

**NANOĞÜMÜŞ KATKILI KOLLOİDAL  
SÜSPANSİYONLARIN TRİBOLOJİK  
PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI**

**2019  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**ŞEYMA KORKMAZ**

**NANOGÜMÜŞ KATKILI KOLLOİDAL SÜSPANSİYONLARIN  
TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI**

**Şeyma KORKMAZ**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Mayıs 2019**

Şeyma KORKMAZ tarafından hazırlanan “NANOĞÜMÜŞ KATKILI KOLLOİDAL SÜSPANSİYONLARIN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi M. Hüseyin ÇETİN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 31/05/2019


Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK (KBÜ)



Üye : Dr. Öğr. Üyesi M. Hüseyin ÇETİN (KBÜ)



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fuat KARTAL (KÜ)



...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.





*Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Şeyma KORKMAZ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### NANOĞÜMÜŞ KATKILI KOLLOİDAL SÜSPANSİYONLARIN TRİBOLOJİK PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Şeyma KORKMAZ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi M. Hüseyin ÇETİN

Mayıs 2019, 78 sayfa

Aşınmaya maruz ortamlarda kullanılan soğutma ve yağlama sıvılarının performanslarının artırılması için nano partikül takviyelerinin kullanılması, tribolojik koşulların optimizasyonu açısından önem taşımaktadır. Nano partiküllerin kolloidal süspansiyon olarak kullanılabilmesi, sınır yağlama tabakasına nüfuziyeti kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada etilen glikol solüsyonu içerisinde farklı oranlarda süspansiyon edilen nano gümüş partiküllerin aşınma bölgesindeki etkisi, sıcaklık değişimi, sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri yoluyla araştırılmıştır. Gümüş 406 W/mK değeri ile ısı iletim katsayısı en yüksek olan metalik malzemedir. Bu sebeple nanogümüşün aşınma bölgesinde soğutma ajanı olarak kullanılabilmesi ve aşınmaya bağlı oluşacak deformasyonları minimize edebileceği düşünülmüştür. Ayrıca aşınma deneylerinde yük ve hız parametreleri de incelenerek, kesme sıvıları ile yük ve hız parametrelerinin etkileşimi analiz edilmiştir. Aşınma karakterizasyonu için deney numunelerinin yüzey topoğrafyası, SEM ve EDX sonuçları ile görsel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kesme sıvısı

içerisinde nanogümüş miktarı arttıkça aşınan malzeme miktarının azaldığı, aşınan yüzey kalitesinin arttığı, aşınma bölgesi sıcaklığının düştüğü ve aşınma bölgesindeki sürtünme katsayısının azaldığı belirlenmiştir. Nano gümüş partiküllerinin aşınma bölgesine nüfuz edebilme kabiliyetinde etilen glikolün önemli oranda etkili olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler :** Nano gümüş, Kesme sıvısı, Etilen glikol, Aşınma sıcaklığı.

**Bilim Kodu** : 914.1.090



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF NANOSILVER ADDED COLLOIDAL SUSPENSIONS**

**Şeyma KORKMAZ**

**Karabuk University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. M. Hüseyin ÇETİN**

**March 2019, 78 pages**

Use of nano particle additives for improving the performance of cooling and lubricating fluids in conditions exposed to wear bears great significance for the optimization of tribological conditions. Use of nanoparticles as colloidal suspension makes the penetration into the layer of lubricating border easier. In this study, the effect of nano silver particles suspended in different ratios in ethylene glycol solution has been investigated through the parameters of temperature change, friction coefficient, weight loss and surface roughness. The silver has the highest thermal conductivity coefficient among the metallic materials with its 406 W/mK value. Therefore, it is thought that nanosilver can be used as the cooling agent in the wear region and minimize the deformations caused by the wear. Moreover, examining the load and speed parameters in the wear experiments, the interaction of them with cutting fluids has been analysed. For the wear characterization, the layer topography of the experiment samples was examined visually with the results of SEM and EDX.

According to the results, it has been found that as the amount of the nanosilver in the cutting fluid increases, the amount of the worn material decreases, also the quality of the worn surface raises and the temperature and the friction coefficient in the wear region decrease. It was seen that the ethylene glycol has a significant effect on the penetration ability of the nano silver particles to the wear region.

**Key Word** : Nano silver, Cutting fluid, Ethylene glycohol, Wear temperature.

**Science Code** : 914.1.090





## TEŞEKKÜR

Tasarım aşamasından rapor edilmesine kadar çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini paylaşarak bana yol gösteren, sabrını ve yardımını esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN'e anlayış ve katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince bilgi, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen, deneysel çalışmalarında gerekli olan cihaz ve ekipmanları temin ederek laboratuvar imkanlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI hocama, nano gümüş koloidal sıvılarını geliştiren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nurettin ELTUĞRAL hocama ve deneysel çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Şevval DOĞAN'a, Kadir ÖZEN'e, Enes AYHAN'a, Mertcan ÖZGÜL'e ve Süleyman Furkan ÖZDEMİR'e teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her zaman destek olan değerli hocalarıma ve tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, ihtiyacım olan her an büyük bir sabır ve anlayışla destek olan sevgili abim Samet KORKMAZ'a, maddi manevi desteklerini esirgemeyen anne ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	4
BÖLÜM 3 .....	20
TRİBOLOJİ .....	20
3.1. SÜRTÜNME.....	21
3.1.1. Hareket Türüne Göre Sürtünme Çeşitleri.....	23
3.1.1.1. Statik Sürtünme.....	23
3.1.1.2. Kinetik (Kayma) Sürtünme.....	23
3.1.1.3. Yuvarlanma Sürtünmesi.....	24
3.2. Yüzeyler Arasında Yağlayıcı Bulunması Durumuna Göre Sürtünme Çeşitleri	
.....	24
3.2.1.1. Kuru Sürtünme.....	24
3.2.1.2. Yarı Sıvı Sürtünme .....	25
3.2.1.3. Sıvı Sürtünme.....	25
3.3. AŞINMA .....	27

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.3.1. Adhesiv Aşınma.....	28
3.3.2. Abrasiv Aşınma .....	28
3.3.3. Yorulma Aşınması .....	29
3.3.4. Eroziyon Aşınma .....	30
3.3.5. Korozif Aşınma .....	30
3.4. YAĞLAMA.....	31
3.4.1. Katı Yağlayıcılar.....	33
3.4.1.1. Grafit ve Molibden Disülfid .....	33
3.4.1.2. Polimerler.....	34
3.4.1.3. Metalik Yağlayıcılar .....	34
3.4.2. Sıvı Yağlayıcılar ve Viskozite .....	34
3.4.2.1. Mineral Esaslı Yağlayıcılar.....	35
3.4.2.2. Bitkisel Esaslı Yağlar.....	36
3.4.2.3. Sentetik Esaslı Yağlar .....	36
3.4.3. Yarı Katı Yağlayıcılar.....	37
3.4.3.1. Gresler .....	37
3.4.4. Katkılar .....	37
3.4.4.1. Antioksidan Film Katkıları .....	37
3.4.4.2. Aşınma Önleyici Film Katkıları.....	38
3.4.4.3. Aşırı Basınç Film Katkıları (E.P.).....	38
3.4.5. Yağlayıcı Akışkanların Çevre ve İnsan Sağlığına Etkileri .....	38
3.4.5.1. Dermatit .....	39
3.4.5.2. Cilt Kanseri .....	39
3.4.5.3. Solunum Hastalıkları .....	40
BÖLÜM 4 .....	40
NANO METALİK MALZEMELER .....	41
4.1. ALTIN NANO PARTİKÜLLER .....	42
4.2. GÜMÜŞ NANO PARTİKÜLLER.....	42

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 5 .....	43
MATERYAL VE METOT .....	44
5.1. İŞ PARÇASI VE AŞINDIRICI MALZEME .....	44
5.2. NANO AKIŞKANLARIN HAZIRLANIŞI.....	45
5.3. AŞINMA DENEYİ .....	45
5.4. İSTATİSTİKSEL ANALİZ .....	47
5.5. YÜZEY ANALİZİ .....	48
BÖLÜM 6 .....	50
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR .....	50
6.1. NANOAKIŞKANLAR VE GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİNİN KARAKTERİZASYONU .....	50
6.2. DENEYSEL SONUÇLARIN İSTATİSTİKSEL VE GÖRSEL ANALİZİ... 52	
6.3. SEM VE EDX ANALİZLERİYLE AŞINMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ .....	63
BÖLÜM 7 .....	69
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	69
KAYNAKLAR .....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	78

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 3.1. Tribosistem elemanları .....	21
Şekil 3.2. Sürtünme kuvvetinin şematik gösterimi . .....	22
Şekil 3.3. Sürtünmenin sınıflandırılması.....	22
Şekil 3.4. Statik ve kinetik sürtünme kuvvetlerinin karşılaştırması .....	23
Şekil 3.5. Yuvarlanma sürtünmesinin şematik gösterimi . .....	24
Şekil 3.6. Stribeck eğrisi . .....	26
Şekil 3.7. Aşınmaya etki eden faktörler.....	27
Şekil 3.8. Adhesiv aşınma mekanizması .....	28
Şekil 3.9. Abrasiv aşınma mekanizması . .....	29
Şekil 3.10. Yorulma aşınması mekanizması . .....	29
Şekil 3.11. Farklı erozif aşınma mekanizmaları .....	30
Şekil 3.12. Korozif aşınma mekanizması .....	31
Şekil 3.13. Tribokimyasal reaksiyon mekanizması . .....	32
Şekil 3.14. Yağlayıcıların sınıflandırılması. ....	32
Şekil 3.15. Dermatit . .....	39
Şekil 3.16. Cilt kanseri .....	40
Şekil 4.1. Nano gümüşün uygulama alanları . .....	43
Şekil 5.2. Aşınma ortamında sıcaklık ölçümü. ....	46
Şekil 5.1. Ball on plate aşınma cihazı. ....	46
Şekil 6.1. Suda dağılan Ag nanopartiküllerinin UV spektrumu. ....	50
Şekil 6.2. Hazırlanan Ag nanopartiküllerinin TEM fotoğrafı. ....	51
Şekil 6.3. EG içine dağılmış Ag nanopartikülleri. ....	51
Şekil 6.4. Aşınma hipotezi akış diyagramı.....	53
Şekil 6.5. 20 N ve 20 dev/dk deney koşulları için sıcaklık değişim grafiği.....	55
Şekil 6.6. Aşınmış yüzeylerin topoğrafta görüntüleri a. Kuru koşullar, b. Saf su koşulları, c. EG koşulları, d. EG + %4 AgNP koşulları, e. EG + %8 AgNP koşulları, f. EG + %12 AgNP koşulları. ....	62
Şekil 6.7. SEM analizinde aşınma modeli. ....	64

Şekil 6.8. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri a. Kuru koşullar, b. Saf su koşulları, c. EG koşulları, d. EG + %4 AgNP koşulları, e. EG + %8 AgNP koşulları, f. EG + %12 AgNP koşulları. .... 66

Şekil 6.9. Kuru koşullar için EDX analizi ( $C=52,93^\circ$ ,  $Na=4,55^\circ$ ,  $Mg=0,62^\circ$ ,  $Al=41,31^\circ$ ,  $Si=0,59^\circ$ ). .... 67

Şekil 6.10. Saf su koşulları için EDX analizi ( $C=2,88^\circ$ ,  $Na=3,02^\circ$ ,  $Mg=1,63^\circ$ ,  $Al=73,77^\circ$ ,  $Si=0,70^\circ$ ). .... 67

Şekil 6.11. EG+%12 AgNP koşulu için EDX analizi ( $C=12,96^\circ$ ,  $Na=40,61^\circ$ ,  $Mg=2,98^\circ$ ,  $Al=34,89^\circ$ ,  $Si=1,62^\circ$ ,  $Ag=6,93^\circ$ ). .... 68



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 5.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (%).....	44
Çizelge 5.2. 100Cr6 (AISI 52100) çeliğinin kimyasal bileşimi (%).....	44
Çizelge 5.3. Deney parametreleri.....	46
Çizelge 6.1. Deney giriş ve çıkış parametreleri .....	56
Çizelge 6.2. Sürtünme katsayısı için ANOVA tablosu .....	57
Çizelge 6.3. Sıcaklık değişimi için ANOVA tablosu.....	58
Çizelge 6.4. Ağırlık kaybı için ANOVA tablosu .....	59
Çizelge 6.5. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.....	60
Çizelge 6.6. Kesme sıvılarının performans sıralaması.....	63

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$Al_2O_3$	: alüminyum Oksit
Ag	: gümüş
Au	: altın
$AgNO_3$	: gümüş nitrat
cm	: santimetre
cSt	: santistokes
CuO	: bakır oksit
dev/dk	: dakikadaki devir sayısı
gr	: gram
pH	: asitlik derecesi
Pd	: paladyum
kg	: kilogram
m	: metre
m/dk	: metre/dakika
m/s	: metre/saniye
ml/dk	: mililitre/dakika
mm/s	: milimetre/saniye
nm	: nanometre
$\mu m$	: mikrometre
N	: newton
$MoS_2$	: molibden disülfid
$NaBH_4$	: sodyum borhidrür
NaOH	: sodyum hidroksit
rpm	: revolutions per minute
$SiO_2$	: silisyum dioksit
$TiO_2$	: titanyum dioksit



ZnO	: çinko oksit
ZrO <sub>2</sub>	: zirkonyum oksit
W/mK	: ısı iletkenlik katsayısı
°C	: santigrat derece

## **KISALTMALAR**

AgNP	: Gümüş Nano Partikül
AISI	: American Iron And Steel Institute
ASTM	: American Society For Testing and Materials
ANOVA	: Varyans Analizi
BFO	: Bakteriyel Toplama Optimizasyonu
CBLA	: Kalsiyum Borat Nano Partikülleri
CuNP	: Bakır Nano Partikül
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EDX	: Energy Dispersive X-ray (Enerji Dağılımlı X-ışını)
EG	: Etilen Glikol
FEA	: Sonlu Eleman Tabanlı Model
FESEM	: Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu
FNG	: Fonksiyonelleştirilmiş Nano Grafit
GAKO	: Gruplar Arası Kareler Ortalaması
GAKT	: Gruplar Arası Kareler Toplamı
GASD	: Gruplar Arası Serbestlik Derecesi
GİKO	: Gruplar İçi Kareler Ortalaması
GİKT	: Grup İçi Kareler Toplamı
GİSD	: Grup İçi Serbestlik Derecesi
GnKT	: Genel Kareler Toplamı
GnSD	: Genel Serbestlik Derecesi
GP	: Genel Amaçlı
MQL	: Minimum Miktar Yağlama
NFMQL	: Nano Akışkan Esaslı Minimum Miktar Yağlama
NDCF	: Nano Damlacık
OM	: Optik Mikroskop

PAO	: Polyalphaolefin
PSO	: Parçacık Sürtünme Optimizasyonu
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SDBS	: Sodyum Dodesil Benzen Sülfonat
SF	: Sıcaklık Farkı
SPB	: Yüzey Plazmon Bandı
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscopy)
UV	: Ultraviolet Visible (Ultraviyole Görünür)
XPS	: X Işını Fotoelektron Spektroskopisi
ZDDP	: Zinc Dialkyldithiophosphate



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Aşınma kavramıyla ilgili birçok tanım mevcuttur. Aşınma; katı bir yüzeyin, bu yüzeye göre izafi hareket halindeki başka bir yüzeyle (katı, sıvı, gaz) temasında, (ASTM G40) mekanik etkenler sonucu malzeme yüzeyinden parça ayrılması olarak tanımlanmaktadır (DIN 50320) [1,2]. İmalat sektöründe ve mühendislik uygulamalarında zorlu çalışma parametrelerinde (ağır yük, yüksek kayma hızı vb.) işlev gören sistemlerde aşınma miktarı maksimum seviyededir. Bu durumun sistem performansına etkisinin minimize edilebilmesi için, alaşımlandırılarak veya çeşitli ısı işlemlere tabi tutularak aşınma direnci yüksek malzemeler elde edilmeye çalışılmıştır. Fakat bu malzemelerin elde edilmesi zaman kaybına sebep olmakta ve sistem performansını ciddi oranda olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple sürtünme etkisine maruz malzemeler arasında sınır yağlama tabakası oluşumunu sağlayan kesme sıvıları geliştirilmeye çalışılmıştır.

Aşınmaya maruz endüstriyel uygulamalarda kesme sıvılarının kullanımını sürdürülebilirlik açısından önemli bir yere sahiptir. Sürdürülebilirlik kavramı, aşınmanın kesme sıvıları ile azaltılması ve boyutsal problemlerin minimize edilmesiyle endüstriyel ekipmanların kullanım ömürlerinin artırılması olarak tanımlanabilir. Yüksek kuvvetlerin olduğu uygulamalarda (frezeleme, tornalama, büyük transmasyonlar, büyük mil yatakları) aşınmayı azaltmak için kesme sıvılarının daha yüksek seviyede yağlama ve soğutma performansı göstermesi beklenir. Özellikle mekanik sistemlerde sürtünmenin etkisiyle malzemelerin temas bölgesinde meydana gelen ısı, malzemelerin yüzey ve iç yapısında deformasyona sebep olmaktadır. Bu durum, hem malzemelerin kullanım ömrünü azaltarak maliyeti artırmakta hem de sistemin verimini sınırlamaktadır. Bu nedenle kaliteli ürün ve yüksek çalışma performansı istenilen uygulamalarda ısı transferini arttırmak zorunlu hale gelmiştir.

Su veya yağ esaslı sıvılara mikron veya milim boyutunda katı partiküller (CuO, MoS<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, ZrO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) ilave edilerek kesme sıvılarının kabiliyetleri geliştirilmeye çalışılmıştır [3]. Fakat yüksek ısı oluşan sistemlerde katı partiküllerin boyutlarının büyüklüğü çalışma performansını sınırlamakta ve malzemelerin tribolojik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca çevresel açıdan olumsuz etkilere yol açması da dezavantajlarından biridir.

Son yıllarda geleneksel sıvıların dezavantajlarının minimum seviyeye indirilmesi amacıyla özellikle talaşlı imalat endüstrisi, otomotiv uygulamaları, yakıtlar, nükleer reaktörler gibi yüksek ısı transferi kabiliyeti gerektiren alanlarda nanoakışkanların (nano grafit, nano CuO, nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano MoS<sub>2</sub> vb.) kullanımı büyük önem kazanmıştır. Nano partiküllerin, soğutma ve yağlama fonksiyonu için kullanılan yağ süspansiyonları içinde koloidal olarak dağılabilmeleri tribolojik problemlerin minimize edilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Koloidal dağılım sıvı içerisindeki dalga bantlarının enerjisi sayesinde sağlanmakta [4] ve nano partiküller bu dalga enerjisiyle homojen bir şekilde solüsyon içerisine dağılabilmektedir. Nano partiküllerin boyutlarının yaklaşık 110 nm'den küçük olması partiküllerin dalga bantları enerjisiyle birlikte hareket kabiliyeti kazanmalarını sağlamaktadır. Partiküllerin nanometre boyutunda olması, sıvının çalışma bölgesine daha iyi nüfuz edebilmesini sağlamakta ve aşınma bölgesindeki transfer olan ısı miktarını arttırmaktadır.

Metalik malzemeler içerisinde ısı iletim katsayısı en yüksek olan malzemeler sırasıyla gümüş (406 W/mK), bakır (385 W/mK) ve altındır (314 W/mK). Literatür çalışmaları incelendiğinde nano gümüş (AgNP) ve nano bakır (CuNP) partiküllerinin sürtünme ortamındaki performanslarının araştırıldığı ve her iki nano partikülünde aşınma katsayısının azaltılması ve yüzey kalitesinin artırılması açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir [5–9].

Gümüş elementi ısı iletim katsayısı en yüksek olan metalik malzemedir (406 W/mK). Gümüş elementinin bu özelliği, ısı transferinin önemli olduğu uygulamalarda gümüşün bir mühendislik çözümü olarak kullanılabilirliğini düşündürmektedir. Aşınmaya maruz yüzeylerde oluşan ısının aşınma bölgesinden uzaklaştırılması,

aşınmaya bağılı olarak ortaya çıkan negatif durumların minimizasyonu açısından önemlidir. Aşınmanın boyutsal olarak sınır koşullarda gerçekleşmesi sebebiyle, gümüş metalinin aşınma bölgesinden ısı transferini arttırabilmesi ancak nano boyutlarda gümüş partiküllerinin kullanımı ile mümkündür. Nano gümüş partiküllerinin (AgNPs) hareket kabiliyeti kazanabilmesi için de yüksek akışkanlıktaki sıvı ile kolloidal süspansiyon olarak hazırlanması gerekmektedir. Bu çalışmada etilen glikol içerisinde farklı oranlarda (%4, %8, %12) nano gümüş ilave edilerek 3 farklı kolloidal süspansiyon hazırlanmıştır. Etilen glikolün sentetik bazlı alkol olması sebebiyle kesme bölgesine iyi nüfuz edebileceği düşünülmüştür. Nano gümüş partiküllerinin topaklanma davranışının engellenebilmesi için partiküllerin dış yüzeyine jelatin kaplama işlemi yapılmıştır. Nano gümüş katkılı kesme sıvılarının performansları; kuru aşınma şartları, saf su koşullarında aşınma ve sadece etilen glikol ortamında aşınma deneyleri ile kıyaslanarak incelenmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı, sıcaklık değişimi ve yüzey pürüzlülüğü verileri varyans metodu (ANOVA) ile analiz edilmiştir. Kullanılan nano partiküllerin kolloidal süspansiyon davranışları (topaklanma eğilimleri) ultraviyole ve görünür ışık (UV-Vis) absorpsiyon spektroskopisi grafikleriyle değerlendirilmiştir. Sürtünmeye maruz kalan yüzeylerde meydana gelen aşınma mekanizmaları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ayrıca aşınma karakteristiğinin belirlenebilmesi için elemental analiz yapılmış (Energy Dispersive X-Ray Analysis - EDX) ve optik profilometre kullanılarak malzemelerin yüzey pürüzlülüğü üç boyutlu olarak grafikleştirilmiştir. Bu sayede farklı ortam koşullarının (kuru, saf su, EG, EG + %4, EG + %8, EG + %12) yüzey morfolojisine etkisi incelenmiştir.

İkinci bölümde literatür çalışmaları, üçüncü bölümde triboloji, aşınma mekanizmaları ve yağlamanın tribolojik performansa etkisi, dördüncü bölümde nano metalik malzemeler, beşinci bölümde nanoakışkanların hazırlanması ve deneysel çalışma, altıncı bölümde deney sonuçları ve tartışma, yedinci bölümde sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kesme sıvıları, sürtünmeye maruz temas bölgelerinde sağladığı soğutucu ve yağlayıcı etki sayesinde malzemelerin aşınma direncini ciddi oranda arttırmaktadır. Malzemelerin tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi ve mekanik sistemlerin çalışma performansının artırılmasına etkisi açısından imalat sektöründe en önemli parametrelerden biri haline gelen kesme sıvılarının performansı büyük önem kazanmaktadır. Geçmişten günümüze kadar kullanılan geleneksel kesme sıvıları, özellikle yüksek ısı oluşumunun meydana geldiği endüstriyel uygulamalarda yeterli soğutma ve yağlama özelliği gösterememektedir. Geleneksel kesme sıvılarının istenilen performansı sağlayamaması, ısıl iletkenliği yüksek nano boyutta partiküllerin takviye edilmesiyle elde edilen nano akışkanların kullanımını gerekli hale getirmiştir. Nano boyuttaki partiküllerin nüfuziyet kabiliyetinin fazla olması, aşınma bölgesinde meydana gelen ısının kesme sıvısına daha kolay transfer edilebilmesine imkan sağlamaktadır. Bu durum, nano akışkanların geliştirilmesine yönelik çalışmaların hızla artmasına sebep olmuştur. Nano partikül katkılı yağlayıcıların performans ölçümleri için genellikle aşınma deneyleri ve talaşlı imalat prosesleri tercih edilmektedir. Her iki proseste oluşan yüksek sıcaklık ve yüksek sürtünme katsayısı değerleri diğer endüstriyel uygulamalar için referans teşkil edebilecek yeterliliktedir. Literatürde, nanoakışkanların mekanik sistemlerin çalışma performansına ve malzemelerin tribolojik özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır [10].

Dai vd. [10], nanopartikül katkılı yağlayıcıların tribolojik performans üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, nanopartiküllerin fiziksel (partikül boyutu), kimyasal (kimyasal bileşim) ve morfolojik özelliklerinin malzemelerin sürtünme ve aşınma özellikleri üzerine etkileri, literatürdeki çalışmalar arasında karşılaştırma yapılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, nanopartikül boyutunun hem sürtünme hem de aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Nanopartiküllerin kimyasal bileşimi sürtünme faktörü üzerinde, morfolojik özellikleri ise aşınma direnci üzerinde dikkate değer oranda etki sağlayan parametreler olarak belirlenmiştir.

Xie vd.[11], SiO<sub>2</sub> ve MoS<sub>2</sub> nanopartiküllerinin AZ31 magnezyum alaşımının tribolojik özelliklerine etkisini, üç farklı yağlayıcı koşullarında yapılan aşınma deneyleri ve yüzey morfolojisi incelemeleriyle araştırmışlardır. Aşınma deneyleriyle nanopartiküllerin sürtünme katsayısı, yük taşıma kapasitesi, yağlama filmi stabilitesi parametrelerine etkisi incelenmiş olup deney sonrasında alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve X ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ile aşınmış magnezyum alaşımının yüzey görüntüleri incelenerek aşınma karakterizasyonları analiz edilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda yüksek temas basınçlarında MoS<sub>2</sub> nanopartiküllerinin SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerine kıyasla yük taşıma kapasitesi parametresi üzerinde daha belirgin bir pozitif etki sağladığı görülmüştür. Baz yağı (motor yağı) ve SiO<sub>2</sub> nano yağlayıcı kullanıldığında ise baz yağı filminin 230, SiO<sub>2</sub> nano yağlayıcı filminin ise 2600 kayma hareketinden sonra etkisiz hale geldiği gözlenmiştir. MoS<sub>2</sub> nano yağlayıcı filmi kullanıldığında SiO<sub>2</sub> nano yağlayıcı filmine kıyasla deney başlangıcında sürtünme katsayısı değerlerinin daha yüksek değerlere ulaştığı fakat deneyin sonraki aşamalarında giderek azaldığı görülmüştür. Yüzey morfolojisi analizinde ise MoS<sub>2</sub> nano yağlayıcının en iyi tribolojik özellikleri sağladığı belirlenmiştir. Aşınma deneyleri ve yüzey morfolojisi incelemeleri birlikte değerlendirildiğinde ise tribolojik performansın iyileştirilmesinde optimum özelliklerin ağırlıkça %1 MoS<sub>2</sub> ve %0,7 SiO<sub>2</sub> konsantrasyonlarında sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Luo vd. [12], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikül katkılı yağlayıcıların tribolojik özelliklerini aşınma deneyleriyle araştırmışlardır. Aşınma deneyleri; dört bilyalı ve baskı halkası tribometreleri olmak üzere iki farklı aşınma cihazında, farklı konsantrasyonlarda hazırlanan nano yağlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, bu yağlayıcıların sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapına etkisi incelenmiştir. Deney sonucunda sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapı değerlerinin %0,1 konsantrasyonundaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano yağlayıcı ortamında en küçük değerlere ulaştığı görülmüştür.

Najiha vd. [13], AA6061-T6 alüminyum alaşımının frezelenmesi işleminde minimum miktar yağlama (MQL) koşullarında su bazlı TiO<sub>2</sub> nanoakışkanlarının takım aşınmasına etkisini araştırmışlardır. Deneyler üç farklı kesme hızında (5200 rpm, 5400 rpm, 5600 rpm), iki farklı MQL akış hızında ( 0,65 ml/dk ve 1 ml/dk) ve üç farklı konsantrasyonda hazırlanmış TiO<sub>2</sub> nanoakışkan (%0,5, %2,5, %4,5) koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınmış takım yüzeylerindeki aşınma mekanizmalarını yorumlayabilmek için SEM ve EDX görüntüleri analiz edilmiştir. Deney sonrası yüzey görüntüleri incelendiğinde, aşınmış yüzeylerde abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmaları oluşumu gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, %0,5 konsantrasyonunda nanopartikül içeren nanoakışkanın yeterli yağlama etkisi sağlayamaması sebebiyle talaş yapışması olayı meydana gelmiş, %4,5 konsantrasyonunda nanopartikül içeren nanoakışkanın yüksek yoğunlukta ve sabit basınçta pompalama sebebiyle beklenen etkili yağlamayı sağlayamadığı görülmüştür. Takım aşınmasının minimizasyonu açısından optimum nanoakışkan konsantrasyonunun %2,5 olduğu belirlenmiştir.

Ma vd. [14], ZrO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı akışkanların aşınma ve sürtünme faktörlerine etkisini dört bilyalı test cihazı ve baskı halkası test cihazı ile yaptıkları aşınma deneyleriyle incelemişlerdir. Deneyler farklı konsantrasyonlardaki ZrO<sub>2</sub> nano akışkan ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ve aşınmayı azaltmada ağırlıkça %0,5 konsantrasyonundaki nanoakışkan optimum yağlayıcı olarak belirlenmiştir. Dört bilyalı testte, %0,5 konsantrasyonundaki nanoakışkanın baz yağına kıyasla sürtünme katsayısını %5,36, aşınma izini çapını %3,98 oranında azalttığı görülmüştür. Baskı halkası test cihazının kullanıldığı deneyde ise sürtünme katsayısının %27,34 oranında azaldığı ve aşınmış halkadaki ağırlık kaybının 0,0163 gr olduğu sonucuna varılmıştır.

Ajithkumar vd.[15], nano yağlayıcıların takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, sürtünme bölgesindeki ısı artışını ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini, bunun yanı sıra nano parçacıkların türü, boyutu ve konsantrasyonunu literatürdeki çalışmalarını detaylı bir şekilde inceleyerek değerlendirmişlerdir. Ayrıca literatürde bulunan farklı nano yağlayıcıların kullanımı ve nano parçacıkların bir imalat uygulamasındaki etkisini geliştirmek için etkili yöntemlerin tanımlanması hakkında kapsamlı inceleme yapılmıştır. Yapılan literatür incelemesi sonucunda; daha fazla nano partikül



konsantrasyonuna sahip nano yağlama uygulamasının kuru ve diğer geleneksel yağlama yöntemleri ile karşılaştırıldığında yüzey kalitesini arttırdığı, takım aşınmasını, sürtünme bölgesindeki ısı artışını, kesme kuvvetini ve güç gereksinimini azalttığı tespit edilmiştir. Daha iyi ısı transfer verimliliği, yüzey kalitesi, takım ömrü ve daha iyi işlenebilirlik için nano yağlama maddesinin konsantrasyonu, türü, akış miktarı gibi diğer imalat koşullarının da önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Amrita vd.[16], metal kesme işleminde emülsiyonlaştırıcı yağ bazlı nano kesme sıvılarının uygulanması üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada MQL uygulamasında nano-grafit, nano borik asit ve nano molibden disülfür partikülleri kullanılarak nano kesme sıvıları hazırlanmıştır. Hazırlanan kesme sıvıları, sürekli kesme koşulları altında tornalama işlemi gerçekleştirilirken dakikada 10 ml akış hızında uygulanmıştır. Nano kesme sıvılarının takım aşınması, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri analiz edilerek stabilite değerlendirmesi yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda; nano MoS<sub>2</sub> ve fonksiyonelleştirilmiş nano grafit (FNG) yüzey aktif madde olan sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS) eklenmesi stabiliteyi olumlu etkilemiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri açısından nano MoS<sub>2</sub> sıvısının, kesme sıcaklığı açısından ise nano borik asit sıvısının en iyi özellikleri sağlayan sıvı olduğu görülmüştür.

Battez vd. [17], sıvı yağlayıcıların CuO, ZrO<sub>2</sub>, ZnO nanopartikülleriyle oluşturulan süspansiyonlarının çeliklerin tribolojik özelliklerine etkisini aşınma deneyi ve yüzey morfolojisini inceleyerek araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak polyalfolefin (PAO 6) baz yağına ağırlıkça % 0,5, % 1 ve % 2 oranlarında CuO, ZrO<sub>2</sub>, ZnO nanopartikülleri ilave edilerek nano yağlayıcılar elde edilmiştir. Elde edilen nano yağlayıcıların tribolojik davranışını incelemek için block-on-ring konfigürasyonunda bir tribometre ile aşınma deneyi yapılmıştır. Blok-halka konfigürasyonunda blok malzemesi olarak AISI 1045 çeliği, halka malzemesi olarak da AISI D3 çeliği kullanılmıştır. Deneyde giriş parametreleri olarak yük 165 N, kayma hızı 2 m/s ve toplam mesafe 3066 m belirlenmiş, çıkış parametresi olarak sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı verileri elde edilmiştir. Yüzey morfolojisini incelemek için ise aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri analiz edilmiştir. Aşınma deneyi sonuçları değerlendirildiğinde bütün nanoyağlayıcıların PAO 6 baz yağına kıyasla daha iyi sürtünme ve aşınma davranışı

sergilediği görülmüştür. Nanoyağlayıcılar kendi aralarında karşılaştırıldığında %0,5 ZrO<sub>2</sub>, ZnO konsantrasyonuna sahip sıvıların en iyi tribolojik özellikleri sağladığı, bununla birlikte %2 CuO konsantrasyonuna sahip nanoyağlayıcının en yüksek sürtünme katsayısına ve en düşük aşınmaya sebep olduğu sonucuna varılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde; baz yağın içerisindeki CuO konsantrasyonu arttıkça tribolojik özelliklerde iyileşme meydana gelirken, baz yağın içerisindeki ZrO<sub>2</sub>, ZnO konsantrasyonları arttıkça abrasiv aşınmanın arttığı yani tribolojik özelliklerin olumsuz etkilendiği görülmüştür.

Chan vd. [18], hassas tornalama işleminde nano damlacıklar (NDCF) ile zenginleştirilmiş kesme sıvısının işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır. NDCF'nin fiziksel özelliği tezgah testleri ile değerlendirilmiş olup nano damlacıkların varlığının yayılma oranını doğru orantılı olarak etkilediği görülmüştür. Deneysel çalışmalardan, seyreltilmiş genel amaçlı (GP) kesme sıvılarına göre daha yüksek temas açısına sahip olan NDCF'nin daha iyi yağlama etkisi sağladığı buna bağlı olarak da yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin GP'ye göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Çalışmada nano kesme sıvıları ve geleneksel kesme sıvıları arasındaki kıyaslama sadece yüzey pürüzlülüğü parametresi incelenerek araştırılmıştır. Fakat tornalama işleminde kesme hızı, ilerleme hızı gibi parametreler de imalat performansını etkilemekte olup bu parametreler çalışmada dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla çalışma, nano kesme sıvılarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi ile ilgili yeterli bilgi vermemektedir.

Rasul vd. [19], nano kesme sıvılarının imalat uygulamalarındaki yeri ve önemini kapsamlı bir literatür analizi yaparak incelemişlerdir. Çalışmada ilk olarak nano kesme sıvıları, nano partiküllerin metalik olup olmamasına göre sınıflandırılmış daha sonra bu sıvıların iş parçasına ve kesme takımına etkileri kuru ortam ve geleneksel sıvılarla yapılan imalat uygulamalarıyla kıyaslanarak araştırılmıştır. Sonuçlar, nano akışkanların imalat uygulamalarında soğutucu ve yağlayıcı olarak kullanımının; takım sıcaklığı, takım aşınması, yüzey kalitesi, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve çevresel faktörler açısından avantajlı olduğunu göstermektedir. Fakat nano kesme sıvılarının maliyetinin yüksek olması, bu sıvıların üretimi ve uygulanması için belirli cihazlara ihtiyaç duyulması, uygulama esnasında gerekli hassasiyet gösterilmediğinde

kümelenme ve tortu tabakalarının oluşması gibi faktörler nano kesme sıvılarının kullanımını sınırlandıran etkenler olarak belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, nano kesme sıvısı temel sıvıya kıyasla daha iyi tribolojik özellikler sergilemektedir.

Chetan vd. [6], tornalama işleminde alümina ( $Al_2O_3$ ) ve gümüş (Ag) nano kesme sıvılarının kesme parametrelerine, kesici takıma ve iş parçasına etkisini araştırmışlardır. Nano kesme sıvılarından elde edilen sonuçlar ile biyo-bozunabilir emülsiyon ve kuru kesme yöntemiyle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, düşük yüzey geriliminin sonucu olarak  $Al_2O_3$ 'lü nanoakışkanlarda düşük temas açılı ve küçük boyutlu damlacıklar meydana gelmiştir.  $Al_2O_3$  nanoakışkanı, SOIW ve Ag nanoakışkanları ile karşılaştırıldığında serbest yüzey aşınmasını ve takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığı aynı zamanda  $Al_2O_3$  nanoakışkanı kullanımı esnasında en küçük kesme kuvveti değerine ulaşıldığı görülmüştür. Ayrıca, SOIW ile talaşlı imalat sırasında çukur oluşumu, yanma ve adhezyon gözlenen baskın yüzey aşınma mekanizmaları olmuştur. Gümüş nano akışkanının, düşük akış hızı (debi) ve düşük konsantrasyon koşullarında yüzeyde talaş yapışmasına sebep olduğu fakat yüksek akış hızında talaş yapışması durumunu azalttığı gözlenmiştir. Genel bir karşılaştırma yapıldığında ise, kuru ve MQL yöntemleriyle yapılan talaşlı imalat sırasında talaş alt yüzeyinde ciddi sürtünme izlerinin olduğu gözlenmiştir. Kuru talaşlı imalat ile karşılaştırıldığında nano akışkanların talaş kalınlığını önemli ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır.

Wu vd. [9], nanopartikül katkılı yağlayıcıların tribolojik özelliklerini motor yağı ve bir baz yağı kullanarak uyguladıkları sürtünme ve aşınma deneyleriyle analiz etmişlerdir. Çalışmada ilk olarak API- SF motor yağı ve baz yağına %10 oranında CuO,  $TiO_2$ , nano-elmas nanopartikülleri ilave edilerek nanoyağlayıcılar elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen nanoyağlayıcılar kullanılarak doğrusal eksenli tribometre cihazı ile sürtünme ve aşınma deneyleri uygulanmıştır. Sürtünme deneyinde krom kaplı demir bir plaka 200 N yük altında 120 mm/s hız koşulları altında test edilmiştir. Aşınma deneyinde ise aşındırıcı malzeme 6 mm çapında krom çelik bilye, aşınan malzeme FC25 gri dökme demir bir plaka kullanılmıştır. Deneyler, API-SF motor yağı için 100 N yük ve baz yağı için 25 N yük altında, ortalama 30 mm/s kayma hızında, 2 saatlik

süre boyunca 40 °C ve 160 °C arasında değişen bir sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Aşınan yüzeylerin aşınma mekanizmaları hakkında bilgi edinebilmek için ise TEM, OM, SEM ve EDX kullanılmıştır. Sürtünme ve aşınma deneyleri sonunda, nanopartikül katkılı ve katkısız yağlayıcıların sıcaklık - sürtünme katsayısı ve sıcaklık-temas direnci ilişkisi incelenerek nanopartiküllerin tribolojik özelliklere etkisi analiz edilmiştir. Analiz verileri incelendiğinde, CuO takviyeli SF ve baz yağlarının, nanopartikül takviyesiz yağlara göre sürtünme katsayısını %18,4 ve %5,8 oranında ve aşınma izi derinliğini sırasıyla %16,7 ve %78,8 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır. Bütün yağlayıcılar değerlendirildiğinde ise nanopartikül takviyeli yağların takviyesiz yağlara oranla daha iyi tribolojik özellikler gösterdiği, özellikle CuO nanopartikül takviyesinin kayda değer oranda etkisinin olduğu gözlenmiştir.

Gara ve Zou [20], yağ bazlı ZnO nanoakışkanlarının sürtünme ve aşınma karakteristiklerini ball on disk tribometre cihazı ile yapılan aşınma deneyleriyle incelemiştir. Çalışmada ilk olarak parafinik mineral yağa ZnO nanopartikülü ilave edilerek nanoakışkan hazırlanmış ve nanopartiküllerin homojen olarak dağılabilmesi için oleik asit kullanılmıştır. Daha sonra aşınma deneyleriyle yüzey aktif madde, partikül konsantrasyonu, uygulanan yük, kayma hızı ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin, nanoakışkanların sürtünme ve aşınma performansına etkileri analiz edilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, sürtünmeyi azaltmada en iyi performansı %2 konsantrasyonundaki ZnO nanoakışkanının sağladığı görülmüştür. Düşük hız, yük ve pürüzlülük değerlerinde tribolojik özelliklerin iyileştirilmesinde olumlu etki sağladığı fakat hız, yük ve pürüzlülük değerleri arttığında baz yağa kıyasla daha kötü sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca yüzey aktif madde olarak oleik asidin kullanılması sürtünmeyi azaltıcı etki göstermiş ve nanopartiküllerin homojen olarak dağılmasını ve stabilitesini sağlamıştır.

Amrita vd. [21], talaşlı imalat sürecinde nano grafit esaslı kesme sıvısının performansını yağlama özelliği açısından değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirme, grafit esaslı yeni bir nano kesme sıvısı hazırlanıp, bu sıvının minimum miktarda yağlama (MQL) şartlarında AISI 1040 çeliğinin tornalanması işleminde iş parçasına ve kesici takımın tribolojik özelliklerine etkisinin incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan grafit esaslı nano kesme sıvısı; kuru ortam, taşkın soğutma ortamı ve

geleneksel kesme sıvısı ortamlarında yapılan uygulamalarla karşılaştırılmıştır. Bu ortam şartlarında kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve talaş morfolojisi faktörlerinin değişimini gösteren grafiklerden elde edilen sayısal veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, nano grafit esaslı kesme sıvısıyla yapılan talaşlı imalat uygulamasının diğer kesme şartlarında yapılan imalat uygulamalarına nazaran daha iyi yağlama özelliklerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, grafitin lamelli yapıya sahip olmasından dolayı karbon düzlemlerinin birbiri üzerinde kolayca kaymasını sağlayabilmesi ve buna bağlı olarak temas bölgesine daha iyi nüfuz edebilmesiyle açıklanmıştır. Çalışma istatistiksel olarak değerlendirildiğinde ise; MQL şartlarında grafit esaslı kesme sıvısının, taşkın soğutma şartlarında geleneksel kesme sıvısı uygulamasına kıyasla kesme kuvvetlerini (%54), kesme sıcaklığını (%25), takım aşınmasını (%71), yüzey pürüzlülüğünü (%30) oranında azalttığı ve talaş morfolojisinde iyileşme sağladığı görülmektedir. Ayrıca, MQL şartlarında grafit esaslı kesme sıvısının, MQL şartlarında geleneksel kesme sıvısı uygulamasına kıyasla kesme kuvvetlerini (%50), kesme sıcaklığını (%20), takım aşınmasını (%37), yüzey pürüzlülüğünü (%28) oranında azalttığı ve talaş morfolojisinde iyileşme sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir.

Gupta vd. [22], nano akışkan esaslı minimum miktar yağlama (NFMQL) ortam koşullarında titanyum alaşımlı bir çubuğun tornalanması işleminde kesme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışma için alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), molibden disülfid ( $MoS_2$ ) ve grafit olmak üzere üç farklı nanoparçacık kullanılmıştır. Giriş parametresi olarak kesme hızı, ilerleme hızı ve yaklaşma açısı kullanılmış olup çıkıp parametresi olarak ise giriş parametrelerinin kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Parametrik optimizasyon, parçacık sürtünme optimizasyonu (PSO) ve bakteriyel toplama optimizasyonu (BFO) olmak üzere iki farklı evrimsel optimizasyon metoduyla gerçekleştirilmiştir. Bu metotlardan elde edilen sonuçlar analiz edilip geleneksel işlenebilirlik fonksiyonuyla yaklaşım tekniği (ANOVA) kullanılarak karşılaştırılmıştır. İç yapıyı analiz edebilmek için mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda; PSO ve BFO tekniklerinin geleneksel işlenebilirlik fonksiyonu yaklaşımına kıyasla titanyum alaşımının optimum işleme parametrelerini belirlemede

daha etkili olduğu görülmüştür. NFMQL koşulları altında grafit esaslı nanoakışkanın kullanılması esnasında düşük kesme hızı (215 m/dk), daha düşük ilerleme hızı (0,10 mm/dev), yüksek yaklaşma açısı (83°) giriş parametrelerinin kullanılması kesme kuvvetlerini, takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme sıcaklığını en aza indirmek için belirlenmiş optimum şartlardır. ANOVA sonuçları incelendiğinde, kesme hızı (%40,20), ilerleme hızı (%36,5) ve soğutma koşulunun (%20,13) istatistiksel olarak anlamlı olduğu, yaklaşma açısının ise istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Pertürbasyon analizi sonucunda; takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin kesme ve ilerleme hızının artmasına bağlı olarak arttığı, kesme sıvısındaki değişim ile büyük oranda azaldığı görülmüştür. Yaklaşma açısının etkisinin çok az olduğu sonucuna varılmıştır. Pertürbasyon analizinden elde edilen sonuçlar ile ANOVA sonuçları uyumluluk göstermektedir. Mikroyapı incelemesi sonucunda, grafit esaslı nanoakışkanın diğer iki nano akışkana kıyasla daha ince laminar yapı meydana getirdiği gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak, grafitin ısı taşıma kapasitesinin diğer iki nano akışkana göre daha fazla olması buna bağlı olarak da daha az mikroyapısal değişikliklerin gözlenmesi öngörülmüştür. Laminar yapının ince olması kesme sıcaklığını minimum seviyeye indirmiştir. Dolayısıyla grafit esaslı nano akışkanların kullanımında daha küçük kesme kuvveti ve daha az takım aşınması meydana gelmektedir.

Huang vd. [23] yüzeyi değiştirilmiş kalsiyum borat nanopartikül katkılı yağlayıcıların tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada ilk olarak laurik asit ile modifiye edilmiş kalsiyum borat nanopartikülleri (CBLA) hazırlanmıştır. Tribolojik özelliklerinin değerlendirilebilmesi için ise dört bilyalı tribometre cihazı kullanılarak aşınma deneyi yapılarak sonuçlar geleneksel katkı maddesi (T202) takviyeli akışkan ile karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda T202'nin yük taşıma kapasitesinin CBLA'dan daha iyi olduğu görülmüştür. Düşük konsantrasyondaki CBLA'nın düşük yük koşulları altında T202'den daha iyi sürtünme azaltma performansı sergilediği gözlenmiştir. Ayrıca deney esnasında CBLA'nın aşınma yüzeyinde biriktiği ve tribokimyasal ürün üreterek aşınma direncini sağlayan film oluşturduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, CBLA'nın geleneksel katkı maddelerine alternatif bir katkı maddesi olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Lee vd. [24], grafit nano yağlayıcıların tribolojik özellikler üzerine etkisini deneysel çalışmalar ve yüzey analizleri ile incelemişlerdir. Çalışmada baz yağlayıcı olarak 40 °C’de 220 cSt kinematik viskoziteye sahip endüstriyel dişli yağı kullanılmıştır. Dişli yağına hacimce % 0,1 ve % 0,5 oranlarında 55 nm boyutundaki nanografit partikülleri ve ağırlıkça %30 oranında seyreltici sıvı ilave edilerek nanoakışkan yağlayıcılar üretilmiştir. Nanoyağlayıcıların fiziksel özelliklerini 40 °C ve 100 °C sıcaklık aralığında kinematik viskozite değişimini inceleyerek analiz etmişlerdir. Yağlayıcı akışkanların sürtünme katsayısı üzerine etkisini incelemek için gri dökme demirden yapılmış plakalar kullanılarak disk-on-disk tribometre test cihazında aşınma deneyi uygulanmıştır. Deneyler 35 °C ortam sıcaklığında 10 dakikalık süre boyunca 500 rpm dönme hızında 100 N kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında sürtünmenin etkisiyle sıcaklık 40 °C’ye ulaşmış ve 1000 rpm sabit dönme hızında 500 N ile 3000 N arasında değişken yükler uygulanmıştır. Sürtünme yüzeylerinin morfolojisini incelemek için ise atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak plakalar üzerindeki aşınan bölgelerin mikroskopik görüntüleri detaylı bir şekilde incelenmiş, ayrıca yüzey ölçüm cihazı kullanılarak aşınmaya maruz kalan yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Nanoyağlayıcıların sıcaklık-kinematik viskozite ilişkisi değerlendirildiğinde 60 °C’nin altındaki sıcaklıklarda nanoyağlayıcıların kinematik viskozitesinin ham yağlayıcıya oranla %4 daha düşük olduğu, sıcaklık 80 °C’ye yaklaştığında ise bu farkın %0,5’e kadar düştüğü gözlenmektedir. Bu durum sıcaklık arttıkça ham yağlayıcı ve nanoyağlayıcının fiziksel olarak benzer özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Aşınma deneylerinden elde edilen veriler analiz edildiğinde, uygulanan bütün kuvvet değerlerinde nanoyağlayıcı maddenin sürtünme katsayısını azalttığı, 3000 N kuvvet değerinde nanoyağlayıcının en iyi sürtünme katsayısı değerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca nanoyağlayıcının yağlanmış yüzeyin sıcaklığına etkisinin incelenmesi amacıyla sabit plaka üzerine termokupl yerleştirilmiştir. Ham yağlama maddesi ve nanoyağlayıcı madde kullanımında en yüksek sıcaklıklar sırasıyla 116 °C ve 60 °C değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar dikkate alınarak, yağlayıcı içerisindeki nanografit katkı oranı artırıldığında sürtünme katsayısının ve yağlanma yüzeyi sıcaklığının önemli ölçüde azaldığı sonucuna varılmaktadır. Nanoyağlayıcının metal temasını azaltması sonucu sürtünme katsayısı ve sıcaklıkta düşüş gözlemlendiği öngörülmektedir. Yüzey morfolojisi incelemelerinden

elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, sabit plakaların yüzey pürüzlülük değerleri ham yağlayıcı, %0,1 katkılı nanoyağlayıcı, %0,5 katkılı nanoyağlayıcı kullanıldığında sırasıyla 0,177  $\mu\text{m}$ , 0,132  $\mu\text{m}$  ve 0,109  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Deneyle önce ve sonra elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde, ham yağlayıcı kullanıldığında deney öncesinde plakada mevcut olan çizik ve oyukların az miktarda azaldığı fakat anlamlı bir etkisinin olmadığı, bunun yanı sıra nanoyağlayıcı kullanıldığında bu azalmanın dikkate değer ölçüde olduğu görülmüştür. AFM ile elde edilen yüzey topoğrafyası görüntüleri analiz edildiğinde ise ham yağlayıcı kullanıldığında yüzey pürüzlülüğünün nanoyağlayıcılara kıyasla daha fazla olması sebebiyle yüzey topoğrafyasında daha yüksek ve tekrarlı tepeliklerin meydana geldiği görülmektedir. Çalışmadan elde edilen tüm veriler genel olarak değerlendirildiğinde, nanoyağlayıcıların hem metal temasını azaltması hem de ısı transferini artırması sebebiyle malzemenin tribolojik özelliklerine olumlu etki sağladığı görülmektedir.

López vd.[25], yüzey modifiyeli Pd ve Au nanopartiküllerinin aşınma üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada baz yağı olarak tetrabutylammoniumacetate (TBA) ve parafin kullanılarak ağırlıkça %5 konsantrasyonunda Pd ve Au dispersiyonları hazırlanmıştır. Dispersiyonların tribolojik özellikleri ball on disk tribometre cihazıyla iki ayrı yük altında (7 N ve 15 N) aşınma deneyleriyle incelenmiştir. Deney sonucunda nanopartikül katkılı akışkanların sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azaltarak tribolojik özellikleri iyileştirdiği gözlenmiştir. Ayrıca aşınmış yüzeylerdeki aşınma karakterizasyonunun belirlenmesi için deney sonrasında yüzeylerin SEM görüntüleri incelenmiştir. SEM görüntülerine göre nanopartikül katkılı akışkanların deformasyonu minimize ederek yüzey kalitesini arttırdığı görülmüştür. Elde edilen SEM görüntüleri ve deney sonuçları uyumluluk göstermektedir.

Mao vd. [26], taşlama işleminde minimum miktar yağlama (MQL) yönteminde kullanılan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{MoS}_2$  nanoakışkanlarının tribolojik özelliklerini pin-on disk aşınma deneyi sonuçları ve yüzey görüntülerini analiz ederek incelemişlerdir. Deney sonucunda nanoakışkanların baz yağla kıyasla tribolojik özelliklerde ciddi oranda iyileşme sağladığı gözlenmiştir. Özellikle  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoakışkanının saf deiyonize suya kıyasla sürtünme katsayısını ve ağırlık kaybını sırasıyla %34,2 ve %43,4 oranında azalttığı görülmüştür. Ayrıca yüzey morfolojisinin analiz edilebilmesi için deney



sonrasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) elde edilen yüzey görüntüleri incelenmiştir. Kuru sürtünme koşullarında yüzeyde parça kopmaları ve çizikler meydana gelmiş ve yüzey ciddi oranda deforme olmuştur. Nanopartikül katkılı akışkanların kullanıldığı sürtünmeye maruz yüzeylerde ise deformasyon miktarının kayda değer oranda azaldığı ve bu sayede yüzey kalitesinin arttırıldığı görülmüştür.

Khandekar vd. [27],  $Al_2O_3$  nanopartikül katkılı kesme sıvılarının metal kesme performansı üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada geleneksel kesme sıvısına hacimce %1 oranında  $Al_2O_3$  nanopartikülleri takviye edilmiştir. Elde edilen nano akışkanın takım aşınması, kesme kuvveti, iş parçasının yüzey pürüzlülüğü, talaş kalınlığı parametreleri üzerine etkisi kuru kesme ve geleneksel kesme sıvılarının etkileriyle karşılaştırılarak incelenmiştir. Nano kesme sıvıları yapılan işlemde kesme kuvvetinde kuru kesme ve geleneksel kesme sıvılarıyla yapılan işleme kıyasla sırasıyla %50 ve %30 oranında azalma olduğu görülmüştür. Nano kesme sıvılarının iş parçası yüzeyi üzerindeki tribolojik performansı incelendiğinde ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinde kuru kesme ve geleneksel kesme sıvılarıyla yapılan işleme kıyasla sırasıyla %54,5 ve %28,5 oranında azalma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca nano kesme sıvısı kullanımıyla krater ve serbest yüzey aşınmasının azaldığı görülmüş ve bu durum sıvının gelişmiş termal özellikleri ile açıklanmıştır.

Peng vd. [28], oleik asit (OA) kullanılarak yüzey modifikasyon yöntemiyle sıvı parafin içerisindeki alüminyum nanopartiküllerinin oluşturduğu dispersiyonun tribolojik performansını araştırmışlardır. Alüminyum nanopartiküllerinin sıvı parafin içerisindeki dispersiyon stabilitesi Taguchi metoduna uygun spektrofotometri ile ölçülmüş ve tribolojik performansı ball on ring tipi aşınma cihazı ile analiz edilmiştir. Spektrofotometri ölçümüne göre alüminyum partiküllerinin sıvı parafin içerisinde iyi bir dağılım ve stabilite performansı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde ise alüminyum nanopartikül katkılı nano akışkanın yük taşıma kapasitesi, aşınma direnci ve sürtünmeyi azaltmada saf sıvı parafine kıyasla daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Sürtünmeyi minimize eden optimum konsantrasyonun %0,5 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca alüminyum nanopartikül katkılı akışkanın yük taşıma kapasitesinin yanı sıra aşınma bölgesinde sürtünmeyi azaltan yağlama filmi oluşturabildiği de görülmüştür.

Revuru vd. [29], minimum miktar yağlama (MQL) yönteminde nano kesme sıvılarının performansını geliştirdikleri sonlu eleman modeliyle incelemişlerdir. Çalışmada borik asit ve molibden disülfid katı yağlayıcıları kullanılarak oluşturulan mikro ve nano akışkanlar, AISI 1040 çeliğinin farklı kesme hızlarında tornalanması işleminde uygulanmıştır. Bu uygulama esnasında mikro ve nano akışkanların performanslarının karşılaştırılmasına ek olarak kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı gibi farklı imalat parametreleri de değerlendirilmiştir. Bu parametreleri tahmin edebilmek için sonlu eleman tabanlı model (FEA) geliştirilip deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda; nano akışkanların mikro akışkanlara göre daha iyi performans sergiledikleri görülmüştür. Kuru kesme ile kıyaslandığında nano MoS<sub>2</sub>'in kesme kuvvetlerini %82 oranında, kesme sıcaklığını yaklaşık %37 oranında, yüzey pürüzlülüğünü yaklaşık %46 oranında azalttığı; mikro akışkanlar ile kıyaslandığında ise kesme kuvvetlerini yaklaşık %40 oranında, kesme sıcaklığını yaklaşık %15 oranında, yüzey pürüzlülüğünü yaklaşık %23 oranında azalttığı görülmüştür. Sonlu eleman modelinden elde edilen bu sayısal sonuçlarla deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar uyumluluk göstermektedir. Geliştirilen FEA modeliyle deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları % 8'den daha az bir hata oranı ile tahmin edilebilmektedir. Bu durum modelin farklı koşullarda deneysel çalışma yapılmadan da parametre değerlerini makul doğrulukta tahmin edebileceğini göstermektedir.

Sharma vd. [30], talaşlı imalat uygulamalarında (frezeleme, delme, taşlama, tornalama) nano akışkan kullanımının etkisini literatür çalışmalarını detaylı şekilde inceleyerek araştırmışlardır. Çalışmada farklı nano akışkanların imalat performansı üzerine etkisinin yanı sıra imalat performansını etkileyen diğer parametreler de (nano parçacık büyüklüğü, baz akışkan içindeki nano parçacık konsantrasyonu, yağlama modu vb.) belirlenmiştir. Literatür çalışmalarının analizinden nano akışkan kullanımının, kuru kesme ve geleneksel kesme sıvılarına kıyasla takım aşınmasını, kesme kuvvetini, güç tüketimini ve sürtünme katsayısını azalttığı ve yüzey kalitesini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Shookohi vd. [31], talaşlı imalat uygulamalarında nano akışkanların etkisini literatürdeki çalışmaları detaylı bir şekilde inceleyerek araştırmışlardır. Çalışmada

nano akışkanların talaşlı imalat yöntemleri (taşlama, tornalama, frezeleme, delme) ve imalat parametreleri (kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve çevresel etkiler) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca yaygın olarak kullanılan nano akışkanların uygulandıkları imalat yöntemleri, soğutma ortamları, kesici takım ve iş parçası çeşidi, kesme parametreleri bir çizelgede özetlenmiştir. Sonuçlar, soğutma ve yağlama amacıyla kullanılan nano akışkanların doğru yöntem ve parametrelerle uygulanması halinde optimum sonuçlara ulaşılabildiğini göstermiştir.

Suryawanshi ve Pattiwar [32], nanopartikül katkılı mobil sınıfı ticari yağlayıcıların sürtünme ve aşınma önleme performansını araştırmışlardır. Çalışma kapsamında üç farklı mobil sınıfı yağlayıcıya (DTE 24, DTE 25 ve DTE 26) ağırlıkça %0,5 konsantrasyonunda  $TiO_2$  takviye edilerek nano yağlayıcılar hazırlanmıştır. Hazırlanan yağlayıcıların sürtünme ve aşınmayı azaltma performansı dört bilyalı tribometre cihazı kullanılarak yapılan deneylerle incelenmiştir. Nanopartiküllerin yüzey morfolojisi ise taramalı elektron mikroskobu, ultraviyole spektrofotometre ve X ışını kırınımı yardımıyla analiz edilmiştir. Deney sonucunda nanopartikül katkılı yağlayıcıların yüzey pürüzlülüklerinin temasını azaltarak sürtünme ve aşınmayı azalttığı görülmüş, bu durum nanopartiküllerin yağlayıcı viskozitesini arttırmasıyla açıklanmıştır. Yüzey morfolojisi analizine göre ise nano yağlayıcıların sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapını azalttığı görülmüştür. Bu sonuç aşınma deneyi sonuçlarını doğrulamaktadır.

Jiao vd. [33], alümina/silika kompozit nanopartikülleri yağlayıcı katkı maddesi olarak kullanıldığında tribolojik özelliklere etkisini baskı halkası ve dört bilyalı aşınma deneyleriyle test etmişlerdir. İlk olarak hidrotermal yöntemle optimize edilmiş  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  nanopartikülleri hazırlanmıştır. Hazırlanan nanopartiküller ağırlıkça %0,05, %0,1, %0,5 ve %1 yoğunluklarında mineral yağa ilave edilerek yeni bir yağlayıcı elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapı ölçümleri için yarım saat deney süresi ve 348 °K sıcaklık koşulları altında baskı halkası ve dört bilyalı aşınma deneyleri uygulanmıştır. Deney verileri değerlendirildiğinde, %0,5 yoğunluğa sahip nanoyağlayıcının en küçük aşınma izi çapı ve sürtünme katsayısı değerlerini sağladığı görülmüştür. Deney sonunda optimize edilen nanoyağlayıcıların aşınan yüzeylere etkisi hakkında bilgi edinebilmek için SEM görüntüleri incelenmiştir. Bu görüntüler optimize edilmiş nanoyağlayıcının saf nanoyağlayıcıya oranla daha iyi yüzey performansı sergilediğini göstermektedir. Deneysel veriler ve SEM görüntüleri birlikte

değerlendirildiğinde ise SEM görüntülerinin deneysel sonuçları destekler nitelikte olduğu görülmektedir.

Asrul vd. [8], sıvı parafin içerisindeki yüzeyi geliştirilmiş nanopartikülün yağlama mekanizması ve tribolojik özelliklerini deneysel çalışmalarla analiz etmişlerdir. İlk olarak, sıvı parafin içerisine %0,2, %0,25, %2 ve %3 oranlarında yüzeyi geliştirilmiş ve herhangi bir işlem görmemiş CuO nanopartikülleri ilave edilerek nanoyağlayıcılar üretilmiştir. Üretilen nanoyağlayıcılar ile dört bilyalı tribometre cihazı kullanılarak 15 dakikalık zaman diliminde yapılan deneylerde giriş parametresi olarak 60-70 °C sıcaklık, 40 kg yük, 1200 rpm dönme hızı değerleri uygulanmıştır. Çıkış parametresi olarak sürtünme katsayısı ve aşınma izi çapı değerleri elde edilmiştir. Aşınan yüzeylerin iç yapısında meydana gelen değişimleri inceleyebilmek için ise optik mikroskop kullanılmıştır. Aşınma deneyi verileri analiz edildiğinde, yüzeyi geliştirilmemiş CuO nanopartikülleriyle hazırlanan nanoyağlayıcılar için en düşük sürtünme katsayısı değeri (0,185) %0,2 konsantrasyonunda, en yüksek sürtünme katsayısı değeri (0,247) %3 konsantrasyonunda elde edilmiştir. Yüzeyi geliştirilmiş CuO nanopartikülleriyle hazırlanan nanoyağlayıcılarda ise en düşük sürtünme katsayısı değeri (0,123) %3 konsantrasyonunda, en yüksek sürtünme katsayısı değeri (0,158) %0,2 konsantrasyonunda elde edilmiştir. Bu durum nanopartiküllerin yüzey morfolojisindeki değişimin sürtünme katsayısı değerlerinde büyük farklılıklara sebep olduğunu göstermektedir. Aşınma izi çap değerleri incelendiğinde, yüzeyi geliştirilmiş olan nanopartiküllerin işlem görmemiş nanopartiküllere oranla daha küçük çaplı aşınma izleri meydana getirdiği görülmüştür. Bu veriler yüzeyi geliştirilmiş nanopartiküllerin daha iyi tribolojik özellikler sağladığını göstermektedir. Aşınan yüzeylerin görüntüleri analiz edildiğinde saf sıvı parafinin kullanıldığı malzeme yüzeyinde CuO takviyeli sıvı parafine oranla daha fazla aşınma izi gözlenmiştir.

Zhou vd.[7], yaptıkları çalışmada bakır nano partikül takviyeli parafin yağının tribolojik özelliklerini 4 bilyalı aşınma cihazında test etmişlerdir. Bakır nano partiküllerin performansı ZDDP (zinc dialkyldithiophosphate) ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Cu nano partikül aşınma direncini artırma, sürtünme katsayısını azaltma ve yük taşıma kapasitesini artırma açısından ZDDP'den daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Saravanakumar vd. [34], nano gümüş partiküllerinin aşınma ortamındaki davranışlarını tornalama deneyleri yoluyla incelemiştir. Çalışmada nano partikül katkıli kesme sıvısının, talaşlı imalat ortamındaki ısı taşıma kapasitesi, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Nano gümüş katkıli akışkanın normal kesme sıvısına göre yaklaşık 2 °C daha fazla ısındığı, kesme kuvvetlerini %8,8 oranında düşürdüğü ve yüzey kalitesini %7,5 oranında arttırdığı belirlenmiştir.

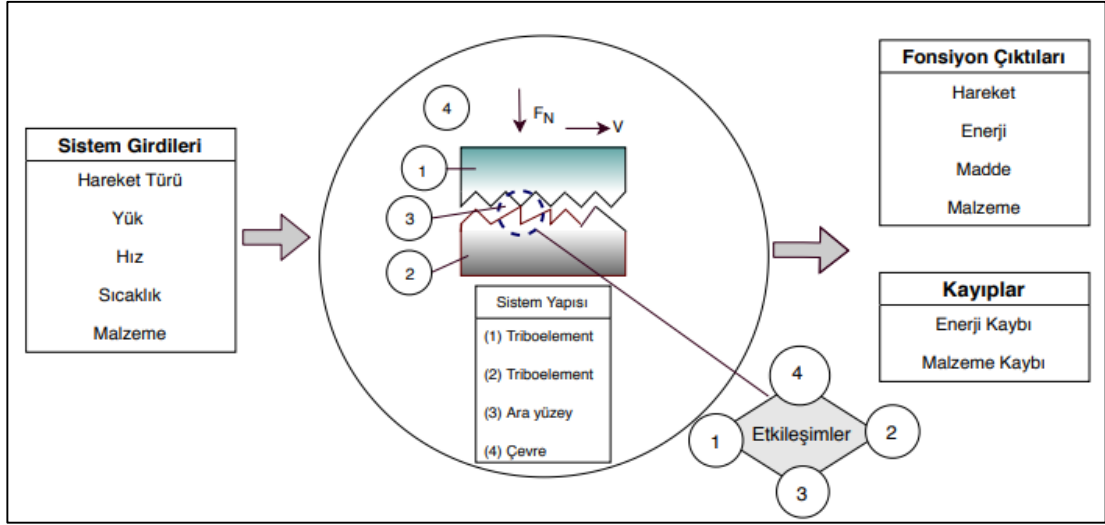


## BÖLÜM 3

### TRIBOLOJİ

Triboloji kavramı, Yunanca “tribos” kelimesinden türetilmiş olup, “etkileşim halindeki malzemelerin birbirlerine göre izafi hareketi esnasında meydana gelen sürtünme, aşınma ve yağlama mekanizmalarını analiz eden bilim dalı” olarak tanımlanmaktadır [35,36]. Bu kavram, ilk olarak Prof. H. Peter Jost (1966) tarafından bir raporda ifade edilmiş olmasına rağmen tarihin en eski dönemlerinden beri insanoğlunun araştırma yaptığı konulardan biridir [37]. Tarihsel süreçte Amonton’un (1699) çalışmalarıyla başlayan ve daha sonra Coulomb (1736-1806), Hatchett (1760-1820) ve Leonardo da Vinci (1452-1519) tarafından yapılan çalışmalarla devam eden triboloji alanındaki ilk araştırmalar sürtünme konusuyla sınırlı kalmıştır. [35].

Fren, kavrama vb. mekanizmaları gibi yüksek hareket direncine ihtiyaç duyulan durumlarda sürtünmenin kontrollü bir şekilde artırılması istenmesine karşın mekanik sistemlerin çoğunda azaltılması istenmektedir. Tribolojinin temel amacı, sistem verimini ve çalışma performansını olumsuz etkileyen sürtünme ve aşınma mekanizmalarının minimize edilmesini sağlamaktır [38]. Sürtünmenin fazla olması aşınma mekanizmasını oluşturmakta ve artan deformasyon nedeniyle malzemelerin mekanik performans kaybına sebebiyet vermektedir. ASTM standardına (G40-15) göre çevresel faktörlerin de dahil olduğu bir veya daha fazla triboelement içeren aşınma mekanizmasının olduğu sistemler tribosistem olarak adlandırılmaktadır [2]. Tribosistem temel olarak; malzeme, karşıt malzeme, ara yüzey ve ortamdan oluşmaktadır. Yük, hız, sıcaklık gibi parametrelerin sisteme etkisiyle enerji ve malzeme kaybı meydana gelmektedir (Şekil 3.1). Tribosistemin iyi bir şekilde analiz edilmesiyle sistemin elemanları hakkında detaylı bilgi sahibi olmak aşınma problemlerinin daha kolay çözüme kavuşturulmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.1. Tribosistem elemanları [39].

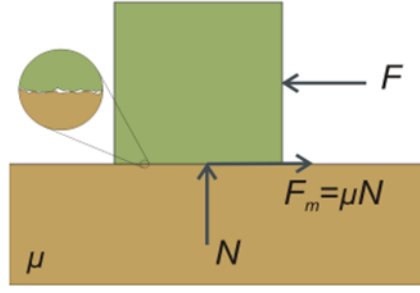
Aşınmaya maruz sistemlerde aşınan malzemenin değiştirilmesi, malzeme yüzeyinin kaplanması gibi çözümler uygulanmaktadır. Fakat bu yöntemler hem zaman kaybına sebep olmakta hem de maliyetli olmaktadır. Bu sebeple sürtünme etkisindeki malzemelerin temas bölgelerine yağlayıcı akışkan takviye edilerek malzemelerin etkileşim noktaları azaltılmaktadır. Sistemin tribolojik performansının artırılması sayesinde aşınma miktarı da minimize edilmektedir. Bu sayede özellikle imalat sektöründe sistem verimi ciddi oranda artmaktadır.

### 3.1. SÜRTÜNME

Sürtünme, birbirine göre relatif hareket halindeki iki yüzeyin harekete karşı gösterdiği dirençtir. Temas halindeki yüzeylerin relatif hareketi esnasında harekete ters yönde teğetsel kuvvetler meydana gelir (Şekil 3.2). Bu teğetsel kuvvetlere sürtünme kuvveti adı verilmektedir. Vinci, Amonton ve Coulomb'un çalışmalarıyla ortaya çıkarılan sürtünme kanunları, daha sonra Coulomb tarafından formülize edilmiştir.

Sürtünme kanunları şu şekildedir [40]:

1. Sürtünme, kayma hızından bağımsızdır.
2. Sürtünme kuvveti uygulanan yük ile doğru orantılı olarak değişmektedir.
3. Sürtünme kuvveti temas alanından bağımsızdır.



Şekil 3.2. Sürtünme kuvvetinin şematik gösterimi [41].

$$F_m = \mu F_N \quad (3.1)$$

$F_m$  = sürtünme kuvveti

$\mu$  = sürtünme katsayısı

$F_N$  = cisim üzerine uygulanan kuvvet

Sürtünme, hareket türüne ve relatif hareket halindeki yüzeyler arasında yağlayıcı bulunması durumuna göre Şekil 3.3'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 3.3. Sürtünmenin sınıflandırılması.



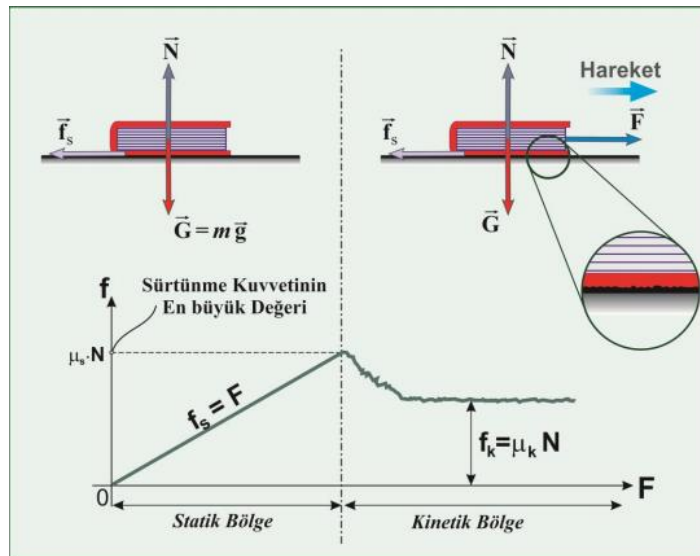
### 3.1.1. Hareket Türüne Göre Sürtünme Çeşitleri

#### 3.1.1.1. Statik Sürtünme

Statik sürtünme, temas halindeki hareketsiz katı cisimler arasındaki sürtünmedir. Sürtünme kuvvetinin büyüklüğünü belirleyen temel etken sürtünme katsayısıdır. Sürtünme katsayısı malzemelerin mekanik özelliklerine ve yüzey kalitelerine göre değişen büyüklüktür. Hareketsiz cisimler arasındaki sürtünme katsayısı ise statik sürtünme katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Yüzeyler arasındaki statik sürtünme katsayısı sebebiyle oluşan sürtünme kuvvetinin, hareketi sağlayacak olan kuvvetten büyük bir değere ulaşması durumunda cisimlerin stabilizasyonu sağlanmaktadır.

#### 3.1.1.2. Kinetik (Kayma) Sürtünme

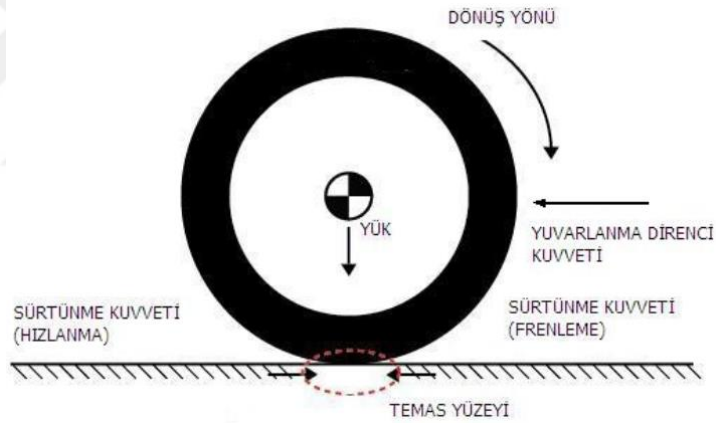
Kinetik sürtünme, relatif hareket esnasında temas halinde olan iki katı yüzey arasındaki sürtünmedir. Duran bir cismi harekete geçirmek, hareket halindeki bir cismin ivmesini arttırmaktan daha zordur. Bu sebeple statik sürtünme kuvveti kinetik sürtünme kuvvetine göre daha büyük bir değerdir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Statik ve kinetik sürtünme kuvvetlerinin karşılaştırması [42].

### 3.1.1.3. Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, temas halindeki katı yüzeylerin yuvarlanma hareketi etkisi sebebiyle ortaya çıkan deformasyonun yüzey pürüzlülüğünü artırması sonucu meydana gelen dirençtir (Şekil 3.5). Bir cismin kaymaya karşı gösterdiği direnç yuvarlanmaya karşı gösterdiği dirençten daha fazladır. Makro ölçekte farklı görünen kayma ve yuvarlanma sürtünme mekanizmaları, mikro ölçekte benzer özellikler göstermektedir. İki cismin yuvarlanma hareketi aslında dönme ve kayma hareketlerinin kombinasyonu olarak düşünülmektedir [43]. Fakat dönme hareketi esnasında basınç kuvveti daha az etki ettiğinden yuvarlanma sürtünmesi kayma sürtünmesine göre daha küçük bir değere sahiptir. Yuvarlanma sürtünmesinin kayma sürtünmesinden daha küçük değerde olması esasına dayanılarak icat edilen tekerlek, insanlık tarihinin en önemli buluşlarından biridir [44].



Şekil 3.5. Yuvarlanma sürtünmesinin şematik gösterimi [45].

## 3.2. Yüzeyler Arasında Yağlayıcı Bulunması Durumuna Göre Sürtünme Çeşitleri

### 3.2.1.1. Kuru Sürtünme

İki veya daha fazla cismin birbirlerine göre hareketi esnasında malzemelerin temas bölgesinde yağlayıcı akışkan bulunmaması koşulunda gerçekleşen sürtünmeye kuru sürtünme adı verilmektedir. Malzemelerin yüzey pürüzlülüğü, benzer kristal yapıya sahip olmaları, yüzey sertliği gibi mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri kuru

sürtünmeye etki eden önemli faktörlerdir. Özellikle pürüzlülüğün fazla olduğu malzeme yüzeylerindeki düzensiz girinti çıkıntılar cisimlerin hareketini zorlaştırmakta ve yüzey deformasyonunu arttırmaktadır. Ayrıca cisimlere etki eden yükün büyüklüğüne göre deformasyon şekli de değişmektedir. Hafif yük koşullarında malzeme yüzeyinde elastik deformasyonun etkisiyle yüzeyde çiziklerin oluşması söz konusuysen, ağır yük koşulları altında plastik deformasyonun etkisiyle yüzeyde parça kopmaları meydana gelmektedir. Ağır yük koşulları altında girinti çıkıntılarının temasının artması sebebiyle kayma hareketinin yapışma-ayrılma şeklinde meydana gelmesi aşınma miktarını arttırmaktadır. Aşınma miktarını azaltmanın en yaygın ve sürdürülebilir yöntemi ise malzemelerin yüzey tabakaları arasına yağlayıcı akışkan takviye edilerek yüzey pürüzlülükleri temasının azaltılmasıdır.

#### **3.2.1.2. Yarı Sıvı Sürtünme**

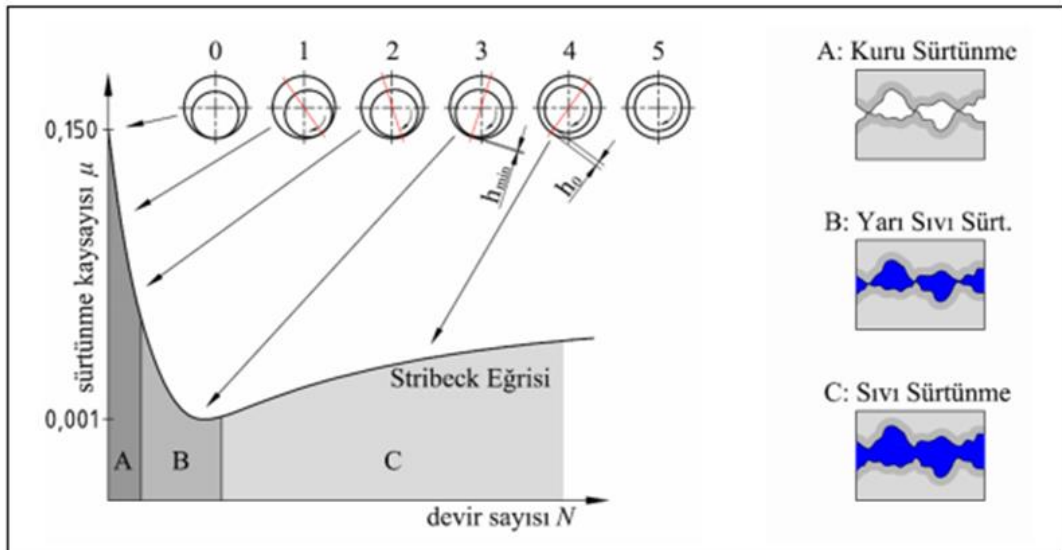
Aşınmayı azaltmak için malzemeler arasına yağlayıcı akışkan takviyesiyle sürtünme koşullarında yağlayıcı film tabakası oluşturulmaktadır. Elde edilen film tabakası, malzeme yüzeylerindeki pürüzlülüklerin temas bağlantılarını tamamen koparacak kalınlıkta olmadığında sadece temas noktalarını azaltma işlevi görmektedir. Bu sürtünme rejimine sınır sürtünme adı verilmektedir. Sınır yağlama tabakası sayesinde sürtünme esnasında meydana gelen basınç ve gerilmelerin bir kısmı yağlayıcı film tarafından taşınarak malzemeye doğrudan etkisi önlenmektedir. Bu şekilde aşınma miktarı az da olsa azaltılabilmektedir.

#### **3.2.1.3. Sıvı Sürtünme**

Bu sürtünme şeklinde sınır sürtünmeden farklı olarak, yağlayıcı film tabakası malzemeler arasındaki etkileşimi tamamen önlemektedir. Malzemeler arasındaki yağlayıcı akışkanın basıncı, yükün meydana getirdiği basıncı karşılar duruma geldiğinde malzemeler arasında temas söz konusu olmamakta ve sisteme etki eden tek sürtünme kuvveti yağlayıcı akışkanın basıncının meydana getirdiği gerilmeler sebebiyle oluşmaktadır [46]. Yağlayıcı akışkanın, malzemelerin aşınma direncini arttırması sayesinde aşınma miktarı minimum seviyeye indirgenmektedir.

## Stribeck Eğrisi

Aşınmaya maruz mekanizmalarda sistem veriminin artırılması için uygun yağlama rejiminin belirlenmesi gerekmektedir. 19. yüzyılın sonlarında Alman mühendis Richard Stribeck kaymalı yataklarda sürtünme ve yağlama üzerine çalışmalar yaparak yağ viskozitesi, temas alanı ve milin dönme hızı arasında ilişki elde etmiş ve bu parametrelerin yağlama rejimleri üzerine etkisini analiz etmiştir [2]. Şekil 3.6'da verilen Stribeck eğrisine göre mil hızının çok düşük olduğu bölgede sürtünme katsayısının en yüksek değere ulaştığı görülmüş ve mil ile yatağın temas halinde olduğu bu bölge kuru sürtünme bölgesi olarak adlandırılmıştır. İnce bir film tabakası oluşturulan yarı sıvı sürtünme olarak adlandırılan bölgede ise mil hızının artmasıyla sürtünme katsayısında ciddi oranda azalma görülmüştür. Yarı sıvı sürtünme bölgesinden hidrodinamik yağlamanın gerçekleştiği sıvı sürtünme bölgesine geçiş bölgesinde sürtünme katsayısının minimum değere ulaştığı görülmekte ve sıvı sürtünme bölgesinde yağın iç basıncı nedeniyle sürtünme katsayısı artmaktadır.



Şekil 3.6. Stribeck eğrisi [47].

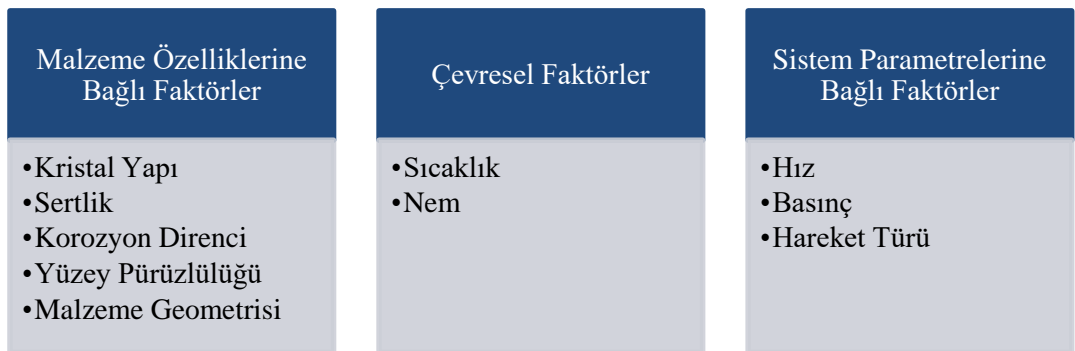
### 3.3. AŞINMA

Özellikle imalat sektöründe yaygın kullanılan metaller, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle sürtünmeye maruz kalırlar. Yüksek hız ve basınç etkisinde çalışan sistemlerde metal-metal temasında meydana gelen termal etki, plastik deformasyon oluşumuna sebep olarak aşınma mekanizmalarını meydana getirmektedir.

Malzemenin aşınması sonucu üç hasar meydana gelmektedir. Bunlar şu şekildedir [40]:

1. Mekanik deformasyon ve termal dağılma sebebiyle malzemede meydana mikroyapısal değişiklikler,
2. Malzeme yüzeyinde meydana gelen kimyasal etki nedeniyle oksitlenme,
3. Malzeme yüzeyinden parça kopmaları.

Yapılan çalışmalar sonucunda makine elemanlarında meydana gelen boyutsal ve yüzeysel problemlerin büyük çoğunluğunun aşınmadan kaynaklandığı görülmektedir. Metal malzemelerde meydana gelen bu deformasyonların azaltılması sistem verimini ciddi oranda arttırmaktadır. Bu sebeple aşınmayı arttıran faktörlerin minimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu faktörler 3 ana başlık altında incelenmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Aşınmaya etki eden faktörler.

Malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri, çevresel faktörler ve çalışma şartlarına bağlı olarak aşınma mekanizmaları arasında farklılıklar olsa da birbirinden ayrılmalarını sağlayan keskin bir sınır yoktur. Bu durum aşınma olayını karmaşık hale

getirmektedir. Malzeme yüzeyinde oluşan deformasyon şekillerine göre aşınma mekanizmaları şu şekilde sınıflandırılabilir:

1. Adheziv aşınma
2. Abrasiv aşınma
3. Yorulma aşınması
4. Eroziv aşınma
5. Koroziv aşınma

### 3.3.1. Adheziv Aşınma

Kristal yapıları benzer malzemeler arasında gerçekleşen ve yapışma aşınması olarak da adlandırılan aşınma türüdür. Sürtünmeye maruz malzemelerde düşük hızlarda hareketin etkisiyle malzemelerin yüzey pürüzlülük noktalarında ısı artışı meydana gelir. Artan ısının etkisiyle malzemeler arasında atom transferi gerçekleşerek mikro kaynak bağları oluşur. Hareketin sürekliliğiyle birlikte kaynak bağları zamanla kopar ve bu esnada düşük mukavemetli malzemedeki parça kopmasına sebep olur. Adheziv aşınma sonunda malzeme yüzeyinde derin boşlukların oluştuğu ciddi yüzey deformasyonları meydana gelmektedir (Şekil 3.8).

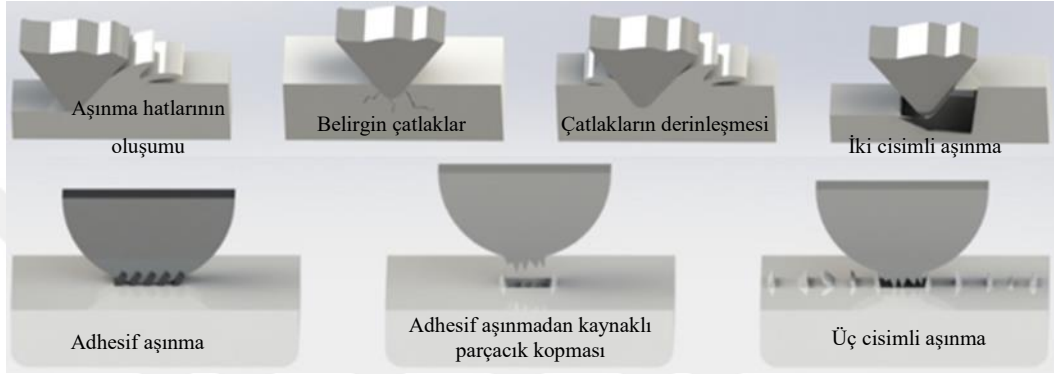


Şekil 3.8. Adheziv aşınma mekanizması [48].

### 3.3.2. Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, temas halindeki iki malzemedeki sert olanın yumuşak olan malzeme yüzeyinde plastik deformasyona sebep olması ve yüzeyden mikro boyutta malzeme kaldırmasıdır. Abrasiv aşınmada iki cisimli aşınma ve üç cisimli aşınma olmak üzere iki durum mevcuttur [49]. Sürtünme başlangıcında yumuşak olan malzemedeki ilk olarak küçük yarıklar oluşur ve zamanla belirgin çatlaklara dönüşür. Aşınmaya bağlı

olarak malzemede tanecik hasarları (iki cisimli aşınma) meydana gelir. Daha sonra aşınma bölgesinde ısı enerjisinin artışıyla meydana gelen adhesif aşınma sonucu malzemeden kopan parçacıklar malzemelerin temas bölgesinde serbest kalır ve aşınmayı hızlandırıcı etki gösterir (üç cisimli aşınma). Abrasif aşınma sonunda malzeme yüzeyinde yırtılma ve çiziklerin olduğu deformasyonlar meydana gelmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Abrasif aşınma mekanizması [38].

### 3.3.3. Yorulma Aşınması

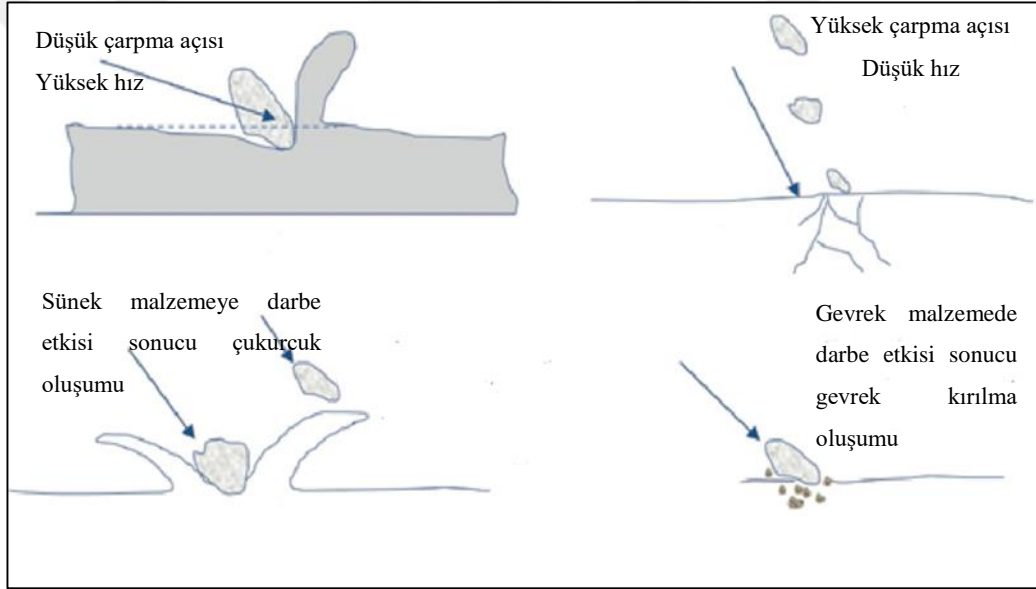
Etki eden yük ve tekrarlı hareketin etkisiyle oluşan düşük genlikteki (1-300  $\mu\text{m}$ ) titreşime bağlı olarak malzemeye etki eden gerilmeler artar ve plastik deformasyonlar meydana gelir [40]. Uygulanan yükün malzemenin yorulma direncinden fazla olması, yüzeyden başlayarak iç yapıya doğru gerçekleşen yorulma olayına sebebiyet vermektedir. Yorulma sonunda malzemeden tabakalar halinde parçalar kopması ve yüzeyde derin boşlukların oluşmasıyla aşınma meydana gelir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Yorulma aşınması mekanizması [48].

### 3.3.4. Erozif Aşınma

Katı bir yüzeye, katı veya sıvı parçacıkların tekrarlı darbe etkisi sonucu yüzeyde meydana gelen deformasyonlar erozif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Erozif aşınmanın etkisi malzeme özelliklerine, parçacıkların şekli, sertliği, çarpma hızı ve çarpma açısına göre değişiklik göstermektedir [50]. Malzeme sünek olduğunda yüzeyde çukurcuk oluşumu, gevrek olduğunda ise çatlaklar gözlenmektedir. Yüksek çarpma açısı ve düşük çarpma hızı koşullarında malzemede plastik deformasyon gerçekleşirken, düşük çarpma açısı ve yüksek çarpma hızında çatlak oluşumu söz konusudur (Şekil 3.11).



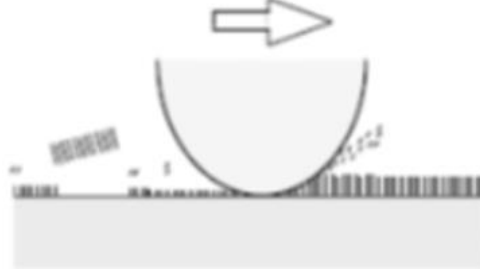
Şekil 3.11. Farklı erozif aşınma mekanizmaları [51].

### 3.3.5. Korozi Aşınma

Metallerin hava veya kimyasal maddelerle reaksiyona girmesi sonucu oluşan korozyon filmlerinin etkisiyle meydana gelen aşınma türüdür (Şekil 3.12). Dayanıklı ve uzun ömürlü olan korozyon filmi oluşumu adhezyon aşınmasını önleyici etkiye sahiptir. Kısa ömürlü olan korozyon filmleri ise aşamalı olarak birikerek oluşan fakat temas noktalarına nüfuziyeti sağladıktan sonra kaybolan filmlerdir. Bu korozyon filmlerinin zamanla parçalanması aşınmayı hızlandırıcı etki göstermektedir [38]. Korozyon



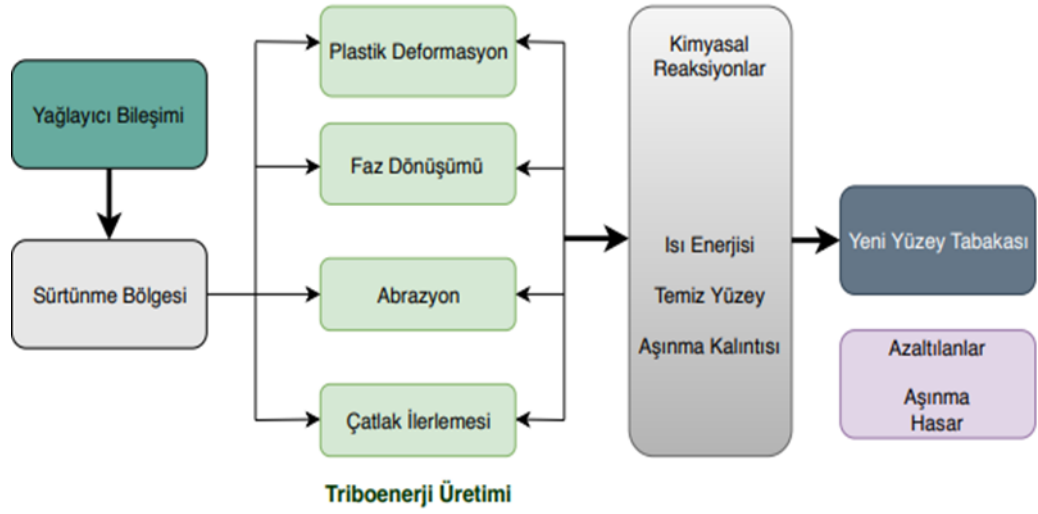
aşınması, metal yüzeylerinin çeşitli malzemelerle kaplanmasıyla kimyasal madde veya hava ile temasının engellenmesiyle önlenmektedir.



Şekil 3.12. Korozif aşınma mekanizması [52].

### 3.4. YAĞLAMA

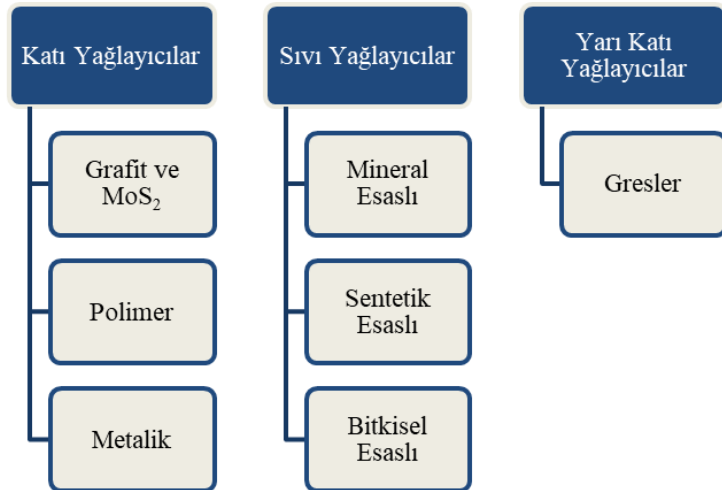
Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte makinelerin yüksek sıcaklık ve hız koşullarında iyi bir performans göstermesi gereklilik haline gelmiştir. Sürtünme ve aşınmanın yüksek olduğu bu çalışma koşullarında makine elemanlarının zarar görmemesi için yağlayıcı madde kullanımı en yaygın yöntemdir. Yağlayıcı maddeler; malzemelerin temas noktalarını azaltarak sürtünme ve aşınmayı azaltma, sürtünme bölgelerinde oluşacak yüksek ısıyı uzaklaştırma, malzemelerin temas bölgesine yabancı madde nüfuziyetini önleme, makine elemanlarının hareketiyle oluşan titreşimi sönümlenme, sürtünme bölgesiyle korozif ortam arasında oluşabilecek etkileşimi önleme fonksiyonlarına sahiptir [44]. Yağlama koşullarında ortaya çıkan olumsuzluklar adhesiv ve kimyasal aşınmadan kaynaklanmaktadır. Yüksek tribolojik performansa sahip olan yağlayıcı madde, yüzeyler arasında dayanıklı bir film oluşturarak adhesiv ve kimyasal aşınmayı azaltıcı rol oynamaktadır [36]. Sınır yağlama koşullarında yağlayıcının performansını yağlayıcı maddenin özelliklerinin yanı sıra çevresel faktörler de ciddi oranda etkilemektedir [53]. Dolayısıyla sistemde kullanılacak yağlayıcı madde, kimyasal ve fiziksel özelliklerin reaksiyona girerek tribokimyasal etki göstermesi sebebiyle ortam ve yağlayıcının özelliklerine göre değişiklik göstermektedir [54]. Şekil 3.13'de tribokimyasal reaksiyon şematik olarak gösterilmektedir [54].



Şekil 3.13. Tribokimyasal reaksiyon mekanizması [54].

Tribokimyasal reaksiyon sebebiyle yağlayıcı filmler deforme olmaktadır. Tribolojik performansı yüksek olan film elde etmek için ise yağlayıcı maddelere katkı maddeleri takviye edilmektedir. Katkı maddeleri yağlayıcıların özelliklerini tamamen değiştirebilme kabiliyetine sahiptir [38].

Yağlayıcı maddeler genel olarak katı yağlayıcılar, sıvı yağlayıcılar ve yarı katı yağlayıcılar olmak üzere 3 ana başlık altında incelenmektedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Yağlayıcıların sınıflandırılması.

### 3.4.1. Katı Yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar, diğer yağlayıcıların yağlama görevlerini yerine getiremedikleri yüksek sıcaklık, radyoaktivite ve vakum uygulamalarında kullanılmaktadır [38,44]. Tabakalı yapı oluşturmaları hem korozyonu önlemekte hem de daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olmalarını sağlamaktadır. Bu sayede aşınma problemleri minimum seviyeye indirgenmektedir. Katı yağlayıcılar uygulama alanları, kimyasal uyumluluk, termal kararlılık, nüfuziyet kabiliyeti gibi kriterlere bağlı olarak seçilmekte olup, bu kriterlerin dışında dikkate alınması gereken 4 önemli faktör bulunmaktadır. Bunlar [55].

1. Yağlayıcının kimyasal yapısı
2. Yağlayıcı film kalınlığı
3. Sistem parametreleri (hız, temas basıncı, sıcaklık)
4. Hareket türü (kayma, yuvarlanma vs.)

Sisteme etki eden hız, temas basıncı ve sıcaklığın yüksek olduğu koşullarda yağlayıcı film zarar görebilmektedir. Ayrıca mekanizmanın hareket şekli de sisteme etki eden bir diğer faktördür. Kayma hareketi esnasında yuvarlanma hareketine kıyasla sürtünme artışı daha fazladır. Yüksek sürtünme etkisi altında yağlayıcı filmin zarar görmemesi için yağlayıcı maddenin kimyasal kararlılığı ve film kalınlığı büyük önem kazanmaktadır. Film kalınlığı  $10^{-5}$  cm olduğunda optimum tribolojik performans sağlanırken, kalınlık  $10^{-6}$  cm'ye düştüğünde filmin etkisi de azalmaktadır [56]. Bu sebeple yüzeyde oluşan film kalınlığı, yağlayıcının tribolojik davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

#### 3.4.1.1. Grafit ve Molibden Disülfid

Grafit ve  $\text{MoS}_2$  kullanımı en yaygın organik katı yağlayıcılar olarak bilinmektedir. Benzer tribolojik özelliklere sahip olmaları, kristal yapılarının (anizotropik) benzer olmasıyla ilişkilendirilmektedir [38]. Grafit ve  $\text{MoS}_2$  tabakalarının hareket serbestliği daha iyi yağlama performansı göstermelerini sağlamaktadır. Fakat  $\text{MoS}_2$  partiküllerinin grafitte kıyasla daha küçük boyutta olması yüzey pürüzlülüğü

boşluklarına nüfuziyetini sağlamaktadır. Bu durum MoS<sub>2</sub> partiküllerinin daha geniş alana yayılmasını sağlamaktadır [44]. Ayrıca MoS<sub>2</sub>'in grafitle kıyasla düşük yük koşullarında yağlama performansının daha iyi olduğu belirlenmiştir [57].

#### **3.4.1.2. Polimerler**

Polimerlere örnek olarak poliamid, polietilen, politetraflororetilen ve polipropilen verilebilir. Politetraflororetilen, polimer yağlayıcılar içerisinde en yaygın olanıdır. Lamelli yapıda olması sebebiyle daha kolay hareket edebilme özelliğine sahiptir. Çelik yüzeylerle temas halinde grafitle benzer özellikleri göstermesinin yanı sıra MoS<sub>2</sub>'e kıyasla daha düşük yağlama performansı sergilemektedir [58]. Grafit ve MoS<sub>2</sub> yağlayıcı maddelerine kıyasla daha düşük termal iletkenlik ve düşük yük taşıma kapasitesine sahip olması gibi dezavantajlara sahip olması nedeniyle düşük hız ve sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir.

#### **3.4.1.3. Metalik Yağlayıcılar**

Yağlayıcı maddelerinin en önemli işlevlerinden biri de metal-metal temasında oluşan yüksek ısıyı uzaklaştırarak temas bölgesinde soğutucu etki sağlamasıdır. Metalik yağlayıcı olarak altın, gümüş, bakır, kurşun gibi metaller kullanılmaktadır. Bu metallerin ısı iletim kabiliyetlerinin yüksek olması dişliler, rulmanlar gibi yüksek sıcaklığın olduğu uygulamalarda tercih edilmelerini sağlamaktadır.

#### **3.4.2. Sıvı Yağlayıcılar ve Viskozite**

Katı yağlayıcıların düşük ısıl iletkenliği, kısa ömürlü olması ve sınırlı nüfuziyet sağlayabilmesi gibi dezavantajları nedeniyle sıvı yağlayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır [59]. Sıvı yağlayıcılar kullanım kolaylığı, katkı maddesi takviyesiyle geliştirilebilme özelliği ve daha fazla alana nüfuziyet kabiliyeti sebebiyle endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kristal yapıları ve takviye edilen katkı maddeleri sebebiyle farklı özelliklere sahip olan sıvı yağlar farklı uygulama alanlarında işlev görmektedir. Çalışma koşullarına göre kullanılacak yağın tribolojik özellikleri dikkate alınarak seçilmesi büyük öneme sahiptir. Yağ seçiminde genel olarak viskozite, yapışma

kabiliyeti, yoğunluk, alevlenme noktası, ısıl iletkenlik, donma noktası faktörleri göz önüne alınmaktadır [60]. Viskozite bu kriterlerin içerisinde ayrıca incelenmesi gereken önemli bir faktördür. Sıvı yağlayıcılar mineral esaslı, bitkisel esaslı ve sentetik esaslı olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmektedir.

Viskozite akışkanın iç direncidir. Yağlama maddesi olarak kullanılan sıvının sürtünmesini, yük taşıma kapasitesini, ısı transfer kabiliyetini ve kararlılığını belirleyen en önemli etkidir [61]. Viskozite sıcaklıkla ters orantılı basınçla doğru orantılı olarak değişmektedir. Düşük sıcaklıklarda viskozitenin artması, sıvının sıcaklık azaldıkça kümelenme eğiliminden kaynaklanmaktadır. Sıcaklık arttıkça akışkanın hareket serbestliği artmaktadır [62]. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla viskozitenin azalması sonucu yağlayıcı daha az yük taşıma kapasitesine sahip olmakta ve yağlayıcının fonksiyonlarını olumsuz etkilemektedir [55]. Bu sebeple herhangi bir makine parçası için optimum çalışma performansının sağlanmasında çalışma şartlarına uygun viskozitede yağlayıcı kullanımı büyük önem kazanmaktadır. [62].

#### **3.4.2.1. Mineral Esaslı Yağlayıcılar**

Ham petrolün rafine edilmesiyle elde edilen mineral yağlar sızdırmazlık, katkı maddesi takviyesine uygunluk ve ucuz olması sebebiyle yaygın kullanılan sınır yağlayıcılarıdır. Yalnızca karbon ve hidrojen içeren hidrokarbonlardır ve kimyasal formlarına göre farklılık gösterirler [38].

Karbon atomlarının kimyasal formlarına ve zincir uzunluğuna göre parafinik, naftenik ve aromatik olmak üzere 3 gruba ayrılırlar. Aromatik yağlar benzen içerikli yağlardır. Sıcaklık değişimine olan hassasiyeti, oksidatif etkisi ve çevreye olumsuz etkisi sebebiyle kullanılmamaktadır. Karbon zincirindeki atomların çoğu düz veya dallanmış şekilde ise parafinik yağ, halka şeklinde ise naftenik yağ olarak isimlendirilmektedir. Parafinik yağlar düşük buharlaşma eğilimi, sıcaklık değişimlerinde stabilizasyon, yüksek viskozite indeksi ve yüksek oksidasyon direnci ile karakterize edilen yağlayıcılarıdır. Ayrıca uzun karbon zincirli kimyasal yapıya sahip olmaları sebebiyle yağlayıcı tabaka oluşturma kabiliyetleri fazladır. Fakat sıvı içerisinde homojen

dağılma, yüksek ısı iletim kabiliyeti ve ekonomikliği sebebiyle naftenik yağlar daha çok tercih edilmektedir [63].

#### **3.4.2.2. Bitkisel Esaslı Yağlar**

Yenilenebilir özelliğiyle kolay temin edilebilmesi sebebiyle katkı maddesi olarak veya baz sıvısı olarak birçok uygulamada yaygın şekilde kullanılmaktadır [64, 65]. Bitkisel yağlar mineral yağlara kıyasla daha iyi yağlayıcılık özelliği ve yüksek viskozite indeksine sahiptir. Ayrıca çevreye olumsuz etkisinin bulunmaması ve yüksek alevlenme noktası özelliği sebebiyle güvenli olması endüstriyel alanda önemini arttırsa da yüksek sıcaklıklarda oksidatif stabilitesinin zayıf olması ve düşük sıcaklıklarda kolay katılaşma özellikleri kullanımını sınırlandırmaktadır [66].

#### **3.4.2.3. Sentetik Esaslı Yağlar**

Yüksek sıcaklıklarda oksidasyon, düşük alevlenme noktası ve düşük sıcaklıklarda katılaşma gibi dezavantajları nedeniyle mineral yağlar her zaman yeterli performans sağlayamamaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık ve düşük basınç koşullarındaki uzay uygulamaları ve savunma sanayisinde yüksek performanslı yağlayıcılar ihtiyaç haline gelmiştir.

Sentetik yağlar yeterli viskoziteye sahip düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerin kimyasal olarak birleştirilmesi (sentezlenmesi) ile üretilirler [62] ve hidrokarbon boyutları benzerdir. Daha geniş sıcaklık aralığında çalışabilmeleri ve sıcaklık stabilitesini koruyabilmeleri sayesinde iyi bir soğutucu ve yağlayıcı etki sağlamaktadır. Fakat yüksek maliyetli olması kullanım alanını sınırlamakta ve sadece zorlu koşullardaki uygulamalarda tercih edilmektedir.

### **3.4.3. Yarı Katı Yağlayıcılar**

#### **3.4.3.1. Gresler**

Sentetik veya mineral yağa koyulaştırıcı ve katkı maddeleri takviye edilerek oluşturulan kolloidal yağlardır. Soğutmanın gerekli olmadığı, tekrarlı yükler altında çalışan, sıvı yağın kullanılmasının uygun olmadığı ve az bakım gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Sızdırmazlık özelliği, uzun ömürlü olması ve düşük kayma hızı koşullarında yüksek performans sağlaması en önemli avantajlarıdır. Akmaya karşı gösterdiği direnç sebebiyle yarı katı halde bulunması yüksek basınç kuvvetlerini taşıyabilme kabiliyetini arttırmaktadır. Özellikle yüksek basıncın etkili olduğu rulmanlı yataklarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Fakat, yüksek sıcaklık koşullarında mineral yağlar kadar iyi bir soğutucu etki sağlayamaması gres performansını olumsuz etkilemektedir.

#### **3.4.4. Katkılar**

Yağlayıcı maddelerin yağlama kalitelerinin ve performanslarının artırılması için belirli miktarlarda katkı maddeleri takviye edilmektedir. Baz yağ içerisindeki optimum katkı maddesi miktarının ayarlanması çok önemlidir. Katkı maddesi miktarı fazla olduğunda yağlayıcı maddenin termal kararlılığının azalmasının yanı sıra malzeme yüzeylerinin korozyona uğrama ihtimali artmaktadır. Miktar az olduğunda ise koruyucu film oluşturamama riski artmakta ve bu durum makine parçalarının arızalanmasına sebep olmaktadır [38].

Her katkı maddesinin kimyasal yapılarının farklı olması sebebiyle yağlayıcı madde içerisinde farklı etki göstermektedir. Yağlayıcı maddeye sağladıkları etkiye göre 3 grupta incelenmektedirler.

##### **3.4.4.1. Antioksidan Film Katkıları**

Yağ ve havanın etkileşimi ve sıcaklığın etkisiyle malzemeler korozyona uğrayarak özellikle metal yüzeylerde oksit tabakası oluştururlar. Oksit tabakası zamanla

malzemeleri aşındırmakta ve bu durum makine parçalarının şekilsel ve boyutsal özelliklerinde değişimine sebebiyet vermektedir. Korozyon önleyici film katkıları oksit tabakası oluşumunu önleyerek malzemelerin daha uzun ömürlü olmalarını sağlamaktadır. En yaygın kullanılan antioksidan katkı maddeleri aminlerdir. Daha çok hafif yük ve düşük sıcaklık koşullarında etkilidirler.

#### **3.4.4.2. Aşınma Önleyici Film Katkıları**

Aşınma önleyici film katkıları, oluşturulan koruyucu filmin stabilizasyonunu sağlamakta ve bu sayede malzemeye uygulanan yükün etkisini azaltarak aşınmayı azaltıcı rol oynamaktadır. Çinko dialkil ditiofosfat (ZDDP) en yaygın aşınma önleyici katkı maddesidir. Nispeten yüksek sıcaklık ve yük koşullarında işlev görerek yağlayıcı maddenin performansını arttırmaktadır. Ayrıca 200 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda trikresilfosfat (TCP) katkı maddesi de aşınmayı ciddi oranda azaltmakta olup bu sıcaklık değeri arttırıldığında koruyucu filmin mukavemetini olumsuz etkileyerek yük taşıma kapasitesini azaltmakta ve aşınma miktarının artışına sebep olmaktadır [67].

#### **3.4.4.3. Aşırı Basınç Film Katkıları (E.P.)**

Aaşırı basınç film katkıları, aşırı yük ve hız koşullarında meydana gelen yüksek basıncın etkili olduğu uygulamalarda makine parçalarının sorunsuz bir şekilde işlev görmesini sağlamak için kullanılırlar. Bu katkı maddeleri metal yüzeylerle reaksiyona girerek yük taşıma kapasitesi yüksek olan koruyucu film tabakası oluştururlar. Yağlayıcı film sayesinde malzemeye uygulanan yük daha geniş bir alana yayılarak yüzey pürüzlülük noktalarına daha küçük gerilmeler etki eder ve malzemedeki meydana gelebilecek plastik deformasyonu azaltarak aşınma miktarını minimize eder.

#### **3.4.5. Yağlayıcı Akışkanların Çevre ve İnsan Sağlığına Etkileri**

Endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan yağlayıcı akışkanların büyük bir kısmı, içerdikleri katkı maddeleri ve kimyasal yapıları sebebiyle çevreye ve insan sağlığına zarar vermektedirler. Yüksek oranda toksik etkisi olan yağlayıcılara solunum yoluyla,



deri temasıyla, ağız yoluyla maruz kalınması ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır [68]. Bu sağlık sorunları dermatit, kanser ve solunum hastalıkları Şeklinde sıralanabilir [69].

#### **3.4.5.1. Dermatit**

Yağlayıcı içerisindeki kimyasal maddelerin deri ile uzun süreli teması sonucu deride çatlaklar, kızarıklık, su toplama, kaŐıntı gibi belirtilerin meydana geldiği rahatsızlıktır. Yağlayıcı içerisinde kimyasal maddelerin derideki proteinlere zarar vererek yağ tabakasını deforme etmesi sonucu meydana gelmektedir. Ortaya çıkan belirtilerin Őiddeti derinin yağlayıcıya maruz kalma süresi, kimyasal maddenin yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir . Kısa sürede tedavi edilmediği takdirde daha ciddi rahatsızlıklara sebep olmaktadır [68].



Şekil 3.15. Dermatit [70].

#### **3.4.5.2. Cilt Kanseri**

İçerisinde az rafine edilmiş hidrokarbonlar ve nitrit gibi kimyasalların bulunduğu yağlayıcılar, cilt kanserine neden olmaları sebebiyle 1985 yılından itibaren kullanımdan kaldırılmıŐtır. Yağlayıcı ile uzun süreli cilt temasında hastalığın belirtileri yıllar sonra ortaya çıkabilmektedir [71].



Şekil 3.16. Cilt kanseri [72].

### 3.4.5.3. Solunum Hastalıkları

Yağlayıcıların pH değerlerinin insan sağlığına ve işlem performansına uygun şekilde ayarlanması büyük önem taşımaktadır. Bu değerın çok düşük olması malzemenin oksitlenmesine ve paslanmasına sebep olurken, 9,5'tan yüksek olması astım, akciğer yetmezliği ve bronşit gibi ciddi solunum rahatsızlıklarına sebebiyet vermektedir [71]. Bu sebeple kullanılan sıvılara çok yakın mesafede bulunulmaması ve çalışma ortamının hijyenik olması gerekmektedir.

## BÖLÜM 4

### NANO METALİK MALZEMELER

Metaller; temin edilebilme kolaylığı, ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması, kolay şekillendirilebilme gibi özellikleri sebebiyle endüstriyel alanda en yaygın kullanım alanına sahip malzemelerdir. Çevresel koşullar ve çalışma parametrelerine bağlı olarak imalat uygulamaları sırasında hareket halindeki metal malzemeler arasında sıcaklık miktarı artmaktadır. Isı enerjisinin artışı, malzemelerin aşınma miktarını arttırarak makine parçalarının zarar görmesine sebebiyet vermektedir. Bu sebeple aşınma miktarının azaltılması büyük önem arz etmektedir.

Tarihin eski dönemlerinden beri aşınma miktarının azaltılması için imalat uygulamaları esnasında kesme sıvıları kullanılmaktadır. Mineral yağ kullanımıyla başlayan bu uygulama daha sonra mineral yağa katkı maddelerinin takviye edilmesiyle geliştirilen sentetik yağların elde edilmesiyle daha yaygın şekilde kullanılmaya başlamıştır. Fakat teknolojinin gelişmesiyle birlikte ağır yük ve yüksek hız koşullarında çalışan sistemlerde geleneksel formdaki sıvıların yetersiz kalması nedeniyle daha üstün özelliklere sahip nano yağlayıcılar geliştirilmiştir. Nano kesme sıvıları, su veya alkol bazlı yağlara nanopartiküllerin takviye edilmesiyle elde edilen soğutucu ve yağlayıcı özelliğe sahip sıvılardır.

Nano partiküller, yaklaşık 100 nm'den daha küçük boyuttaki malzemelerdir. Geleneksel formdaki malzemelere nazaran farklı özelliklere sahiptir. Partikül boyutunun küçülmesiyle birlikte yüzey - hacim oranlarındaki artış ve kuantum özelliklerinin değişmesi, partiküllerin mekanik, optik ve elektriksel özelliklerinin artmasını sağlamıştır. [73]. Kesme sıvısı içerisindeki üstün özelliklere sahip nano boyuttaki partiküller metal- metal temas bölgesinde daha iyi nüfuz ederek tribolojik performansı arttırmaktadır.

Talaşlı imalat uygulamaları, rulman ve dişli mekanizmaları gibi zorlu koşullarda çalışan sistemlerde açığa çıkan yüksek ısının ortamdaki uzaklaştırılması, aşınmanın azaltılmasına etki eden faktörlerden biridir. Bu sebeple nano kesme sıvısı üretiminde gümüş ve altın gibi ısı iletim katsayısı yüksek metallerin kullanımı büyük öneme sahiptir.

#### **4.1. ALTIN NANO PARTİKÜLLER**

Altın (Au) ısı iletim katsayısı (314 W/mK) en yüksek üçüncü metaldir. Yüksek termal iletkenliğiyle aşınma ortamında açığa çıkan ısıyı ortamdaki uzaklaştırarak soğutucu etki sağlamaktadır. Yüzeyde geniş yayılma özelliği sayesinde malzeme üzerine uygulanan yükün daha geniş bir alana yayılarak temas noktalarına etki eden kuvvetlerin azalmasını sağlamaktadır. Bu sayede aşınmayı ciddi oranda azaltmaktadır. Ayrıca çevresel faktörlerden etkilenmemesi sebebiyle oksidasyona uğramamaktadır ve bu sayede malzemelerin yüzey kalitesi olumsuz etkilenmemektedir.

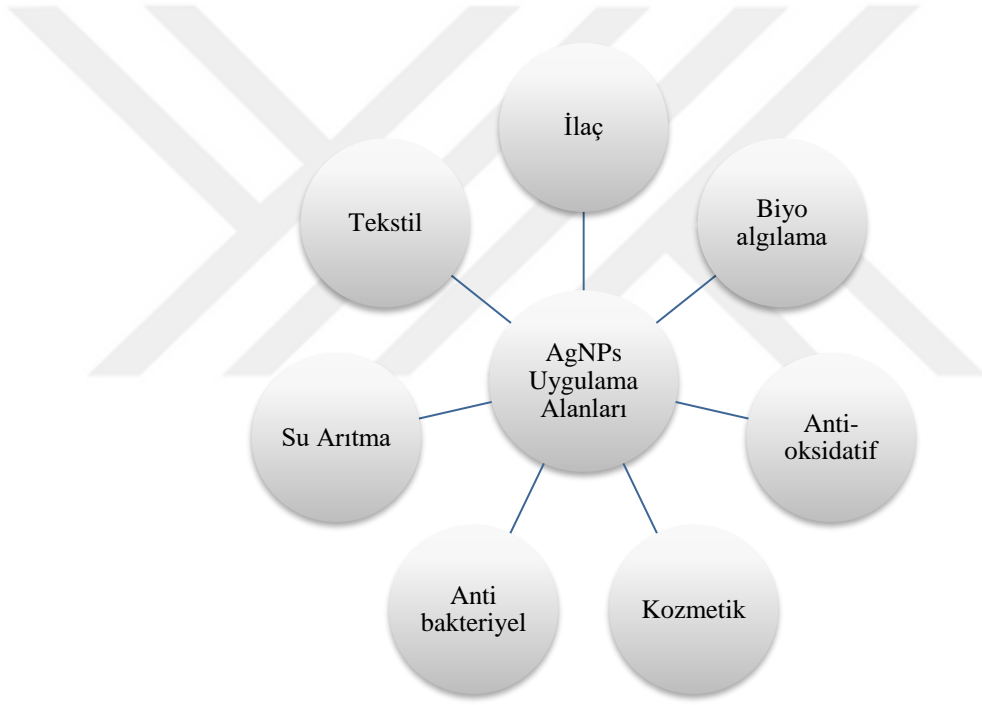
Toksik etkisinin olmaması ve gelişmiş optik özellikleri sayesinde tıp alanında hedefleme, görüntüleme ve algılama uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerin biyoyumsuzluk gibi problemler sebebiyle yetersiz kaldığı hedefleme uygulamalarında, ilacın doğrudan hedef bölgeye ulaştırılarak tedaviyi hızlandırıcı etki sağlaması tıp sektöründe büyük gelişme sağlamıştır [74].

#### **4.2. GÜMÜŞ NANO PARTİKÜLLER**

Nanopartiküllerin tribolojik performansları kimyasal ve fiziksel karakteristiklerine bağlıdır. Topaklanma eğilimi nano boyutta karakteristik davranışı belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Dış yüzeyi herhangi bir kimyasal ile kaplanmamış nano partiküllerin koloidal kararsızlığından dolayı topaklanma eğilimi yüksektir. Özellikle uzun süreli kullanımda bu eğilim daha da artacaktır. Topaklanmaya başlayan nanopartiküller, kimyasal olarak pasifleşme eğiliminde olduğu için sürtünmeye maruz temas bölgelerinde aşındırıcı etki göstermeye başlarlar.

Gümüş partiküllerinin nano boyutta olması yüzey alanını arttırmaktadır ve nano gümüş partikülleri sıvı içerisinde hareket serbestliği kazanarak homojen olarak dağılabilmektedir. Metal-metal temas bölgesinde topaklanma davranışı göstermemesi ve yüksek ısı transfer kabiliyetiyle sıcaklık artışını azaltması sayesinde aşınma miktarı minimize edilebilmektedir.

Nano gümüş partiküllerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri partikül boyutu, şekli, yüzey özellikleri, kaplama gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Partikül yapısına göre çeşitli özelliklerin elde edilebilirliği gümüşün birçok farklı uygulamada kullanımına imkan tanımaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Nano gümüşün uygulama alanları [75].

## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE METOT

#### 5.1. İŞ PARÇASI VE AŞINDIRICI MALZEME

Deneyleerde iş parçası malzemesi olarak AA7075-T6 malzemesi kullanılmıştır. Alüminyum 7XXX serisi Al-Zn alaşımıdır ve işlenebilir özelliğe sahip malzemelerdir. AA7075-T6 malzemesi yüksek kaynak performansı, hafifliği, yüksek mukavemeti ve yüksek korozyon direnci özellikleri sebebiyle havacılık, savunma sanayinde yaygın kullanılmaktadır [76]. Yüksek sertlikteki AA7075 malzemesi ısıl işleme tabi tutularak işlevselliği artırılmış ve daha mukvemetli ve sünek bir malzeme olan AA7075-T6 malzemesi elde edilmiştir. Deneyleerde kullanılan AA7075-T6 malzemesinin kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Aşındırıcı malzeme olarak ise AA7075-T6’dan daha sert bir malzeme olan 100Cr6 (AISI 52100) çeliği kullanılmıştır. Rulman çeliği olarak da bilinen 100Cr6 çeliği dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması sebebiyle özellikle imalat sektöründe geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. 100Cr6 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (%).

Element	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Ti	Cr	Si
Yüzde Ağırlığı	88,86	6,08	2,70	1,32	0,2	0,1	0,17	0,24	0,33

Çizelge 5.2. 100Cr6 (AISI 52100) çeliğinin kimyasal bileşimi (%).

Element	C	Si	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Cr	Mo
Yüzde Ağırlığı	1,02	0,27	0,32	0,025	0,015	1,53	≤0,1

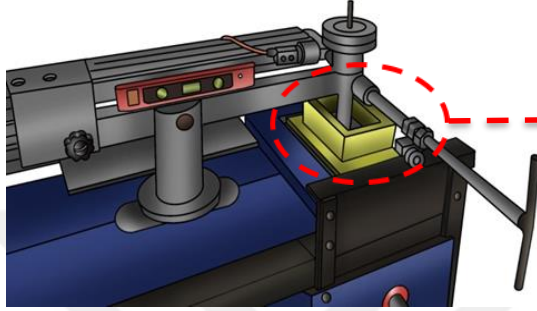
## 5.2. NANO AKIŞKANLARIN HAZIRLANIŞI

Gümüş nanoparçacıklar (AgNP'ler), literatürde tarif edildiği gibi Tollens işlemi ile üretilmiştir [77]. Gümüş nitrat ( $\text{AgNO}_3$ , %99,0, Sigma-Aldrich; 20 mL,  $2,5 \times 10^{-3}$  M), ammonia ( $\text{NH}_3$ , %25-30, Sigma-Aldrich; 20 mL,  $1,25 \times 10^{-2}$  M), ve sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ , Merck; 10 mL,  $5 \times 10^{-2}$  M)), Erlenmayer'de kuvvetlice (oda sıcaklığında 20 dakika boyunca 500 rpm'de manyetik bir karıştırıcı ile) karıştırılmıştır. Karıştırma sırasında 1,25 gr jelatin (Sigma-Aldrich) ve ardından damla damla sodyumborohidrid ( $\text{NaBH}_4$ , %98,0, Sigma-Aldrich; 5 mL, 0,1 M) eklenmiştir. Reaksiyon, 1 saat boyunca karıştırma koşulu altında devam etmiştir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra elde edilen kahverengimsi renkli nanopartiküller karanlıkta bekletilmiştir. Bu sentezde jelatin, şekillendirilmiş gümüş parçacıklarının yüksek aktif yüzeyini stabilize etmek için kaplama maddesi olarak görev yapar ve koloidal stabilite sağlar. Hazırlanan AgNP'lerin uzun süreli stabilitesi ve optik özellikleri Ultraviyole görünür (UV-vis) Spektrofotometri ile analiz edilmiştir. UV spektrumları, ölçümlerden önce ve sonra çift ışınlı bir spektrofotometre (Agilent Cary 60 UV-Vis Spektrofotometre) kullanılarak kaydedilmiştir. Hazırlanan nanoparçacıkların varlığı, transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile doğrulanmıştır. AgNP'lerin parçacık büyüklüğü, bir transmisyon elektron mikroskobu (Jeol 2100F RTEM 200 kV) ile alınan TEM görüntüsü ile belirlenmiştir. Bu çalışmada, etilen glikolde (EG) farklı miktarlarda gümüş nanopartikülleri içeren nano-sıvılar hazırlanmıştır. Bu bağlamda, AgNP'lerin koloidal süspansiyonları, EG hacmine göre 4, 8 ve 12'lik bir yüzdelik oranına uygun stok AgNP'lerinin uygun hacimlerinin eklenmesiyle EG'de çeşitli gümüş içerikleri dağıtılmıştır. Böylece, hazırlanan nanoakışkan koloidal süspansiyonları sırasıyla EG +%4, EG +%8 ve EG +%12 olarak adlandırılmıştır.

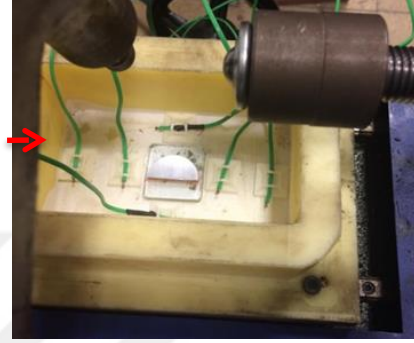
## 5.3. AŞINMA DENEYİ

Deneysel Şekil 5.1'de şematik resmi verilen ball-on-plate aşınma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. AA7075-T6 alüminyum alaşımı sabit malzeme (aşınan) malzeme (Şekil 5.2), 6 mm çapında AISI 52100 (100Cr6) çelik bilya karşı malzeme (aşındırıcı) olarak kullanılmıştır. Deneysel kuru ve sıvı (saf su, etilen glikol, EG+%4 AgNP, EG+%8 AgNP, EG+%12 AgNP) ortam koşullarında, 20 dev/dk ve 50 dev/dk kayma

hızı, 10 N ve 20 N yük parametreleri uygulanarak, 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.3). Bütün deneylerin sonunda malzemenin ağırlık kaybı 0,0001 gr hassasiyetinde teraziyle ölçülmüştür. Ayrıca test düzeneğine K tipi termokupllar yerleştirilerek deney süresi boyunca ortam sıcaklığının değişimi 7 farklı noktadan ölçülmüş ve nano gümüş partiküllerinin ısı transferine etkisi incelenmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. Ball on plate aşınma cihazı.





Şekil 5.2. Aşınma ortamında sıcaklık ölçümü.

Çizelge 5.3. Deney parametreleri.

Parametreler	Aşınma Ortamı	Yük (N)		Kayma hızı (dev/dk)	
		Seviye 1	10	Seviye 1	20
Seviye 2	Saf su	Seviye 2	20	Seviye 2	50
Seviye 3	Etilen glikol	Seviye 3	-	Seviye 3	-
Seviye 4	Etilen glikol + %4 Nano gümüş 	Seviye 4	-	Seviye 4	-



Çizelge 5.3. (Devam ediyor).

Seviye 5	Etilen glikol + %8 Nano gümüş 	Seviye 5	-	Seviye 5	-
Seviye 6	Etilen glikol + %12 Nano gümüş 	Seviye 6	-	Seviye 6	-

#### 5.4. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

Deney tasarımı full faktöriyel olarak modellenmiştir. Bu sebeple 6 farklı kesme sıvısı ortamı, 2 farklı yük ve 2 farklı kayma hızı için toplam 24 (6\*2\*2) deney gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ağırlık kaybı, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık değişimi olmak üzere 4 farklı çıkış değişkeni analiz edilmiştir. Deney sonuçlarının istatistiki olarak anlamlılığını ölçmek için varyans analizi (ANOVA) ve R-Kare değerleri kullanılmıştır [78]. ANOVA, giriş değişkenlerinin çıkış değişkenleri üzerindeki etkisinin sayısal olarak ölçülebilmesini ve giriş parametreleri için belirlenen seviyelerin etki sıralamasının elde edilmesini (Main factor analyze) sağlar [77–79]. Bu sayede sistem optimizasyonu için hangi giriş değişkeninin daha önemli ve etkili olduğu belirlenir. R-Kare değeri ise, kurulan deney setinin başarısı için temel bir ölçüttür. Giriş parametrelerinin aşınma davranışını açıklayabilme kabiliyeti R-Sq değerinin yüksekliğine bağlıdır. Deneysel tecrübelerle bağlı olarak, aşınma prosesi için % 70 ve üzeri R-Sq değerinin deneysel anlamlılık açısından yeterli olduğu söylenebilir. İstatistiki analizler için Minitab programında aşağıdaki eşitlikler kullanılarak ANOVA sonuçları elde edilmiştir [81].

$$GnKT = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{\sum n} \quad (5.1)$$

$$GAKT = \sum_{j=1}^k \left[ \frac{(\sum x_j)^2}{n_j} \right] - \left[ \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \quad (5.2)$$

$$GAKT = \sum_{j=1}^c r(\bar{X}_j - \bar{x})^2 \quad (5.3)$$

$$G\dot{I}KT = GnKT - GAKT \quad (5.4)$$

$$GAKO = \frac{GAKT}{GASD} \quad (5.5)$$

$$G\dot{I}KO = \frac{G\dot{I}KT}{G\dot{I}SD} \quad (5.6)$$

$$FH = \frac{GAKO}{G\dot{I}KO} \quad (5.7)$$

$$GASD = Grup\ sayısı - 1 \quad (5.8)$$

$$G\dot{I}SD = n - Grup\ sayısı \quad (5.9)$$

$$GnSD = n - 1 \quad (5.10)$$

## 5.5. YÜZEY ANALİZİ

Kesme sıvılarının malzemelerin tribolojik performansına etkisini değerlendirebilmek için sadece istatistiksel analizlerden elde edilen verileri yorumlamak yeterli değildir. Deneyler süresince malzeme yüzeyinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler tribolojik performansın incelenmesinde büyük önem taşımaktadır. Çalışmada, sürtünmeye maruz kalan yüzeylerde meydana gelen aşınma mekanizmaları taramalı elektron mikroskobu (CARL ZEISS GEMINI FESEM) ile incelenmiştir. Yüzeydeki elementlere bağlı olarak aşınma mekanizmalarına karar verebilmek için

EDX analizleri kullanılmıştır. Phase View optik profilometre ile aşınmış yzeyelelerin yzeye pürüzlülüğü üç boyutlu olarak incelenmiştir.

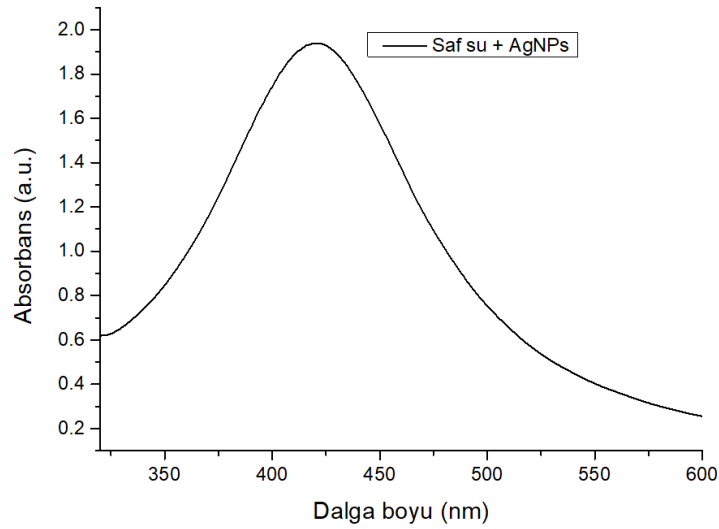


## BÖLÜM 6

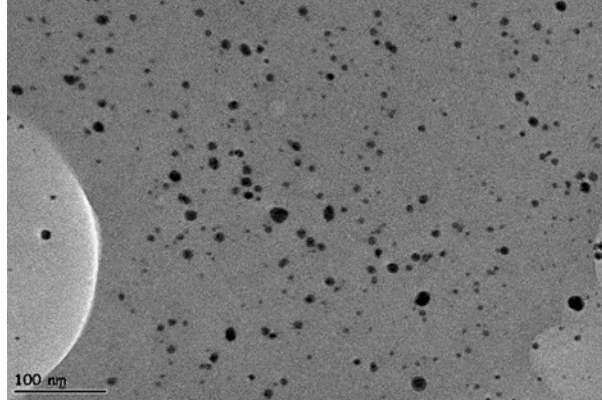
### DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

#### 6.1. NANOAKIŞKANLAR VE GÜMÜŞ NANOPARTİKÜLLERİNİN KARAKTERİZASYONU

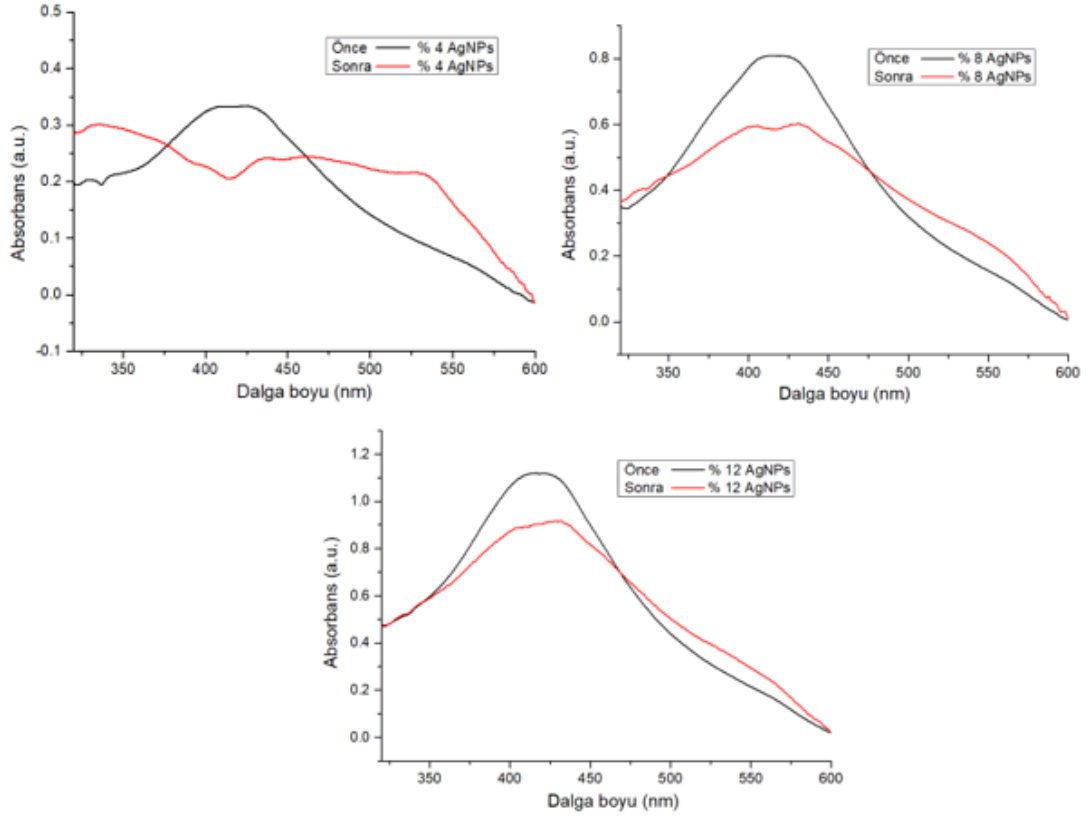
Nanopartikül süspansiyonları, boyuta, şekle ve etrafındaki ortama duyarlı olan belirli dalga boylarında UV spektrumunda yüzey plazmon bandı (SPB) olarak da bilinen tek bir maksimum absorbansa sahiptir [82]. Çeşitli şekillerde onlarca nanometre içinde küresel şekilli ve büyüklükteki gümüş nanopartiküller, 390 ile 430 nm arasında güçlü bir SPB sergilemektedir [82, 83]. Suda dağılan AgNP'lerin temsili bir UV spektrumu, Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Nanopartiküller, 420 nm dalga boyunda güçlü bir SPB sergilemiştir. Bu, nanopartiküllerin 100 nm'den küçük olmasını sağlar. Nanopartikül morfolojisi transmisyon elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 6.2, küresel şekilde hazırlanan AgNP'lerin tipik bir TEM görüntüsünü göstermektedir. Ortalama parçacık çapının  $10 \pm 3.1$  nm olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 6.1. Suda dağılan Ag nanopartiküllerinin UV spektrumu.



Şekil 6.2. Hazırlanan Ag nanopartiküllerinin TEM fotoğrafı.



Şekil 6.3. EG içine dağılmış Ag nanopartikülleri.

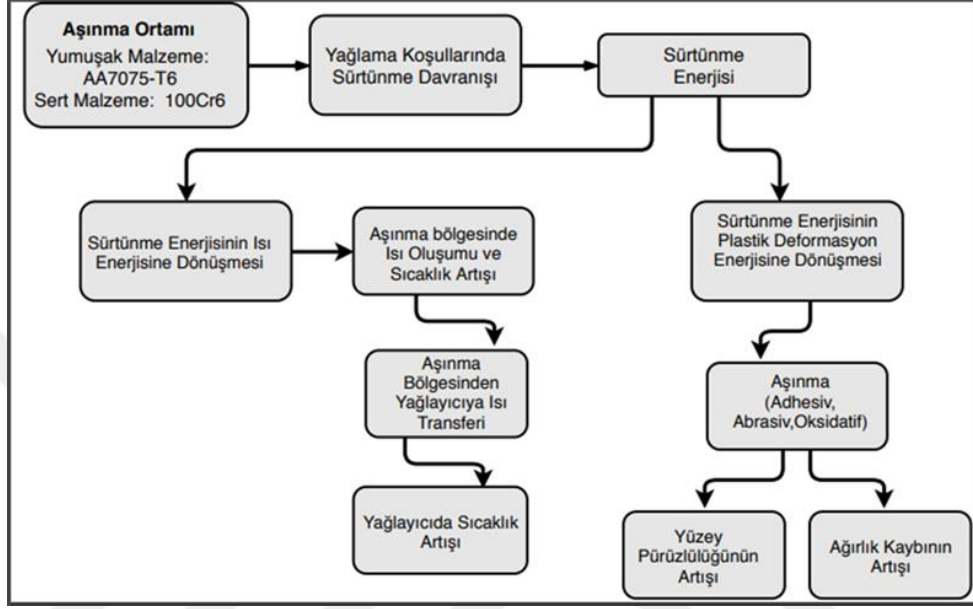
Elde edilen AgNP'ler, deneyler için hazırlanan EG kesme sıvıları içinde dağıtılmıştır. Nanoakışkanlar, stok AgNP'leri baz sıvının farklı yüzdelerinde dağıtmak suretiyle hazırlanmıştır.. Elde edilen nano sıvılar, deneylerden önce ve sonra UV spektrumları kaydedilerek test edilmiştir. Şekil 6.3, EG içinde dağılmış farklı gümüş nanoparçacık içeriğine sahip nano-akışkanların UV spektrumlarını göstermektedir. EG'de dağılmış

nanoparçacıkların absorpsiyon profillerinin suda dağılmış nanopartiküllerin elde edilen spektrumlarına benzer şekilde görüldüğü görülebilir, ancak SPB'leri EG'de genişler ve müdahale edilen iki absorpsiyon maksiması varmış gibi görünmektedir. Bu durumun bant şeklini ve pozisyonunu bozan solvent etkisinden kaynaklandığı düşünülebilir. Hazırlanan tüm nanoakışkanların UV-vis spektrumu birbirine benzemekte ve 410-430 nm aralığında görünen bir SPB sergilemektedir. Bu, nanoparçacık konsantrasyonu arttıkça artan pik yoğunluğunun, absorbansın doğrudan nanoparçacık konsantrasyonu ile ilişkili olduğu, ancak nano-akışkanda herhangi bir kütle oluşumunun hiçbir belirtisini sağlamayan SPB tepe pozisyonunda ve biçiminde önemli bir kayma olmadığı anlamına gelir. AgNPs süspansiyonunun (hacimce %4 EG) dağıtılmasıyla hazırlanan EG+%4 nanoakışkan numunesinin, EG'de, bir SPB'nin deneyden önce 420 nm civarında bir dalga boyunda net bir şekilde görüldüğü bir UV-vis spektrumu sergilemiştir. Ancak, deneyi yaptıktan sonra hiçbir SPB gözlemlenmemiştir. Bu, test edilen malzeme üzerindeki kaba çatlakların doldurulmasında neredeyse tüm nanoparçacıkların olası yönelmesine neden olmuş olabileceği düşünülmektedir [85]. Malzeme ile etkileşime giren nanopartiküllerin bir dereceye kadar çatlaklara transfer olması beklenir. Bu etki EG + %4 için ciddi olarak yaşanmıştır. Bu durum EG + % 8 ve EG + %12 nano akışkanları için gözlenmedi, daha yüksek miktarda nanoparçacık içerdikleri için çatlakları işgal eden nanopartiküllerin miktarı bu durumda ihmal edilebilir. Deneylerden önce ve sonra EG + % 8 ve EG + %12 için kaydedilen UV spektrumları, deneyden sonra nano akışkanlar için yaklaşık 556 nm'de ortaya çıkan ikinci bir genişletilmiş bant dışında birbirine benzer davranış sergiledi. Deneyden önce görülmeyen bu geniş bant, deney sırasında üretilen bazı aşınma parçacıkları tarafından bozulduğu düşünülen çevre ortamda topaklar oluşturmak için nanopartiküllerin bağlanmasıyla ilişkilendirilebilir [84]. Bununla birlikte, bu ikinci genişletilmiş bant sadece deney sonuçlarını önemli ölçüde etkilemeyeceğine inanılan bir ölçüde sınırlanmıştır.

## **6.2. DENEYSEL SONUÇLARIN İSTATİSTİKSEL VE GÖRSEL ANALİZİ**

DeneySEL sonuçların analizi için kabul edilen aşınma hipotezi Şekil 6.4'de akış diyagramı ile gösterilmiştir. Birbiri üzerinde kayan yüzeyler, kayma hızı etkisi altında sürtünme enerjisi kazanmaktadır. Sürtünme enerjisi de enerji balansı açısından ısı

enerjisi ve plastik deformasyon enerjisine dönüşmektedir. Sürtünme enerjisinin fiziksel göstergesi sürtünme katsayısı, ısı enerjisinin fiziksel göstergesi sıcaklık artışı, plastik deformasyon enerjisinin fiziksel göstergesi ise kütle kaybı ve yüzey formu değişimidir.



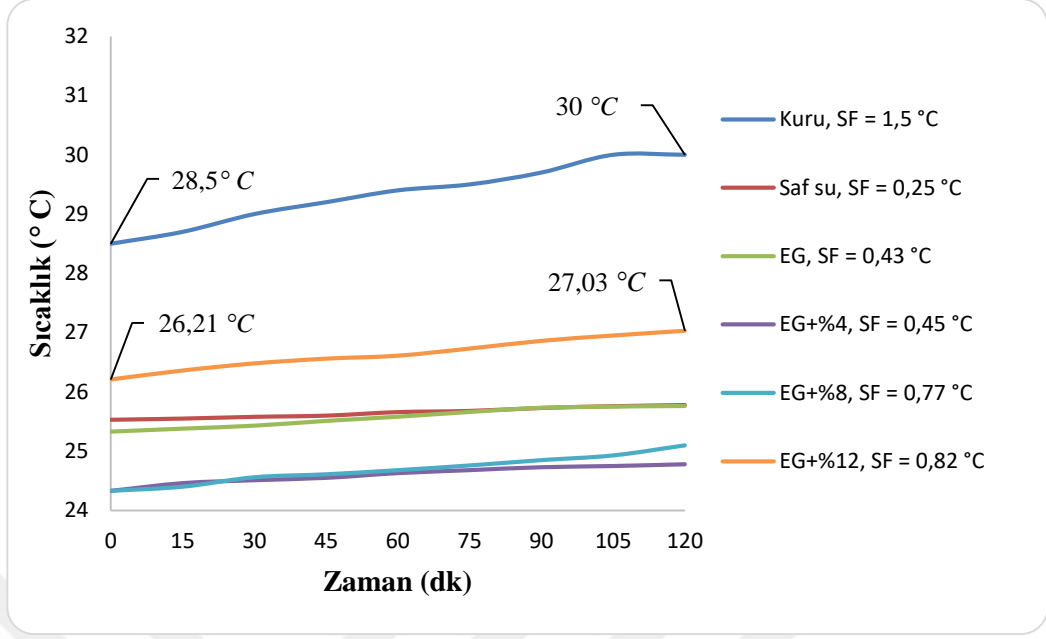
Şekil 6.4. Aşınma hipotezi akış diyagramı.

Aşınma ortamında yağlayıcı kullanıldığı durumlarda ise sürtünme ortamındaki ısı enerjisinin bir kısmının yağlayıcıya transfer olması, sürtünme ortamının sıcaklığının düşmesi ve yağlayıcının sıcaklığının artması beklenir. İlaveten, yağlayıcıların sıkıştırılmaz olması nedeniyle plastik şekil değişim ortamında oluşan basıncın belirli bir kısmını taşıyabilecekleri ve bu sayede aşınma direncini arttıracakları iddia edilebilir. Ayrıca sınır yağlama koşullarında, yüzeyin belirli bir kısmında (yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı olarak) şekil değişimi metal-metal teması ile değil, metal-sıvı yüzeyi teması ile gerçekleşmektedir. Bu durumda yüzey pürüzlülüğü değerinde azalış sağlayacağı öngörülmektedir. Belirtilen etkenlere göre sürtünme ortamı-yağlayıcı etkileşimini analiz edebilmek için gerekli olan parametreler sürtünme katsayısı, yağlayıcı sıcaklığı değişimi, yüzey pürüzlülüğü ve ağırlık kaybıdır.

Performans kıyaslamasında öncelikli olarak aşınma ortamı sıcaklığının değişimi incelenmiştir. Aşınan malzemeden ortaya çıkan ısıya ne kadarlık miktarının aşınma

havuzunda bulunan deney sıvısına aktarılabildiğini belirleyebilmek için sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Şekil 6.5'te 20 N yük ve 20 rpm hız koşullarında aşınma havuzu sıvısının sıcaklık değişim grafiği verilmiştir. Diğer koşullarda oluşan sıcaklık değişim grafiklerinden elde edilen sıcaklık farkı (SF) değerleri ise Çizelge 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.5'e göre kuru aşınma şartlarında AA7075-T6 malzemenin sıcaklığı ortalama olarak 1,5 °C artmıştır. Literatürde 100 N yükleme şartlarında 5 °C sıcaklık artışı olduğu belirtilmiştir [24]. Mevcut çalışma kapsamında kullanılan yük maksimum 20 N olup, sıcaklık farkı ortalama 1,5 °C olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler çalışmanın literatür ile uyumlu olduğunu ve deneysel tasarımın güvenilirliğini göstermektedir. Saf su ortamında yapılan deneylerde sıvı sıcaklığını ortalama 0,3 °C, etilen glikol ortamında yapılan deneylerde ise sıvı sıcaklığı ortalama 0,4 °C artış göstermiştir. Bu durum aşınma deneyleri boyunca 1,5 °C'ye eşdeğer ısının saf su ortamında %20, etilen glikol ortamında ise %27 kadarının aşınma ortamından sıvıya aktarılabildiğini göstermektedir. Bu sonuç etilen glikolün aşınma ortamına saf sudan daha fazla nüfuz edebildiğini göstermekte ve çalışma için kurulan hipotez kapsamında, nano gümüş partiküllerinin aşınma ortamına nüfuziyeti için etilen glikol ile kolloidal süspansiyon hazırlanması yaklaşımının doğru olduğu kanıtlanmaktadır. %4 oranında nano gümüş ilave edilen etilen glikol kolloidal süspansiyonu için sıcaklık değişimi yaklaşık olarak 0,46 °C olarak ölçülmüş ve saf etilen glikol ortamına göre %3'lük bir ısı transferi artışı olduğu belirlenmiştir. %8 ve %12'lik nano gümüş ilave edilen etilen glikol kolloidal süspansiyonu için sıcaklık değişimi yaklaşık olarak sırasıyla 0,6 °C ve 0,8 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, etilen glikol içindeki nano gümüş miktarının, % 4 yoğunluğa kadar kayda değer bir etkisinin olmadığını, % 8 ve % 12'lik konsantrasyonlarda ısı transferini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca %12 nano gümüş katkı oranına kadar, nano gümüş miktarı ile aşınma ortamından transfer edilen ısı miktarı arasında doğrusal bir ilişkinin bulunduğu iddia edilebilir.





Şekil 6.5. 20 N ve 20 dev/dk deney koşulları için sıcaklık değişim grafiği.

Deneysel çalışmada sıcaklık değişimi ile birlikte sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri de ölçülmüştür. Farklı değerlerdeki yük (10 N, 20 N) ve hız (20 dev/dk, 50 dev/dk) parametreleriyle birlikte tam faktöriyel olarak tasarlanan deneysel çalışmaya ilişkin sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiştir. ANOVA ile elde edilen deneysel sonuçlar da Çizelge 6.2-6.5’de verilmiştir. Kuru deney koşullarının sıvı ortam koşullarına göre tribolojik açıdan kötü sonuç vereceği bilinen bir durumdur. Bu sebeple sıcaklık değişimi, ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısı parametreleri için gerçekleştirilen ANOVA testinde, istatistiki anlamlılık açısından kuru aşınma koşullarında elde edilen veriler analize dâhil edilmemiştir. Yüzey pürüzlülüğü parametresi analiz edildiğinde ise kuru deney şartları dikkate alınmadan anlamlı sonuçların elde edilemediği görülmüş ve bu sebeple üç boyutlu yüzey topoğrafya görüntüleri kullanılmıştır.

Çizelge 6.1. Deney giriş ve çıkış parametreleri.

Giriş Parametreleri			Çıkış Parametreleri			
Aşınma Ortamı	Yük (N)	Kayma Hızı (dev/dk)	Sürtünme Katsayısı ( $\mu$ )	Ağırlık Kaybı (mg)	Sıcaklık Farkı ( $^{\circ}C$ )	Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu m$ )
Kuru	20	20	0,4582	11,8000	1,5	1,06
Kuru	10	20	0,3695	6,7667	1,6	1,56
Kuru	20	50	0,2557	10,7000	1,3	1,72
Kuru	10	50	0,2243	6,1667	1,4	2,61
Saf Su	20	20	0,0516	9,3333	0,25	0,56
Saf Su	10	20	0,0456	6,0000	0,28	0,6
Saf Su	20	50	0,0557	10,0000	0,34	0,4
Saf Su	10	50	0,0353	5,9667	0,39	0,47
EG	20	20	0,0501	7,3667	0,43	0,47
EG	10	20	0,0424	4,7333	0,38	0,85
EG	20	50	0,0542	9,8667	0,35	0,49
EG	10	50	0,0313	5,3667	0,4	0,27
EG + %4 AgNP	20	20	0,0569	6,6667	0,45	0,66
EG + %4 AgNP	10	20	0,0402	4,5000	0,4	0,41
EG + %4 AgNP	20	50	0,0556	8,0333	0,42	0,32
EG + %4 AgNP	10	50	0,0310	5,3000	0,56	0,55
EG + %8 AgNP	20	20	0,0442	4,5333	0,77	0,6
EG + %8 AgNP	10	20	0,0370	3,7667	0,47	0,38
EG + %8 AgNP	20	50	0,0472	7,8000	0,66	0,32

Çizelge 6.1. (Devam ediyor).

EG + %8 AgNP	10	50	0,0280	5,0667	0,75	0,22
EG + %12 AgNP	20	20	0,0428	3,7718	0,82	0,33
EG + %12 AgNP	10	20	0,0386	2,6667	0,87	0,51
EG + %12 AgNP	20	50	0,0480	5,8653	0,7	0,24
EG + %12 AgNP	10	50	0,0275	3,8667	0,8	0,45

Çizelge 6.2. Sürtünme katsayısı için ANOVA tablosu.

	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı, (SS)	Kareler ortalaması, (MS)	F Oranı ( $\alpha = \%5$ )	P	Etki oranı (%)
Kesme sıvısı	4	0,000226	0,000057	2,65	0,081	<b>13,44</b>
Yük (N)	1	0,001116	0,001116	52,40	0,000	<b>66,35</b>
Kayma Hızı	1	0,000063	0,000063	2,98	0,108	<b>3,75</b>
Hata	13	0,000277	0,000021			<b>16,47</b>
Toplam	19	0,001682				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-sq = % 83,54</b>			<b>R-sq (adj)= % 75,95</b>		

Sürtünme katsayısı için ANOVA testinden elde edilen değerlere göre (Çizelge 6.2) yük parametresi sürtünme katsayısı üzerinde %66,35 oranıyla en yüksek etkiye sahiptir. Kayma hızı parametresi ise %3,75 değeri ile sürtünme katsayısı üzerinde en düşük etkiyi göstermiştir. Sürtünme katsayısını etkileyen fakat deney tasarımına dahil edilemeyen titreşim, malzemenin mikroyapısı gibi diğer faktörler ise %16,47 hata oranı ile açıklanmıştır. Kesme sıvısı kullanımı sürtünme katsayısını %13,44 oranında etkilemektedir. Deneylerde elde edilen anlamlılık katsayısı ise %75,95 oranındaki *R-Sq (adj)* istatistiki değeri ile açıklanmıştır. Matematiksel olarak modellenbilmesi zor olan sürtünme katsayısı parametresinin, deneysel olarak %75,95 oranında açıklanabilmesi deneysel çalışmanın yeterliliğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre yük arttıkça sürtünme katsayısı ciddi oranda etkilenmektedir. Fakat kesme sıvısının kullanıldığı ortamlarda yük artışının etkisi nedeniyle oluşabilecek tribolojik problemler %13 civarında minimize edilebilecektir. Kesme sıvısının oluşturacağı sınır yağlama tabakası sayesinde yük nedeniyle oluşan basıncın bir kısmı

kesme sıvısı molekülleri tarafından taşınabilecektir. Yükün taşınması esnasında sınır bölgede hareket halinde olan kesme sıvısı moleküllerinin iç sürtünme ve basınç etkisiyle ısınması kaçınılmaz bir durumdur. Bu sebeple oluşan ısının aşınma bölgesinden bertaraf edilebilmesi için mikron boyutlardaki sınır yağlama bölgesine nano gümüş partikül takviyesi yapılması, tribolojik koşullarını iyileştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Nano gümüş penetrasyonun analizi için de, deneyler süresince ölçülen kesme sıvısı sıcaklığı parametresi için ANOVA testi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 6.3’de verilmiştir. Çizelge 6.3’e göre kesme sıvısı sıcaklığının farklılaşması %86,27 oranıyla kesme sıvılarının değişimiyle açıklanabilmektedir. Deneylerde kullanılan kesme sıvısı türü değişikçe, kesme bölgesinden transfer olan ısı miktarında da ciddi oranda değişiklik olmuştur. Yük ve kayma hızı parametrelerinin sıcaklık değişimine olan etkisi ise istatistiki olarak anlamlı değildir ( $p_{yük} = 0,782 > 0,05$  and  $p_{hız} = 0,531 > 0,05$ ). Aşınma bölgesinde sıcaklığın artması, aşınan malzemeden parçacık kopmasını kolaylaştırıcı etki gösterecektir. Isınma ile birlikte plastik şekil değişimi için gereken enerji azalacak ve malzeme deformasyonu kolaylaşacaktır. Bu yaklaşıma göre kesme sıvılarının ısı iletme kabiliyeti arttıkça aşınan malzemede oluşan malzeme kaybının azalması beklenir. Bu yaklaşımı analiz edebilmek için ağırlık kaybı parametresinin ANOVA testi sonuçları tartışılmalıdır (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.3. Sıcaklık değişimi için ANOVA tablosu.

	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı, (SS)	Kareler ortalaması, (MS)	F Oranı ( $\alpha = \%5$ )	P	Etki oranı (%)
Kesme sıvısı	4	0,640170	0,160043	21,19	0,000	<b>86,27</b>
Yük (N)	1	0,000605	0,000605	0,08	0,782	<b>0,08</b>
Kayma Hızı	1	0,003125	0,003125	0,41	0,531	<b>0,42</b>
Hata	13	0,098195	0,007553			<b>13,23</b>
Toplam	19	0,742095				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-sq = % 86,77</b>			<b>R-sq (adj)= % 80,66</b>		

Çizelge 6.4. Ağırlık kaybı için ANOVA tablosu.

	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı, (SS)	Kareler ortalaması, (MS)	F Oranı ( $\alpha = \%5$ )	P	Etki oranı (%)
Kesme sıvısı	4	33,465	8,3662	13,07	0,000	<b>39,32</b>
Yük (N)	1	33,822	33,8225	52,82	0,000	<b>39,74</b>
Kayma Hızı	1	9,506	9,5063	14,85	0,002	<b>11,16</b>
Hata	13	8,324	0,6403			<b>9,78</b>
Toplam	19	85,118				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-sq = % 90,22</b>			<b>R-sq (adj)= % 85,71</b>		

Çizelge 6.4'deki ANOVA testi değerlerine göre, kesme sıvısı %39,32, yük parametresi %39,74 etki oranı ile ağırlık kaybını etkilemektedir. Yük oranı arttıkça oluşacak gerilme artışı nedeniyle malzeme kaybının artması plastisite teorisi açısından beklenen bir durumdur. Çizelge 6.4'de dikkat çeken durum ise kesme sıvılarının malzeme kaybı üzerinde yük parametresi kadar etkisi olmasıdır. Çizelge 6.1'teki sıcaklık değişimi değerleri incelendiğinde maksimum sıcaklık değişiminin 1,5 °C olduğu görülmektedir. Bu değer malzemenin plastik şekil değişimi davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olabileceğini iddia etmek anlamsızdır. Fakat aşınan malzeme miktarı mikrogram mertebesinde ve bu boyutlarda sürtünmeden dolayı anlık oluşan sıcaklık çok daha yüksek değerlere ulaşacaktır. Bu sebeple mikro boyutlarda oluşan sıcaklığın plastik şekil değişimini etkilemeye yeter değerlerde olduğu iddia edilebilir. Aşınma bölgesinde oluşan ısı, kesme sıvıları ile hızlı bir şekilde transfer edilebildiği ölçüde malzeme kaybı değeri olumlu bir şekilde etkilenmektedir.

AA7075-T6 malzeme hem yüzeydeki oksit tabakası hem de yüksek dayanım özelliği sebebiyle aşınmaya direnç gösterebilecek niteliktedir. Kesme sıvılarının kullanıldığı ortamlarda aşınma direncinin daha da artması beklenir. Yüksek aşınma direnci kabiliyeti, malzeme yüzeyi ve içyapısında meydana gelebilecek deformasyonu azaltarak yüzey formunu ve yüzey pürüzlülük değerini olumlu etkileyecektir. Bu yaklaşım yüzey pürüzlülüğü için gerçekleştirilen ANOVA testi ile analiz edilmiştir (Çizelge 6.5). Çizelge 6.5'te kesme sıvısının, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili (%77,19) parametre olduğu görülmektedir. Kullanılan sıvıların yüzey pürüzlülüğü minimizasyonu üzerine olan performans sıralaması için 20 N yük ve 20 dev/dk

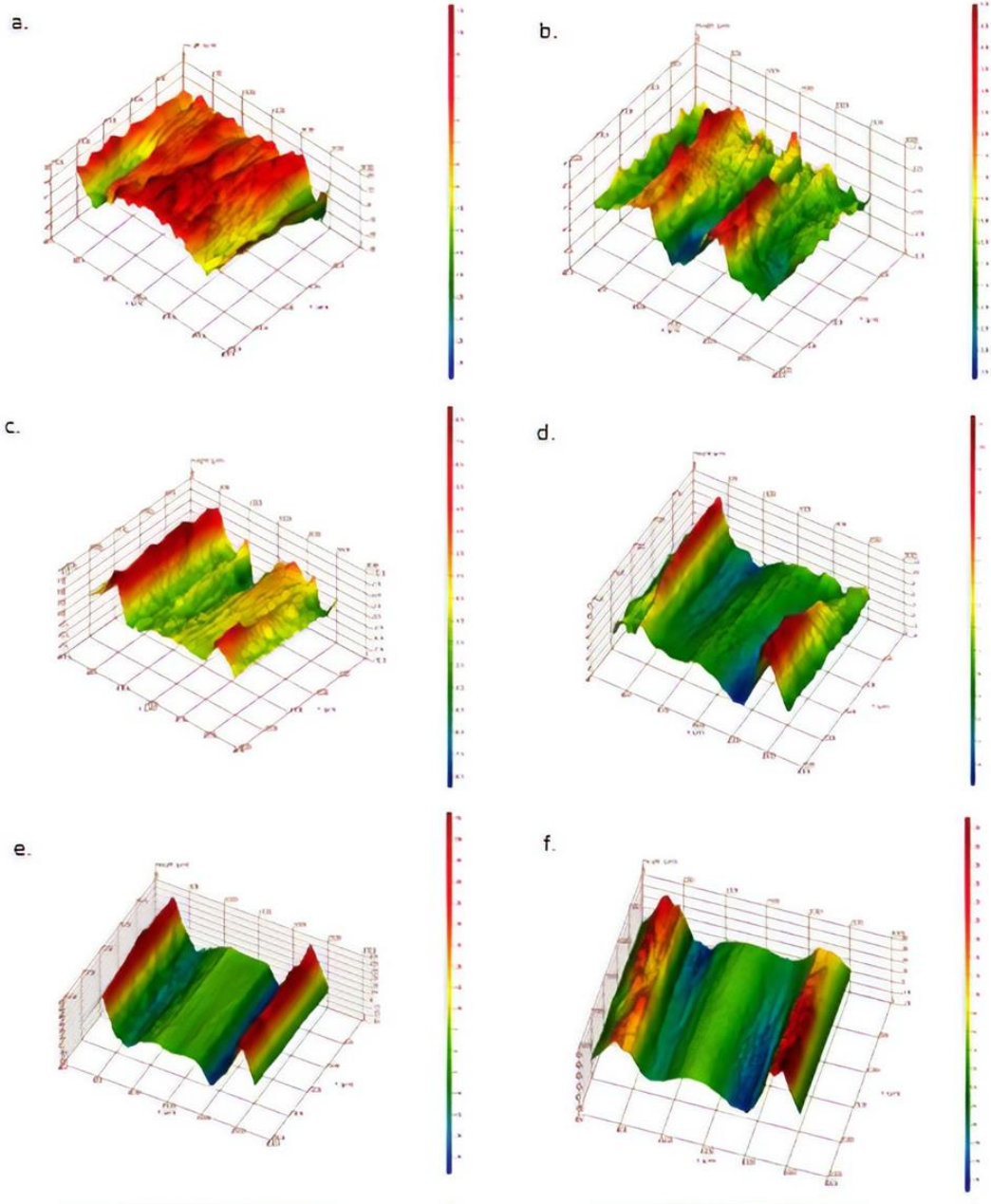
koşullarındaki (en zorlu deney koşulları) aşınma numunelerinin optik profilometreden elde edilen yüzey topoğrafyası görüntüleri dikkate alınmıştır (Şekil 6.6). Şekil 6.6.a ve 6.6.b sırasıyla kuru kesme ve saf su kullanılan aşınma koşulları için elde edilen aşınma yüzey topoğrafyalarını göstermektedir. Kuru kesme şartlarına yüzeyde çok sayıda tepelik oluşumu gözlenirken, saf su kullanılan deney koşullarında tepelik miktarı kuru kesmeye nazaran azaltılabilmektedir. Bu durum adhezyon aşınması ile açıklanabilir. Yapışma eğiliminin artması nedeniyle gerçekleşen düzensiz plastik şekil değişimi yüzeyde çok sayıda tepelik oluşumuna sebebiyet vermiştir. Şekil 6.6.c ve 6.6.d sırasıyla EG ve EG+%4 AgNP koşullarında oluşan görüntülerdir. EG'nin kullanılmaya başlamasıyla yüzey pürüzlülüğünde ciddi oranda bir iyileşme olduğu ve EG+%4 koşullarında yüzey kalitesinin daha da arttığı görülmektedir. Aşınma bölgesine nüfuz eden kesme sıvısı miktarının artması ve ısıyı ortam şartlarından uzaklaştıran ajanların varlığı sebebiyle abrasif aşınma davranışı daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmektedir. Şekil 6.6.e ve 6.6.f sırasıyla EG+%8 ve EG+%12 koşullarında oluşan görüntülerdir. EG + % 4 koşulu ile kıyaslandığında, EG+%8 ve EG+%12'nin kullanıldığı koşullarda malzeme yüzey kalitesinin artan AgNP miktarına bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Çizelge 6.5. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.

	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı, (SS)	Kareler ortalaması, (MS)	F Oranı ( $\alpha = 5\%$ )	P	Etki oranı (%)
Kesme sıvısı	5	5,57213	1,11443	11,84	0,000	<b>77,19</b>
Yük (N)	1	0,14107	0,14107	1,50	0,239	<b>1,95</b>
Kayma Hızı	1	0,00015	0,00015	0,00	0,969	<b>0,002</b>
Hata	16	1,50578	0,09411			<b>20,86</b>
Toplam	23	7,21913				<b>100</b>
<b>Anlamlılık</b>	<b>R-sq = 79,14%</b>			<b>R-sq (adj)= 70,02%</b>		

ANOVA analizlerinden (Çizelge 6.2-6.5) elde edilen verilere göre kesme sıvısı parametresinin tribolojik performans açısından yüksek oranda önemli ve anlamlı olduğu görülmektedir. Bu aşamada tartışılması gereken unsur kesme sıvılarının performans sıralamasıdır. Performans sıralaması için ANOVA testinden elde edilen faktör analizi değerleri kullanılmış ve çıkış parametrelerine göre etkililik sıralamaları

Çizelge 6.6'da verilmiştir. Çizelge 6.6'daki performans sıralamalarına göre % 8 ve % 12 AgNP katkılı kesme sıvıları bütün değerlendirme ölçütlerinde yüksek performans vermiştir. Fakat %4 AgNP katkılı kesme sıvısı ile EG'nin performans açısından anlamlı bir farklılık gösterdiği iddia edilemez. Bu durumda belirli bir yüzde oranına kadar AgNP'nin tribolojik açıdan yeterli değişim sağlayamadığı, %4 ve üzeri kolloidal süspansiyonlarda ise tribolojik performansın daha anlamlı olarak artmaya başladığı anlaşılmaktadır. Çizelge 6.6'dan çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise kesme sıvılarının penetrasyon kabiliyetidir. Saf su kullanılan bütün deney şartlarında olumsuz performans izlenmiştir. Fakat EG (type of alcohol) bütün koşullarda saf sudan, bazı deney koşullarında ise %4 AgNP katkılı kolloidal süspansiyondan yüksek performans sağlamıştır. Bu durum kullanılan kesme sıvısının aşınma bölgesine nüfuz edebilme kabiliyeti ile açıklanabilir. EG'nin düşük yoğunluğu ( $0,8 \text{ gr/cm}^3$ ) ve denatürasyon özelliği saf suya göre aşınma bölgesine nüfuz edebilme kabiliyetini arttırmaktadır. Kesme sıvılarına eklenen katışıkları açısından da bu durum önem taşımaktadır. Aşınma bölgesine tribolojik performans ajanı olarak nüfuz ettirilmek istenen katışıkları (bu çalışmada AgNP) etki edebilme kabiliyetinin, taşıyıcı kesme sıvısı ile bağlantılı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.6. Aşınmış yüzeylerin topoğrafta görüntüleri of a. Kuru koşullar, b. Saf su koşulları, c. EG koşulları, d. EG + %4 AgNP koşulları, e. EG + %8 AgNP koşulları, f. EG + %12 AgNP koşulları.



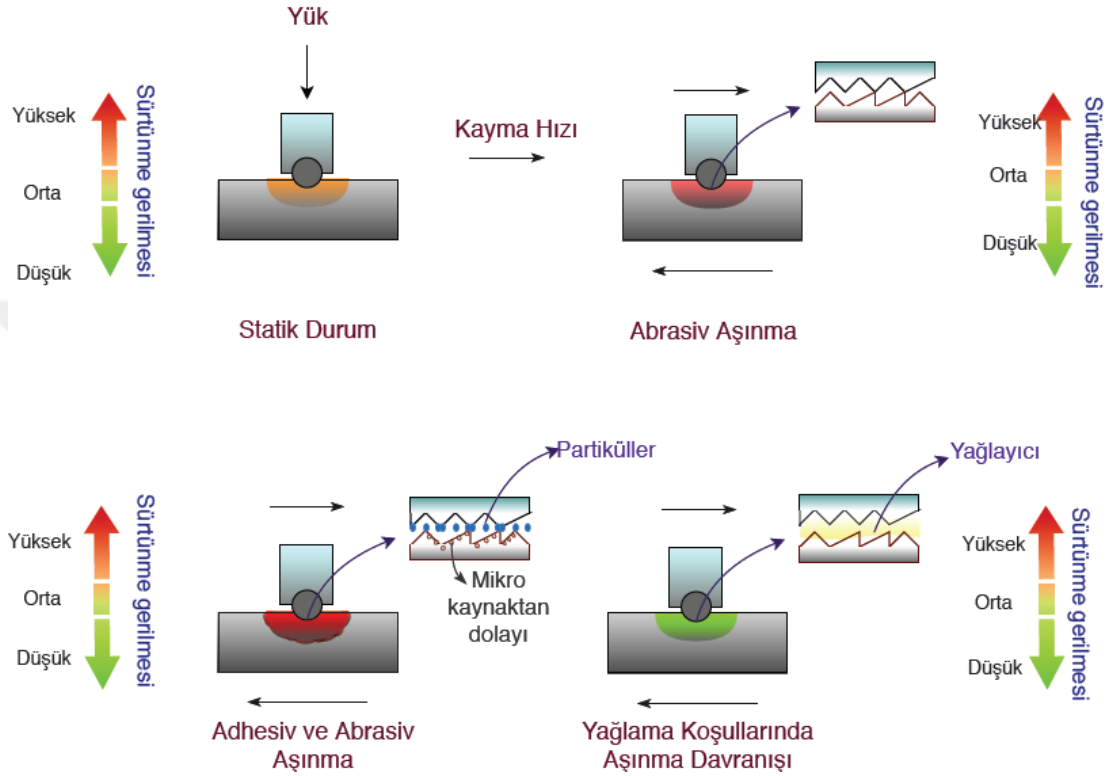
Çizelge 6.6. Kesme sıvılarının performans sıralaması.

<b>Çıkış Parametreleri</b>	<b>En Etkili</b>	<b>Etkili</b>	<b>Normal</b>	<b>Az Etkili</b>	<b>Etkisiz</b>
Sürtünme Katsayısının Minimizasyonu	<i>EG + %8 AgNP</i>	<i>EG + %12 AgNP</i>	<i>EG</i>	<i>EG + %4 AgNP</i>	<i>Saf Su</i>
Ağırlık Kaybı Minimizasyonu	<i>EG + %12 AgNP</i>	<i>EG + %8 AgNP</i>	<i>EG + %4 AgNP</i>	<i>EG</i>	<i>Saf Su</i>
Sıcaklık Farkı Maksimizasyonu	<i>EG + %12 AgNP</i>	<i>EG + %8 AgNP</i>	<i>EG + %4 AgNP</i>	<i>EG</i>	<i>Saf Su</i>
Yüzey Pürüzlülüğü Minimizasyonu	<i>EG + %8 AgNP</i>	<i>EG + %12 AgNP</i>	<i>EG + %4 AgNP</i>	<i>EG</i>	<i>Saf Su</i>

### **6.3. SEM VE EDX ANALİZLERİYLE AŞINMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Birbiri ile temas halindeki yüzeylerde kayma hızı ve yük ile oluşturulan mekanik enerji sürtünme enerjisini meydana getirmektedir. Birbirine temas eden yüzey pürüzlülük noktalarında oluşan sürtünme enerjisi sonucu malzeme yüzeyi plastik deformasyona uğramaktadır. Plastik deformasyon esnasında oluşan kesme kuvvetleri nedeniyle oluşan çizikler ve aşınan malzemedan kopan nano-mikro boyutlu partiküller, abrasiv aşınma mekanizmasını oluşturmaktadır. Yüzeylerin sürtünme enerjisine bağlı olarak açığa çıkan diğer bir parametrede ısıdır. Isı enerjisine bağlı sıcaklık artışı ve sürtünen malzemelerin arasında oluşan Van der Waals bağı sebebiyle sürtünen malzemeler arasında mikro kaynak oluşumu gerçekleşmektedir [86]. Mikro kaynak oluşumu adhesive aşınma mekanizması olarak tanımlanmaktadır. Sürtünme esnasında izafi hareketin sürekliliği sebebiyle kaynaklanmış malzemelerin birbirinden ayrılması ve aşınmaya maruz malzemedan parçacık kopmaları oluşmaktadır. Aşınan malzemedan kopan mikro boyuttaki partiküllerin yüzey pürüzlülükleri arasına nüfuz etmesiyle malzeme yüzeyinde hem adhesiv hem de abrasiv aşınma mekanizması meydana gelmektedir. Bu durum ise adhesion kaynaklı abrazyon mekanizması olarak ifade edilebilir. Aşınma mekanizmalarının birlikte oluşumu aşınma miktarını maksimum seviyeye çıkararak, malzemenin kütle kaybının artışına ve yüzeydeki deformasyonu artırarak yüzey morfolojisinin bozulmasına sebep olmaktadır. Aşınma bölgesine

yağlayıcı akışkan takviyesiyle yüzeyler arasında sınır yağlama tabakası oluşturularak yüzeylerin temas alanı azaltılabilmektedir. Ayrıca akışkanın aşınma bölgesinde meydana gelen ısıyı transfer etme kabiliyeti sayesinde mikro kaynak oluşumu azaltılarak aşınma miktarı minimize edilebilmektedir (Şekil 6.7).

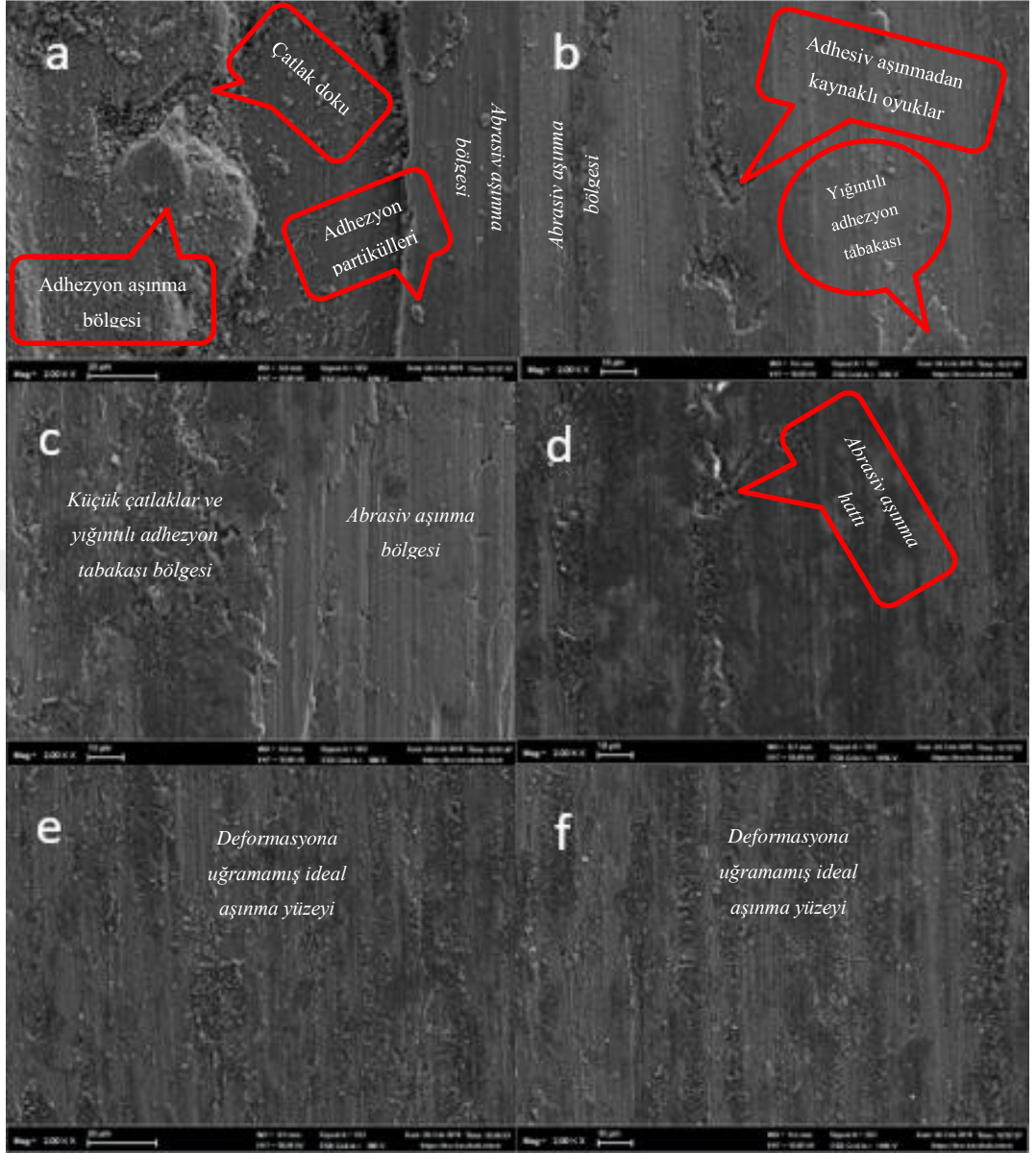


Şekil 6.7. SEM analizinde aşınma modeli.

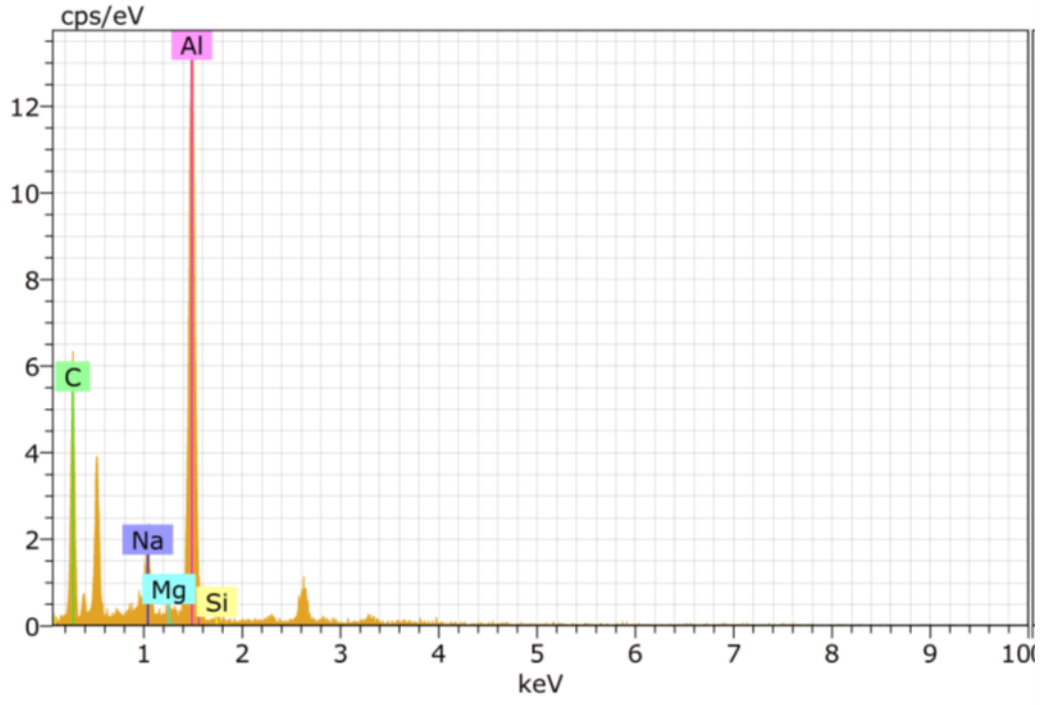
Aşınma deneyleri sonrasında malzeme yüzeylerinde meydana gelen aşınma mekanizmalarını belirleyebilmek için aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri incelenmiştir. 20 N 20 dev/dk (en zorlu koşullar) deney koşullarındaki aşınma numunelerinin yüzey görüntüleri Şekil 6.8’de verilmiştir. Kuru deney koşullarında (Şekil 6.8.a), aşınan malzeme yüzey morfolojisinin gözle görülebilir seviyede zarar gördüğü ve malzeme yüzeyinde derin boşluklar meydana geldiği görülmektedir. Kesme sıvısının kullanılmadığı durumlarda, aşınma temas noktalarında yüksek gerilmelere bağlı mikro kaynak ve plastik deformasyon oluşmaktadır. Adhezyon olarak adlandırılan bu aşınma mekanizması sebebiyle malzemede yığıntı kaynak bölgeleri veya parçacıklı yüzeyler oluşmuştur. Ayrıca adhezyon aşınması sebebiyle kopan parçacıklar abraziv aşınma etkisini arttırmış (ikincil abrazif aşınma) ve yüzey

formu ciddi oranda bozulmuştur. Saf su kullanılan deney koşullarında (Şekil 6.8.b) abrasif ve adhesif aşınma görülmüş, fakat adhezyona bağlı yüzey deformasyonunun kuru aşınma koşullarına kıyasla önemli oranda azaldığı gözlemlenmiştir. Saf su koşullarında adhezyondan kaynaklı ikincil abrasiv aşınma davranışı gözlenmemiştir. Kuru ve saf su koşullarında oluşan yüzeylerin EDX analizleri de adhezyon aşınmasının varlığını kanıtlamaktadır (Şekil 6.9-6.10). Şekil 6.9'da kuru aşınma koşulları için verilen EDX görüntüsüne göre yüzeyde 52,93° karbon ve 43,43° alüminyum difraksiyonu oluşmuştur. Şekil 6.10'da verilen saf su koşullarında ise 20,88° karbon, 73,77° alüminyum difraksiyonu oluşmuştur. Matris malzeme alüminyum olmasına rağmen yüksek miktarda karbon varlığı, adhezyon aşınması yaklaşımını doğrulamaktadır.

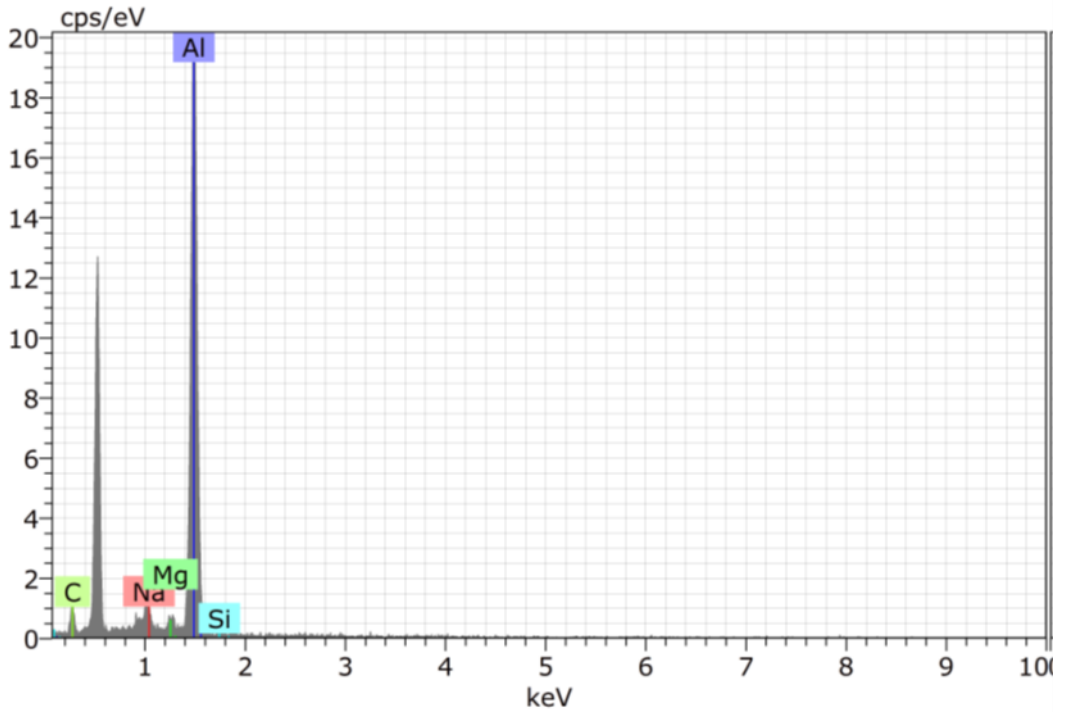
Şekil 6.8.c ve 6.8.d'de sırasıyla EG ve %4 AgNP deney koşullarından elde edilen görüntüler verilmiştir. EG'nin kullanımıyla, aşınma bölgesinde sıcaklığın düşürülmesi ve nüfuziyetin artırılması sayesinde aşınan ve aşındırıcı malzeme arasındaki mikrokaynak oluşumu yani adhesiv aşınma azaltılabilmektedir. Bu sayede yumuşak malzeme yüzeyinden oluşan çukurcuk ve tepeciklerin boyutu minimize edilmiş ve yüzey stabilitesi sağlanmıştır. Topoğrafya görüntülerinden elde edilen sonuçlarla SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar birbirini doğrular niteliktedir. Şekil 6.8.e ve 6.8.f'de sırasıyla % 8 AgNP ve % 12 AgNP deney koşullarından elde edilen görüntüler verilmiştir. Şekil 6.8.e ve 6.8.f'de, malzeme yüzeyinde oluşan kontrolsüz deformasyonlar, mikro kaynaklar ve derin aşınma izleri görülmemektedir. Bu durum, AgNP kullanımının gözlemlenebilir adhezyon aşınmasını tamamen önleyebildiğini kanıtlamaktadır. İlaveten, %12 AgNP kullanılan yüzey için alınan EDX görüntülerinde (Şekil 6.11) 6,93° gümüş difraksiyonu görülmüştür. Gümüş elementinin aşınma bölgesinde ajan olarak varlığı, aşınma karakteristiğinin değiştirilmesine önemli oranda etki edebilmiştir.



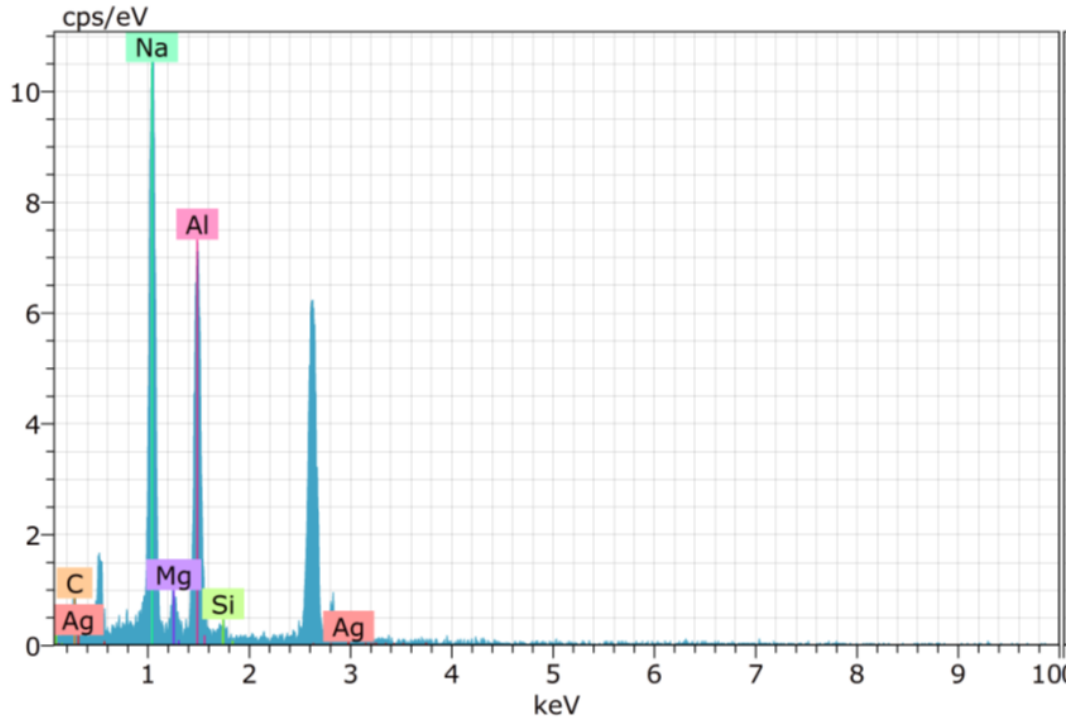
Şekil 6.8. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri a. Kuru koşullar, b. Saf su koşulları, c. EG koşulları, d. EG + %4 AgNP koşulları, e. EG + %8 AgNP koşulları, f. EG + %12 AgNP koşulları.



Şekil 6.9. Kuru koşullar için EDX analizi ( $C=52,93^\circ$ ,  $Na=4,55^\circ$ ,  $Mg= 0,62^\circ$ ,  $Al= 41,31^\circ$ ,  $Si=0,59^\circ$ ).



Şekil 6.10. Saf su koşulları için EDX analizi ( $C= 2,88^\circ$ ,  $Na= 3,02^\circ$ ,  $Mg=1,63^\circ$ ,  $Al=73,77^\circ$ ,  $Si=0,70^\circ$ ).



Şekil 6.11. EG+%12 AgNP koşulu için EDX analizi ( $C=12,96^\circ$ ,  $Na=40,61^\circ$ ,  $Mg=2,98^\circ$ ,  $Al=34,89^\circ$ ,  $Si=1,62^\circ$ ,  $Ag=6,93^\circ$ )

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, nanogümüş takviyeli kesme sıvısının AA7075-T6 alüminyum alaşımının tribolojik performansına etkisi farklı deney koşullarında (kuru, saf su, EG, EG + %4, EG + %8 ve EG+%12) yapılan aşınma deneyleriyle incelenmiştir. İlk olarak, farklı kesme sıvısı, kayma hızı ve yük parametreleri altında yapılan deneyler süresince aşınma bölgesinde meydana gelen sıcaklık değişimi hakkında bilgi edinebilmek için sıcaklık değişim grafikleri incelenmiştir. Daha sonra kesme sıvısı, kayma hızı ve yük parametrelerinin sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü, ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısı parametrelerine etkisi ANOVA ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca kesme sıvılarının yüzey morfolojisine etkisi SEM, EDX ve topoğrafya görüntüleri ile detaylı bir şekilde incelenmiş ve yüzeylerin aşınma karakteri belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. Sıcaklık değişim grafikleri incelendiğinde, kuru ortam koşullarında aşınan malzemede meydana gelen sıcaklık artışı 1,5 °C'dir. Bu değer, %8 ve %12 nanogümüş takviyeli kesme sıvılarının kullanıldığı deney koşullarında sırasıyla 0,6°C ve 0,8°C kadar azaldığı görülmektedir. Nanogümüş konsantrasyonundaki artışın, aşınma ortamından transfer edilen ısı miktarını artırdığı belirlenmiştir.
2. Kesme sıvılarının sürtünme katsayısı üzerinde %13,44 oranında etkili olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısının azaltılmasında kesme sıvılarının performans sıralaması iyiden kötüye; EG+%8 AgNP, EG+%12 AgNP, EG, EG+%4 AgNP, saf su olarak belirlenmiştir.
3. Kesme sıvılarının sıcaklık değişimi üzerinde %86,27 oranında etkili olduğu görülmüştür. Aşınma bölgesi ısısının azaltılmasında kesme sıvılarının performans sıralaması iyiden kötüye; EG + %12 AgNP, EG + %8 AgNP, EG+ %4 AgNP, EG, saf su olarak belirlenmiştir.

4. Kesme sıvılarının ağırlık kaybı üzerinde %39,32 oranında etkili olduğu görülmüştür. Aşınan madde miktarının azaltılmasında kesme sıvılarının performans sıralaması iyiden kötüye; EG+%12 AgNP, EG+%8 AgNP, EG+%4 AgNP, EG, saf su olarak belirlenmiştir.
5. Kesme sıvılarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde %77,19 oranında etkili olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında kesme sıvılarının performans sıralaması iyiden kötüye; EG+%8 AgNP, EG+%12 AgNP EG+%4 AgNP, EG, saf su olarak belirlenmiştir.
6. Yüzey topoğrafyası görüntülerine göre, EG'nin yüzey kalitesinin artmasında yüksek oranda önemli olduğu ve artan nanogümüş miktarına göre yüzey kalitesinin daha da arttığı anlaşılmaktadır. EG'nin yüksek oranda etkili olması, nanopartikülü aşınma bölgesine taşıyan sıvının penetrasyon kabiliyetinin önemli olduğunu göstermektedir.
7. SEM ve EDX görüntülerinden çıkarılan sonuçlara göre; kuru aşınma şartlarında abrazyon, adhezyon ve adhezyondan kaynaklı ikincil abrazyon aşınmasının olduğu, saf su şartlarında abrazyon ve adhezyon aşınmasının olduğu, EG ve EG+%4 AgNP şartlarında kontrollü abrazyon ve etkisi düşük adhezyon aşınmasının olduğu, EG+%8 AgNP ve EG+%12 AgNP şartlarında ise yüzeyin sadece abrazyon aşınmasına maruz kaldığı ve herhangi bir yüzey deformasyonunun meydana gelmediği görülmüştür.

## ÖNERİLER

1. Farklı hız ve yük koşulları altında nano altın, nano bakır gibi ısıl iletkenliği yüksek diğer metal nano partiküller incelenebilir.
2. Nano gümüş partiküllerinin tribolojik davranışı titanyum, paslanmaz çelik ve kalıp çeliklerinde incelenebilir.
3. Optik profilometre ile incelenen aşınma yüzeylerin morfolojisi AFM ile daha küçük kesitler halinde incelenebilir.



## KAYNAKLAR

1. H. K. Gahr Zum, "Microstructure and Wear of Materials", Netherlands (1987).
2. P. J. Blau, "Tribosystem Analysis: A Practical Approach to the Diagnosis of Wear Problems", 65 (4): London, New York (2016).
3. X.Q. Wang and A. S. Mujumdar, "Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review", *International Journal of Thermal Sciences*, 46 (1): 1–19, January (2007).
4. K. Lu, "Theoretical Analysis of Colloidal Interaction Energy in Nanoparticle Suspensions", *Ceramics International*, 34 (6): 1353–1360 (2008).
5. L. Xu, Y. Zhang, D. Zhang, and M. Leng, "Preparation and Tribological Properties of Ag Nanoparticles/Reduced Graphene Oxide Nanocomposites", *Industrial Lubrication and Tribology*, 70 (9): 1684–1691 (2018).
6. Chetan, B. C. Behera, S. Ghosh, and P. V. Rao, "Application of Nanofluids During Minimum Quantity Lubrication: A Case Study in Turning Process", *Tribology International*, 101: 234–246 (2016).
7. Zhou, J., Wu, Z., Zhang, Z., Liu, W. and Xue, Q. "Tribological Behavior and Lubricating Mechanism of Cu Nanoparticles in Oil", *Tribology Letters*, 8 (4): 213–218 (2000).
8. Asrul, M. N., Zulkifli, W. M., Masjuki, H. H. and Kalam, M. A., "Tribological Properties and Lubricant Mechanism of Nanoparticle in Engine Oil", *Procedia Engineering*, 68: 320–325 (2013).
9. Wu, Y. Y. Tsui, W. C. and Liu, T. C., "Experimental Analysis of Tribological Properties of Lubricating Oils With Nanoparticle Additives", *Wear*, 262 (7–8): 819–825 (2007).
10. Dai, W., Kheireddin, B., Gao, H. and Liang, H., "Roles of Nanoparticles in Oil Lubrication", *Tribology International*, 102, 88–98 (2016).
11. Xie, H., Jiang, B., He, J., Xia, X. and Pan, F. "Lubrication Performance of MoS<sub>2</sub> And SiO<sub>2</sub> Nanoparticles As Lubricant Additives in Magnesium Alloy-Steel Contacts", *Tribology International*, 93, 63–70 (2016).

12. Luo, T., Wei, X., Huang, X., Huang, L. and Yang, F., “Tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as lubricating oil additives”, *Ceramics International*, 40 (5): 7143–7149 (2014).
13. Najiha, M. S., Rahman, M. M. and Kadirgama, K., “Performance of Water-Based TiO<sub>2</sub> Nanofluid During the Minimum Quantity Lubrication Machining of Aluminium Alloy, AA6061-T6,” *Journal of Cleaner Production*, 135, 1623–1636 (2016).
14. Ma, S., Zheng, S., Cao, D. and Guo, H., “Anti-Wear and Friction Performance of ZrO<sub>2</sub> Nanoparticles as Lubricant Additive”, *Particuology*, 8 (5): 468–472 (2010).
15. Ajithkumar J. P. and Anthony Xavier, M., “Influence of Nano Lubrication in Machining Operations-A Review,” *Materials Today: Proceedings*, 5(5): 11185–11192 (2018).
16. Amrita, M., Shariq, S. A., Manoj, M. and Gopal, C. “Experimental Investigation on Application of Emulsifier Oil Based Nano Cutting Fluids in Metal Cutting Process”, *Materials Today: Proceedings*, 97, 115–124 (2014).
17. Hernández Battez, A., González, R., Viesca, J. L., Fernández, J. E., Díaz Fernández, J. M., Machado, A., Chou, R. and Riba, J., “CuO, ZrO<sub>2</sub> and ZnO Nanoparticles as Antiwear Additive in Oil Lubricants”, *Wear*, 265 (3–4): 422–428 (2008).
18. Chan, C. Y., Lee, W. B. and Wang, H. “Enhancement of Surface Finish Using Water-Miscible Nano-Cutting Fluid in Ultra-Precision Turning”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 73, 62–70 (2013).
19. Tosun, N., Rostam, S. and Rasul, S. “Use of Nano Cutting Fluid in Machining”, 17–21, August (2018).
20. Gara L. and Zou, Q. “Friction and Wear Characteristics of Oil-Based ZnO Nanofluids”, *Tribology Transactions*, 56 (2): 236–244 (2013).
21. Amrita, M., Srikant, R. R. and Sitaramaraju, A. V. “Performance Evaluation of Nanographite-Based Cutting Fluid in Machining Process”, *Materials and Manufacturing Processes*, 29 (5): 600–605 (2014).
22. Gupta, M. K., Sood, P. K. and Sharma, V. S. “Optimization of Machining Parameters and Cutting Fluids During Nano-Fluid Based Minimum Quantity Lubrication Turning of Titanium Alloy by Using Evolutionary Techniques,”

- Journal of Cleaner Production*, 135, 1276–1288 (2016).
23. Huang, Y., Han, S., Liu, S., Wang, Y. and J. Li, “Preparation and Tribological Properties of Surface-Modified Calcium Borate Nanoparticles as Additive in Lubricating Oil”, *Industrial Lubrication Tribology*, 66 (1): 143–150 (2014).
  24. Lee, C. G., Hwang, Y. J., Choi, Y. M., Lee, J. K., Choi, C. and Oh, J. M. “A Study on the Tribological Characteristics of Graphite Nano Lubricants,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10 (1): 85–90 (2009).
  25. Sánchez-López, J. C., Abad, M. D., Kolodziejczyk, L., Guerrero, E. and Fernández, A. “Surface-Modified Pd and Au Nanoparticles for Anti-Wear Applications”, *Tribology International*, 44 (6): 720–726 (2011).
  26. Mao, C., Huang, Y., Zhou, X., Gan, H., Zhang, J. and Zhou, Z. “The Tribological Properties of Nanofluid Used in Minimum Quantity Lubrication Grinding”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71 (5–8): 1221–1228 (2014).
  27. Khandekar, S., Sankar, M. R., Agnihotri, V. and Ramkumar, J. “Nano-Cutting Fluid for Enhancement of Metal Cutting Performance”, *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (9), 963–967 (2012).
  28. Peng, D. X., Kang, Y., Chen, S. K. and Chang, Y. P., “Dispersion and Tribological Properties of Liquid Paraffin With Added Aluminum Nanoparticles”, *Industrial Lubrication and Tribology*, 62 (6): 341–348 (2010).
  29. Revuru, R. S., Pasam, V. K., Syed, I. and Paliwal, U. K., “Development of Finite Element Based Model for Performance Evaluation of Nano Cutting Fluids in Minimum Quantity Lubrication”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, 75–85 (2018).
  30. Sharma, A. K., Tiwari, A. K. and Dixit, A. R., “Progress of Nanofluid Application in Machining: A Review,” *Materials and Manufacturing Processes*, 30 (7): 813–828 (2015).
  31. Shokoohi Y. and Shekarian, E. “Application of Nanofluids in Machining Processes -A Review”, *Journal of Nanoscience and Technology*, 2 (21): 59–63 (2016).

32. Suryawanshi S. R. and Pattiwar, J. T. “Tribological Performance of Commercial Mobil Grade Lubricants Operating With Titanium Dioxide Nanoparticle Additives”, *Industrial Lubrication and Tribology* (2018).
33. Jiao, D., Zheng, S., Wang, Y., Guan, R. and Cao, B. “The Tribology Properties of Alumina/Silica Composite Nanoparticles as Lubricant Additives”, *Applied Surface Science*, 257 (13): 5720–5725 (2011).
34. Saravanakumar, N., Prabu, L., Karthik, M. and Rajamanickam, A., “Experimental Analysis on Cutting Fluid Dispersed With Silver Nano Particles”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (2): 645–651 (2014).
35. Chattopadhyay R. and Park, M., "Surface Wear: Analysis, Treatment and Prevention" (2001).
36. Bhushan, B., "Introduction to Tribology, 2nd. ed." (2013).
37. Bhushan, B., "Principles and Applications of Tribology, 2nd. ed. ", Wiley, New York (2013).
38. Stachowiak, G. and Batchelor, A. W., "Engineering Tribology", Butterworth-Heinemann (2013).
39. İnternet: “What is Tribology? | Bearing Design, Lubrication , Friction by GGB." <https://www.ggbearings.com/en/company/tribology> (2019).
40. Hutchings, I., “Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, 2nd. ed.”, United Kingdom (2017).
41. İnternet:“Sürtünme Kuvveti”  
[https://www.wikiwand.com/tr/Sürtünme\\_kuvveti](https://www.wikiwand.com/tr/Sürtünme_kuvveti).
42. Tarakçı, Öğr. Gör. Dr. M., “Hareket Kanunları Uygulamaları”,  
[http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.tarakci/Fizik\\_I/Ders\\_06.pdf](http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.tarakci/Fizik_I/Ders_06.pdf).
43. Johnson, K. L., “Contact Mechanics”, Clarendon Oxford, UK (1985).
44. TMMOB Makine Mühendisleri Odası, “Makine Mühendisliği El Kitabı- Cilt 1” (1994).
45. İnternet: “Lastik Teknolojisi ve Lastik Sektörü Bilgi Sitesi” (2011).  
<http://lastikteknolojisesektoru.blogspot.com/>.
46. Adatepe, H., Cengil, M. and Güneş, B., “Statik Yük Altındaki Kaymalı Yataklarda Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi”, 25–34 (2012).

47. İnternet: “Hidrodinamik Kaymalı Yataklar.”  
<http://konstruk.mkm.yildiz.edu.tr/dosya/kyatakB.pdf>.
48. İnternet: “Mechanisms of Wear”,  
[https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear).
49. Harsha, A. P., Tewari, U. S. and Venkatraman, B., “Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Polyaryletherketone Composites”, *Wear*, 254( 7–8): 680–692 (2003).
50. Erdem, V. E., Arisoy, C. F. , Başman, G. and Şeşen, M. K., “SAE 1060 Çeliğinin Erozif Aşınma Özelliklerinin Aşınmaya Dirençli Ticari Çelik Plakalarla Karşılaştırılması” (2005).
51. İnternet: “Various Forms of Erosive Wear Mechanisms”,  
[https://www.researchgate.net/figure/Various-forms-of-erosive-wear-mechanisms-a-abrasive-cutting-erosion-b-fatigue\\_fig2\\_325049197](https://www.researchgate.net/figure/Various-forms-of-erosive-wear-mechanisms-a-abrasive-cutting-erosion-b-fatigue_fig2_325049197).
52. Coşar, D., “8622RH ve 20MnCr5 Çeliklerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerine Gaz Karbürleme İşleminin Etkisinin İncelenmesi”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, pp:44 (2014).
53. Stachowiak, G. W., “Wear - Materials, Mechanisms and Praticce”, *John Wiley & Sons Ltd*, (2005).
54. Kajdas, C., “Tribochemistry”, *Proceedings of the World Tribology Congress*, Vienna (2000).
55. Blau, P. J., “Friction Science and Technology, 2nd ed.”, *CRC Press* (2008).
56. Bowden, F. P. and Tabor, D., “The Friction and Lubrication of Solids, 2nd ed.”, *Oxford: Oxford University Press* (2001).
57. Oliver, C. S. and Haltner, A. J., “Frictional Properties of Some Solid Lubricant Films under High Load”, *Journal of Chemical & Engineering Data*, 6(1): 128–130 (1961).
58. Salomon, G., Begelinger, A. and Gee, A. W. J., B. “Friction Properties of Phthalocyanine Pigments”, *Wear*, 10(5): 383–396 (1967).
59. Bhushan, B., “Modern Tribology Handbook”, *CRC Press* (2001).
60. Booser Richard, E., “The Handbook of Lubrication”, vol: 2 (1984).
61. Stepina, V. and Vesely, V. “Lubricants and Special Fluids”, *Elsevier*, (1992).

62. Pirro, D. M. and Daschner, E., “Lubrication Fundamentals”, **CRC Press**, New York (2001).
63. Çetin, M. H., “Bitkisel Esaslı Kesme Sıvılarının Tornalamadaki Performanslarının Araştırılması”, **Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Gebze (2010).
64. İnternet: S. Latta., “INFORM” (1990).
65. İnternet: Shanahan, P. S. and Landis, A., “INFORM” (1994).
66. Mortier, R. M., Orszulik, S. T. and Fox, M. F., “Chemistry and Technology of Lubricants, 3rd ed.”, New York (2010).
67. Anderson, D. G., Schwender, L. and Chen, G., “Synthesis and Characterization of Silahydrocarbons - A Class of Thermally Stable Wide-Liquid-Range Functional Fluids”, 25 (3): 299–308 (1982).
68. Şirin, Ş. and Şirin, E. “Merkezi Soğutma Sisteminde Kullanılan Metal İşleme Sıvılarının İnsan Sağlığına Olumsuz Etkileri”, **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 2 (2): 444–457 (2016).
69. Yücel, E., Günay, M., Ayyıldız, M., Erkan, Ö. ve Kara, F. “Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkileri ve Sürdürülebilir Kullanımı”, **6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)** (2011).
70. İnternet: “<http://www.steadyhealth.com>” (2011).
71. Erel, F. and Işık Coskunes, Dr. Fatma, “Metal İşleme Akışkanları Kullanımında İş Sağlığı ve Güvenliği”, 11-13, Ankara (2012).
72. İnternet: Anonim, <http://www.saglikal.com/wp-content/uploads/BCCarcinoma.jpg>.
73. Madras, “Introduction to Materials”, November (2016).
74. G. Tan, M. A. Onur, and N. Sağlam, “Nano Gold and Biomedicine: Scientific Letter”, **Türkiye Klinikleri Journal of Medical Sciences** (2012).
75. X. F. Zhang, Z. G. Liu, W. Shen, and S. Gurunathan, “Silver nanoparticles: Synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches”, **International Journal of Molecular Sciences**, 17 (9), (2016).
76. İnternet: “Alüminyum Alaşımları”, <http://www.varzene.com/Ozel-Metaller/Aluminyum-Alasimlari>.

77. M. Sivera *et al.*, "Silver nanoparticles modified by gelatin with extraordinary pH stability and long-term antibacterial activity", *PLOS ONE*, 9 (8), (2014).
78. M. DC., "Design and analysis of experiments", John wiley & sons (2017).
79. Weiss DJ., "Analysis of Variance and Functional Measurement: A Practical Guide Includes CD-ROM", Oxford university press (2006).
80. O. M. Sahai H, "Analysis of Variance for Random Models: Theory, Methods, Applications, and Data Analysis Volume II: Unbalanced Data", Birkhäuser (2005).
81. F. Ersöz and T. Ersöz, "Uygulamalı İstatistiksel Yöntemler - 1", Ankara (2017).
82. P. T. Ghosh SK, "Interparticle coupling effect on the surface plasmon resonance of gold nanoparticles: from theory to applications", *Chemical reviews*, 107 (11): 4797–4862 (2007).
83. P.A. A. Slistan-Grijalva A, Herrera-Urbina R, Rivas-Silva JF, Ávalos-Borja M, Castellón-Barraza FF, "Classical theoretical characterization of the surface plasmon absorption band for silver spherical nanoparticles suspended in water and ethylene glycol", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 27 (1–2): 104–112 (2005).
84. J. P. Desai R, Mankad V, Gupta SK, "Size distribution of silver nanoparticles: UV-visible spectroscopic assessment," *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 4 (1): 30–34 (2012).
85. L. C. Kao MJ, "Evaluating the role of spherical titanium oxide nanoparticles in reducing friction between two pieces of cast iron," *Journal of Alloys and Compounds*, 483 (1–2): 456–459 (2009).
86. E. Gnecco and E. Meyer, "Fundamentals of Friction and Wear on the Nanoscale" (2007).

## ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Karabük'te doğdu. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Mühendisliği Programında başlayan lisans eğitimini 2017 yılında tamamlayarak aynı yıl Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği A.B.D.'de yüksek lisans programına başladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Bahçelievler Mah. 77 No.lu Sokak No:12 Şehriyar Sitesi A Blok D:20,  
78020, Beşbinevler / KARABÜK

Tel : 05307963829

E-posta : korkmaz.syma@gmail.com