



## Investigation of tribological performances of EP oil additive with gelatin and PVA coated nanoparticles

Hamza Mohamed S Abushrenta<sup>1</sup> , Sena Kabave Kılınçarslan<sup>1</sup> , Şeyma Korkmaz<sup>2</sup> , Onur Can Şirvan<sup>3</sup> , M. Hüseyin Çetin<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Karabük University, 78050, Karabük, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Electronics and Automation, Vocational School of Technical Sciences, Kırşehir Ahi Evran University, 40100, Kırşehir, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, 42250, Konya, Türkiye

### Highlights:

- Synthesis and characterization of ligand-coated nano-silver
- Tribological performance of nano-silver added oils
- Effect of nano-silver ratio as oil additive

### Keywords:

- Sliding Bearing Material
- Lubricant Additives
- Nano-silver
- Extreme Pressure
- Ligands

### Article Info:

Research Article

Received: 17.06.2022

Accepted: 13.10.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1132419

### Correspondence:

Author: M. Hüseyin Çetin  
e-mail: mhçetin@ktun.edu.tr  
phone: +90 551 905 4354

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, first of all, EP and nanosilver (gelatin and PVA coated) added lubricants were synthesized and the characterization analysis of the synthesized lubricants was performed. Lubricants were used in ball-on-plate wear tests to analyze the effect of prepared lubricants on the wear performance of tin bronze material. The wear test results were analyzed numerically and visually. The methodology determined for the study is given in Figure A.

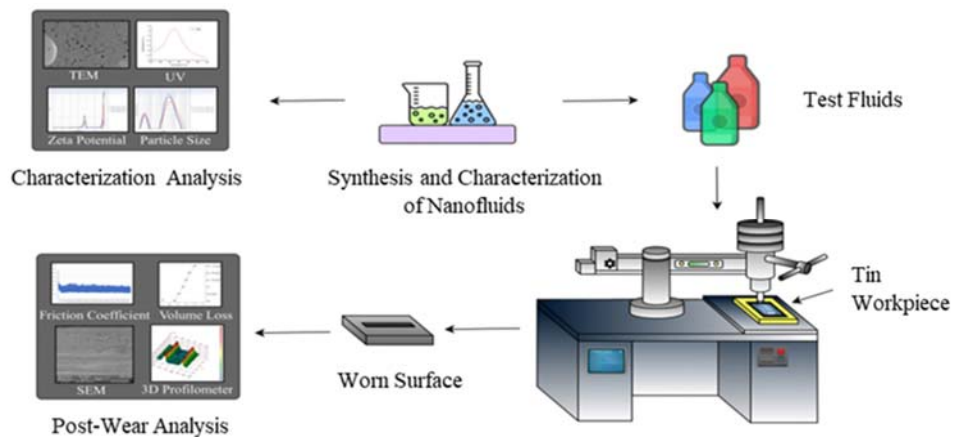


Figure A. The methodology determined for the study

**Purpose:** In this study, the effect of the lubricant prepared by adding EP and silver nanoparticles (AgNP) coated with different ligands to the ethylene glycol (EG) liquid on the tribological performance of the bearing material made of CuSn10Zn tin bronze was investigated.

**Theory and Methods:** For the tribological analysis of the EP additive, the optimum EP ratio was determined by performing wear tests in dry environment, pure EG and lubricating media (EG + 5%, 10%, 15% EP). Optimum AgNP concentration and ligand material were determined by using 2%, 5% and 8% AgNP coated with different ligands together with the determined optimum EP. Experiments were carried out with a ball-on-plate type tribometer at 20 N load and 40 rpm speed parameters in both stages where the optimum EP and AgNP concentrations were determined. Experiment results were analyzed by comparing friction coefficient, wear volume values with SEM and 3D topography images.

**Results:** According to the results, it was determined that the friction coefficient and wear volume values obtained in EG + 5% EP environment were lower than 10% and 15% concentrations. According to the results obtained from the interaction of EG + 5% EP with AgNP, the optimum AgNP concentration was determined as 2%, and the optimum ligand material was determined as gelatin (Gel). In EG + 5% EP + 2% AgNP\_Gel conditions, the friction coefficient was reduced by 18.70% and the volume loss by 16.94% compared to EG.

**Conclusion:** In order to achieve high tribological performance, the optimum concentration of EP and AgNP that can be used as oil impurities was determined as 5% and 2%, respectively. In terms of tribological performance, gelatin outperformed PVA in all output parameters.



## Jelatin ve PVA kaplı nanopartiküller ile EP yağ katkısının tribolojik performanslarının araştırılması

Hamza Mohamed S Abushrenta<sup>1</sup>, Sena Kabave Kılınçarslan<sup>1</sup>, Şeyma Korkmaz<sup>2</sup>, Onur Can Şirvan<sup>3</sup>, M. Hüseyin Çetin<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

<sup>2</sup>Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

<sup>3</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Ligand kaplı nano-gümüş sentezi ve karakterizasyonu
- EP ve Nano-gümüş katkılı yağların tribolojik performansı
- Yağ katkısı olarak nano-gümüş konsantrasyonunun etkisi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.06.2022

Kabul: 13.10.2022

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1132419

#### Anahtar Kelimeler:

Kaymalı yatak,  
yağ katkısı,  
nano-gümüş,  
EP,  
ligandlar

#### ÖZ

Bu çalışmada etilen glikol (EG) sıvısına aşırı basınç (EP) katkısı ve farklı ligandlarla kaplanmış gümüş nano partikülleri (AgNP) takviye edilerek hazırlanmış yağlayıcının, CuSn10Zn kalay bronzundan imal edilmiş yatak malzemesinin tribolojik performansına etkisi araştırılmıştır. EP takviyesinin tribolojik analizi için kuru ortam, saf EG ve EG sıvısına hacimce %5, %10, %15 oranlarında EP takviye edilerek hazırlanan yağlayıcı ortamlarında aşınma deneyleri gerçekleştirilerek optimum EP oranı belirlenmiştir. Belirlenen optimum EP ile birlikte hacimce %2, %5 ve %8 oranlarında ve farklı ligandlar ile kaplanmış AgNP kullanılarak optimum AgNP konsantrasyonu ve ligand malzemesi belirlenmiştir. Optimum EP ve AgNP konsantrasyonlarının belirlendiği her iki aşamada da deneyler ileri-geri hareket yapan tribometre (plaka üzerinde bilye düzeneği) ile 20 N yük ve 40 dev/dk hız parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları sürtünme katsayısı, aşınma hacmi değerleri ile SEM ve 3D topoğrafya görüntüleri kıyaslanarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre EG + %5 EP ortamında elde edilen sürtünme katsayısı ve aşınma hacmi değerlerinin %10 ve %15 konsantrasyonlarına kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. EG + %5 EP ile AgNP etkileşiminden elde edilen sonuçlara göre optimum AgNP konsantrasyonu %2, optimum ligand malzemesi de jelatin (Jel) olarak belirlenmiştir. EG + %5 EP + %2 AgNP\_Jel koşullarında EG'ye kıyasla sürtünme katsayısı %18,70, hacim kaybı ise %16,94 oranında azaltılmıştır.

## Investigation of tribological performances of EP oil additive with gelatin and PVA coated nanoparticles

### H I G H L I G H T S

- Synthesis and characterization of ligand-coated nano-silver
- Tribological performance of EP and Nano-silver added oils
- Effect of nano-silver concentration as oil additive

#### Article Info

Research Article

Received: 17.06.2022

Accepted: 13.10.2022

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1132419

#### Keywords:

Sliding bearing,  
lubricant additive,  
nano-silver,  
EP,  
ligands

#### ABSTRACT

In this study, the effect of the lubricant prepared by adding EP and silver nanoparticles (AgNP) coated with different ligands to the ethylene glycol (EG) liquid on the tribological performance of the bearing material made of CuSn10Zn tin bronze was investigated. For the tribological analysis of EP additive, the optimum EP ratio was determined by carrying out wear tests in dry medium, pure EG and lubricant media prepared by adding volume of 5%, 10%, 15% EP to EG liquid. Optimum AgNP concentration and ligand material were determined by using volume of 2%, 5% and 8% AgNP coated with different ligands together with the determined optimum EP. In both stages, where optimum EP and AgNP concentrations were determined, the experiments were carried out with a reciprocating tribometer (ball on plate) with a load of 20 N and a speed of 40 rpm. Experiment results were analyzed by comparing friction coefficient, wear volume values with SEM and 3D topography images. According to the analysis results, it was determined that the friction coefficient and wear volume values obtained in EG + 5% EP environment were lower than 10% and 15% concentrations. According to the results obtained from the interaction of EG + 5% EP with AgNP, the optimum AgNP concentration was determined as 2%, and the optimum ligand material was determined as gelatin (Gel). In EG + 5% EP + 2% AgNP\_Jel conditions, the friction coefficient was reduced by 18.70% and the volume loss by 16.94% compared to EG.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : hamzaly1988@gmail.com, senakilincarslan@karabuk.edu.tr, seyma.korkmaz@ahievran.edu.tr, ocsirvan@ktun.edu.tr \*mhçetin@ktun.edu.tr / Tel: +90 551 905 4354

## 1. Giriş (Introduction)

Kaymalı yatak malzemelerinin aşınma dayanımları kullanılan alaşım elementlerinin mekanik özelliklerine bağlıdır. Yüksek basınç ve sıcaklık altında çalışan yatak malzemelerinin mekanik ve korozyon dayanımlarının artırılması için uygun alaşım elementlerinin kullanımı ile birlikte yağlama da önem taşımaktadır. Uygun yağlayıcı ve yağ katışkılarının kullanımı ile yatakların yorulma dayanımı, dolayısıyla çalışma ömrü artırılabilir. Günümüzde yatak malzemesi olarak kalay bronzları yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Bu alaşımlar yüksek korozyon ve aşınma direncine, yüksek termal iletkenliğe ve kendinden yağlanma özelliklerine sahiptirler [4-6]. Kaymalı yataklarda yatak ve mil arasında kuru, sıvı ve yarı sıvı sürtünme söz konusudur. Ağır işletme koşullarında yetersiz yağlama durumunda metaller arasındaki sürtünme katsayısı artmakta, bunun sonucunda yüzeyde aşınma, çatlama, sıvanma gibi deformasyonlar meydana gelmektedir [7]. Ayrıca artan sıcaklık sebebiyle oksidasyon hızı artmakta ve tribo-korozyona bağlı malzeme kaybı tahmin edilenden daha fazla miktarda olmaktadır [8]. Kendinden yağlamalı yataklar da dahil olmak üzere, kaymalı yataklara uygulanan yağlayıcının sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir [7, 9, 10]. Ayrıca yağlara ilave edilen katkı maddeleri sayesinde tribolojik performans daha da artırılabilir. Bu katkı maddeleri iletkenliği, yağ filmi mukavemetini, ısı transfer katsayısını artırma ve korozyon önleme amacıyla yağlayıcılara katılmaktadır [11-14]. Bu katkı maddeleri arasında aşırı basınç (EP-extreme pressure) sağlayıcılar, katışkılar içerisinde en yoğun kullanım alanına sahip kimyasal ajanlardır. Yağlayıcılara ilave edilen EP katkıları sayesinde yağlayıcı ile metal yüzey tribo-kimyasal olarak reaksiyona girmekte ve yüksek mukavemetli bir yağ filmi meydana gelmektedir [15-17]. Bu sayede metal-metal teması engellenerek sıcaklık, sürtünme ve aşınma minimize edilmektedir.

Son yıllarda katkı maddesi olarak nanopartiküllerin kullanımı da oldukça yaygınlaşmıştır [18]. Özellikle ısı transfer katsayısını arttırmada etkili olan nanopartiküller, sıvıların yağ filmi mukavemetini arttırmaktadır [13, 19]. Nanopartikül katkılı yağlayıcılar sürtünmeye, aşınmaya ve plastik deformasyona maruz yüzeylerde üstün tribolojik performans sergilemektedir [11, 20]. Nanopartiküllerin boyutları, morfolojik yapıları ve kimyasal özellikleri tribolojik performansı belirleyici etkenlerdir [21-24]. Küresel forma sahip partiküllerin lifli nanopartiküllerin aksine daha düşük bir sürtünme katsayısı sergilemesi ve sıvılarda daha kolay dağılması bu duruma örnek gösterilebilir [13, 25]. Ayrıca küresel partiküller yuvarlanma, tamir ve parlatma gibi mekanik davranışlarının etkisi ile aşınan malzemelerin yüzey morfolojisini korumaktadırlar [26-28]. Fakat, nanopartiküller sahip oldukları yüksek yüzey enerjisi nedeniyle topaklanmaya eğilimlidir [29-31]. Bu sebeple, sürdürülebilir bir kullanım sağlanması açısından nanopartiküllerin topaklanma eğilimi ve koloidal stabilitesi önem taşımaktadır. Topaklanma davranışının minimizasyonu için nanopartiküllerin yüzeyleri, ligand adı verilen organik veya polimer esaslı malzemelerle kaplanmaktadır. Ligand olarak polivinil piroidon (PVP), polivinil alkol (PVA), polietilen glikol (PEG), jelatin (Gel), glikoz gibi yüklü veya nötr halde bulunan organik ajanlar kullanılmaktadır [32-34]. Kararlı davranış göstermeyen ligandlar kullanılarak sentezlenen nanopartiküller birbirleri ile birleşerek boyutları artmakta ve bunun sonucunda da aşınma bölgesinde aşındırıcı gibi davranabilmektedirler. Nanopartikülün yüzeyine bağlanan ligandlar aktif atom yüzeylerini pasifleştirerek partiküllerin arasındaki itme-çekme kuvvetlerinin oluşmasını engellemektedir [32]. Cetin ve Korkmaz [21], farklı konsantrasyonlardaki (%4, %8 ve %12) jelatin kaplı nano gümüş partiküllerinin topaklanma davranışını ve tribolojik performansa etkisini irdelemişlerdir. Aşınma deneylerinde elde ettikleri sürtünme katsayısı, ağırlık kaybı, sıcaklık değişimi ve yüzey

pürüzlülüğü sonuçlarını irdeleyerek, konsantrasyon oranı %4'den %12'ye çıktıkça yüzey pürüzlülüğünün %50 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Konsantrasyon arttıkça topaklanmanın azaldığını ve partiküllerin topaklanma davranışının aşınma direncini olumsuz etkilediğini belirlemişlerdir.

Hidrodinamik kaymalı yatak sistemlerinde yatak-mil arasında bulunan yağlayıcının milin ağırlığını taşıyabilecek kapasitede olması beklenmektedir [35, 36]. Bu sebeple kullanılan yağın yük taşıma kapasitesinin yüksek olması ve mil ağırlığı sebebiyle oluşacak basınca dayanıklı olması gerekmektedir. Ağır yük koşullarında yaygın kullanıma sahip yüksek basınca dayanıklı EP yağlayıcılar endüstride ve mühendislik uygulamalarında büyük ilgi görmektedir [37]. Literatürde aşınma deneyleri ve talashi imalat uygulamalarında yapılan çalışmalarda EP katkılı yağlayıcıların sürtünme katsayısını, yüzey pürüzlülüğünü, kesme kuvvetini ve takım aşınmasını önemli oranda azalttığı belirlenmiştir [17, 38-40]. Lin vd. [34] parafin yağı ve sentetik yağa farklı konsantrasyonlardaki EP takviyesinin tribolojik performansını aşınma deneyleri ile araştırmışlar ve EP konsantrasyonu %0,5'ten %5'e arttıkça sürtünme katsayısının %41,17 oranında azaldığı sonucunu elde etmişlerdir. EP katkısının yoğun kullanımı, nanopartikül katkısı ile EP'nin etkileşimi konusunda araştırma gereksinimi oluşturmaktadır. Kaymalı yatakların çalışma koşulları ve literatür çalışmalarında belirlenen sonuçlar dikkate alınarak mevcut çalışmada nanogümüş katkısına ek olarak EP katkı maddesi kullanımı tercih edilmiştir.

Literatürde nano-gümüş (AgNP) ve EP katışkılarının metalik malzemelerin aşınması üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı incelendiği görülmektedir. Fakat farklı ligandlarla kaplanmış AgNP ve EP takviyesi ile geliştirilen yağlayıcının tribolojik performansının incelendiği çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada özgün değer olarak, farklı konsantrasyonlarda hazırlanmış EP ve AgNP katkılı koloidal süspansiyonların tribolojik performansları kalay bronzunun aşınma deneyleri yoluyla incelenmiştir. Baz yağlayıcı olarak yüksek penetrasyon kabiliyetine sahip etilen glikol kullanılmıştır. Etilen glikole farklı konsantrasyonlarda EP (%5, %10, %15) ve AgNP (%2, %5, %8) katkıları ilave edilmiştir. Bu sayede hem optimum konsantrasyon oranları belirlenmeye çalışılmış hem de iki farklı katışkının etkileşimi analiz edilmiştir. İlaveten, AgNP sentezinde jelatin ve PVA olmak üzere iki farklı ligand kullanılarak kaplama yapılmıştır. Farklı ligandların aşınmaya etkisi ve EP ile etkileşiminin incelenmesi de literatür için tektir. Nano partiküllerin boyutları, morfolojisi, topaklanma davranışı ve koloidal stabilitesi zeta potansiyeli ölçümü, geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü, ultraviyole ve görünür ışık (UV - Vis) absorpsiyon spektroskopisinin grafikleri ve partikül boyut analizi (PSA) ile karakterize edilmiştir. Ayrıca farklı konsantrasyonlarda hazırlanan katkılı yağların iletkenlik ve yüzey gerilimleri incelenerek yağlar karakterize edilmiştir. Tribolojik performans deneylerinde, yoğun kullanım alanına sahip kaymalı yatak malzemesi olan kalay bronz (CuSn10Zn) aşınma numunesi olarak kullanılmıştır. Tribolojik performans deneylerinde aşınma parametreleri olarak 20 N yük ve 40 rpm kayma hızı belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar taramalı elektron mikroskobu (SEM), 3D topografya analizi, hacim kaybı ve sürtünme katsayısı verilerine göre değerlendirilmiştir.

## 2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Nano Gümüş Partiküllerinin Sentezi ve Karakterizasyonu (Synthesis and Characterization of Nano Silver Particles)

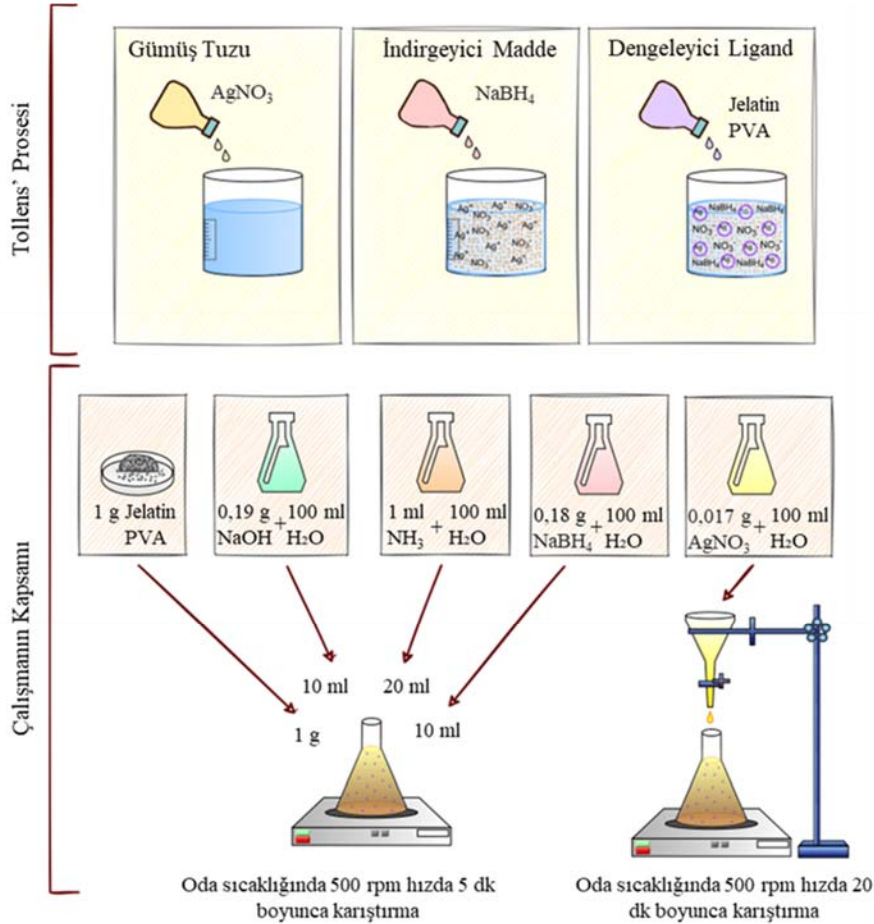
Bu çalışma kapsamında gümüş nanopartikülleri Tollens' yöntemi ile üretilmiştir. Bu yöntemde nano partiküllerin sentezi için gümüş (Ag<sup>+</sup>) iyonu içeren bir tuzun uygun bir solüsyon içerisinde çözünmesi ve

$Ag^+$  iyonlarının indirgenmesi gerekmektedir (Şekil 1). Gümüş tuzu olarak belirlenen  $AgNO_3$ ,  $H_2O$  içerisinde çözünerek solüsyon oluşturulmaktadır. Çözünen  $AgNO_3$  tuzundan  $Ag$  iyonlarının indirgenmesi ve solüsyon içerisinde küçük boyutlarda dağılabilmesi için solüsyona bir baz ilavesi gerekmektedir. Bazik yapıda olan  $NaBH_4$  bileşiğinin solüsyona eklenmesi ile boyutları küçülen  $Ag$  iyonları, oksijen iyonları arasında dağılmaktadır.  $Ag$  iyonlarının tekrar  $NO_3$  ile birleşerek çökmesini engellemek için karışıma stabilize edici bir ligand eklenmesi gerekmektedir. Pozitif (+) iyon olan  $Ag$  elementinin ligand ile etkileşime girebilmesi için negatif (-) yüklü bir ligand kullanılması gerekmektedir. Azot, fosfor ve oksijen içeren jelatin, ligand malzemesi olarak kullanılan güçlü bir kaplayıcıdır [41]. Nano metalik partiküllerin kaplanmasında polimer malzemeler de oldukça yaygın kullanılmaktadır. Özellikle PVA kararlı bir film oluşturma, emülsifiye etme ve yapışma özelliklerine sahiptir [42].

Sentezlenen  $AgNP$ 'ler UV testi, zeta potansiyeli, TEM ve PSA analizi ile karakterize edilmiştir. UV testi partiküllerin absorpsiyonunu belirlemektedir. Absorbans değeri hazırlanan test numunesinin konsantrasyonuna bağlı olarak artmaktadır. Literatür çalışmalarında numunelerin 0,6 – 2 değerleri arasında absorpsiyona sahip olduğu ve küresel yapıdaki nano gümüş partiküllerinin 390-450 nm civarında pik verdiği belirlenmiştir [43]. 10~100 nm arasında değişebilen partikül boyutları, kararlılığını kaybettiği takdirde topaklanma ve çökme davranışı göstermektedir [31]. Kolloidal kararlılık, partikülleri kaplayan ligandın stabilitesi ile bağlantılıdır. Ligand stabilitesi zeta potansiyel testi ile belirlenmektedir. Nano partiküllerin

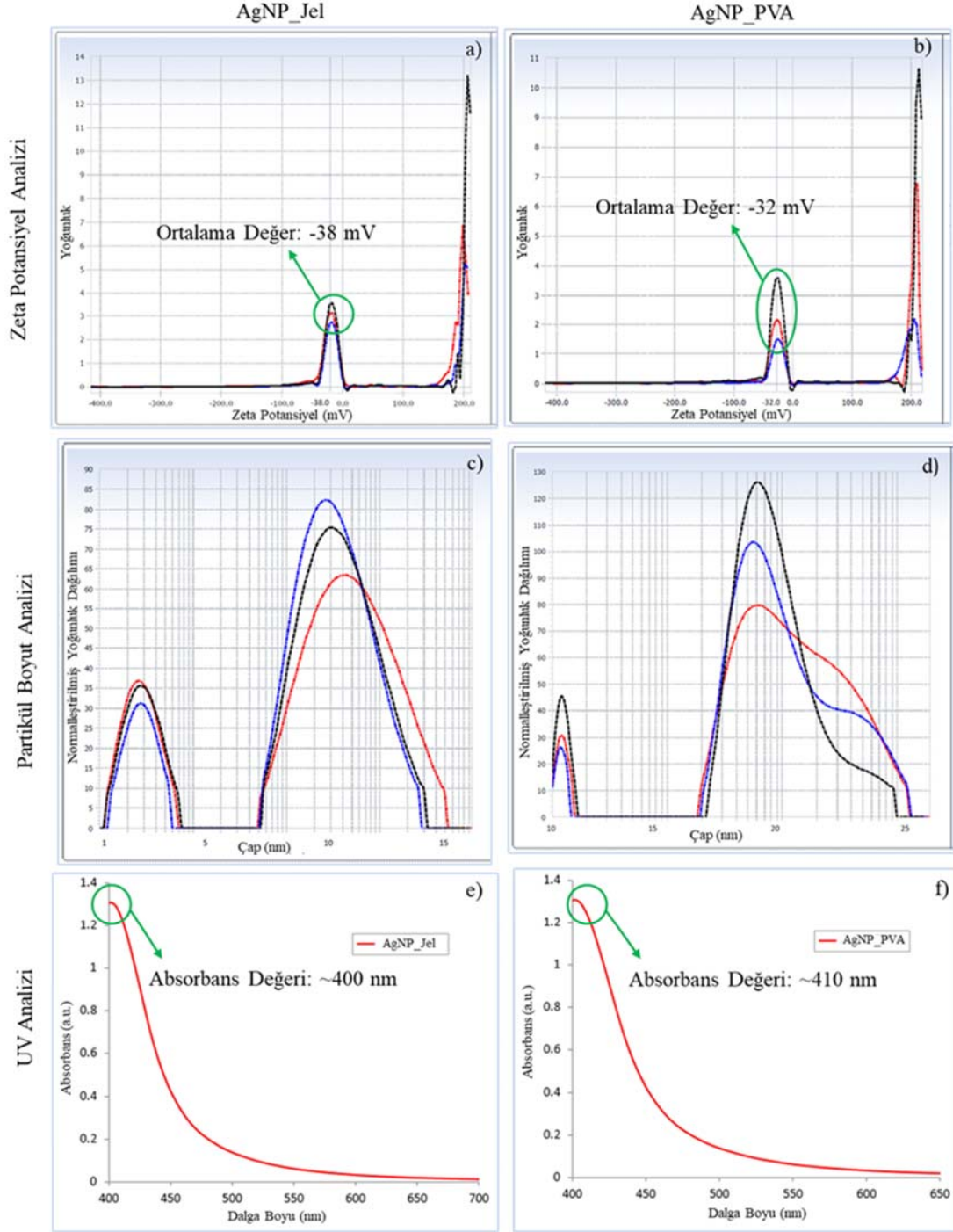
zeta potansiyel test sonucunun +30 mV değerinden yüksek veya -30 mV değerinden düşük olması yüksek derecede stabilizeye sahip olduğu anlamına gelmektedir [44, 45].

Bu çalışmada nano gümüş üretimi için 0,19 gr  $NaOH$  (Merck;  $5 \times 10^{-2} M$ ), 0,18 gr  $NaBH_4$  (%98, Sigma-Aldrich;  $0,1 M$ ), 0,017 gr  $AgNO_3$  (%99, Sigma-Aldrich;  $2,5 \times 10^{-3} M$ ) ve 1 ml  $NH_3$  (%25-30, Sigma-Aldrich;  $1,25 \times 10^{-2} M$ ) 100 ml saf suyun içinde ayrı ayrı karıştırılarak çözeltiler hazırlanmıştır (Şekil 1). Oda sıcaklığında karıştırma kabına 1 gr toz jelatin eklendikten sonra hazırlanan karışımlara 10 ml  $NaOH$  çözeltisi eklenmiş ve manyetik karıştırma işlemi başlatılmıştır. 500 rpm hızda 5 dk boyunca karıştırılan çözeltilere 20 ml  $NH_3$  ve 10 ml  $NaBH_4$  eklenerek karıştırma işlemi devam ettirilmiştir. Ardından hazırlanan 10 ml'lik  $AgNO_3$  çözeltisi saniyede 1 damla olacak şekilde karışıma damlatılmıştır. Kimyasal reaksiyon 500 rpm hızda 20 dk boyunca devam etmiştir. Süzme işleminin ardından elde edilen kolloidal süspansiyon karanlık ortamda muhafaza edilmiştir. Sentezleme için dikkate alınan işlem sırası, kullanılan kimyasallar ve miktarları literatüre göre belirlenmiş, sentez için belirlenen optimum koşullar dikkate alınmıştır [32, 46, 47]. Üretilen partiküllerin karakterizasyonu için gerçekleştirilen UV analizinin sonuçları Şekil 2e ve Şekil 2f'de verilmiştir. UV-Vis grafiğine göre partiküller ~400 nm değerlerinde absorpsiyon vermiştir. Ölçülen UV değeri  $AgNP$  için literatürde belirtilen değerlerle uyumludur [21]. Gerçekleştirilen PSA analizi (Şekil 2c, Şekil 2d) ve TEM (Şekil 3a, Şekil 3b) sonucunda da elde edilen partikül boyutları ~10 nm ve ~15 nm olarak tespit edilmiştir. Zeta potansiyel test değerleri ise kolloidal kararlılığın sağlandığını göstermektedir (Şekil 2a, Şekil 2b).



Şekil 1. Nano gümüş partiküllerinin Tollens' yöntemi ile üretimi (Production of nano silver particles by Tollens' method)





**Şekil 2.** Üretilen nanopartiküllerin karakterizasyon sonuçları: a) AgNP\_Jel için Zeta potansiyel sonucu, b) AgNP\_PVA için Zeta potansiyel sonucu, c) AgNP\_Jel için PSA sonucu, d) AgNP\_PVA için PSA sonucu, e) AgNP\_Jel için UV sonucu, f) AgNP\_PVA için UV sonucu (Characterization results of the produced nanoparticles: a) Zeta potential result for AgNP\_Gel, b) Zeta potential result for AgNP\_PVA, c) PSA result for AgNP\_Gel, d) PSA result for AgNP\_PVA, e) UV result for AgNP\_Gel, f) UV result for AgNP\_PVA)

## 2.2. Yağlayıcıların Hazırlanması (Preparation of Lubricants)

Aşınma testleri kuru, etilen glikol (EG), EP katkıli etilen glikol (EG + EP), nano gümüş ve EP katkıli etilen glikol (EG + EP + AgNP) yağlama koşullarında gerçekleştirilmiştir. Katkılar literatür referans alınarak belirlenen konsantrasyonlara göre etilen glikole ilave edilmiştir [15, 17, 48–50]. Çalışmanın ilk aşamasında kuru, EG ve

farklı konsantrasyonlarda (hacimce %5, %10, %15) EP katkıli EG koşulları altında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sülfür esaslı EP katkıli kullanılmıştır. Sülfür -2 iyon seviyesi ile polardır ve metalik yüzeylere tutunabilir [51]. Optimum sonucu veren EP konsantrasyonu seçilerek, farklı konsantrasyonlarda (%2, %5, %8) hazırlanan jelatin kaplı nano gümüş (AgNP\_Jel) ve PVA kaplı nano gümüş (AgNP\_PVA) sıvılarının oluşturduğu deney setleriyle aşınma

testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel setleri ve kullanılan sıvı miktarları Tablo 1’de verilmiştir. Sıvılar oda sıcaklığında mekanik karıştırma yöntemi ile homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Deneysel öncesinde hazırlanan sıvıların yüzey gerilimi (YG) ve ıslatılabilirlik açısı (ID) incelenmiştir (Şekil 4). Testler akredite bir laboratuvarında uzman bir personel tarafından optik tensiyometre cihazı ile ölçülmüştür (Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM laboratuvarı). Islatma açıları her bir damlanın yaklaşık 80 mm<sup>2</sup>’lik bir alana eşit hacimde damlatılması ile minimum 3 tekrarlı olarak ölçülmüştür. Damlatma cihazı cihaz tarafından sürekli kaydedilmiştir. Verilen sayısal değerler ortalama değerleri göstermektedir. Resimler ise damlanın yayılma hızı düştüğü anda çekilerek elde edilmiştir. Şekil 4’e göre hem Jel hem de PVA kaplı numunelerde AgNP konsantrasyonu arttıkça yüzey gerilimi ve ıslatılabilirlik açısı artmaktadır. Katı gümüş nanopartikülleri ile EP ve EG sıvıları arasında oluşan yüzey geriliminin ıslatılabilirliği etkilemediği fakat nanopartikül konsantrasyonu arttıkça artan topaklanma ve çökme davranışına bağlı olarak ıslatılabilirliğin olumsuz etkileneceği literatürde belirtilmiştir [52–54]. Literatürden elde edilen veriler ile çalışma kapsamında elde edilen ölçüm sonuçları tutarlılık göstermektedir. Nano partikül ile EP etkileşimi de ıslatılabilirlik açısının artış trendini değiştirmemiştir.

### 2.3. Deneysel Düzenek (Experimental setup)

Bu çalışmada deneyler plaka üzerinde bilye düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel kurulum Şekil 5’te, sistemin şematik görüntüsü Şekil 6’da verilmiştir. Aşınma numunesi olarak ~250 HV sertlikte (Bruker UMT Universal Tester) CuSn10Zn kalay bronz, aşındırıcı olarak da 6 mm çapında ve ~60 HRC sertlikte 100Cr6 (AISI 52100) alaşımı kullanılmıştır [55, 56]. Aşınma numunesi ve aşındırıcı bilyenin kimyasal bileşimi Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmiştir. Aşınma

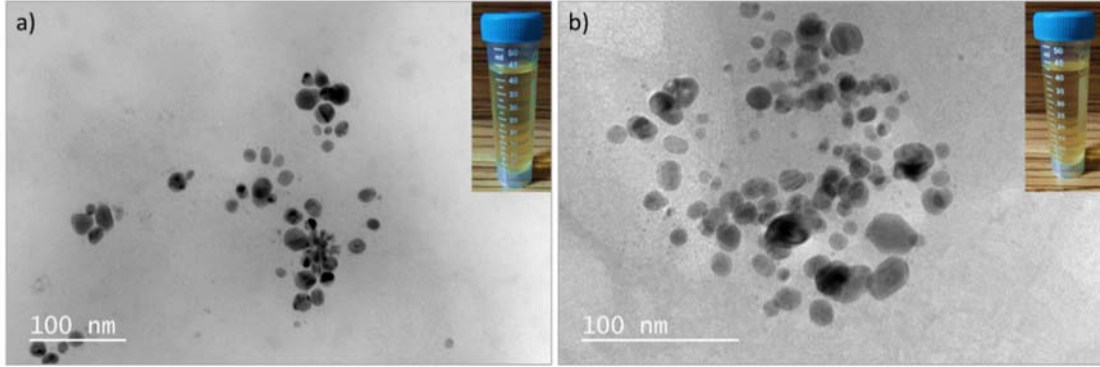
deneysel parametreleri sabit yük (20 N) ve kayma hızı (40 rpm) koşullarında gerçekleştirilmiştir. Parametre seçimi ön deneylere ve literatüre göre belirlenmiştir [21, 41]. Aşınma izinin görsel olarak analiz edilebildiği deneysel parametreleri dikkate alınmıştır. Deneysel sonuçlar SEM (Carl Zeiss Gemini FESEM), 3D topografya analizi (Phase View Optik Profilometre), hacim kaybı ve sürtünme katsayısı verilerine göre değerlendirilmiştir.

Sürtünme katsayıları ±0,5 N hassasiyetinde tek eksen dinamometre ile ölçülmüştür. Sürtünme katsayıları Şekil 7’de görüldüğü gibi grafik olarak elde edilmiştir. Grafik değerlerinin aritmetik ortalamaları dikkate alınarak kararlı hal katsayıları belirlenmiştir. Hacim kaybı ölçümü için 2D topografya görüntüleri kullanılmıştır. Deneysel sonucunda meydana gelen aşınma izinin boyu 1/10’luk kumpas ile, aşınma izinin derinliği ve eni ise 2D profilometre cihazı (Portable Surface Roughness Tester (Sj-410 Series)) ile belirlenmiştir. 2D profilometre cihazının çıktısı olan boyut grafiğinin bir örneği ve aşınma numunesinin resmi Şekil 8’de verilmiştir. Hacim kaybı verileri Eş. 1’deki bağıntıya göre hesaplanarak elde edilmiştir. Eş. 1’de verilen a, b ve c değerleri sırasıyla aşınma izinin enini, derinliğini ve strok mesafesini ifade etmektedir [57].

$$V = \frac{2}{3} * a * b * c \quad (1)$$

İncelenen çıkış parametrelerinin arasındaki ilişki için korelasyon analizi kullanılmıştır. Korelasyon analizi için kullanılan bağıntı Eş. 2’de verilmiştir [58]. Eşitlikteki x ve y bağımlı değişkenleri, n ise veri sayısını ifade etmektedir.

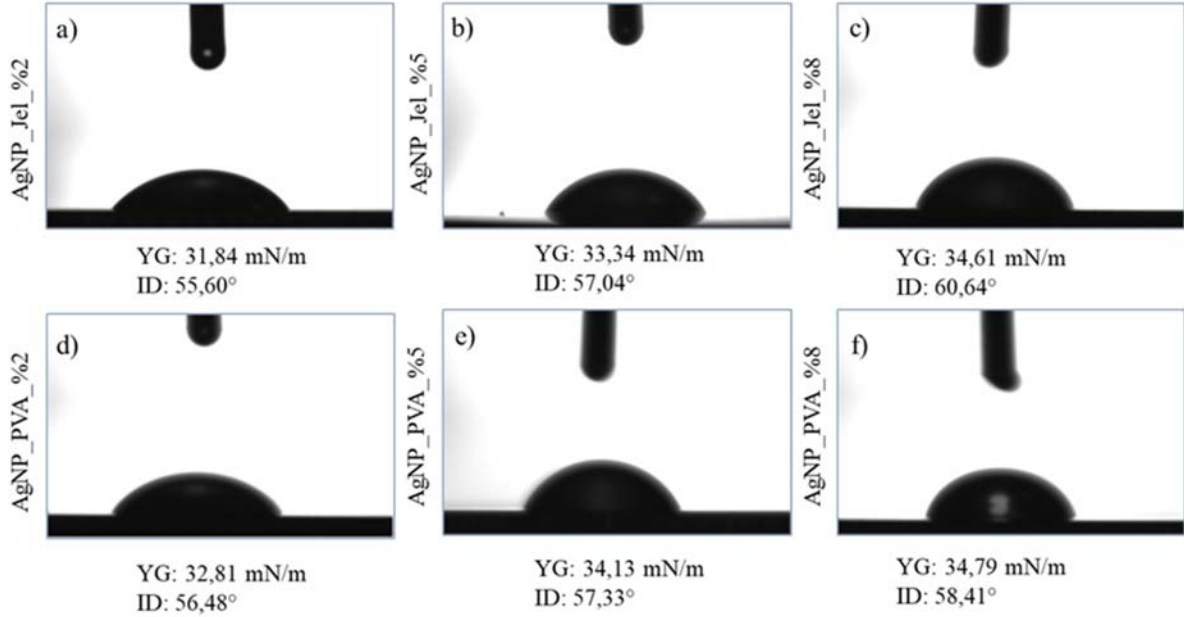
$$r = \frac{\sum(xy) - (\sum x)(\sum y)/n}{\sqrt{(\sum x^2 - (\sum x)^2/n)(\sum y^2 - (\sum y)^2/n)}} \quad (2)$$



Şekil 3. Nanopartiküllerin TEM analizi sonuçları: a) AgNP\_Jel, b) AgNP\_PVA (TEM analysis results of nanoparticles: a) AgNP\_Jel, b) AgNP\_PVA)

Tablo 1. Yağlayıcıların karakteristik özellikleri (Characteristics of lubricants)

Deneysel Aşamaları	Yağlama Koşulları	Miktar
1. Aşama	Kuru	-
	EG	200 ml EG
	EG + %5 EP	190 ml EG + 10 ml EP
	EG + %10 EP	180 ml EG + 20 ml EP
	EG + %15 EP	170 ml EG + 30 ml EP
	EG + %5 EP + %2 AgNP_Jel	186 ml EG + 10 ml EP + 4 ml AgNP_Jel
2. Aşama	EG + %5 EP + %5 AgNP_Jel	180 ml EG + 10 ml EP + 10 ml AgNP_Jel
	EG + %5 EP + %8 AgNP_Jel	174 ml EG + 10 ml EP + 16 ml AgNP_Jel
	EG + %5 EP + %2 AgNP_PVA	186 ml EG + 10 ml EP + 4 ml AgNP_PVA
	EG + %5 EP + %5 AgNP_PVA	180 ml EG + 10 ml EP + 10 ml AgNP_PVA
	EG + %5 EP + %8 AgNP_PVA	174 ml EG + 10 ml EP + 16 ml AgNP_PVA



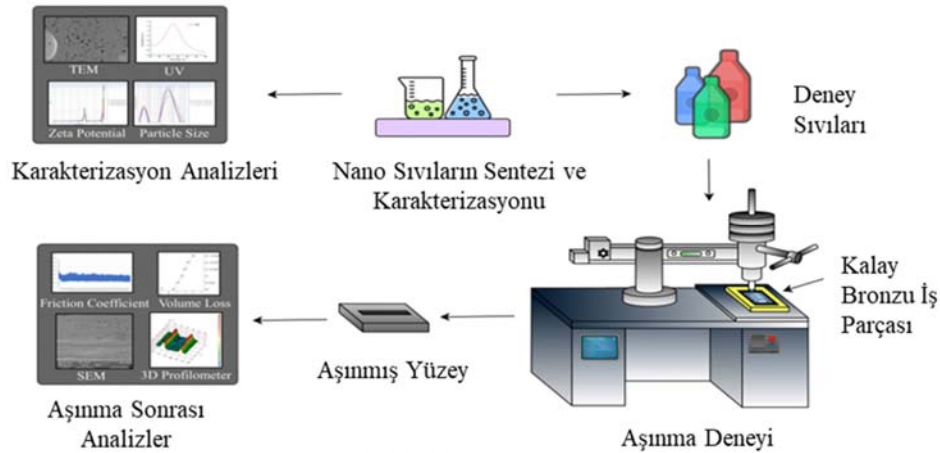
**Şekil 4.** Hazırlanan sıvıların yüzey gerilimi (YG) ve ıslatılabilirlik açısı (ID) sonuçları: a) EG + %5 EP + %2 AgNP\_Jel, b) EG + %5 EP + %5 AgNP\_Jel, c) EG + %5 EP + %8 AgNP\_Jel, d) EG + %5 EP + %2 AgNP\_PVA, e) EG + %5 EP + %5 AgNP\_PVA, f) EG + %5 EP + %8 AgNP\_PVA (Surface tension (ST) and wettability angle (WD) results of the prepared liquids: a) EG + 5% EP + 2% AgNP\_Gel, b) EG + 5% EP + 5% AgNP\_Gel, c) EG + 5% EP + 8% AgNP\_Gel, d) EG + 5% EP + 2% AgNP\_PVA, e) EG + 5% EP + 5% AgNP\_PVA, f) EG + 5% EP + 8% AgNP\_PVA)

**Tablo 2.** CuSn10Zn alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of CuSn10Zn alloy)

Element	Cu	Sn	Zn	Pb	Ni	P
Yüzde Ağırlığı (%)	86 – 89	9 – 11	1 – 3	1,5 (max)	2 (max)	0,05 (max)

**Tablo 3.** AISI 52100 (100Cr6) alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI 52100 (100Cr6) alloy)

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

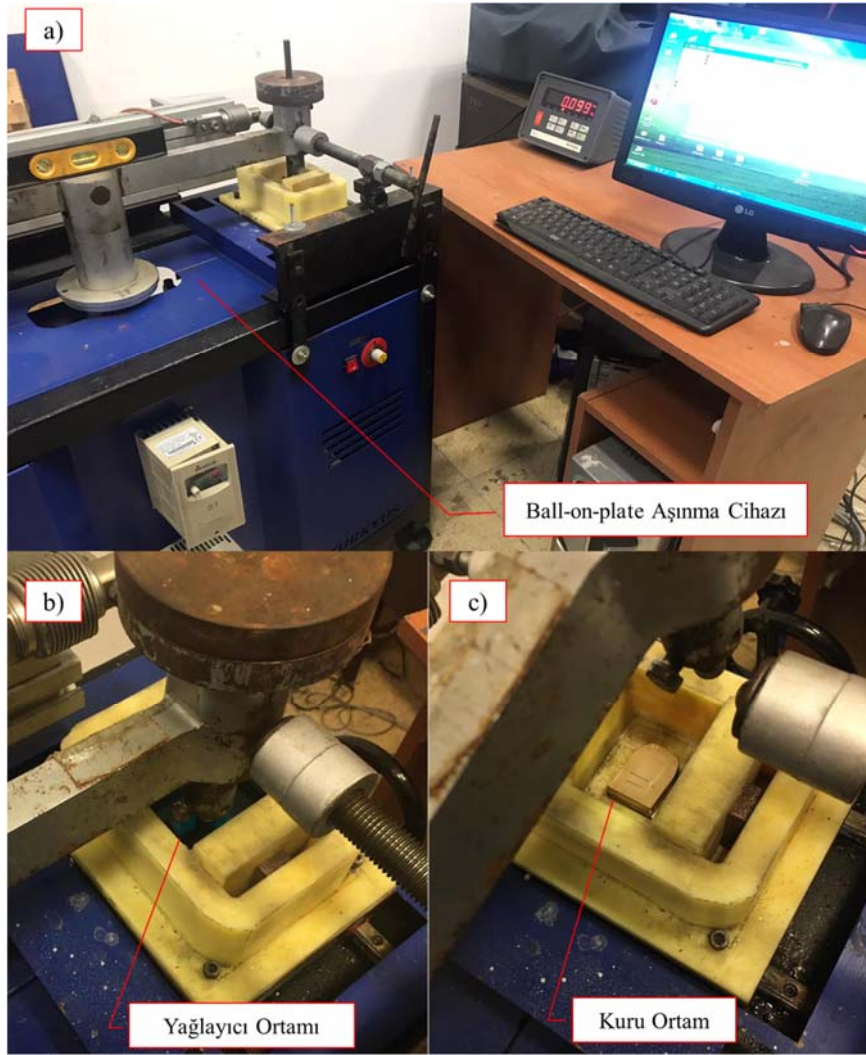


**Şekil 5.** Deneysel Kurulum (Experimental Setup)

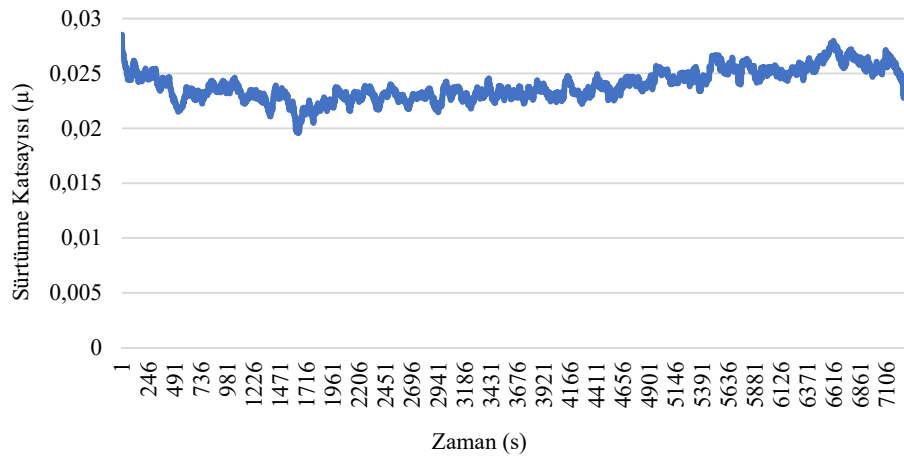
### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Deneysel sonuçların analizi için belirlenen metodoloji Şekil 9'da verilmiştir. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak optimum EP oranının belirlenmesi için, EG sıvısına farklı oranlarda EP takviye edilerek elde edilen yağlayıcılar 20 N yük ve 40 dev/dk

parametrelerinde aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Optimum EP katkı oranını belirlemek amacıyla kuru, saf EG, EG + %5 EP, EG + %10 EP ve EG + %15 EP koşullarında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre optimum sonuçların %5 konsantrasyonda elde edildiği belirlenmiştir. İkinci aşamada ise farklı ligandlarla (jelatin ve PVA) üretilmiş olan



Şekil 6. Aşınma tezgahı: a) Plaka üzerinde bilye düzeneği, b) Yağlayıcı ortamında aşınma, c) Kuru ortamda aşınma  
(Wear bench: a) Ball-on-plate wear device, b) Wear in lubricant condition, c) Wear in dry condition)

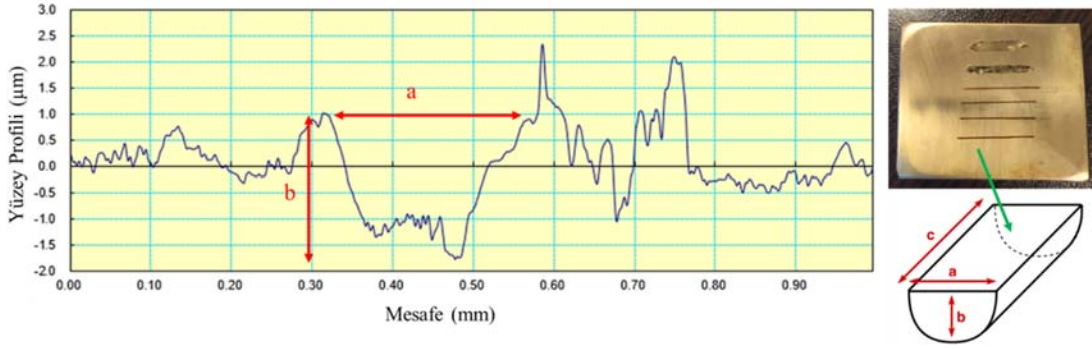


Şekil 7. Sürtünme Katsayısı Grafiği (Coefficient of Friction Graph)

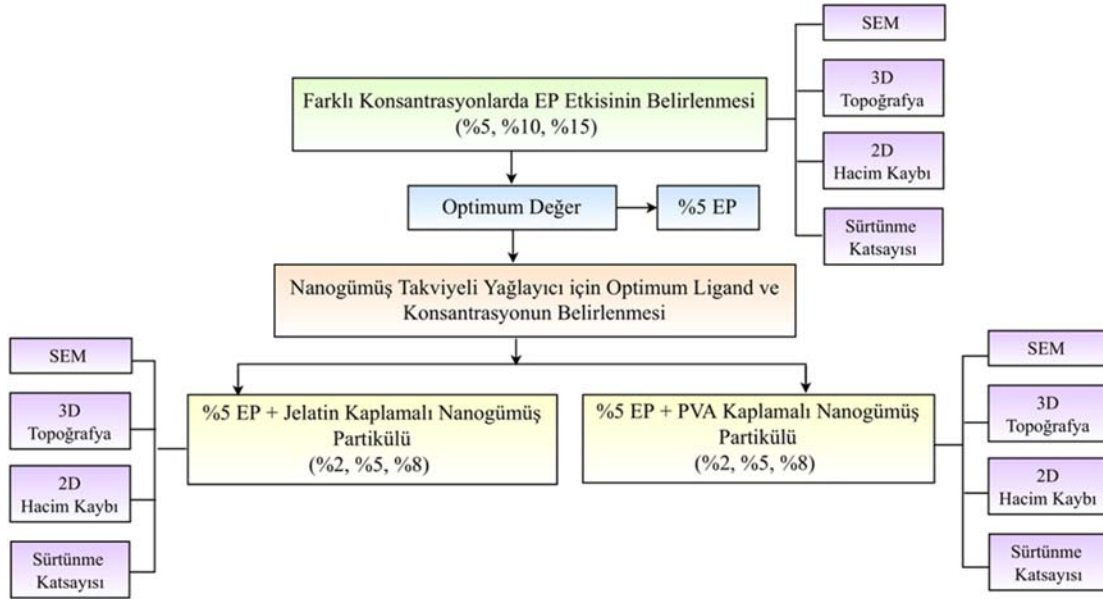
AgNP katkısı optimum EP katkısı ile farklı oranlarda karıştırılarak 6 farklı kolloidal süspansiyon hazırlanmıştır. Deneylerde %2, %5 ve %8 oranlarında AgNP ilave edilerek hazırlanan kolloidal süspansiyonlar

kullanılmış ve optimum AgNP konsantrasyonu belirlenmiştir. Aşınma deneyleri, jelatin ve PVA kaplı AgNP'ler için ayrı ayrı uygulanmış, bu sayede farklı kaplama malzemelerinin etkisi de analiz edilmiştir.





Şekil 8. 2D Hacim Kaybı Grafiği ve Aşınma Numunesi (2D Volume Loss Chart and Wear Sample)



Şekil 9. Deneysel Süreç (Experimental Process)

Deneysel sonuçlar her iki aşama için sürtünme katsayısı değerleri, aşınma hacmi değerleri, SEM ve 3D topoğrafya görüntüleri analiz edilerek belirlenmiştir.

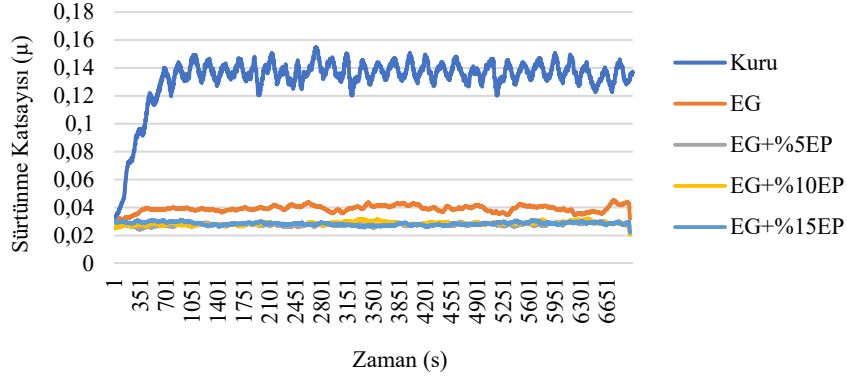
### 3.1. Optimum EP Katkı Oranının Belirlenmesi (Determination of the Optimum EP Additive Ratio)

#### 3.1.1. Sürtünme katsayısı (Friction coefficient)

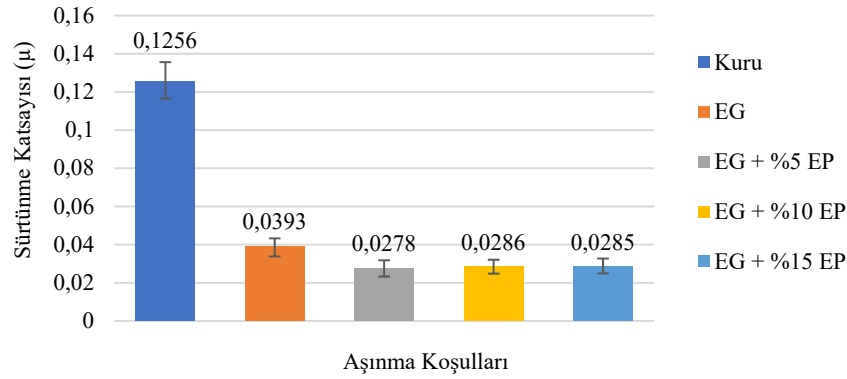
Hidrodinamik yağlama koşullarında çalışan sistemlerde yağ filmi oluşuncaya kadar, yatak ve mil malzemesi arasındaki metal-metal temasına bağlı olarak sürtünme katsayısı artmaktadır. Sürtünme katsayısındaki bu artış, yatak malzemelerindeki aşınmayı arttırmakta ve yatak malzemelerinin servis ömrünün kısılmasına neden olmaktadır [59, 60]. Bu sebeple sürtünme katsayılarının analiz edilmesi gerekmektedir. Optimum EP konsantrasyonunun belirlenmesi için kuru, EG, EG + %5 EP, EG + %10 EP ve EG + %15 EP koşullarında 20 N yük ve 40 dev/dk hız parametrelerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sürtünme grafikleri ve sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'e göre sürtünme katsayısı değerlerinin kuru ortam koşullarına kıyasla EG, EG + %5 EP, EG + %10 EP ve EG + %15 EP koşullarında sırasıyla %68,71, %77,86, %77,23, %77,30 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu değerlere göre EG + %5 EP sıvısının sürtünme katsayısının minimizasyonu açısından en yüksek

etki sağlayan yağlayıcı olduğu sonucu elde edilmiştir. %5'lik EP katkısı yüzeyde kararlı bir yağ filmi meydana getirerek sürtünme katsayısını kuru şartlara göre %77,86 oranında, saf EG yağlayıcısına göre ise %29,26 oranında düşürmüştür. %10 EP ve %15 EP konsantrasyonlarındaki yağlayıcılarda ise sürtünme katsayısı açısından anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

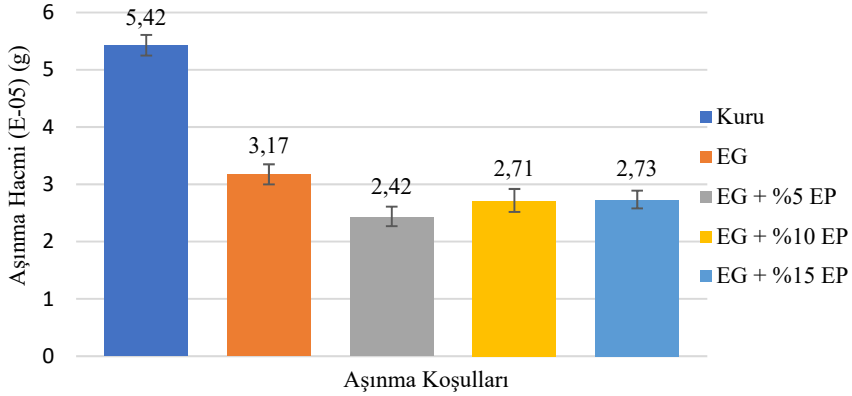
Sülfür bazlı EP katkısı, sürtünme ve basınç nedeniyle 600 °C'den yüksek sıcaklıklarda sınır tabakada koruyucu bir yüzey sağlar [15]. EP katkısı içeriğinde bulunan sülfür, sürtünmeye ve basınca bağlı olarak artan sıcaklıkla yüzeyde Cu<sub>2</sub>S, SnS ve ZnS esaslı koruyucu bir tabaka oluşturmaktadır [51]. Mikron boyutlardaki bölgede oluşan tabakanın dayanımına bağlı olarak, temas eden yüzeyler arasında sürtünme katsayısının düşmesi beklenen bir durumdur. Deneysel sonuçlara göre de EP takviyeli solüsyonların kullanıldığı koşullarda sürtünme katsayısı değerleri düşmüştür (Şekil 11). Fakat Şekil 11'de EP konsantrasyonu arttıkça sürtünme katsayısı değerlerinde düşüş trendinin olmadığı, konsantrasyon arttıkça değerlerin stabil kaldığı görülmektedir. Benzer sonuçlar Şekil 12'deki aşınma hacmi değerleri için de elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı ve EP katkısı arasındaki ilişki iki açıdan tartışılabilir. İlk olarak %5 EP miktarının, çalışılan deney koşullarında koruyucu tabaka oluşturabilmek açısından yeterli olduğu iddia edilebilir. Deney koşullarında oluşan sıcaklık ve basınç, sınır yağlama bölgesinde ancak %5'lik bir konsantrasyon için reaksiyon oluşturabilmiştir. %5 üzeri değerler ise reaksiyona



Şekil 10. Aşınma Testinden Elde Edilen Sürtünme Grafikleri (Friction Graphs Obtained from Wear Test)



Şekil 11. Aşınma Testinin Sürtünme Katsayısı Değerleri (Coefficient of Friction Values of Wear Test)



Şekil 12. Aşınma Testinin Hacim Kaybı Verileri (Volume Loss Data of Wear Test)

girmemiş ve bu sebeple değerlerde anlamlı değişim gözlenmemiştir. İkinci durum ise artan EP'ye bağlı olarak hem solüsyonda hem de iş parçası yüzeyindeki oksitlenmenin artması ve artan korozyona bağlı aşınan malzemede yüzey kararlılığının bozulmasıdır. Farklı konsantrasyonlarda yapılan deneylere ait yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 13) yüzey morfolojilerinde belirgin farklılıklar göze çarpmaktadır. %5'ten daha yüksek EP konsantrasyonlarında yüzeyde çatlak oluşumunun arttığı Şekil 13d ve Şekil 13e'de görülmektedir. Bu sebeple fazla miktarda EP kullanımının korozyon oluşumunu arttırdığı iddia edilebilir. Fakat bu artış sürtünme katsayısı üzerinde anlamlı bir etki oluşturacak seviyede değildir. İlaveten, sürtünme esnasında EP aktivasyonu için gerekli sıcaklık ve basınç değerlerine sadece sınır tabaka bölgesinde ulaşılabilir. Bu duruma bağlı olarak, fazla EP kullanımının sürtünme katsayısı,

solüsyon stabilitesi ve aşınan malzemenin yüzeyinin korunması açısından anlamlı olmadığı söylenebilir. Ayrıca, EP'nin tribolojik performans artırma kabiliyetinin yanı sıra toksik özelliği bulunmaktadır [61]. Bu yüzden fazla EP kullanımının performans, maliyet ve çevreye olan zararından dolayı EP konsantrasyonunun minimize edilmesi anlamlıdır.

### 3.1.2. Aşınma hacim kaybı (Wear volume loss)

Mühendislik malzemelerinde genel olarak sürtünme katsayısındaki artışa bağlı olarak malzeme yüzeyinden kopan parçacık miktarı artmaktadır [62]. Yatak malzemesinde oluşan hacim kaybı boyut tamlığı ve yorulma ömrü açısından sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple aşınma hacmi değerlerinin analiz edilmesi

gerekmektedir. Kuru, EG, EG + %5 EP, EG + %10 EP ve EG + %15 EP koşullarında oluşan aşınma yüzeylerinin 2D profilometre ile ölçülmesi sonucu elde edilen aşınma miktarı değerleri Şekil 12'de verilmiştir. Kuru ortam koşullarına kıyasla EG, EG + %5 EP, EG + %10 EP ve EG + %15 koşullarında aşınma hacmi değerlerinin sırasıyla %41,51, %55,35, %50,00 ve %49,63 oranında azaldığı belirlenmiştir. Hacim kaybı verilerine göre optimum EP katkı oranı %5 olarak bulunmuştur. %5 oranında EP katkısı hacim kaybını kuru şartlara göre %55,35 oranında, saf EG şartlarına göre ise %23,65 oranında düşürmüştür. Korelasyon analizine göre sürtünme katsayısı değerleri ile hacim kaybı değerleri arasında pozitif yönlü ve %85 (Eş. 2) uyumlu bir ilişki bulunmaktadır. Bu sebeple %5 konsantrasyondaki EP'nin aşınma yüzeyinde koruyucu etkisinin yüksek olduğu, EP'nin artışına bağlı olarak kimyasal stabilitenin bozulduğu ve aşınma yüzeyinin negatif etkilendiği sonuçları aşınma hacmi değerleri içinde geçerlidir. EP'nin artışına bağlı olarak Şekil 13d ve Şekil 13e'de oluşan yüzey çatlaklar aşınma hacminin az da olsa artışına sebebiyet vermiştir.

### 3.1.3. SEM analizi sonuçları

(Scanning electron microscope analysis results)

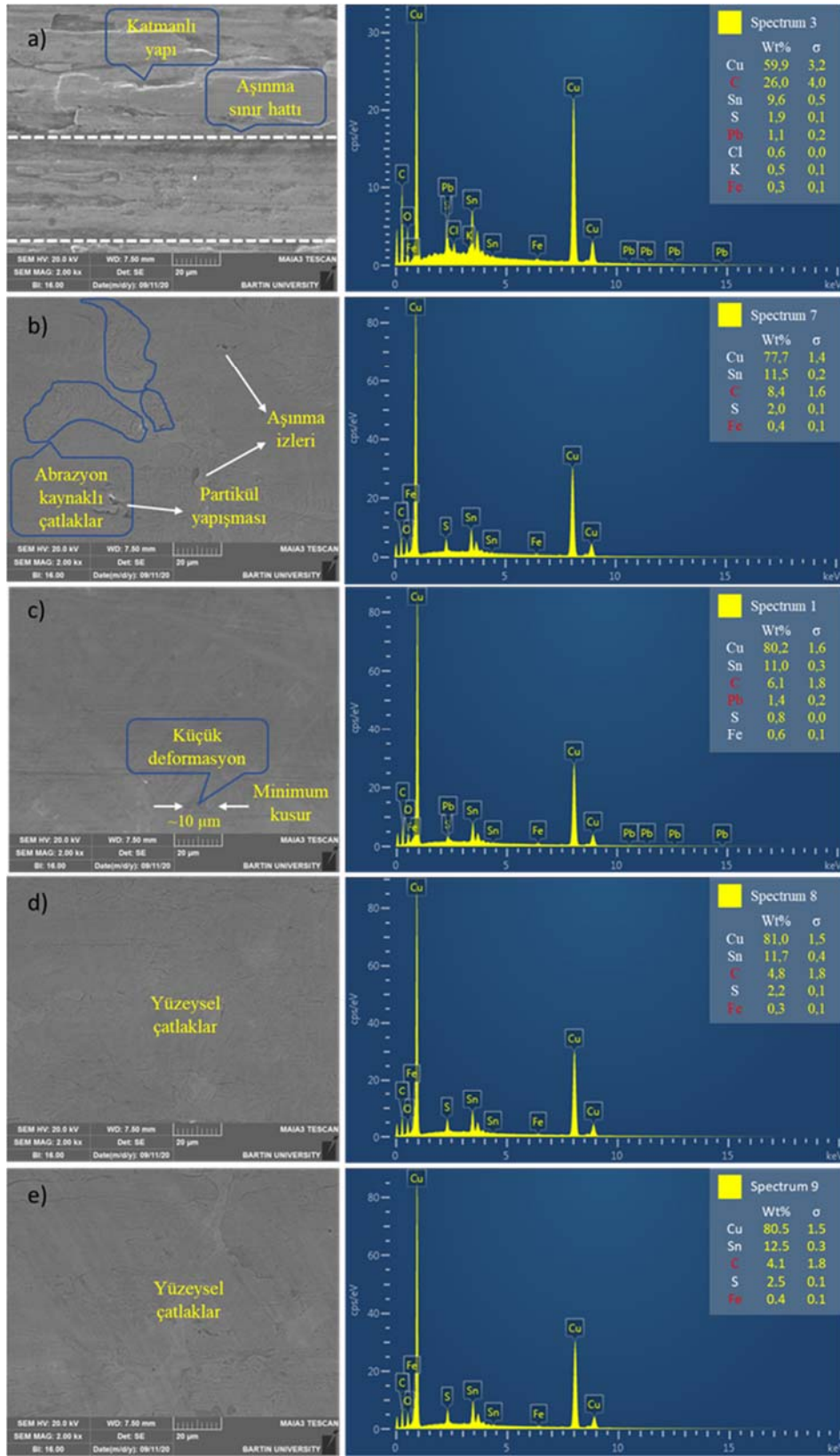
Sürtünmeye maruz malzemelerde yüzeyden kopan parçacıklar sebebiyle yüzey morfolojisi bozulmaktadır. Bu durum malzemenin boyutlarını ve yüzey kalitesini olumsuz etkilediği için SEM görüntülerinin analiz edilmesi ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 13'te kuru, EG, EG + %5 EP (optimum konsantrasyon), EG + %10 EP ve EG + %15 EP koşullarında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen numunelerin aşınma bölgelerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde kuru şartlarda aşınan yüzeyin oldukça pürüzlü olduğu görülmektedir (Şekil 13a). Aşınmaya maruz yüzeylerde bir yağ filminin bulunmaması sürtünme katsayısını arttırmıştır. Sürtünme devam ettikçe aşınan yüzeyden kopan partiküller yüzeyleri çizerek abrasif aşınmaya sebep olmuştur. Ayrıca açığa çıkan ısının etkisiyle yüzeyde mikro kaynak ve dolayısıyla tabakalı yapı oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 13a). Ayrıca yüzeyde derin aşınma izleri ve çukurcuklar oluşmuştur. Yüzeyler arasında yağ filminin bulunması metal-metal temasını engelleyerek sürtünme katsayısını düşürmektedir. Ayrıca yağ filmi, sürtünme bölgesinde oluşan sıcaklığı azaltarak adhezyon mekanizmasını engellemektedir. Saf EG şartlarında aşınan yüzeyde çatlak, çizik ve adhezyon tabakalarının azalması bu durumun bir göstergesidir (Şekil 13b). EG ortam koşullarında kuru koşullara nazaran aşınma izi derinlikleri ve yüzey kusurları ciddi oranda azalmıştır. %5 oranında EP katkısı ile yüzeyde mikro kaynak oluşumu ve çizikler minimize edilmiş, saf EG ortamına göre aşınma izi oldukça küçülmüştür. EG + %5 EP koşulunda yüzey kalitesinin gözle görülebilir seviyede arttığı görülmektedir. Bu durum EP katkısının yüzeyde meydana getirdiği kararlı yağ filmi oluşumu ile açıklanabilir (Şekil 13c). Şekil 13d ve Şekil 13e'de EP konsantrasyonunun artmasına rağmen Şekil 13c'ye nazaran yüzeydeki çatlakların daha fazla olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında sülfür esaslı EP kullanılmıştır. Sülfür taneler arası korozyona sebebiyet vermekte ve EP miktarının artışıyla artan sülfür oranına bağlı olarak malzeme korozyona uğrayarak aşınma hızı önemli oranda artmaktadır. Ek olarak kükürt içeriğinin artması malzemenin gevrekleşmesine de neden olmaktadır [51]. Gevrekleşme ve korozyon artışı malzemede meydana gelen plastik deformasyonu artırarak derin ve geniş aşınma izlerinin oluşumuna sebebiyet vermiştir. Bu sebeple %10 ve %15 EP oranlarında %5 oranına kıyasla daha fazla deformasyon oluşmuştur. Sürtünme katsayısı ve hacim kaybı grafiklerinden elde edilen sonuç ile SEM görüntülerinden elde edilen morfoloji uyumluluk göstermektedir. EP konsantrasyonun artışı ile belirsizliğin artması durumu literatürle de uyumludur [50]. Deneysel sonuçlar, yatak malzemeleri için minimum EP kullanımının (%5) tribolojik açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Şekil 13'teki

EDX sonuçlarına göre EP konsantrasyonunun artışına bağlı olarak yüzeydeki karbon miktarının azaldığı görülmektedir. Bu sonuç tribolojik açıdan dikkat çekicidir. Kuru deney koşullarında oluşan yüzeyde (Şekil 13a-EDX) %26 oranında karbon görülürken bu değer EG kullanımı ile %8,4'e (Şekil 13b-EDX), %15 EP kullanımı ile %4,1 (Şekil 13c-EDX) değerine kadar düşmüştür. 100Cr6 malzemesinin aşınması sebebiyle ortaya çıkan karbon yatak malzemesi yüzeyinde biriktirmektedir. Yüzeyde biriken karbon oranı EP'nin artışıyla birlikte azalmıştır (Şekil 13). EP'nin artışıyla birlikte aşınma ara yüzeyindeki film tabakasının direncinin arttığı ve aşınmanın azaldığı söylenebilir. Fakat EP'nin artışı her ne kadar fiziksel olarak yüzeyi korusa da kimyasal olarak aynı kararlılık oluşmamış ve korozif etki sebebiyle, konsantrasyon artışına bağlı olarak yüzey çatlakları artmıştır. Korozif etkinin varlığı EDX sonuçlarındaki kükürt oranının artışı ile açıklanabilir. Kükürt oranının, EP katkısı %5'ten %10'e yükseldiğinde %2,2, %15'e yükseldiğinde ise %2,5 seviyesine çıktığı görülmektedir (Şekil 13c-Şekil 13e).

### 3.1.4. 3D topografya (3D topography)

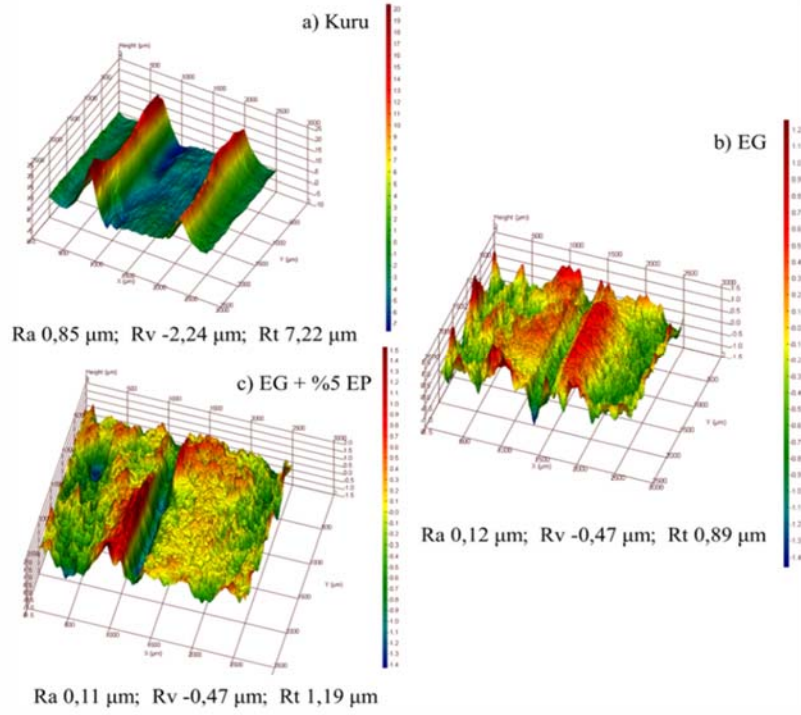
3D topografya görüntüleri ile milimetrik boyutlarda alan taranmakta ve yüzey formu hakkında (dalgalanmalar, form bozuklukları) detaylı bilgi edinilmektedir. Kuru, EG ve EG + %5 EP koşullarında aşınma testine tabi tutulan numunelerin form değişikliklerinin analizi için aşınma bölgelerinden elde edilen 3D topografya görüntüleri Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14'te verilen topografya görüntülerinde mavi tonlama aşınma izi derinliğini, kırmızı tonlama yükselti noktalarını, sarı ve yeşil tonlama ise minimum yüzey pürüzlülük bölgelerini ifade etmektedir. Şekil 14'a göre kuru ortam koşulunda mavi ve kırmızı tonların yoğun olduğu ve aşınma izi genişliğinin ~1000 µm olduğu görülmektedir. Kuru ortamdaki katastrofik aşınma durumuna bağlı olarak aşınma genişliği, aşınma derinliği (-2,237 µm Rv) ve toplam yükselti (7,222 µm Rt) değerleri maksimum değerde çıkmıştır. SEM görüntülerine göre belirlenen adhezyon mekanizmasının varlığı Rt değeri ile doğrulanabilir. Mikro kaynaklara bağlı olarak yüzeye yapışan malzemeler aşınma çizgisinin etrafına yığılmış ve 7,222 µm'lik Rt değeri oluşmuştur. Diğer yandan, kuru ortamda yüzey kalitesinin taşlanma pürüzlülüğü değerlerinde olduğu (0,851 Ra), EG ve EP katkılı ortamda ise bu değer (~0,12 µm) honlanmış yüzey kalitesinde olduğu görülmektedir. Temas bölgesinde yağ filminin bulunmaması, aşınmaya bağlı sıcaklık artışıyla malzemenin yumuşamasına ve yüzey formunun bozulmasına sebep olmuştur. EG + %5 EP koşulunda ise kurudan çok daha iyi fakat EG koşuluna benzer bir yüzey morfolojisi elde edilmiştir (Şekil 14b). Bu durum, EG ile EG + %5 EP koşullarında yüzey topografyasına etki eder seviyede anlamlı bir sıcaklık farkının oluşmaması ile açıklanabilir. Şekil 14b'deki yüzey incelendiğinde sarı ve yeşil rengin hâkim olduğu, yüzeydeki pürüzlerin minimum seviyede olduğu görülmektedir. EP katkısı yağ filminin yük taşıma kapasitesini artırarak yüzeyleri birbirinden ayırmış, sıcaklığın homojen dağılmasını sağlayarak düzgün bir yüzey morfolojisinin elde edilmesini sağlamıştır. Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri de bu bulguları doğrular niteliktedir.

Çalışmanın 1. aşamasında gerçekleştirilen aşınma deneylerine göre optimum yağlayıcının EG + %5 EP olduğu sonucuna varılmıştır. Sürtünme katsayısı, 2D hacim kaybı, SEM ve 3D topografya görüntüleri incelendiğinde EP katkısının meydana getirdiği kararlı yağ filmi sayesinde, sürtünme katsayısının azaldığı ve yüzey kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir. EP katkısının işlevini yerine getirmesi açısından optimum katkı oranı %5 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın ilk aşaması sonucunda EG + %5 EP sıvısının kaymalı yataklarda kullanılması ile yüzey kalitesinin artacağı buna bağlı olarak da yorulma direncinin de artacağı düşünülmektedir. Bundan sonraki aşamada farklı oranlarda ve farklı kaplayıcılarla üretilmiş AgNP katkısının EG + %5 EP sıvısı ile etkileşimi incelenecektir.



**Şekil 13.** Aşınma Testinin SEM ve EDX Görüntüleri: a) Kuru, b) EG, c) EG + %5 EP, d) EG + %10 EP, e) EG + %15 EP (SEM and EDX Images of Wear Test: a) Dry, b) EG, c) EG + 5% EP, d) EG + 10% EP, e) EG + 15% EP)





Şekil 14. Aşınma Testinin 3D Topografya Sonuçları: a) Kuru, b) EG, c) EG + %5 EP  
(3D Topography Results of Wear Test: a) Dry, b) EG, c) EG + %5 EP)

### 3.2. EP ve Gümüş Esaslı Katkı Maddelerinin Etkileşiminin İncelenmesi (Investigation of Interaction of EP and Silver Based Additives)

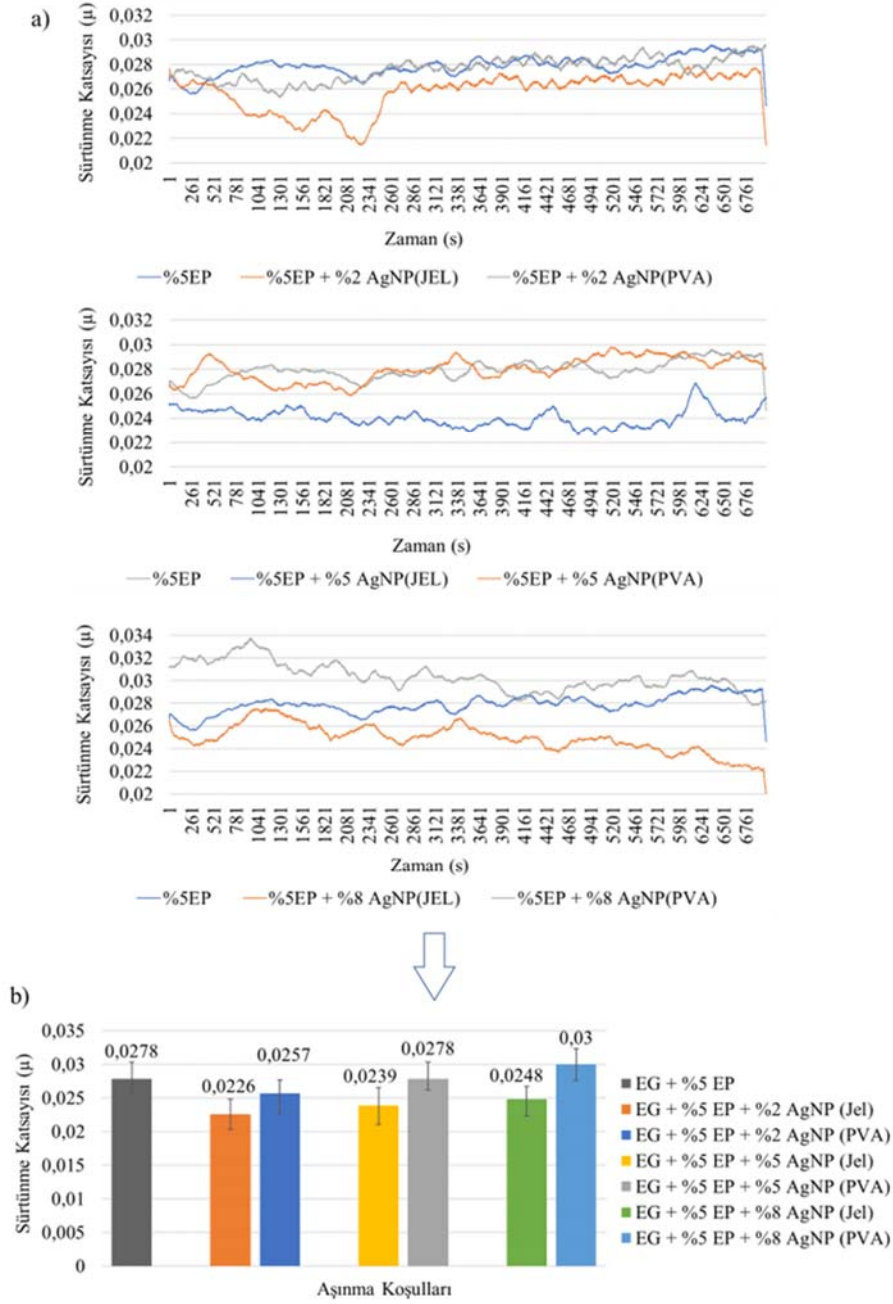
#### 3.2.1. Sürtünme katsayısı (Friction coefficient)

Çalışma kapsamında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Şekil 15'te verilmiştir. Şekil 15'e göre AgNP takviye edilerek hazırlanmış yağlayıcı kullanımı ile EG + %5 EP sıvısına kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edildiği görülmektedir. AgNP, yüksek termal iletkenlik özelliği sayesinde sürtünme bölgesinde oluşan ısıyı hızlı bir şekilde azaltarak malzemelerin birbirine yapışmasını önlemiş ve bu sayede aşındırıcı malzemenin kolay hareket etmesiyle düşük değerlerde sürtünme katsayısı elde edilmesini sağlamıştır [63, 64]. Farklı ligandların etkisi incelendiğinde, jelatin kaplı AgNP ile hazırlanan yağlayıcıların PVA kaplı AgNP ile hazırlanan yağlayıcılara kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı değerleri verdiği görülmektedir. Gümüş nanopartiküllerin sentezlenmesi esnasında partiküller birbirine yapışarak topaklanmakta ve bu duruma bağlı olarak partiküllerin boyutu büyümektedir [41]. Büyük boyutlu partiküllerin aşınma bölgesine yeterli penetrasyon sağlayamaması sebebiyle yağlayıcının soğutma performansının azalacağı söylenebilir. Topaklanma davranışının önlenmesi amacıyla partiküller farklı ligand malzemeler ile kaplanmaktadır. Jelatin ligandı PVA'ya kıyasla daha iyi kaplama performansı sağlayarak partiküller arasındaki çekme etkisini minimuma indirmiş ve bu sayede topaklanma davranışını azaltarak partiküllerin boyut stabilizasyonunu sağlamıştır [32]. Partikül boyutundaki stabilizasyon sayesinde jelatin kaplamalı AgNP'ler aşınma bölgesine daha kolay penetre olabilmektedir. Bu sayede jelatin kaplamalı AgNP'ler ile aşınma bölgesinde tribolojik performansını yüksek yağ filmi oluşturularak sürtünme katsayısı azaltılmıştır. Çalışmada farklı ligandların etkisinin yanı sıra EP ile farklı konsantrasyonlardaki AgNP'lerin etkileşiminin sürtünme katsayısına etkisi analiz edilmiştir. Şekil 15'e göre hem PVA hem de jelatin kaplı partiküller için %2 oranında %5 (Jel-%5.44, PVA-%7.55) ve %8 (Jel-

%8.87, PVA-%14.33) oranlarına kıyasla daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bu durum EP'nin aktivasyon sıcaklığı ve AgNP'nin soğutma kabiliyeti arasındaki ilişki ile açıklanabilir. AgNP konsantrasyonu %8 oranına kadar arttıkça aşınma bölgesinde yağlama ve soğutma performansının arttığı literatürdeki çalışmalarda belirtilmiştir [64]. Mevcut çalışmada EP ve AgNP etkileşiminin aynı koşullar altında sinerjik etki göstererek yüksek performans oluşturacağı öngörülmüştür. Fakat elde edilen sonuçlara göre EP ve AgNP etkileşiminin tribolojik performans açısından anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Sülfür esaslı EP katkısı yüksek sıcaklıklarda aktif hale gelmektedir [65]. Aşınma bölgesinde oluşan yüksek ısı EP'nin aktivasyonunu hızlandırır da yüksek konsantrasyonlarda AgNP kullanımı ile yağ filminin soğutma kabiliyetinin artması oluşan ısıyı azaltmaktadır. Bu durum EP katkısının aktivasyonunu zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla EP ve AgNP katkıları ile aşınma bölgesinde oluşturulan yağ filminin yük taşıma kabiliyeti azalmaktadır. Buna bağlı olarak aşındırıcı malzeme kalay bronzuna daha fazla basınç uygulamakta ve bu durum sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Şekil 15'te AgNP konsantrasyonu arttıkça sürtünme katsayısındaki artış, AgNP'nin yüksek konsantrasyonlardaki topaklanma eğiliminin artması ve EP'nin ısı transferinden olumsuz etkilenmesiyle açıklanabilir.

#### 3.2.2. Aşınma hacim kaybı (Wear volume loss)

AgNP takviyesinin ve kaplama malzemelerinin aşınma hacmine etkisinin analizi için elde edilen değerler Şekil 16'da verilmiştir. Sürtünme katsayısı verilerinde olduğu gibi bu verilerde de jelatin kaplama PVA kaplamaya göre daha iyi sonuç vermiş ve optimum AgNP katkı oranı %2 olarak belirlenmiştir. Düşük konsantrasyonda hazırlanan koloidal sıvıların aşınma hacmini olumlu etkilemesi nanopartiküllerin topaklanma davranışıyla açıklanabilir. Nano boyutlarda yüksek kimyasal kararsızlığa sahip gümüş partikülleri birbirleri arasında metalik bağ oluşturarak topaklanma ve çökme eğilimi gösterirler. Valans elektronlarının elektron bulutu içerisinde dağılmasıyla elde edilen metalik bağda yaklaşık 200 kcal/mol bağ



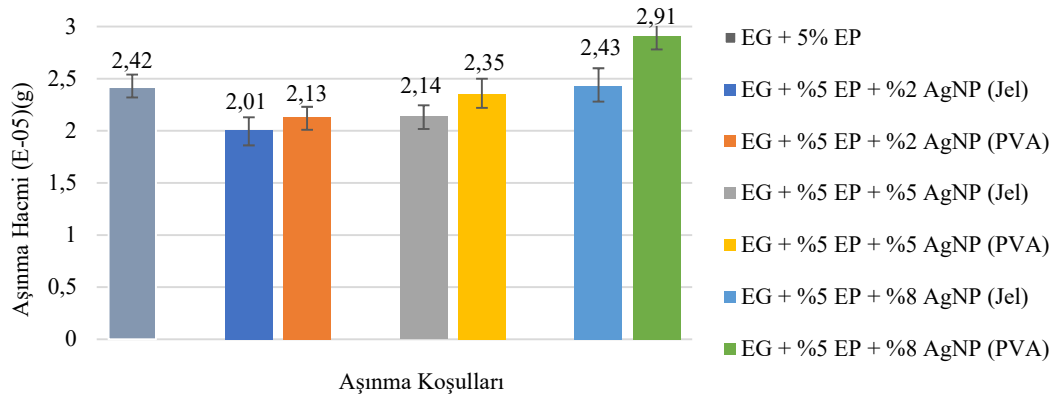
Şekil 15. Aşınma Testinin Sürtünme Katsayısı Değerleri (Coefficient of Friction Values of Wear Test)

kuvveti bulunmakta ve bu duruma bağlı olarak kararlı gümüş molekülleri oluşmaktadır [66]. Sert partikül formundaki moleküllerin aşınma ara yüzeyinde oluşturdukları abrasiv etki aşınma hacminin artışına sebebiyet vermiştir. Nano partikül konsantrasyonu arttıkça aşınma hacminin olumsuz etkilenmesi literatür çalışmalarıyla uyumluluk göstermektedir. Bu problemin çözülebilmesi için atomal kararlılığın artırılması yani güçlü ligandların geliştirilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan PVA ligandı ile hazırlanan süspansiyonlarda gümüş partiküllerin toplanması sonucu partiküller birleşerek molekül formuna dönüşmektedir. Partiküllerin molekül formuna dönüşümü sonucunda ağırlığının artmasına bağlı olarak EP'nin oluşturduğu yağ filmi deforme olmaktadır. Yağ filminin yırtılması sonucu EP'nin yük taşıma performansı azalmakta ve aşındırıcı malzeme ile kalay bronzunun temas alanı artmaktadır. Artan basınç ve temas alanı sebebiyle kalay

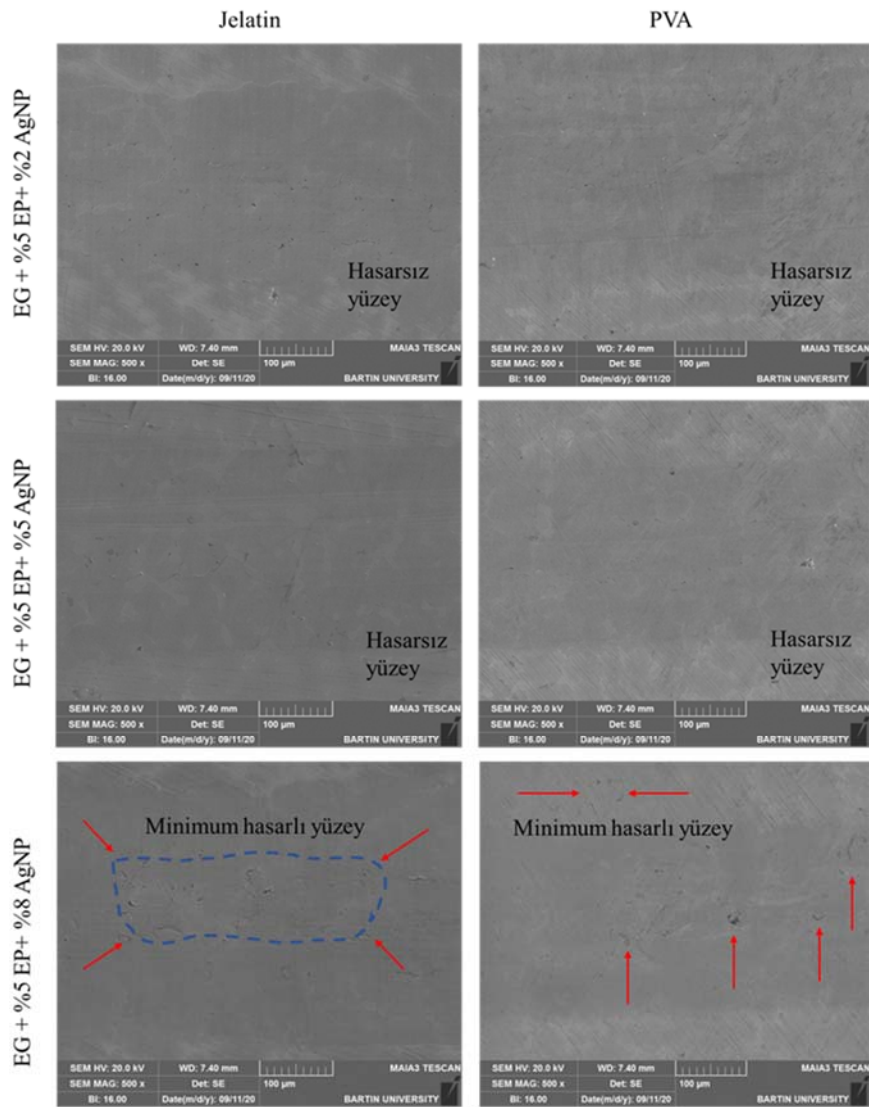
bronzuna etki eden sürtünme artmakta ve bu durum kalay bronzundan kopan parçacık miktarını arttırmaktadır. Belirtilen yaklaşım konsantrasyonun artması durumunda da geçerlidir. Konsantrasyon arttıkça partiküllerin toplanma eğilimi artmaktadır. Dolayısıyla konsantrasyon artışı ve PVA kaplama kullanımı benzer etki göstermektedir.

### 3.2.3. SEM analizi sonuçları (Scanning electron microscope analysis results)

Sürtünme katsayısı ve hacim kaybı verilerine göre %2 oranında AgNP (Gel) daha iyi sonuç vermiş, fakat SEM görüntülerinde farklı süspansiyonlar arasında gözle görülecek bir fark oluşmamıştır (Şekil 17). EG + %5 EP + %8 AgNP (PVA) ve EG + %5 EP + %5 AgNP (PVA) şartlarında elde edilen yüzeylerin de birbirine benzer sonuç



Şekil 16. Aşınma Testinin Hacim Kaybı Verileri (Volume Loss Data of Wear Test)



Şekil 17. Farklı oran ve kaplayıcılarla hazırlanmış nanoakışkan ortamında aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri (SEM images of worn surfaces in nanofluid conditions prepared with different ratios and coatings.)

verdiği görülmektedir. Her iki kaplama için %8 oranında AgNP katkısı ile elde edilen aşınma yüzeylerinde minimum seviyede pürüz ve çatlakların olduğu gözlemlenmektedir. Sürtünme katsayısı ve

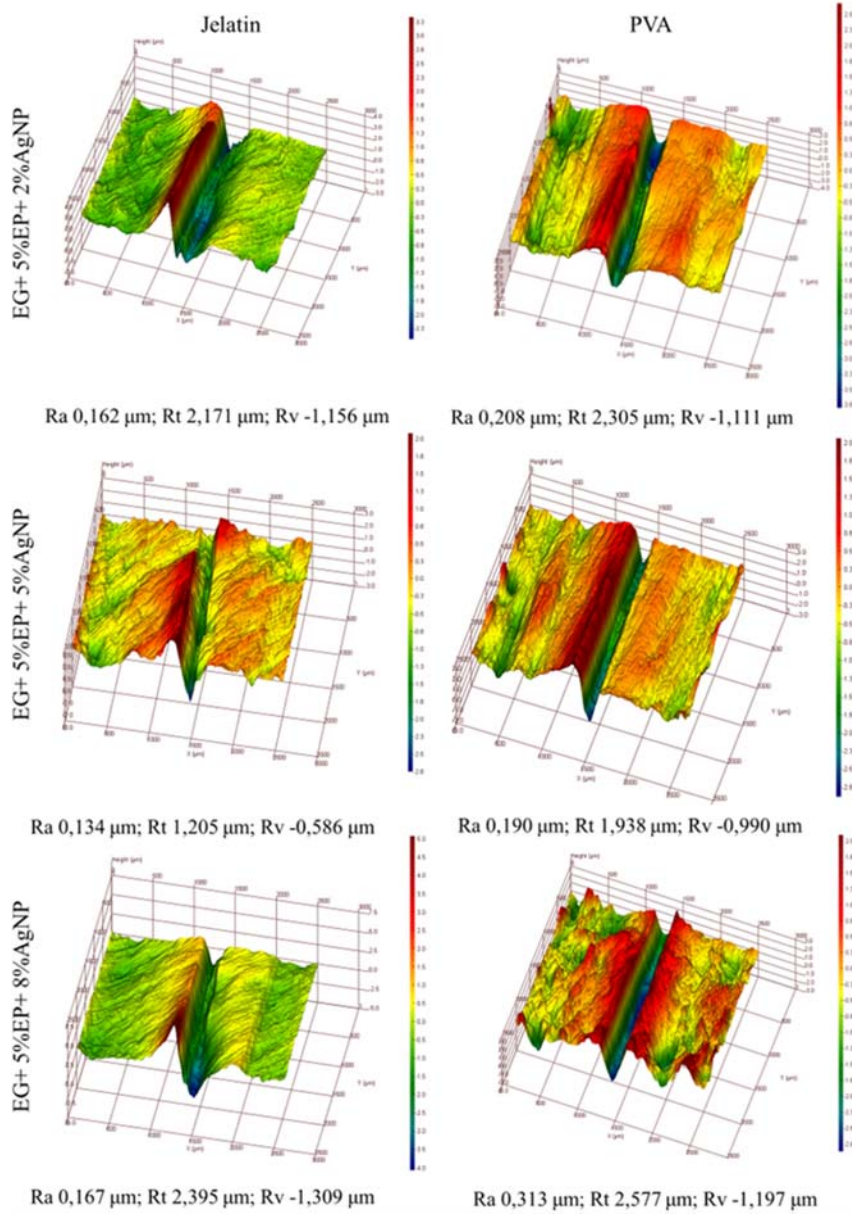
hacim kaybı verileri incelendiğinde %8 oranında AgNP katkısının diğer konsantrasyonlara göre aşınma ve sürtünmeyi minimize etmede yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Nano partikül konsantrasyonunun

artışı ile artan topaklanma ve çökeltme nedeniyle sıvının aşınma yüzeyine penetrasyonunun zorlaşması bu durumu sebebi olarak gösterilebilir. Karakterizasyon aşamasında elde edilen verilere göre %8 oranındaki AgNP katkısının en yüksek ıslatma açısına sahip olması bu durumu doğrular niteliktedir (Şekil 4). Topaklanan nano partiküller solüsyon içerisinde yüzey direnci oluşturarak ıslatma açısının azalmasını engellemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre her iki kaplama malzemesi için %2 ve %5 oranında AgNP katkısının daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Deneysel süresince aşındırıcı malzeme lineer hareket yapmakta ve lineer hareketin sürekliliği kayma gerilmesini arttırmaktadır. Artan kayma gerilmesi, sertlik ve elastikiyet modülü düşük olan gümüş partiküllerinin plastik deformasyona uğrayarak yüzeyde dağılmasını sağlamak ve koruyucu film tabakası oluşumunu sağlamaktadır [49]. Fakat konsantrasyon oranı %5'ten daha yüksek değerlerde (%8) olduğunda partiküllerin topaklanması ve topaklanan partiküllerin ağırlığına bağlı olarak film tabakasının zarar görmesi sebebiyle %2 ve %5

konsantrasyonlara kıyasla daha yoğun ve derin aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir. %2 ve %5 AgNP katkı oranlarının arasında kıyaslama yapabilmek için sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve ıslatılabilirlik verileri referans olarak alınabilir. Bu sonuçlara göre optimum konsantrasyon oranının %2 olduğu görülmektedir. Görüntüler karşılaştırıldığında jelatin kaplamasının PVA kaplamaya göre tüm konsantrasyonlarda daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu durum jelatinin nanopartiküller üzerinde daha kararlı bir kaplayıcı olduğu, nano partiküllerin topaklanmasını engelleyerek koloidal kararlılığı sağladığını göstermektedir.

### 3.2.4. 3D topoğrafya (3D topography)

PVA ve jelatin kaplı AgNP takviye edilerek hazırlanan koloidal süspansiyonların yüzey formuna etkisinin incelenmesi için aşınma bölgelerinden elde edilen 3D topoğrafya görüntüleri Şekil 18'de verilmiştir. Jelatin kaplı AgNP takviyeli koloidal süspansiyon



Şekil 18. Farklı oran ve kaplayıcılarla hazırlanmış nanoakışkan ortamında aşınan yüzeylerin 3D topoğrafya görüntüleri (3D topography images of worn surfaces in nanofluid conditions prepared with different ratios and coatings)



koşullarında elde edilen 3D topoğrafya görüntülerinde EG + %5 EP + %2 AgNP'nin kullanılan numune yüzeyinde yeşil tonlamanın, EG + %5 EP + %5 AgNP ve EG + %5 EP + %8 AgNP koşullarına kıyasla daha yoğun olduğu ve daha düzgün bir yüzey formu elde edildiği görülmektedir. PVA kaplı AgNP takviyeli koloidal süspansiyon koşullarında elde edilen 3D topoğrafya görüntülerinde ise sarı ve kırmızı tonların daha yoğun olduğu görülmektedir. Konsantrasyonlar arasında kıyaslama yapıldığında jelatin kaplı AgNP ile benzer durum söz konusu olduğu görülmektedir. Konsantrasyon miktarı arttıkça renk tonları koulaşmış ve kırmızı tonlar daha fazla alana yayılmıştır. Bu duruma bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü artmış ve homojen olmayan yüzey formu oluşmuştur. Pürüzlülük değerleri arasındaki fark ihmal edilebilir seviyededir fakat görüntülerdeki renk dağılımı analiz edildiğinde %2 konsantrasyonda %5 ve %8 konsantrasyonlarına kıyasla daha iyi yüzey kalitesinin elde edildiği belirlenmiştir. Konsantrasyon arttıkça AgNP'nin EG + EP karışımı içerisinde partikül yoğunluğu artmaktadır. Artan yoğunluğa bağlı olarak partiküllerin sıvı içerisindeki hareketi zorlaşmakta ve partiküller aşınma bölgesine yeterince penetrasyon sağlayamamaktadır. Jelatin ve PVA kaplı AgNP arasında kıyaslama yapıldığında ise jelatin kaplı AgNP'nin kullanıldığı yüzeydeki renk dağılımının yoğun olarak yeşil ve tonlarında, PVA kaplı AgNP'nin kullanıldığı yüzeydeki renk dağılımının sarı ve kırmızı tonlarında olduğu görülmektedir. Ayrıca jelatin kaplı AgNP'nin kullanıldığı yüzeylerde PVA kaplı AgNP'ye kıyasla daha homojen bir yüzey formu elde edilmiştir. Bu durum jelatin kaplamanın partiküllerin toplanma eğilimini azaltarak partiküllerin küresel şeklini koruması ile açıklanabilir. Küresel formdaki partiküller yuvarlanma hareketi ile aşınma bölgesine kolay bir şekilde penetrasyon sağlamaktadır. Bu sayede aşınma bölgesinde oluşan ısı, nanogümüş takviyeli koloidal süspansiyonun ısı transfer özelliği sayesinde süspansiyona transfer edilerek malzeme yüzeyine homojen şekilde dağılmaktadır. Isının azaltılması ve homojen dağılımı ile malzeme deformasyonu azalmış ve daha düzlemsel bir yüzey formu elde edilmiştir. Konsantrasyon oranları ve kaplama malzemelerinin etkisi birlikte değerlendirildiğinde optimum yüzey formunun EG + %5 EP + %2 AgNP koşullarında elde edildiği belirlenmiştir.

### 3. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada jelatin ve PVA kaplanmış gümüş nano partiküllerin ve EP katkısının aşınma yüzeylerde tribolojik performans ajanı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Gümüş nano partiküllerinin ve EP'nin birlikte sinerjistik etki oluşturarak aşınma yüzeylerde güçlü bir film tabakası oluşturması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdadır;

- Yüksek tribolojik performans elde etmek için yağ katışkısı olarak kullanılacak optimum EP konsantrasyonu %5, AgNP konsantrasyonu ise %2 olarak belirlenmiştir. Her iki katkı maddesi de konsantrasyon oranının artışına bağlı olarak aşınma yüzeyini olumsuz etkilemiştir.
- Gümüş nanopartikülleri jelatin ve PVA ile (ligand) kaplanmıştır. Tribolojik performans açısından bütün çıkış parametrelerinde jelatin PVA'dan daha iyi performans göstermiştir.
- EP ile AgNP etkileşimi %2 AgNP hariç anlamlı sonuçlar vermemiştir. Gümüş konsantrasyonu arttıkça toplanma ve çökelmeye bağlı olarak EP tabakasının deforme olduğu ve tribolojik performansın olumsuz etkilendiği düşünülmektedir.
- SEM görüntülerine göre farklı konsantrasyonlarda AgNP ve EP kullanımını kalay malzeme yüzeyinde morfolojik açıdan dikkate değer farklılık oluşturmamıştır. Fakat kuru aşınma koşullarına göre yüzey kalitesi önemli oranda iyileştirilmiştir.
- 3D topografya görüntülerine %2 konsantrasyonda jelatin kaplamalı AgNP kullanımı ile diğer koşullara kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri ve daha düzlemsel bir yüzey formu elde edildiği görülmüştür.

### Kaynaklar (References)

1. Li H., Yin Z., Wang, Y., A study on the wear behavior of tin-based journal bearing under different working conditions, *Industrial Lubrication And Tribology*, 72 (3), 359–368, 2020.
2. Ni Y., Sun N., Zhu G., Liu S., Liu J., Dong, G., Effect of different Cu6Sn5 morphology on the tribological properties of Babbitt alloy, *Industrial Lubrication And Tribology*, 74 (5), 580–587, 2022.
3. Zainulabdeen A. A., Hashim F. A., Assi S. H., Mechanical Properties of Tin-Based Babbitt Alloy using the Direct Extrusion technique, *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 518 (3), 1–9, 2019.
4. Ünlü B. S., Pinar A. M., CuSn10 Yatakların Farklı Yükleme, Hız ve Ortamlarda Yüzey Pürüzlülüğü ve Aşınmaya Etkisi, (May), 16–18, 2011.
5. Chidi N. K., Uchenna O. I., Odo J. U., Effect of Nickel and Iron Addition on the Structure and Mechanical Properties of Tin Bronze (Cu-10wt%Sn), *American Journal Of Engineering, Technology And Society*, 4 (6), 110–118, 2017.
6. Abed I. J., Kadhim H. A., Tribological Behaviour of Tin Bronze Alloys Produced by Different Casting Techniques, 2020.
7. Ünlü B.S., Durmuş H., Meriç C., Determination of tribological properties at CuSn10 alloy journal bearings by experimental and means of artificial neural networks method, *Industrial Lubrication And Tribology*, 64 (5), 258–264, 2012.
8. Huttunen-Saarivirta E., Kilpi L., Pasanen A. T., Salminen T., Ronkainen H., Tribocorrosion behaviour of tin bronze CuSn12 under a sliding motion in NaCl containing environment: Contact to inert vs. reactive counterbody, *Tribology International*, 151 (February) 106389, 2020.
9. Rasep Z., Muhammad Yazid M. N. A. W., Samion S., Lubrication of textured journal bearing by using vegetable oil: A review of approaches, challenges, and opportunities, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 146 (111191), 1–14, 2021.
10. Senatore A., Rao T. V. V. L. N., Partial Slip Texture Slider and Journal Bearing Lubricated with Newtonian Fluids: A Review, *Journal Of Tribology*, 140 (4), 1–20, 2018.
11. Kabave Kilincarslan S., Cetin M.H., Improvement of the milling process performance by using cutting fluids prepared with nano-silver and boric acid, *Journal Of Manufacturing Processes*, 56 (May), 707–717, 2020.
12. Padgurskas J., Rukuiza, R., Prosyčėvas I., Kreivaitis R., Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles, *Tribology International*, 60, 224–232, 2013.
13. Uflyand I. E., Zhinzhiro V. A., Burlakova V. E., Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development, *Friction*, 7 (2), 93–116, 2019.
14. Wang B., Qiu F., Barber G. C., Zou Q., Wang J., Guo S., Yuan Y., Jiang, Q., Role of nano-sized materials as lubricant additives in friction and wear reduction: A review, *Wear*, 490–491 (5988), 2022.
15. Alves S. M., Schroeter R. B., Dos Santos Bossardi J. C., De Andrade C. L. F., Influence of EP Additive on Tool Wear in Drilling of Compacted Graphite Iron Compacted, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 33 (2), 197–202, 2011.
16. Matuszewska A., Gradkowski, M., Antiwear action of mineral lubricants modified by conventional and unconventional additives, *Tribology Letters*, 27 (2), 177–180, 2007.
17. Kumar B.S., Padmanabhan G., Krishna P.V., Experimental Investigations of Vegetable Oil Based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining of AISI 1040 Steel, *Manufacturing Science and Technology*, 3 (1), 1–9, 2015.
18. Sezer İ., Effects of nano materials additives on fuel properties and combustion characteristics, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 115–136, 2019.
19. Dai W., Kheireddin B., Gao H., Liang H., Roles of nanoparticles in oil lubrication, *Tribology International*, 102, 88–98, 2016.
20. Reverberi A. P., D'Addona D. M., Bruzzone A. A. G., Teti R., Fabiano B., Nanotechnology in machining processes: Recent advances, *Procedia CIRP*, 79, 3–8, 2019.
21. Cetin M.H., Korkmaz S., Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method, *Tribology International*, 147 (February), 106273, 2020.
22. Srivayas P. D., Charoo, M. S., A review on tribological characterization of lubricants with nano additives for automotive applications, *Tribology In Industry*, 40 (4), 594–623, 2018.
23. Aydın S., Investigation of the effects of nanoparticles on metal adhesives, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1289–1301, 2021.
24. Turgut A., Sağlanmak Ş., Doğanay S., Experimental investigation on thermal conductivity and viscosity of nanofluids: Particle size effect,

- Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (1), 95–103, 2016.
25. Khan M. S., Sisodia M. S., Gupta S., Feroskhan M., Kannan S., Krishnasamy K., Measurement of tribological properties of Cu and Ag blended coconut oil nanofluids for metal cutting, *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 22 (6), 1187–1192, 2019.
  26. Lee K., Hwang Y., Cheong S., Choi Y., Kwon L., Lee J., Kim S. H., Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication, *Tribology Letters*, 35 (2), 127–131, 2009.
  27. Sia S. Y., Bassyony E. Z., Sarhan A. A. D., Development of SiO<sub>2</sub> nanolubrication system to be used in sliding bearings, *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 71 (5), 1277–1284, 2014.
  28. Zhao J., Huang Y., He Y., Shi Y., Nanolubricant additives: A review, *Friction*, 9 (5), 891–917, 2021.
  29. Eltugral N., Simsir H., Karagoz S., Preparation of nano-silver-supported activated carbon using different ligands, *Research On Chemical Intermediates*, 42 (3), 1663–1676, 2016.
  30. Shrestha S., Wang B., Dutta P., Nanoparticle processing: Understanding and controlling aggregation, *Advances In Colloid And Interface Science*, 279, 1–16, 2020.
  31. Ilyas S. U., Pendyala R., Marneni N., Preparation, sedimentation, and agglomeration of nanofluids, *Chemical Engineering And Technology*, 37 (12), 1–12, 2014.
  32. Simsir H., Eltugral N., Karagoz S., The role of capping agents in the fabrication of nano-silver-decorated hydrothermal carbons, *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 7 (5), 1–9, 2019.
  33. Restrepo C. V., Villa C. C., Synthesis of silver nanoparticles, influence of capping agents, and dependence on size and shape: A review, *Environmental Nanotechnology, Monitoring And Management*, 15, 1–11, 2021.
  34. Arancón R. A. D., Lin S. H. T., Chen G., Lin C. S. K., Lai J., Xu G., Luque R., Nanoparticle tracking analysis of gold nanomaterials stabilized by various capping agents, *RSC Advances*, 4 (33), 17114–17119, 2014.
  35. Babu M. V. S., Krishna A. R., Suman K. N. S., Review of Journal Bearing Materials and Current Trends, *American Journal of Materials Science And Technology*, 4 (2), 72–83, 2015.
  36. Bouyer J. Fillon M., An experimental analysis of misalignment effects on hydrodynamic plain journal bearing performances, *Journal of Tribology*, 124 (2), 313–319, 2002.
  37. Özkan D., The tribological performance investigation of low concentrations ZDDP anti-wear additive, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2045–2059, 2019.
  38. Lin Y. C., Cho Y. H., Chiu C. Te, Tribological Performance of EP Additives in Different Base Oils, *Tribology Transactions*, 55 (2), 175–184, 2012.
  39. Yadav G., Tiwari S., Jain M. L., Tribological analysis of extreme pressure and anti-wear properties of engine lubricating oil using four ball tester, *Materials Today: Proceedings*, 5 (1), 248–253, 2018.
  40. Huesmann-Cordes A. G., Meyer D., Brinksmeier E., Schulz J., Influence of additives in metalworking fluids on the wear resistance of steels, *Procedia CIRP*, 13, 108–113, 2014.
  41. Raghs H., Kondul B., Cetin M. H., Investigation of Wear Behavior of Boronized H13 Steel under Environment of Nano-Silver-Added Lubricants Coated with Different Ligands, *Surface Topography: Metrology And Properties*, 8 (1), 2–33, 2020.
  42. Ananth A. N., Daniel S. C. G. K., Sironmani T. A., Umamathi S., PVA and BSA stabilized silver nanoparticles based surface-enhanced plasmon resonance probes for protein detection, *Colloids And Surfaces B: Biointerfaces*, 85 (2), 138–144, 2011.
  43. Slepíčka P., Kasálková N. S., Siegel J., Kolská Z., Švorčík V., Methods of gold and silver nanoparticles preparation, *Materials*, 13 (1), 2020.
  44. Berg J. M., Romoser A., Banerjee N., Zebda R., Sayes C. M., The relationship between pH and zeta potential of ~ 30 nm metal oxide nanoparticle suspensions relevant to in vitro toxicological evaluations, *Nanotoxicology*, 3 (4), 276–283, 2009.
  45. Barathithasan R., Electrophoretic Light Scattering (Zeta Potential) What is Zeta Potential?, 1–50, 2018.
  46. Abbasi E., Milani M., Aval S. F., Kouhi M., Akbarzadeh A., Nasrabadi H. T., Nikasa P., Joo S. W., Hanifehpour Y., Nejati-Koshki K., Samiei M., Silver nanoparticles: Synthesis methods, bio-applications and properties, *Critical Reviews In Microbiology*, 42 (2), 173–180, 2016.
  47. Tran Q. H., Nguyen V. Q., Le A., Silver nanoparticles: synthesis, properties, toxicology, applications and perspectives, *Advances In Natural Sciences: Nanoscience And Nanotechnology*, 4, 1–20, 2013.
  48. Kumar B. S., Padmanabhan G., Krishna P. V., Performance Assessment of Vegetable Oil based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining, *Journal Of Advanced Research In Materials Science*, 19 (1), 1–13, 2016.
  49. Prabu L., Saravanakumar N., Rajaram G., Influence of Ag nanoparticles for the anti-wear and extreme pressure properties of the mineral oil based nano-cutting fluid, *Tribology In Industry*, 40 (3), 440–447, 2018.
  50. Ahmida Y.A.A., Korkmaz S., Kilincarslan S. K., Sirvan O. C., Investigation of interaction of extreme pressure additive, load and sliding speed parameters with silver nano-particles in wear environment, *Surface Topography: Metrology And Properties*, 9 (4), 45020, 2021.
  51. Li H., Zhang Y., Li C., Zhou Z., Nie X., Chen Y., Cao H., Liu B., Zhang N., Said Z., Debnath S., Jamil M., Ali H. M., Sharma S., Extreme pressure and antiwear additives for lubricant: Academic insights and perspectives, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120 (2), 1–27, 2022.
  52. Safiei W., Rahman M. M., Yusoff A. R., Radin M. R., Preparation, stability and wettability of nanofluid: A review, *Journal of Mechanical Engineering And Sciences*, 14 (3), 7244–7257, 2020.
  53. Ajithkumar J. P., Anthony Xavier M., Influence of Nano Lubrication in Machining Operations-A Review, *Materials Today: Proceedings*, 5 (5), 11185–11192, 2018.
  54. Bhuiyan M. H. U., Saidur R., Amalina M. A., Mostafizur R. M., Islam, A. K. M. S., Effect of nanoparticles concentration and their sizes on surface tension of nanofluids, *Procedia Engineering*, 105, 431–437, 2015.
  55. Hekimoğlu A. P., Haciosmanoğlu M., Baki M., Effect of zinc contents on the structural, mechanical and tribological properties of EN AC-48100 (Al-17Si-4Cu-Mg) alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 1799–1814, 2020.
  56. Alemdağ Y., Karabyık S., Pürçek G., Effect of multi-directional hot forging on mechanical and tribological properties of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 255–265, 2021.
  57. Korkmaz S., Pehlivanoglu M., Orak, A., Cetin M. H., Investigation of Wear Behavior of Carbide Based Coated Rolling Roll Materials Under Dry and Lubricated Conditions, *Surface Topography: Metrology and Properties*, 9 (1), 1–19, 2021.
  58. Toutenburg H., *Statistical Analysis of Designed Experiments, Analysis, Second Ed.*, Springer, 487–515, 2010.
  59. Zhang Y., Tudela I., Pal M., Kerr I., High strength tin-based overlay for medium and high speed diesel engine bearing tribological applications, *Tribology International*, 93, 687–695, 2016.
  60. Gebretsadik D. W., Hardell J., Prakash B., Friction and wear characteristics of different Pb-free bearing materials in mixed and boundary lubrication regimes, *Wear*, 340–341, 63–72, 2015.
  61. Herdan J. M., Lubricating oil additives and the environment - An overview, *Lubrication Science*, 9 (2), 161–172, 1997.
  62. Korkmaz S., Cetin M. H., Dogan S., Ozen K., Ayhan E., Ozgul M., Ozdemir S.F., A Comprehensive investigation on tribological performance of nano-silver and nano-gold additivated fluids on wearing surfaces, *Journal of Tribology*, 147, 1–13, 2020.
  63. Saravanakumar N., Prabu L., Karthik M., Rajamanickam A., Experimental analysis on cutting fluid dispersed with silver nano particles, *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 28 (2), 645–651, 2014.
  64. Cetin M. H., Korkmaz, S., Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method, *Tribology International*, 147, 106273, 2020.
  65. Li H., Zhang Y., Li C., Zhou Z., Nie X., Chen Y., Cao H., Liu B., Zhang N., Said Z., Debnath S., Jamil M., Ali H. M., Sharma S., Extreme pressure and antiwear additives for lubricant: Academic insights and perspectives, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–27, 2022.
  66. Soy U., "1000 Soruda Malzeme Bilimi", 2. Ed., İstanbul, 62–63, 2017.