ve kırılgan korozyon tabakası izafi hareketin etkisi

ile aşınır veya parçalanır. Yüzey filminin parçalandığı bölge hızla aşınarak malzeme kaybına neden olur. Bu şekilde gerçekleşen malzeme kaybına mekanik korozyon aşınması denir [24, 30].

Kayma yüzeylerindeki oksidasyonun genellikle faydalı olduğunu belirtmek önemlidir. İzafi hareket olmadığında korozyonun kimyasal ürünleri, yüzeyler üzerinde tipik olarak 1 µm'den daha az kalınlıkta bir film oluşturur ve bu film katı yağlayıcı görevi görür ve metal-metal temasını önler. Bu durum adhezyon ve korozyon aşınmasını yavaşlatmaktadır [3, 28].

#### **1.2.4. Yağlama ve Yağlayıcılar**

Yağlama, yük altında izafi hareket halindeki etkileşimli yüzeylerin sürtünmesini ve aşınmasını kontrol etme işlemi olarak tanımlanabilir [4]. Eş çalışan yüzeyler arasında oluşan sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı en aza indirmek, ısıyı dağıtmak, kirleticileri gidermek ve verimliliği artırmak amacıyla yağlayıcı maddeler kullanılmaktadır [28]. Bir yağlayıcı, kayan yüzeyler arasına, yüzeylerin kendisinden daha düşük bir kesme mukavemetine sahip yağ tabakası oluşturarak işlev görür [32]. Yağlayıcı madde, birçok eş çalışan sistemde yüzey pürüzlerinin temaslarını kısmen veya tamamen engelleyebilir ve yüzeyler arasındaki yapışma kuvvetini azaltabilir.

Bir montajdaki hemen hemen her hareketli bileşen yağlayıcı gerektirir. Yağlayıcı maddelerin çeşitli sürtünme halleri için etki mekanizmaları farklıdır. Sınır sürtünmede yağın ıslatma kabiliyeti ve kimyasal yapısı oldukça önemlidir ve bu bölgede genellikle katı veya katkılı sıvı yağlayıcılar kullanılmaktadır. Sıvı sürtünme halinde ise yüzeyler arasında bulunan yağ tabakası yüzeyleri birbirinden tamamen ayırdığı için yağın viskozitesi önem taşır. Bundan dolayı, sıvı sürtünmede genellikle sıvı veya gaz yağlayıcılar kullanılır [24]

Yağlayıcılar fiziksel durumlarına göre katı (grafit, molibden disülfür, bor nitrür, PTFE vb.), yarı katı/yarı sıvı (gres, tozlar, vb.), sıvı (otomotiv ve diğer makine yağları) ve gaz (karbon dioksit, nitrojen, soy gazlar) halinde olabilir [24, 33].

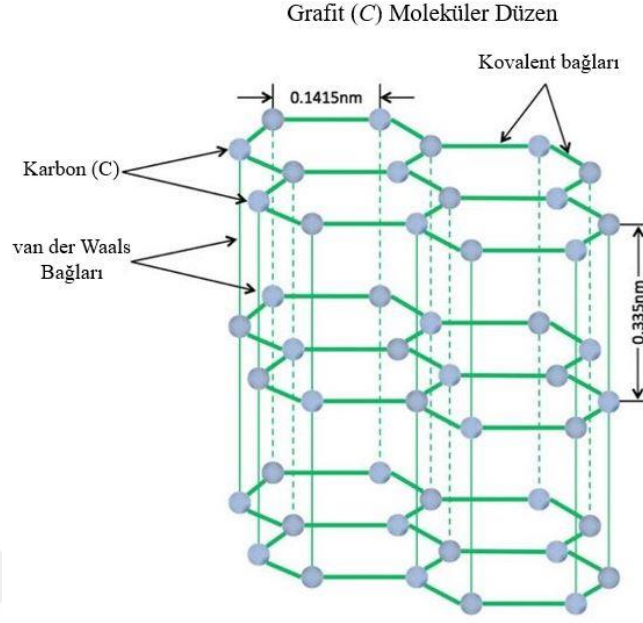
##### **1.2.4.1. Katı Yağlayıcılar**

Katı yağlayıcı, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltmak için göreceli hareket sırasında yüzeyler arasında düşük kayma mukavemetli, ince bir film oluşturabilen maddelerdir.

Kayma yüzeylerine iyi bir şekilde tutunurlar (kopma mukavemetleri yüksek) ve kayma kabiliyetini artırır (kayma mukavemetleri düşük) [24]. Bir başka ifade ile, katı yağlayıcılar, yağlama yüzeylerine yapışır, karşıt yüzey pürüzleri arasındaki teması en aza indiren koruyucu bir sınır tabakası oluşturur ve kayan temasta sıvı veya gres tipi yağlayıcılara benzer davranır ve işlev görür [28]. Katı yağlayıcılar, genellikle yüksek sıcaklıklar, vakum, nükleer radyasyon, havacılık ve geleneksel yağların ve greslerin kullanımını engelleyen ortamlarda aktif şekilde kullanılmaktadırlar [34].

Gelişmiş sürtünme ve aşınma özellikleri elde etmek için, katı yağlayıcılar doğrudan doğruya veya toz halinde suya, sıvı yağlara ve greslere katılarak kullanılabilirler. Bu gibi kombinasyonlar, kayma yüzeylerinin sürtünme ve aşınma performansı üzerinde faydalı bir sinerjik etkiye sahiptir. Katmanlı katı yağlayıcılar, en yaygın olarak kullanılan yağlayıcı sınıftır ve grafit, MoS<sub>2</sub> veya WS<sub>2</sub>, altıgen bor nitrür (hBN) ve borik asit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) en çok kullanılan katmanlı yağlayıcılarıdır. Bu katmanlı katı bileşenlerin tümü, kovalent bağlarla birbirine bağlanmış atom katmanlarından oluşan benzer moleküler yapılara sahiptir. Bu katmanlar, zayıf van der Waals kuvveti tarafından bir arada tutunur ve kayma mukavemetleri oldukça düşüktür [4, 35]. Ayrıca Teflon (PTFE), poliamid (PA), poliasetal (POM) gibi plastik malzemeler de düşük sürtünme katsayılarına sahip malzemelerdir. Makine elemanları tamamen bu malzemelerden yapılabilir, sıvı yağlara ve gresler için katkı maddesi olarak kullanılabilir veya diğer katı yağlayıcılar ile karıştırılarak sürtünme kabiliyetleri iyileştirilebilir.

Grafit, sürtünme ve aşınmayı azaltmak için toz, ince film, katı ve kompozit gibi çeşitli formlarda yağlayıcı olarak kullanılabilir. Grafit (C), karbon atomlarının bir tabaka oluşturmak için bir düzlemde kuvvetli kovalent bağlar ile bağlandığı ve tabakaların zayıf van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulduğu bir kristal yapıya sahiptir (Şekil 1.9). Grafit bileşenlerinin ısıl kararlılıkları çok iyidir. Grafit ancak hava ve suyun bulunduğu ortamlarda yağlayıcı özelliğe sahipken bunun dışındaki ortamlarda (örneğin vakum) tam tersine aşındırma elemanıdır. Genellikle düşük devirlerde ve yüksek sıcaklıklarda kullanılır. Ayrıca aşırı uygulama koşullarında daha iyi yağlama elde etmek için su, sıvı yağlar ve greslerde katkı olarak kullanılmaktadır [28, 35].



Şekil 1.9. Grafitin (C) moleküler düzeni [28].

#### 1.2.4.2. Sıvı Yağlayıcılar

Sıvı yağlayıcılar, çeşitli yöntemlerle karakterize edilebilir ve en yaygın yöntem, kullanılan baz yağın tipidir. Dikkate değer baz yağ türleri; mineral yağlar (ham petrolden türetilmiştir), organik yağlar (bitkilerden ve hayvanlardan türetilmiştir) ve sentetik yağlar olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Makine elemanı porselen, plastik veya lastik gibi metal dışı bir malzemeden yapılmış ise su da sıvı yağlayıcı olarak kullanılabilir. Bir sıvı yağlayıcının birincil işlevi, bir sistemin öngörülen ömrü boyunca sürtünmeyi, aşınmayı ve yüzey hasarını kontrol etmektir. Diğer önemli işlevleri ise, korozyonu önlemek ve ısıyı, kiri ve aşınma kalıntılarını gidermektir. Bazı durumlarda, hidrolik sistemlerde olduğu gibi, kuvvet veya enerjiyi aktarmak için sıvı yağlayıcılar kullanılabilir [4, 24, 28].

Organik yağların bitkisel ve hayvansal (doğal olarak oluşan esterler, üçüncül bir alkolle birleştirilmiş uzun zincirli organik asitler) olmak üzere iki kaynağı vardır. Bitkisel yağlara örnek olarak hint, hurma, kolza tohumu ve zeytin yağı, hayvansal yağlara ise koyunlardan elde edilen sperm, balık (köpekbalığı, balina vb.) ve yün yağları (lanolin) örnek olarak verilebilir. Organik yağlayıcılar iyi yağlama özelliğine sahip olmalarına rağmen metallere karşı madensel yağlar daha duyarlı olmaları ve yüzeylerde korozyona sebep olmaları nedeniyle endüstride çok az kullanılırlar. Genellikle iyi sınır yağlayıcılarıdır, ancak

mineral yağlar kadar oksidasyon ve termal kararlılığa sahip değildirler ve yapışkan tortular vermek üzere parçalanma eğilimindedirler. Bunlar maksimum 120°C sıcaklığa kadar kullanılabilir. Organik yağlar, örneğin gıda veya ilaç endüstrisinde, kirletme riskinin minimuma indirilmesi gereken uygulamalar için uygundur ancak fiyatları çok yüksektir [1, 24]. Bitkisel yağların özellikle çevreye duyarlı alanlarda baz yağlar olarak kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Biyolojik olarak parçalanabilirler ve düşük toksik etkiye sahiptirler, ancak tüm organik yağlar gibi, belirli koşullar altında sabunlaşmaya eğilimlidirler. Kullanım sırasında su ile temas ederse biyolojik bozulma da mümkündür [3, 36, 37].

Mineral yağlar en çok kullanılan yağlayıcılardır. Ham petrolün damıtılması ile elde edilen mineral yağlar, birçok işlemlerden geçirilerek hidrokarbon bileşimlerinden oluşan baz yağlar elde edilir. Ham petrol, hidrokarbon dokusunun karakteristik dağılımına göre parafinik, aromatik, naftanik ve karışık şekilde bulunabilir. Mineral yağlar, değişik viskoziteli baz yağlara ve üründen beklenen özelliklere göre seçilir ve çeşitli katkı maddelerinin karıştırılmasıyla elde edilmesi mümkündür. Ham petrolden elde edildikleri için büyük miktarda üretilebilir ve ucuzdurlar. Ayrıca taşınmaları, depo edilmeleri ve makinada istenilen yağlama noktasına iletilmeleri kolaydır. Metaller ve lastik gibi malzemelere karşı kimyasal bakımdan duyarlıdır ve yüzeyleri oksidasyona karşı korurlar [3, 24, 38].

Sentetik yağlar genellikle kimyasal sentez yöntemiyle elde edilen yapay yağlar olup yağlayıcı özellikleri ham petrol esaslı yağlara benzerdir. Temel olarak havacılıktaki gelişmeler, başlangıçta gaz türbinli motorların daha yüksek hız ve performans gereksinimleri; vakum pompaları ve jet motorlarında düşük buhar basınçlı yağlayıcı gereksinimleri gibi durumlar, aşırı sıcaklık ve basınç, yüksek vakum ve yüksek nem içeren ortamlara dayanabilen sentetik yağlayıcıların geliştirilmesine yol açmıştır. Sentetik yağlayıcıların mineral yağlara göre üstünlükleri ve eksiklikleri mevcuttur. Mineral yağlara göre daha uygun viskozite-sıcaklık ve oksitlenme davranışı sergilerler. Çalışma esnasında daha düşük sürtünme katsayısı verirler ve düşük alevlenme kabiliyetine sahiptirler. Çok kaliteli olmalarına rağmen korozyon, sızdırmazlık elemanları ile kimyasal reaksiyona girme tehlikesi, yüksek fiyat ve zehirleyebilme gibi sakıncalı yönlerinin de değerlendirilmesi gerekir [24].

#### **1.2.4.3. Yarı Katı Yağlayıcılar (Gresler)**

Gresler kimyasal açıdan çeşitli bileşiklerin karışımı, fiziksel açıdan ise sıvıdan (yağ) ve katı maddeden (katılaştırıcı) oluşan bir süspansiyondur. Metalik sabun, yağ damlacıklarının etrafını bir bal peteği gibi sarar; çalışma başlayınca basınç altında yağ damlacıkları serbest kalarak yağlama görevini yerine getirir. Ağırlık olarak greslerin %75-95'ini sıvı yağ, %4-20'sini sabun ve %0-5'ini de katkı maddeleri oluşturur. Katılaştırıcı, yağa kararlı bir plastiklik özelliği sağlar. Yani, gres bir krem gibi yüzeye sürülür ve kolayca plastik deformasyona uğrayabilir. Greslerde katılaştırıcı madde olarak genellikle kalsiyum, lityum, sodyum gibi madensel sabunlar veya organik esaslı sabun olmayan maddeler kullanılmaktadır [3, 24].

Gresler, yer ve maliyet nedeniyle dolaşımdaki sıvı yağlayıcının tutulamadığı ve yağ ile soğutmanın gerekli olmadığı veya sıvı yağlayıcı uygulanmasının mümkün olmadığı durumlarda kullanılır. Greslerin en yaygın uygulama alanları, rulmanlı yataklar ve dişli mekanizmalarıdır. Gres, bir rulmana veya dişli takımına doldurulabilir ve değişim zamanına kadar yağlama işlevini yerine getirebilir [1, 26, 28].

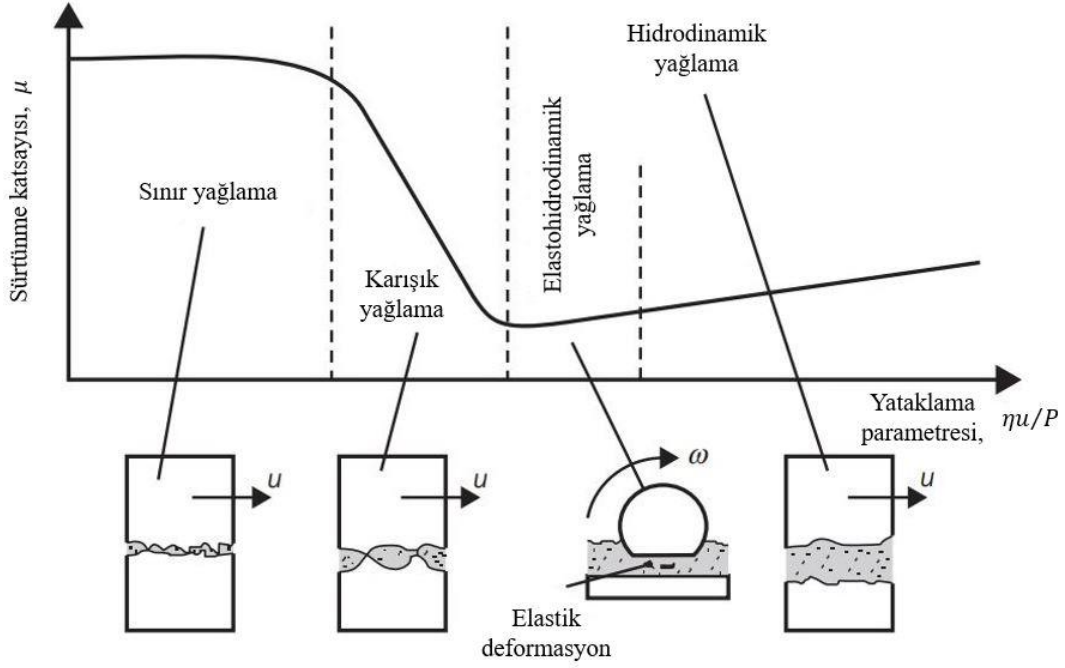
#### **1.2.4.4. Gaz Yağlayıcılar**

Gaz yağlayıcı olarak, çalışma koşullarında kararlı olmak ve sistemin malzemesine duyarlı olması şartı ile herhangi bir gaz ve buhar kullanılabilir. Yüksek hız ve düşük yüklü sıvı sürtünmeli sistemlerde ve ayrıca gıda ve ilaç sanayinde sıvı yağ ve gres kullanımı istenmediği için gaz yağlayıcılar kullanılmaktadır. Gaz yağlayıcıların viskoziteleri sıvı yağlayıcılara göre çok küçük olduğundan kullanıldıkları sistemlerde sürtünme ve ısı oluşumu çok az olmaktadır. Ancak gaz yağlayıcıların kullanıldığı sistemlerde yük taşıma kabiliyeti çok düşüktür. Hava, hidrojen ve azot yağlayıcı olarak kullanılmaktadır.

#### **1.2.5. Stribeck Eğrisi ve Yağlama Rejimleri**

Hidrostatik yağlamada, yatak yüzeyleri arasına dış basınçla (pompa) zorlanan bir yağlayıcı sıvı veya gaz filmi ile tamamen ayrılır (Şekil 1.10). Sürekli bir basınçlı yağlayıcı kaynağı sağlandığı sürece, kayma hızı olmasa bile yağ filmi mevcuttur. Hidrostatik filmler, en pürüzlü yüzeylerin bile pürüzleri arasındaki teması önleyecek önemli bir kalınlığa sahiptir

(yaklaşık 100  $\mu\text{m}$ ). Yüzeyler arasında bağıl hareketin çok az olduğu veya hiç olmadığı uygulamalarda kullanılırlar. Hidrostatik yataklar, başlatma ve kapatma sırasında bir nedenden dolayı yatak yüzeylerine dokunmaya veya sürtünmeye izin verilmeyen uygulamalarda da gerekli olabilir [3, 39].



Şekil 1.10. Stribeck eğrisi ve yağlama rejimleri [33].

Sınır yağlama, temas halindeki yüzeylerin arasındaki sıvı filminin ince ve süreksiz olduğu ve yüzey pürüzlülüklerinin doğrudan temasının en yoğun olduğu durumdur (Şekil 1.10). Çok yüksek temas basınçları altında veya çok düşük hızlarda, hidrodinamik kuvvetler, kayan yüzeyler arasında sürekli bir yağlayıcı film sağlamak için yetersizdir ve pürüzler arasında doğrudan temas meydana gelir. Yüzeyler bir şekilde korunmadığı sürece, izafi hızında etkisiyle başlangıçta yüksek sürtünme ve aşınma oranları meydana gelebilir. Sınır yağlama olarak adlandırılan bu rejimde yüzeyleri korumak için genellikle yağlara ve greslere çeşitli katkı maddeleri eklenir. Bu durumda çalışan sürtünme yüzeyleri adsorpsiyon ve tribokimyasal reaksiyonlar yoluyla ince moleküler bir sıvı film tabakası (tek tabaka) oluşturan yağdaki katkı maddeleri tarafından kontrol edilebilir [15, 33, 39].

Karışık yağlama, hidrodinamik ve sınır yağlama rejimleri arasında ve iki yağlama mekanizmasının çalışabileceği yani tamamen yağlanmış (ayrılmış) ve temaslı (ayrılmamış) yüzey alanlarının aynı anda bulunduğu durumdur (Şekil 1.10). Eş çalışacak yüzeyler arasında bazı noktalarda pürüzlülükler temas halindeyken yatak yüzeyinin bir bölümü kısmi hidrodinamik film tarafından desteklenmiş haldedir [1, 28].

Elastohidrodinamik yağlama, temas halindeki yüzeylerde elastik deformasyonunun meydana geldiği ve yağlayıcı filmin şeklinin ve kalınlığının önemli ölçüde değiştirildiği bir tür hidrodinamik yağlama rejimidir (Şekil 1.10). Temas yüzeyleri arasında onları ayıran ve sürtünmeyi azaltan ince bir yağlayıcı filmin geliştirilmesiyle elde edilir. Artan basınçla yağlayıcının viskozitesindeki artış ve yağlayıcı filmdeki yüksek lokal basınçlar nedeniyle yüzeylerde elastik deformasyon gerçekleşir ve bu durum hidrodinamik yağ filminin korunması için gereklidir. Elastohidrodinamik yağlama, yüklerin nispeten küçük temas alanları üzerine etki ettiği, örneğin bilyalı ve makaralı yatakların, dişli dişlerinin veya kamların temas noktaları gibi yüksek geometrik uygunluk ve düşük elastik modüle sahip etkileşimlerde meydana gelir haldedir [1, 28, 33, 39].

Hidrodinamik yağlamada, kayma yüzeyleri nispeten kalın bir sıvı yağlayıcı film ile tamamen ayrılır ve normal yük, hidrodinamik olarak oluşturulan bu film içindeki basınç tarafından desteklenir (Şekil 1.10). Hidrodinamik film, yağlayıcının daralan bir boşluğa viskoz bir şekilde sürüklenmesiyle basınçlandırılır. Hidrodinamik yağlamada geliştirilen basınçlar genellikle düşüktür (genellikle 5 MPa'dan az), bu nedenle yüzeyler genellikle sert olarak kabul edilebilir ve basınç-viskozitesi etkileri küçüktür [15, 23, 39].

### **1.2.6. Baz Yağlara Eklenen Katkı Maddeleri**

Katkı maddelerinin işlevi, yağın mevcut özelliklerini geliştirmek, yağa yeni özellikler kazandırmak veya istenmeyen özelliklerini minimize etmek suretiyle baz yağların yağlama kabiliyetini geliştirmektir. Hemen hemen tüm yağlayıcılar bir veya birkaçının birlikte kullanıldığı kimyasal katkı maddelerini içermektedir. Bunun nedeni, formüle edilmemiş yağlayıcıların veya baz yağların günümüz ekipmanlarında etkili bir şekilde performans göstermesi için ihtiyaç duyulan özelliklere sahip olmamasıdır [34, 36].

Yağ katkı maddeleri birçok farklı işlevi yerine getirir ve genel olarak kimyasal olarak aktif (duyarlı) ve pasif (duyarsız) şeklinde sınıflandırılabilir. Kimyasal olarak pasif katkı maddeleri, eklendiği yağlayıcının fiziksel özelliklerini iyileştirir ve akma noktası

düşürücüler, köpük önleyiciler ve viskozite değiştiriciler gibi katkı maddeleri bu sınıfın içinde yer alır. Kimyasal olarak aktif katkı maddeleri ise, metal yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar sonucu koruyucu film oluştururlar. Bu tür katkı maddeleri arasında dispersanlar, deterjanlar, aşınma önleyici ve sürtünme düşürücü, aşırı basınç maddeleri, oksidasyon önleyiciler ve pas ve korozyon önleyiciler bulunur. Yağlayıcının uygulama alanı, ilgili katkı maddesinin seçimi için başlıca kriterdir. Günümüzde birçok modern katkı maddesi, çeşitli işlemlere sahip önceden karıştırılmış bir paket olarak tedarik edilmektedir [34, 36].

### **1.3. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı**

Bu tez çalışmasında iki çeşit sıvı baz yağdan biri olan SAE 20W50 motor yağına molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve kalsiyum Florür ( $\text{CaF}_2$ ) katkıları, sıvı baz yağlardan diğeri olan ham fındık yağına toz ve granül borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) katkıları eklenmiştir ve tribolojik davranışları araştırılmıştır. Bu bölümde kullanılan katkılı yağlar ile ilgili literatürdeki çalışmaların özeti ve kullanım amaçları hakkında bilgi verilecektir.

#### **1.3.1. Molibden Disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve Kalsiyum Florür ( $\text{CaF}_2$ ) Katkı Maddelerinin Baz Yağlarda Kullanımı ile İlgili Çalışmalar**

Avrupa Petrol Katkı Maddesi Üreticileri Teknik Komitesi (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, ATC) katkı maddelerinin yağların performansına ve ömrüne etkileri hakkında detaylı bir rapor hazırlamıştır. Endüstriyel yağlayıcılar için ana katkı sınıfları kimya, etki şekli ve uygulama açısından tartışılmıştır. Yağlayıcıların kendi içinde ve katkı maddelerinin görevlerine göre sınıflandırıldığı raporda, uygun katkı maddelerinin endüstriyel yağların tribolojik özelliklerine çok büyük katkı sağladığı vurgulanmıştır. Katkıların kimyasal özelliklerinin ve çalışma sistemlerinin de anlatıldığı çalışmada, katı, sıvı veya karışım olabilecekleri ifade edilmiştir. Ayrıca raporda, test metotlarından ve katkıların uygulama alanlarından da bahsedilmiştir. Petrol bazlı katkı maddelerinin birçoğunun ağır metaller ve hidrokarbonlar içerdiği gösterilmiştir. Ancak katkıların üretimi, kullanımı ve yok edilmesinin yasalar ile sınırlandırıldığı da ifade edilmiştir. Bununla beraber, Avrupa marketinde endüstriyel yağlayıcıların önemli bir yer tuttuğu ve Avrupa'da kullanılan endüstriyel yağlayıcı hacminin dünyadaki yağ kullanım

hacminin yaklaşık %25'ine tekabül ettiği belirtilmiştir [6].

Avrupa Petrol Katkı Maddesi Üreticileri Teknik Komitesinin (Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, ATC) hazırlamış olduğu bir diğer raporda, yağlayıcı katkıların kullanımı, faydaları ve çevre sağlığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yağ katkı maddeleri kimyasal yapılarına ve işlevlerine göre sınıflandırılmış ve kullanım alanları hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Genel olarak yağ katkı maddelerinin motor elemanlarının yüzeylerini koruması, yağlayıcının fiziksel özelliklerini düzenlemesi, motordaki birikintileri ve etkilerini kontrol altına alması ve enerji tasarrufu sağlaması gibi birincil fonksiyonları olduğu ifade edilmiştir. Bunun yanında farklı birincil görevlere sahip katkı maddelerinin de olabileceği belirtilmiş ve genel anlamda tüm katkıların yağların tribolojik özelliklerini geliştirdiği vurgulanmıştır. Katkıların kimyasal içerikleri üzerinde detaylı bilgi veren rapor, yasaların kısıtlayıcı etkisi olduğundan bahsetmiş ve bilim insanlarının yeni yağ katkıları geliştirme çalışmaları yaptığını da belirtmiştir. Avrupa'daki motor yağı endüstrisinin profili hakkında bilgiler veren doküman, katkı maddelerinin tarihsel gelişiminden de bahsetmiştir. Sağlık ve çevre yönünden detaylı bir inceleme sunan rapor, katkı maddelerinin çoğunun memelilerde düşük ancak suda yaşayan organizmalarda yüksek toksik etki oluşturabileceğini belirtmiştir. Yağ katkı maddelerinin çoğunun molibden, nitrojen, çinko, fosfor ve sülfür vb. ağır metaller içerdiği ve endüstride aktif olarak kullanıldığını ve ayrıca fazla temas halinde toksik etkileri olabileceğini ifade edilmiştir. Ayrıca, yağların ve katkı maddelerinin üretimi, kullanımı ve yok edilmesi ile ilgili kısıtlamalar ve düzenlemeler hakkında bilgi verilmiştir [40].

Wu ve arkadaşları, parafin yağına katkı maddesi olarak benzer boyut (1-2  $\mu\text{m}$ ) ve morfolojideki bor nitrür (BN) ve molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) partikülleri ilave etmiş ve elde edilen katkılı yağların tribolojik davranışlarını block-on-ring test cihazı kullanarak incelemiştir. Farklı katkı oranları ve yüklerde çizgisel temas geometrisinde gerçekleştirilen deneylerde, BN partikülleri yağlayıcılık özelliklerini büyük ölçüde iyileştirirken  $\text{MoS}_2$  katkısı beklenen sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici davranışı sergileyememiştir. Sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici olarak iki katkı maddesi için de uygun katkı oranı ağırlıkça %0,25 olarak belirlenmiştir. Temas yüzeyinde katkı maddesi olarak BN partiküllerini, BN ve bor oksit ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) bileşiği şeklinde elde ederken,  $\text{MoS}_2$  partiküllerinin karmaşık bir tribofilm oluşturduğunu tespit edilmiştir. Tribofilm özelliklerinin yağlama performansını artırma hususunda önemli olduğunu ancak katmanlar arası kesme kuvvetini arttırmadığı sonucuna varılmıştır. Aşınma önleyici olarak ısı

kararlılığı ve mukavemeti yüksek bor bazlı tribofilmin tercih edilebileceği ifade edilmiştir [41].

Gansheimer ve Holinski, parafin yağına ve lityum sabunlu grese farklı katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> partikülleri ilave etmiş ve sınır yağlama koşullarında aşınma ve sürtünmeye etkilerini araştırmışlardır. Parafin içerisinde MoS<sub>2</sub> katkısının tribolojik etkileri block-on-ring test cihazı yardımı ile çizgisel temas geometrisinde ve lityum sabunlu grese MoS<sub>2</sub> katkısının tribolojik etkileri ise four-ball test cihazı yardımı ile noktasal temas geometrisinde gerçekleştirilmiştir. MoS<sub>2</sub> katkısı her iki yağ koşulunda da sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici etkiler göstermiştir. Yağlayıcı olarak MoS<sub>2</sub> katkısının sınır yağlama koşullarında sürtünme yüzeyleri arasında karmaşık ve sürekli bir yağ filmi oluşturduğu belirlenmiştir. Yüksek sürtünme sıcaklıklarında (700°C) MoS<sub>2</sub> ve sürtünme yüzeyi olan çelik arasında kimyasal etkileşim gerçekleştiği ve MoS<sub>2</sub>'ün çelik yüzeyine nüfuz ederek sertliği arttırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca çinko dialkilditiofosfat (ZDDP) katkısına göre MoS<sub>2</sub>'ün belirli çalışma koşullarında daha iyi bir aşınma önleyici olduğu belirtilmiştir [42].

Wu ve arkadaşları, ağır metaller içeren MoS<sub>2</sub> ve ZDDP nanoparçacıklarını katkı maddesi olarak ISO VG 32 beyaz yağına farklı oranlarda karıştırmış ve oluşturulan katkılı yağların tribolojik özelliklerini block-on-ring test cihazı yardımı ile incelemiştir. Çizgisel temas geometrisinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, nano-MoS<sub>2</sub> ve ZDDP için sırasıyla uygun katkı oranları ağırlıkça %0,25 ve %1 olarak belirlenmiştir. Düşük yüklerde ZDDP ve MoS<sub>2</sub> katkıları benzer sürtünme, aşınma ve yağ sıcaklığı davranışı gösterirken, yüksek yüklerde MoS<sub>2</sub> parçacıklarının sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici olarak daha etkili bir katkı maddesi olduğu belirlenmiştir. Elde SEM sonuçları, nano-MoS<sub>2</sub> parçacıklarının ağırlıkça %1 ZDDP katkısına kıyasla daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu doğrulamıştır. Ayrıca EDS ve XPS analizleri, aşınma izi üzerindeki tribofilmin zengin MoS<sub>2</sub> ve fosfattan oluştuğunu ortaya koymuş ve MoS<sub>2</sub> katkısının baz yağın tribolojik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir [43].

Çiçek benzeri yapıdaki nano- MoS<sub>2</sub> (250 nm) katkısının iki farklı baz yağ içerisindeki sürtünme özelliklerini inceleyen Tontini ve arkadaşları, pin-on-disc test cihazı yardımıyla noktasal temas geometrisinde deneylerini gerçekleştirmişlerdir. MoS<sub>2</sub> katkısı poliolester yağın ortalama sürtünme katsayısına herhangi bir etki göstermezken, naftenik yağın sürtünme özelliklerini büyük oranda azaltmıştır. MoS<sub>2</sub> partikülleri ve naftenik yağ arasındaki bu durumun, naftenik gruplar ile MoS<sub>2</sub> katmanları arasındaki güçlü van der Waals etkileşimlerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [44].

Kalin ve arkadaşları, katkı maddesi olarak MoS<sub>2</sub> nanotüplerinin polialfaolefin (PAO) baz yağının tribolojik davranışlarına etkilerini ball-on-disc test cihazı kullanarak incelemiştir. Sınır yağlama şartlarında ve noktasal temas geometrisinde gerçekleştirilen deneylerde, baz yağa MoS<sub>2</sub> nanotüplerin eklenmesi, sürtünme ve aşınma davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir. SEM ve EDS analizleri ile aşınma yüzeyleri incelenmiş ve temas alanında MoS<sub>2</sub> nanotüp bazlı bir tribofilm oluşumunun sürtünme ve aşınmanın azaltılmasına yardımcı olduğu belirtilmiştir [45].

Yi ve Zhang, üç farklı morfolojideki MoS<sub>2</sub> partikülleri ile sıvı parafini sentezlemiş ve oluşan katkılı yağların tribolojik özelliklerini ball-on-disc test düzeneği kullanarak incelemiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları, katkı maddesi olarak MoS<sub>2</sub> partiküllerinin tüm durumlarda sıvı parafinin yağlayıcılık özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Ağır yük durumunda, tabaka morfolojisine sahip nano-MoS<sub>2</sub> partiküllerinin, çiçek ve küre tipli nano-MoS<sub>2</sub> partikülleri ile karşılaştırıldığında daha iyi sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici davranış sergilediği görülmüştür. MoS<sub>2</sub> partiküllerinin morfolojisinin yağların tribolojik davranışı üzerinde bariz bir etkiye sahip olduğunu belirtilmiştir [46].

Sgroi ve arkadaşları, yağlayıcıların performansını iyileştirmek için tam formüle edilmiş SAE 5W30 motor yağına molibden disülfür (MoS<sub>2</sub>) ve tungsten disülfür (WS<sub>2</sub>) katkıları ekleyerek sürtünme ve aşınma önleyici özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Valf mekanizmalı dizel motorundaki gerçek tribolojik koşulların simüle edildiği bir düzeneğin kullanıldığı deneylerde, motor yağına eklenen nano-MoS<sub>2</sub> partiküllerinin sürtünme katsayısı yaklaşık %50 oranında azalttığı bulunmuştur. Ayrıca, MoS<sub>2</sub> katkısının tüm yağlama rejimlerinde sürtünme katsayısını azaltıcı etkisi olduğu kanıtlanmıştır. Nanopartiküllerin etkisinin, birkaç saatlik testten sonra belirgin hale geldiği görülmüştür ve katkıların temas yüzeyleri arasında tribofilm oluşumuna yardımcı olduğu belirlenmiştir. Katkılı yağ koşullarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda temas yüzeyinde XPS analizi yapılmış ve aşınma izlerinde Mo ve S elementleri tespit edilmiştir ve bu durum tribofilm ile ilişkilendirilmiştir. Bu tribofilmin çalışan yüzeyleri koruduğu ve aşınma önleyici rolü olduğu belirtilmiştir [47].

Tannous ve arkadaşları, sınır yağlama koşullarında sürtünme düzenleyici ve aşınma önleyici olarak bilinen metal dikalkojenitlerden inorganik fulleren (IF) benzeri MoS<sub>2</sub> nanopartikülleri ile PAO yağını karıştırmış ve farklı yüzeylerdeki tribokimyasal etkilerini anlamaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamındaki deneyler, katkılı PAO yağı ile çelik, alüminyum, elmas-benzeri karbon gibi farklı sürtünme yüzeyleri kullanılarak

pin-on-flat test cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma yüzeylerinin EDS ve XPS ile analiz edildiği çalışmada, sadece çelik yüzeyde altıgen 2H-MoS<sub>2</sub> nano-tabakalarından oluşan bir tribofilm gözlenmiş ve sürtünme azaltıcı etki etmiştir. MoS<sub>2</sub> tabakalarının çeliğin dış yüzeyinde bulunan doğal demir oksit tabakasına dahil edildiği ve aynı zamanda MoS<sub>2</sub> ile demir atomları/demir oksit türleri arasında bir reaksiyon meydana geldiği belirtilmiştir. Oluşan bu tribokimyasal reaksiyonun, tribofilmin yüzeye yapışmasının asıl nedeni olduğu ifade edilmiştir. Reaktif olmayan yüzeylerde tribofilm oluşmadığı ve IF-MoS<sub>2</sub> nanopartiküllerinin bu yüzeylerde sürtünmenin azaltılmasına katkı sağlamadığı belirlenmiştir. Bunun yanında, metal dikalkojenit katkıların yağlama özelliklerinin, partiküllerin boyutuna, yapısına ve çalışma yüzeyindeki pürüzlülükler ile etkileşimine bağlı olduğu bildirilmiştir [48].

Kogovsek ve Kalin, PAO yağına mikro ve nanopartikül boyutunda yedi farklı katkı maddesi eklemiş ve baz yağ üzerindeki tribolojik etkilerini karşılaştırmıştır: tüp benzeri nano-MoS<sub>2</sub>, plaka benzeri micro-MoS<sub>2</sub> (2 ve 10 µm), tüp benzeri nano-WS<sub>2</sub>, nano-IF-WS<sub>2</sub>, plaka benzeri micro-grafit (20 µm) ve çok duvarlı karbon nanotüpler. Sınır yağlama koşullarında ve noktasal temas geometrisinde gerçekleştirilen deneylerde, ball-on-disc test cihazından faydalanılmıştır. Genel olarak, parçacıkların baz yağla sürtünmeyi ve aşınmayı önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Tribolojik performanslarını büyük ölçüde belirleyen şeyin parçacıkların malzemesi olduğu belirlenmiştir. Parçacık malzemesine aksine boyut etkisinin daha az olduğu ve morfolojisinin neredeyse hiç etki etmediği ifade edilmiştir. Sürtünme katsayısı verileri aynı parçacığa ait değerlerin çok yakın olduğunu ve MoS<sub>2</sub> parçacıklarının sürtünmenin azaltılmasında en etkili katkı olduğu gözlemlenmiştir. WS<sub>2</sub> partiküllerinin daha fazla oksitlendiği ve özellikle IF-WS<sub>2</sub> durumunda güçlü bir şekilde topaklaştığı görülmüştür. MoS<sub>2</sub> ve WS<sub>2</sub> partiküllerinin tüm durumlarında aşınmanın oldukça yakın ve baz yağ göre %90 kadar daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma koşulları altında temel yağlama mekanizmaları açısından nanopartiküllerin mikropartiküller üzerinde belirgin bir avantajı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, gerçek uygulama için partiküllerin yağdaki dağılım açısından göz önünde bulundurulması tavsiye edilmiştir [49].

Gulzar ve arkadaşları, literatürde yağ katkı maddesi olarak kullanılan partiküllerin tribolojik davranışları ve yağlama mekanizmalarını incelemiştir. Partiküllerin yağ içerisinde homojen dağılımı ve kararlılığı açısından nanoparçacık ve yağlayıcı uyumluluğunu, nanoparçacık morfolojisi ve konsantrasyonunun tribolojik performanstaki rolünü göz önünde bulundurarak, literatürdeki ilgili çalışmaları birleştirmeyi

amaçlamışlardır. Sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici özellikleri için test koşullarının rolünü inceledikleri raporda, araştırmacıların çoğunun noktasal ve çizgisel temas şartlarında çalışma yaptığı görülmüştür. Nanoparçacıkları üç ana grupta sınıflandıran yazarlar, mühendislik uygulamalarında metal, metaloksit, kalkojenit, karbon temelli, inorganik fulleren, bor temelli, seramik, kompozit ve polimer esaslı katkıların kullanıldığını belirtmişlerdir. İncelenen çalışmaların çoğu, nanoparçacıkla zenginleştirilmiş yağlama yağlarının tribolojik performansının iyileştiğini iddia etse de, nanoparçacıkların yağlama mekanizması tam olarak anlaşılmamıştır. Birçok nanoparçacık olması ve bunların her biri farklı uygulamalarda farklı şekillerde çalışabilmesinden dolayı, nanoparçacıkların yağlama mekanizmasının karmaşık olduğu belirtilmiştir. Katkıların yağlara dispersiyon metotları ve analizlerinden bahseden araştırma, katkıların yağ içerisindeki dağılımını ve dağılım kararlılığını uzun süre korumasının en önemli koşul ve zorluk olduğunu ifade etmişlerdir. Literatürde farklı katkılar ve kombinasyonları için farklı yağlama mekanizmalarının olduğunu tespit eden yazarlar, yağlama prensiplerini iki ana kategoride incelemişlerdir; direkt etkiler (ball bearing/rolling effect, protective film/tribofilm effect) ve yüzey iyileştirici etkiler (mending/reparing effect, polishing/smoothing effect). Nanoparçacık boyut seçimi yapılırken, yağlanan yüzeyin ortalama yüzey pürüzlülüğünün nanoparçacık yarıçapına oranının önemli bir parametre olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca parçacıkların şeklinin ve yapısını da önemli rol oynadığını literatürden birçok örnek ile kanıtlamışlardır. Bunun yanında, yağ içerisindeki nanopartikül konsantrasyonunun artmasının yağ viskozitesini arttırması ve yüksek enerji tüketimine sebep olabileceği, bu nedenle de yağ-katkı kombinasyonu formüle edilirken fizikokimyasal özelliklerin endüstrideki çalışma koşullarını sağlaması gerektiğine dikkat çekilmiştir [50].

Baş ve Karabacak, titanyum dioksit ( $TiO_2$ ), molibden disülfür ( $MoS_2$ ) ve kalsiyum florür ( $CaF_2$ ) nanoparçacıklarının dişli yağının tribolojik davranışı ve dişli kutusu performansı üzerindeki etkilerini farklı çalışma koşulları altında araştırmışlardır. Endüstri ile uyumlu bir dişli kutusu test sistemi yardımıyla gerçekleştirilen çalışmada, dişli yağı olarak ayçiçek yağı kullanılmıştır. Katkılı yağ koşullarında elde edilen güç kaybının, nanoparçacıklar kullanılmadan elde edilenden her zaman daha düşük olduğunu gösteren sonuçlar bulunmuştur ve sıcaklıktaki artışın güç kayıplarında da artışa neden olduğu belirlenmiştir. Nanoparçacıkların dişli kutusu ve performansı üzerinde benzer pozitif etkileri olduğu belirlenmişse de,  $MoS_2$  katkılı yağın diğer koşullara göre özellikle yüksek sıcaklıkta daha yüksek performans sergilediği tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda, güç kaybı ile

nanoparçacıkların yüzeylere tutunma yeteneği arasında önemli bir negatif ilişki olduğu gözlemlenmiştir. MoS<sub>2</sub> nanoparçacıklarının yüzeye yapışma eğilimi daha yüksek olduğundan cilalama (polishing/smoothing) ve yağ filmi oluşumu (tribofilm/protective film), TiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının kullanıldığı durumda yuvarlanma/bilyeli yatak (ball bearing/rolling) ve CaF<sub>2</sub> nanoparçacıklı yağ koşullarında ise tamir/onarma (reparing/mending) mekanizmalarının aktif olduğu ifade edilmiştir [51].,

Tablo 1.1. MoS<sub>2</sub> katkısının baz yağlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar

<b>Katkı Maddesi</b>	<b>Yağlayıcı</b>	<b>Test Sistemi</b>	<b>Temas Geometrisi</b>	<b>Çalışmanın Amacı</b>	<b>Referans</b>
MoS <sub>2</sub> ve BN	Parafin yağı	Block-on-ring	Çizgisel	Katkıların tribolojik mekanizmalarının belirlenmesi	Wu vd. [41]
MoS <sub>2</sub>	Lityum sabunlu gres ve Parafin yağı	Block-on-ring ve Four-ball	Noktasal ve Çizgisel	Katkının yağın tribolojik özelliklerine etkilerinin araştırılması	Gansheimer ve Holinski [42]
MoS <sub>2</sub> ve ZDDP	ISO VG 32 beyaz yağı	Block-on-ring	Çizgisel	MoS <sub>2</sub> yağlama etkinliği ve avantajlarının araştırılması	Wu vd. [43]
MoS <sub>2</sub>	Saf poliolester ve naftenik yağlar	Pin-on-disc	Noktasal	Katkı dispersiyon ve morfolojisinin tribolojik etkilerinin araştırılması	Tontini vd. [44]
MoS <sub>2</sub>	PAO	Ball-on-disk	Noktasal	Çalışma boyunca tribolojik mekanizmaların değişimi ve tribolojik etkilerinin araştırılması	Kalin vd. [45]
MoS <sub>2</sub>	Parafin yağı	Ball-on-disk	Noktasal	Katkı dispersiyon ve morfolojisinin tribolojik etkilerinin araştırılması	Yi ve Zhang [46]
MoS <sub>2</sub> , WS <sub>2</sub> ve Grafit	PAO	Ball-on-disk	Noktasal	Katkı boyut ve morfolojisinin tribolojik etkilerinin araştırılması	Kogovsek ve Kalin [49]

Mohan ve arkadaşları, katı yağlayıcıların sürtünme özelliklerini en aza indirmedeki rolünü özetlemiş ve katı yağlayıcı olarak florürlerin rolünü ortaya koymuşlardır. Literatürdeki araştırmacıların katı yağlayıcı olarak  $\text{CaF}_2$  kullandıkları ve iyi sonuçlar aldıkları çalışmalarını inceleyen yazarlar,  $\text{CaF}_2$  katkısının çeşitli malzemelerde, özellikle metaller ve seramiklerde katı yağlayıcılar olarak kullanılmasını raporlamışlardır.  $\text{CaF}_2$  temas yüzeylerinin tribolojik davranışı üzerinde güçlü bir mikro-fiziksel, kimyasal ve yapısal etkiye sahip olduğu, düşük kayma direnci ve düzlemler arası zayıf bağlara sahip yapısının grafit,  $\text{MoS}_2$  ile aynı olduğu ve bu nedenlerin  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  gibi floridleri katı yağlayıcı olarak uygun aday konumuna getirdiği ifade edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta yağlamanın zorluğu, katı yağlayıcı olarak  $\text{MoS}_2$  ve grafitin yüksek sıcaklık uygulamalarına istenilen cevabı veremediği de gösterilmiş ve  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  gibi yapışkanlığı yüksek floridlerin yüksek sıcaklıktaki yağlama uygulamaları için de uygun oldukları belirtilmiştir. Bununla birlikte araştırmacılar, yüksek sıcaklıkta katı yağlayıcı olan  $\text{CaF}_2$ 'ün oda sıcaklığında da sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici performans sergilediğini ifade edilmiştir. Bunun yanında,  $\text{CaF}_2$ 'ün suda çözünürlüğünün düşük olması ve radyasyona karşı koyabilmesi onun radyasyona maruz kalmada da kullanılacak güvenli malzemeler arasında olduğu raporlanmıştır. Ancak  $\text{CaF}_2$ , birçok matrisle iyi uyumluluk ve gelişmiş tribolojik özellikler göstermesine rağmen, bazı araştırmacıların  $\text{CaF}_2$  ilavesinin ekipman sertliğini arttırdığı ve mekanik özelliklerde düşüş gözlemlendiği bildirilmiştir. Sonuç olarak, katı bir yağlayıcı olarak  $\text{CaF}_2$  ile çok fazla çalışma yapılmadığı ve diğer düşük ve yüksek sıcaklık yağlayıcılarla birlikte kullanımının detaylı araştırılması gerektiği ifade edilmiştir ve nano- $\text{CaF}_2$  tozlarının farklı matrislere sahip sıvı yağlayıcılara yağ katkısı olarak denenebileceği önerilmiştir [52].

Deadmore ve Sliney,  $\text{CaF}_2$  ve  $\text{BaF}_2$  katı yağlayıcıların sertliğini 25 ile 670°C arasında değişen sıcaklıklarda incelemişlerdir. Bulgular, florid ötekiğinin, yaklaşık 400-500°C'de gevrek ile sünek geçişe maruz kaldığı için yüksek sıcaklıklar için iyi bir yağlayıcı olduğunu göstermiştir. Düşük gerinim oranında floridler için gevrekten süneğe geçiş sıcaklığının 25 ile 100 °C arasında olduğunu ve tek kristalli  $\text{CaF}_2$  ve  $\text{BaF}_2$  sertliğinin bu sıcaklık aralığında %40 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. İlaveten, 400 °C civarında floridlerin sertliğinin %10 seviyelerinde azaldığı gözlemlenmiştir [53].

Sliney, orta ve aşırı yüksek sıcaklıkta yağlama için (<870°C) katmanlı kafes yapısına sahip  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ , grafit floride yüksek sıcaklıklı poliamid polimer ve  $\text{CaF}_2$  bazlı kaplamalar ve kompozitlerin yağlama özellikleri ve çeşitli ortamlarda kararlılıklarını incelemiştir.

Çalışma, aşınma test cihazları, bilyalı yataklar ve kaymalı yataklardan elde edilen sonuçları içermektedir. Katı yağlayıcıların geniş bir sıcaklık aralığında çalışmaları mümkün olduğunu ifade eden yazar, MoS<sub>2</sub> ve WS<sub>2</sub> gibi katmanlı kafes yapısına sahip katı yağlayıcıların 370-425°C, grafitin 455°C, grafit floridin 480-540°C ve CaF<sub>2</sub> bazlı kaplamaların ise 870°C'a kadar yağlayıcılık özelliğini sürdürebileceği belirtmiştir. 540°C ve daha yüksek sıcaklıkta yağlama için, CaF<sub>2</sub> ve BaF<sub>2</sub> bileşenlerinin kaplama ve florür/metal kompozit içerisinde katı yağlayıcı olarak güçlü tribolojik özellikler oluşturduğu literatürdeki çalışmalar ile sunulmuştur [54].

Baş ve arkadaşları, katkı maddesi olarak benzer boyuttaki (3-4 µm) MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> partiküllerinin lityum sabunlu gres üzerindeki tribolojik etkilerini araştırmışlardır. Deneyleri farklı katkı oranı, devir ve yüklerde block-on-ring deney düzeneği kullanılarak yüzeysel temas geometrisinde gerçekleştirmişler. Lityum sabunlu grese ağırlıkça %1-1,5 oranında MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katılmasının sürtünme katsayısını sırasıyla %50 ve %37,5 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma için uygun şartlarda her iki katkı maddesinin de aşınma önleyici olduğunu kanıtlanmıştır. Uygun katkı koşullarında (ağırlıkça %1-1,5) MoS<sub>2</sub> katkısının yüzeyi koruyucu (protective film) etki gösterdiği ve en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu SEM analizi ve profilometre yardımıyla belirlenmiştir. EDS analizi yardımıyla incelenen aşınmış çalışma yüzeylerinde katkı maddeleri ile ilintili eser miktarda Mo ve F elementleri tespit edilmiş ve bu durumun oluşan yağ filminin inceliğine işaret ettiğini belirtmişlerdir. MoS<sub>2</sub>'e göre daha kararlı bir sürtünme davranışı sergileyen CaF<sub>2</sub> katkısının, yüzeysel temas koşullarında ve çevrenin önemli olduğu durumlarda ağır metal içeren MoS<sub>2</sub> yerine yağ katkı maddesi olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir [55].

Sharma ve Anand, baz olarak Fe-Cu-C ve katı yağlayıcı olarak CaF<sub>2</sub> içeren kompozitler geliştirmiş ve farklı yükler altında, oda ve yüksek sıcaklıklarda CaF<sub>2</sub>'ün aşınma ve sürtünme davranışlarına etkilerini incelemişlerdir. CaF<sub>2</sub>'ün yüksek sıcaklıklarda olduğu kadar oda sıcaklığında da artan tribolojik özellikler sunabileceğini belirlenmiştir. Ancak kompozit içerisinde CaF<sub>2</sub> içeriğinin artışı ile kompozitin yoğunluk ve basınç dayanımı gibi bazı fiziksel ve mekanik özelliklerde hafif bir azalma olduğunu kanıtlanmıştır [56].

Zhang ve arkadaşları, yüzey modifikasyonu ve ısıldama özelliklerine sahip nano-CaF<sub>2</sub> parçacıklarını sentezlemiş ve PAO baz yağına katkı maddesi olarak bu nanoparçacıkları ekleyerek yağların tribolojik özelliklerine etkilerini ve çalışma esnasında ısıldama ile sıcaklık izleme/algılama verilerini incelemişlerdir. Deneyler ball-on-disc deney düzeneği kullanılarak noktasal temas geometrisinde gerçekleştirilmiştir. Katkı maddesi dispersiyon

kararlılığının yağlama yağının tribolojik performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için önemli bir kriter olduğu vurgulanmıştır. PAO baz yağına ağırlıkça %0-4 oranında  $\text{CaF}_2$  nanoparçacıkları dağıtıldığında, 3 aydan fazla süre geçmesine rağmen herhangi bir çökme belirtisi olmadığı ve çok kararlı dispersiyon sergilediği tespit edilmiştir. Yağ katkı maddesi olarak oleik asitle modifiye edilmiş  $\text{CaF}_2$  nanoparçacıklarının PAO baz yağının orijinal tribolojik özelliklerini iyileştirdiği ve uzun süreli koruyabildiği bildirilmiştir.  $\text{CaF}_2$  nanoparçacıklarının değişim kaynaklı ışıldamasının, PAO baz yağının doğrudan sıcaklık değişimini gösterdiğini tespit edilmiştir. Yüzey modifiyeli ve ışıldama özelliklerine sahip  $\text{CaF}_2$  nanoparçacıklarının, yağlarının sıcaklık değişimi izleme/algılaması için kullanılabileceği ileri sürülmüştür [57].

Wang ve arkadaşları, baz yağ olarak kullandıkları lityum sabunlu grese katkı maddesi olarak  $\text{CaF}_2$  nanokristalleri (60 nm) eklemiş ve baz yağ üzerindeki tribolojik etkilerini araştırmışlardır. Çalışmadaki deneyler, four-ball test düzeneği kullanılarak noktasal temas geometrisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada  $\text{CaF}_2$  nanokristalleri için optimum katkı oranının ağırlıkça %1 olduğunu belirleyen yazarlar,  $\text{CaF}_2$  katkısının baz yağın sürtünme, aşınma ve aşırı basınç özelliklerinde iyileştirme yaptığını gözlemlemişlerdir. SEM analizi katkılı ve katkisız çalışan yüzeyler incelenmiş ve  $\text{CaF}_2$  nanokristallerinin çalışma yüzeyinde kazıma (scuffing) olayını azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sınır yağlama koşullarda aşınmış çelik yüzeyinde karmaşık tribokimyasal reaksiyonların meydana geldiği XPS analizi ile belirlenmiştir [58].

Bu tez çalışmasında, kullanılan iki sıvı baz yağdan biri olan SAE 20W50 motor yağına ağır metal içeren ve yaygın olarak kullanılan molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve alkali metal bir tuz olan kalsiyum florür ( $\text{CaF}_2$ ) partikülleri katkı maddesi olarak ilave edilmiştir ve katkı maddelerinin baz yağın tribolojik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma, düşük kayma direncine sahip  $\text{CaF}_2$  mikropartiküllerinin çevrenin önemli olduğu çalışma koşullarında katkı maddesi (sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici) olarak  $\text{MoS}_2$  katkısına alternatif olabileceğine katkı sağlamak amacı taşımaktadır. Ayrıca literatürde baz yağlara katkı maddesi olarak  $\text{MoS}_2$  ve  $\text{CaF}_2$  eklenmesi ile ilgili çalışmaların genellikle noktasal ve çizgisel temas geometrisine sahip sistemlerde gerçekleştirilmesi, bu tez çalışmasını katkılı yağların tribolojik davranışlarını yüzeysel temas geometrisinde araştırmaya yönelmiştir. Deneysel tez çalışması, bu konudaki literatüre yüzeysel temas geometrisinde katkı yapmak ve yeni araştırmacılara rehber olmak amaçlarını da taşımaktadır.

Tablo 1.2. CaF<sub>2</sub> katkısının baz yağlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar

Katkı Maddesi	Yağlayıcı	Test Sistemi	Temas Geometrisi	Çalışmanın Amacı	Referans
TiO <sub>2</sub> , MoS <sub>2</sub> ve CaF <sub>2</sub>	Ayçiçek yağı	Dişli kutusu (Gearbox)	Çizgisel	Katkıların yağın tribolojik özelliklerine ve dişli kutusunun performansına etkilerinin araştırılması	Baş ve Karabacak [51]
MoS <sub>2</sub> ve CaF <sub>2</sub>	Lityum sabunlu gres	Block-on-ring	Yüzeysel	Katkıların yağın tribolojik özelliklerine etkilerinin araştırılması	Baş vd. [55]
CaF <sub>2</sub>	PAO	Ball-on-disc	Noktasal	Katkının yağın tribolojik özelliklerine etkileri ve yağlama yağı sıcaklığının izlenmesi/algılanması için kullanımını araştırmak	Zhang vd. [57]
CaF <sub>2</sub>	Lityum sabunlu gres	Four-ball	Noktasal	Katkıların yağın tribolojik özelliklerine etkilerinin araştırılması	Wang vd. [58]

### 1.3.2. Borik Asit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) Katkı Maddesinin Baz Yağlarda Kullanımı ile İlgili Çalışmalar

Erdemir yaptığı çalışmalar ile, borik asidin katı yağlayıcı olarak veya yarı katı ve sıvı yağlar içerisinde katkı maddesi olarak tribolojik özellikleri geliştirdiğini ve endüstride kullanımının uygun olduğunu kanıtlamıştır [59, 60].

Lovell ve arkadaşları, özel bir sac germe aparatı aracılığıyla borik asit (ağırlıkça %5) ve kanola yağı kombinasyonlarının sac metal şekillendirme işlemleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel sonuçlar, borik asit-kanola yağı kombinasyonunun ticari olarak uygulanabilir ve çevre dostu yağlayıcı olarak önemli bir potansiyel göstermiştir. Çalışma, yenilemenin mümkün olmadığı ve çevre dostu olmayan yağlayıcıların bertarafının pahalı olduğu üretim süreçlerinde kullanılabileceğini göstermesi bakımından önemlidir [61].

Kabir ve arkadaşları, farklı partikül büyüklüklerinde ve katkı oranındaki borik asit partiküllerini kanola yağı ile karıştırmış ve yağlayıcı performansına etkilerini pin-on-disc test düzeneği kullanarak araştırmışlardır. Birçok farklı kombinasyonda gerçekleştirilen deneylerde, sürtünmeyi en aza indirmek için 350-700 µm partikül boyutunda ve %7 katı

hacim oranına sahip borik asit-kanola yağı kombinasyonu optimum koşul olarak belirlenmiş ve sürtünme katsayısı ile borik asit partikül boyutu arasındaki ters ilişki olduğu ifade edilmiştir. Sonuçlar, borik asit-kanola yağı karışımının sac metal şekillendirme gibi endüstriyel uygulamalarda yağlayıcı olarak kullanımı için uygun olduğunu göstermiştir [62].

Düzcükoğlu ve Acaroğlu, borik asit katkısının kanola yağı üzerindeki aşınma performansları pin-on-disc test cihazında incelenmiştir. Ticari madeni yağ ve kanola yağı kombinasyonlarının karşılaştırıldığı deneyler, sabit hızda ve farklı yüklerde gerçekleştirilmiştir. Katmanlı yapıya sahip borik asit parçacıklarının tabakalarının birbiri üzerinde kolaylıkla kayarak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltabildiği ifade edilmiştir. Ayrıca, bor kristallerinin elmas benzeri sertliği nedeniyle birbirine temas eden yüzeyleri fiziksel olarak sert bir filmle kaplayarak sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan hasarları minimuma indirdiği belirtilmiştir [63].

Düzcükoğlu ve Şahin, saf kanola yağı ve %5 borik asit katkılı kanola yağının beklenmedik yağ tahliyesi sonrasında tribolojik davranışlarını araştırmışlardır. Pin-on-disc test düzeneğinde sabit hız ve yükte gerçekleştirilen deneyler sınır sürtünme koşullarında değerlendirilmiştir. Sürekli yağlama 800 m sonra kesilmiş ve sistem yağsız 10 km çalıştırılmıştır. Borik asit katkılı kanola yağı için elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin, tüm durumlarda saf kanola yağından daha düşük olduğu kaydedilmiştir. Borik asidin pim yüzeyinde çatlaklara nüfuz ederek sürtünme katsayısını azaltan bir yağ filmi oluşturduğu ifade edilmiştir. Beklenmedik bir yağ tahliyesi durumunda, borik asit katkılı kanola yağının, yağ deposunu yeniden doldurmaya veya sistemi durdurmaya yetecek kadar yağlamaya devam ettiği sonucuna varılmıştır [64].

Baş ve Karabacak, bor bileşiklerinin 20W50 motor yağı üzerindeki etkilerini block-on-ring test cihazı kullanılarak araştırmışlardır. Deneylerde borik asit ( $H_3BO_3$ ) ve hegzagonal bor nitrür (hBN) katkıları farklı konsantrasyonlarda motor yağına eklenmiş ve farklı yüklerdeki tribolojik davranışları incelenmiştir. Bor bileşik katkılı yağların katkısız motor yağına kıyasla tüm çalışma koşullarında daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip olduğu görülmüştür ve her iki katkı maddesi için optimum katkı oranı %4 olarak belirlenmiştir. Motor yağlarında bor bileşiklerinin katkı maddesi olarak kullanımının, sınır veya karışık yağlama koşullarında sürtünme katsayısını düşürebileceği sonucuna varılmıştır.  $H_3BO_3$  katkısının sürtünme katsayısını düşürmede hBN katkısından daha büyük etkiye sahip olduğu ve artan temas yükü ile bu etkinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca optimum katkılı yağ şartlarında 170 kW dizel motor kullanılarak yakıt tüketim deneyleri de

yapılmıştır ve borik asit ve bor nitrür katkı maddeleri ile yakıt tüketiminde sırasıyla %3,6 ve %2,7'lik bir azalma olduğunu görülmüştür [65].

Lovell ve arkadaşları, borik asit ( $H_3BO_3$ ) partikül boyutunun kanola yağının aşınma ve sürtünme performansına etkilerini pin-on-disc test düzeneği kullanarak incelemişlerdir. Deneylede farklı ortalama boyutlarda (20 nm, 600 nm ve 4  $\mu m$ ) borik asit tozu kanola yağı ile homojen olarak karıştırılarak çevreci yağ kombinasyonları ve ayrıca karşılaştırma için piyasada aktif şekilde kullanılan  $MoS_2$  tozu (0,5-10  $\mu m$ ) kanola yağı kombinasyonları hazırlanmıştır. Deneyleler sonucunda, nano (20 nm) borik asit katkılı yağlayıcılar, sürtünme ve aşınma performansı açısından diğere tüm yağlayıcılardan daha iyi performans göstermiştir. Nano boyutlu borik asit katkılı yağlayıcılar, daha büyük boyutlu borik asit ve  $MoS_2$  katkılı yağlayıcılardan daha düşük aşınma oranı sergilemiştir. Yüzey pürüzlülüğünden daha büyük olan parçacıklar aşındırıcı etki gösterirken, daha küçük parçacıkların yüzey pürüzlerini doldurarak sürtünmeyi azalttığı sonucuna varılmıştır. Borik asit - kanola yağı çevre açısından zararsız ve yenilenebilir olduğundan, bu çalışmanın katkı maddelerinin partikül boyutunu optimize ederek çok işlevli yeşil yağlayıcıların geliştirilmesine katkı sağlayabileceği ifade edilmiştir [66].

Kim ve arkadaşları, yüzey aktif maddenin (sorbitan trioleat) borik asit katkılı baz yağ üzerindeki tribolojik etkilerini reciprocating test düzeneği üzerinde incelemişlerdir. Sonuçlar, yüzey aktif maddenin öğütme işleminden sonra borik asit parçacıklarının topaklanmasını önlediğini ve böylece yüksek sıcaklıklarda iyi bir dağılım kararlılığı sağladığını göstermiştir. Borik asit katkılı baz yağa yüzey aktif madde eklenmesi, baz ve tam formüle edilmiş yağa kıyasla sürtünme katsayılarını sırasıyla %58 ve %42 oranında ve aşınma izi çapını sırasıyla %48 ve %34 oranında azaltmıştır. Yazarlar bu çalışma ile, endüstriyel yağlayıcılara yüzey aktif madde ve borik asit kombinasyonunun katkı maddesi olarak kullanımının, aşınma ve sürtünme katsayısını azaltarak enerji tasarrufu için potansiyel kullanıma sahip olabileceğini ifade etmiştir [67].

Deshmukh ve arkadaşları, mühendislik sistemlerinde yenileme yapılmadan kullanılabilen, özellikle çevre dostu olan yağlayıcıların geliştirilmesi amacıyla, kanola yağı, dişli yağı ve borik asit katkısının çeşitli kombinasyonlarını kullanarak ticari bir fren valfi düzeneğinde yağların uzun süreli performans etkilerini incelemişlerdir. Yalnızca başlangıçta disk yüzeyine yağlayıcı kombinasyonları uygulanmış ve 6000 m'den daha fazla kayma mesafesi boyunca ikmallsiz deneyleler gerçekleştirilmiştir Ticari dişli yağı ile birleştirildiğinde, borik asit karışımının hem sürtünme hem de aşınma performansı açısından

oldukça etkili olduğunu kanıtlamıştır. Bunun yanında, kanola yağı-borik asit kombinasyonu, test edilen tüm yağlayıcılar arasında en iyi aşınma performansını vermiştir ve bu kombinasyonun bazı mühendislik uygulamalarında alternatif bir yağlayıcı olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır [11].

Trzepieciński, sac metal şekillendirme işleminde kullanılması için çevre dostu bir yağlayıcı geliştirmek amacıyla borik asit ve farklı bitkisel yağları kullanarak kombinasyonlar geliştirmiş ve strip-drawing test cihazında (şerit çekme testi) performans etkilerini incelemiştir. Katkısız ve borik asit katkılı palm yağı, her iki durumda da sürtünme katsayısında en büyük azalmayı sağlayan bitkisel yağ olmuştur ve ayrıca uzun zincirli yağ asitlerinin varlığı nedeniyle sınır sürtünmesi altında iyi yağlama sağlamıştır. Palm yağı ve ağırlıkça %5 borik asit karışımın, 15-60 MPa nominal basınç koşullarında diğer yağlayıcı karışımlarından daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Bitkisel yağlara borik asit ilavesi, saf yağlara kıyasla yağlama veriminde %15 yakın bir artış sağlamıştır. Zeytin ve kolza yağının sürtünme dirençlerini azaltmadaki etkinliğinin nominal basınca bağlı olduğu tespit edilmiştir [68].

Literatürde baz yağ katkı maddesi olarak borik asidin ( $H_3BO_3$ ) yanında hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısının da sıklıkla kullanıldığı görülmüştür ve çalışmanın irdelenmesine yardımcı olacağı düşünüldüğü için, bu bölümde hBN katkısının literatürdeki yerine de kısaca yer verilmiştir.

Kimura ve arkadaşları, ring-on-roller test cihazı kullanarak parafinik mineral yağına eklenen bor nitrür (BN) partiküllerinin sürtünme ve aşınma etkilerini, kayma yüzeylerinin gözlem ve analizinin sonuçlarıyla karşılaştırarak tartışmışlardır. Çalışmada ring malzemesi olarak rulman çeliği ve roller malzemesi olarak rulman çeliği ve dökme demir kullanılmıştır. Rulman çeliğinin aynı malzeme üzerinde kayması durumunda, BN sürtünme katsayısını yükseltmişse de aşınmayı önemli ölçüde azaltmıştır ve yüzeylerde oksitlenmiş bor kaldığı tespit edilmiştir. Rulman çeliği dökme demire üzerinde kaydırıldığında ise, BN hem sürtünme katsayısını hem de aşınmayı azaltmıştır ve yüzeylerdeki kalıntının çoğunlukla BN olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, katkı maddesi olarak BN kullanılması durumunda aşınmayı azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [69].

Reyes ve arkadaşları, zeytinyağı ve badem yağına levha morfolojisine sahip nano BN katkısı eklemiş ve yağların tribolojik performansına etkilerini ball-on-disc test düzeneği kullanarak araştırmışlardır. Farklı katkı oranlarında ve yüklerde gerçekleştirilen deneylerde, zeytinyağı ve badem yağına eklenen BN katkısının sürtünme katsayısını ciddi şekilde

düşürdüğü belirlenmiştir. BN katkısının zeytin ve badem yağı gibi doğal yağların tribolojik özelliklerini iyileştirdiğı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bitkisel yağların özelliklerinin geliştirilmesi ile endüstriyel makineler için potansiyel yağlayıcılar olabilecekleri ifade edilmiştir [69].

Abdullah ve arkadaşları, 15W40 motor yağına katkı maddesi olarak hegzagonal bor nitrür (hBN) nanopartikülleri eklemişler ve four-ball test cihazı kullanarak katkı maddesinin yağ üzerindeki aşırı basınç etkilerini araştırmışlardır. Nanoparçacık katkılı yağın, temas yüzeylerinde adezyon aşınmasını azalttığı ve yüksek basınç oluşumunu geciktirdiğı belirlenmiştir. Bu etkilerin, temas yüzeyleri arasında doğrudan çarpışmayı azaltan bir tribofilm oluşumundan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları, yağlama yağının yük taşıma kabiliyetini geliştirmek için katkı maddesi olarak hBN'nin potansiyelini göstermiştir [70].

Wang ve arkadaşları, baz yağ olarak hint yağına hegzagonal bor nitrür (hBN) nanopartikülleri eklemişler ve ball-on-disc test cihazı kullanarak katkı maddesinin farklı çalışma koşulları altında tribolojik etkilerini araştırmışlardır. Düşük sıcaklıklarda katkı maddesi artışı hint yağının viskozitesini artırırken, yağ sıcaklığının yükselmesi ile durum tersine dönmüştür. Düşük yük ve yüksek hızda karışık ve elastohidrodinamik yağlama rejimleri oluşmuştur ve hBN katkısı sürtünmeyi arttırmasına rağmen aşınma %55 oranında azaltıcı etki göstermiştir. Aşınma azaltıcı etkinin yüksek dinamik viskozite ve yağ filmi kalınlığından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yüksek yük ve düşük hızdaki çalışmalarda ise, sınır yağlama rejimi oluşmuş ve viskozite azalmıştır. Optimum katkılı yağ koşullarındaki partikül boyutu, yağ filmi kalınlığından büyük olduğu için, sürtünme ve aşınma da sırasıyla %30 ve %52 oranında azalma tespit edilmiştir. Eş çalışan yüzeyler arasında katkı maddesinin etkin mekanizmasının yuvarlanma etkisi (rolling effect) olduğu bildirilmiştir [71].

Reeves ve arkadaşları, çevre dostu yağ karışımlarında katkı maddelerinin partikül boyutunun tribolojik etkilerini araştırmak amacıyla, baz yağ olarak kanola yağına farklı partikül boyutlarında hegzagonal bor nitrür (hBN) partikülleri eklemiştir. Farklı katkı oranlarında ve partikül boyutlarında birçok yağ karışımı elde eden yazarlar, çalışmalarını pin-on-disc deney düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Kanola yağına katılan nanoparçacıkların, mikron parçacıklara kıyasla gelişmiş tribolojik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Yüzey pürüzlerinden daha büyük partiküllerin eş çalışan yüzeyler arasına girerek direk teması önlediğı ve yükün bir kısmını taşıdığı ve sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olduğu ileri sürülmüştür. Bunun yanında, büyük parçacıkların aşındırıcı rolü

olduğu için yüksek aşınma oranlarına ve pürüzlü yüzeylere neden olabileceği ifade edilmiştir [72].

Charoo ve Wani, çeşitli temas yüklerinde ve katkı oranlarında hegzagonal bor nitrürün (hBN) baz yağ olarak 20W50 motor yağı üzerindeki tribolojik etkilerini four-ball ve universal pin-on-disc deney düzeneklerini kullanarak incelemiştir. Four-ball test düzeninde gerçekleştirilen deneylerde, motor yağına hBN katkısı bilyaların aşınmasını %20 oranında azaltmıştır. Sürtünme deneylerinin gerçekleştirildiği universal pin-on-disc deneylerinde ise, hBN katkısı baz yağın sürtünme ve aşınma özelliklerine düşürücü yönde etki etmiştir [73].

Çelik ve Göncü, baz yağ olarak SAE10W motor yağına hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısının AISI 4140 çeliği üzerindeki sürtünme ve aşınma etkilerini araştırmışlardır. Farklı katkı oranı ve yüklerdeki deneyler, ball-on-disc test cihazında gerçekleştirilmiştir. Yağı farklı hacimsel oranlarda eklenen katkı miktarları yağ viskozitesini etkilemezken, çeliğin sürtünme ve aşınma özelliklerini iyileştirdiği ileri sürülmüştür. Nanopartiküller numune yüzeyindeki pürüzleri doldurarak aşınma miktarını düşürdüğü ve hBN katkısının tamir etkisi (mending effect) ile bu işlevi gerçekleştirdiği bildirilmiştir [74].

Bu tez çalışmasında Çevre Koruma Ajansı tarafından belirlenen Temiz Su Yasası (Clean Water Act) kapsamında kirletici olmayan katkı maddeleri sınıfında yer alan ve Türkiye’de yüksek miktarda rezervi bulunan granül ve toz borik asit katkıları kullanılmıştır. Borik asit kullanımı ile yağlarda çevre dostu katkı kullanımı, katkı morfolojisinin yağların tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak amaçlanmıştır.

Tablo 1.3. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> katkısının baz yağlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar

<b>Katkı Maddesi</b>	<b>Yağlayıcı</b>	<b>Test Sistemi</b>	<b>Temas Geometrisi</b>	<b>Çalışmanın Amacı</b>	<b>Referans</b>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Sıvı ve yarı katı yağlar	Pin-on-disc ve Ball-on-disc	Noktasal, çizgisel ve yüzeysel	Katkı maddesinin yağların tribolojik özelliklerine etkilerinin araştırılması	Erdemir [59, 60]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Kanola yağı	Sac germe aparatı	Yüzeysel	Çevre dostu karışımın sac metal şekillendirme işlemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması	Lovell vd. [61]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Kanola yağı	Pin-on-disc	Noktasal	Katkı maddesinin boyutu ve katkı oranının yağın tribolojik özelliklerine etkilerinin araştırılması	Kabir vd. [62]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Kanola yağı	Pin-on-disc	Noktasal	Karışımın tribolojik özelliklerinin incelenmesi	Düzcükoğlu ve Acaroğlu [63]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Kanola yağı	Pin-on-disc	Noktasal	Beklenmedik yağ tahliyesinin tribolojik etkilerinin incelenmesi	Düzcükoğlu ve Şahin [64]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ve hBN	SAE 20W50	Block-on-ring	Yüzeysel	Bor bileşiklerinin yağın tribolojik özelliklerine etkilerinin araştırılması	Baş ve Karabacak [65]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Kanola yağı	Pin-on-disc	Noktasal	Katkı maddesi boyutunun tribolojik etkilerinin araştırılması	Lovell vd. [66]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	PAO 4	Pin-on-disc, reciprocating mod	Çizgisel	Yüzey aktif madde modifiyeli katkının yağın tribolojik etkilerinin araştırılması	Kim vd. [67]
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Sentetik ve bitkisel yağlar	Şerit çekme testi	Yüzeysel	Çevre dostu yağlayıcı karışımının sac metal şekillendirme işlemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması	Trzepieciniski [68]

### 1.3.3. Yağlayıcı Olarak Kullanılan Fındık Yağı ile İlgili Çalışmalar

Shafi ve arkadaşları, baz yağ olarak kullandıkları fındık yağına küresel morfolojiye sahip and 25 nm boyuttaki bakır (Cu) nanopartikülleri eklemiş ve katkılı yağın tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler pin-on-disc test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir ve bulgular sınır ve karışık yağlama bölgelerinde değerlendirilmiştir. Fındık yağına Cu katkısının sınır yağlama bölgesinde sürtünme düşürücü olarak etkinlik gösterdiği belirlenmiştir. Tüm karışım oranlarında ve hızın artışı ile beraber Cu katkısının sürtünme azaltıcı etkisi artarak devamlılık göstermiştir [75].

Shafi ve Charoo, piyasada yaygın şekilde kullanılan çinko dialkilditiofosfat (ZDDP) katkısının fındık yağı üzerindeki aşırı basınç ve aşınma etkilerini araştırmışlardır. Deneyler four-ball test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. ZDDP katkısının fındık yağına ait aşınma ve aşırı basınç özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Eş çalışan yüzeylerde çinko fosfat şeklinde yağ filmi oluşumu, tüm tribolojik iyileşmelerin nedeni olarak ileri sürülmüştür. Katkılı fındık yağının, petrol bazlı yağlara yakın parlama sıcaklığı değerlerine sahip olduğu hatta bazı durumlarda daha da iyi olduğu belirlenmiştir. Yüksek oleik asit oranına sahip fındık yağının ZDDP eklentisi ile geleneksel petrol bazlı yağlarla karşılaştırılabileceği ifade edilmiştir [76].

Tablo 1.4. Yağlayıcı olarak fındık yağı kullanımı ile ilgili çalışmalar

Katkı Maddesi	Yağlayıcı	Test Sistemi	Temas Geometrisi	Çalışmanın Amacı	Referans
Cu	Fındık yağı	Pin-on-disc	Noktasal	Katkı maddesinin yağın sürtünme ve aşınma özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması	Shafi vd. [75]
ZDDP	Fındık yağı	Four-ball	Noktasal	Katkı maddesinin yağın aşınma ve aşırı basınç özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması	Shafi ve Charoo [76]

Literatürde fındık yağının tribolojik özellikleri ile alakalı çalışmaların az olduğu ve genellikle biyoyakıt olarak kullanımı ile alakalı araştırmaların yapıldığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, kullanılan iki sıvı baz yağdan diğeri olan ham fındık yağına toz ve granül ultra düşük sülfatlı borik asit ( $H_3BO_3$ ) katkı maddeleri ilave edilmiştir ve katkı maddelerinin baz yağın tribolojik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Fındık yağının yüksek biyoçözünürlük, düşük zehirlilik oranı ve yenilebilir bir kaynak olması ve yüksek oleik asit içeriği nedeniyle mineral yağlara alternatif olabileceği düşünülmüştür. Dünya Çevre Ajansı tarafından kirletici olmayan katkılar sınıfında yer alan ve yaygın olarak kullanılan borik asit ham fındık yağına eklenerek tamamen çevre dostu bir yağlayıcının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Farklı morfolojilerde borik asit katkıları seçilerek partikül morfolojisinin yağlayıcılık performansı üzerindeki etkilerinin de araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca ülkemizin fındık ve bor ürünleri üretiminde ve ihracatında lider bir ülke olması nedeniyle, bu ürünlerin incelenmesinin ve kullanımının veya herhangi bir gelişmenin Türkiye ve dünya ekonomisine katkı sağlayacağı beklenmektedir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan materyaller, deney sistemi ve kullanılan yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

### 2.1. Deneylerde Kullanılan Baz Yağlar ve Özellikleri

Bu tez çalışmasında sıvı baz yağ olarak SAE 20W50 motor yağı ve ham fındık yağı seçilmiştir ve bu bölümde baz yağlar ve özellikleri hakkında bilgi verilecektir.

#### 2.1.1. SAE 20W50 Motor Yağı ve Özellikleri

Çalışmalarda kullanılan iki çeşit sıvı yağdan biri, benzinli ve dizel araçların API SF/CF performansını karşılayan parafinik esaslı Speedol Super Diesel SAE 20W50 motor yağı, baz yağ olarak seçilmiştir. Motor yağının piyasada aktif olarak kullanımının ilgili çalışmalardaki tüm değerlere referans olabileceği düşünülmüştür. Motor yağına ait teknik özellikler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Super Diesel SAE 20W50 motor yağına ait teknik özellikler

Viskozite 100°C, cSt	<b>ASTM D 445</b>	17,0
Viskozite İndeks	<b>ASTM D 2270</b>	122
Alevlenme Noktası, °C	<b>ASTM D 92</b>	230
Akma Noktası, °C	<b>ASTM D 97</b>	-21

#### 2.1.2. Fındık Yağı ve Özellikleri

Çalışmalarda kullanılan iki çeşit sıvı yağdan diğeri, biyoçözünürlüğü yüksek ve zehirlilik oranı düşük bitkisel bir yağ olan ham fındık yağı baz yağ olarak seçilmiştir. Çotanak (Altaş Yağ Sanayi) firmasının ürünü olan ham fındık yağına ait teknik özellikler Tablo 2.2’de verilmiştir.

Fındık yağının yağlayıcılık özelliklerini doğru şekilde tespit edebilmek ve yenilebilir fındık yağının kimyasal reaksiyonlara uğraması nedeniyle bu çalışma da ham fındık yağı baz yağ olarak seçilmiştir. Ham fındık yağı, fındık meyvesinden fiziksel işlemler ile elde edilen ve kimyasal işlem görmemiş bir yağdır. Tablo 2.2’de görüleceği üzere, fındık yağları çoğunlukla yüksek miktarda oleik (%74,2-86,7) ve linoleik (%5,2-18,7) asitler ve daha düşük miktarlarda palmitik (%4,2-8,9), stearik (%0,8-3,2) ve linolenik (%0,3) asitler içermektedir. Fındık yağlarının yüksek oleik ile linoleik ve düşük linolenik asit içeriği termooksidatif kararlılıklarını iyileştirirken, düşük seviyelerde doymuş (palmitik ve stearik) asit içeriği soğuk ortamlarda yağlayıcılık özelliklerini korumasına yardımcı olmaktadır [77]. Bunun yanında, iyi akma noktası, bulutlanma noktası, yüksek parlama noktası ve yanma noktası gibi özellikler hem düşük hem de yüksek sıcaklıkta yağlayıcılık özelliklerini iyileştirmektedir [75].

Fındık yağının yüksek biyoçözünürlük, düşük zehirlilik oranı ve yenilebilir bir kaynak olması nedeniyle mineral yağlara alternatif olabilmektedir. Dünya çapında popüler bir kabuklu yemiş olan fındık (*Corylus avellana L.*), Türkiye’nin Karadeniz Bölgesi kıyılarında, Güney Avrupa’da (İtalya, İspanya, Portekiz ve Fransa) ve Amerika’nın bazı bölgelerinde (Oregon ve Washington) yetiştirilmektedir [78, 79]. Dünyanın ilk fındık üreticisi ve ihracatçısı olan Türkiye, dünya üretiminin yaklaşık %70’ini (665000 ton) ve ihracatının %82’sini karşılamaktadır. Onu üretimde yaklaşık %20 ve ihracatta %15 ile İtalya takip etmektedir [80]. Türkiye’nin en büyük fındık üreticisi ve ihracatçısı olması nedeniyle, bu ürünlerdeki herhangi bir gelişmenin Türkiye ve dünya ekonomisine katkı sağlaması beklenmektedir.

Tablo 2.2. Ham fındık yağına ait yapısal özellikler

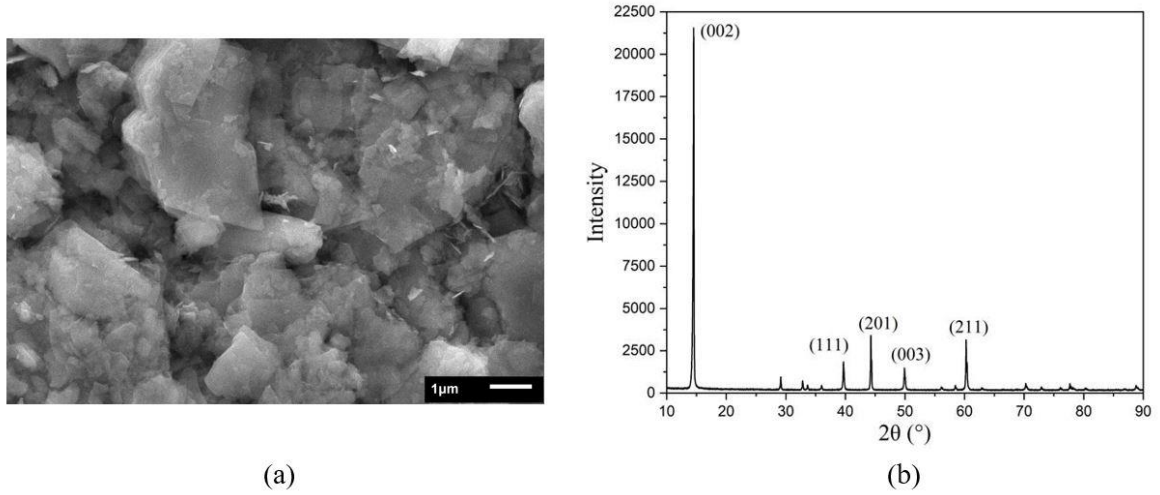
<b>Fiziksel ve Kimyasal Özellikler (%)</b>	<b>Kabul Değeri</b>
Renk	9R 0B
İyot sayısı	81-92
Bağlı yoğunluk	0,8980-0,9150
Kırılma İndisi	1,4681-1,4735
Rutubet ve Uçucu Madde max.	% 0,5 (105 C°)
Çözünmeyen yabancı madde max.	% 0,5
Sabunlaşma sayısı	188-198
Sabunlaşmayan madde max. g/kg	15
Demir ppm	1,5
Bakır ppm	0,1
<b>Yağ asitleri kompozisyonu (%)</b>	
Miristik asit (C14:0)	0,1
Palmitik asit (C16:0)	4,2-8,9
Palmitoleik asit (C16:1)	0,5
Margarik asit (C17:0)	0,1
Heptadesenoik asit (C17:1)	0,1
Stearik asit (C18:0)	0,8-3,2
Oleik asit (C18:1)	74,2-86,7
Linoleik asit (C18:2)	5,2-18,7
Linolenik asit (C18:3)	0,3
Araşidik asit (C20:0)	0,2
Eikosenoik asit (C20:1)	0,2
Behenik asit (C22:0)	0,1
Erusik asit (C22:1)	0,1
Nervonik asit (C24.1)	0,3

## 2.2. Deneylerde Kullanılan Katkı Maddeleri ve Özellikleri

Bu tez çalışmasında, iki çeşit baz yağdan biri olan SAE 20W50 motor yağına katkı maddesi olarak molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve kalsiyum florür ( $\text{CaF}_2$ ); diğer baz yağ olan fındık yağına toz (ultra düşük sülfatlı) borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ve granül (ultra düşük sülfatlı) borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) katılmıştır. Bu bölümde çalışma esnasında kullanılan katkı maddeleri ve özellikleri hakkında bilgi verilecektir.

### 2.2.1. Molibden Disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) Katkısı ve Özellikleri

SAE 20W50 motor baz yağına eklenen doğal molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) tozları Alfa Aesar şirketinden temin edilmiştir (CAS: 1317-33-5). %98 saflık derecesine sahip  $\text{MoS}_2$  tozlarının ortalama partikül boyutu 2-4  $\mu\text{m}$  ve 25 °C'deki yoğunluğu 5,06  $\text{g}/\text{cm}^3$  tür.  $\text{MoS}_2$  tozlarına ait SEM ve XRD sonuçları Şekil 2.1'de verilmiştir.



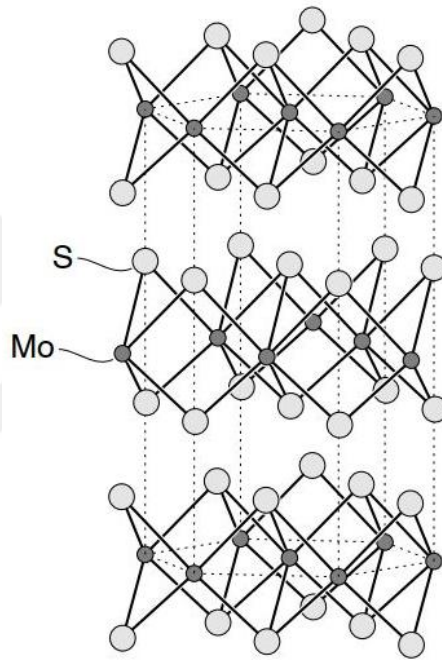
Şekil 2.1. Molibden disülfüre ( $\text{MoS}_2$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi

Şekil 2.1 (a)'daki  $\text{MoS}_2$  SEM görüntüsünde, çok küçük partiküllerin büyük partiküllere yapıştığı veya etraflarında kümелendiği ve düzensiz tabaka şekli oluşturdukları görülmektedir [51, 55].

Şekil 2.1 (b)'de  $\text{MoS}_2$  partiküllerinin (002), (111), (201), (003) ve (211) düzlemlerine atanan 14.4, 39.6, 44.1, 49.8 ve 60.1° saçılma açılarında ( $2\theta$ ) pikler gösterdiği açıkça

görülmektedir. Özellikle (002) düzlemine ait  $2\theta = 14.4^\circ$ 'de kristalleşmenin bir göstergesi olan yoğun ve keskin bir pik gözlenmiştir. Sonuçlar  $\text{MoS}_2$  partiküllerinin kristalleştiğini ve hegzagonal yapıya sahip olduğunu göstermiştir [51, 55].

Katmanlı katı yağlayıcılar, mühendisler tarafından endüstride yaygın şekilde kullanılan yağlayıcılardır. Geçiş metali dikalkojenitlerin örneklerinden katmanlı yapıya sahip olan molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ), literatürde sıklıkla kullanılan bir katı yağlayıcıdır [1, 28].



Şekil 2.2. Molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) moleküler düzeni [3].

Molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ), molibden (Mo) ve kükürtten (S) oluşan inorganik bir bileşiktir. Üçgen prizma şeklinde bir paket yapıya sahip olan  $\text{MoS}_2$  katkısının tüm katmanlarında, sülfür atomları prizmanın köşelerine yerleşmişken, molibden atomları ise üçgen prizmanın merkezinde yer alır ve birleşerek hegzagonal bir kristal yapıyı meydana getirir [3, 81, 82].  $\text{MoS}_2$  moleküllerinin katmanlı kristal yapısının şematik bir temsili Şekil 2.2'de verilmiştir. Molibden disülfürde ( $\text{MoS}_2$ ) iki farklı atomik bağ türü vardır ve molibden (Mo) ile kükürt (S) arasındaki (S-Mo-S) çekim güçlü kovalent bağdır. Ancak S atomları komşu düzlemleri arasında sadece çok zayıf van der Waals çekimi mevcuttur. Bu düzlemler, özellikle bazal düzlemlerdeki (yani atom düzlemlerine paralel) kayma etkisini diğer yönlere

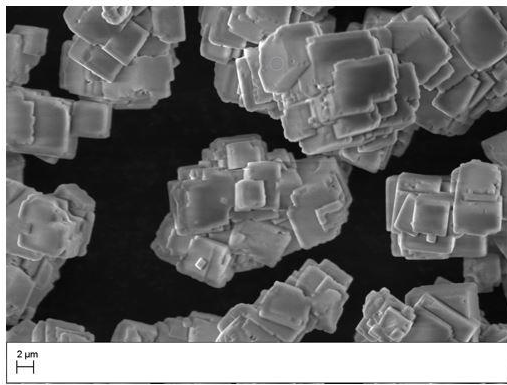
göre daha kolaylaştırmaktadır. Düzlemler arasındaki düşük sürtünme direnci nedeniyle, molibden disülfürün esnek katmanları birbiri üzerinde kolaylıkla ve sürekli kayarak yağlamayı gerçekleştirebilmektedir [83, 84]. Literatürdeki bu bilgiler doğrultusunda, yaygın şekilde kullanılan ve ağır metal içeren molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) katkısının yüzeyel temas geometrisinde motor yağı üzerindeki tribolojik etkileri araştırılmıştır.

### 2.2.2. Kalsiyum Florür ( $\text{CaF}_2$ ) Katkısı ve Özellikleri

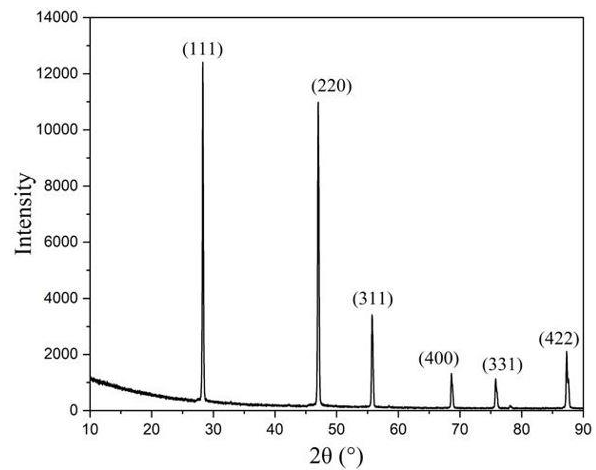
SAE 20W50 motor baz yağına eklenen kalsiyum florür ( $\text{CaF}_2$ ) tozları Sigma-Aldrich şirketinden temin edilmiştir (CAS: 7789-75-5). %99 saflık derecesine sahip  $\text{CaF}_2$  tozlarının ortalama partikül boyutu 3-4  $\mu\text{m}$  ve 25 °C'deki yoğunluğu 3,18 g/mL'dir.  $\text{CaF}_2$  tozlarına ait SEM ve XRD sonuçları Şekil 2.3'te verilmiştir.

Şekil 2.3 (a)'da  $\text{CaF}_2$  partiküllerinin kübik bir şekle sahip olduğu belirlendi. Üst üste eklenmiş yapıların temiz bir yüzeye sahip olduğu görüldü [51, 55].

Şekil 2.3 (b)'de kalsiyum florür partikülleri (111) ve (220) kristal düzlemlerine atanan 28.3 ve 46.9 saçılma açılarında keskin pikler göstermiştir. Ayrıca kristalografik düzlemlere (311), (400), (331) ve (422) bağlı olan 55.7, 68.7, 75.8 ve 87.3 derecelerde benzer yoğun pikler belirlenmiştir. Bu XRD sonuçları,  $\text{CaF}_2$ 'ün kübik bir kristal yapıya sahip olduğunu teyit etmiştir [51, 55].



(a)

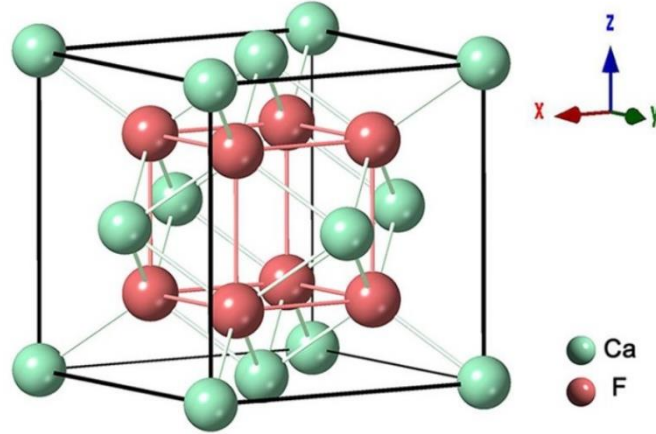


(b)

Şekil 2.3. Kalsiyum florüre ( $\text{CaF}_2$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi

Yüksek sıcaklıkta grafit (C) ve molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) gibi çeşitli yağlayıcıların istenilen performansı gösterememesi, araştırmacıları hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta çalışabilen yağlayıcıların belirlenmesine yöneltmiştir. Kalsiyum florür ( $\text{CaF}_2$ ) ve baryum florür ( $\text{BaF}_2$ ) gibi alkali metal tuzları,  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin ( $1000\text{ }^\circ\text{F}$ ) üzerindeki sıcaklıklar için önemli bir rol oynamıştır [35, 52, 54]. Florürler arasında  $\text{CaF}_2$  nanoparçacıkları ayarlanabilir parçacık boyutları, kolay yüzey modifikasyonu ve düşük kesme mukavemeti nedeniyle yaygın kullanılan katkı maddeleridir ve temas yüzeylerinin tribolojik davranışı üzerinde güçlü bir kimyasal, fiziksel ve mikroyapısal etkiye sahiptir [52, 56, 85].

Şekil 2.4, kationların ( $\text{Ca}^{+2}$ ) kübik olarak paketleniği ve anyonların ( $\text{F}^-$ ) tetrahedral boşluklara doldurulduğu  $\text{CaF}_2$  nanoparçacıklarının iyonik kristal yapısını göstermektedir. Kalsiyum florürün yapısı grafit, molibden disülfür ile benzerdir, yani her düzlemde altıgen desenli katmanlı bir yapıya sahiptir ve bu düzlemler, belirli sıcaklıklarda kolayca kesilen ve yüzeyleri yağlayan zayıf kuvvetlerle bağlanır [57].



Şekil 2.4. Kalsiyum florürün ( $\text{CaF}_2$ ) moleküler düzeni [57].

Kalsiyum florürün sudaki düşük çözünürlüğü ve radyasyona direnme kabiliyeti onu radyasyona maruz kalmada da kullanılabilir güvenli malzemeler arasına yerleştirmiştir ve birçok matrisle iyi uyumluluk ve gelişmiş tribolojik özellikler göstermiştir [86]. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar  $\text{CaF}_2$  ilavesinden dolayı mekanik özelliklerde azalma olduğunu ve sertliği artırdığını kanıtlamıştır [53, 54]. Literatürdeki bu bilgiler doğrultusunda, ağır metal içermeyen  $\text{CaF}_2$  katkısının yüzeysel temas geometrisinde tribolojik etkileri araştırılmış ve ağır metal içeren katkılara alternatif olabileceği düşünüldüğünden tercih edilmiştir.

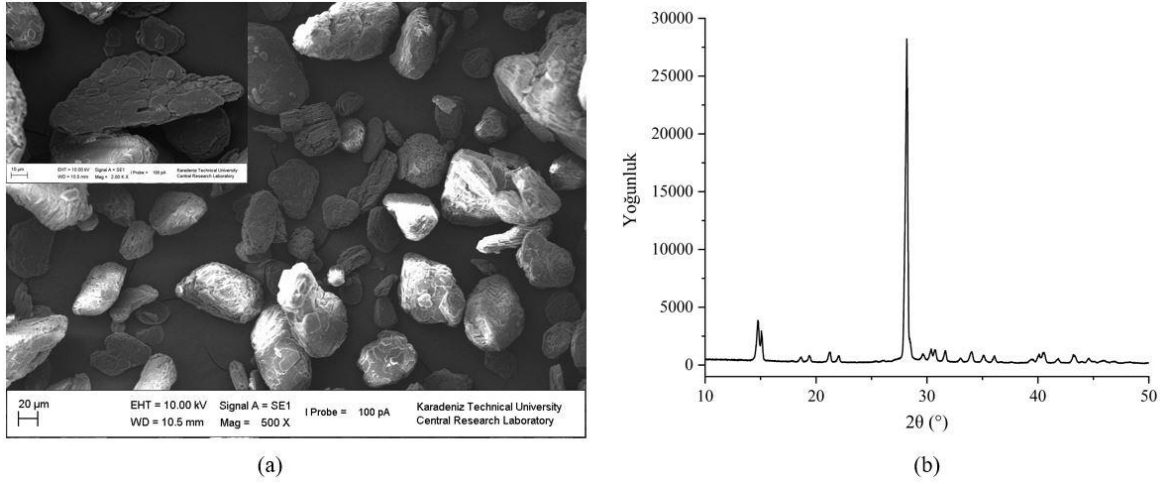
### 2.2.3. Toz Borik Asit ( $H_3BO_3$ ) Katkısı ve Özellikleri

Fındık baz yağına eklenen ultra düşük sülfatlı toz (CAS: 10043-35-3) ortoborik asit Eti Maden İşletmelerinden temin edilmiş olup toz borik aside ait teknik bilgiler Tablo 2.3'te, SEM görüntüsü ve XRD analizi Şekil 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Toz (ultra düşük sülfatlı) ortoborik asidin teknik özellikleri

<b>Kimyasal Özellikler (Toz <math>H_3BO_3</math>)</b>	
Bileşen	İçerik Miktarı
$B_2O_3$	%56,25 – 56,90
$H_3BO_3$	%99,92 – 101,07
SO <sub>4</sub>	12 ppm max.
Cl	3 ppm max.
Fe	3 ppm max.
<b>Partikül Boyutu Özellikleri</b>	
Büyüklik	10-100 $\mu$ m

Şekil 2.5 (a)'da toz borik asidin SEM görüntüsünde, tabaka benzeri kristalitlerin birbiri üzerine sıralanmış şekilde bir araya gelerek plaka şeklinde yapılar oluşturduğu ve boyutlarının 10-100  $\mu$ m arasında değiştiği görülmektedir [10, 62]. Şekil 2.5 (b)'de toz borik asit (002) kristal düzlemine atanan  $\theta = 28^\circ$  saçılma açısında keskin pik göstermiştir. Toz borik asit parçacıklarının literatürde ile uyumlu ve hegzagonal yapıya sahiptir [87, 88].

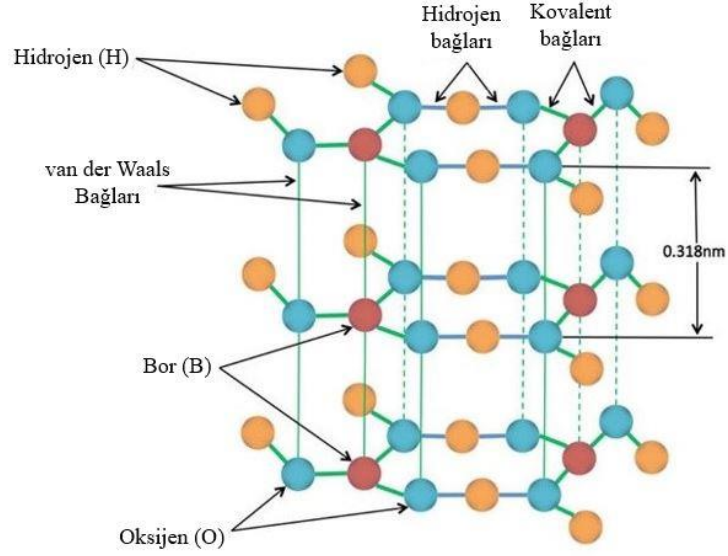


Şekil 2.5. Toz borik aside ( $H_3BO_3$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi

Kimyasal olarak borik asit çok hafif, toksik olmayan bir asittir ve Çevre Koruma Ajansı tarafından kirletici olmayan katkıları sınıfında gösterilmiştir [10]. Metaborik ve ortoborik olarak iki kristal formda bulunan borik asidin ortoborik asit formu yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ortoborik asidin katmanlı bir yapıya sahip olması nedeniyle  $MoS_2$  ve grafit gibi kendi kendini yağlama özelliklerine sahip olduğu ve pratikte katı yağlayıcı olarak kullanılabilmesi kanıtlanmıştır. Ayrıca Erdemir, katkı maddesi olarak ortoborik asidin nemli koşullarda  $MoS_2$ 'den daha iyi yağlama özelliklerine sahip olduğunu belirtmiştir [89–91].

Borik asidin moleküler düzenine ait görsel Şekil 2.6'da verilmiştir. Borik asit atomlarının düzlemleri sıkı bir şekilde paketlenmiştir ve güçlü kovalent tipte bağlanmış bor, oksijen ve hidrojen atomlarından oluşur, ancak katmanlar geniş ölçüde birbirinden ayrılır ve yalnızca van der Waals kuvvetleri tarafından çekilir. Kayma sırasında borik asit, plaka benzeri katmanlarını bağıl harekete paralel yönde hizalayabilir ve bu durum katmanların kolaylıkla birbiri üzerinde kayabilmesine imkan sağlar. Borik asidin uygulamalarda düşük sürtünme katsayısı vermesinin, katmanlı kristal yapısı ile ilişkili olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca borik asitte bulunan bağ türleri, su ve diğer çözücüler içinde çözünmesine izin vererek onu birçok yağlayıcıda faydalı bir katkı maddesi haline getirmektedir [59, 60, 92].

### Borik Asit ( $H_3BO_3$ ) Moleküler Düzen



Şekil 2.6. Borik asidin ( $H_3BO_3$ ) moleküler düzeni [28].

Bu çalışmada, temiz katkılar sınıfında yer alan ultra düşük sülfatlı toz borik asit ( $H_3BO_3$ ), ham fındık yağına katılarak endüstride kullanılabilen çevre dostu bir yağlayıcı karışımı oluşturulmak istenmiştir. Literatürdeki çalışmaların yüzeysel temas geometrilerinde az olması nedeniyle, bu çevre dostu karışımın tribolojik etkilerinin yüzeysel temas şartlarındaki davranışları araştırılmıştır. Bunun yanında hem borik asit hem de fındık yağının Türkiye'deki üretim ve ihracatının yüksek olması, bu ürünler ile ilgili gelişmeleri Türkiye ve dünya ekonomisine sağlayacağı katkı açısından önemli kılacaktır.

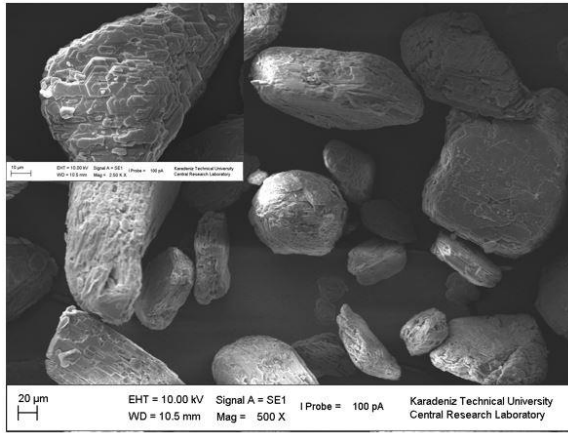
#### 2.2.4. Granül Borik Asit ( $H_3BO_3$ ) Katkısı ve Özellikleri

Fındık baz yağına eklenen ultra düşük sülfatlı toz (CAS: 10043-35-3) ortoborik asit Eti Maden İşletmelerinden temin edilmiş olup toz borik aside ait teknik bilgiler Tablo 2.4'te, SEM görüntüsü ve XRD analizi Şekil 2.7'de verilmiştir.

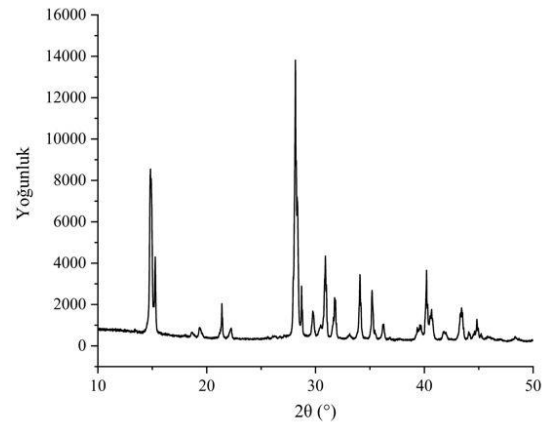
Tablo 2.4. Granül (ultra düşük sülfatlı) ortoborik asidin ( $H_3BO_3$ ) teknik özellikleri

<b>Kimyasal Özellikler (Toz <math>H_3BO_3</math>)</b>	
Bileşen	İçerik Miktarı
$B_2O_3$	%56,25 – 56,90
$H_3BO_3$	%99,92 – 101,07
SO4	12 ppm max.
Cl	3 ppm max.
Fe	3 ppm max.
<b>Partikül Boyutu Özellikleri</b>	
Büyüklik	10-100 $\mu m$

Şekil 2.7 (a)'da borik asidin SEM görüntüsünde, tabaka benzeri kristalitlerin birbiri üzerine sıralanmış şekilde istiflenerek granül şeklinde yapılar oluşturduğu ve boyutlarının 10-100  $\mu m$  arasında değiştiği görülmektedir [10, 66]. Şekil 2.7 (b)'de granül borik asit parçacıkları 17.7, 28, 30.8, 34 ve 40.2 saçılma açılarında pikler göstermiştir. Granül borik asit parçacıklarının literatür ile uyumlu ve hegzagonal yapıya sahip olduğu görülmüştür [87, 88]. Ayrıca saçılma açılarındaki piklerin fazlalığı granül borik asidin toza kıyasla büyük parçacık miktarının daha fazla olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)

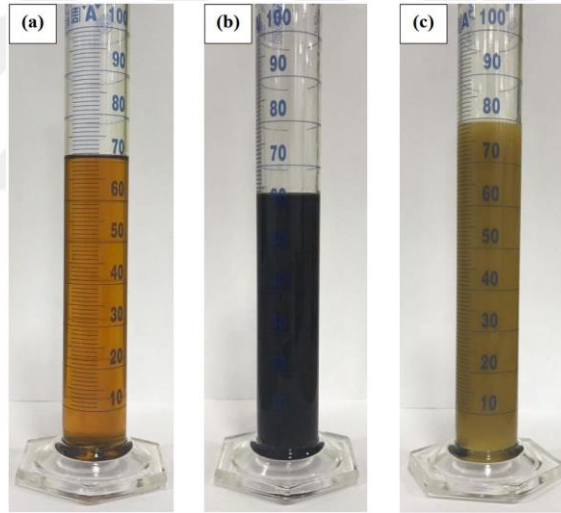
Şekil 2.7. Granül borik aside ( $H_3BO_3$ ) ait (a) SEM görüntüsü ve (b) XRD analizi

Bu çalışmada, çevre dostu olan ham fındık yağı ve borik asit karışımının içerisinde borik asit morfolojisinin yağın tribolojik etkilerine özelliklerini araştırmak amacıyla, ultra düşük sülfatlı toz ve granül borik asit ( $H_3BO_3$ ) kullanılmıştır.

### 2.3. Yağ Karışımlarının Hazırlanması

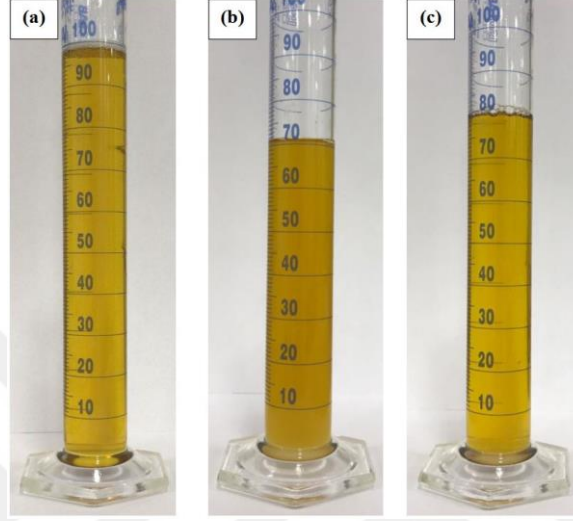
Bu çalışmadaki tüm yağ karışımları ultrasonik homojenizatör (sonikatör) yardımıyla hazır hale getirilmiştir.

Sıvı baz yağ olarak seçilen SAE 20W50 motor yağına ağırlıkça %0.1, 0.25, 0.5 ve 1 oranlarında  $MoS_2$  ve  $CaF_2$  katkıları ayrı ayrı eklenmiş ve ultrasonik homojenizatör ile 30 dk karıştırılmıştır. Deneyler öncesinde optimum koşullarda hazırlanan motor yağı karışımları Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Motor yağı çalışmasındaki deneyler öncesinde yağ karışımlarının görünümü: (a) SAE 20W50, (b) ağırlıkça %0,25  $MoS_2$  katkılı yağ ve (c) ağırlıkça %0,25  $CaF_2$  katkılı yağ

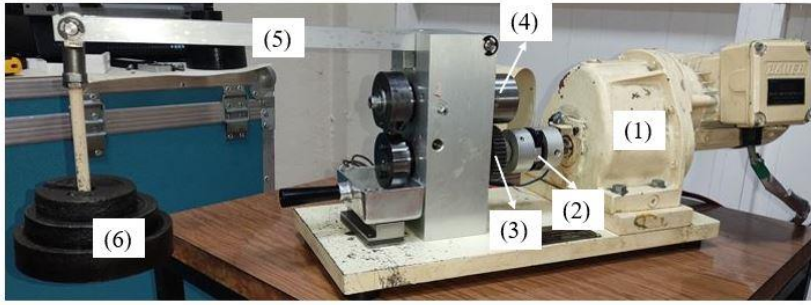
Sıvı baz yağ olarak seçilen ham fındık yağına ağırlıkça %0.5, 1, 1.5 ve 2 oranlarında ultra düşük sülfatlı toz ve granül  $H_3BO_3$  katkıları ayrı ayrı eklenmiş ve ultrasonik homojenizatör ile 30 dk karıştırılmıştır. Deneyle öncesindeki optimum koşullarda hazırlanan fındık yağı karışımları Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Fındık yağı çalışmasındaki deneyler öncesinde yağ karışımlarının görünümü: (a) ham fındık yağı, (b) ağırlıkça %1 tBA katkılı yağ ve (c) ağırlıkça %1 gBA katkılı yağ

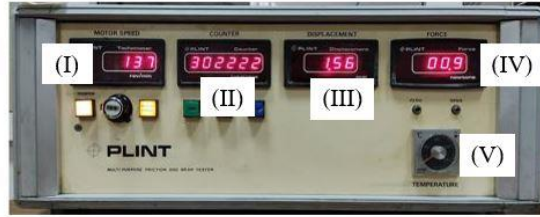
#### 2.4. TE53 Multi-Purpose Sürtünme ve Aşınma Test Cihazı ve Detayları

Bu tez çalışmasındaki deneylerde Plint & Partners marka TE53 Multi-Purpose Friction & Wear Tester kullanılmıştır. Bu test cihazı, tribolojik çalışmalarda kullanılan bir test cihazı olup (Şekil 2.10 (a)) araştırmacılara farklı geometrilerdeki yüzey çiftlerine ait deneylere imkan tanımaktadır. Bu temas çiftlerinde disk ile eş çalışan disk, pin, blok veya bilya numune olarak kullanılabilir (Şekil 2.12). Ayrıca deney cihazına entegre şekildeki seri bağlı arayüz modülü SLIM 2000 (Şekil 2.10 (b)) yardımıyla, sistemin kontrolü (hız, sıcaklık, devir vb.) yapılabilir ve veriler bilgisayar ortamına aktarılabilir.



1. Elektrik motoru
2. Kaplin
3. Alt mil
4. Üst mil
5. Yük kolu
6. Yük

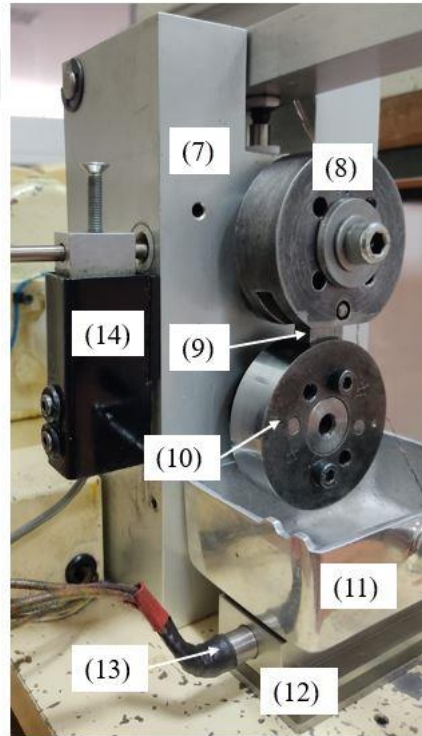
(a)



- I. Motor hızı
- II. Tur sayısı
- III. Yer değiştirme
- IV. Sürtünme kuvveti
- V. Sıcaklık

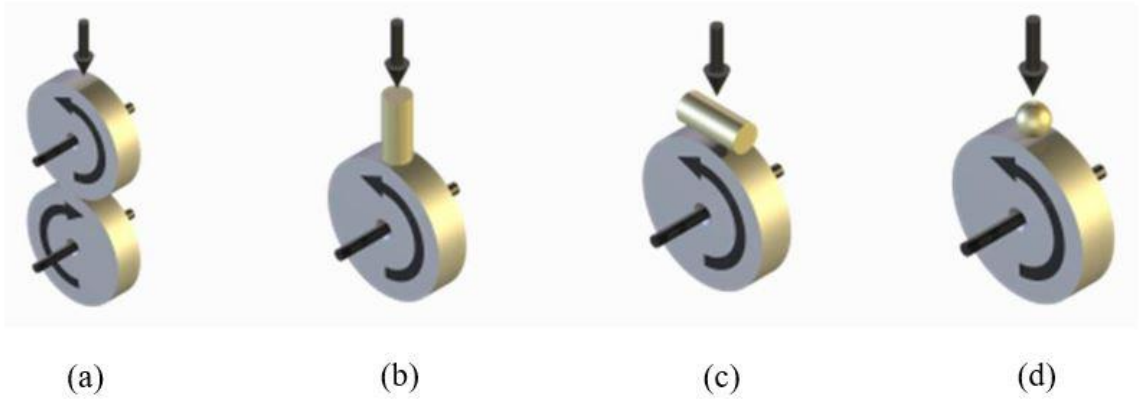
(b)

Şekil 2.10. (a) TE53 Multi-Purpose test cihazı ve (b) kontrol ünitesi

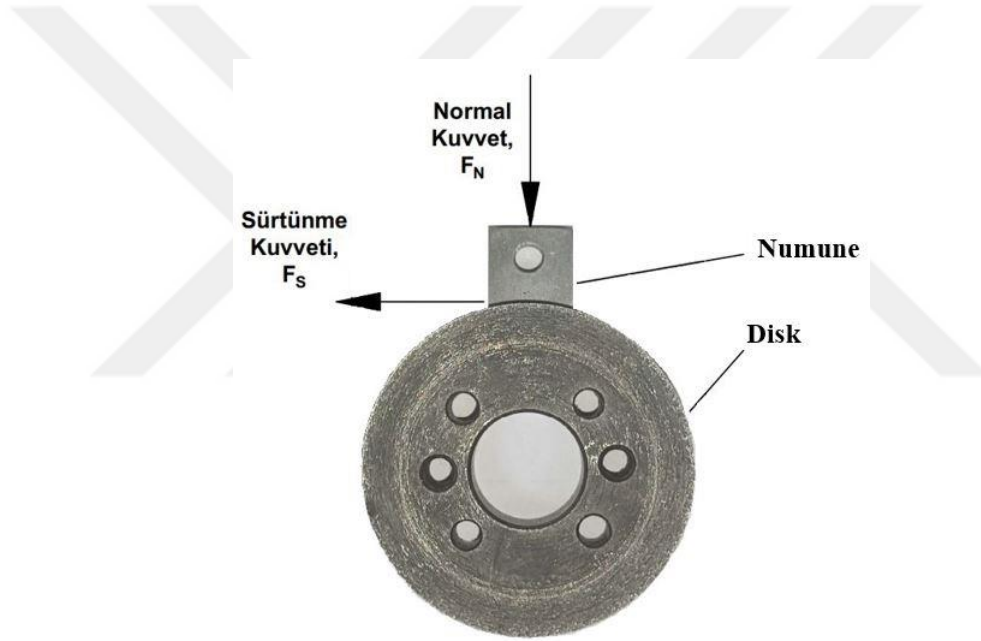


7. Taşıyıcı gövde
8. Numune tutucu
9. Numune
10. Disk
11. Yağ kabı
12. Altlık
13. Isıtıcı
14. Kuvvet sensörü

Şekil 2.11. Disk, numune ve sensör grubunun yakın görüntüsü



Şekil 2.12. Deney sisteminde kullanılabilen farklı yüzey geometrileri: (a) disk-disk, (b) pin-disk, (c) silindir-disk ve (d) bilya-disk



Şekil 2.13. Sürtünme kuvvetinin ölçümü

Deney sisteminin genel görünümü Şekil 2.10’da verilmiştir. Deney cihazını tek fazlı, 0,25 kW bir elektrik motoru (1) çalıştırmaktadır. Deney sisteminde, taşıyıcı gövde (7) içerisinde rulmanlar ile yataklanmış iki paralel mil bulunmaktadır. Alt mil (3) diski (10) taşır ve elektrik motoru miline kaplin (2) ile bağlıdır. Üst mil (4) ise, ucuna yerleştirilen numune tutucu (8) yardımıyla disk ile eş çalışacak numuneyi (9) taşır. Diskin (10) hemen altına yerleştirilen yağ kabı (11) sayesinde yağlama gerçekleştirilir. Yağ kabının oturtulduğu altlık (12) içerisinde bulunan yuvaya ısıtıcı (13) yerleştirilerek çalışma ortamı veya yağ sıcaklığı ayarlanabilmektedir (Şekil 2.10 (b)). Çalışma durumuna göre üst milin arka ucuna eş çalışan

bir dişli monte edilebilir. Yük (6), üst şaftın ön ucundaki dikey düzlemde hareket eden ve hareketli yatağın dış yuvasına bastıran bir kol (5) vasıtasıyla uygulanır. Çalışma esnasında numune (9) ve disk (10) arasında meydana gelen sürtünme kuvveti, bir kuvvet sensörü (14) tarafından algılanıp kayıt sistemine iletilir. Üst şaft eksenine dik yönde yerleştirilen algılayıcı, üst milin yatay hareketini bir gerinim ölçer dönüştürücü tarafından karşılar ve kontrol ünitesinde (Şekil 2.10 (b)) sürtünme kuvveti olarak görüntülenen temastaki teğetsel kuvveti verir (Şekil 2.12).

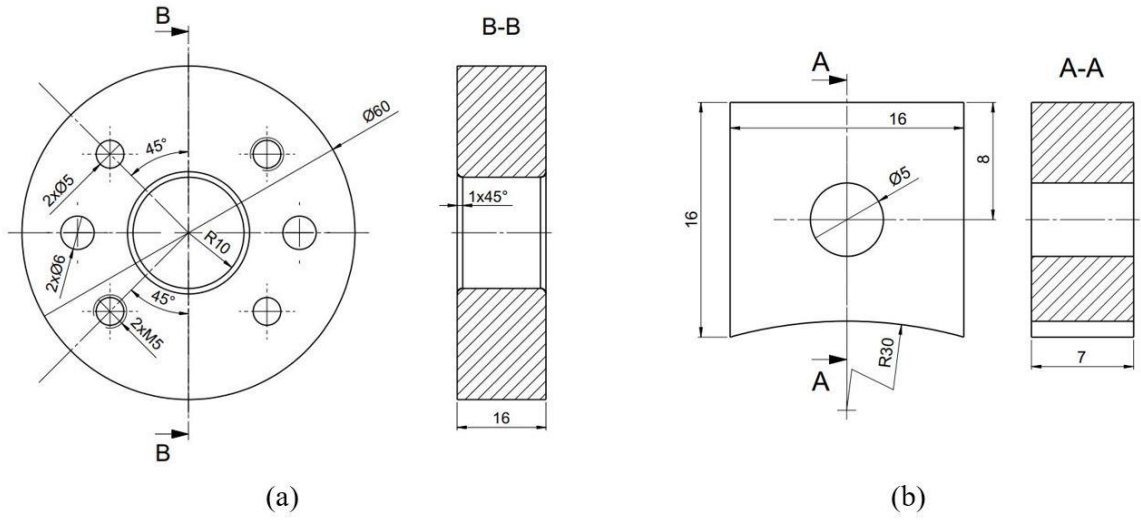
Bu tez çalışmasında, tüm deneyler yüzeysel temas geometrisi şeklinde tasarlanmış disk-numune çifti ile gerçekleştirilmiştir. Numune, tutucu yardımıyla dönmeyecek şekilde sabit iken, alt mile bağlı olan disk dönme hareketi yapmaktadır.

#### 2.4.1. Disk ve Numune Özellikleri

Tüm deneylerde kullanılan numune ve diske ait görüntüler boyutları ile beraber Şekil 2.14’te verilmiştir. Disk ve numune malzemesi olarak sırasıyla AISI 52100 ve AISI 4140 çelikleri seçilmiştir. Disk 60 mm çapında ve 16 mm kalınlığında üretilmiştir. Numune ise 16 mm yükseklik, 16 mm genişlik, 7 mm kalınlığa sahiptir. Tel erozyon yöntemiyle şekillendirilen numuneler, montaj boyutlarına getirilmiş ve numunenin temas yüzeyi disk ile aynı çapta olacak şekilde taşlanmıştır. Ardından disk üzerine konumlandırılan zımpara ile numune temas yüzey çapı disk çapı ile aynı boyuta getirilmiştir. Böylece numunenin alıştırma (rodaj) aşamasının tamamlanması ve testlere hazırlanması amaçlanmıştır. Disk ve numunenin sertlik değerleri sırasıyla 60 ve 20 HRC şeklindedir. Disk ve numuneye ait kimyasal özellikler Tablo 2.5’te verilmiştir.

Tablo 2.5. Disk ve numuneye ait kimyasal özellikler

Element	Cr	C	Mn	Si	Mo	Al	Cu	Ni
<b>Numune</b>	0.98	0.4	0.79	0.27	0.15	-	-	-
<b>Disk</b>	1.48	1.07	0.34	0.3	0.051	0.048	0.21	0.011



Şekil 2.14. (a) Disk ve (b) numune fiziksel özellikleri

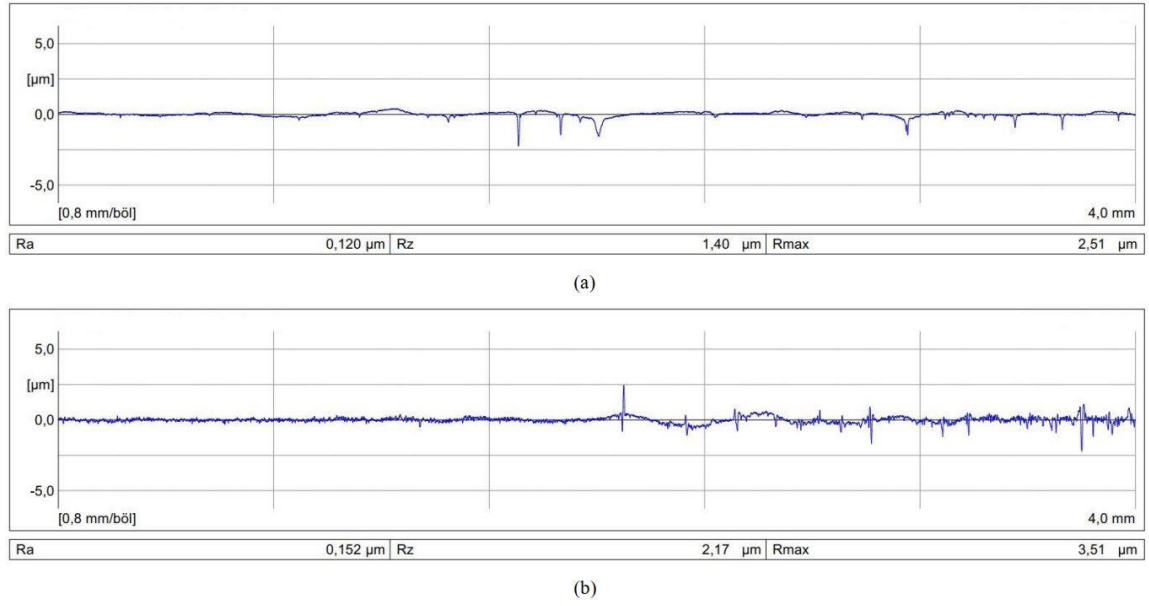
## 2.5. Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçülmesi

Mahr marka MarSurf PS1 model bir profilometre yardımıyla, numune ve disk yüzeylerinin deney öncesinde ve sonrasında pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.15).



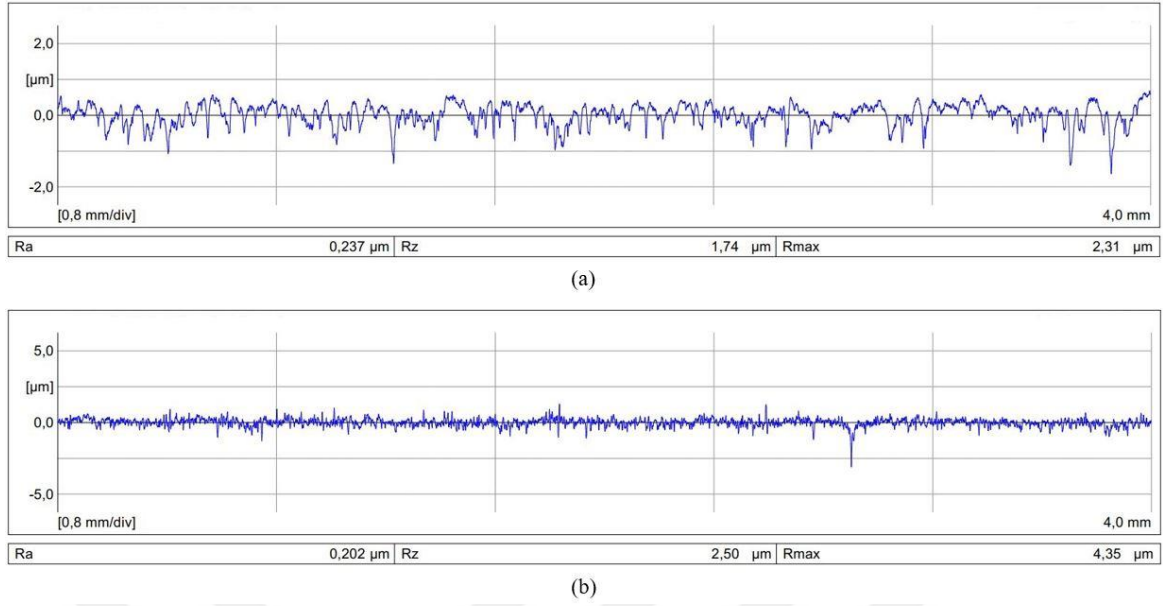
Şekil 2.15. Profilometrenin görünümü

Sıvı yağ olarak kullanılan ve bu tez çalışmasında baz yağ olarak seçilen SAE 20W50 motor yağı ile yapılan çalışmalarda, deneyler öncesinde disk ve numune yüzeyleri sırasıyla 800 ve 1000'lik zımparalar ile hazır hale getirilmiştir. Deneysel çalışmalar öncesi yapılan ölçümlerde numune ve disk ortalama pürüzlülük değerleri, Ra sırasıyla 0,15 ve 0,14  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir ve bu değerler motor yağı ile yapılan tüm testler için başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Baz motor yağı ile ilgili deneylerin başlangıcındaki (a) disk ve (b) numune yüzey pürüzlülükleri

Sıvı yağ olarak kullanılan ve bu tez çalışmasında baz yağ olarak seçilen ham fındık yağı ile yapılan çalışmalarda, deneyler öncesinde disk ve numune yüzeyleri sırasıyla 400 ve 500'lük zımparalar ile hazır hale getirilmiştir. Deneysel çalışmalar öncesi yapılan ölçümlerde disk ve numune ortalama pürüzlülük değerleri, Ra sırasıyla 0,23 ve 0,20  $\mu\text{m}$  olarak belirlenmiştir ve bu değerler fındık yağı ile yapılan tüm testler için başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Baz fındık yağı ile ilgili deneylerin başlangıcındaki (a) disk ve (b) numune yüzey pürüzlülükleri

## 2.6. Yağlama Rejimlerinin Teorik Olarak Belirlenmesi

Tribolojide elde edilen sonuçları yorumlamak için çalışmanın yağlama rejimini bilmek önemli bir parametredir. Yağlama bölgelerinin teorik olarak belirlenmesi için literatürde birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, literatürde sıklıkla tercih edilen Hamrock ve Dowson yaklaşımı kullanılarak yağlama bölgeleri belirlenmiştir [3, 26].  $\lambda$  büyüklüğü yağlama bölgesini temsil eder. Eğer  $\lambda$  değeri 1'den küçükse, yağlama bölgesi sınırlı, 1 ile 3 aralığında ise yağlama bölgesi karışık ve 3'ten büyükse yağlama bölgesinin hidrodinamik yağlama olduğu söylenebilir.  $\lambda$  büyüklüğü aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{(R_{a1})^2 + (R_{a2})^2}} \quad (1)$$

Burada,  $R_{a1}$  ve  $R_{a2}$  [m] sırasıyla numune ve diskin ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini ve  $h_{\min}$  [m] minimum yağ filmi kalınlığını ifade etmektedir.  $h_{\min}$  büyüklüğü ise Hamrock ve Dowson bağıntısından şu şekilde elde edilir:

$$h_{\min} = H_{\min} \cdot R' \quad (2)$$

Burada,  $H_{\min}$  boyutsuz yağ filmi kalınlık parametresi ve  $R'$  [m] eş değer eğrilik yarıçapını temsil etmektedir.  $R'$  aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad (3)$$

Burada,  $R_x$  ve  $R_y$  [m] sırasıyla numune ve disk temas yüzeylerinin yarıçaplarıdır. Ayrıca (2) numaralı denklemde yer alan  $H_{\min}$  aşağıdaki ampirik bağıntı ile bulunabilir:

$$H_{\min} = 3.63(U)^{0.68} \cdot (G)^{0.49} \cdot (W)^{-0.073} \cdot (1 - e^{-0.68k}) \quad (4)$$

Burada,  $k$  eliptiklik parametresidir ve bu çalışma yüzeysel temas geometrisinde gerçekleştirildiği için  $k = \infty$  olarak alınmıştır.  $U$  ise boyutsuz hız parametresidir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$U = \frac{\eta_0 \cdot u}{E' \cdot R'} ; u = \frac{1}{2}(u_1 + u_2) \quad (5)$$

Burada,  $u$  [m/s] ortalama kayma hızını,  $u_1$  ve  $u_2$  [m/s] numune ve diskin dönme hızlarını ve  $\eta_0$  [Pa.s] atmosfer basıncı altında yağın viskozitesini temsil etmektedir.

$$G = \alpha \cdot E' \quad (6)$$

Burada yer alan ve (4) numaralı denklemde hesaplanan  $G$  boyutsuz malzeme parametresini ve  $\alpha$  [m<sup>2</sup>/N] ise akışkanın basınç – viskozite katsayısını ifade etmektedir.

$$W = \frac{F}{E' \cdot (R')^2} \quad (7)$$

Burada yer alan ve (4) numaralı denklemde hesaplanan  $W$  boyutsuz yük parametresini ve  $F$  [N] temas yükünü temsil etmektedir. Ayrıca boyutsuz parametrelerin hesabında kullanılan  $E'$  [Pa] eş değer Young modülüdür ve aşağıdaki denklem ile elde edilebilir:

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (8)$$

Burada,  $E_1$  ve  $E_2$  [Pa] sırasıyla disk ve numunenin Young modülleridir. Ayrıca aynı denklemde yer alan  $v_1$  ve  $v_2$  büyüklükleri ise sırasıyla numune ve diske ait Poisson oranlarını temsil etmektedir.

## 2.7. Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

TE53 Multi-Purpose test cihazının ilgili kataloğundaki bilgiler takip edilerek sistemin sürtünme kuvveti kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistem çalıştığı esnada algılayıcı yardımıyla gerilim ölçerden mV cinsinde elde edilen teğetsel kuvvet sinyalleri, kontrol ünitesine entegre edilmiş çözümleme kartı yardımıyla Newton büyüklüğünde ekrandan okunabilmektedir. Kalibrasyon için numune, disk yüzeyine tam oturacak şekilde ayarlandı ve sürtünme kuvveti ekranda sıfır (0) olarak okundu. Bu işlemin ardından numunenin tutucu ile bağlı olduğu üst mile yatay doğrultuda bilinen kuvvetler asıldı ve kontrol ünitesinde okunan kuvvet değerleri ile kalibrasyon gerçekleştirildi ve hata oranının yaklaşık  $\pm 5\%$  olduğu belirlendi.

Sürtünme kuvveti verileri DAQ kart yardımıyla bilgisayar aktarılarak eş zamanlı çizdirilmiştir. Kontrol ünitesinden Newton cinsinden okunan sürtünme kuvveti,  $F_s$  [N] değerleri ve yük yani normal kuvvet,  $F_N$  [N] değerlerine bölünerek sürtünme katsayısı,  $\mu$  teorik olarak aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

$$(\mu = F_s / F_N) \quad (9)$$

## 2.8. Aşınma Miktarının Belirlenmesi

Bu tezdeki aşınma miktarı ve katkı miktarı ölçümleri, Shimadzu marka LIBROR AEG-120 model, 0.1 mg hassasiyete sahip ve 120 grama kadar ölçüm yapabilen elektronik hassas terazi yardımıyla yapılmıştır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Elektronik hassas terazinin görünümü

Tüm deneylerden önce ve sonra numunelerdeki kütleli farklılıklar ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Kaydedilen bilgiler literatürde sıklıkla kullanılan

$$S_{WR} = V_w / (F \times L) \quad (10)$$

bağıntısında yerine konularak aşınma miktarları belirlenmiştir. (10) numaralı denklemde  $V_w$  [ $\text{mm}^3$ ] ortalama aşınma hacmini,  $F$  [N] uygulanan normal kuvveti ve  $L$  [mm] toplam kayma mesafesini temsil etmektedir [55].

## 2.9. Yağ Sıcaklığının Ölçülmesi ve Şartlandırılması

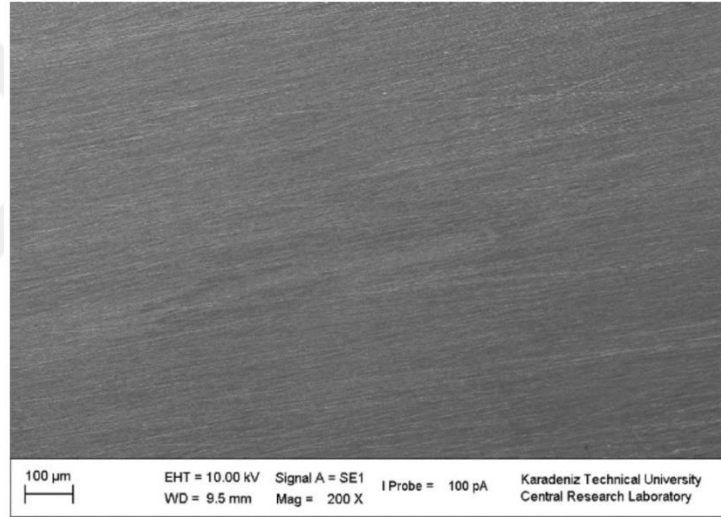
Yağ sıcaklıklarının şartlandırılması ve ölçülmesi için sırasıyla ısıtıcı ve K tipi termokupl kullanılmıştır.

Test düzeneğinde diskin hemen altında yağ beslemesi için yerleştirilen bir yağ kabı (11) bulunmaktadır ve diskin bir kısmı yağ kabı içerisindedir. Test cihazının kendi bünyesinde bulunan ısıtıcı (13), yağ kabının hemen altında bulunan bloğun (12) yuva kısmına yerleştirilir ve yağ kabı ısıtılarak yağ istenilen sıcaklıkta tutulabilmektedir. Kontrol ünitesinde yer alan sıcaklık kontrolör (Şekil 2.10 (b)) yardımıyla sıcaklık ayarı

yapılabilmektedir. Ayrıca, yağ kabı içerisine K tipi termokupl konulmuştur ve deney esnasındaki yağ sıcaklıkları daha iyi bir hassasiyet ile ölçülmüştür ve yağ sıcaklık değerleri bilgisayar ortamına aktarılarak eş zamanlı olarak çizdirilmiştir.

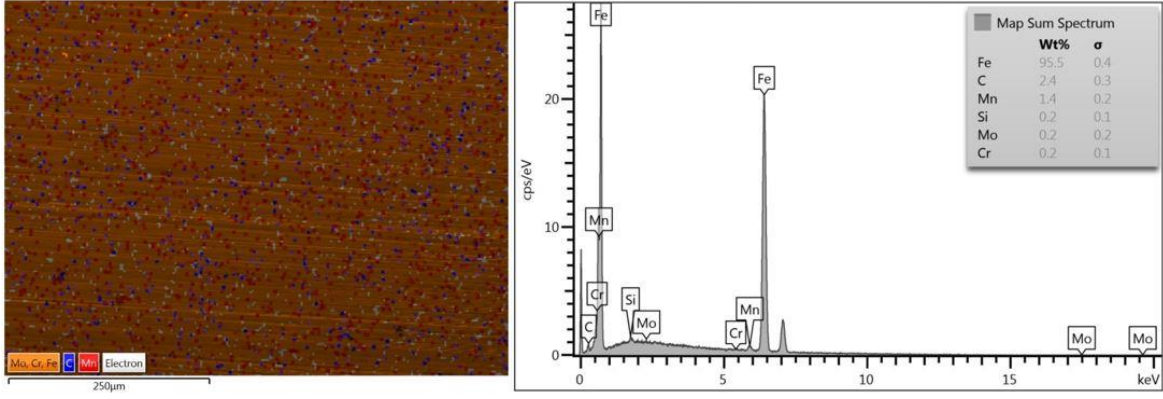
## 2.10. Mikroyapısal Özelliklerin İncelenmesi

Deneylerden önce ve sonraki numune yüzeylerinde, aşınma izlerinin belirlenmesi ve katkı maddelerinin morfolojik görünümünün elde edilmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy, SEM) yöntemi kullanılmıştır. Numune yüzeyinin deneylerin başlangıcındaki SEM görüntüsü Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19. Deneylerin başlangıcında numune yüzeyinin SEM görüntüsü

Numune içeriğinin ve aşınmış yüzeylerdeki elementlerin belirlenmesi için Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) analizi gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde kullanılan AISI 4140 numune yüzeyine ait başlangıç içeriğini gösteren EDS analizi Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20. Deneylede kullanılan AISI 4140 numune yüzeyine ait başlangıç kompozisyonu

Katkı maddelerinin kristalografik yapısı, kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinmek için X-Ray Kırınım Analizi (X-Ray Diffraction Analysis, XRD) gerçekleştirilmiştir.

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu tez çalışması kapsamında sıvı yağ olarak kullanılan iki farklı baz yağ (SAE 20W50 ve ham fındık yağı) ve dört farklı katkı maddesi ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ , granül ve toz  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) kullanılmıştır. Çalışmalarda, iki çeşit sıvı baz yağdan biri olan SAE 20W50 motor yağına katkı maddesi olarak molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve kalsiyum florür ( $\text{CaF}_2$ ); sıvı baz yağlardan diğeri olan fındık yağına ise toz (ultra düşük sülfatlı) borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ve granül (ultra düşük sülfatlı) borik asit ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) katılarak deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar yüzeysel temas geometrisinde tasarlanmış block-on-ring test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm içerisinde çalışmalar ile ilgili detay, bulgu ve irdelemeler verilecektir.

#### 3.1. Baz Yağ Olarak Kullanılan Motor Yağı ile İlgili Çalışmalar

Bu bölümde baz yağ olarak 20W50 motor yağı ve katkı maddesi olarak molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve kalsiyum florür ( $\text{CaF}_2$ ) partikülleri seçilmiştir. İlk olarak literatürden referans alınarak motor yağına ağırlıkça %0,25 ve 0,5 oranlarında katkı maddeleri ayrı ayrı eklenerek farklı yağ karışımları elde edilmiştir ve farklı çalışma hızları ve yükleme şartlarında deneyler yapılarak ideal çalışma hızı seçilmiştir. Daha sonra seçilen çalışma hızında, katkı oranları artırılarak (%0,1-1) farklı temas yüklerinde (144, 353 ve 546 N) deneyler gerçekleştirilmiştir ve tüm durumlar için sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı sonuçları incelenerek optimum katkı oranı ve yük belirlenmiştir. Ardından optimum koşullarda yağ sıcaklığı yaklaşık 50-55°C'de şartlandırılmıştır ve yağ karışımlarının sürtünme davranışı incelenmiştir. Son olarak optimum katkılı yağ şartlarında çalışan numune yüzeyleri SEM ve EDS teknikleri ile analiz edilmiştir. Bu kısımdaki çalışma şartlarının detayları Tablo 3.1'de verilmiştir. Her bir deney için test süresi 1300 s'dir ve elde edilen verilerin doğruluğu için testler 3 (üç) kez tekrarlanarak ilgili değerlerin ortalaması alınmıştır. Sürtünme katsayısını gösteren grafiklere en küçük kareler yöntemi kullanılarak eğriler uyumlanmıştır. Her deneyden önce numune ve disk yüzeyleri sırasıyla 800 ve 1000'lik zımparalar ile aşamalı olarak zımparalanmış ve aseton-izopropanol karışımı ile temizlenerek başlangıç şartlarına hazır hale getirilmiştir.

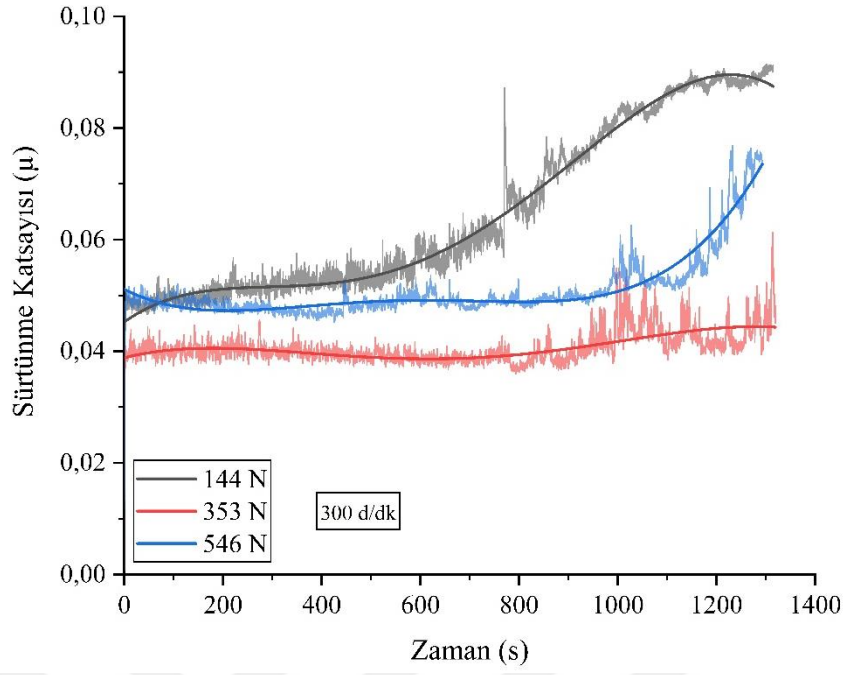
Tablo 3.1. Motor yağı çalışmalarına ait deney şartları

Katkı	Ağırlıkça %	Yük	N	144	353	546	Bağlı Nem, % 70
MoS <sub>2</sub> CaF <sub>2</sub>	0,1; 0,25; 0,5; 1	<b>Temas basıncı</b>	MPa	1,28	3,15	4,88	
		<b>Kayma hızı</b>	m/s	0,94	1,88	2,83	
			d/dk	300	600	900	
		<b>Katedilen mesafe</b>	m	1220	2440	3680	
		<b>Yağ sıcaklıkları</b>	°C	23	50-55		

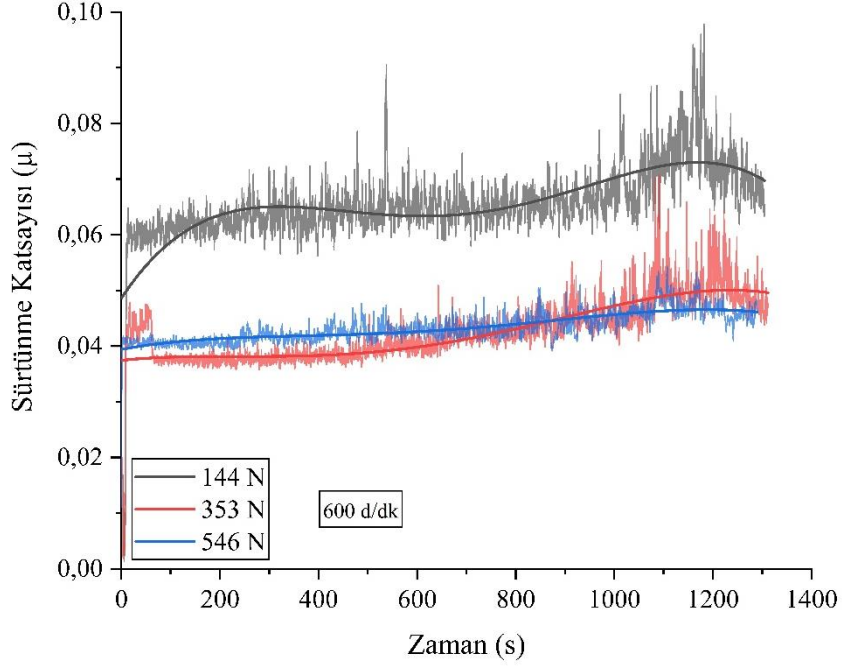
### 3.1.1. Motor Yağının Sürtünme Davranışı

İlk olarak, optimum çalışma koşullarını belirlemek için üç farklı devir (300, 600 ve 900 d/dk) ve yükte (144, 353 ve 546 N) motor yağının (SAE 20W50) sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) davranışları incelenmiştir. Ardından motor yağına literatürden faydalanılarak %0,25 ve 0,5 katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkıları eklenmiştir ve farklı devir ve yüklerde sürtünme davranışına etkileri araştırılmıştır.

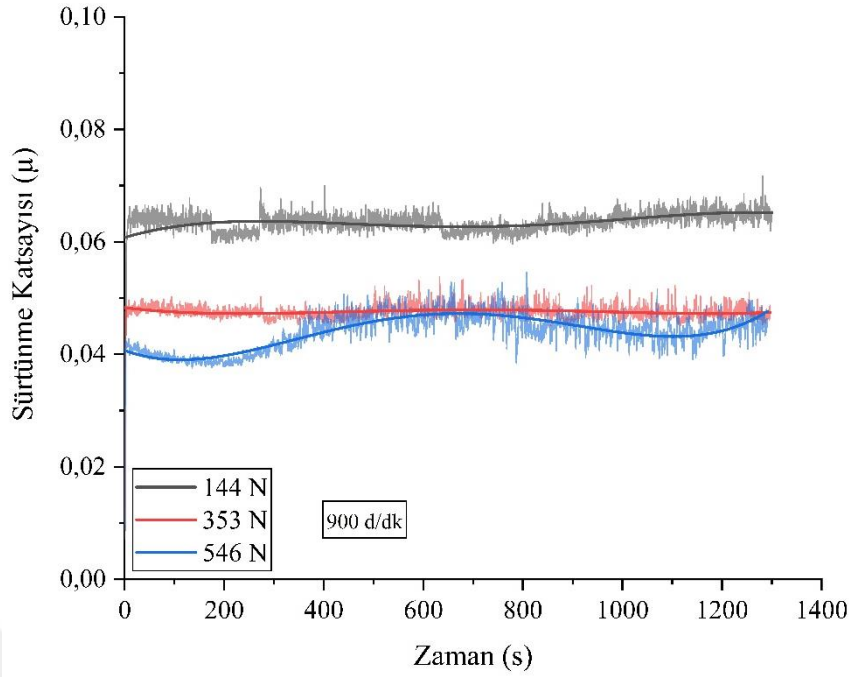
Motor yağının farklı devir ve yüklerdeki sürtünme davranışları Şekil 3.1-3 arasında verilmiştir. Düşük devirlerde, 300 d/dk (0,94 m/s), baz yağın  $\mu$  değerlerinde orta yüke (353 N) kadar düşüş gözlemlendi ve çalışma süresinin ortalarına kadar (750-800 s) katsayı değerlerinde sapmaların azaldığı görüldü (Şekil 3.1) Orta devirlerde, 600 d/dk (1,88 m/s), yük artışı ile  $\mu$  değerlerinde devamlı bir düşüş gözlemlendi (Şekil 3.2). Yüksek devirlerde, 900 d/dk (2,83 m/s) ise,  $\mu$  eğrileri yük ile orta devire benzer bir davranış sergiledi ancak sapmaların yük artışı ile arttığı görüldü (Şekil 3.3).



Şekil 3.1. 300 d/dk ve farklı yüklerde katkısız motor yağının sürtünme katsayısı



Şekil 3.2. 600 d/dk ve farklı yüklerde katkısız motor yağının sürtünme katsayısı

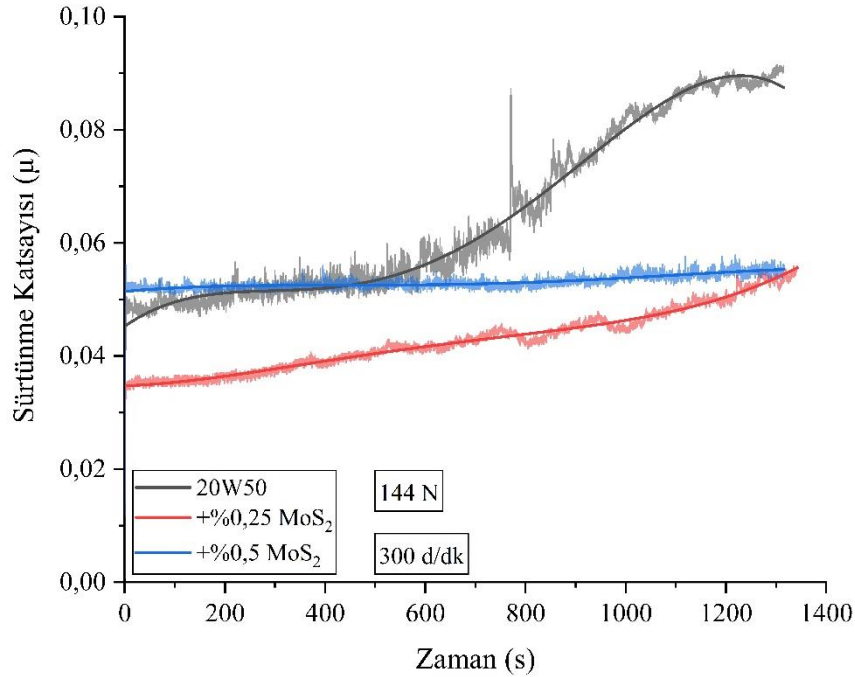


Şekil 3.3. 900 d/dk ve farklı yüklerde katkısız motor yağının sürtünme katsayısı

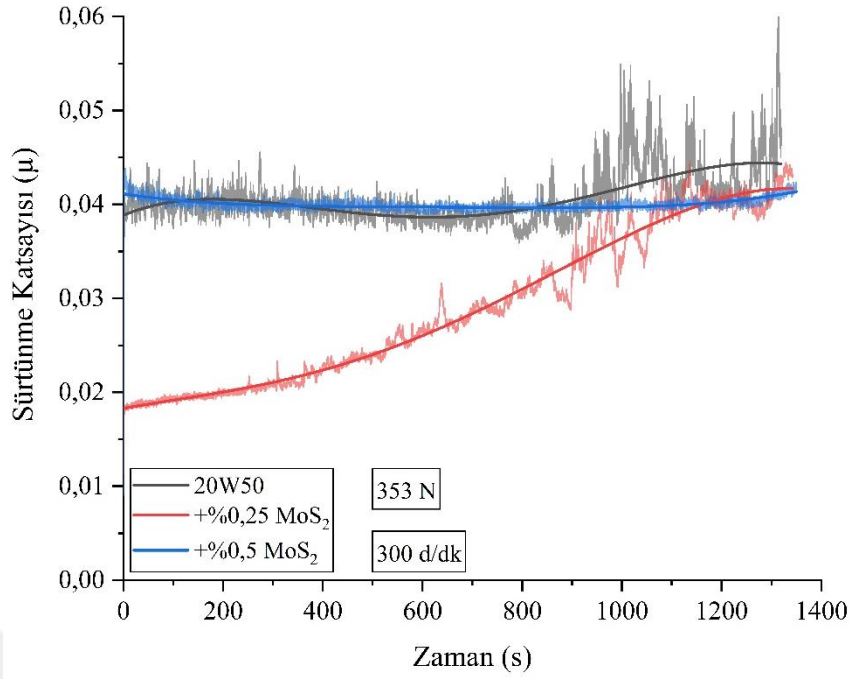
Numune ve diskin uyumlu yüzeylere (9 ve 10) sahip olmasının yanında temas yükleri ile oluşan yüzeysel basınçların yüksek olması, çalışmanın sınır yağlama bölgesinde gerçekleşmesine neden olmuştur. Ayrıca, hidrodinamik kaymalı yataklar göz önüne alındığında, kullanılan sistemde diske göre numune yüzey genişliğinin çok küçük olması nedeniyle yağlamanın baskın şekilde sınır sürtünme bölgesinde gerçekleştiği görülmüştür. Sınır yağlama bölgesinde, yağ filminin süreksiz olması ve sıklıkla yüzey pürüzlülüklerin teması yani metal-metal temasının gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bu durum, yüzeyler arasında anlık kaynama noktalarının oluşumuna ve çalışma yüzeyleri arasında malzeme transferine neden olmaktadır ve bu nedenle sürtünme katsayısında ve aşınma miktarında artış meydana gelmektedir [3]. Ayrıca motor yağının taşıma kapasitesinin yapılan deneylerde yetersiz olması, yüzeyler arasında yağ filmi oluşum etkisinin zayıf olmasına ve sürtünme katsayısındaki değerlerin fazla değişim göstermesine neden olmaktadır [4]. Bunun yanında, aşırı hız, yük ve sıcaklık durumlarında yağ filmi oluşum etkisinin zayıf kaldığı ve sınır yağlama şartlarında sürtünme yüzeylerinin temasını arttırdığı düşünülebilir.

### 3.1.1.1. Molibden Disülfür (MoS<sub>2</sub>) Katkısının Motor Yağı Üzerindeki Sürtünme Etkileri

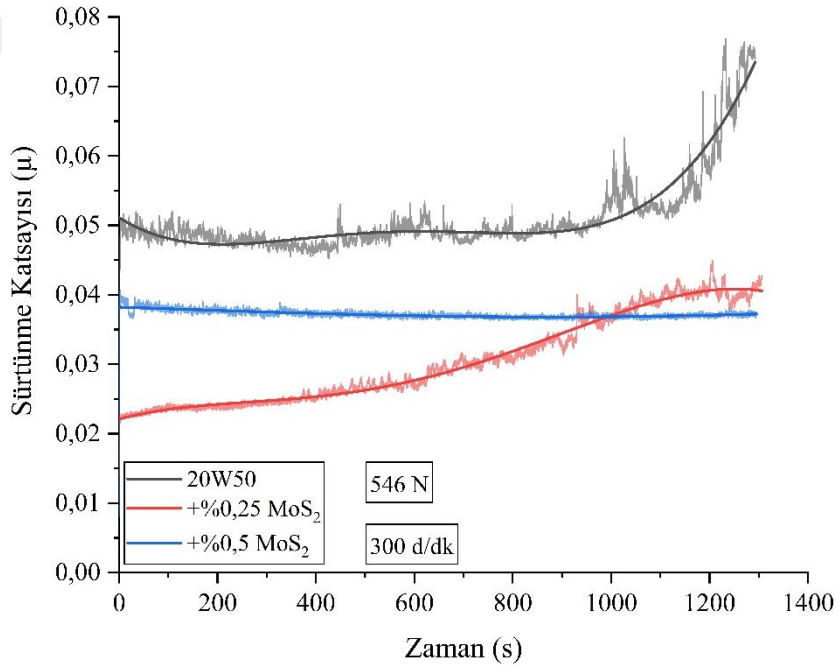
Düşük devir (300 d/dk) ve farklı yüklemeye koşullarında, değişken katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> katkısının motor yağı üzerindeki sürtünme etkileri Şekil 3.4-6 arasında verilmiştir. Düşük devir ve yükte, baz yağa MoS<sub>2</sub> katkısının sürtünme düşürücü etki gösterdiği ve özellikle ağırlıkça %0,5 katkı oranında  $\mu$  değerlerine kararlılık kazandırdığı görüldü (Şekil 3.4). Orta yükte, çalışma başlangıcında ağırlıkça %0,25 oranında MoS<sub>2</sub> katkısı sürtünme düşürücü etki gösterse de  $\mu$  değerlerinin sürekli artan bir karakter sergilediği gözlemlendi. Bunun yanında ağırlıkça %0,5 katkı oranının  $\mu$  değerlerinin sapmasını azalttığı belirlendi (Şekil 3.5). Yük artışı ile MoS<sub>2</sub> katkısının sürtünme düşürücü etkisinin devam ettiği görüldü. Motor yağına ağırlıkça %0,25 oranında MoS<sub>2</sub> katkısı ile en düşük  $\mu$  değerini elde edilirken ağırlıkça %0,5 katkı oranında  $\mu$  değerlerindeki sapmaların azaldığı gözlemlendi (Şekil 3.6). Ağırlıkça %0,25 katkı oranının az olması ve çalışma alanında yeteri kadar bulunamaması nedeniyle, katkı maddesinin eş çalışan yüzeylerde doğrudan teması engelleyemediği ve  $\mu$  değerlerinin artan karakter sergilediği görülmektedir [93].



Şekil 3.4. 300 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

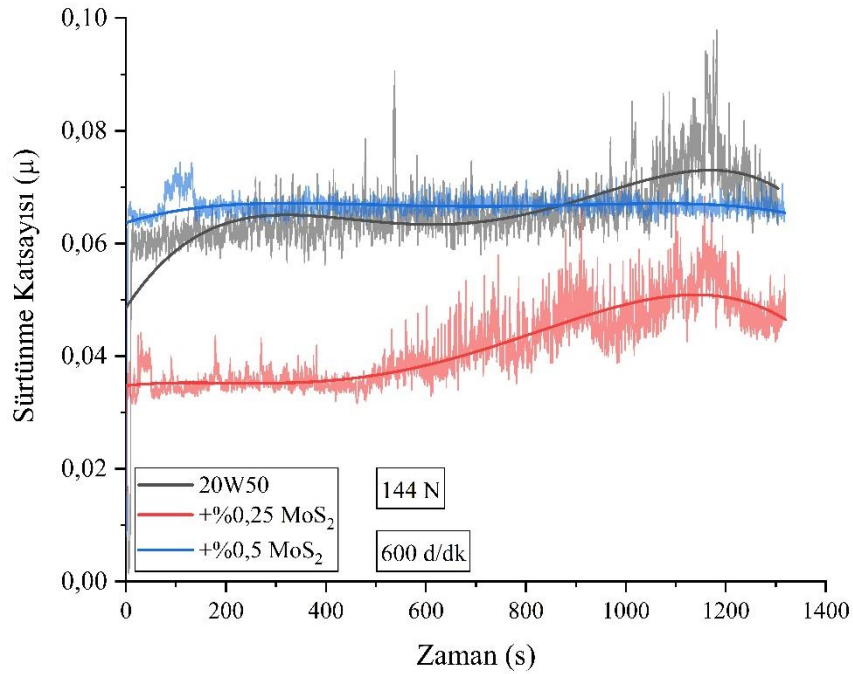


Şekil 3.5. 300 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

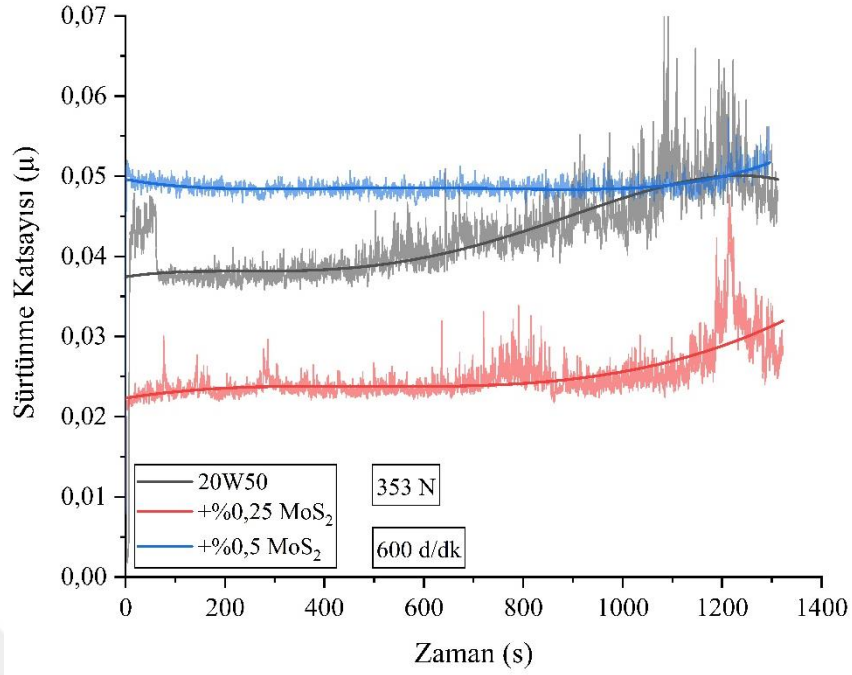


Şekil 3.6. 300 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

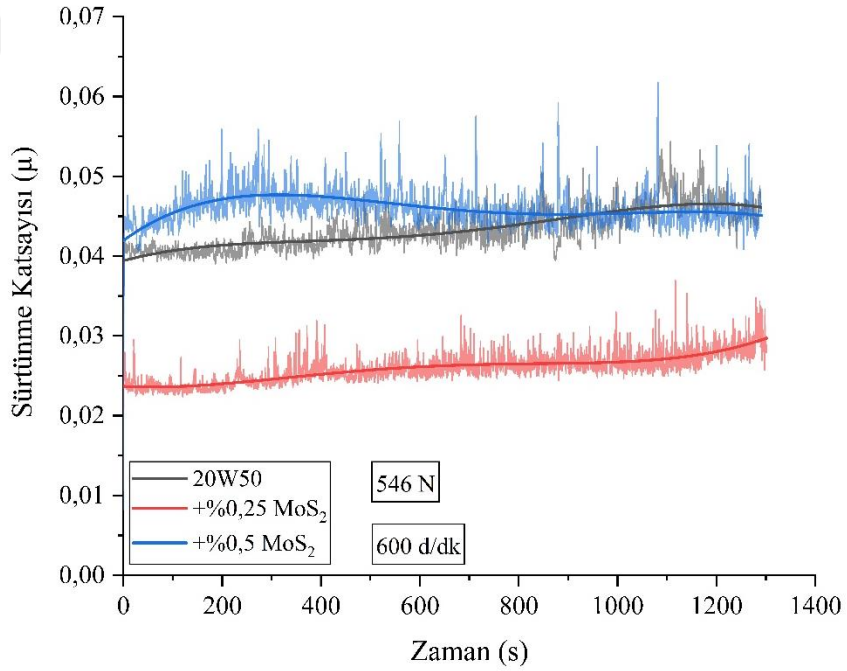
Orta devir (600 d/dk) ve farklı yüklenme koşullarında, değişken katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> katkısının motor yağı üzerindeki sürtünme etkileri Şekil 3.7-9 arasında verilmiştir. Orta devirlerde, baz yağa ağırlıkça %0,25 oranında MoS<sub>2</sub> katkısının tüm temas yüklerinde sürtünmede azaltıcı etkiye sahip olduğu ve yük artışı ile  $\mu$  değerlerindeki sapmaların azaldığı görüldü. İlave olarak, özellikle orta ve yüksek yüklerde katkı oranı arttıkça kararlı  $\mu$  değerleri elde edilirken sürtünme düşürücü etkinin azaldığı saptanmıştır (Şekil 3.6-9). Sınır yağlama rejiminde baz yağ içerisindeki ince MoS<sub>2</sub> katkı partikülleri, katmanlı yapısından ötürü pürüz tepelerindeki metal-metal temasını geciktirme eğilimindedir ve bu durum kaymaya yardımcı olur. Böylece daha düşük sürtünme değerleri ortaya koyar [94].



Şekil 3.7. 600 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

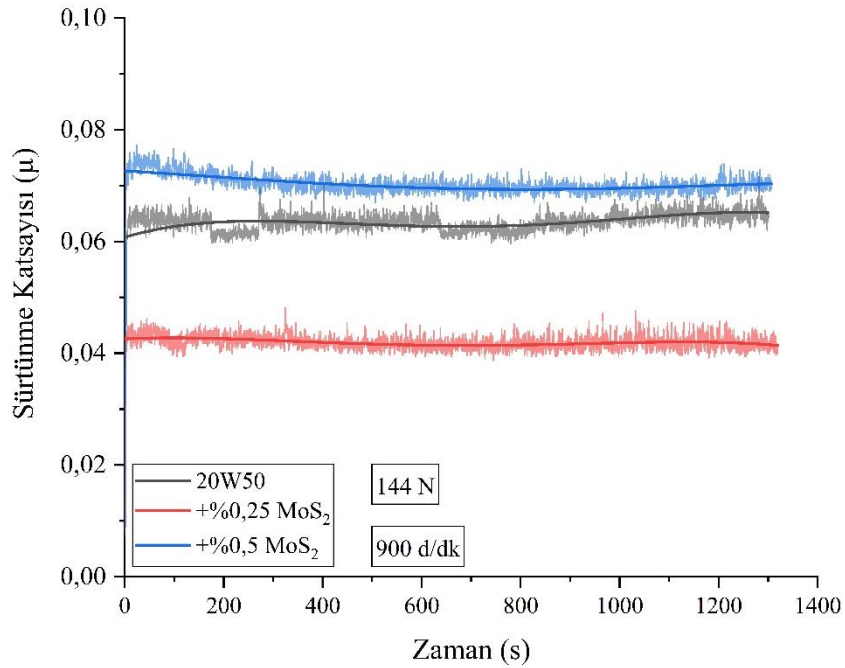


Şekil 3.8. 600 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

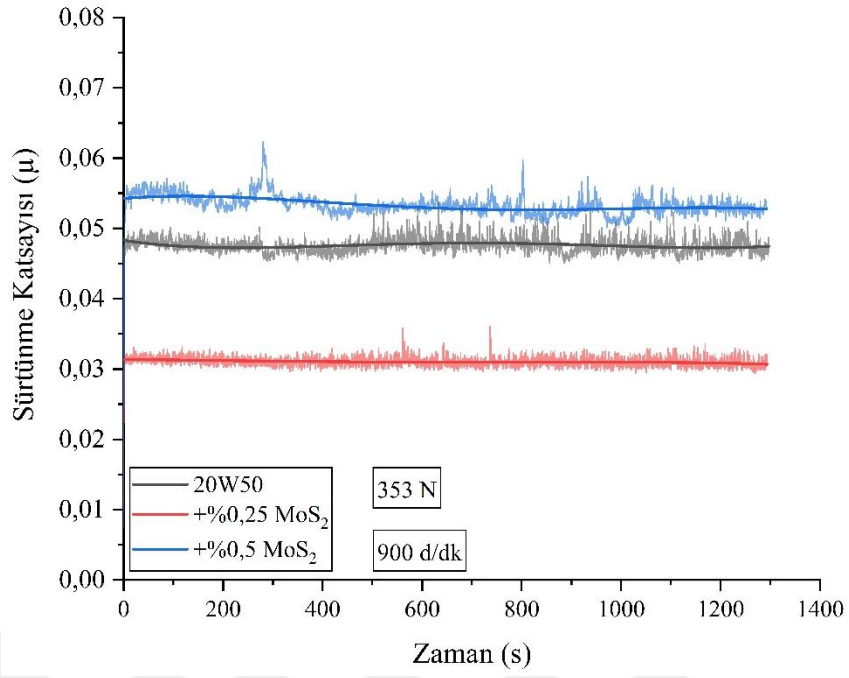


Şekil 3.9. 600 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

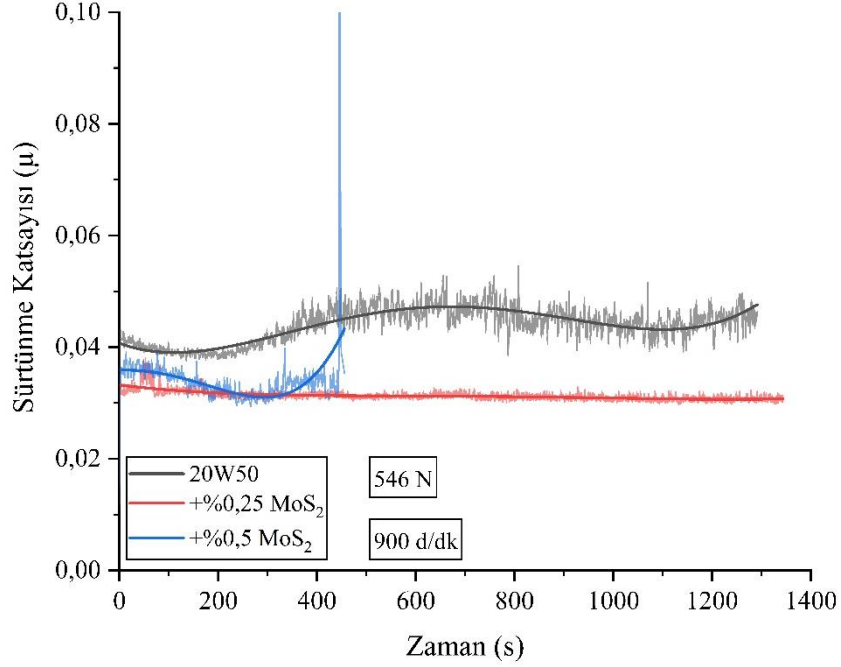
Yüksek devir (900 d/dk) ve farklı yükleme koşullarında, değişken katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> katkısının motor yağı üzerindeki sürtünme etkileri Şekil 3.10-12 arasında verilmiştir. Yüksek devirlerde, tüm yükleme durumlarında baz yağa ağırlıkça %0,25 MoS<sub>2</sub> katkısı sürtünmeyi azaltıcı etkisine devam etmiştir. Bu durumun, baz yağ içerisindeki ince parçacıkların sürtünme çifti arasına girerek pul pul dökülmesi (exfoliation) ve kristal yapıdaki katmanların kayması ile göreceli harekete izin vermesi sonucu düşük sürtünmenin elde edildiği söylenebilir [95]. Ayrıca yüksek yükleme durumunda katkı oranı arttıkça,  $\mu$  değerlerindeki sapmaların arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.9-12). Burada, hız ve yük artışı ile eş çalışan yüzeyler arasındaki boşluk azalmıştır ve bu durum, çalışma bölgesindeki MoS<sub>2</sub> partiküllerinin varlığını etkilemiştir. Özellikle yüksek yükte basıncın artması ile yağ filmi oluşum etkisinin oldukça zayıflaması ve katkı oranı artışının film oluşumuna etkisinin daha da azaldığı söylenebilir [18, 94].



Şekil 3.10. 900 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi



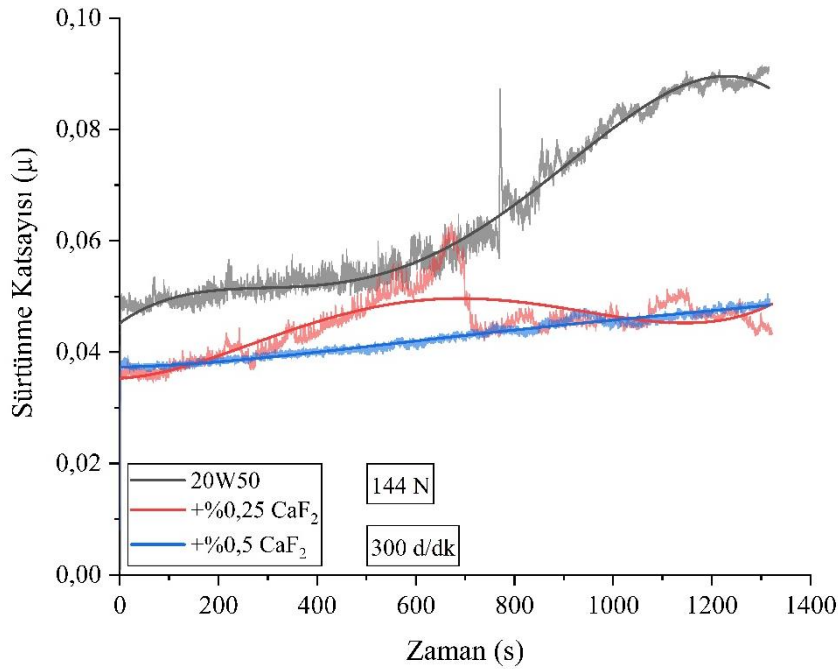
Şekil 3.11. 900 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi



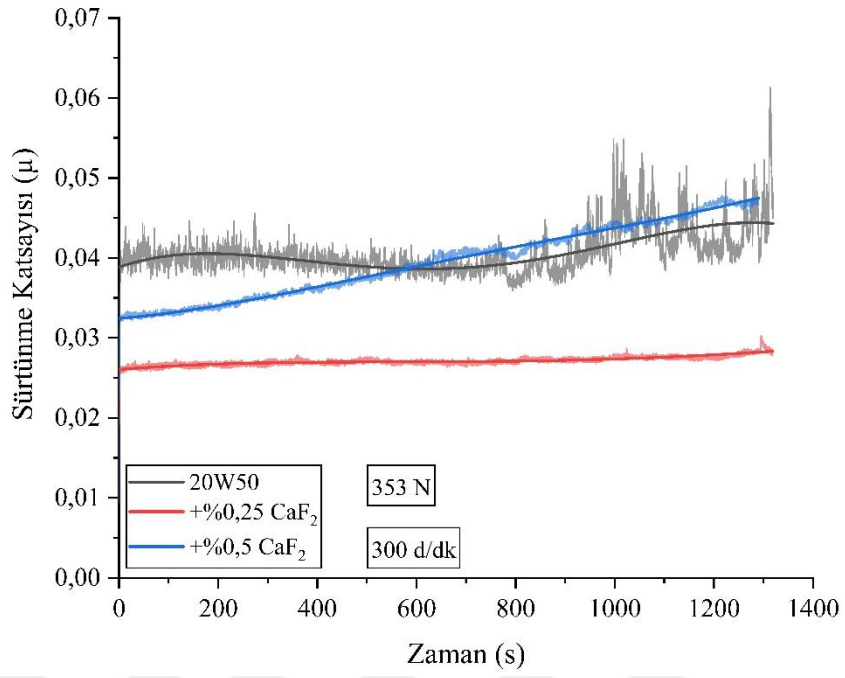
Şekil 3.12. 900 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

### 3.1.1.2. Kalsiyum Florür (CaF<sub>2</sub>) Katkısının Motor Yağı Üzerindeki Sürtünme Etkileri

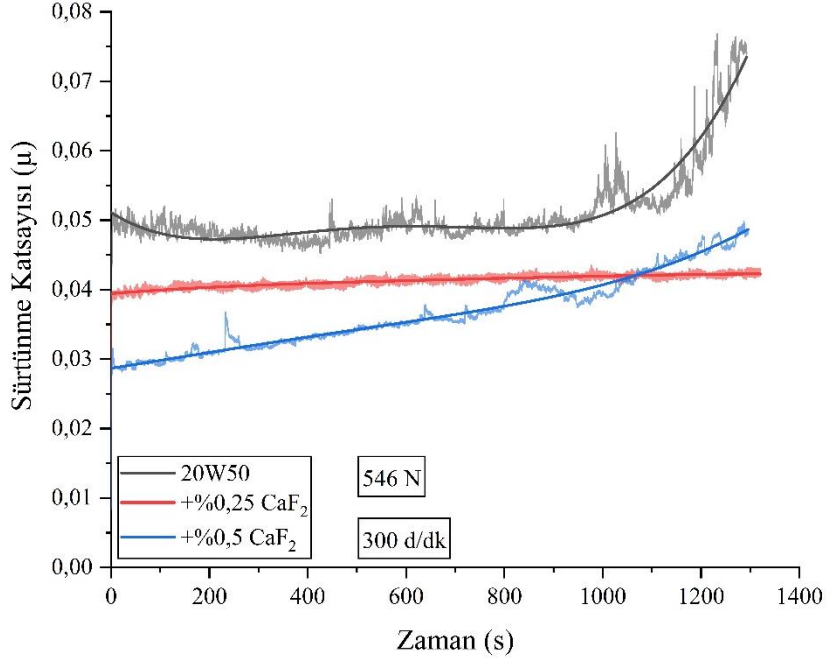
Düşük devir (300 d/dk) ve farklı yükleme koşullarında, değişken katkı oranlarında CaF<sub>2</sub> katkısının motor yağı üzerindeki sürtünme etkileri Şekil 3.13-15 arasında verilmiştir. Düşük devir ve yükte (144 N), baz yağa CaF<sub>2</sub> katkısı çalışmanın başlangıcında sürtünmeyi azaltıcı etki göstermesine rağmen, sürtünme katsayısının artan değerler aldığı tespit edildi (Şekil 3.13). Orta (353 N) ve yüksek yükleme (546 N) durumlarında, ağırlıkça %0,25 CaF<sub>2</sub> katkısı motor yağı üzerinde sürtünmeyi azaltıcı etki göstermiştir ve kararlı  $\mu$  değerleri elde edilmiştir. Ancak katkı oranının artışı ile katsayı eğrisinin artan karaktere büründüğü gözlemlendi (Şekil 3.14-15). Katkı oranının artışı ile sapmaların artması ve  $\mu$  değerlerinin artması, CaF<sub>2</sub> partiküllerinin boyutu ve çalışma yüzeylerinde tutunamamasından kaynaklanmıştır [96].



Şekil 3.13. 300 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

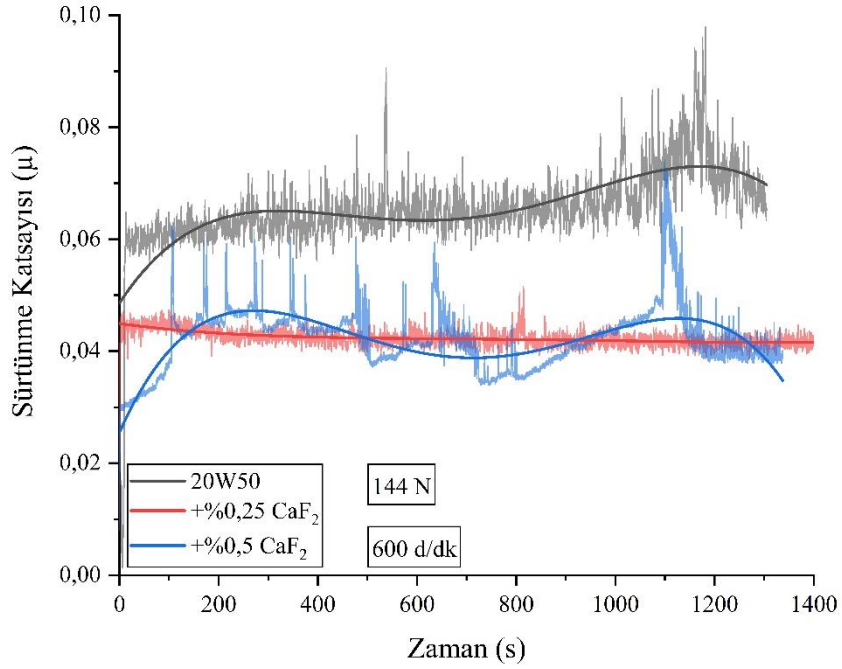


Şekil 3.14. 300 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

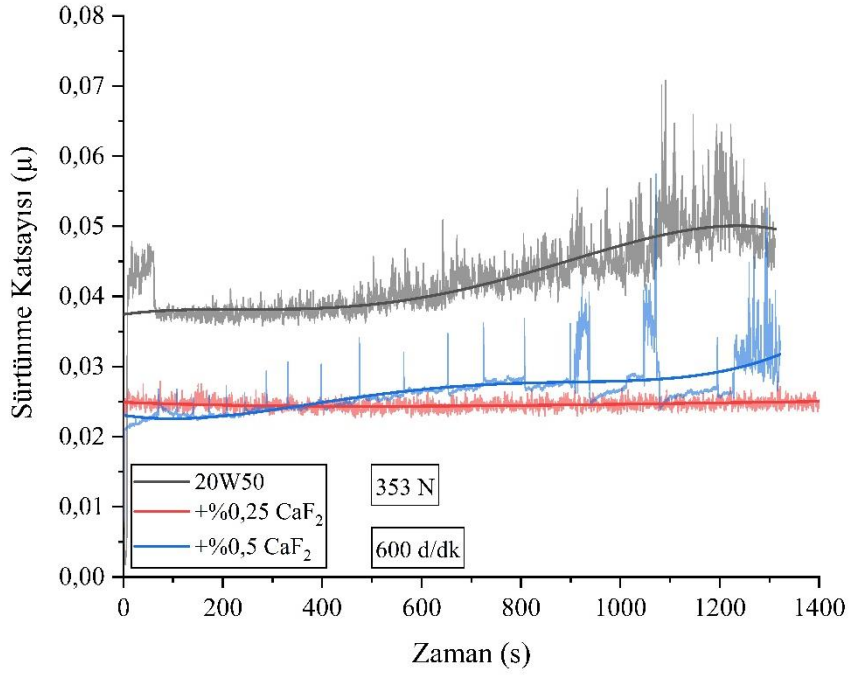


Şekil 3.15. 300 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

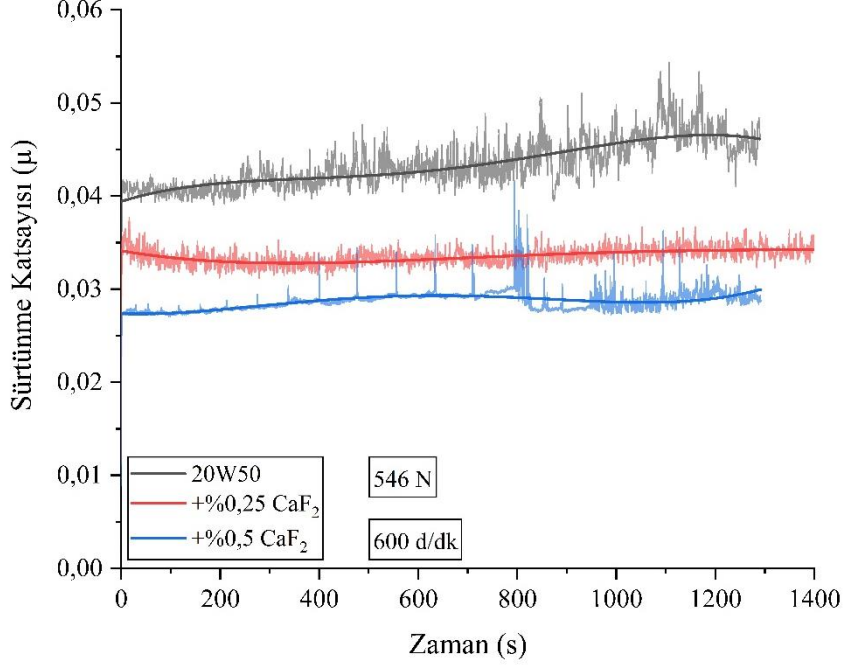
Orta devir (600 d/dk) ve farklı yükleme koşullarında, değişken katkı oranlarında CaF<sub>2</sub> katkısının motor yağı üzerindeki sürtünme etkileri Şekil 3.16-18 arasında verilmiştir. Orta devirde, tüm yükleme durumlarında baz yağa CaF<sub>2</sub> katkısının özellikle ağırlıkça %0,25 katkı oranında sürtünmeyi azaltıcı etki gösterdiği ve  $\mu$  değerlerindeki sapmaların oldukça azaldığı gözlemlendi. CaF<sub>2</sub> partiküllerinin sürtünme yüzeyine absorbe olmuştur ve düşük kayma direnci sayesinde direk teması engelleyerek yağlamayı kolaylaştırmıştır ve sürtünmeyi azaltmıştır [85]. Katkı oranının artışı ile  $\mu$  değer aralığının genişlediği ve sapmaların arttığı görüldü (Şekil 3.16-18). Temas noktasındaki CaF<sub>2</sub> partiküllerinin topaklanması şiddetli sürtünmeye ve kazıma etkisine neden olmuştur. Bu durum yüzeyin aşınma direncini düşürmüş ve yağ film oluşum etkisini azaltarak sapmalara neden olmuştur [97].



Şekil 3.16. 600 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

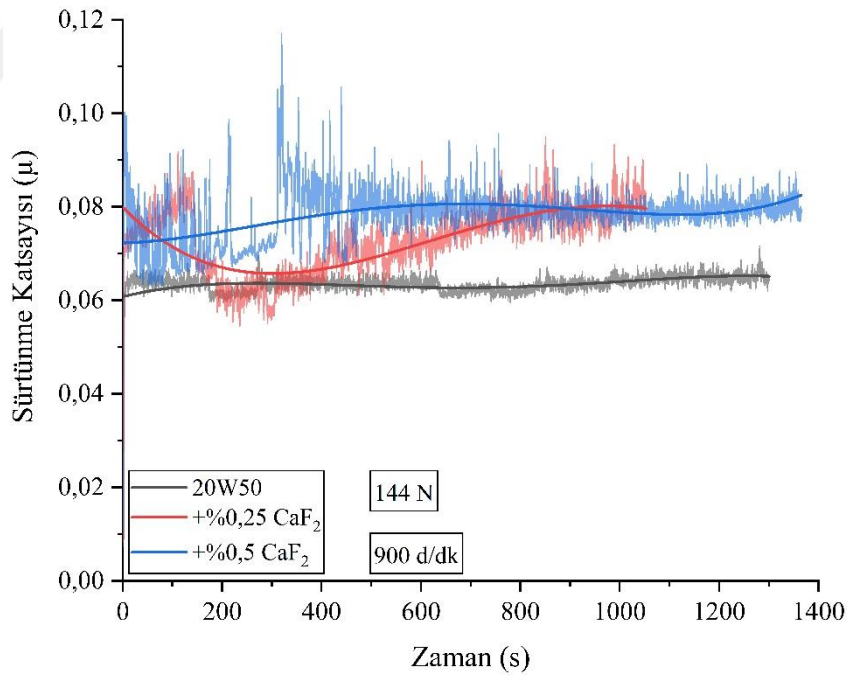


Şekil 3.17. 600 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

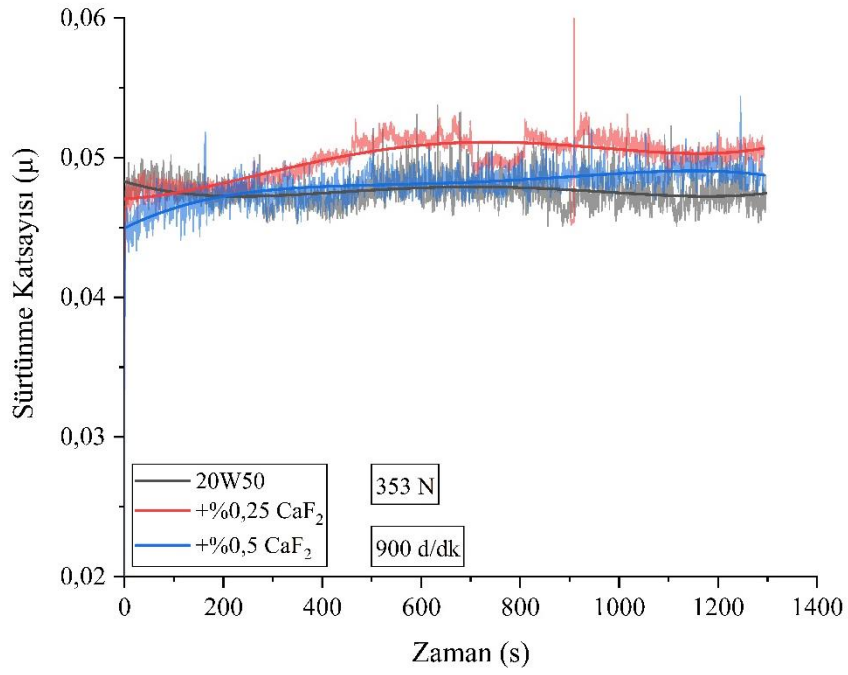


Şekil 3.18. 600 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

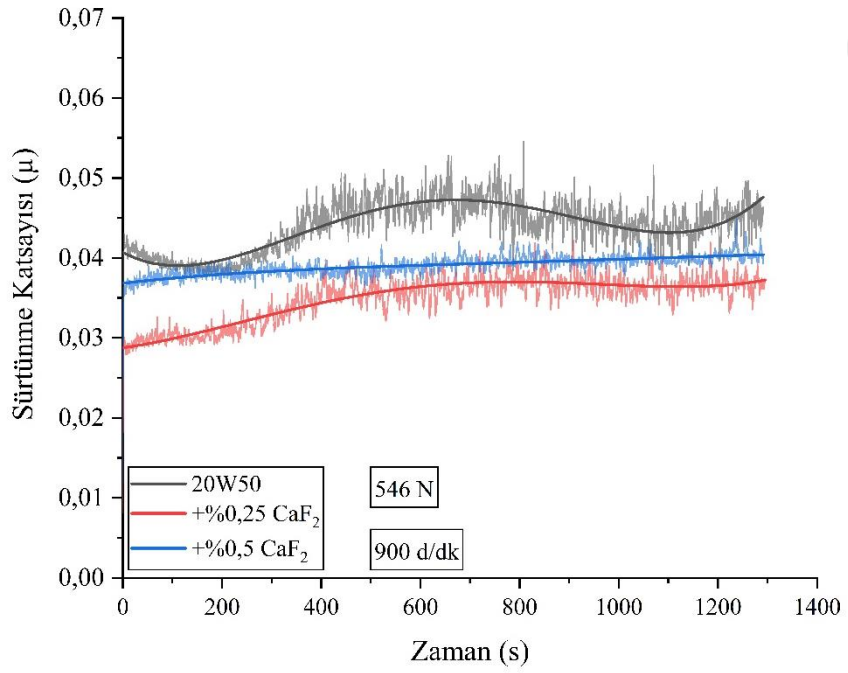
Yüksek devir (900 d/dk) ve farklı yükleme koşullarında, değişken katkı oranlarında CaF<sub>2</sub> katkısının motor yağı üzerindeki sürtünme etkileri Şekil 3.19-21 arasında verilmiştir. Yüksek devirde, düşük yükleme durumunda baz yağa CaF<sub>2</sub> katkısının sürtünme katsayısı değerlerindeki sapmaları arttırdığı görüldü (Şekil 3.19). Özellikle testin başlangıcında CaF<sub>2</sub> partikülleri yüzeye absorbe olmada zorlanmış ve kısmi yağlamaya neden olmuştur [56]. CaF<sub>2</sub> katkısının yalnızca yüksek yükte baz yağ üzerinde sürtünmeyi azaltıcı etkisi olduğu gözlemlendi (Şekil 3.21-22). Yük artışı ile CaF<sub>2</sub> partiküllerinin boyutunun azalması ve yüzeye absorbe olmasının kolaylaşması sonucu, sürtünmeyi azaltıcı etkinin oluştuğu söylenebilir. Boyutu düşük CaF<sub>2</sub> partikülleri, katmanlı yapısı ile yağ filmi oluşum etkisini artırmıştır [85]. Partikül boyutu büyük katkı maddeleri, kaba pürüzlü yüzey ve düşük izafi hızlarda çalışan sistemlerde iyi performans göstermektedir [7]. Yüksek çalışma hızlarında büyük boyutlu CaF<sub>2</sub> partiküllerinin çalışma yüzeyine anlık giriş ve çıkışı, yüzeylerde sürekli gelişen bir kazıma etkisi (scuffing) göstererek sürtünme değerlerinde ani artışlara sebep olduğu söylenebilir [98].



Şekil 3.19. 900 d/dk ve 144 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi



Şekil 3.20. 900 d/dk ve 353 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi



Şekil 3.21. 900 d/dk ve 546 N şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının motor yağının sürtünme katsayısına etkisi

### 3.1.2. Optimum Koşullarda Sürtünme, Aşınma ve Yağ Sıcaklığı Davranışları

Farklı yük, hız ve katkı oranlarında katkılı yağların sürtünme davranışlarını daha iyi analiz edebilmek ve optimum koşulları seçebilmek için Bölüm 3.1.1'deki MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkılı yağlara ait sürtünme verileri, sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ) şeklinde toparlanmıştır.

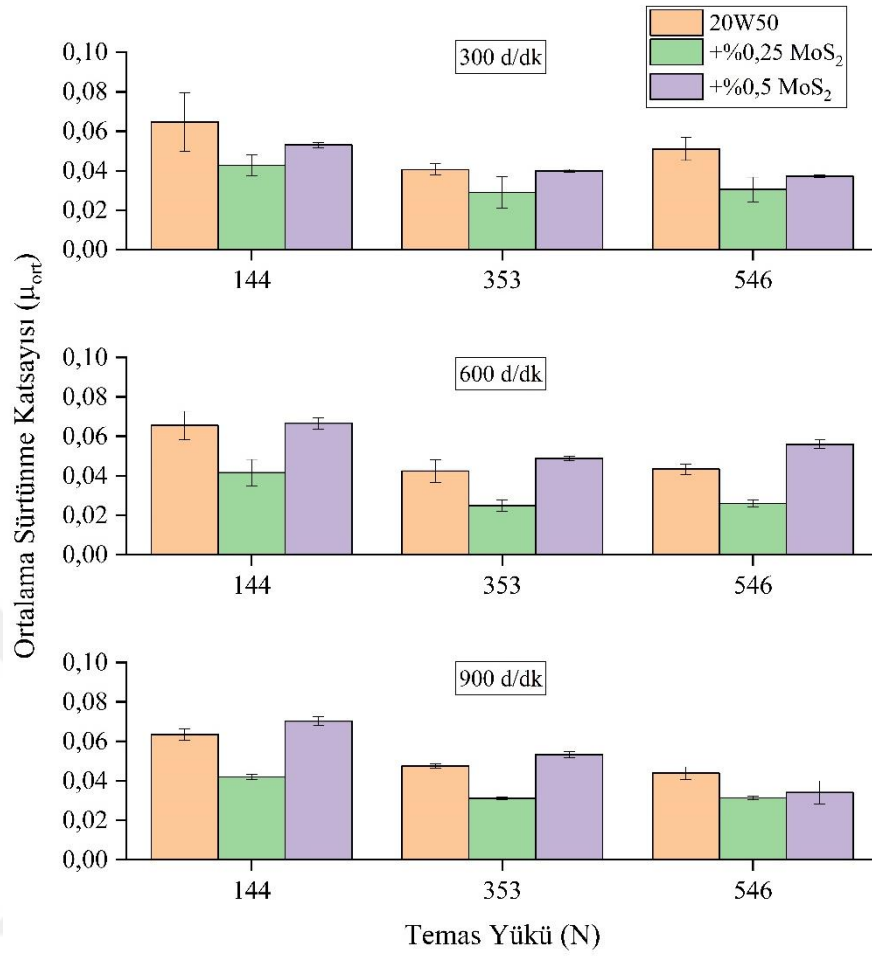
Farklı devir ve katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ) Tablo 3.2'de ve ilgili görsel Şekil 3.22'de verilmiştir.

Farklı devir ve katkı oranlarında CaF<sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ ) Tablo 3.3'te ve ilgili görsel Şekil 3.23'te verilmiştir.

Sürtünme davranışı bulguları incelendiğinde katkılı yağların orta devirde (600 d/dk) daha düşük  $\mu_{ort}$  değerlerine sahip olduğu görüldü ve her iki katkı maddesinin de benzer koşullarda incelenmesi adına en uygun çalışma hızı 600 d/dk (1.88 m/s) olarak seçildi. Literatürde benzer çalışmaların orta devirlerde gerçekleştirildiği görüldü [65, 99, 100]. Seçilen çalışma hızı koşullarında uygun katkı oranı ve yükleme durumunu belirlemek için, baz yağa yukarıda bahsedildiği gibi ağırlıkça %0,25 ve 0,5 katkı oranlarına ilave olarak ağırlıkça %0.1 ve 1 oranları da eklenerek katkılı yağların sürtünme ve aşınma davranışları incelendi.

Tablo 3.2. Farklı devir ve katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ )

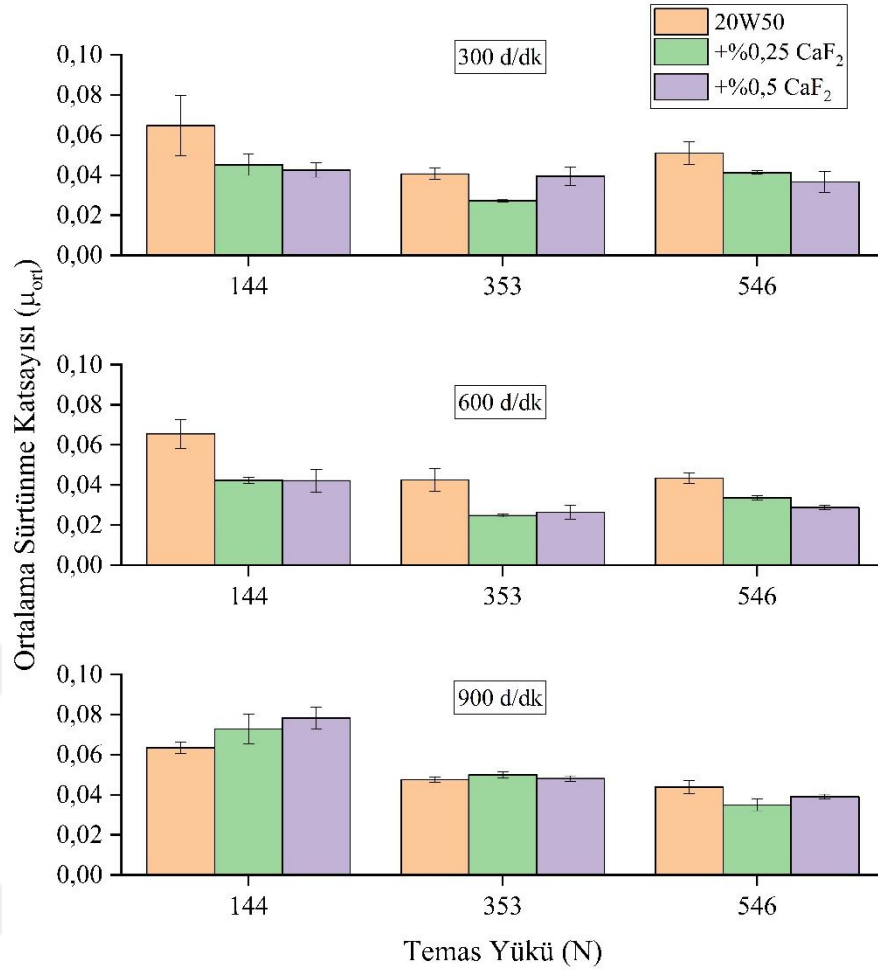
Yük (N)	300 d/dk (0,94 m/s)			600 d/dk (1,88 m/s)			900 d/dk (2,83 m/s)		
	$\mu_{ort}$			$\mu_{ort}$			$\mu_{ort}$		
	20W50	+%0,25 MoS <sub>2</sub>	+%0,5 MoS <sub>2</sub>	20W50	+%0,25 MoS <sub>2</sub>	+%0,5 MoS <sub>2</sub>	20W50	+%0,25 MoS <sub>2</sub>	+%0,5 MoS <sub>2</sub>
144	0,065	0,043	0,053	0,065	0,041	0,067	0,063	0,042	0,070
353	0,041	0,029	0,040	0,042	0,024	0,049	0,048	0,031	0,053
546	0,051	0,031	0,037	0,043	0,026	0,056	0,044	0,031	0,034



Şekil 3.22. Farklı yük, hız ve katkı oranlarında MoS<sub>2</sub> katkıli yağların sürtünme katsayısı ortalama değerleri

Tablo 3.3. Farklı devir ve katkı oranlarında CaF<sub>2</sub> katkıli yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri (μ<sub>ort</sub>)

Yük (N)	300 d/dk (0,94 m/s)			600 d/dk (1,88 m/s)			900 d/dk (2,83 m/s)		
	μ <sub>ort</sub>			μ <sub>ort</sub>			μ <sub>ort</sub>		
	20W50	+%0,25 CaF <sub>2</sub>	+%0,5 CaF <sub>2</sub>	20W50	+%0,25 CaF <sub>2</sub>	+%0,5 CaF <sub>2</sub>	20W50	+%0,25 CaF <sub>2</sub>	+%0,5 CaF <sub>2</sub>
144	0,065	0,045	0,043	0,065	0,042	0,042	0,063	0,073	0,078
353	0,041	0,027	0,039	0,042	0,026	0,026	0,048	0,050	0,048
546	0,051	0,041	0,037	0,043	0,033	0,029	0,044	0,035	0,039

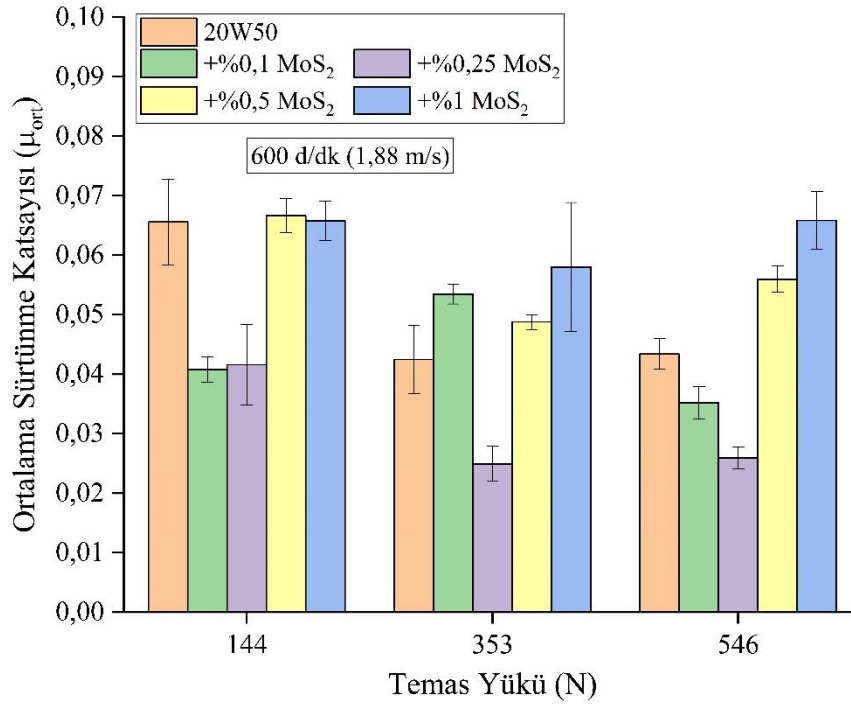


Şekil 3.23. Farklı yük, hız ve katkı oranlarında CaF<sub>2</sub> katkılı yağların sürtünme katsayısı ortalama değerleri

Seçilen çalışma hızında (600 d/dk), farklı yük ve MoS<sub>2</sub> katkı oranlarındaki sürtünme katsayısı ortalama değerleri, μ<sub>ort</sub> Tablo 3.4'te ve ilgili görsel Şekil 3.24'te verilmiştir. Düşük yükte (144 N), baz yağa ağırlıkça %0.1-0.25 oranlarında MoS<sub>2</sub> katılarak yapılan deneylerde, MoS<sub>2</sub> katkısı sürtünmeyi azaltıcı etki gösterirken katkı oranının artışı ile bu etkinin ortadan kaybolduğu tespit edildi. Orta yükte (353 N), MoS<sub>2</sub> katkısının ağırlıkça sadece %0.25 katkı oranında sürtünme düşürücü etkiye sahip olduğu belirlendi. Yüksek yükte (546 N), düşük yükte benzer şekilde davranış sergileyen MoS<sub>2</sub> katkılı baz yağın, ağırlıkça %0.1-0.25 katkı oranlarında sürtünmeyi azalttığı görülmüştür. Özellikle orta devir ve yükte, ağırlıkça %0.25 MoS<sub>2</sub> katkılı baz yağın en düşük μ<sub>ort</sub> değerine (μ<sub>ort</sub> = 0,024) sahip olduğu belirlendi.

Tablo 3.4. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ )

Yük (N)	600 d/dk (1,88 m/s)				
	$\mu_{ort}$				
	20W50	+%0,1 MoS <sub>2</sub>	+%0,25 MoS <sub>2</sub>	+%0,5 MoS <sub>2</sub>	+%1 MoS <sub>2</sub>
144	0,065	0,041	0,041	0,067	0,066
353	0,042	0,053	0,024	0,049	0,058
546	0,043	0,035	0,026	0,056	0,065

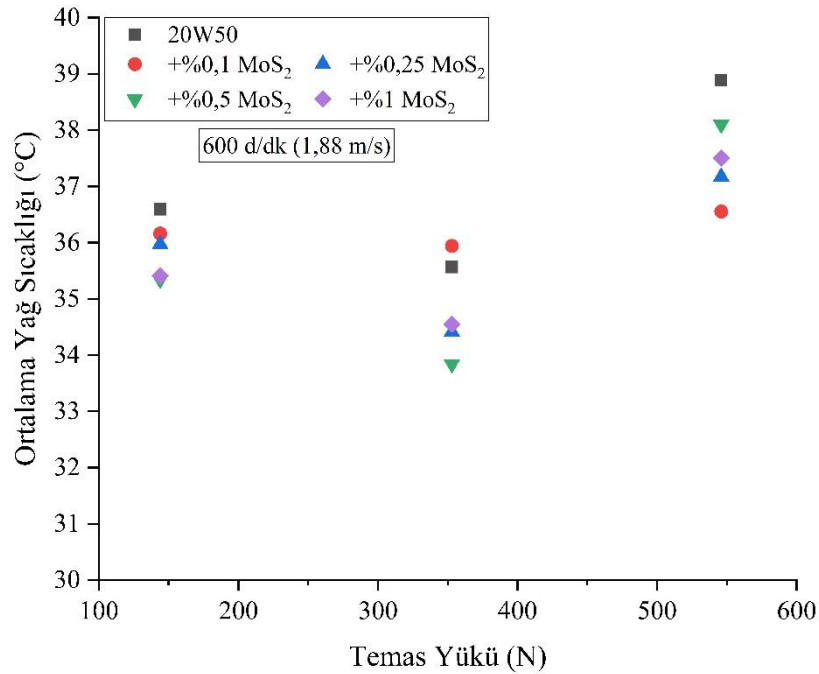


Şekil 3.24. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının baz yağın sürtünme katsayısına etkisi

Seçilen çalışma hızında farklı MoS<sub>2</sub> katkı oranı ve yüklerdeki yağ sıcaklığı ortalama değerleri Tablo 3.5'te ve ilgili görsel Şekil 3.25'te verilmiştir. Yağ sıcaklıklarında çok büyük farklar olmamakla birlikte, MoS<sub>2</sub> katkısının SAE 20W50 motor yağına eklenmesi ile yağ sıcaklığında düşüş meydana gelmiştir ve bu durum yüzeylerde lokal ısınmaları engelleyerek sürtünmenin azaltılmasına yardımcı olduğu söylenebilir. İlave olarak, en düşük sıcaklık ortalamalarının orta yükte ve ağırlıkça %0.5 katkı oranında olduğu tespit edildi.

Tablo 3.5. 600 d/dk ve farklı yüklemeye şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri

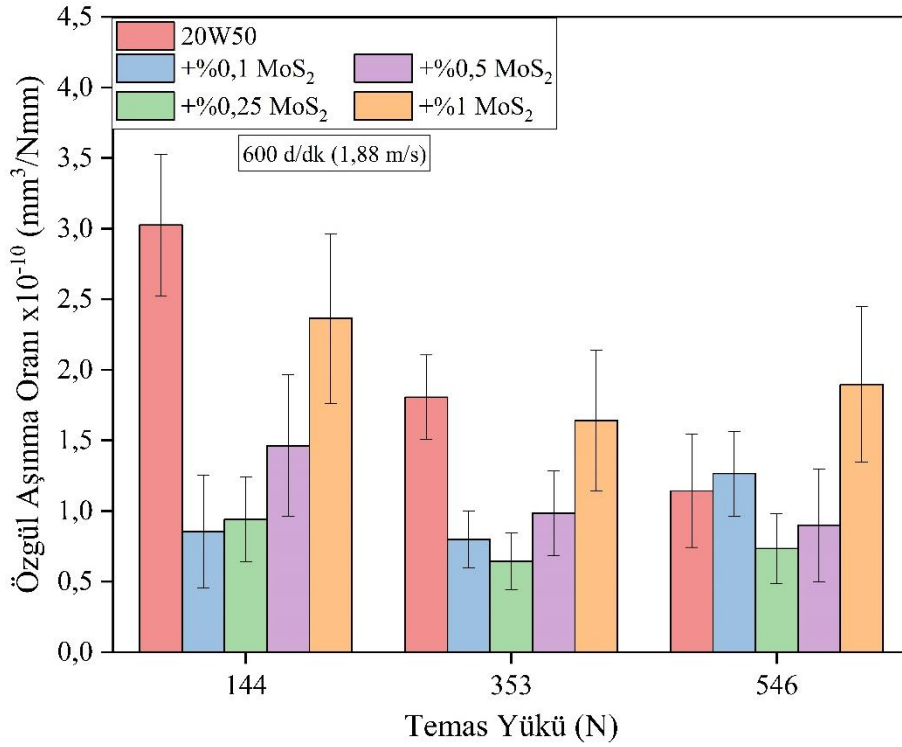
Yük (N)	600 d/dk (1,88 m/s)				
	20W50 (°C)	+%0,1 MoS <sub>2</sub> (°C)	+%0,25 MoS <sub>2</sub> (°C)	+%0,5 MoS <sub>2</sub> (°C)	+%1 MoS <sub>2</sub> (°C)
144	36,59	36,16	35,97	35,34	35,41
353	35,56	35,94	34,41	33,84	34,55
546	38,88	36,55	37,17	38,10	37,50



Şekil 3.25. 600 d/dk ve farklı yüklemeye şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının yağ sıcaklığına etkisi

Tablo 3.6. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkıli yağa ait özgül aşınma oranı değerleri

Yük (N)	600 d/dk (1,88 m/s)				
	20W50 x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%0,1 MoS <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%0,25 MoS <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%0,5 MoS <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%1 MoS <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)
144	3,03	0,85	0,94	1,46	2,36
353	1,81	0,80	0,63	0,98	1,64
546	1,14	1,26	0,73	0,90	1,90

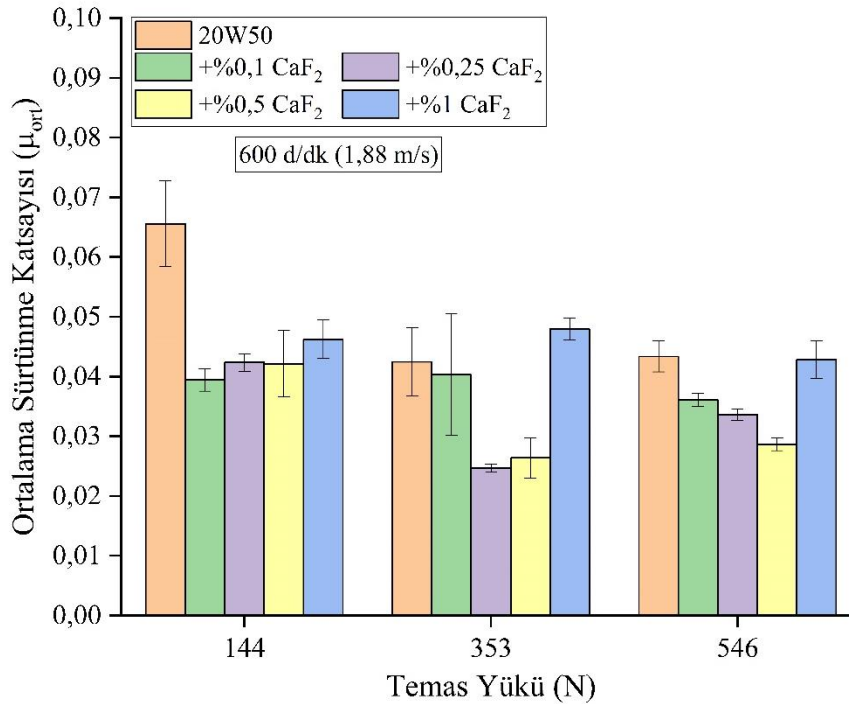


Şekil 3.26. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen MoS<sub>2</sub> katkı oranının baz yağın aşınma davranışına etkisi

Seçilen çalışma hızında farklı MoS<sub>2</sub> katkı oranı ve yüklerdeki özgül aşınma oranı değerleri Tablo 3.6’da ve ilgili görsel Şekil 3.26’da verilmiştir. Düşük ve orta yüklerde MoS<sub>2</sub> katkısı tüm katkı oranlarında aşınmayı azaltıcı etki göstermiştir. Baz yağ içerisindeki MoS<sub>2</sub> katkı oranı arttıkça aşınma üzerindeki düşürücü etkisinde azalma görülmüştür. Yüksek yükte ise, MoS<sub>2</sub> katkısı ağırlıkça %0.25-0.5 oranlarında baz yağ üzerinde aşınma düşürücü etki göstermiştir. MoS<sub>2</sub> katkılı motor yağı için en düşük özgül aşınma oranı değeri, ağırlıkça %0,25 katkı oranında  $SWR_{ort} = 0,63 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.7. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ )

Yük (N)	600 d/dk				
	$\mu_{ort}$				
	20W50	+%0,1 CaF <sub>2</sub>	+%0,25 CaF <sub>2</sub>	+%0,5 CaF <sub>2</sub>	+%1 CaF <sub>2</sub>
144	0,065	0,039	0,042	0,042	0,046
353	0,042	0,040	0,026	0,026	0,048
546	0,043	0,036	0,033	0,029	0,043



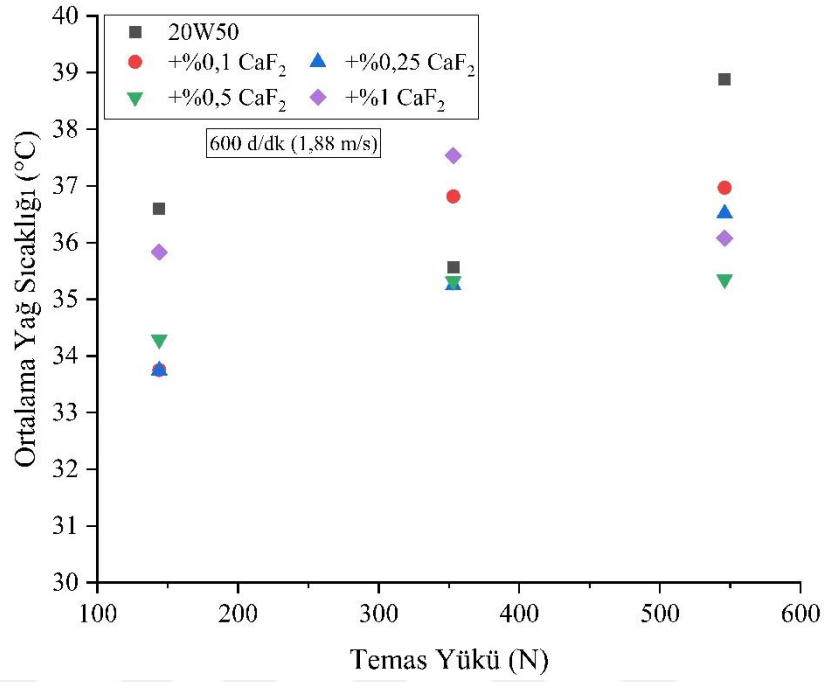
Şekil 3.27. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının baz yağın sürtünme katsayısına etkisi

Seçilen çalışma hızında (600 d/dk) farklı CaF<sub>2</sub> katkı oranı ve yüklerdeki ortalama sürtünme katsayısı,  $\mu_{ort}$  değerleri Tablo 3.7’de ve ilgili görsel Şekil 3.27’de verilmiştir. Düşük ve yüksek yükte (144 ve 546 N), baz yağ içerisinde tüm katkı oranlarında CaF<sub>2</sub> katkısı sürtünmeyi azaltıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir. Orta yükte (353 N) ise, ağırlıkça %1 katkı oranı hariç CaF<sub>2</sub> katkısının sürtünme düşürücü etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Genel olarak CaF<sub>2</sub> katkısının baz yağ içerisinde ağırlıkça %0,1-0,5 katkı oranı aralığında sürtünme düşürücü olduğu ve katkı oranı artışı ile sürtünme düşürücü etkisinin azaldığı söylenebilir. Özellikle orta devir ve yükte, ağırlıkça %0,25 CaF<sub>2</sub> katkılı baz yağın en düşük  $\mu_{ort}$  değerine ( $\mu_{ort} = 0,026$ ) sahip olduğu belirlendi.

Seçilen çalışma hızında farklı CaF<sub>2</sub> katkı oranı ve yüklerdeki yağ sıcaklık ortalama değerleri Tablo 3.8’de ve ilgili görsel Şekil 3.28’de verilmiştir. Düşük ve yüksek yüklerde, tüm katkı oranlarında yağ sıcaklık ortalamalarının baz yağa kıyasla daha düşük olduğu gözlemlendi. Bunun yanında, en düşük yağ sıcaklık ortalamasının düşük yükte ağırlıkça %0.1-0.25 katkı oranında olduğu belirlendi.

Tablo 3.8. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri

Yük (N)	600 d/dk (1,88 m/s)				
	20W50 (°C)	+%0,1 CaF <sub>2</sub> (°C)	+%0,25 CaF <sub>2</sub> (°C)	+%0,5 CaF <sub>2</sub> (°C)	+%1 CaF <sub>2</sub> (°C)
144	36,59	33,75	33,74	34,29	35,83
353	35,56	36,81	35,24	35,31	37,53
546	38,88	36,97	36,51	35,34	36,07

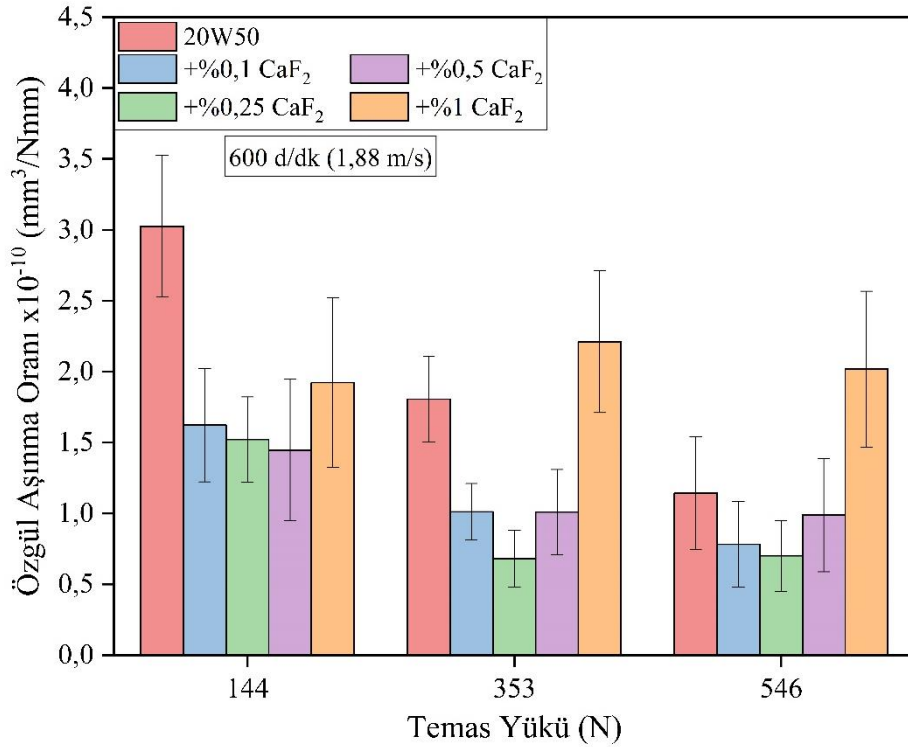


Şekil 3.28. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının baz yağın sıcaklığına etkisi

Seçilen çalışma hızında farklı CaF<sub>2</sub> katkı oranı ve yüklerdeki özgül aşınma oranı değerleri Tablo 3.9’da ve ilgili görsel Şekil 3.29’da verilmiştir. Düşük yükte, CaF<sub>2</sub> katkısı baz yağ içerisinde tüm katkı oranlarında aşınmayı azaltıcı etki göstermiştir. Orta ve yüksek yükte ise CaF<sub>2</sub> katkısı, ağırlıkça %1 katkı oranı dışında tüm oranlarda aşınmayı azaltıcı etkiye sahiptir. CaF<sub>2</sub> katkılı motor yağı için en düşük özgül aşınma oranı değeri, ağırlıkça %0,25 katkı oranında  $SWR_{ort} = 0,69 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.9. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkılı yağa ait özgül aşınma oranı değerleri

Yük (N)	600 d/dk (1,88 m/s)				
	20W50 x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%0,1 CaF <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%0,25 CaF <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%0,5 CaF <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%1 CaF <sub>2</sub> x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)
144	3,03	1,62	1,52	1,44	1,92
353	1,81	1,01	0,69	1,01	2,21
546	1,14	0,78	0,70	0,99	2,02



Şekil 3.29. 600 d/dk ve farklı yükleme şartlarında, değişen CaF<sub>2</sub> katkı oranının baz yağın aşınma davranışına etkisi

Yukarıdaki sonuçlar göz önüne alındığında, özellikle katkı oranı artışı ile sürtünme ve aşınma üzerinde olumsuz etkilerin kazıma (scuffing) [98], topaklaşma (agglomeration) [97] ve partikül parçalanması (fragmentation) [7] gibi olaylar neticesinde gerçekleştiği düşünülmektedir. Testler sırasında, eş çalışan yüzeyler arasına giren büyük parçacıklar, basıncın etkisi ile birbirlerinden ayrılarak toz haline gelir (pulverizing effect) ve boyutsal

olarak küçülürler [101]. Ayrıca katkı maddeleri arasında ortalama parçacık boyutundan daha küçük parçacıklar da mevcuttur (Şekil 2.1 ve 2.3). Temas yüzeyine giren küçük parçacıklar, pürüzlülükler arasına girerek yağlamaya yardımcı olacağı gibi yüzeye bağlı parçacıklara da yapışır ve topaklanmaya neden olur. Topaklanmaların çalışma yüzeyinde pürüzlülük tepeleri gibi sert çıkıntılar oluşturarak şiddetli kazıma etkisine neden olduğu söylenebilir [30]. Ayrıca, bu tepelikler kırılarak yağ sirkülasyonu ve izafi hareket yardımıyla tekrar tekrar çalışma bölgesine girerek aşınmaya ve değerlerde sapmalara neden olmuştur. Bu nedenle yağda artan katkı oranının belirli bir seviyeden sonra topaklaşmaya neden olduğu ve yüzey kalitesine zarar verdiği ifade edilebilir. Bu hususta, partikül yarıçapı/boyutu, yüzeyin pürüzlülük dağılımı ve temas şekli oldukça önemlidir [96]. Aynı zamanda, partiküllerin çalışma alanındaki dizilişi de yağlama özellikleri üzerinde etkili olmuştur [7].

Literatürde, aynı veya farklı test cihazlarının kullanıldığı ve farklı partikül boyutları ile yapılan çalışmalarda çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır [41-50]. Örneğin, Wu ve arkadaşları [43], çalışmaları için en uygun koşulların 326 N ve ağırlıkça %0,25 MoS<sub>2</sub> oranında gerçekleştiğini; Yu ve arkadaşları [99], sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici olarak MoS<sub>2</sub> için en uygun katkı oranının ağırlıkça %0,2 olduğunu bildirmişlerdir.

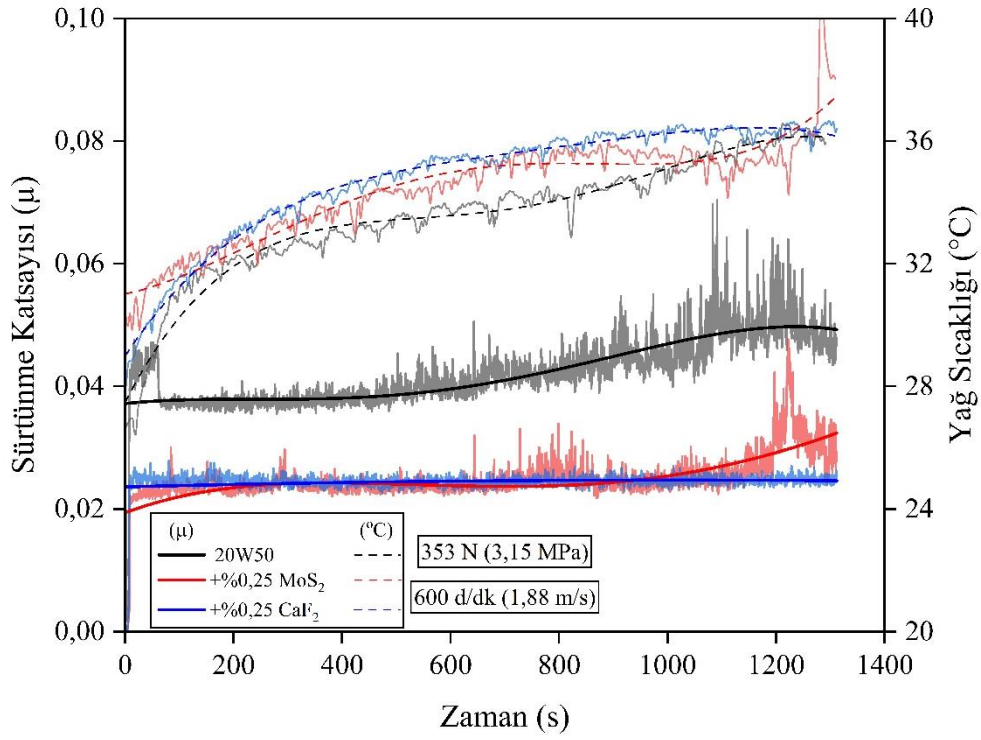
Bu deneysel çalışmada motor yağına MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkıları yüzey temas geometrisinde aşınma önleyici ve sürtünmeyi azaltıcı etkiler göstermiştir. Motor yağı içerisinde MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkıları için en uygun çalışma koşulları (optimum), orta yük (353 N) ve katkı oranları ağırlıkça %0,25 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Optimum çalışma koşulları altında özgül aşınma oranı ve sürtünme katsayısı ortalama değerleri, MoS<sub>2</sub> katkılı yağ için  $SWR_{ort} = 0,63 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  ve  $\mu_{ort} = 0,024$ ; CaF<sub>2</sub> katkılı yağ için  $SWR_{ort} = 0,69 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  ve  $\mu_{ort} = 0,026$  olarak elde edilmiştir. Benzer koşullarda baz yağ için özgül aşınma oranı ve sürtünme katsayısı ortalama değerleri  $SWR_{ort} = 1,81 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  ve  $\mu_{ort} = 0,043$  değerler kaydedilmiştir. Sonuç olarak motor yağı üzerinde MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkılarının aşınmayı sırasıyla %65,2 ve %61,8 oranında azalttığı ve sürtünmeyi sırasıyla %43,5 ve %38,8 oranında düşürdüğü belirlenmiştir.

Optimum koşullarda yağ karışımlarının sürtünme davranışları ve yağ sıcaklıkları Şekil 3.30'da verilmiştir. Katkisiz baz yağ koşulları altında (siyah çizgi), sürtünme katsayısının zamanla artan değerler aldığı ve testin sonuna doğru katsayı değerlerdeki sapmaların arttığı gözlemlendi. Baz yağın  $\mu$  değerlerindeki sapmaların artmasının temel sebebi, sınır yağlama bölgesinde çalışması ( $\lambda < 1$ ) ve yüzey pürüzlülüklerinin temasının yüksek olması

nedeniyle şiddetli kazıma etkisinin (scuffing) oluşmasıdır [3, 102]. Yağ filmi oluşum etkisinin zayıf olması, özellikle sertliği daha düşük olan numune yüzeyinde aşınmayı arttırmıştır. Baz yağa ağırlıkça %0,25 MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkı maddeleri eklendiğinde, sürtünme üzerindeki düşürücü etkileri Şekil 3.30'da görülmektedir. Optimum katkılı yağ şartlarında  $\mu$  değerlerinin birbirine çok yakın ve 0,025 değeri civarında olduğu gözlemlendi. MoS<sub>2</sub> katkılı yağ koşullarında (kırmızı çizgi) testin belirli bölümlerinde sapmaların arttığı görülürken CaF<sub>2</sub> katkılı yağın (mavi çizgi) deney süresi boyunca kararlı değerler aldığı ve sapmaların az olduğu belirlendi. Her iki katkı maddesinin de sınır sürtünme koşulları altında yağ filmi oluşum etkisini iyileştirerek sürtünmeyi ve aşınmayı azalttığı belirlendi (Tablo 3.2). CaF<sub>2</sub> ve MoS<sub>2</sub> katkılarının motor yağı üzerinde benzer etkiler göstermesi, daha önce Bölüm 2.2.1 ve 2.2.2 bahsedilen katmanlı yapılara sahip olmalarından kaynaklanmaktadır [52].

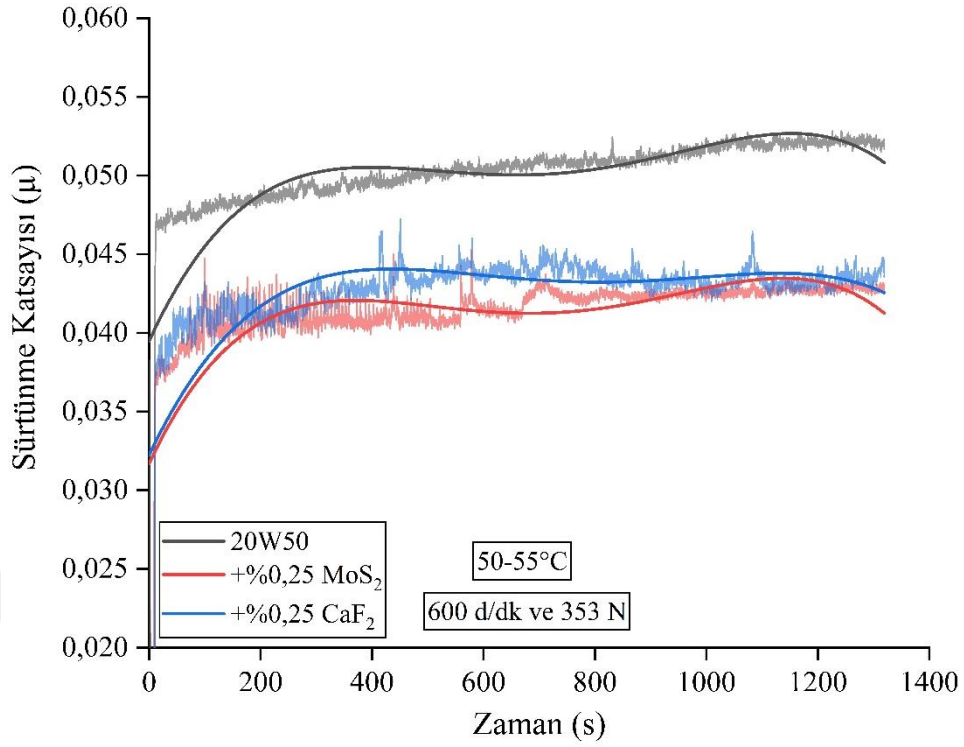
MoS<sub>2</sub> katkı maddesinin sürtünme azaltıcı etkisini daha iyi değerlendirebilmek için, MoS<sub>2</sub> katkısının katmanlı kristal yapısı göz önüne alınmalıdır. MoS<sub>2</sub> katkısı, S-Mo-S atomları arasında güçlü kovalent bağlara ve düzlemler arasında zayıf van der Waals bağlarına sahiptir [82]. Zayıf van der Waals bağları izafi hareket etkisiyle kolaylıkla koparak katmanların birbiri üzerinde kaymasını sağlar. Kayan MoS<sub>2</sub> katmanları eş çalışan yüzeylerdeki pürüzlerin doğrudan temasını önleyerek sürtünmenin azaltılmasını sağlar [48, 84]. MoS<sub>2</sub> katkılı yağ koşullarında testin sonuna doğru  $\mu$  değerlerindeki sapmalar, çalışma bölgesine giren partiküllerin topaklanması ve yağ filmi oluşum etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır [97, 99].

Baz yağa CaF<sub>2</sub> katkısı, temas yüzeyinde güçlü tribolojik özellikler (fiziksel, kimyasal ve mikroyapısal) sergilemiştir. Hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda çalışabilen CaF<sub>2</sub>, katmanlı yapıları arasındaki zayıf bağlar sayesinde iyi yağlama özelliklerine sahiptir [54]. Ayrıca alkali florürler genellikle kararlı termofiziksel ve termokimyasal özelliklere sahiptir ve kararlı kristal yapısı sürtünme yüzeylerinde yağ filmi oluşum etkisine katkıda bulunmuştur [85]. Bunun yanında, literatürde CaF<sub>2</sub> katkısının mekanik özellikleri olumsuz etkilese de tribolojik özellikleri iyileştirdiği gözlemlenmiştir [52].



Şekil 3.30. Optimum şartlarda, sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklıklarının değişimi

Optimum koşullarda yağ sıcaklığındaki değişimin sürtünme üzerindeki etkilerini görmek için, yağ sıcaklığı yaklaşık 50-55°C de şartlandırılmıştır ve Şekil 3.31’de şartlandırılmış koşullardaki sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) değişimleri verilmiştir. Baz yağın  $\mu$  değerlerinin (siyah çizgi) çalışma süresi boyunca artan değerler aldığı belirlendi. Şartlandırılmış yağ sıcaklıklarında baz yağa katkı maddesi eklenmesi ile iki katkı maddesinin de oda koşullarındaki sürtünmeyi azaltıcı etkilerine devam ettiği görüldü. Katkılı yağlar ile yapılan testlerin belirli bölümlerinde  $\mu$  değerleri arasında farklılıklar oluşsa da, katsayı değerlerinin birbirine yakın oldukları tespit edildi. MoS<sub>2</sub> katkılı baz yağın (kırmızı çizgi)  $\mu$  değerlerinde, testin başlangıcında sapmaların meydana geldiği, testin ortalarına doğru kademeli bir artışın gerçekleştiği ve daha sonra testin sonuna kadar kararlı değerler aldığı görüldü. CaF<sub>2</sub> katkılı baz yağın (mavi çizgi), ortam sıcaklığına kıyasla şartlandırılmış sıcaklıkta daha kararsız bir görüntü sergilediği belirlendi. Çalışmanın belirli bölümlerinde sert pikler görülse de, katkı maddesinin etkisiyle düşüşlerin gerçekleştiği görülebilir.



Şekil 3.31. Optimum şartlarda, yağ sıcaklığının şartlandırılması (50-55°C) ile sürtünme katsayısının değişimi

Katkılı yağlar ile yapılan deneylerde artan sıcaklıkla yağ film oluşum etkisinin azalması testin belirli bölümlerinde sürtünme katsayısı değerlerinde sapmalara neden olmuştur [94, 96]. Film oluşum etkisinin azalmasında baz yağ içerisinde büyük parçacık dağılımı veya yetersiz dispersiyon ve temas yüzeyindeki topaklaşmalar etkili olmuştur ve bu durumun sürtünmenin sürekli artmasına ve aşınmanın şiddetli şekilde gerçekleşmesine yol açtığı söylenebilir [7, 97]. Bunun yanında çalışma bölgesine giren katkı maddelerinin basınç etkisi ile ufalanması ve pürüzlülükler arasına absorbe olması, eş çalışan yüzey pürüzlülüklerinin temasını azaltarak film oluşum etkisini artmıştır. Böylece katkılı yağlar ile daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir [101].

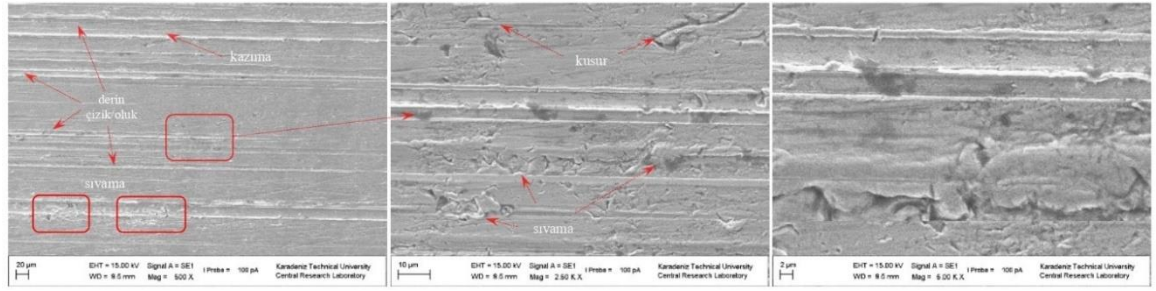
### 3.1.3. Optimum Koşullarda Yüzey Pürüzlülüğü ve Mikroyapısal Özelliklerin İncelenmesi

Optimum koşullarda gerçekleştirilen çalışmaların teorik yağlama rejimleri Bölüm 2.6'da yer alan (1-8) denklemleri ile hesaplanmıştır ve ilgili film parametreleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Film parametreleri incelendiğinde optimum koşullardaki çalışmaların tamamının teorik olarak sınır yağlama rejiminde gerçekleştiği görülmüştür ( $\lambda < 1$ ). Ağırlıkça %0.25 MoS<sub>2</sub> ve %0.25 CaF<sub>2</sub> katkılarının teorik olarak yağ filmi oluşum etkisini arttırdığı ve baz yağa kıyasla daha düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü, Ra değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

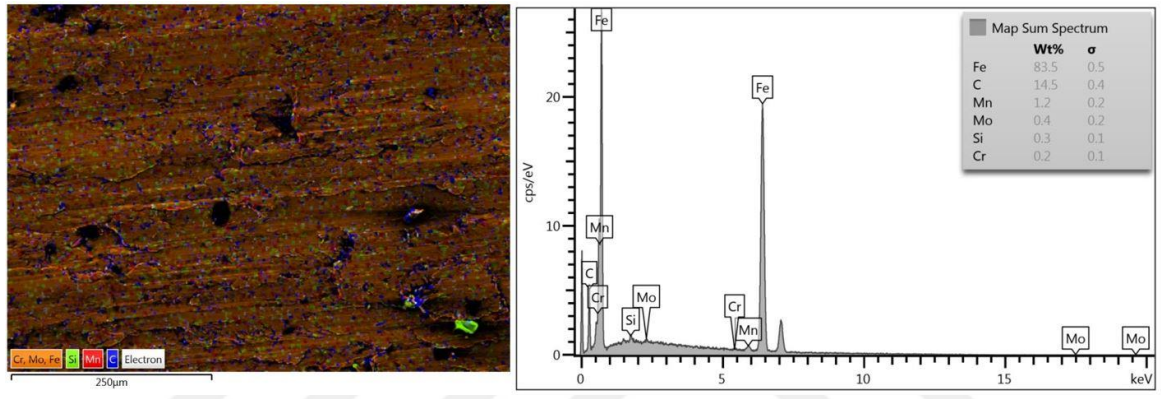
Tablo 3.2. Optimum koşullardaki film parametreleri

Film parametreleri	Deneyden sonra						Deneyden önce	
	SAE 20W50		+%0.25 MoS <sub>2</sub> katkısı		+%0.25 CaF <sub>2</sub> katkısı			
	Numune	Disk	Numune	Disk	Numune	Disk	Numune	Disk
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,386	0,3	0,256	0,21	0,282	0,22	0,15	0,12
$\lambda$	0,354		0,522		0,483			

Baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsünde (Şekil 3.32), kayma yönüne paralel yüksek derinlik ve genişliğe sahip çizikler/oluklar görüldü. Ayrıca olukların içerisinde küçük çukurlar, sıvanmış bölgeler ve kusurların (çizik, oyuk vb.) olduğu tespit edildi. Katkısız motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizinde ise, başlangıç durumuna göre demir oranı azalırken (%83,5 Fe), karbon oranının arttığı (%14,5 C) gözlemlendi (Şekil 3.33). Sınır yağlama bölgesinde baz yağın film oluşum etkisinin zayıf olması, izafi hareket esnasında metal-metal temasının şiddetinin artmasına ve yumuşak numune yüzeyinde adhezyon aşınması ile geniş oluklar oluşmasına neden olmuştur [98]. Ayrıca metal yüzeyinde oluşan oksit tabakasının sıklıkla parçalanması, çiziklerin sayısını oldukça artırmıştır. Bunun yanında, yüzeyden kopan sert aşınma tanecikleri izafi hareket yardımıyla yüzey üzerinde yuvarlanarak önündeki malzemeleri belirli bölgelere sürüklemiş ve sıvanmış bölgeler oluşturmuştur (three-body abrasive wear) [3, 45]. Çalışma yüzeyinde çizik, oyuk veya çukur gibi kusurların artması da aşınma direncini oldukça azaltmıştır.



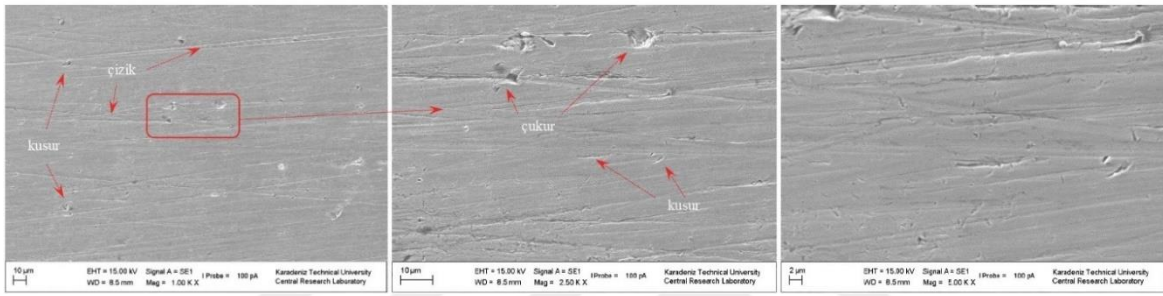
Şekil 3.32. Optimum şartlarda (600 d/dk ve 353 N), katkısız motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü



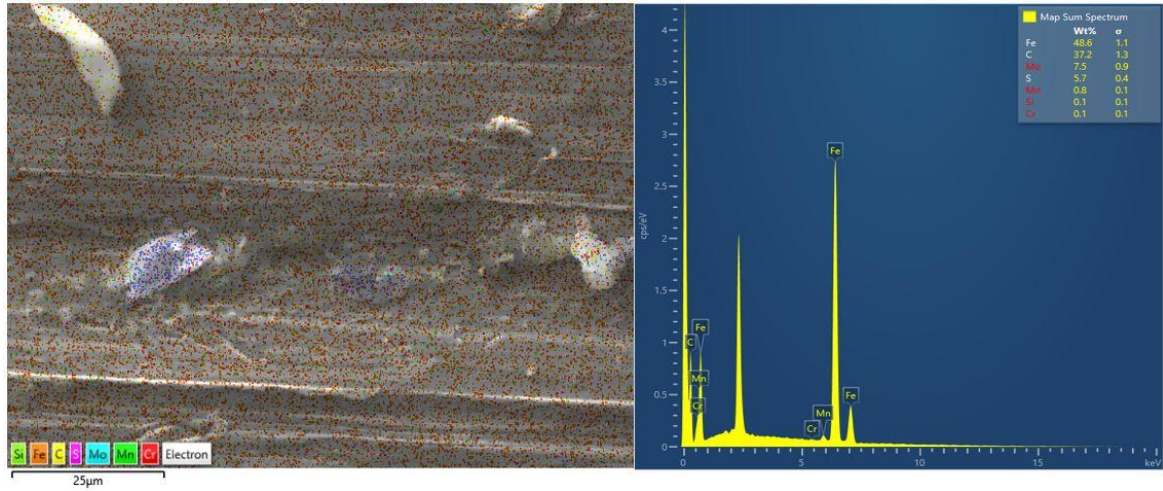
Şekil 3.33. Optimum şartlarda (600 d/dk ve 353 N), katkısız motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi

Ağırlıkça %0,25 MoS<sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsünde (Şekil 3.34), kayma doğrultusunda derinliği ve genişliği düşük olan çizikler görüldü. Ayrıca kayma yönünde olmayan çukur ve kusurlar tespit edildi. MoS<sub>2</sub> katkısı, pürüzlülüklerin arasını doldurarak yağ filmi oluşum etkisini arttırmıştır ve pürüzlülüklerin doğrudan temasını azaltarak temas yüzeyindeki çizilme etkilerinin azaltılmasına yardımcı olmuştur [41, 43, 48]. Kazıma esnasında anlık soğuk kaynak noktalarının oluşumu adhezyon aşınmasına neden olmuştur ve küçük olukları meydana getirmiştir [1]. Çalışma sırasında, aşınma kalıntılarının veya katkı partiküllerinin numune yüzeyi ile ani temasından dolayı yüzeylerde çizik/oyuk şeklinde kusurlar meydana geldiği söylenebilir. İlaveeten, yağ sirkülasyonu ile partiküllerin tekrar çalışma bölgesine taşınması ve çalışma bölgesinde anlık düzensiz dizilişleri, kusurların farklı bölgelerde oluşmasına neden olmuştur [4]. Bazı yağa eklenen MoS<sub>2</sub> katkısının yüzeylerde aşınma direncini arttırdığı ve yüzeyi koruyucu etkiye (protective film effect) sahip olduğu görülmüştür [99, 103].

Ağırlıkça %0,25 MoS<sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizinde, aşınma sonucu oluşan çiziklerin içinde ve kenarlarında eser miktarda molibden (Mo) ve kükürt (S) elementlerinin bir arada yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.35). Benzer şekilde literatürde, aşınma yolu sınırında Mo ve S elementlerini bir arada tespit edilmiştir. MoS<sub>2</sub> katkısının çalışma yüzeyleri arasında girerek tribokimyasal reaksiyonlar meydana getirdiği ve sürtünme yüzeylerinin doğrudan temasını azalttığı ifade edilebilir [41, 43, 48, 82]. Buradan Mo ve S elementlerinin çalışma bölgesinde eser miktarda bulunmasına rağmen, sınır yağlama şartlarında yağ film oluşum etkisini arttırdığı söylenebilir.



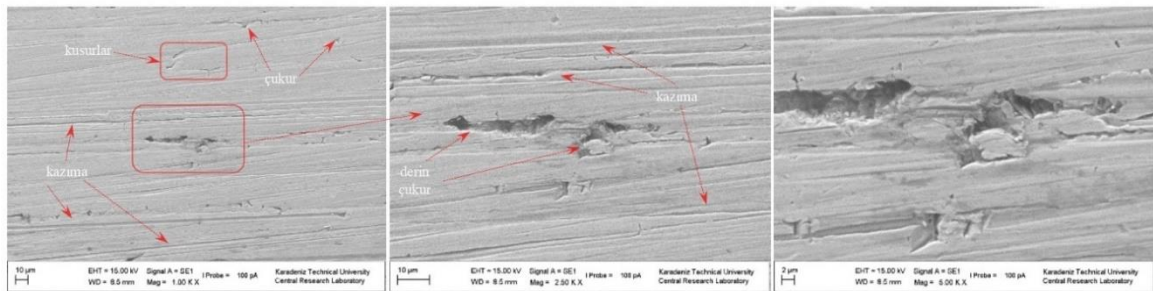
Şekil 3.34. Optimum şartlarda (600 d/dk ve 353 N), ağırlıkça %0,25 MoS<sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü



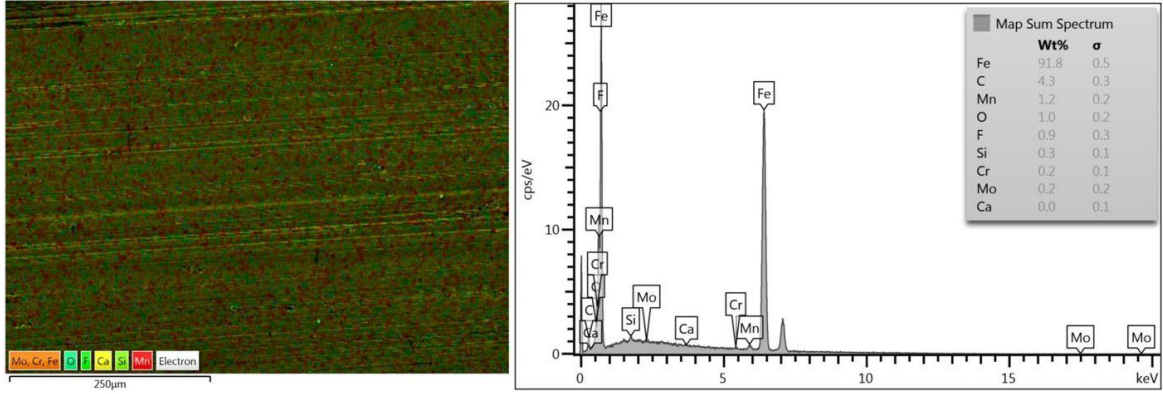
Şekil 3.35. Optimum şartlarda (600 d/dk ve 353 N), ağırlıkça %0,25 MoS<sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi

Ağırlıkça %0,25 CaF<sub>2</sub> katkılı yağ ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsünde (Şekil 3.36), kayma doğrultusunda kazıma etkileri ile beraber bol miktarda çizik görülmüştür. Abrasyon aşınması nedeniyle oluşan çizikler, sürüyerek kazıma (scuffing) olayının aktif bir şekilde gerçekleştiğini göstermiştir [98]. CaF<sub>2</sub> katkısının sınır yağlama bölgesinde yağ film oluşum etkisini artırarak, olukların derinlik ve genişliğini ve sıvanmış bölgelerin varlığını azalttığı söylenebilir. Bunun yanında, numune yüzeyinde çizikler etrafında krater benzeri derin çukurlar ve oyuk benzeri kusurlar tespit edilmiştir. Meydana gelen krater benzeri çukurların, eş çalışan yüzeylerde anlık oluşan soğuk kaynak noktalarının izafi hız ile kopması ve sertliği diskten daha düşük olan numune yüzeyinden malzeme koparması ile oluştuğu ifade edilebilir [1, 3].

Ağırlıkça %0,25 CaF<sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizinde (Şekil 3.37), kalsiyum (Ca) elementi için yeterli sinyal bulunmazken, çalışma yüzeyinde ve aşınma sınırlarında flor (F) elementinin varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca yüzeyde birçok bölgede oksit tabasının oluştuğu belirlenmiştir. Yüzeydeki F ve O elementlerinin varlığı, yüzeyde tribokimyasal reaksiyonların meydana geldiğini ve oksit filminin sıklıkla oluştuğunu göstermektedir. Buradan CaF<sub>2</sub> katkısının yağ film oluşum etkisini arttırarak eş çalışan yüzeylerin birbiri ile temasını azalmaya yardımcı olduğu ve baz yağın tribolojik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [55, 58, 85].



Şekil 3.36. Optimum şartlarda (600 d/dk ve 353 N), ağırlıkça %0,25 CaF<sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 3.37. Optimum şartlarda (600 d/dk ve 353 N), ağırlıkça %0,25 CaF<sub>2</sub> katkılı motor yağı ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi

### 3.2. Baz Yağ Olarak Kullanılan Ham Fındık Yağı ile İlgili Çalışmalar

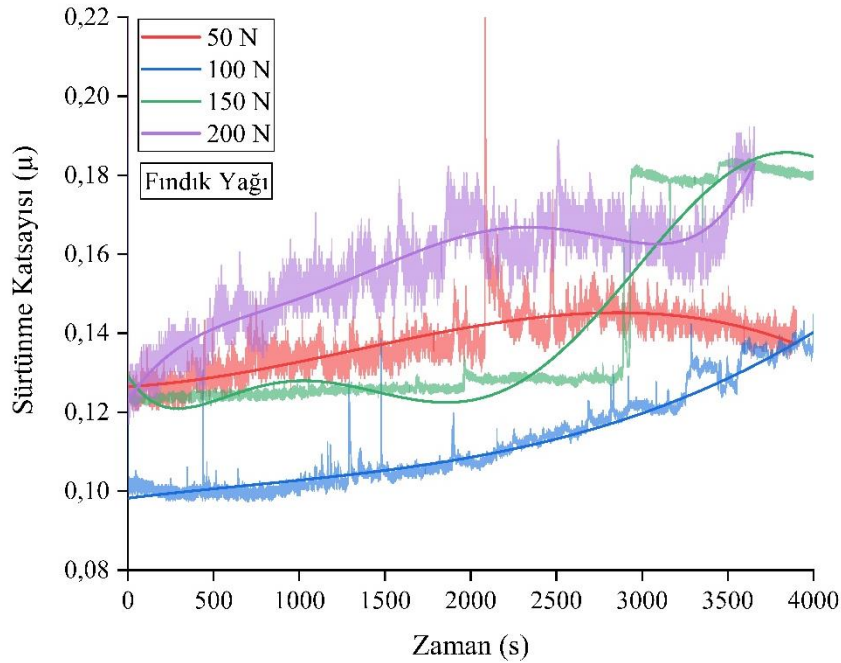
Bu bölümde baz yağ olarak ham fındık yağı (FY), katkı maddesi olarak da iki farklı morfolojiye sahip (granül ve toz) ve benzer boyutlarda (10-100 µm) ultra düşük sülfatlı borik asit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) partikülleri seçilmiştir. Ham fındık yağına ağırlıkça %0.5, 1, 1.5 ve 2 oranlarında katkı maddeleri ayrı ayrı eklenerek farklı yağ karışımları elde edilmiştir. Deneyler literatürdeki bitkisel yağlar ile yapılan çalışmalardan faydalanılarak sabit devirde (300 d/dk) ve farklı temas yüklerinde (50, 100, 150 ve 200 N) gerçekleştirilmiştir. Karışımların sürtünme ve aşınma davranışları incelenerek optimum çalışma koşulları (katkı oranı ve yük) belirlenmiştir. Belirlenen bu koşullar altında yapılan deneylerin sonucunda aşınan numune yüzeyleri SEM ve EDS teknikleri ile analiz edilerek değerlendirilmiştir. Bu bölümdeki çalışma şartlarının detayları Tablo 3.3'te verilmiştir. Her bir deney için test süresi 2000 s'dir ancak fındık yağının karakteristiğini daha iyi anlayabilmek için 4000 s'e kadar testler yapılmıştır. Elde edilen verilerin doğruluğu için testler 3 (üç) kez tekrarlanarak ilgili değerlerin ortalaması alınmıştır. Sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklıklarını gösteren grafiklere en küçük kareler yöntemi kullanılarak eğriler uyumlanmıştır. Her deneyden önce numune ve disk yüzeyleri sırasıyla 400 ve 500'lük zımparalar ile aşamalı olarak zımparalanmış ve aseton-izopropanol karışımı ile temizlenerek başlangıç şartlarına hazır hale getirilmiştir.

Tablo 3.3. Fındık yağı çalışmalarına ait deney şartları

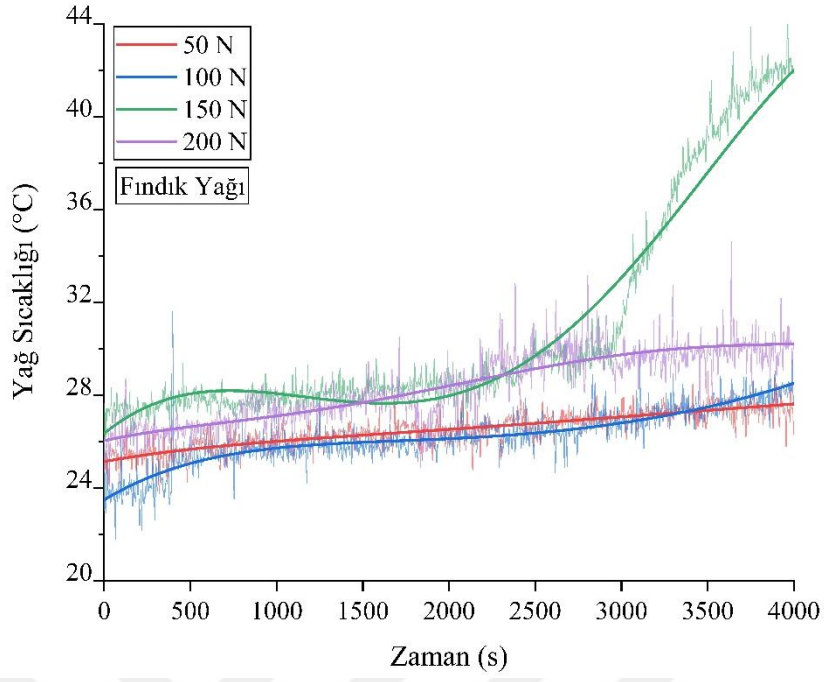
Katkı	Ağırlıkça %	Yük	N	50	100	150	200	Bağıl Nem, %70
(Ultra düşük sülfatlı) Granül ve Toz H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,5; 1; 1,5; 2	Temas basıncı	MPa	0,45	0,9	1,34	1,79	
		Kayma hızı	m/s	0,94				
			d/dk	300				
		Katedilen mesafe	m	1880				
Başlangıç yağ sıcaklığı	°C	23						

### 3.2.1. Ham Fındık Yağının Sürtünme ve Aşınma Davranışları

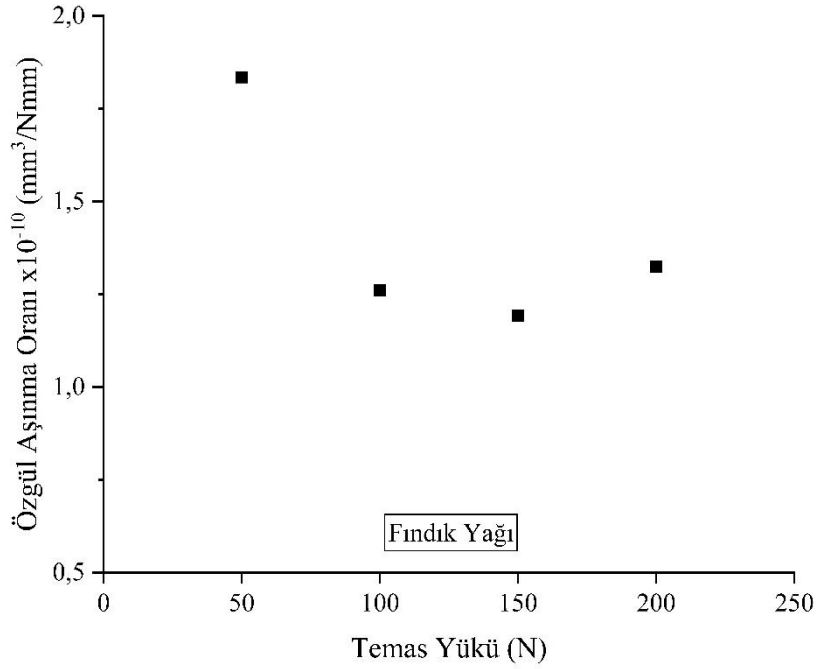
Ham fındık yağına ait sürtünme katsayısı, yağ sıcaklığı ve özgül aşınma oranı verileri sırasıyla Şekil 3.38-40'da verilmiştir.



Şekil 3.38. 300 d/dk ve farklı yüklerde ham fındık yağının sürtünme katsayısının değişimi



Şekil 3.39. 300 d/dk ve farklı yüklerde ham fındık yağı sıcaklığının değişimi



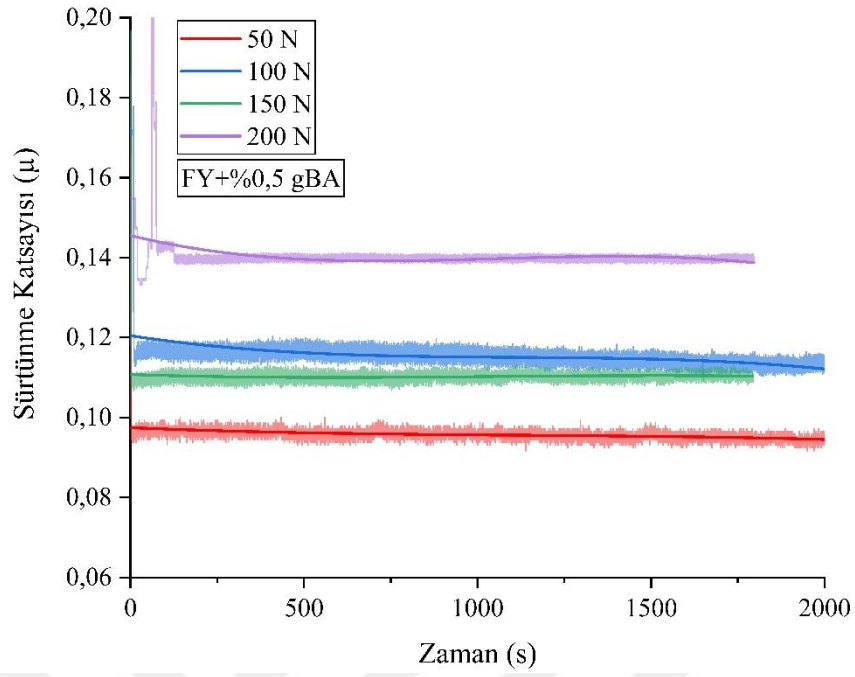
Şekil 3.40. 300 d/dk ve farklı yüklerde ham fındık yağının özgül aşınma oranının değişimi

Katkısız baz yağa ait  $\mu$  değerleri yük artışı ile yükselmiştir ve değerlerde sapmanın fazla olduğu görülmüştür. Özellikle yüksek yüklerde (150-200 N) testin son bölümlerine doğru aşırı sürtünme oluştuğu ve anlık değer yükselmesinin meydana geldiği görülmüştür (Şekil 3.38). Bununla birlikte yağ sıcaklıkları artan eğimlere sahiptir ve özellikle 150 N temas yükünde aşırı sürtünme nedeniyle yağ sıcaklığında ani yükselişler görülmüştür (Şekil 3.39). Ayrıca özgül aşınma oranlarının yükleme koşullarının tümünde birbirine yakın değerler aldığı ancak orta yüklerde en düşük değere sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.40).

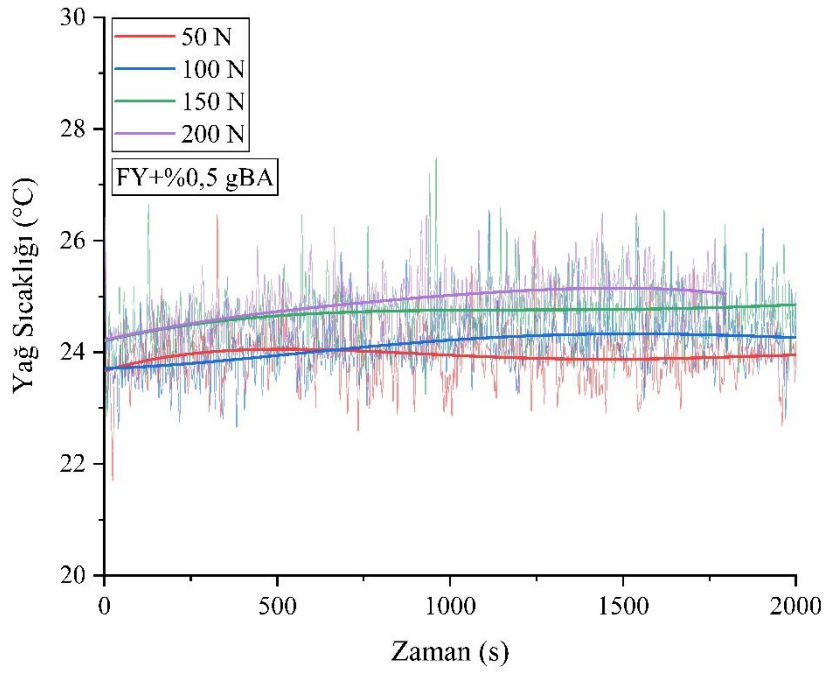
Katkısız fındık yağı ile yapılan deneylerde (Şekil 3.38),  $\mu$  değerlerindeki sapmalar ve ani değer yükselmelerinin sınır yağlama bölgesinde şiddetli metal-metal temasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Baz yağın yapısındaki doymamış yağ asitleri polar grupları ile yüzeye tutunur ve temas yüzeyleri arasında film oluşturma eğilimi gösterirler. Ancak sınır yağlama koşullarında düşük hız ve yüksek yüklerde, pürüzlülük teması nedeniyle sıcaklıkta anlık artışlar meydana gelir ve bu durum yüzeydeki reaksiyon hızını artırır. Bu anlık yüksek sıcaklıklar film oluşum etkisini zayıflatır ve kararsızlığı artırır. Film oluşumunun gerçekleşmemesi nedeniyle temas yüzeyinde şiddetli kazıma etkisi görülür ve bu durum sürtünme katsayısında ani yükselişlere ve sapmalara neden olur [75, 76, 104].

### **3.2.1.1. Granül Borik Asit Katkısının Fındık Yağı Üzerindeki Sürtünme ve Aşınma Etkileri**

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %0,5 gBA katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklığının değişimi sırasıyla Şekil 3.41 ve 42'de verilmiştir. gBA katkısının ağırlıkça %0,5 katkı oranında sürtünmeyi azaltıcı olduğu ve  $\mu$  değerlerinde sapmaları azalttığı görülmüştür. Ayrıca, katkı maddesinin yağ sıcaklıklar değerlerindeki artışı azalttığı ve özellikle 150 N'da yağ sıcaklığını düşürdüğü tespit edilmiştir.

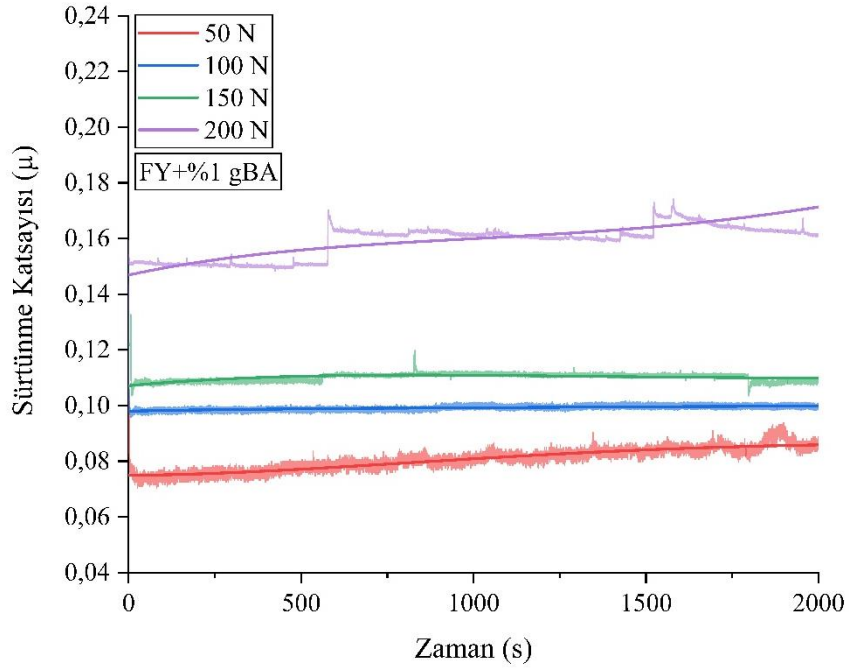


Şekil 3.41. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi

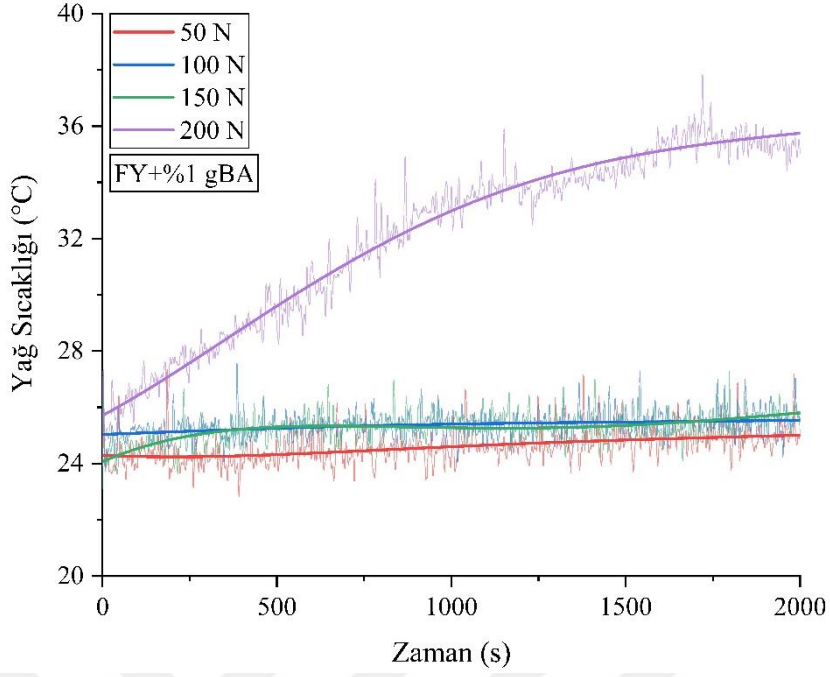


Şekil 3.42. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %1 gBA katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklığının değişimi sırasıyla Şekil 3.43 ve 44'te verilmiştir. Baz yağa ağırlıkça %1 oranında gBA katkısının, 200 N temas yükü hariç, diğer tüm durumlarda sürtünmeyi azalttığı görüldü (Şekil 3.43). Özellikle 200 N şartlarında,  $\mu$  değerlerinin kademeli olarak artış gösterdiği ve bu durumda yağ sıcaklığının 36°C değerine kadar çıktığı görüldü (Şekil 3.44).

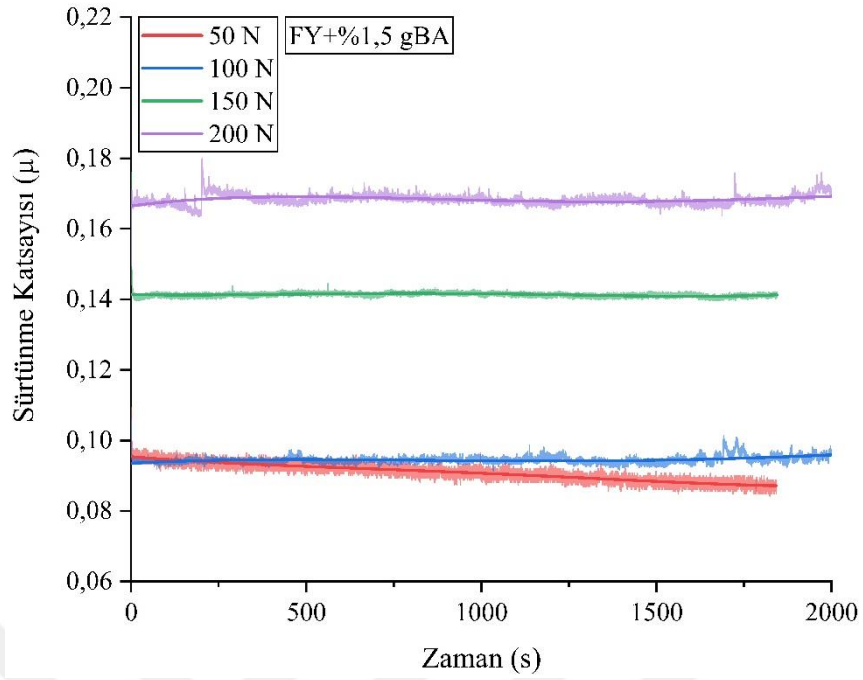


Şekil 3.43. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi

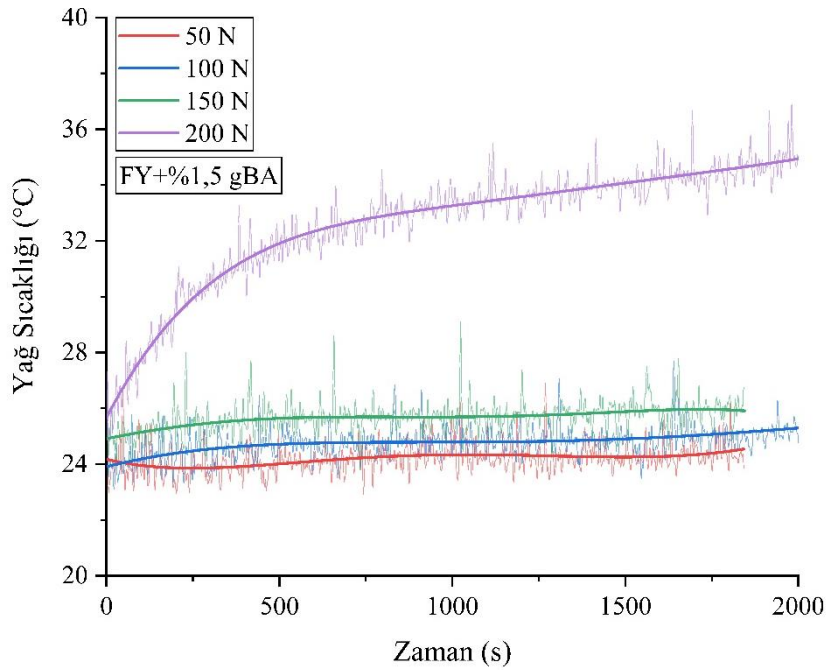


Şekil 3.44. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %1,5 gBA katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklığının değişimi sırasıyla Şekil 3.45 ve 46'da verilmiştir. Baz yağa ağırlıkça %1,5 oranında gBA katkısının, 200 N temas yükü hariç, diğer tüm durumlarda sürtünmeyi düşürdüğü görüldü (Şekil 3.45). Yağ sıcaklıkları genel anlamda değişkenlik göstermezken sadece 200 N temas yükünde sıcaklığın artan değerler aldığı gözlemlendi (Şekil 3.46).

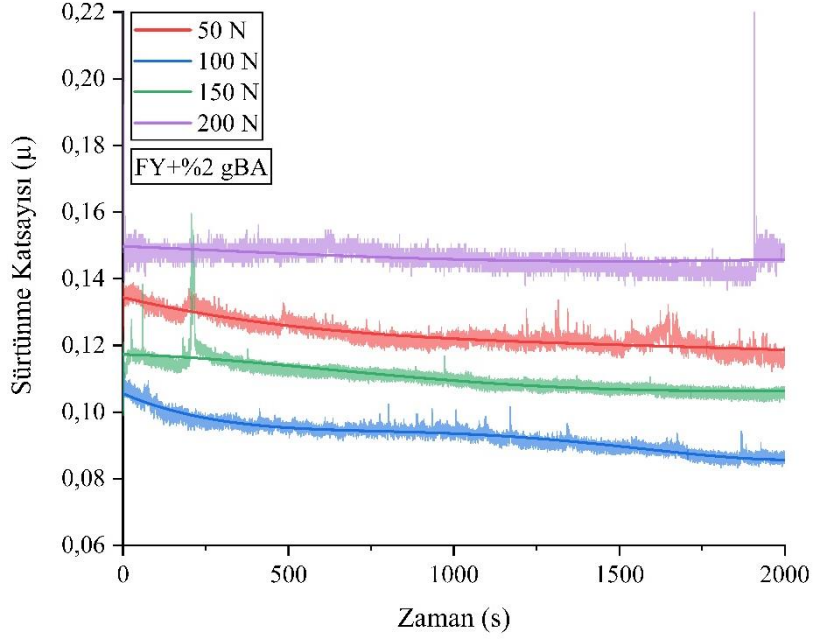


Şekil 3.45. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi

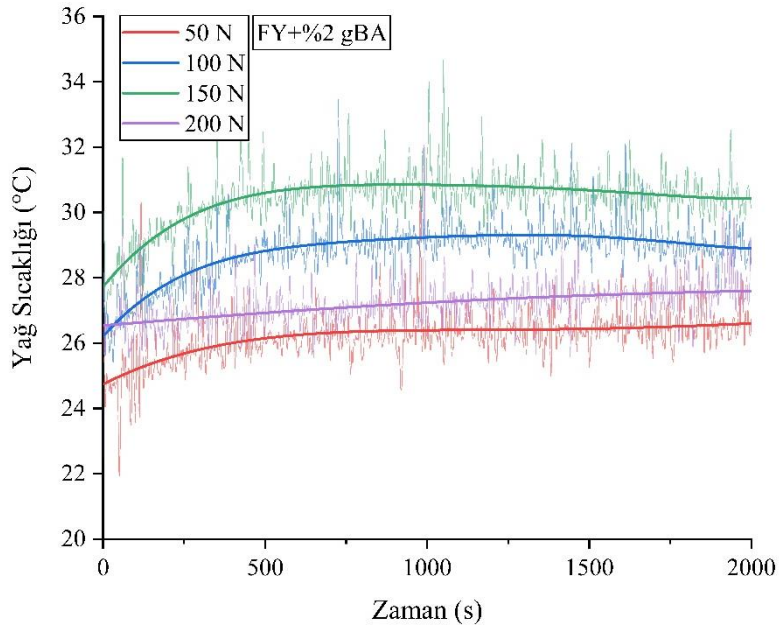


Şekil 3.46. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %2 gBA katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklığının değişimi sırasıyla Şekil 3.47 ve 48’de verilmiştir. Ağırlıkça %2 oranında gBA katkısının tüm yükleme şartlarında sürtünmeyi azalttığı gözlemlendi. Ayrıca yağ sıcaklık değerlerinin deneylerin ilerleyen bölümlerinde sabit değerler aldığı görüldü.



Şekil 3.47. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 granül borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi

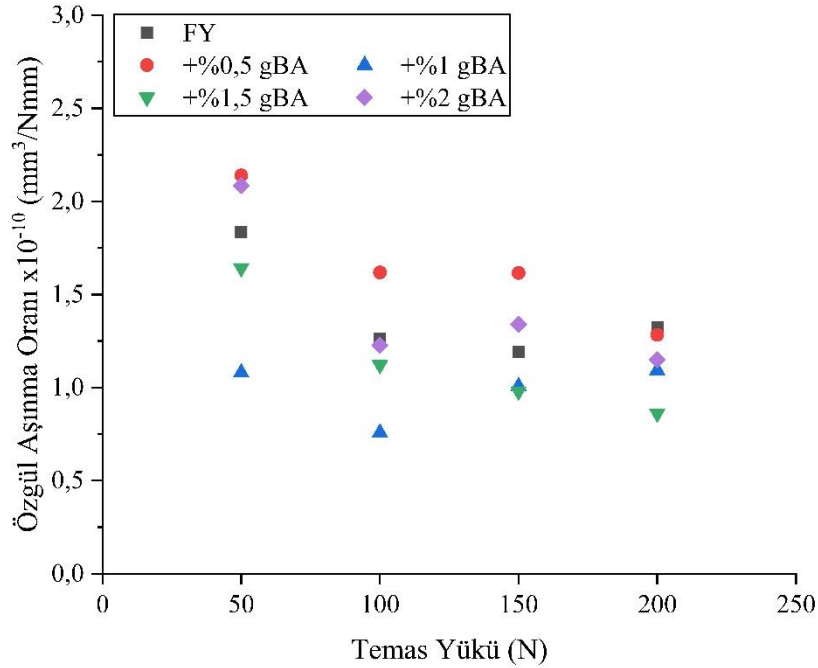


Şekil 3.48. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 granül borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, baz yağa çeşitli oranlarda gBA katkısının özgül aşınma oranı değerleri Tablo 3.4'te ve ilgili görsel Şekil 3.49'da verilmiştir. Baz yağ içerisinde ağırlıkça %1-1,5 oranlarında gBA katkısının tüm yükleme şartlarında aşınmayı düşürdüğü görülmüştür. Bununla birlikte 200 N temas yükünde tüm katkı oranlarında gBA katkısının aşınma önleyici etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. En düşük özgül aşınma oranı değeri ağırlıkça %1 katkı oranında ve 100 N temas yükünde  $SWR_{ort, gBA} = 0,75 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.4. Granül borik asit katkılı yağa ait özgül aşınma oranı değerleri

Yük (N)	Fındık Yağı $\times 10^{-10}$ ( $\text{mm}^3/\text{Nmm}$ )	+%0,5 gBA $\times 10^{-10}$ ( $\text{mm}^3/\text{Nmm}$ )	+%1 gBA $\times 10^{-10}$ ( $\text{mm}^3/\text{Nmm}$ )	+%1,5 gBA $\times 10^{-10}$ ( $\text{mm}^3/\text{Nmm}$ )	+%2 gBA $\times 10^{-10}$ ( $\text{mm}^3/\text{Nmm}$ )
50	1,83	2,14	1,08	1,64	2,08
100	1,26	1,62	0,75	1,12	1,22
150	1,19	1,61	1,01	0,98	1,34
200	1,32	1,28	1,09	0,86	1,14

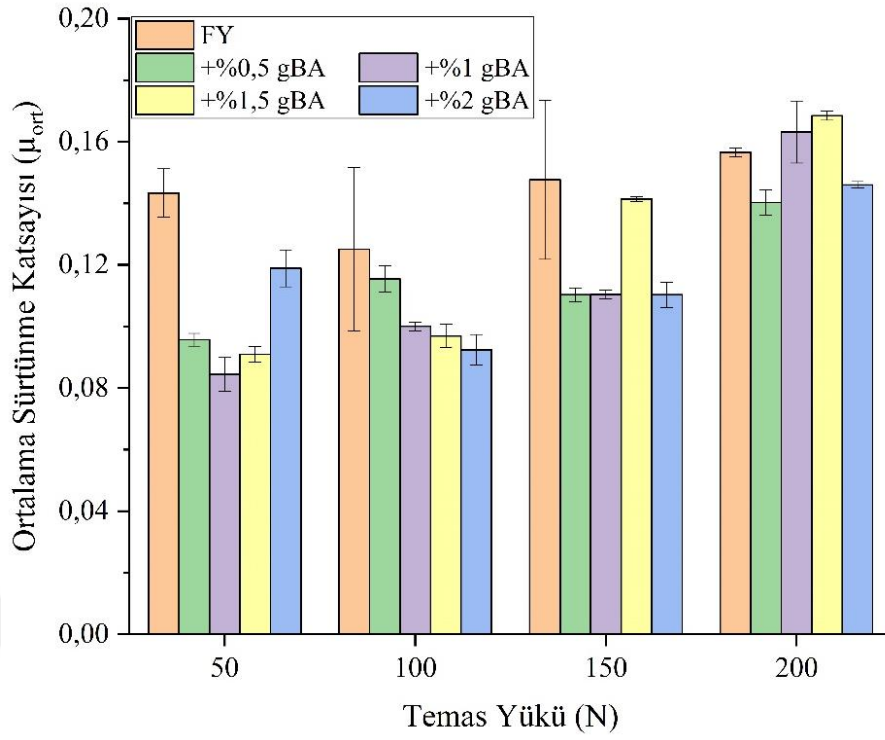


Şekil 3.49. 300 d/dk ve farklı yüklerde, baz yağa çeşitli oranlarda granül borik asit katkısının özgül aşınma oranına etkisi

Granül borik asit (gBA) katkılı baz yağ için genel bir değerlendirme yapabilmek ve en uygun koşulları seçebilmek amacıyla sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklık ortalama değerleri toplu şekilde sırasıyla Şekil 3.50 ve 51’de ve ilgili değerler sırasıyla Tablo 3.5 ve 3.6’da verilmiştir. gBA düşük (50 N) ve orta yüklerde (100-150 N), tüm katkı oranlarında sürtünmeyi azaltıcı etkiye sahipken (Şekil 3.50) sadece ağırlıkça %1-1,5 oranlarında aşınmayı azaltıcı etki göstermiştir (Şekil 3.49). Yüksek yükte (200 N) ise, tüm katkı oranlarında aşınma azaltıcı etkiye sahipken, yalnızca ağırlıkça %1 ve %2 katkı oranında sürtünmeyi azaltıcı etki göstermiştir. Buradan fındık yağı içerisinde gBA katkısının yük ve katkı oranı artışı ile sürtünme düşürücü etkisinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Yağ sıcaklık ortalamaları incelendiğinde ise, düşük ve orta yüklerde ağırlıkça %0,5-1,5 gBA katkılı yağların birbirine oldukça yakın değerlere sahip olduğu ancak katkı oranı artışı ile yağ sıcaklığı ortalama değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Yüksek yükte ise, gBA katkılı yağların yalnızca ağırlıkça %1 ve %2 oranlarında baz yağdan daha düşük yağ sıcaklık ortalama değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.51). Sonuç olarak, gBA partikül boyutunun yüksek olması nedeniyle katkı oranı ve yük artışı ile sürtünmenin arttığı ve bu durumun yağ sıcaklıklarını yükselttiği söylenebilir.

Tablo 3.5. Granül borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ )

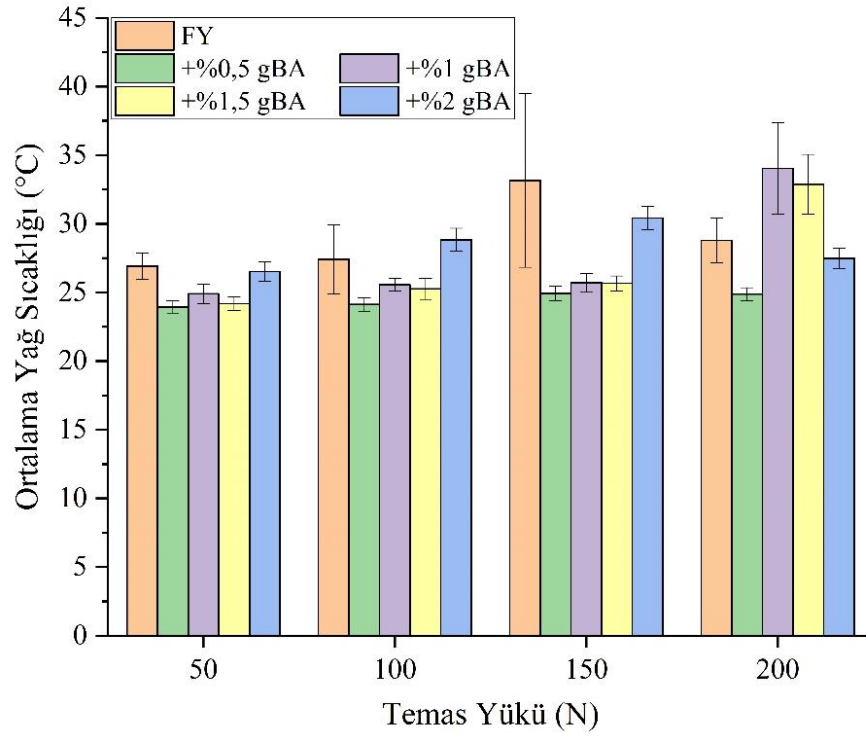
Yük (N)	$\mu_{ort}$				
	Fındık Yağı	+%0,5 gBA	+%1 gBA	+%1,5 gBA	+%2 gBA
50	0,143	0,096	0,084	0,091	0,119
100	0,125	0,115	0,100	0,097	0,092
150	0,148	0,110	0,110	0,141	0,110
200	0,157	0,140	0,163	0,168	0,146



Şekil 3.50. 300 d/dk ve farklı yüklerde, granül borik asit katkılı baz yağın ortalama sürtünme katsayısının değişimi

Tablo 3.6. Granül borik asit katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri

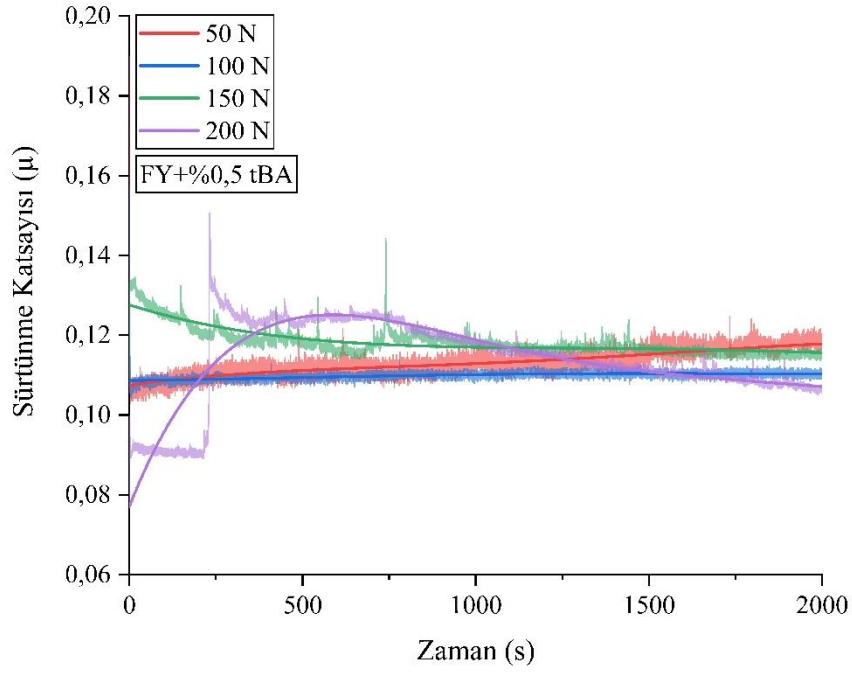
Yük (N)	Fındık Yağı (°C)	+%0,5 gBA (°C)	+%1 gBA (°C)	+%1,5 gBA (°C)	+%2 gBA (°C)
50	29,92	23,93	24,91	24,18	26,52
100	27,41	24,12	25,55	25,27	28,84
150	33,16	24,91	25,70	25,66	30,42
200	28,78	24,88	34,03	32,88	27,48



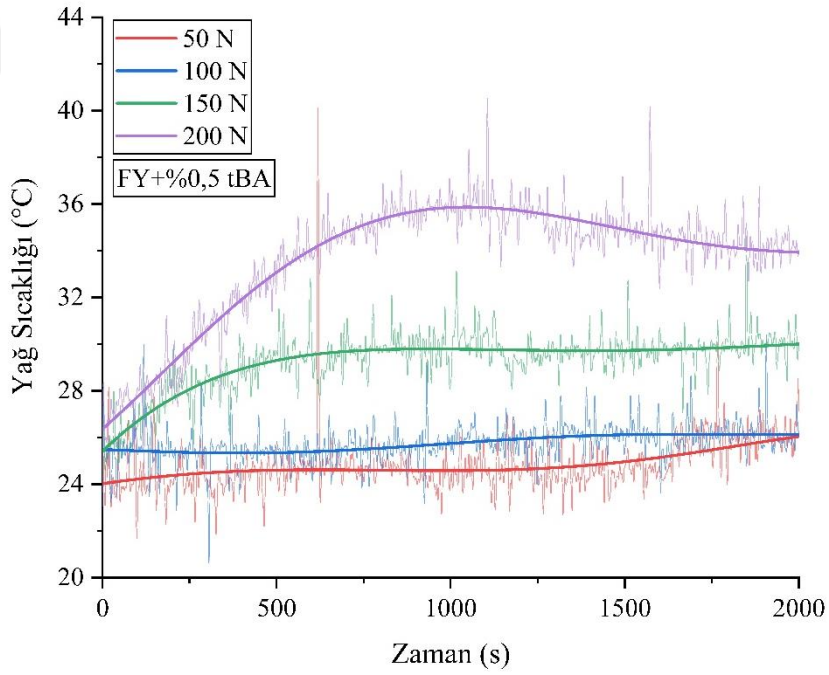
Şekil 3.51. 300 d/dk ve farklı yüklerde, granül borik asit katkılı baz yağın sıcaklık ortalamalarının değişimi

### 3.2.1.2. Toz Borik Asit Katkısının Fındık Yağı Üzerindeki Sürtünme ve Aşınma Etkileri

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %0,5 toz borik asit (tBA) katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ( $\mu$ ) ve yağ sıcaklıklarının değişimi sırasıyla Şekil 3.52 ve 53'te verilmiştir. Sürtünme katsayısı grafiğinden görüleceği üzere (Şekil 3.52), tBA katkısı tüm yükleme koşullarında (50, 100, 150 ve 200 N) sürtünmeyi azaltıcı etki göstermiştir. Çalışma başlangıcında, özellikle 150-200 N temas yüklerinde,  $\mu$  değerlerinde artış görülürken zamanla  $\mu$  değerlerindeki değişim azaldığı görülmüştür. Deneyin ilerleyen sürelerinde (1250-1500 s sonra) tBA katkısının yüksek yükteki etkinliğinin arttığı ve  $\mu$  eğrisinin azalan karakter sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 3.52). Ayrıca, yüksek yükte başlangıçta yağ sıcaklığı yükselme eğiliminde iken, çalışma süresinin ortalarında  $\mu$  değerlerinin azalma göstermesine paralel olarak yağ sıcaklığının da azaldığı belirlenmiştir. Düşük ve orta yüklerde, yağ sıcaklık eğrilerinin yatay ve kararlı bir yapıda olduğu görülmüştür (Şekil 3.53).

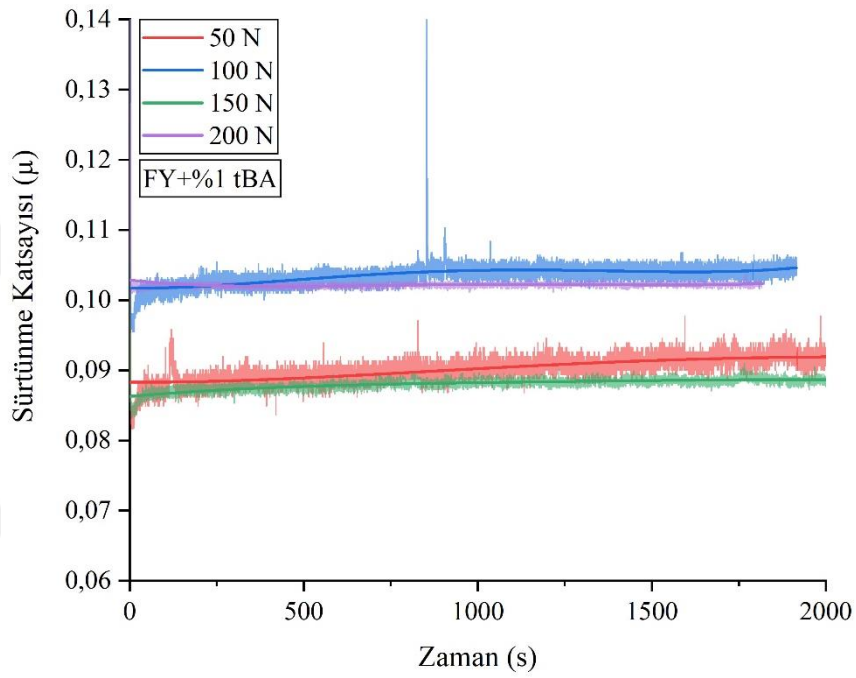


Şekil 3.52. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi

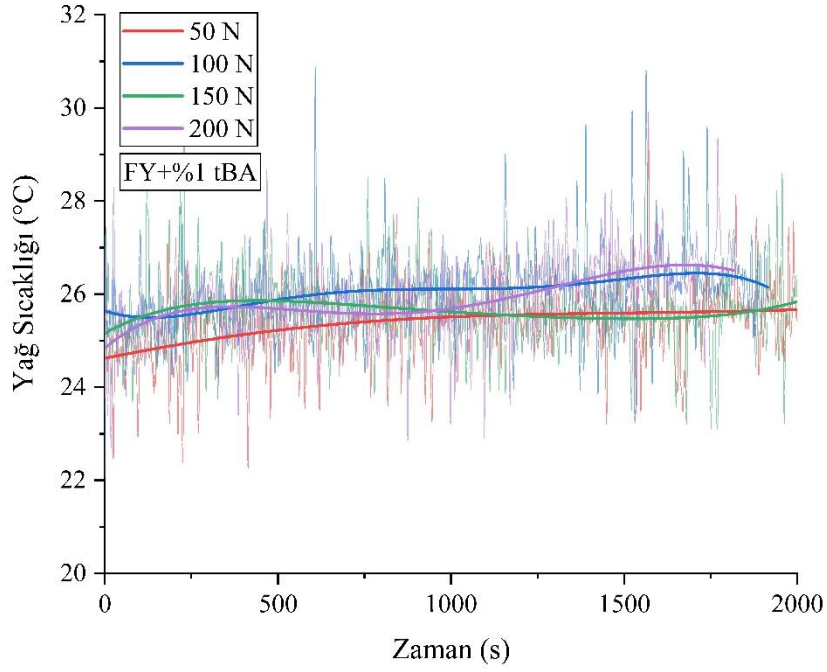


Şekil 3.53. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %0,5 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %1 tBA katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklıklarının değişimi sırasıyla Şekil 3.54 ve 55'te verilmiştir. Katkı oranı artışı ile toz borik asidin sürtünme düşürücü etkisine devam ettiği ve  $\mu$  değerlerindeki sapmaların azaldığı görüldü. Toz borik asit katkılı yağın en düşük  $\mu$  değerine 150 N şartlarında sahip olduğu belirlendi (Şekil 3.54). Bunun yanında toz borik asidin, özellikle 150 N temas yükünde, baz yağ sıcaklığını düşürdüğü tespit edildi (Şekil 3.55).

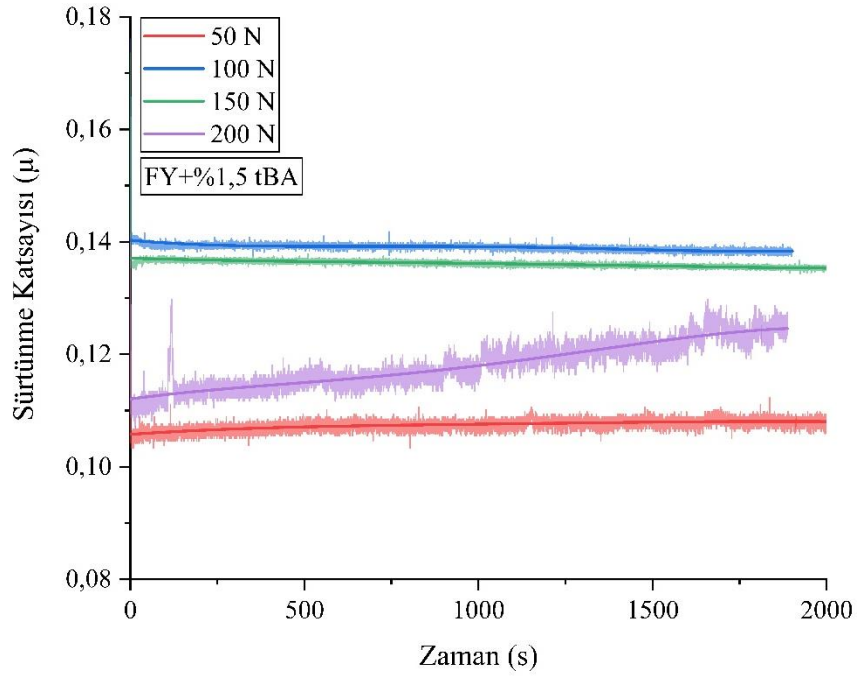


Şekil 3.54. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi

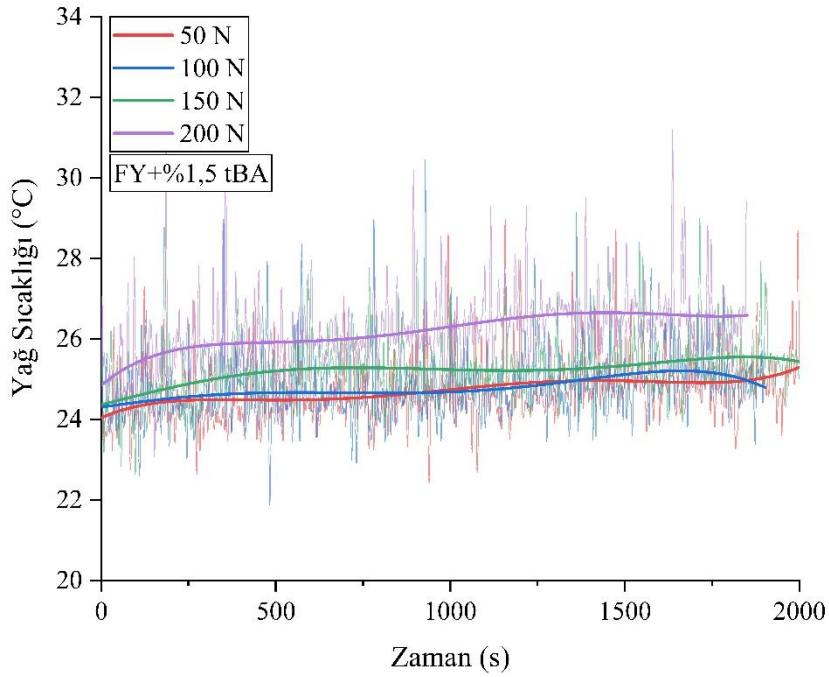


Şekil 3.55. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %1,5 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklıklarının değişimi sırasıyla Şekil 3.56 ve 57’de verilmiştir. Ağırlıkça %1,5 katkılı baz yağın  $\mu$  değerleri orta yükte (100 N) baz yağa kıyasla artış gösterirken düşük ve yüksek yükte (50 ve 200 N) sürtünme düşürücü etkiye sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.56). Ağırlıkça %1,5 toz borik asit katkısının yağ sıcaklıklarının artan eğimini azalttığı ve özellikle orta ve yüksek yüklerde düşürücü etkiye sahip olduğu belirlendi (Şekil 3.57).



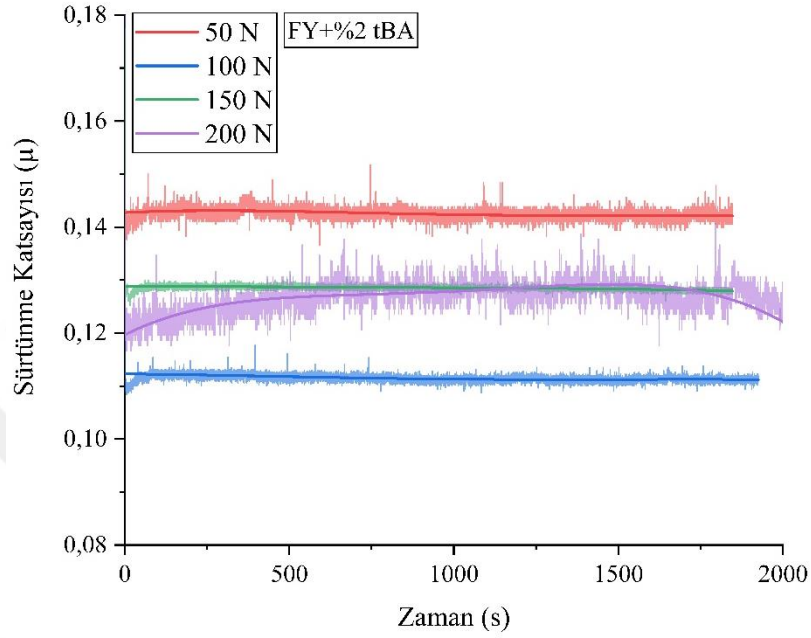
Şekil 3.56. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi



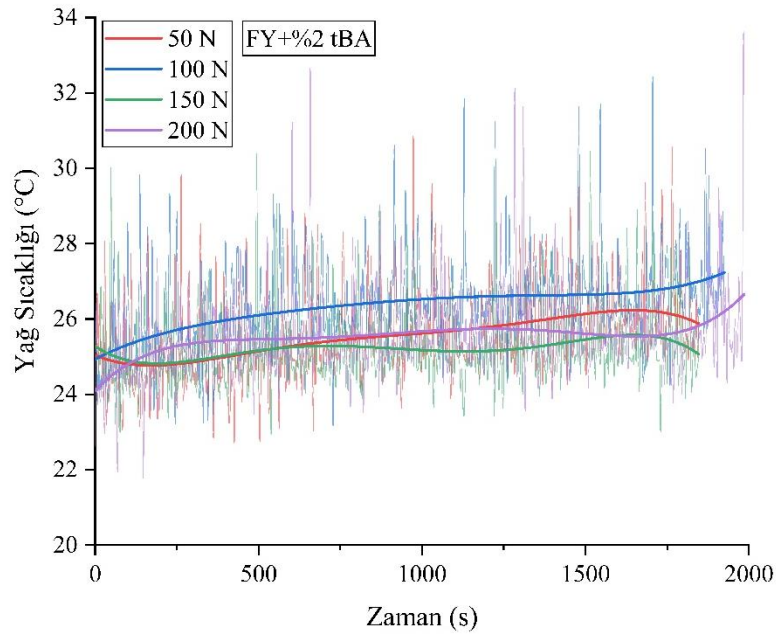
Şekil 3.57. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %1,5 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, ağırlıkça %2 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklıklarının değişimi sırasıyla Şekil 3.58 ve 59'da verilmiştir.

Baz yağa ağırlıkça %2 oranında toz borik asit katkısının özellikle orta ve yüksek yüklerde sürtünme düşürücü etki gösterdiği tespit edildi (Şekil 3.58). Ayrıca yağ sıcaklık ortalama değerlerinin birbirine oldukça yakın oldukları görüldü (Şekil 3.59).



Şekil 3.58. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 toz borik asit katkılı baz yağın sürtünme katsayısının değişimi

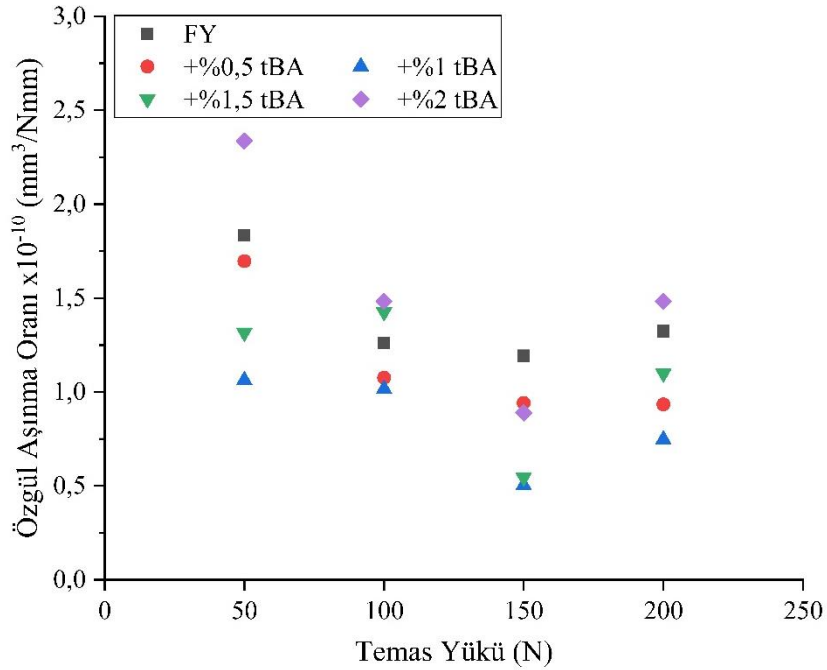


Şekil 3.59. 300 d/dk ve farklı yüklerde, ağırlıkça %2 toz borik asit katkılı baz yağ sıcaklığının değişimi

300 d/dk ve farklı temas yüklerinde, baz yağa çeşitli oranlarda tBA katkısının özgül aşınma oranına etkisi Şekil 3.60'da ve ilgili değerler Tablo 3.7'de verilmiştir. Ağırlıkça %0,5-1 tBA katkılı baz yağların tüm yükleme şartlarında aşınma önleyici olduğu görülmüştür. Bunun yanında 150 N temas yükünde tüm katkı oranlarında tBA katkısının aşınma önleyici olduğu belirlenmiştir. En düşük özgül aşınma oranı değeri ağırlıkça %1 katkı oranında ve 150 N temas yükünde  $SWR_{ort, tBA} = 0,50 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nmm olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.7. Toz borik asit katkılı yağa ait özgül aşınma oranı değerleri

Yük (N)	Fındık Yağı x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%0,5 tBA x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%1 tBA x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%1,5 tBA x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)	+%2 tBA x10 <sup>-10</sup> (mm <sup>3</sup> /Nmm)
50	1,83	1,70	1,06	1,32	2,34
100	1,26	1,07	1,01	1,42	1,48
150	1,19	0,94	0,50	0,54	0,89
200	1,32	0,93	0,74	1,10	1,48

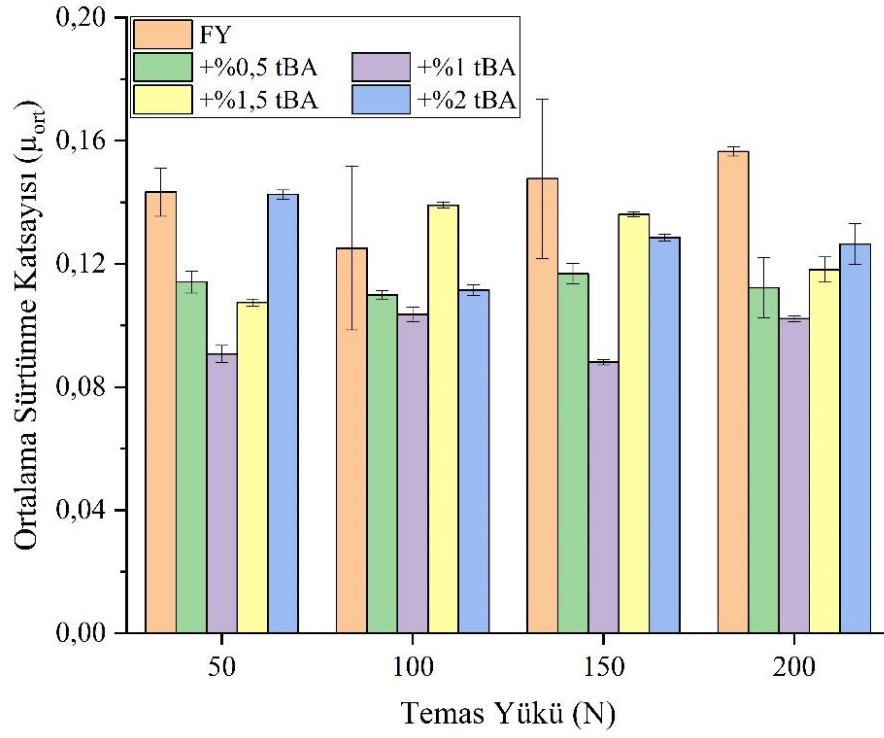


Şekil 3.60. 300 d/dk ve farklı yüklerde, baz yağa çeşitli oranlarda toz borik asit katkısının özgül aşınma oranına etkisi

Toz borik asit (tBA) katkılı baz yağ için genel bir değerlendirme yapabilmek ve en uygun koşulları seçebilmek amacıyla sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklık ortalama değerleri toplu şekilde sürtünme katsayısı ve yağ sıcaklık ortalama değerleri sırasıyla Şekil 3.61 ve 62’de ve ilgili değerler sırasıyla Tablo 3.8 ve 3.9’da verilmiştir. Fındık yağına katılan tBA katkısı ağırlıkça %0,5-1 katkı oranlarında tüm yükleme koşullarında hem sürtünme hem de aşınma azaltıcı etki göstermiştir. İlave olarak, tüm yükleme koşullarında ağırlıkça %1 tBA katkılı yağların en düşük  $\mu_{ort}$  değerlerine sahiptir ve çalışmadaki en düşük değeri 150 N temas yükünde  $\mu_{ort, tBA} = 0,088$  olarak kaydedilmiştir. Bunun yanında fındık yağı içerisinde tBA katkı oranı arttıkça, özellikle orta ve yüksek yüklerde (150 ve 200 N), yağ sıcaklıklarında düşüş olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan aşınma verileri de incelendiğinde, 150 N koşullarında tüm katkı oranlarında tBA katkısının aşınma önleyici etkiye sahip olduğu görülmüştür. En düşük aşınma oranı değeri yine ağırlıkça %1 katkı oranı ve 150 N temas yükünde  $SWR_{ort, tBA} = 0,50 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.8. Toz borik asit katkılı yağa ait sürtünme katsayısı ortalama değerleri ( $\mu_{ort}$ )

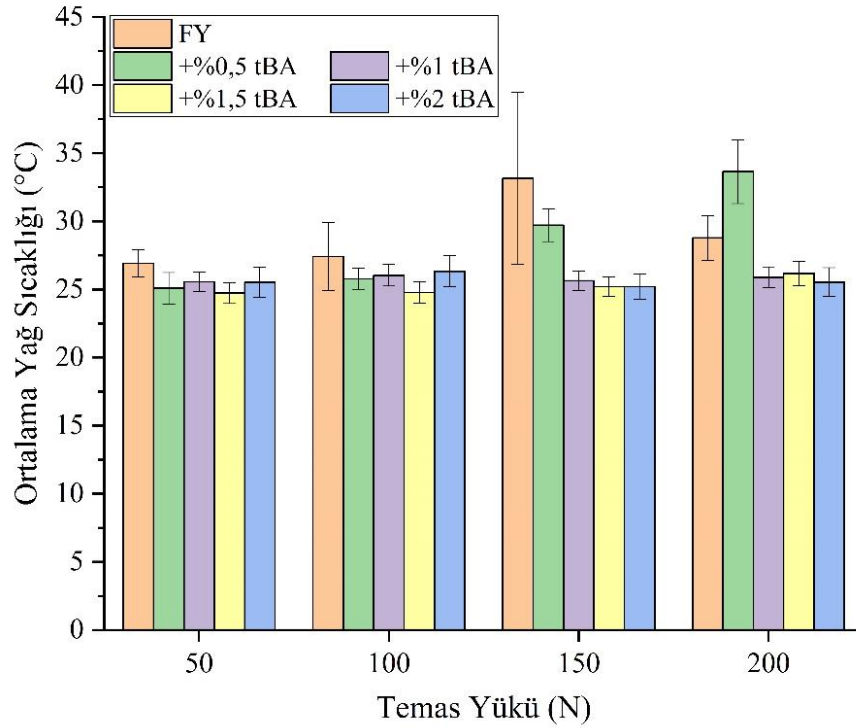
Yük (N)	$\mu_{ort}$				
	Fındık Yağı	+%0,5 tBA	+% 1 tBA	+% 1,5 tBA	+%2 tBA
50	0,143	0,114	0,091	0,107	0,142
100	0,125	0,109	0,103	0,139	0,111
150	0,148	0,117	0,088	0,136	0,128
200	0,157	0,112	0,098	0,118	0,126



Şekil 3.61. 300 d/dk ve farklı yüklerde, toz borik asit katkılı baz yağın ortalama sürtünme katsayısının değişimi

Tablo 3.9. Toz borik asit katkılı yağa ait yağ sıcaklığı ortalama değerleri

Yük (N)	Fındık Yağı (°C)	+%0,5 tBA (°C)	+%1 tBA (°C)	+%1,5 tBA (°C)	+%2 tBA (°C)
50	26,91	25,08	25,56	24,73	25,53
100	27,41	25,78	26,04	24,78	26,33
150	33,16	29,71	25,64	25,21	25,20
200	28,78	33,64	25,89	26,18	25,53



Şekil 3.62. 300 d/dk ve farklı yüklerde, toz borik asit katkılı baz yağın sıcaklık ortalamalarının değişimi

### 3.2.2. Borik Asidin Baz Yağa Etkilerinin İrdelenmesi ve Uygun Çalışma Koşullarının Belirlenmesi

Baz yağa (findık yağı) granül borik asit (gBA) katkısı, yük ve katkı oranı artışı ile  $\mu_{ort}$  değerlerini artırırken düşük ve orta yüklerde tüm katkı oranlarında sürtünme düşürücü etkisini göstermiştir. Katkı oranı artışı ile yüksek yük dışında tüm yükleme koşullarında sürtünme düşürücü etkisine devam etmiştir. gBA katkılı yağ ile yapılan çalışmalarda, en düşük  $\mu_{ort}$  değeri ağırlıkça %1 katkı oranı ve 50 N koşullarında elde edilmiştir ( $\mu_{ort,gBA} = 0,084$ ) ve sürtünmeyi yaklaşık %41,2 oranında düşürmüştür. Bunun yanında yağ sıcaklık ortalamalarının özellikle yüksek yükte katkı oranı artışı ile yükseldiği belirlenmiştir.

Baz yağa tBA katkısı, yük artışı ile baz yağın taşıma kapasitesini artırmıştır. Orta ve yüksek yüklerde tüm katkı oranlarında sürtünme düşürücü etki göstermiştir. tBA katkılı yağ ile yapılan çalışmalarda, en düşük  $\mu_{ort}$  değeri ağırlıkça %1 katkı oranı ve 150 N yükleme koşullarında elde edilmiştir ( $\mu_{ort,tBA} = 0,088$ ) ve sürtünmeyi yaklaşık %40,5 oranında düşürmüştür. Bunun yanında yağ sıcaklık ortalamalarının birbirine oldukça yakın değerler aldığı ve yüksek yükte katkı oranı artışı ile ortalama sıcaklık değerlerinin düştüğü

belirlenmiştir.

Ham fındık yağına granül ve toz borik asit katkıları genel olarak sürtünme ve aşınma düşürücü etki göstermiştir. Borik asit katkılarının baz yağın sürtünme davranışını genel olarak iyileştirdiği ve  $\mu$  değerlerindeki sapmaları azalttığı belirlenmiştir. Literatürde borik asidin sıvı veya yarı katı yağlayıcılara eklenmesi ile sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici etki gösterdiği ve sürtünme katsayısı değerlerinde sapmaları azalttığı Erdemir tarafından kanıtlanmış ve tescillenmiştir [59, 60]. Borik asit kristal yapısında, aynı katman üzerindeki atomlar birbirlerine güçlü bağlar ile bağıyken katmanların birbirlerine olan mesafesi fazladır ve aralarında zayıf van der Waals bağları mevcuttur. İzafi hareket yapan temas yüzeyleri arasında bulduklarında katmanlar, aralarındaki bağları koparır ve kayma yönüne paralel şekilde kendilerini hizalayarak birbirleri üzerinde kayarlar. İzafi hareketin etkisiyle katman kaymaları sürekli hale gelir. Bu sayede borik asit katkısının baz yağa düşük ve kararlı bir sürtünme karakteri kazandırdığı söylenebilir. Bunun yanında atomlar arasında güçlü bağlar ve paketlemenin, aşınmanın azaltılmasındaki en önemli etken olduğuna inanılmaktadır [60, 90, 91].

Sürtünme testlerinin bazılarında çalışma başlangıcında ortalamanın üzerinde yüksek  $\mu$  değerleri ve testin bazı bölümlerinde anlık yükselişler görülmüştür. Nispeten yüksek  $\mu$  değerleri, temas alanına giren borik asit parçacıklarının çalışma başlangıcında yüzeyler arasında tabakaların rastgele dizilişine ve partikül boyutuna atfedilebilir. Temas alanında rastgele dizilmiş kristallerin yüksek kayma direncine sahip olduğu ve dolayısıyla sürtünme değerlerini arttırdığı düşünülmektedir [7, 105]. Bunun yanında, katkı maddelerinin sürtünme yüzeylerini korumak için sürekli çalışma bölgesinde bulunması gerekir. Bu nedenle yüzey pürüzlülükleri ve parçacık boyutu oldukça önemlidir. Bu hususta iki durum söz konusudur. İlk durumda parçacık boyutu, sürtünme yüzeylerinin pürüzlülük ortalamasından büyük ise katkı maddesi yüzeye tam anlamıyla tutunamaz ve temas bölgesinden kolayca kaçarak zayıf yağlamaya yol açabilir. Bunun yanında temas bölgesinden uzaklaşırken ciddi aşınmalara neden olabilir. İkinci durumda ise, parçacık boyutu pürüzlülük ortalamasından küçük ise, pürüzlülükler arasındaki boşluklar katkı maddeleri ile doldurulabilir ve temas yüzeyini yapay şekilde düzleştirerek tribolojik özellikleri iyileştirebilir [68, 96].

Baz yağa granül ve borik asit katkıları orta ve yüksek yüklerde katkı oranı artışı ile aşınma önleyici etkilerini artırmıştır. Baz yağa gBA eklentisinin katkı oranı artışı ile etkinliğini arttırdığı ve orta yüklerde daha etkin olduğu görülmüştür. gBA katkılı yağ için en düşük aşınma oranı değeri ağırlıkça %1 katkı oranında ve 100 N şartlarında elde edilmiştir

( $SWR_{ort, gBA} = 0,75 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$ ) ve aşınmayı %40,5 oranında azaltmıştır. Baz yağa tBA eklentisi ise ağırlıkça %0,5-1,5 katkı aralığında genel olarak aşınma önleyici etki etmiştir. tBA katkılı yağ için en düşük aşınma oranı değeri ağırlıkça %1 katkı oranında ve 150 N şartlarında elde edilmiştir ( $SWR_{ort, tBA} = 0,50 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nmm}$ ) ve aşınmayı %58 oranında azaltmıştır. Yük artışı ile temas basıncının ve sürtünmeli çekişin artması (Tablo 3.3), borik asit katmanları arasındaki bağların daha kolay kopmasına neden olur. Bu durumda, borik asit katmanları birbiri üzerinde daha kolay kayar ve basıncında etkisiyle temas yüzeyindeki pürüzlülükler arasına girerek yüzeyde yağ filmi oluşum etkisini artırır. Bu etkinin artması ile yüzeylerin esneklik ve yük taşıma kapasitesinin yükseldiğine inanılmaktadır [60, 68, 90].

Yukarıdaki sonuçlar göz önüne alındığında, özellikle yük artışı ile toz borik asit katkısı baz yağ üzerinde granül borik aside kıyasla daha üstün sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici etki göstermiştir. Bu durumun katkı maddelerinin farklı morfolojilere sahip olmasından kaynaklandığı ve parçacık morfolojisinin yağlama kabiliyeti üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir [106]. Parçacık şekli, yükleme esnasında parçacıkların maruz kalacağı basıncı doğrudan etkilemektedir. Yüksek yüke maruz kaldığında granül borik asit parçacıkları karşı yüzey ile nokta teması kurarken plaka benzeri yapıya sahip toz borik asit parçacıkları ise yüzeysel bir temas kurar. Nokta temasında granül parçacıkları üzerinde anlık yüksek basınçlar oluşurken plaka benzeri parçacıklar yüzey alanını genişleterek yüzeyin yük taşıma kapasitesini artırır. Bu durumda plaka benzeri borik asidin parçacıklarının granüle kıyasla çalışma yüzeylerindeki sürtünmeyi azaltmada daha etkili olduğu söylenebilir [68, 96].

Granül borik asit parçacıklarının iki yüzey arasında düşük ve orta yüklerde yuvarlanma (rolling) etkisine sahip olmasına rağmen, özellikle yüksek yükte bu mekanizma ile çalışmadığı düşünülmektedir. Parçacıkların temas yüzeylerinde yuvarlanma (rolling) [95, 107] hareketi yapabilmesi için, parçacık boyutunun yüzeyin ortalama pürüzlülüğünden büyük ve yüzeye yapışma dirençlerinin de düşük olması gerektiğine inanılmaktadır [108]. Ancak yüksek yükte granül borik asit parçacıklarının, basıncın etkisiyle parçalanarak boyutlarının küçüldüğü (pulverizing effect) ve yüzeyin belirli noktalarında topaklaşarak (agglomeration) aşırı sürtünmeye ve aşınma hasarına neden olduğu düşünülmektedir [97]. Ayrıca bu durumun sürekli gerçekleşmesi, yük ve katkı oranı artışı ile yağ sıcaklığının da yükselmesine neden olmuş olabilir. Diğer yandan boyutları küçülen parçacıkların pürüzlülükler arasında yerleşmesi ve çalışma alanında yeteri kadar

bulunması, yağlamaya yardımcı olabilir ve sürtünmeyi pozitif yönde etkileyerek yüzey hasarının azalmasına yardımcı olabilir.

Diğer taraftan toz borik asit parçacıklarının özellikle yüksek yükte, yüzeyler arasında sıkışarak direkt teması azaltıcı yönde etki göstermiş ve soğuk kaynak noktalarının oluşumunu azaltmıştır. Yüzeyler arasında sıkışan toz borik asit parçacıklarının pul pul dökülerek (exfoliation) deformasyona uğradığı ancak çok katmanlı yapısı sayesinde tabakaların birbiri üzerinde kayması (sliding) ve boyutu küçülen parçacıkların pürüzlülükler arasında girmesi ile sürtünmeyi azalttığı düşünülmektedir. Toz borik asidin bu davranışı, lokal ısınmayı ve dolayısıyla numune yüzeyinin aşınmasını [95, 103] ve yüksek yüklerde yağ sıcaklığının artışı azaltmaktadır.

Literatürde borik asit katkılı karışımların en düşük  $\mu$  değerini aldığı optimum bir katkı oranı mevcuttur. Erdemir, borik asit katkılı baz yağ için en uygun karışım ve kararlı çalışma aralığının en az ağırlıkça %0,2 katkı oranı ve 0,2-40  $\mu\text{m}$  boyutlarında gerçekleştiğini bildirmiştir [60]. Lovell ve arkadaşları, sac şekillendirme üzerinde tasarlanmış test cihazında ortalama boyutu 100  $\mu\text{m}$  olan borik asit katkısının kanola yağı içerisinde ağırlıkça %5 katkı oranında birçok yağlayıcıdan daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir [109]. Literatürde farklı çalışmalarda, kanola yağına borik asit katkısının ortalama 100  $\mu\text{m}$  boyutunda ve ağırlıkça %5 katkı oranında sürtünme ve aşınma önleyici etki gösterdikleri bildirilmiştir [11, 63, 68]. Kabir ve arkadaşları, farklı borik asit partikül boyutları ve katkı oranları ile yaptıkları deneylere dayanarak, kanola yağına 350-700  $\mu\text{m}$  ve hacimce %7 borik asit katkısının test edilen koşullarda en etkili sürtünme düşürücü olduğu sonucuna varmışlardır [62]. Vadiraj ve arkadaşları, motor ve dişli yağlarına farklı katkı oranlarında nano boyutta (50 nm) borik asit katkısı eklemişler ve borik asit katkısının baz yağların sürtünme ve aşınma davranışı üzerinde 1:10 hacim oranında düşürücü etkileri olduğunu göstermişlerdir [110]. Lovell ve arkadaşları, kanola yağına farklı boyutlarda (nano ve mikro) borik asit katkısı eklemişler ve ağırlıkça %5 nano parçacık katkılı karışımın en iyi sürtünme ve aşınma performansını sergilediği sonucuna varmışlardır [66]. Baş ve Karabacak, motor yağı içerisinde borik asit katkısının ağırlıkça %3 katkı oranında sürtünme ve aşınmayı azalttığını bildirmişlerdir [65].

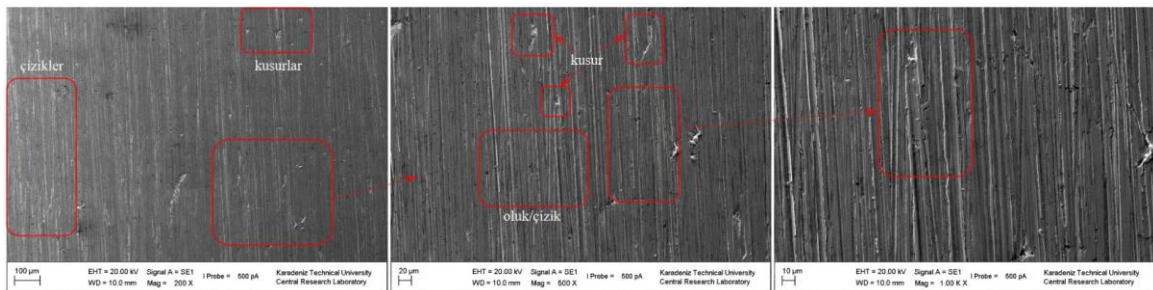
Literatürde görüleceği üzere optimum katkı oranı çalışma ortamı, test düzeneği, temas geometrisi (noktasal, çizgisel veya yüzeysel), parçacık boyutu gibi birçok parametreye bağlıdır ve her çalışma koşuluna göre incelenmesi gerekir. Bu çalışmada, 10-100  $\mu\text{m}$  boyutlarında ve farklı morfolojilere sahip borik asit katkılı yağların sürtünme ve aşınma

davranışları yüzeysel temas geometrisinde incelenmiştir. Yukarıdaki sonuçlar ve değerlendirmeler göz önünde alınarak en uygun çalışma koşulları, granül borik asit için 100 N temas yükü ve ağırlıkça %1-1,5 katkı oranlarında olduğu; toz borik asit için ise 150 N temas yükü ve ağırlıkça %1 katkı oranında olduğu belirlenmiştir. Belirlenen çalışma koşullarında gerçekleşen deneyler sonucunda aşınan numune yüzeyleri Bölüm 3.2.3'te incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

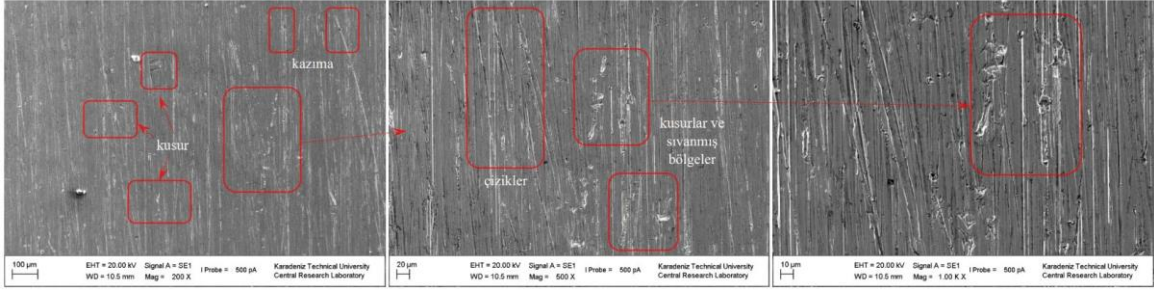
### 3.2.3. Uygun Çalışma Koşullarında Yüzey Pürüzlülüğü ve Mikroyapısal Özelliklerin İncelenmesi

Bu bölümde, belirlenen çalışma koşullarında katkısız ve katkılı baz yağ ile yapılan deneyler sonucunda aşınan numune yüzeyleri SEM ve EDS teknikleri ile analiz edilmiştir ve aşınma davranışlarının karakteristiği ile ilgili bulgulara yer verilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

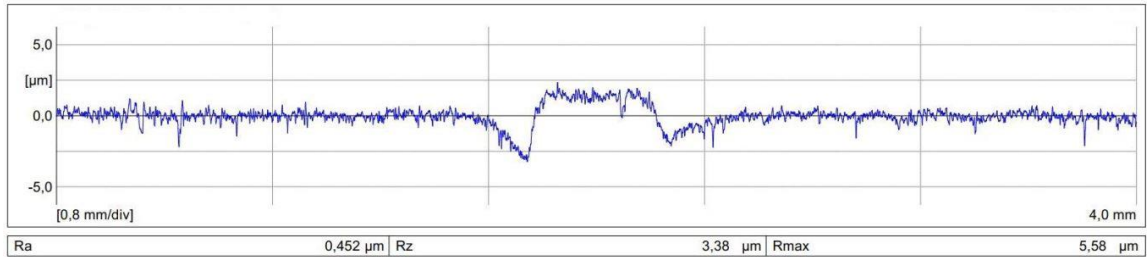
Katkısız baz yağ ile çalışan numune yüzeylerinin 100 N ve 150 N temas yüklerindeki SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 3.63 ve 64'te ve yüzey pürüzlülükleri Şekil 3.65'te verilmiştir. 100 N yükte baz yağ ile çalışan numune yüzeyinde, kayma yönüne paralel geniş ve derin oluklar ve bu olukların içerisinde küçük çukurlar gözlenmiştir. Ayrıca çalışma yüzeyinde oyuk benzeri birçok kusur ve sıvanmış bölgelerin olduğu görülmüştür (Şekil 3.63). Temas yükü 150 N olduğunda ise, numune yüzeyinde kayma yönüne paralel olmayan oluk ve kusurların sayısının arttığı ve sıvanmış bölgelerin çoğaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3.64). Ayrıca oluşan aşınma hasarlarının numune yüzeyinin pürüzlülüğünü arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 3.65)



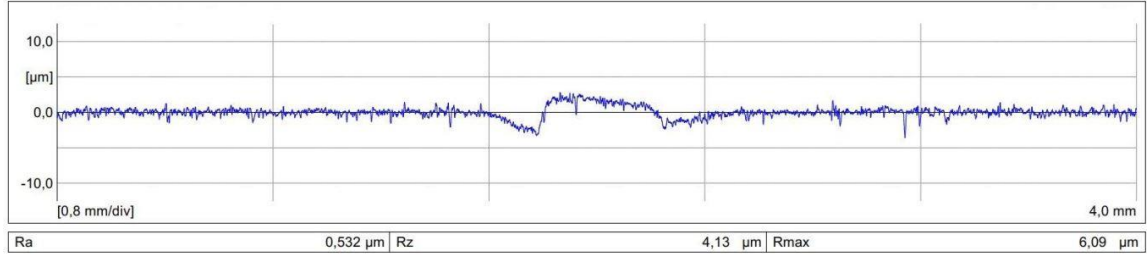
Şekil 3.63. 100 N temas yükünde katkısız fındık yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 3.64. 150 N temas yükünde katkısız fındık yağı ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü



(a)



(b)

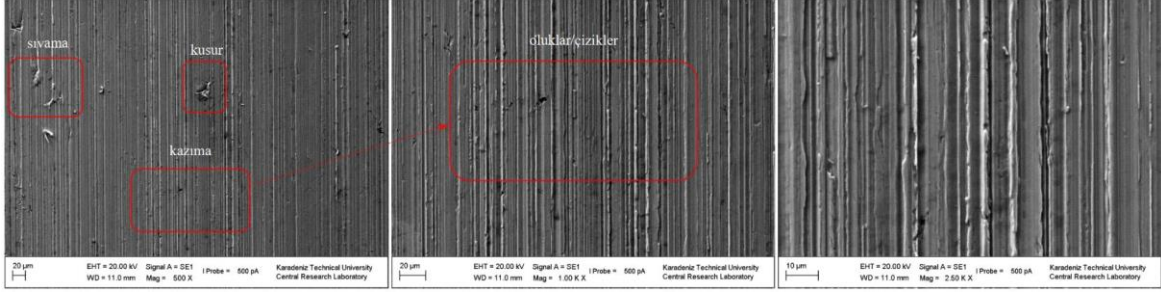
Şekil 3.65. Katkısız baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin pürüzlülüğü: (a) 100 N ve (b) 150 N

Bölüm 3.2.1’de bahsedildiği gibi düşük hız ve yüksek yüklerde pürüzlülükler arasındaki temas, lokal sıcaklık artışlarına ve yüzey reaksiyon hızının artmasına neden olmuştur. Bu durum yüksek oleik asit içeren fındık yağının polar uçları ile yüzeye tutunmasını zorlaştırmış ve film oluşum etkisini zayıflatmıştır [111, 112]. Film oluşumunun gerçekleşmemesi nedeniyle sürtünme yüzeylerinde meydana gelen şiddetli kazıma etkisi aşınma hasarlarını meydana getirmiştir. Basıncın etkisi ile sertliği yüksek olan disk yüzeyindeki pürüzlülükler daha düşük sertlikteki numune yüzeyine batmış ve izafi hareket yardımıyla numune yüzeyinden sürükleyerek malzeme kaldırmıştır. Bu durum geniş oluklar ve sıvanmış bölgeleri oluşturmuştur. Ayrıca anlık pürüzlülük temasları soğuk kaynak

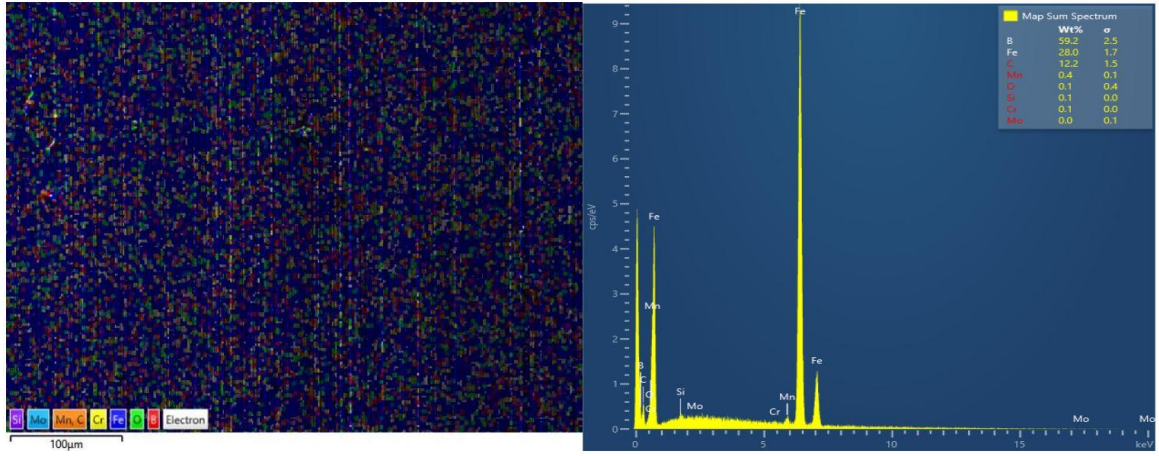
noktaları oluşturmuş ve kayma hareketi ile bu kaynak noktaları koparak sertliği daha düşük olan numune yüzeyinde çukurları meydana getirmiştir [3].

100 N temas yükünde ve ağırlıkça %1 ve %1,5 oranlarında gBA katkılı baz yağlar ile yapılan deneyler sonucu aşınan numune yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri sırasıyla Şekil 3.66-69'da ve yüzey pürüzlülük verileri Şekil 3.70'te verilmiştir. Ağırlıkça %1 gBA katkılı yağ koşullarında aşınan numune yüzeyinin SEM görüntülerinde (Şekil 3.66), kayma yönü doğrultusunda oluk/çiziklerin olduğu ve baz yağa kıyasla sıvanmış bölgelerin ve kusurların azaldığı görülmüştür. Granül borik asidin temas yüzeyindeki dizilişi ve parçacık boyutu, az da olsa kusurların oluşmasına ve malzeme transferine neden olmuştur [68, 96, 105]. Ayrıca adezyon aşınmasına bağlı olarak yüzeyden kopan parçacıklar izafi hız ile temas bölgesinden çıkarken abrazyon aşınmasına neden olmuş ve çizikleri meydana getirmiştir [3]. Baz yağ içerisinde gBA oranının artışı ise (ağırlıkça %1,5), numune yüzeyinde çukur ve sıvanmış bölge oluşumunu azaltırken mikro ölçekte malzeme kopmalarını arttırmıştır (Şekil 3.68). Ayrıca baz yağa kıyasla olukların genişliklerinde azalma olduğu görülmüştür. Diğer yandan yüzey pürüzlülük değerlerinin gBA katkısı ile daha az deformasyona uğradığı ve katkı oranı artışı ile deformasyonun biraz daha azaldığı belirlenmiştir (Şekil 3.70). Basınç ve izafi hareketin etkisi ile granül parçacıklarının pul pul döküldüğü ve katmanlı yapısı sayesinde pürüzlülükler arasında kayarak soğuk kaynak noktalarının oluşumuna azalttığı söylenebilir [103].

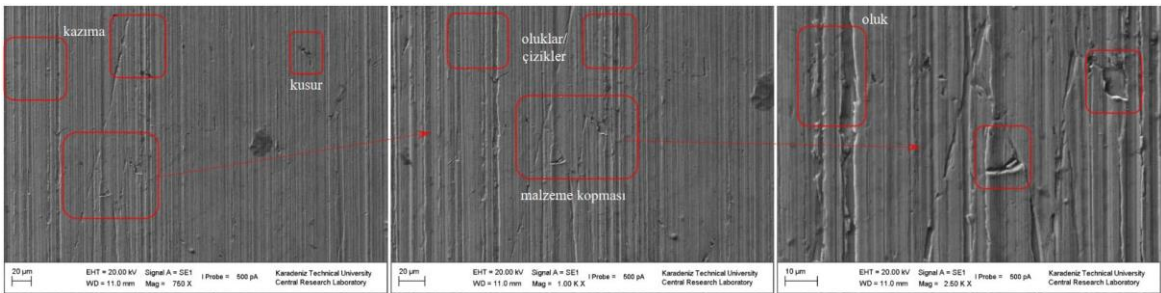
Ağırlıkça %1 gBA katkılı yağ ile yapılan deneyler sonucunda aşınan numune yüzeyinin EDS analizinde, gBA parçacıklarının form değiştirmiş biçimde çalışma bölgesinde varlığı tespit edilmiştir (Şekil 3.67). Bu durum parçacık boyutu büyük olsa da katkı maddelerinin yüzeye tutunabildiğinin bir kanıtıdır. Parçacıkların pürüzlülüklerle tutunarak direkt teması azalttığı ve film oluşum etkisine katkı sağladığı söylenebilir. Ancak yüzey pürüzlülüklerinden büyük parçacıkların sıklıkla abrazyon aşınmasını tetiklediği de bildirilmektedir [66]. Bu durum SEM görüntüleri ile örtüşmektedir (Şekil 3.66). Katkı oranı artışı ile çalışma yüzeyinde granül borik asit miktarının azaldığı ancak oksit kalıntılarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 3.69). Katkı oranı artışı ile yüzeyde tribokimyasal reaksiyonların arttığı ve baz yağın tribolojik özelliklerinde iyileşme olduğu söylenebilir [89, 112].



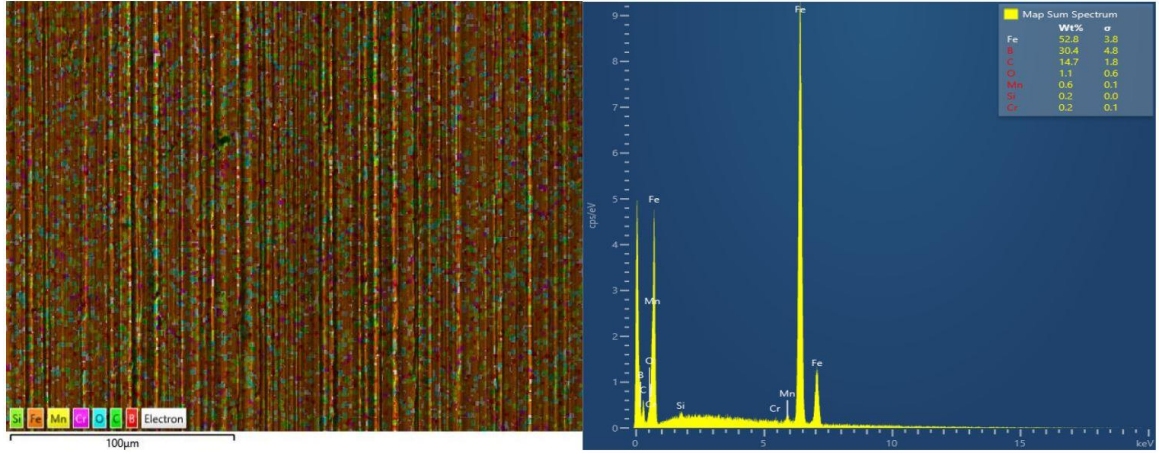
Şekil 3.66. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü



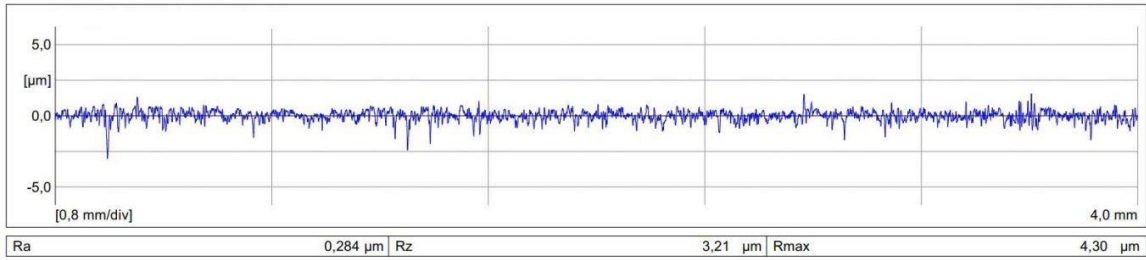
Şekil 3.67. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi



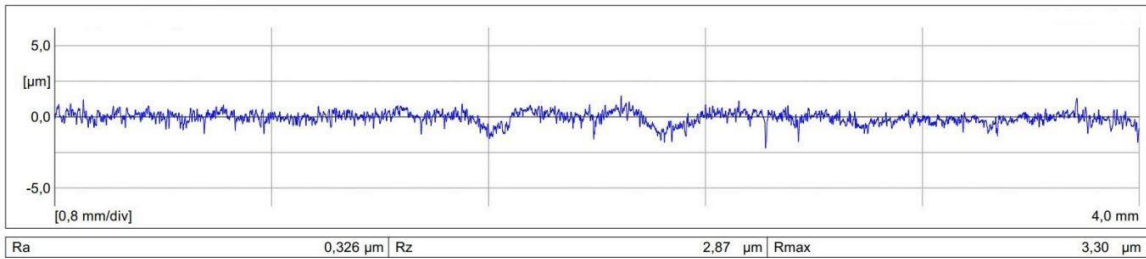
Şekil 3.68. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 3.69. 100 N temas yükünde ağırlıkça %1,5 granül borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi



(a)

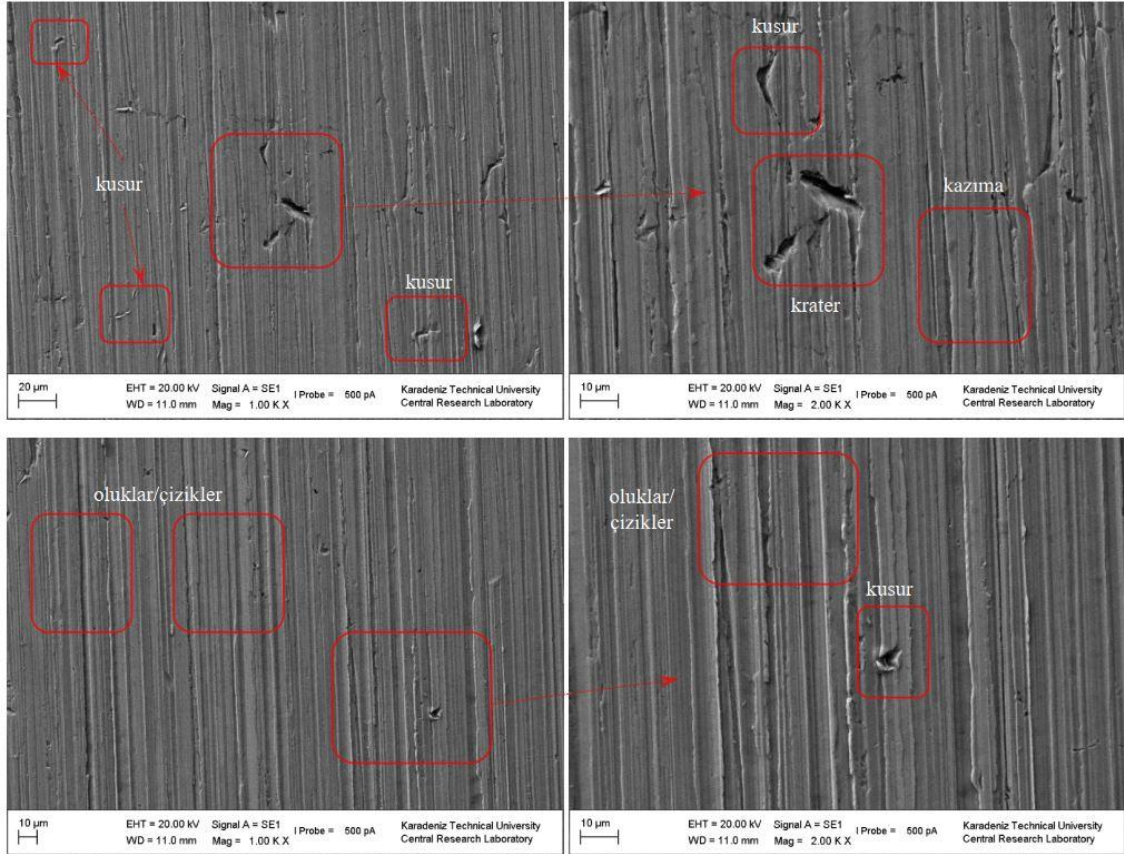


(b)

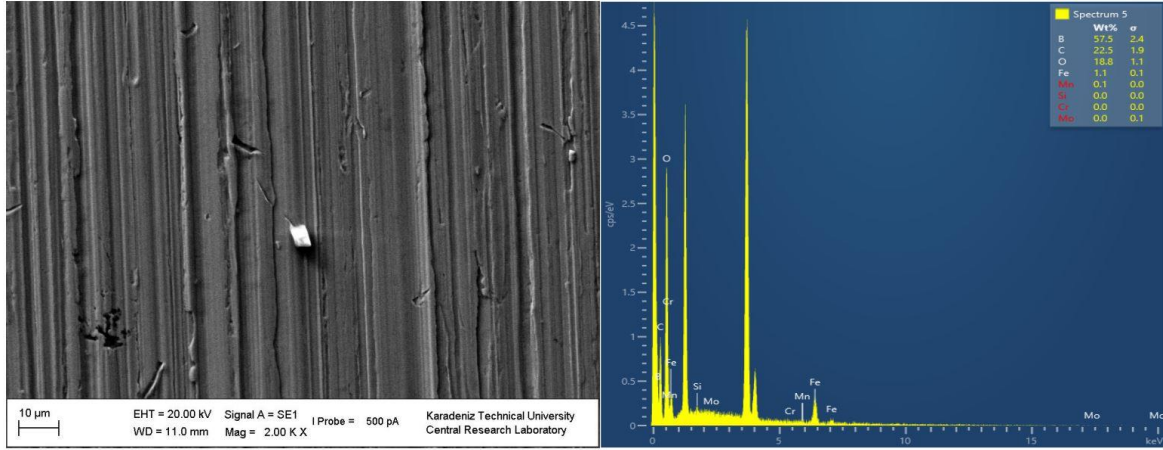
Şekil 3.70. 100 N temas yükünde gBA katkılı yağ ile çalışan numune yüzeyinin pürüzlülüğü: (a) ağırlıkça %1 ve (b) ağırlıkça %1,5 katkı oranı

150 N temas yükünde ve ağırlıkça %1 oranında toz borik asit (tBA) katkılı baz yağ ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda aşınan numune yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi sırasıyla Şekil 3.71 ve 72'de ve yüzey pürüzlülüğü Şekil 3.73'te verilmiştir. İlgili yüzeyin SEM görüntülerinde (Şekil 3.70), kayma doğrultusunda çizikler ve oyuk, çukur benzeri kusurlar tespit edilmiştir. Karışım içerisinde 10-100 µm aralığında değişen parçacık boyutlarından ortalamanın çok üstünde olan parçacıkların yüzey pürüzlülük ortalamasından

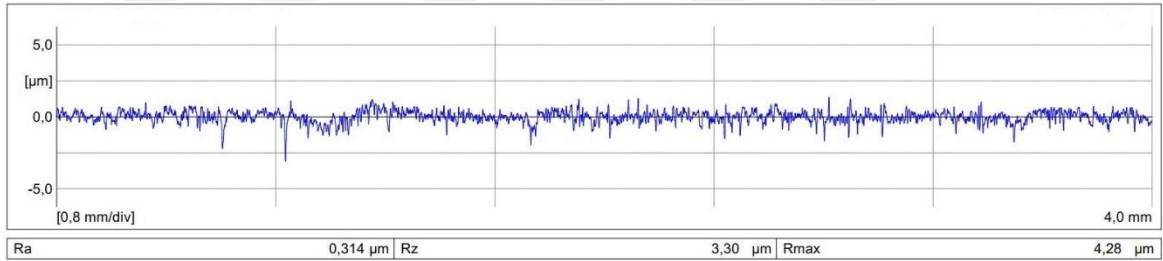
büyük olması durumunda, büyük parçacıklar abrazyon aşınmasına neden olduğu ve çizikler meydana getirdiği söylenebilir [68]. Bunun yanında temas yüzeyine parçacıkların anlık giriş ve çıkışı, basıncın etkisi ile parçacıkların numune yüzeyine batması, temas yüzeyinde parçacıklarının rastgele dizilişi ve aşınma kalıntılarının çalışma yüzeyindeki hareketi gibi durumlar yüzeyde kusurların oluşmasına neden olmuştur [91, 105]. EDS analizinde ise (Şekil 3.72), çalışma yüzeyine yayılmış şekilde tBA parçacıkları ve oksit tabakaları tespit edilmiştir. Sürtünme yüzeyinde borik asit varlığı, katmanlar arası kaymanın meydana geldiğine dair fiziksel bir kanıt sunmaktadır [59, 60]. Ayrıca oksit tabakaları da çalışma bölgesinde tribokimyasal reaksiyonlar gerçekleştiğinin işaretidir [89, 112]. Diğer taraftan tBA katkılı yağ ile çalışan numune yüzeyinin baz yağa kıyasla ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve maksimum pürüzlülük derinliğinin (Rmax) azaldığı görülmüştür. Bu durum, tBA katkısının yüzey deformasyonunu ve aşınma hasarını azalttığını göstermektedir.



Şekil 3.71. 150 N temas yükünde ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin farklı bölgelerindeki SEM görüntüleri



Şekil 3.72. 150 N temas yükünde ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin EDS analizi

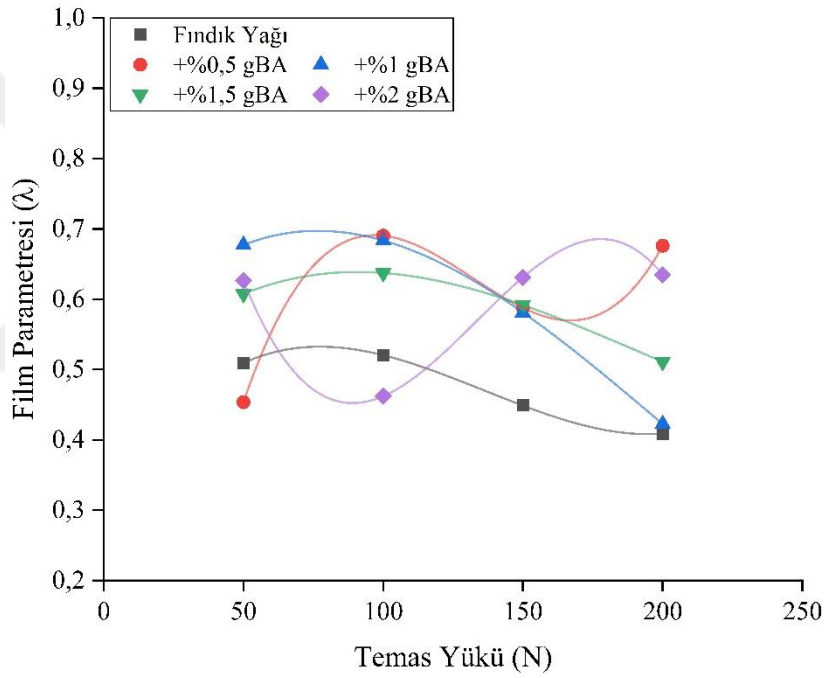


Şekil 3.73. 150 N temas yükünde ağırlıkça %1 toz borik asit katkılı baz yağ ile çalışan numune yüzeyinin pürüzlülüğü

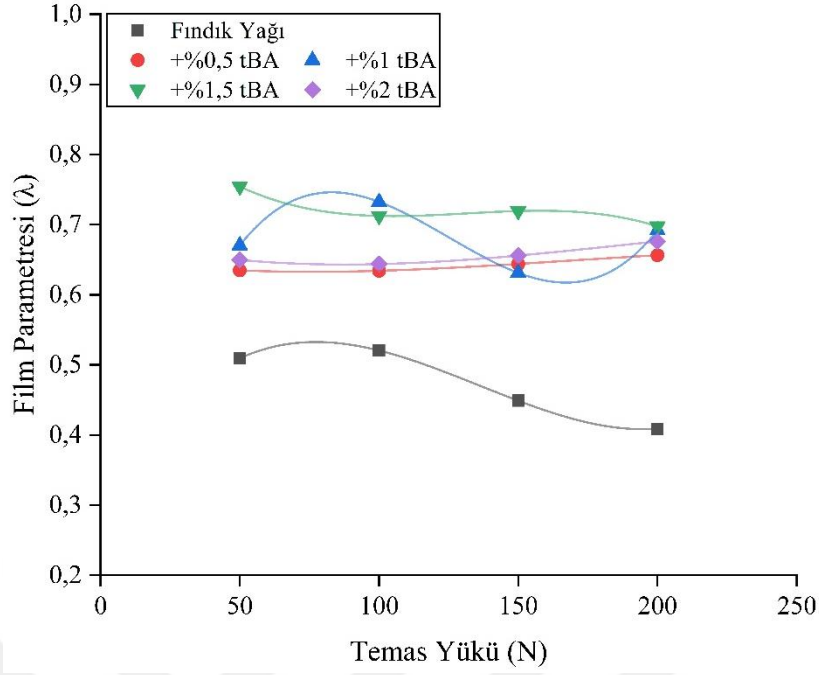
Katkılı yağların çalışma bölgelerini (yağlama rejimi) anlayabilmek için Bölüm 2.6'da yer alan bağıntılardan yararlanılarak teorik hesaplama yapılmıştır. Granül ve borik asit katkılı yağlar için belirlenen film parametresi,  $\lambda$  ile ilgili görseller sırasıyla Şekil 3.74 ve 3.75'te ve ilgili değerler Tablo 3.10'da verilmiştir. Granül ve toz borik asit katkılarının yağ filmi oluşum etkisini genel olarak arttırdığı ve sınır yağlama bölgesinde baz yağın çalışma koşullarını iyileştirdiği söylenebilir. tBA katkısı tüm katkı oranlarında ve yükleme koşullarında iyileştirici etki göstermiştir. gBA katkısı ise tüm yükleme koşullarında sadece ağırlıkça %1-1,5 katkı oranlarında iyileştirici etkiye sahiptir.

Tablo 3.10. Yağ film parametreleri ( $\lambda$ )

Yük (N)	$(\lambda)$								
	Fındık Yağı	+%0,5 gBA	+%1 gBA	+%1,5 gBA	+%2 gBA	+%0,5 tBA	+%1 tBA	+%1,5 tBA	+%2 tBA
50	0,509	0,454	0,677	0,607	0,626	0,635	0,670	0,754	0,650
100	0,520	0,690	0,683	0,637	0,462	0,634	0,732	0,712	0,644
150	0,449	0,588	0,581	0,592	0,631	0,644	0,631	0,719	0,656
200	0,409	0,676	0,422	0,511	0,635	0,656	0,692	0,697	0,676



Şekil 3.74. Granül borik asit katkılı yağın film parametresi değerleri

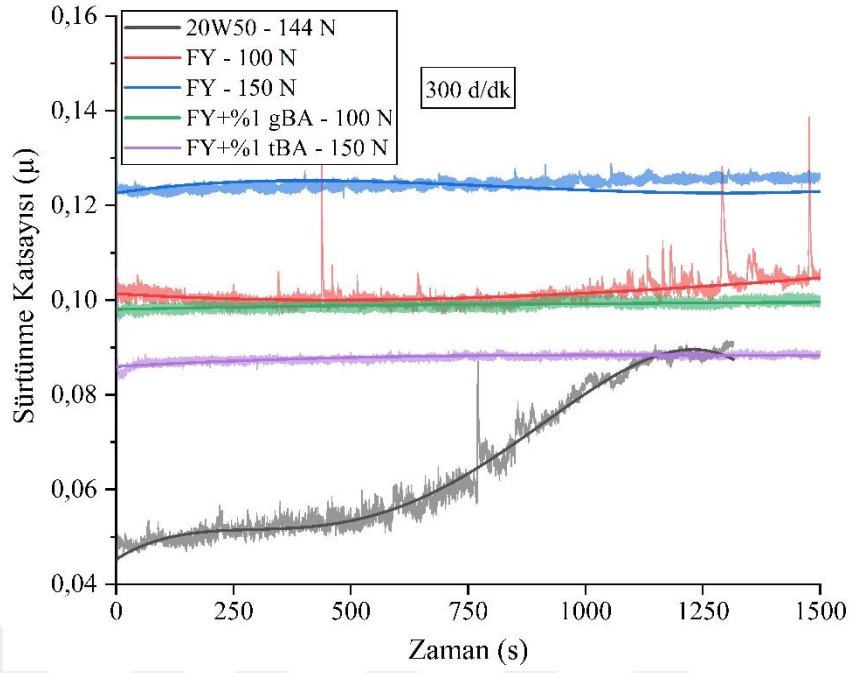


Şekil 3.75. Toz borik asit katkılı yağın film parametresi değerleri

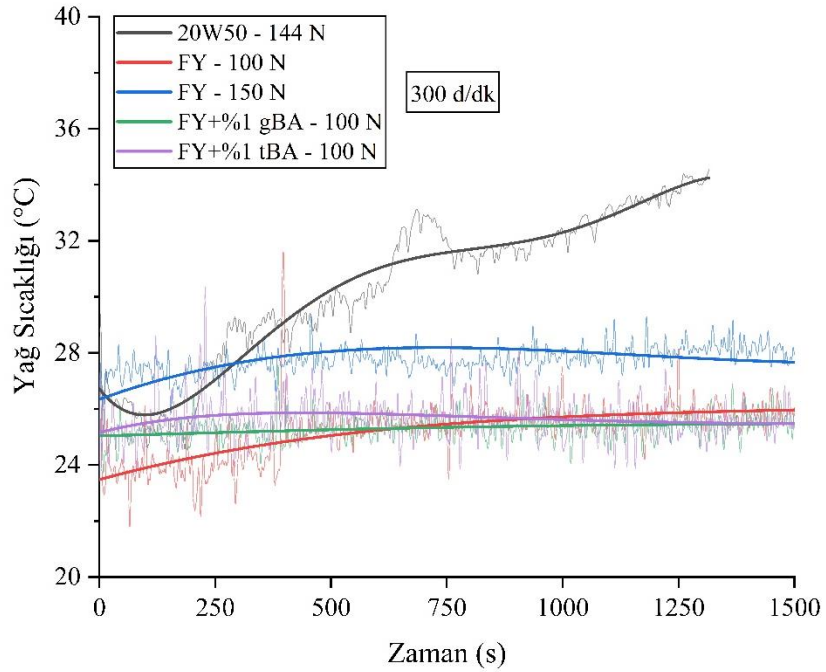
### 3.2.4. Fındık Yağı ile SAE 20W50 Motor Yağı ile Kıyaslanması

Tez çalışmasında kullanılan katkısız ve borik asit katkılı fındık yağı karışımları ile 20W50 motor yağının benzer çalışma koşullarında (300 d/dk çevre hızı ve 100-150 N temas yükü) elde edilen sürtünme, yağ sıcaklığı ve aşınma verileri sırasıyla Şekil 76-78 arasında verilmiştir.

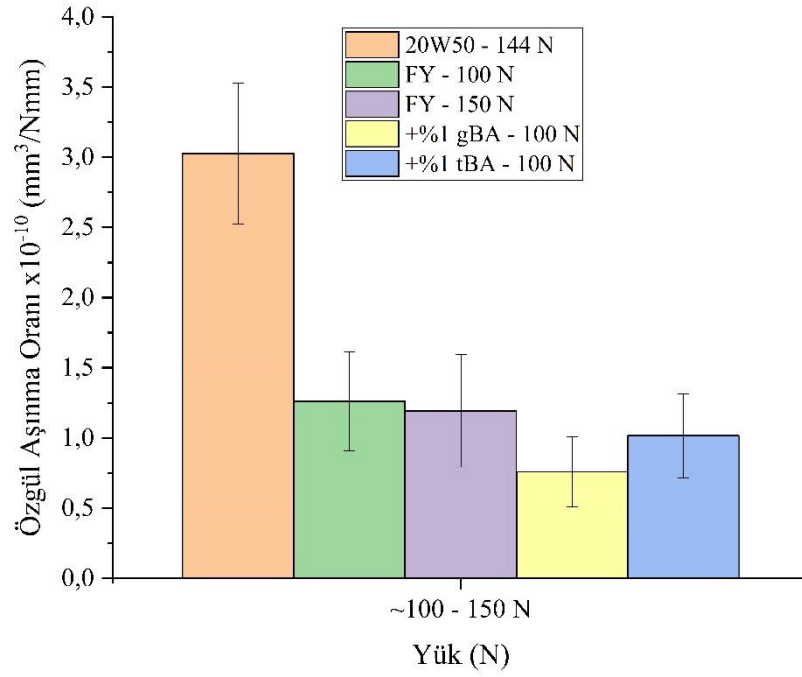
Sürtünme katsayısı verileri incelendiğinde (Şekil 3.76), 20W50 motor yağının artan değerler aldığı ve sürtünme katsayısının 0,09 civarında kararlı değerler almaya başladığı görülmüştür. Benzer koşullarda fındık yağının 0,1 – 0,125 arasında  $\mu$  değerleri aldığı ve çalışmanın bazı aşamalarında sapmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Fındık yağına ağırlıkça %1 tBA ilave edilmesi ile sürtünme katsayısının 0,09 civarında değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tBA katkılı fındık yağı kullanılarak elde edilen  $\mu$  değerlerinin literatürde mineral baz yağlar kullanılarak elde edilen  $\mu$  değerlere yakın olduğu ve sürtünme katsayısının temas geometrisine bağlı olarak farklı değerler aldığı görülmüştür [11, 73, 112]. Bunun yanında, 20W50 motor yağı sıcaklığı 25-35°C değerleri arasında gittikçe artan bir eğime sahipken fındık yağı ve karışımlarının 24-28°C değerleri arasında daha kararlı eğilime sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.77). Diğer yandan, fındık yağı ve karışımlarının motor yağına kıyasla aşınma önleyici olarak daha etkili oldukları görülmüştür (Şekil 3.78)



Şekil 3.76. Fındık yağı ile 20W50 motor yağının sürtünme katsayısı değerlerinin kıyaslanması



Şekil 3.77. Fındık yağı ile 20W50 motor yağının yağ sıcaklık değerlerinin kıyaslanması



Şekil 3.78. Fındık yağı ile 20W50 motor yağının aşınma değerlerinin kıyaslanması

Yukarıdaki tespitler göz önüne alındığında, fındık yağı karışımları içerisinde özellikle ağırlıkça %1 tBA katkılı fındık yağının uygun koşullarda mineral esaslı yağlayıcılar yerine kullanılabilceğı ifade edilebilir.

## 4. SONUÇLAR

### 4.1. SAE 20W50 Motor Yağı ile Kullanılan Molibden Disülfür (MoS<sub>2</sub>) ve Kalsiyum Florür (CaF<sub>2</sub>) Katkıları ile İlgili Çalışmalar

Sıvı baz yağ olarak seçilen SAE 20W50 motor yağına MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkıları eklenmiştir ve baz yağ üzerindeki sürtünme ve aşınma etkileri yüzeysel temas geometrisinde uyarlanmış block-on-ring test düzeneği kullanılarak araştırılmıştır. Farklı hız, yük, katkı oranı ve yağ sıcaklığı şartlarında gerçekleştirilen deneylerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Molibden disülfür (MoS<sub>2</sub>) ve kalsiyum florür (CaF<sub>2</sub>) katkıları motor yağı üzerinde genel olarak sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici etkiler göstermiştir.
2. MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkıları, yağ filmi oluşum etkisini artırarak motor yağının sınır yağlama bölgesindeki çalışmasını iyileştirmiştir.
3. MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkılarının motor yağı içerisinde bu tez çalışması için ideal çalışma hızınının 600 d/dk (1,88 m/s) olduğu görülmüştür.
4. İdeal çalışma hızında ve tüm yüklerde katkı maddelerinin sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici etkileri, motor yağı içerisinde MoS<sub>2</sub> için ağırlıkça %0,25 katkı oranında ve CaF<sub>2</sub> için ağırlıkça %0,1-0,5 aralığındaki katkı oranlarında olduğu belirlenmiştir.
5. MoS<sub>2</sub> katkılı motor yağı için uygun çalışma koşulları 600 d/dk (1,88 m/s), ağırlıkça %0,25 katkı oranı ve 353 N (3,15 MPa) olarak seçilmiştir. Uygun çalışma koşullarında  $\mu_{ort}$  ve  $SWR_{ort}$  değerleri sırasıyla 0,024 ve  $0,63 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nmm olarak elde edilmiştir. Motor yağına uygun çalışma koşullarında MoS<sub>2</sub> katkısının sürtünme ve aşınmayı sırasıyla %43,5 ve %65,2 oranında azaltmıştır.
6. CaF<sub>2</sub> katkılı motor yağı için uygun çalışma koşulları 600 d/dk (1,88 m/s), ağırlıkça %0,25 katkı oranı ve 353 N (3,15 MPa) olarak seçilmiştir. Uygun çalışma koşullarında  $\mu_{ort}$  ve  $SWR_{ort}$  değerleri sırasıyla 0,026 ve  $0,69 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nmm olarak elde edilmiştir. Motor yağına uygun çalışma koşullarında CaF<sub>2</sub> katkısının sürtünme ve aşınmayı sırasıyla %38,8 ve %61,8 oranında azaltmıştır.
7. Optimum koşullarında yağ sıcaklığı (50-55°C) arttırıldığında, MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkıları motor yağı üzerindeki sürtünme düşürücü etkilerine devam etmiştir.

8. MoS<sub>2</sub> katkısı numune yüzeyinde koruyucu etkiye sahipken CaF<sub>2</sub> katkısında böyle bir etkinliğine rastlanılamamıştır.
9. MoS<sub>2</sub> ve CaF<sub>2</sub> katkıları numune yüzeyinde tribokimyasal etkileşimler meydana getirerek yağ filmi oluşum etkisini arttırmıştır.
10. Çevreye zarar vermemesi açısından, ağır metal içeren (MoS<sub>2</sub>) katkıları yerine alkali metal tuzları (CaF<sub>2</sub>) alternatif katkı maddesi olarak kullanılabilir.

#### **4.2. Ham Fındık Yağı ile Kullanılan Granül ve Toz Borik Asit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) Katkıları ile İlgili Çalışmalar**

Sıvı baz yağ olarak seçilen ham fındık yağına (FY) granül (gBA) ve toz (tBA) borik asit (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) katkıları eklenmiştir ve baz yağ üzerindeki sürtünme ve aşınma etkileri yüzeysel temas geometrisinde uyarlanmış block-on-ring test düzeneği kullanılarak araştırılmıştır. Farklı yük ve katkı oranlarında gerçekleştirilen deneylerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Granül ve toz borik asit katkıları ham fındık yağı üzerinde genel olarak sürtünme azaltıcı ve aşınma önleyici etkiler göstermiştir.
2. Borik asit katkıları katmanlı yapıları sayesinde fındık yağının sürtünme değerlerindeki sapmaları azaltmış ve daha kararlı çalışmasını sağlamıştır.
3. Ham fındık yağı içerisindeki borik asit katkı oranı ve temas yükü, baz yağın tribolojik davranışlarını etkilemiştir. Özellikle yüksek temas yüklerinde katkı oranı artışı ile gBA katkılı FY artan  $\mu_{ort}$  değerlerine sahipken tBA katkılı FY daha kararlı  $\mu_{ort}$  değerleri almıştır.
4. Granül ve toz borik asit katkıları yağ filmi oluşum etkisini artırarak sınır yağlama bölgesinde baz yağın çalışmasını iyileştirmiştir.
5. Granül borik asit (gBA) katkılı baz yağ için ağırlıkça %1 katkı oranı ve 100-150 N temas yükleri uygun çalışma koşulları olarak belirlenmiştir. Bu çalışma koşullarındaki  $\mu_{ort}$  ve  $SWR_{ort}$  değerleri, sırasıyla 0,10-0,11 ve 0,75-1,01 x 10<sup>-10</sup> mm<sup>3</sup>/Nmm aralığında elde edilmiştir. Fındık yağına uygun şartlarda gBA katkısının sürtünmeyi %20-25,7 ve aşınmayı %15-40,5 aralığında azaltmıştır.
6. Toz borik asit (tBA) katkılı baz yağ için ağırlıkça %1 katkı oranı ve 150 N temas yükü uygun çalışma koşulu olarak belirlenmiştir. Bu çalışma koşulundaki  $\mu_{ort}$  ve  $SWR_{ort}$  değerleri, sırasıyla 0,088 ve 0,50 x 10<sup>-10</sup> mm<sup>3</sup>/Nmm olarak kaydedilmiştir. Fındık

yağına uygun Őartlarda tBA katkısının sűrtűnme ve aŐınmayı sırasıyla %40,5 ve %58 oranında azaltmıŐtır.

7. Ham fındık yağına gBA ve tBA eklentisi, çalıŐma bűlgesinde tribokimyasal etkileŐimler meydana getirerek yađ filmi oluŐum etkisini arttırmıŐ ve numune yűzeyindeki aŐınma hasarını azaltmıŐtır.
8. Borik asit morfolojisinin baz yađın tribolojik űzelliklerini etkilediđi belirlenmiŐtir. Toz morfolojisine sahip borik asidin granűle kıyasla, űzellikle yűksek temas yűklerinde, daha dűŐűk sűrtűnme ve çalıŐma sıcaklıđı sonuçları vermiŐtir.
9. evre dostu ve yenilenebilir bir karıŐım olan borik asit katkılı fındık yađı mineral esaslı yađlayıcılar yerine alternatif yađlayıcı olarak kullanılabilceđi gűrűlműŐtir.



## 5. ÖNERİLER

Katkı maddeli yağların yüzeylerde gerçekleştirdiği tribokimyasal etkileşimlerin tam anlamıyla tespiti ve anlaşılabilmesi, metal yüzeyindeki oksidasyon seviyeleri ve katkıların yağ filmi oluşumuna etkilerinin nitelik ve nicelik bakımından detaylı şekilde incelenebilmesi için X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) tekniği kullanılabilir.

Parçacık boyutu ve morfolojisinin tribolojik özelliklere etkilerinin detaylı şekilde irdelenebilmesi için, farklı parçacık boyutu ve morfolojiye sahip katkı maddeleri kuru veya yağlı ortamda test edilebilir. Ayrıca farklı karışım oranı, boyut ve morfolojilere sahip katkı maddeleri birlikte yağlara eklenerek tribolojik etkileri araştırılabilir.

Borik asit katkılı fındık yağının tribolojik davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesine katkıda bulunmak amacıyla dinamik yük, farklı hız, sıcaklık ve malzeme çiftleri gibi çeşitli çalışma şartlarında incelenebilir. Ayrıca bu çevre dostu katkılı yağ ile ilgili çalışmalar farklı temas geometrisine sahip test düzeneklerinde ve endüstriyel sistemlerde gerçekleştirilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Bhushan, B., Introduction to Tribology, Second, John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
2. Holmberg, K., ve Erdemir, A., Global impact of friction on energy consumption, economy and environment, FME Transactions, 43, 3 (2015) 181–185.
3. Stachowiak, G.,W., ve Batchelor, A.,W., Engineering Tribology, Second, Butterworth & Heinemann, 2000.
4. Bhushan, B., Modern Tribology Handbook, First, CRC Press LLC, 2001.
5. Sriviyas, P.,D., ve Charoo, M.,S., A review on tribological characterization of lubricants with nano additives for automotive applications, Tribology in Industry, 40, 4 (2018) 594–623.
6. ATC, Industrial Lubricant: Applications and Impact of Additives on Performance, Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 144 (2021).
7. Rudnick, L., Lubricant Additives Chemistry and Applications, Second, CRC Press LLC, 2009.
8. Hewstone, R.,K., Environmental health aspects of lubricant additives, the Science of the Total Environment, 156, 3 (1994) 243–254.
9. Madanhire, I., ve Mbhohwa, C., Mitigating Environmental Impact of Petroleum Lubricants, First, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
10. Sawyer, W.,G., vd., In situ lubrication with boric acid: Powder delivery of an environmentally benign solid lubricant, Tribology Transactions, 49, 2 (2006) 284–290.
11. Deshmukh, P., vd., On the friction and wear performance of boric acid lubricant combinations in extended duration operations, Wear, 260, 11–12 (2006) 1295–1304.
12. Salimon, J., vd., Biolubricants: Raw materials, chemical modifications and environmental benefits, European Journal of Lipid Science and Technology, 112, 5 (2010) 519–530.
13. Cisson, C.,M., vd., Human health and environmental hazard characterisation of lubricating oil additives, Lubrication Science, 8, 2 (1996) 145–177.
14. Nosonovsky, M., ve Bhushan, B., Green Tribology Biomimetics, Energy Conservation and Sustainability, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
15. Reeves, C.,J., ve Menezes, P.,L., Advancements in Eco-friendly Lubricants for Tribological Applications: Past, Present, and Future, Mater. Forming, Mach. Tribol., 2016, , 41–56.
16. Castro, W., vd., A study of the oxidation and wear properties of vegetable oils: soybean oil without additives, Journal of the American Oil Chemists' Society, 83, 1 (2006) 47–52.
17. Sarma, R.,N., ve Vinu, R., Current Status and Future Prospects of Biolubricants: Properties and Applications, Lubricants, 10 (2022) 1–21.

18. Gulzar, M., vd., Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives, Journal of Nanoparticle Research, 18, 8 (2016) 1–25.
19. Dai, W., vd., Roles of nanoparticles in oil lubrication, Tribology International, 102 (2016) 88–98.
20. Holmberg, K., ve Erdemir, A., Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, Friction, 5, 3 (2017) 263–265.
21. Karabacak, Y.,E., Bor Katkılı Yağların Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi, Karadeniz Technical University, 2013.
22. Babalık, F., vd., Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Dora Yayınları, 2013.
23. Schmid, S.,R., vd., Fundamentals of Machine Elements, Third, CRC Press, 2019.
24. Tevrüz, T., Makina Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri - Cilt 2, First, Çağlayan Kitabevi, 2015.
25. Temiz, V., <https://web.itu.edu.tr/temizv/> Triboloji.
26. Hamrock, B.,J., vd., Fundamental of Fluid Film Lubrication, Second, Marcel Dekker, Inc., 2004.
27. Şekercioğlu, T., Makine Elemanları - Hesap ve Şekillendirme, Fourth, Birsen Yayınevi, 2015.
28. Menezes, P.,L., vd. ed., Tribology for Scientists and Engineers, Springer, 2013.
29. Hirani, H., <http://www.infocobuild.com/education/audio-video-courses/mechanical-engineering/Tribology-IIT-Delhi/lecture-07.html> Tribology/Adhesive Wear.
30. Chattopadhyay, R., Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention, First, ASM International, 2001.
31. Wen, S., ve Huang, P., Principles of Tribology, Second, Tsinghua University Press, 1988.
32. Czichos, H., Tribology, First, Elsevier Nort-Holland, 1978.
33. Davim, J.,P., Tribology for Engineers, First, Woodhead Publishing, 2011.
34. Booser, R.,E., Tribology Data Handbook, CRC Press, 1997, .
35. Sliney, H.,E., Solid Lubricants, NASA Technical Memorandum, (1991) 1–19.
36. ATC, Lubricant Additives and the Environment, Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, 49 (2007).
37. Sharma, B.,K., ve Biresaw, G., Environmentally Friendly and Biobased Lubricants, CRC Press, 2017.
38. Gönenli, M.,Y., Madeni Yağlar Hakkında Bilgi Notları, 2015.
39. Mate, C.,M., Tribology on the Small Scale : A Bottom Up Approach to Friction, Lubrication, and Wear, First, Oxford University Press, 2008.
40. ATC, Lubricant Additives: Use and Benefits, Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe, (2016).

41. Wu, H., vd., An investigation on the lubrication effectiveness of MoS<sub>2</sub> and BN layered materials as oil additives using block-on-ring tests, Tribology International, 151 (2020) 106516.
42. Gansheimer, J., ve Holinski, R., Molybdenum disulfide in oils and greases under boundary conditions, Journal of Tribology, 95, 2 (1973) 242–246.
43. Wu, H., vd., Investigation on the lubrication advantages of MoS<sub>2</sub> nanosheets compared with ZDDP using block-on-ring tests, Wear, 394–395, 28 (2018) 40–49.
44. Tontini, G., vd., Synthesis of nanostructured flower-like MoS<sub>2</sub> and its friction properties as additive in lubricating oils, Industrial Lubrication and Tribology, 68, 6 (2016) 658–664.
45. Kalin, M., vd., Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS<sub>2</sub> nanotubes as potential oil additives, Wear, 280–281 (2012) 36–45.
46. Yi, M., ve Zhang, C., The synthesis of MoS<sub>2</sub> particles with different morphologies for tribological applications, Tribology International, 116 (2017) 285–294.
47. Sgroi, M., vd., Friction Reduction Benefits in Valve-Train System Using IF-MoS<sub>2</sub> Added Engine Oil, Tribology Transactions, 58, 2 (2015) 207–214.
48. Tannous, J., vd., Understanding the tribochemical mechanisms of IF-MoS<sub>2</sub> nanoparticles under boundary lubrication, Tribology Letters, 41, 1 (2011) 55–64.
49. Kogovšek, J., ve Kalin, M., Various MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> and C-based micro- and nanoparticles in boundary lubrication, Tribology Letters, 53, 3 (2014) 585–597.
50. Gulzar, M., vd., Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives, Journal of Nanoparticle Research, 18, 8 (2016).
51. Baş, H., ve Karabacak, Y.,E., Investigation of Tribological Properties of TiO<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> Particles as Vegetable Oil Additives and Their Effects on Gearbox Performance, Journal of Bio- and Tribo-Corrosion, 8, 2 (2022).
52. Mohan, S., vd., Calcium Fluoride a Potential Solid Lubricant for Green Tribology and Sustainability, Recent Adv. Mech. Eng., 2019, 587–595.
53. Deadmore, D.,L., ve Sliney, H.,E., Hardness of CaF<sub>2</sub> and BaF<sub>2</sub> solid lubricants at 25 to 670 Deg C., NASA Technical Memorandum, (1987).
54. Sliney, H.,E., High Temperature Solid Lubricants - When and Where To Use Them., NASA Technical Memorandum, (1973) 1–12.
55. Baş, H., vd., Tribological properties of MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> particles as grease additives on the performance of block-on-ring surface contact, Tribology International, 168 (2022).
56. Sharma, S.,M., ve Anand, A., Friction and wear behaviour of Fe-Cu-C based self lubricating material with CaF<sub>2</sub> as solid lubricant, Industrial Lubrication and Tribology, 69, 5 (2017) 715–722.
57. Zhang, J., vd., Defect induced luminescence from surface modified calcium fluoride nanoparticles for in-situ temperature monitoring of lubricating oil, Applied Nanoscience, (2021).
58. Wang, L., vd., Tribological investigation of CaF<sub>2</sub> nanocrystals as grease additives, Tribology International, 40, 7 (2007) 1179–1185.

59. Erdemir, A., Lubrication with boric acid additives, 2000.
60. Erdemir, A., Lubrication from mixture of boric acid with oils and greases, 1995.
61. Lovell, M.,R., vd., A Novel Particulate-Fluid Lubrication For Environmentally Benign Forming Processes, World Tribol. Congr. III, 2005, 1–2.
62. Kabir, M.,A., vd., A pin-on-disk experimental study on a green particulate-fluid lubricant, Journal of Tribology, 130, 4 (2008) 1–6.
63. Düzcükoğlu, H., ve Acaroğlu, M., Lubrication properties of vegetable oils combined with boric acid and determination of their effects on wear, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 32, 3 (2010) 275–285.
64. Düzcükoğlu, H., ve Şahin, Ö.,S., Investigation of wear performance of canola oil containing boric acid under boundary friction condition, Tribology Transactions, 54, 1 (2011) 57–61.
65. Baş, H., ve Karabacak, Y.,E., Investigation of the Effects of Boron Additives on the Performance of Engine Oil, Tribology Transactions, 57, 4 (2014) 740–748.
66. Lovell, M.,R., vd., Influence of boric acid additive size on green lubricant performance, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 368, 1929 (2010) 4851–4868.
67. Kim, J.,H., vd., Effect of surfactant on tribological performance and tribochemistry of boric acid based colloidal lubricants, Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces, 6, 3 (2012) 134–141.
68. Trzepieciński, T., Tribological performance of environmentally friendly biodegradable lubricants based on a combination of boric acid and bio-based oils, Materials, 13, 17 (2020).
69. Kimura, Y., vd., Boron nitride as a lubricant additive, Wear, 232, 2 (1999) 199–206.
70. Chua Abdullah, M.,I.,H., vd., Effect of hexagonal boron nitride nanoparticles as an additive on the extreme pressure properties of engine oil, Industrial Lubrication and Tribology, 68, 4 (2016) 441–445.
71. Wang, Y., vd., Friction and wear mechanisms of castor oil with addition of hexagonal boron nitride nanoparticles, Tribology International, 124 (2018) 10–22.
72. Reeves, C.,J., vd., The size effect of boron nitride particles on the tribological performance of biolubricants for energy conservation and sustainability, Tribology Letters, 51, 3 (2013) 437–452.
73. Charoo, M.,S., ve Wani, M.,F., Tribological properties of h-BN nanoparticles as lubricant additive on cylinder liner and piston ring, Lubrication Science, 24, 6 (2016) 273–292.
74. Çelik, O.,N., vd., Effect of nano hexagonal boron nitride lubricant additives on the friction and wear properties of AISI 4140 steel, Particulate Science and Technology, 31, 5 (2013) 501–506.
75. Shafi, W.,K., vd., Performance evaluation of hazelnut oil with copper nanoparticles - a new entrant for sustainable lubrication, Industrial Lubrication and Tribology, 71, 6 (2019) 749–757.

76. Shafi, W.,K., ve Charoo, M.,S., Antiwear and extreme pressure properties of hazelnut oil blended with ZDDP, Industrial Lubrication and Tribology, 73, 2 (2021) 297–307.
77. Xu, Y.,X., vd., Hybrid hazelnut oil characteristics and its potential oleochemical application, Industrial Crops and Products, 26, 1 (2007) 69–76.
78. İcingür, Y., ve Koçak, M.,S., A Study on the Performance and Emission Parameters of Hazelnut Oil Methyl Ester as an Alternative Diesel Fuel, Journal of Polytechnic, 9, 2 (2006) 119–124.
79. Kesen, S., vd., Ham ve Rafine Fındık Yağlarının Yağ Asitleri Bileşimi, Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 31, 1 (2016) 79–84.
80. Köksal, A.,İ., Inventory of hazelnut research, germplasm and references, FAO Regional Office, 1999.
81. Martin, J.,M., ve Ohmae, N., Nanolubricants, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
82. Farr, J.,P.,G., Molybdenum disulphide in lubrication. A review, Wear, 35, 1 (1975) 1–22.
83. Landsdown, A.,R., Molybdenum Disulphide Lubrication, Elsevier, 1974.
84. Winer, W.,O., Molybdenum Disulphide As a Lubricant: a Review of Fundamental Knowledge, Wear, 10 (1967) 422–452.
85. Fedorchenko, I.,M., vd., Lubricating Properties of Calcium Fluoride, Test Methods and Properties of Materials, (1970) 818–820.
86. Zuomin, L., ve Childs, T.,H.,C., The study of wear characteristics of sintered high speed steels containing CaF<sub>2</sub>, MnS and TiC additives at elevated temperature, Wear, 257, 3–4 (2004) 435–440.
87. Barthel, A.,J., vd., Origin of ultra-low friction of boric acid: Role of vapor adsorption, Tribology Letters, 58, 3 (2015).
88. Yin, S., vd., Dependence of the lubrication enhancement of alkyl-functionalized graphene oxide and boric acid nanoparticles on the anti-oxidation property, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 649 (2022) 129521.
89. Erdemir, A., vd., Self-Lubricating Boric Acid Films for Tribological Applications, Japan Int. Tribol. Conf., 1990, 1–8.
90. Erdemir, A., vd., Tribological Properties of Boric Acid and Boric-Acid-Forming Surfaces: Part II: Crystal Chemistry and Self-Lubricating Mechanism of Boric Acid, Soc. Tribol. Lubr. Eng., 1990, 1–24.
91. Erdemir, A., Tribological Properties of Boric Acid and Boric-Acid-Forming Surfaces: Part I: Crystal Chemistry and Self-Lubricating Mechanism of Boric Acid, Soc. Tribol. Lubr. Eng., 1990, 1–21.
92. Wan, Q., vd., Tribological behaviour of a lubricant oil containing boron nitride nanoparticles, Procedia Engineering, 102 (2015) 1038–1045.
93. Wan, Q., vd., Rheological and tribological behaviour of lubricating oils containing platelet MoS<sub>2</sub> nanoparticles, Journal of Nanoparticle Research, 16, 5 (2014).
94. Qiu, S., vd., A Review of ultrafine particles as antiwear additives and friction modifiers in lubricating oils, Lubrication Science, 11, 3 (1999) 217–226.

95. Tevet, O., vd., Friction mechanism of individual multilayered nanoparticles, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108, 50 (2011) 19901–19906.
96. Akbulut, M., Nanoparticle-Based Lubrication Systems, Journal of Powder Metallurgy and Mining, 1, 1 (2012) 1–3.
97. Moshkovith, A., vd., Friction of fullerene-like WS<sub>2</sub> nanoparticles: effect of agglomeration, Tribology Letters, 24, 3 (2006) 225–228.
98. Bowman, W.,F., ve Stachowiak, G.,W., A review of scuffing models, Tribology Letters, 2, 2 (1996) 113–131.
99. Yu, R., vd., Experimental study on tribological property of MoS<sub>2</sub> nanoparticle in castor oil, Journal of Tribology, 141, 10 (2019) 3–7.
100. Sattar Noori, A.,A., vd., Influence of Adding CuO and MoS<sub>2</sub> Nano-particles to Castor Oil and Moulding Oil on Tribological Properties, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 518, 3 (2019).
101. Ludema, K.,C., ve Ajayi, O.,O., Friction, Wear and Lubrication, 2nd baskı, CRC Press, 2019.
102. Spikes, H.,A., Boundary Lubrication and Boundary Films, Thin Films in Tribology, (1993) 331–346.
103. Lee, K., vd., Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication, Tribology Letters, 35, 2 (2009) 127–131.
104. Fox, N.,J., vd., Boundary lubrication performance of free fatty acids in sunflower oil, Tribology Letters, 16, 4 (2004) 275–281.
105. Erdemir, A., vd., A study of the formation and self-lubrication mechanisms of boric acid films on boric oxide coatings, Surface and Coatings Technology, 43, 44 (1990) 588–596.
106. Akbulut, M., vd., Frictional properties of confined nanorods, Advanced Materials, 18, 19 (2006) 2589–2592.
107. Braun, O.,M., Simple Model of Microscopic Rolling Friction, Physical Review Letters, 126104 (2005) 1–4.
108. Israelachvili, J., vd., Effects of sub-ångstrom ( pico-scale ) structure of surfaces on adhesion , friction , and bulk mechanical properties, Journal of Materials Research, (2005).
109. Lovell, M., vd., Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants, Journal of Materials Processing Technology, 177 (2006) 87–90.
110. Vadiraj, A., vd., Effect of Nano Oil Additive Proportions on Friction and Wear Performance of Automotive Materials, Tribology in Industry, 34 (2012) 1–8.
111. Adhvaryu, A., vd., Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants, Wear, 257 (2004) 359–367.
112. Özkan, D., ve Sulukan, E., Tribological behavior of the low-concentration boric acid and ZDDP lubricating oil mixtures, Surface and Interface Analysis, 51, 8 (2019) 826

## ÖZGEÇMİŞ

2011 yılında Tevfik Serdar Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden lisans derecesi aldı. 2018 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2021 yılında KTÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı ve halen bu görevine devam etmektedir. Orta derecede İngilizce bilen BEŞİRBEYOĞLU'nun uluslararası hakemli bilimsel bir dergide yayınlanmış 1 adet makalesi bulunmaktadır.

### Yayınları

Hasan BAŞ, Onur ÖZEN, Muhammet Ali BEŞİRBEYOĞLU, Tribological properties of MoS<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> particles as grease additives on the performance of block-on-ring surface contact, Tribology International Vol.168 January, 2022  
(<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107433>)