



Investigation of tribological properties of MoS₂ and graphite coatings under different environmental conditions

Yiğit İmece¹, Oğuz Erdem^{2*}, Bedri Tuç³

¹Erkunt Tractor Industry A.Ş., Ankara, 06930, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir, 40100, Turkey

³Department of Mechanical Engineering, Başkent University, Ankara, 06790, Turkey

Highlights:

- The designing and manufacturing of pin-disc type tribometer
- Wear experiments under different environmental conditions
- The statistical calculation of the coating lifetime for a specific reliability value

Keywords:

- solid film lubricants
- friction
- wear
- pin-disc type tribometer

Article Info:

Received: 24.01.2017

Accepted: 28.07.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416401

Acknowledgement:

We gratefully acknowledge the supports of Gazi University and Erkunt Traktör A.Ş.

Correspondence:

Author: Oğuz Erdem

e-mail:

oguz.erdem@ahievran.edu.tr

phone: +90 386 280 3825

Graphical/Tabular Abstract

A pin-disc type tribometer was designed and manufactured for wear and friction tests.

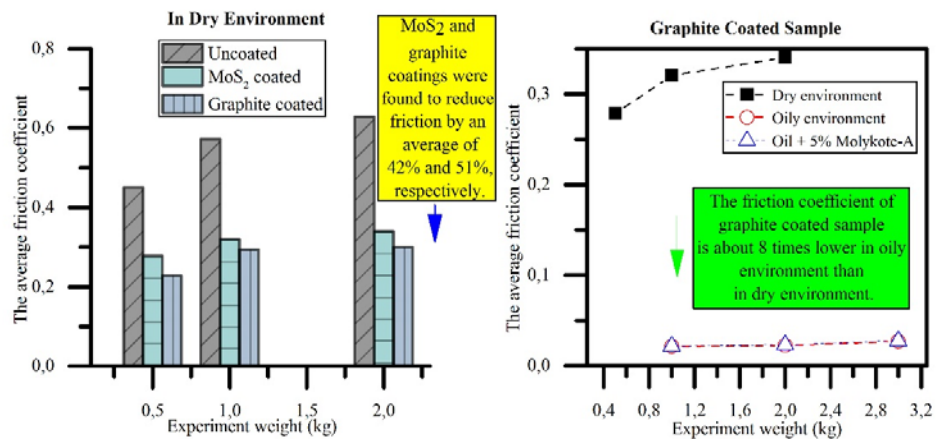


Figure A. The variation of average friction coefficients by different experiment weights

Purpose: The aim of this study is to investigate tribological properties of MoS₂ and graphite coatings under different environmental conditions.

Theory and Methods:

In this study, 10 mm in diameter and 20 mm length made of AISI1008 steel samples coated with graphite and MoS₂ powders which widely used today as a solid lubricant with lead-spinning method. The experiments were carried out under three different environment; dry, oily and oil + 5% Molykote-A added. The properties of the abraded surfaces of the samples were investigated by optical microscope and scanning electron microscope. For 30%, 60% and 95% reliability values, the lifetime values of MoS₂ and graphite coatings were statistically calculated.

Results:

In dry environment, MoS₂ and graphite coatings were found to reduce friction by an average of 42% and 51%, respectively. The friction coefficients for MoS₂ and graphite coatings in oily medium, were respectively about 10 times and 8 times lower than those in dry environment. In investigation of abraded surfaces, it was seen that scratch marks and locally metal regions on abraded surfaces which had worn in dry environment. In case of oily environmental, the coatings were superficially worn and no metal region was seen on abraded surfaces. The coating lifetime for MoS₂ coated sample was calculated to be approximately 31.7 minutes and the lifetime for the graphite coated sample approximately 32 minutes.

Conclusion:

According to the results of the experiments, it has been found that coating any machine element surfaces with MoS₂ or graphite can dramatically reduce the friction coefficient under dry environment. Limit of no use thickness (15 μm) that is also coating thicknesses of MoS₂ and graphite coated samples can withstand abrasion for approximately 32 minutes for 95% reliability with a test weight of 2 kg in dry environment.



MoS₂ ve grafit kaplamaların farklı ortam şartlarında tribolojik özelliklerinin araştırılması

Yiğit İmece¹, Oğuz Erdem^{2*}, Bedri Tuç³

¹Erkunt Traktör Sanayii A.Ş., 06930, Ankara, Türkiye

²Ahi Evran Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, 40100, Kırşehir, Türkiye

³Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, 06790, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Pin-disk tipi tribometre tasarımı ve imalatı
- Farklı ortam şartlarında aşınma deneyleri
- Belirli bir güvenilirlik değeri için kaplama ömrünün istatistiksel hesabı

Makale Bilgileri

Geliş: 24.01.2017

Kabul: 28.07.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416401

Anahtar Kelimeler:

Katı film yağlayıcılar,
sürtünme,
aşınma,
pin-disk tipi tribometre

ÖZET

Bu çalışmada, günümüzde katı yağlayıcı olarak yaygın kullanılan MoS₂ ve grafit tozları AISI1008 çeliğinden imal edilmiş 10 mm çapında ve 20 mm boyundaki numunelere sürme-sıvama metoduyla kaplanmıştır. Aşınma ve sürtünme deneyleri için pin-disk tipi tribometre tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneyler üç farklı; kuru, yağlı ve yağ + %5 Molykote-A katkısı içeren ortam altında gerçekleştirilmiştir. Kuru ortamda, MoS₂ ve grafit kaplamalarının sürtünmeyi sırasıyla ortalama %42 ve %51 oranında azalttığı tespit edilmiştir. MoS₂ ve grafit kaplaması için yağlı ortamdaki sürtünme katsayıları kuru ortamdakilere göre sırasıyla yaklaşık 10 kat ve 8 kat daha düşük elde edilmiştir. Aşınmış yüzeylerin incelemesinde, kuru ortamda aşındırılmış numunelerde kazınma izleri ve bölgesel olarak metal yüzeyler görülmüştür. Yağlı ortamda ise, kaplamalar yüzeyel olarak aşınmış ve aşınmış yüzeylerde herhangi bir metal bölge görülmemiştir. %30, %60 ve %95 güvenilirlik değerleri için MoS₂ ve grafit kaplamaların ömür değerleri istatistiksel olarak hesaplanmıştır.

Investigation of tribological properties of MoS₂ and graphite coatings under different environmental conditions

H I G H L I G H T S

- The designing and manufacturing of pin-disc type tribometer
- Wear experiments under different environmental conditions
- The statistical calculation of the coating lifetime for a specific reliability value

Article Info

Received: 24.01.2017

Accepted: 28.07.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416401

Keywords:

Solid film lubricants,
friction,
wear,
pin-disk type tribometer

ABSTRACT

In this study, 10 mm in diameter and 20 mm length made of AISI1008 steel samples coated with graphite and MoS₂ powders which widely used today as a solid lubricant with lead-spinning method. A pin-disc type tribometer was designed and manufactured for wear and friction tests. The experiments were carried out under three different environment; dry, oily and oil + 5% Molykote-A added. In dry environment, MoS₂ and graphite coatings were found to reduce friction by an average of 42% and 51%, respectively. The friction coefficients for MoS₂ and graphite coatings in oily medium, were respectively about 10 times and 8 times lower than those in dry environment. In investigation of abrasioned surfaces, it was seen that scratch marks and locally metal regions on abrasioned surfaces which had worn in dry environment. In case of oily environmental, the coatings were superficially worn and no metal region was seen on abrasioned surfaces. For 30%, 60% and 95% reliability values, the lifetime values of MoS₂ and graphite coatings were statistically calculated.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: oguz.erdem@ahievran.edu.tr / Tel: +90 386 280 3825

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek verimlilik, uzun süre dayanıklılık ve güvenlik; hareket eden mekanik sistemlerin sonsuz önem duyulması gereken olgularıdır [1]. Birbiriyle temas halinde olan makina elemanları arasında sürtünme ve aşınma mevcuttur [2]. Bunlarla birlikte, günümüzde çok sayıda yenilenemez enerji kaynaklarımızın sürtünmeyi yenmek için kullanıldığı ve birçok mekanik sistem hatasının aşınmadan dolayı kaynaklandığı artık iyi bilinmektedir [3]. Bu nedenle makina elemanlarının tribolojik özelliklerinin (sürtünme, aşınma ve yağlama) incelenmesi büyük önem arz etmektedir [4].

Makina elemanlarının büyük bir çoğunluğunun hurdaya ayrılma sebebi hiç kuşkusuz aşınmadır [5]. Bunun sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilme zorunluluğu, makinaların bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek, bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel, sürtünme sonucu oluşan enerji kayıpları göz önüne alındığında ekonomik açıdan tribolojiye olan ihtiyaç daha da artmaktadır [6]. Triboloji alanında yapılan araştırmalar genellikle; malzemelerin kinetik sürtünme katsayısının [7, 8], dinamik sürtünme katsayısının [9, 10] ve aşınma davranışlarının [11, 12] belirlenmesi, talaşlı imalatta takım aşınma mekanizmasının [13, 14] belirlenmesi, sürtünme ve aşınmaya sebep olan yüzeylerin birbirleriyle temaslarını kesecek katı yağlayıcı malzemelerin [15, 16] araştırılması, yüksek sıcaklıkta çalışabilecek malzemelere yapılacak kaplamalara [17, 18] ve kompozit malzemelere yapılacak kaplamalara [19] karar verilmesi, hareket eden sistemler içerisine üçüncü yapı olarak katılan toz katkılarının [20] davranışlarını, sürtünme önleyici endüstriyel yağlar [21, 22] ve biyoyağlar [23] içerisine yapılan nano boyuttaki toz katkılarının etkileri gibi temel konuları içerir. Nanopartiküllerin sürtünme modifikatörleri ve yıpranma önleyici katkı maddeleri olarak kullanımı son on yılda triboloji alanında geniş ilgi görmektedir [24]. Fakat, nanopartikülün kendisini yağla karıştırmadan taşımak insan sağlığına zararlıdır ve göz ardı edilmemesi gereken bir durumdur. Çünkü nano parçacık taşıma esnasında, havada uçan nanopartikül haline dönüşerek insan solunumuna risk oluşturabilir [25].

Makina elemanlarındaki sürtünmeyi ve tribolojik hasarları en aza indirmek için yapılabilecek birçok yöntem mevcuttur. Yaygın olarak tercih edilen yöntem; birbiriyle temas eden iki yüzeyi viskoz bir akışkanla ayırmaktır. Fakat bazı durumlarda yüzeylerin temasını engellemek mümkün değildir. Ayrıca, mekaniksel sistemler ekstrem durumlar olarak tabir edilen yüksek sıcaklık, aşırı yük, vakum, düşük çalışma hızları vb. şartlar altında çalışmak zorunda kalabilirler. Böylesi durumlarda tribolojik kayıpları en aza indirme yöntemlerinden biri de katı film yağlayıcıları kullanmaktır. Katı yağlayıcılar sahip oldukları katmanlı kristal kafes yapısı sayesinde başarılı tribolojik sonuçlar ortaya çıkarmaktadırlar. Katı yağlayıcılar genellikle, birlikte çalışacak malzemelerin yüzeylerinin kaplanması şeklinde

tercih edilir. Oksagonal ve iki boyutlu kristal yapısından dolayı, MoS₂ (Molibden disülfid) bilinen iyi bir katı yağlayıcıdır [26]. Literatürde, MoS₂ tozlarının biyopolimer kaplama solüsyonları içerisine katı malzemesi olarak kullanımının oldukça iyi aşınma direnci sağladığı ve sürtünmeyi azalttığı şeklinde rapor edildiği çalışmalar mevcuttur [27,28]. Yine biyopolimer kaplama solüsyonlarının dışında katı yağlayıcıların vakslarla karışımından üretilen termoplastik malzemelerde yaygın olarak kullanılır. Ünal ve arkadaşının çalışmasında, katı poliamid-6 (PA 6) termoplastik polimeriyle katı yağlayıcı vaks katkılı poliamid-6 karışımının, kuru kayma şartları altında kendi üzerindeki tribolojik performansları incelenmiştir. Katı yağlayıcı vaks/poliamid-6 polimer karışımı ikiz vidalı bir ekstruderde üretilmiş, deney numuneleri ise enjeksiyon makinesi kullanılarak kalıplanmıştır. Aşınma ve sürtünme deneyleri, ASTM G99 standardına uygun olarak pin-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiş olup tribolojik test sonuçlarına göre, katı yağlayıcı vaks karıştırılmış poliamid-6 polimerinin kendi üzerinde çalışması durumunda sürtünme katsayısı ve aşınma hızı özelliklerinin katı poliamid-6'ya göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir [11]. Vadiraj ve arkadaşları, pin-disk tipi tribometre cihazı kullanılarak MoS₂, grafit, borik asit ve TiO₂'nin sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Deneyleri, 6000 m mesafede ve 10 kg yük altında 100-1200 rpm devir aralığında yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde MoS₂ ve grafitin diğer iki yağlayıcıya göre %30-50 arasında daha az aşındığını ve ayrıca artan devirlerde MoS₂ ve grafitin sınır yağlama durumunda yüzeylere daha iyi yapıştığından daha düşük sürtünme katsayılarına sahip olduğunu tespit etmişlerdir [29]. Yine pratik uygulamaya örnek olarak; Cho ve arkadaşının çalışmasında, içerisine ayrı ayrı grafit, grafit + Sb₂S₃ ve grafit + MoS₂ katkısı içeren günümüz otomobillerinde kullanılan üç adet fren balatası imal edilmiştir. Üretilen balatalar standart bir aile otomobili fren sistemine (tek pistonlu) bağlanmıştır. Frenin disk malzemesi %3,5 karbona sahip gri dökme demir olarak belirtilmiştir. Otomobil, bir dinamometre sistemi üzerine çıkarılarak kalkış ve duruş testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, tek başına grafit katkılı balata düşük sıcaklıklarda başarılı olsa da özellikle yüksek sıcaklıklardaki dur kalk simülasyonunda grafit + Sb₂S₃ bileşimi katkılı balatanın daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu rapor edilmiştir [30].

Bu çalışmada, AISI1008 çeliğinde imal edilmiş deney numuneleri günümüzde katı yağlayıcı olarak yaygın kullanılan MoS₂ ve grafit tozlarıyla püskürtme tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Tasarlanan ve imal edilen pin-disk tipi tribometre sayesinde yük hücresinin de kapasitesi göz önünde bulundurularak 0,5; 1; 2 ve 3 kg ağırlıklarla kuru, yağlı ve yağ + %5 Molykote A katkılı ortamlarda kaplamaların tribolojik özellikleri incelenmiştir. Deney numunelerinin aşınmış yüzeylerinin özellikleri araştırılmıştır.

Belirli bir güvenilirlik değerine karşılık gelen kaplama ömürlerini bulmak için istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

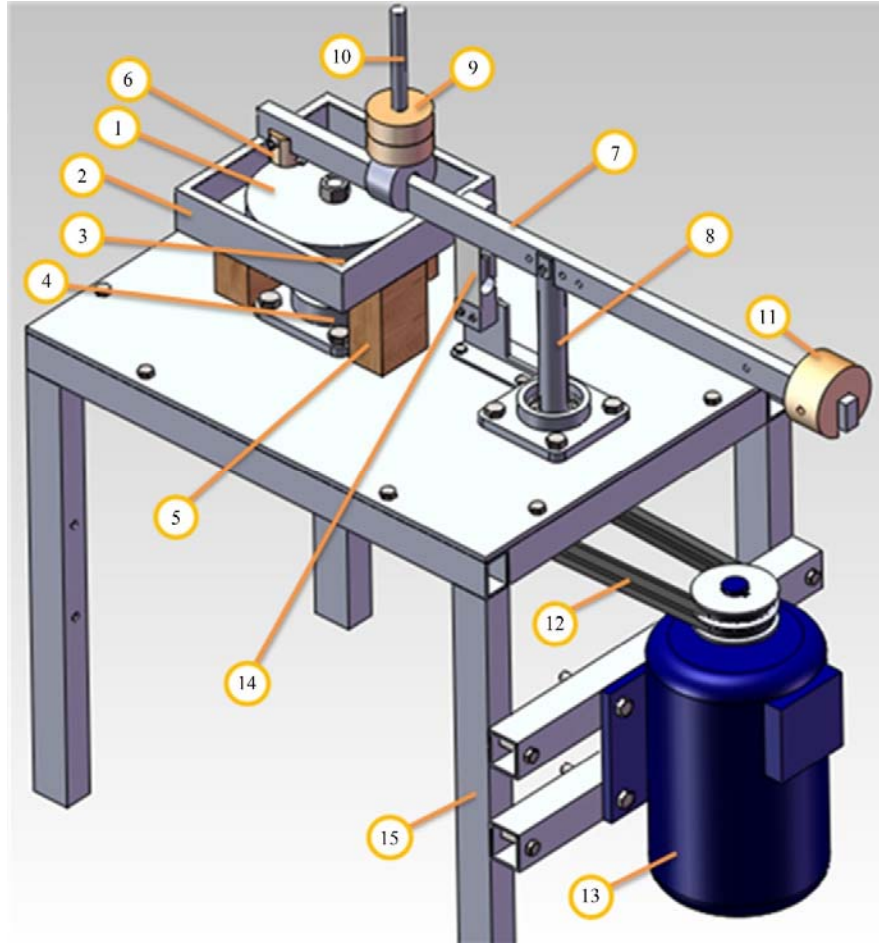
2.1. Aşınma Miktarının ve Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

(Determination of Wear Amount and Friction Coefficient)

Bu çalışmada, deney numunelerinin aşınma miktarlarını ve sürtünme katsayılarını ölçebilmek amacıyla pin-disk tipi bir tribometre tasarlanmış ve imal edilmiştir. Cihazın açıklamalı katı model resmi Şekil 1'de ve imalattan sonraki deney düzeneğinin görünümü Şekil 2'de verilmiştir.

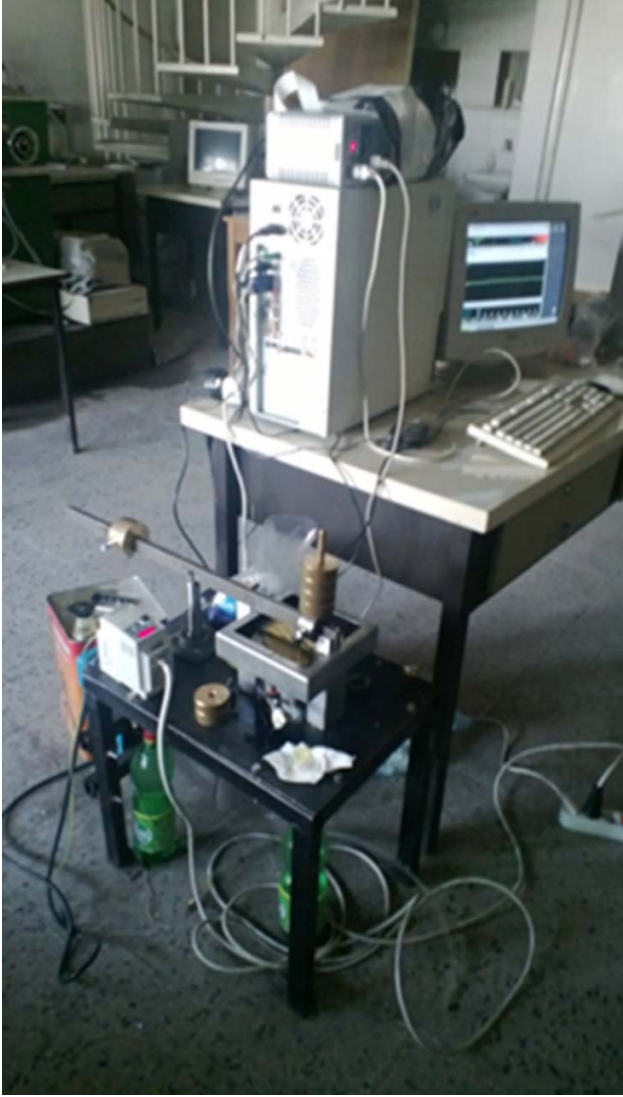
Şekil 1'de numaralarla verilen deney cihazının temel parçalarının özellikleri şu şekildedir: 1 numaralı dönen disk, deney numunelerine göre daha sert olan AISI1040 çeliğinden imal edilmiştir. Disk 158 mm çapında olup yüzeyi 55 HRC sertliğe ve 1µm ortalama pürüzlülüğe sahiptir. Kuru ve yağlı ortamda deneyleri yapılabilmesi amacıyla 200×200 mm'lik 2 numaralı yağ kabı imal edilmiştir. Yağın kaptan sızmasını önlemek amacıyla 4 numaralı ana mil ile kap arasında 3 numaralı flanş yerleştirilmiştir. Flanş, yağ keçesiyle ana mile temas etmektedir. Ayrıca yağ kabının cıvata ve vida bağlantılarına sızdırmazlık için sıvı conta uygulanmıştır. Yağ kabı, cihazın çalışır konumunda oluşan titreşimleri sönmüleyebilmesi için 5 numaralı ahşap

ayaklarla tablaya oturtulmuştur. Yağın bir sonraki deney için tahliyesi, kabın altında bulunan vana aracılığıyla sağlanmaktadır. Deney numuneleri, 6 numaralı vida sıkıştırılmalı numune tutucuyla 7 numaralı çubuğa bağlanmaktadır. Çubuk yüksekliği 8 numaralı pivot mili sayesinde ayarlanabilmektedir. Ayrıca pivot mili serbest hareket ederek diskin çalışması durumunda sisteme herhangi bir etkiye bulunmamaktadır. 9 numaralı piriçten yapılmış deney ağırlıkları (her biri 0,5 kg) 10 numaralı ağırlık tutucu vasıtasıyla çubuk üzerinden numunelere yüklenmektedir. Deneyler sırasında çubuğun, ağırlık tutucunun ve numune tutucunun ağırlıklarını karşılamak için çubuğun karşı tarafında 1 kg'lık piriçten yapılmış 11 numaralı karşı ağırlık bulunmaktadır. Karşı ağırlık, çubuk üzerinde kaydırılarak gerekli hassasiyet sağlanmaktadır. Ana milde bulunan bir kasnakla motor arasında 12 numaralı V kayışlı bir bağlantı mevcuttur. 13 numaralı motor 3 fazlı ve 1000 rpm hıza sahip olup motora bağlanan 0,75 kW'lik AC/DC dönüştürücü güç kaynağı (DELTA VFD-L) sayesinde devri 1-1000 rpm arasında ayarlanabilmektedir. Sürtünme katsayısı ölçümü; yağ kabı ve pivot mil arasında yerleştirilen 14 numaralı 6 kg kapasiteli yük hücresinin (ESIT SPA) numuneye disk arasındaki sürtünmeden meydana gelen paralel kuvvetin çubuk vasıtasıyla yük hücresi kirişine etkisi sayesinde gerçekleştirilmektedir. Yük



Şekil 1. Pin-disk tipi tribometre cihazının açıklamalı katı modeli (The detailed solid model of pin on disc type tribometer)

hücrelerinden alınan veriler, 8 kanallı veri toplama sistemi (TDG Ai8b) ile bilgisayara aktarılmıştır. Tüm deney seti 15 numaralı kare profil kullanılarak oluşturulmuş şase üzerine oturtulmuştur. Aşınma deneyleri oda şartlarında yapılmış olup her deneyden sonra, yağ kabı içerisindeki yağ değiştirilmiştir.



Şekil 2. Pin-disk tipi tribometre cihazı
(The pin on disc type tribometer)

Yağlı ortam deneyleri için SAE 80 W dişli yağı kullanılmıştır. Bu yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Deney numunelerini kaplamada kullanılan MoS₂ ve grafit tozları özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Yapılan toz boyutu analizlerinde MoS₂ tozunun ortalama boyutu ($d_{0,5}$) 3,56 μm ve grafit tozunun ortalama boyutu 5,24 μm olarak ölçülmüştür (Mastersizer toz boyutu ölçüm cihazı). Deneylerde Molykote A (Tablo 3) yağ katkısı, SAE 80W yağı içerisine üretici firma tarafından önerilen oranda (%5) katılmıştır. Kaplama yapılan deney numuneleri AISI1008 çeliğinden imal edilmiş ve mekanik özellikleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 1. SAE 80W dişli yağının özellikleri
(The properties of SAE 80W gear oil)

Özellik	Değer
Ticari isim	SAE 80W (API GL-4)
Tedarik edilen yer	LUKOIL Co.,
Viskozite (mm ² /s) 100°C’de	10
Viskozite (mm ² /s) 40°C’de	63,7
Viskozite İndeksi	141
Asitlik (mg KOH/g)	2
Bazlık (mg KOH/g)	9
Akma Noktası (°C)	-36
Özgül ağırlık (g/cm ³)	0,885
Alevlenme Noktası (°C)	220

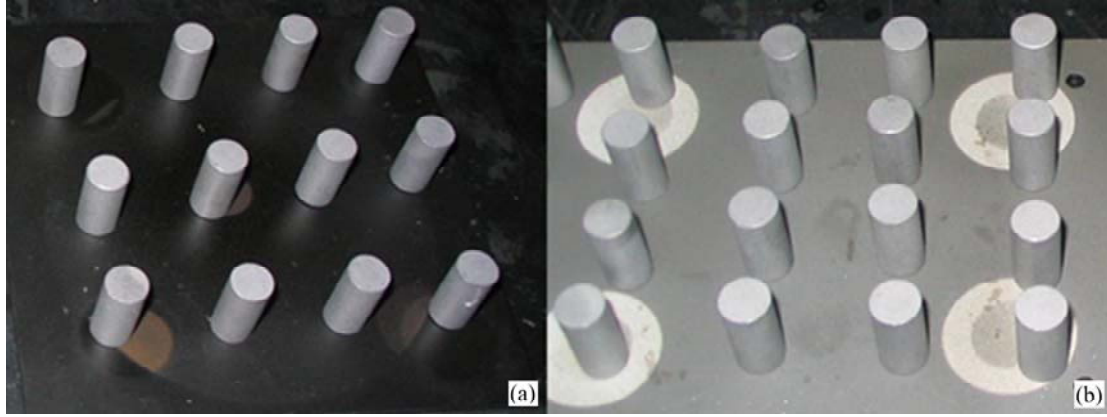
Tablo 2. MoS₂ ve grafit tozlarının özellikleri (The properties of MoS₂ and graphite powders)

Ürün	MoS ₂	Grafit
Ticari isim	Molykote 7409	Molykote D-10
Tedarik edilen yer	DOW CORNING Co.,	DOW CORNING Co.,
Renk	Grimsi siyah	Siyah
Çalışma sıcaklığı (°C)	-70 / +380	-70 / +380
Kürleşme sıcaklığı (°C)	220	180
Kürleşme süresi (min)	30 (220°C)	30 (180°C)
Yoğunluk (g/cm ³)	1,17 (20°C)	1,30 (20°C)
Yüzey hazırlama	Fosfatlama-kumlama (180 grid)	Fosfatlama-kumlama (180 grid)
Uygulama şekli	Püskürtme, daldırma, sürme	Püskürtme, daldırma, sürme

Tablo 3. Molykote A özellikleri (The properties of Molykote A)

Özellik	Değer
Ticari isim	Molykote A-dispersion
Tedarik edilen yer	DOW CORNING Co.,
Görünüm	Siyah sıvı
Parlama noktası (°C)	150
Kinematik viskozite (mm ² /s)	90
Yoğunluk (g/ml)	0,9

Deney numuneleri 10 mm çaplı silindirik çubuklardan torna tezgahında boyları 20 mm olacak şekilde kesilmiştir. Kaplama malzemelerinin yüzeye iyi sıvanması için diske basacak olan her iki yüzeyde tormalamadan dolayı oluşan halka biçimli izler taşlanarak yok edilmiştir. Silindirik şeklindeki deney numunelerinin kaplama öncesi taban ve tavan yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değeri 1,7 μm olarak ölçülmüştür (Surrcorder SE1200 portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı). Şekil 3’de kaplama öncesi numuneler görülmektedir. MoS₂ ve grafit kaplanacak her iki numune türü de öncelikle kumlama işlemine tabii tutulmuştur (Şekil 3b). Kumlama işleminde; 7,2 g/cm³ yoğunlukta, 50 HRC sertlikte, 0,3 mm nominal çapa sahip,



Şekil 3. Deneş numuneleri a) kumlama öncesi b) kumlama sonrası (The test specimens a) before sandblasting b) after sandblasting)

180 elek aralığında (180 grid) ve martenzitik mikro yapıdaki çelik grit kumları/tozları kullanılmıştır.

Tablo 4. AISI1008 çeliğı deneş numunelerinin mekanik özellikleri
(The mechanical properties of AISI1008 steel test specimens)

Özellik	Değer
Ticari isim	SAE-AISI 1008
Tedarik edildiğı yer	Haihong Int. Trade Co.,
Kompozisyon	C %0.10 / Mn %0,3-0,5/ P %0,04 / S %0,05
Yoğunluk (kg/cm ³) 25°C	7871
Poisson Oranı 25°C	0,27-0,30
Elastik Modül (MPa) 25°C	190-210
Çekme Mukavemeti (MPa)	340
Akma Mukavemeti (MPa)	285
Sertlik (HB)	95

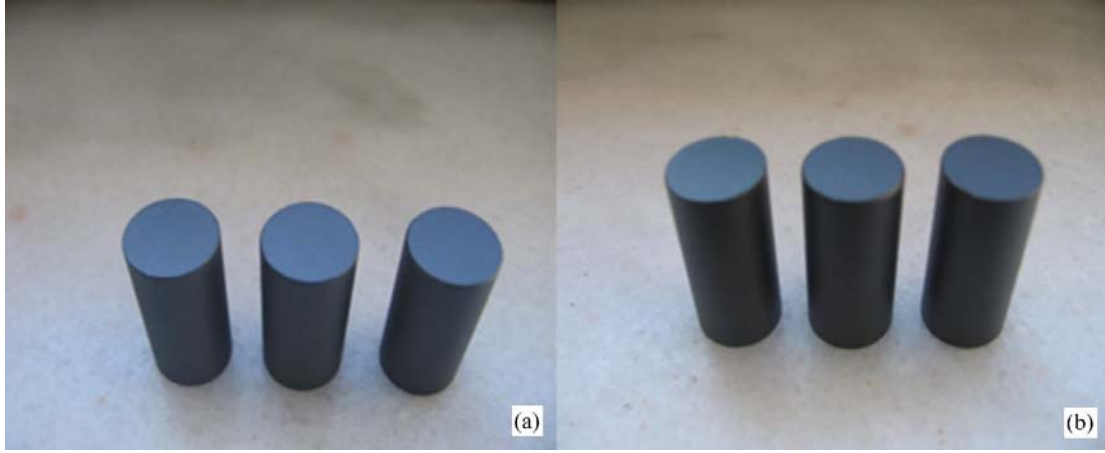
Kumlama işleminin amacı; yapılacak olan kaplamaların yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamak ve kaplama ömrünü uzatmaktır. Kumlanan numuneler, fazla kumlarından arındırılması için havayla temizlenmiş ve asetonla silinerek boyaya/kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Numune yüzeylerinin MoS₂ ile kaplanmasında: a) kumlanmış numuneler 180-200°C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 20 dakika bekletilerek soğumaya bırakılmış, b) iki kat olacak şekilde hava tabancasıyla MoS₂ yüzeye püskürtülmüş (Şekil 4), c) kürlleme için boyanmış numuneler 220°C sıcaklıktaki fırında 30 dakika bekletilmiş ve sonra soğumaya bırakılmıştır (Şekil 5a). Numunelerin grafit ile kaplanmasında ise: a) kumlanmış numuneler 180-200°C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 20 dakika bekletilerek soğumaya bırakılmış, b) iki kat olacak şekilde hava tabancasıyla grafit yüzeye püskürtülmüş, c) numuneler birinci kürlleme işlemi için 100°C fırında 10 dakika bekletilmiştir. Bu sayede grafit kaplanmış yüzeylerin yüksek

ısıya maruz kalarak kabarmasının önüne geçilmiştir, d) numuneler havalandırıldıktan sonra ikinci kürlleme işlemi için 200°C fırında 20 dakika bekletilmiş ve daha sonra soğumaya bırakılmıştır (Şekil 5b). Hem MoS₂ kaplanmış hem de grafit kaplanmış deneş numunelerinin kaplama sonrası R_a değerleri ölçülmüş (0,8 µm) ve birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Insize ISU-200C ultrasonik kalınlık ölçüm cihazıyla MoS₂ ve grafit kaplanmış numunelerin aşındırılacak yüzeylerindeki kaplama kalınlıkları ortalama 15 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4. Numunelerin boya tabancasıyla kaplanması
(Coating of samples with spray gun)

Deneşsel çalışmalarda kullanılacak olan sürtünme katsayısı bağıntısı hesaplanmadan önce cihaz üzerinde kalibrasyon yapılmıştır. Öncelikle yük hücresi (TDG Ai8b 8 kanallı veri toplama sistemi) bilgisayar yazılımında 1 kg'lık yükü 1,53 V olarak okuduğı tespit edilmiştir. Bunun için deneşde kullanılan ağırlıklar 1/10000 hassasiyete sahip terazi yardımıyla kontrol edilmiş ve her biri yük hücresine bağlanarak okuduğı değerler tespit edilmiştir (Tablo 5). Sürtünme katsayısını [11] hesaplamak için Şekil 6'daki serbest cisim diyagramından (SCD) yararlanılmıştır (Eş. 1). Şekil 6'daki SCD sayesinde Eş. 2 elde edilmiştir.

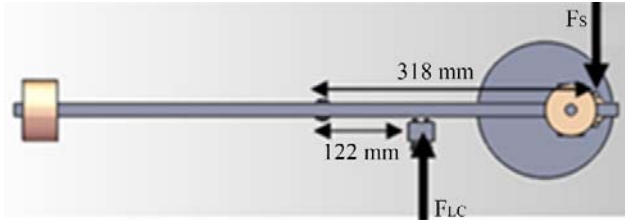


Şekil 5. Deney numuneleri a) MoS₂ kaplanmış b) grafit kaplanmış (Test samples a) MoS₂ coated b) graphite coated)

Tablo 5. Yük hücreğine bağlanan ağırlıkların gerilim karşılıkları

(The voltage responses of test weights connected to the load cell)

Deney ağırlığı (kg)	Gerilim (V)
0,5	0,825
1	1,53
1,5	2,317
2	3,060
2,5	3,807
3	4,550



Şekil 6. Metal çubuğun serbest cisim diyagramı
(The free body diagram of metal rod)

$$F_S = \mu \cdot N \quad (1)$$

$$F_S = F_{LC} \cdot (122 / 318) = F_{LC} / 2,6066 \quad (2)$$

$$F_{LC} = m \cdot g = (V / 1,53) \cdot g \quad (3)$$

Eş. 3'deki kütle (m) yerine; yük hücresi bilgisayar yazılımında 1 kg'lık yükü 1,53 V olarak okunduğundan

dolayı ($m = V / 1,53$) yazılmıştır. Böylece yük hücrelerinden okunan voltaj değeri, kütleye dönüştürülmüştür. Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3'den Eş. 4 türetilmiştir.

$$\mu \cdot N = [(V / 1,53) \cdot 9,81] / (N \cdot 2,6066) \quad (4)$$

$$\mu = 2,4598 \cdot (V / N) \quad (5)$$

Eş. 5'deki N değeri, disk yüzeyine uygulanan normal kuvveti ifade etmektedir. Fakat, deneylerde ağırlığın yerleştirildiği bölgeyle numunenin bulunduğu bölge arasında 27 mm fark vardır (Pivot noktasına uzaklığı: 291 mm) (Şekil 6). Bu sebeple deney numunesine binen net kuvvet (N), asılan ağırlık yani deney ağırlığı (FA) kadar olmayıp Eş. 6'daki gibi hesaplanmıştır. Eş. 6'daki N değeri, Eş. 5'de yerine yazılırsa Eş. 7 elde edilir. Eş. 7, sürtünme katsayısının hesabında kullanılan temel denklemdir.

$$N = F_A \cdot (291 / 318) = 0,915 \cdot F_A \quad (6)$$

$$\mu = 2,6883 \cdot (V / F_A) \quad (7)$$

Deney mesafesi hesabı, numunelerin hareket edeceği disk yarıçapı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Deneyler, 100 m mesafede anlamlı sonuçlar vereceği kabul edilerekten [31], 20 rpm (8 m/min) sabit hızla dönecek olan disk için gerekli deney süresi 12,5 dakika olarak hesaplanmıştır. Aşınma değerleri hassas terazi (1/10000 mg hassasiyette) kullanılarak ölçülmüştür. Deney öncesi tüm numuneler etil alkol yardımıyla temizlenmiş ve ağırlıkları (ilk ağırlık) tartılmıştır. Deney sonrasında numuneler tekrar etil alkolle silinerek yüzeylerindeki kirlere arındırılmış ve daha sonra tartılarak son ağırlıklar tespit edilmiştir. Farklı deneyler için yükleme ağırlıklarının her değişiminde, kap içerisinde bulunan yağ tahliye edilmiş ve kap içerisi aşınma artıklarından temizlenmiştir. Bir sonraki deney için işlem görmemiş yağ kullanılmıştır.

Deneylerde diskin bir yüzeyi MoS₂ kaplanmış numuneler, diğer yüzeyi ise grafit kaplanmış numunelerin aşınma deneyleri için kullanılmıştır. Her deneyin başlangıcında disk

yüzeyi ve numune yüzeyi etil alkolle temizlenmiş ve daha sonra basınçlı havayla kurutulmuştur. Kuru ortam deneylerinde ölçüm hassasiyeti sağlamak ve doğru karşılaştırma yapmak adına 1, 2 ve 3 kg yük yerine Prabakaran ve arkadaşlarının [9] çalışmasındaki benzer olarak 0,5, 1 ve 2 kg deney ağırlıkları kullanılmıştır. Böylelikle deney düzeneğinin aşırı zorlanmasının da önüne geçilmiştir. Motor sürücünün olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak (yük hücresi hassasiyetini sağlamak) amacıyla deney cihazına topraklama yapılmıştır. Veri toplama sisteminin bilgisayara yazılım (TDG Coda Logger Express) aracılığıyla gönderdiği gerilim değerleri, tablo formatında kayıt edilmiş ve daha sonra yine Excel ortamında Eş. 7 kullanılarak gerilim değerlerinden sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Her bir deney, üç kez tekrar edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ortalama kütleli aşınma miktarı (m) ve ortalama sürtünme katsayısı (μ_{ort}) değerleri hesaplanmıştır.

MoS₂ ve grafit kaplanmış deney numunelerinin aşınmış yüzeyleri Olympus marka optik mikroskop ve JEOL JSM-6360LV marka taramalı elektron mikroskop (TEM) altında incelenmiştir. Bu çalışmada, kaplanmış deney numunelerinin aşınmış yüzeylerinin tane yapısından ziyade, kaplamaların aşınma davranışları ve morfolojik özellikleri merak edilmiştir. Bu sebepten numunelere herhangi bir dağlama işlemi yapılmamıştır. Yüzey incelemelerinden önce, her numune etil alkolle yıkanıp fön makinesiyle kurutulmuştur.

2.2. Farklı Güvenilirlik Değerleri İçin Kaplama Ömürleri (The Coating Lifetimes for Different Reliability Values)

Belirli bir güvenilirlik değerine karşılık gelen deney numunelerinin kaplama ömürlerini bulmak için istatistiksel analizler yapılmıştır. Ömür, makine elemanlarının belirli bir güvenilirlik değeri için belirli bir aşınma derinliğine ulaşarak işe yaramaz hale geldiği durumdur [32, 33]. Ömür değerinin, zamanla doğrusal bir ilişkide olduğu kabul edilir ve hesaplanabilmesi için aşınma oranının (λ) bilinmesi gerekir (Eş. 8) [6].

$$\lambda = (h / a) \quad (8)$$

Deneysel olarak hesaplanan kütleli aşınma miktarından (m) yola çıkarak mevcut deney ortamları için gerçek aşınma miktarları (h) hesaplanmıştır (Eş. 9, Eş. 10 ve Eş. 11).

$$\rho = (m / V) \quad (9)$$

$$V = \pi r^2 \cdot h \quad (10)$$

$$h = (m / \rho \cdot \pi r^2) \quad (11)$$

Eş. 11'de, h; gerçek aşınma miktarı (mm), m; kütleli aşınma miktarı (g), ρ ; kaplanan malzemenin yoğunluğu (g/mm^3), r; numune yarıçapı (mm) olarak ifade edilir. Her bir deney süresi (a), tüm numuneler için 12,5 dakika ($a = 0,208$ saat) olarak kabul edildiğine göre, Eş. 11'den hesaplanan h

değerleri, Eş. 8'de yerine konularak gerçek aşınma oranı (λ_c) elde edilir (Eş. 12).

Daha önce MoS₂ ve grafit kaplanmış numunelerin kaplama kalınlıkları ortalama 15 μm olarak ölçüldüğü belirtilmişti. Bu değer, numuneler için işe yaramama sınırı ($h_{cm} = 0,015$ mm) olarak kabul edilmiştir. Aşınma mekanizması gelişigüzel gerçekleşen bir durum olduğu için deney numunelerinin ömür dağılımı güvenilirlik hesaplarında sıkça kullanılan normal dağılım [34] olarak kabul edilmiştir. Bu durumda belirli bir emniyet derinliği (h_{cm}) için deney numunelerinin gerçek ömrü (a_c) Eş. 12'deki gibi ifade edilir [6].

$$a_c = (h_{cm} / \lambda_c) \quad (12)$$

Aşınmada önemli olan problem, belirli bir aşınma sınırı (işe yaramama sınırı (h_{cm})) için ömür dağılımıdır. Daha önceden de belirtildiği gibi kazıma aşınmasında güvenilirlik hesapları normal dağılım eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır. Normal dağılımı karakterize eden iki parameter mevcuttur. Bunlar; numune ömürlerinin ortalaması ve standart sapmasıdır. Bir sistemin güvenilirliği (Eş. 13), sistem ömrünün (a_c) belirli bir (a_R) zamanından daha büyük olma olasılığı ile ifade edilir [34].

$$R = P(a_c > a_R) = \alpha \quad (13)$$

Bu çalışmada, MoS₂ ve grafit kaplanmış numuneler için %95, %60 ve %30 güvenilirlik değerlerine karşılık gelen kaplama ömürleri (a_c) hesaplanmıştır. Yağlı ortamda yapılacak olan aşınma deneylerinin, tribolojik etkilerden (yağlama vs.) ötürü kaplama ömrü hesabını etkileyeceği düşünülmüştür. Ayrıca, yağlı bir ortamda yapılacak aşınma deneyleriyle kaplama ömrü belirlemek oldukça zaman alacağı aşikardır. Bundan dolayı, daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmesi adına kaplama ömürlerinin hesabında; kuru ortamda 2 kg'lık deney ağırlıklarıyla yapılmış deney sonuçlarının kullanılmasına karar verilmiştir.

Güvenilirlik, normal dağılım tablosu vasıtasıyla Eş. 14 ve Eş. 15 kullanılarak hesaplanır [34]. Burada amaç; herhangi bir güven aralığı için (α) sistemin ömrünü hesaplamaktır. z_α değeri; kaplama ömrünün ortalama ömür değerine (\bar{a}_c) farkının ömür değerinin standart sapmasına (\hat{a}_c) oranıyla bulunur (Eş. 15).

$$R(t) = P(z > z_\alpha) = \alpha \quad (14)$$

$$z_\alpha = (a_c - \bar{a}_c) / \hat{a}_c \quad (15)$$

Güvenilirlik değerlerine karşılık gelen kaplama ömürleri (a_c) hesabına geçmeden önce, MoS₂ ve grafit kaplanmış numunelerin ömür ortalamaları (Eş. 16) ve standart sapmaları (Eş. 17) hesaplanmıştır.

$$\bar{a}_c = (\sum_{i=1}^n a_{ic}) / n \quad (16)$$

$$\hat{a}_c = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (a_{ic} - \bar{a}_c)^2 / n - 1]} \quad (17)$$

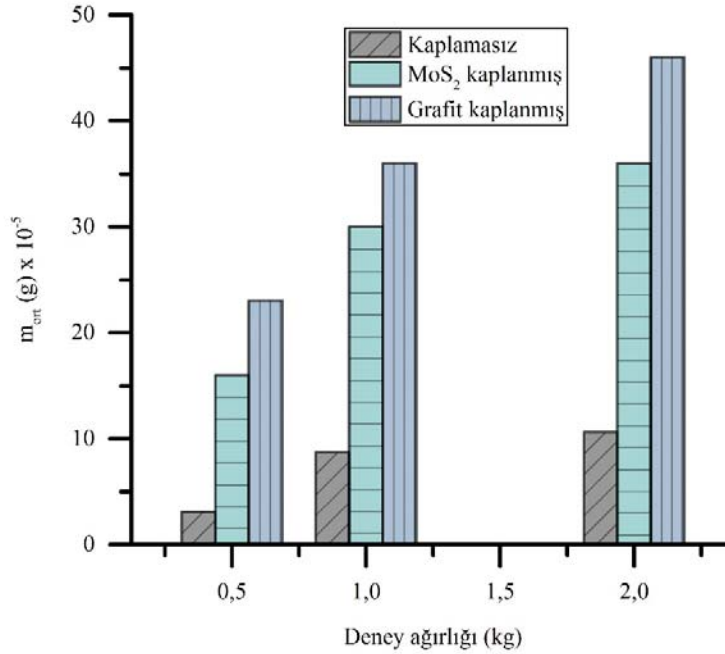
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Kütleli Aşınma Miktarları ve Sürtünme Katsayıları Sonuçları (The results of Mass Wear Quantities and Friction Coefficients)

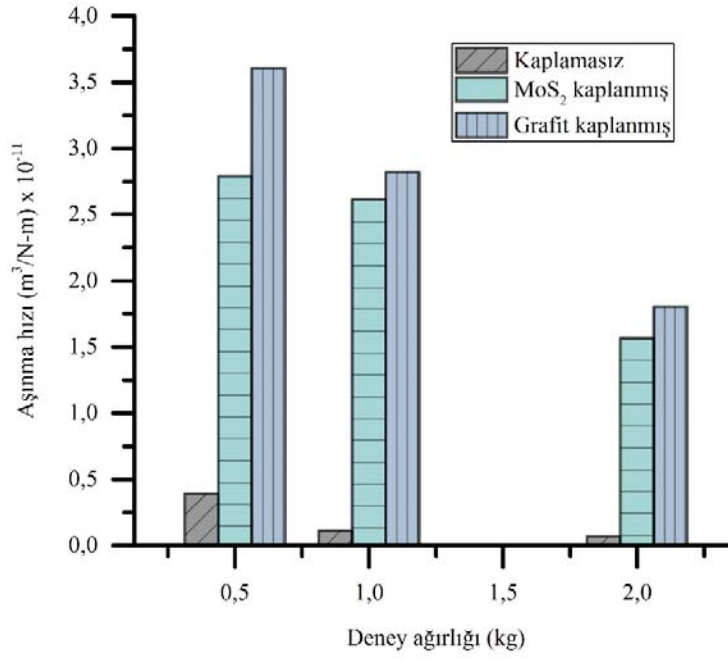
Kaplamasız, MoS₂ ve grafit kaplanmış deney numunelerinin farklı deney ağırlıklarıyla kuru ortamda yapılan deneylerinin sonucunda elde edilen ortalama kütleli aşınma miktarı (m_{ort}) Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'den görüleceği üzere, kaplamasız numune ve her iki kaplama içinde deney ağırlığı arttıkça m_{ort} değeri artmaktadır. Yani; aşınma miktarı yüzeylere uygulanan yükü doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Kuru ortam deneylerinde, deney ağırlığındaki artışla (normal kuvvet artışıyla), aşınma miktarının artmış olması Prabaharan ve arkadaşlarının [9] çalışmasıyla paralellik göstermektedir. Tüm deney ağırlıkları göz önünde bulundurulduğunda; grafit kaplanmış deney numuneleri, MoS₂ kaplanmış deney numunelerine nazaran ortalama %30 oranında daha fazla aşındığı tespit edilmiştir. Her iki kaplamanın da sürtünme katsayılarına uydurulacak doğrular değerlendirildiğinde aşınma eğiliminin (doğrusala yakın) aynı olduğu söylenebilir.

Şekil 7'den de anlaşılacağı üzere her iki kaplama türünün ve kaplamasız numunelerin kuru ortamdaki tüm deney ağırlıklarıyla yapılan deneylerdeki kütleli aşınma miktarları ölçülmüştür. AISI1008 çeliğinin ve kaplama malzemelerinin yoğunlukları da bilindiği için aşınma hacimleri (m^3) hesaplanmıştır. Deney ağırlıkları normal kuvvete (N) dönüştürülerek birim uzunluk (m) için aşınma

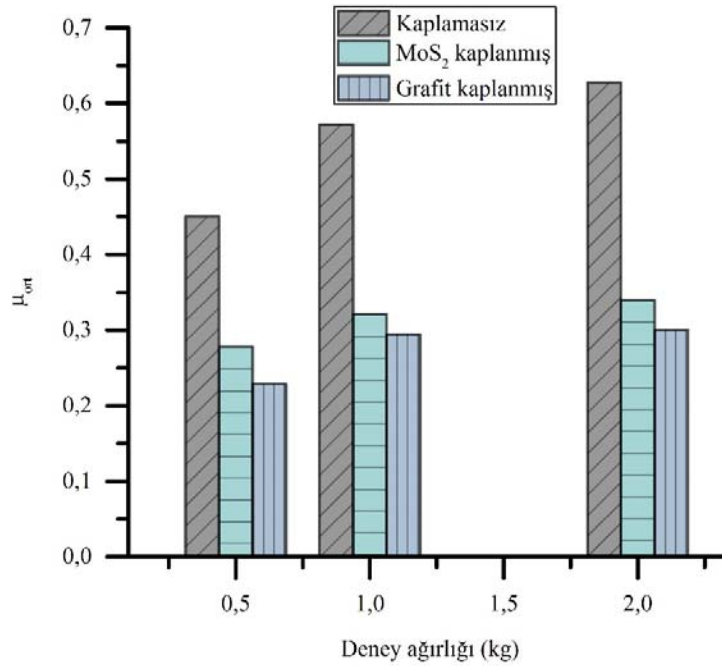
hızı ($m^3/N.m$) değerleri hesaplanmıştır [9] (Şekil 8). Şekil 8'e göre aşınma hızı-deney ağırlığı ilişkisinde her iki tip kaplama için aşınma davranışı aynı olup daha düşük yük altında aşınma hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu etki, Şekil 7'deki sütunlar üzerinden geçecek şekilde eğriler oluşturulduğunda; eğrilerin bölgesel olarak eğiminden de anlaşılabilir. Düşük deney ağırlığı bölgesinde (0,5-1 kg) eğrinin eğimi büyük olduğu için aşınma hızı yüksektir. Keza, yüksek deney ağırlığı bölgesinde (1-2 kg) eğrinin eğimi nispeten daha düşük olduğu için aşınma hızı yavaştır şeklinde yorumlanabilir. Başka bir deyişle, artan normal kuvvetten dolayı diskin dönme hızı nispeten azalacağı için birim mesafedeki aşınma hızını yavaşlatacaktır. Zaten aşınma hızı parametresinin biriminden ($m^3/N.m$) de anlaşılacağı üzere normal kuvvet artışı aşınma hızını düşürecektir. Yine, Şekil 8'e bakıldığında grafit kaplanmış numunelerin daha hızlı aşındığı açıkça görülebilmektedir. MoS₂ kaplamanın grafit kaplamaya göre nispeten daha yavaş aşındığı ve dolayısıyla MoS₂ kaplamanın grafit kaplamaya göre aşınmaya karşı daha dirençli olduğu söylenebilir. Şekil 9'da görüleceği üzere, tüm deney ağırlıklarında MoS₂ kaplanmış deney numunelerinin μ_{ort} değeriyle kaplama yapılmamış deney numunelerinin μ_{ort} değeriyle kıyaslandığında, MoS₂ kaplamanın kuru ortamda sürtünmeyi ortalama %42 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Yani, numuneyi sadece MoS₂ ile kaplamanın μ_{ort} değerini azaltmaya etki ettiği görülebilmektedir. Benzer durum grafit kaplanmış deney numuneleri için de geçerlidir. Tüm deney ağırlıklarıyla yapılmış aşınma deneylerinde grafit kaplanmış numunelerin μ_{ort} değeriyle kaplamasız numunelerinin ki ile kıyaslandığında, grafit kaplamanın kuru ortamda



Şekil 7. Numunelerin farklı deney ağırlıkları için kuru ortamdaki m_{ort} değerleri
(The m_{ort} values of samples for different experimental weights in dry medium)



Şekil 8. Kuru ortamda aşınma hızının deney ağırlığıyla değişimi (The variation of wear rate by experiment weight in dry medium)



Şekil 9. Kaplamsız ve kaplanmış numunelerin kuru ortamdaki μ_{ort} değerleri (The μ_{ort} values of the uncoated and coated samples in dry medium)

sürtünmeyi ortalama %51 oranında azalttığı görülmüştür. Deney sonuçlarına göre; kuru bir ortamda ve deneysel çalışmadaki benzer yükler altında birbiriyle temas halinde çalışacak herhangi makina elemanlarının yüzeylerini MoS₂

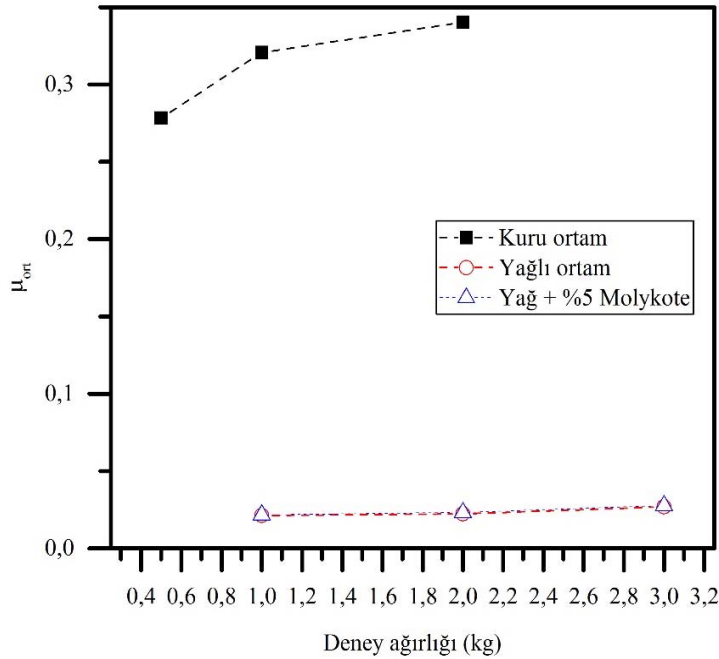
veya grafit kaplamak, sürtünme katsayısını azaltabileceği çok net söylenebilir. Ayrıca, Şekil 7-9 ortak olarak değerlendirildiğinde, kuru ortamlarda grafit kaplamanın MoS₂ kaplamaya nazaran daha çok aşındığı fakat sürtünmeyi

de daha çok azalttığı tespit edilmiştir. Aslında bu farklılıklar çok büyük derecede olmasa da, aşınan grafit malzemesinin deney ortamında MoS₂ malzemesine göre daha iyi bir yağlayıcı olarak davrandığı şeklinde yorumlanmıştır.

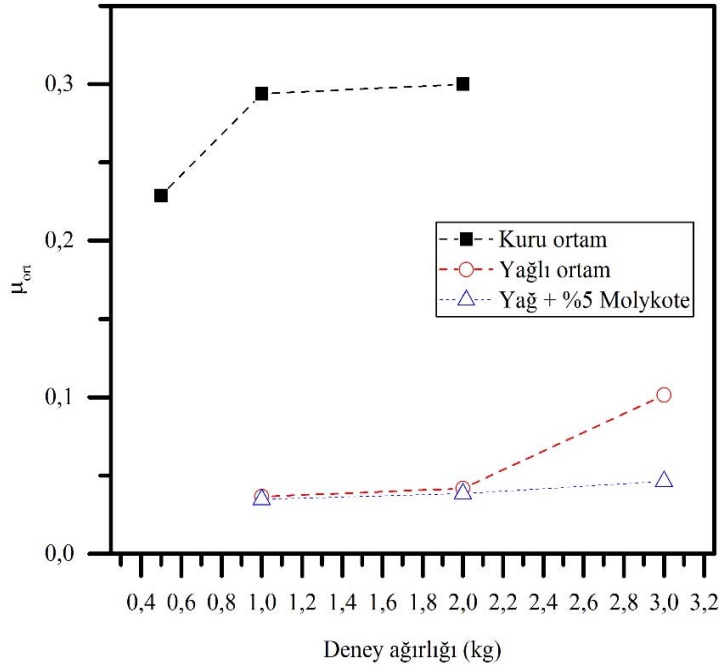
Şekil 10'da MoS₂ kaplanmış numunelerin farklı ortam şartlarında ve farklı ağırlıklarla yapılmış deneylerindeki μ_{ort} değerleri verilmiştir. Kuru ortam deneylerindeki μ_{ort} değerlerinin, diğer ortamlara nazaran oldukça büyük olduğu görülebilmektedir. Deney ortamı, SAE 80W yağ olarak değiştirildiğinde ise; μ_{ort} değerleri tüm deney ağırlıklarında kuru ortam şartlarına göre yaklaşık 10 kat azalmaktadır (Şekil 10). Aslında bu çarpıcı sonuç tribolojik açıdan zaten beklenen bir durumdur. Çünkü; temel sürtünme mekanizmasında sıvı sürtünme ve yarı sıvı sürtünme durumlarının, kuru sürtünmeye nazaran oldukça düşük μ_{ort} değerleri vereceği deneysel birçok çalışmayla da ispatlanmıştır [3, 16]. Yapılan deneysel çalışmanın bu bağlamda temel sürtünme mekanizmasına aykırı olmadığı ve diğer deneysel çalışmalarla [17, 24] örtüştüğü görülmüştür. SAE 80W yağı içerisine %5 Molykote-A katkısıyla hazırlanan karışımda gerçekleştirilen deneylerde elde edilen μ_{ort} değerleriyle katkısız yağ ortamında elde edilen μ_{ort} değerleri arasında neredeyse fark olmadığı saptanmıştır. Kuru ortamda yapılan deneylerde, deney ağırlığının artırılması μ_{ort} değerlerini oldukça artırdığı görülmüştür. Yağlı ortamlarda yapılan deneylerde ise; deney ağırlığının artırılması μ_{ort} değerlerini çok az oranda artırdığı tespit edilmiştir. Bu duruma açıklık getirmek gerekirse; dinamik sürtünme halinde, birbiriyle temas eden yüzeyler arasına giren yağ maddesi, iki yüzey arasındaki pürüz tepeciklerini

birbirinden uzaklaştırmaktadır. Birbirine göre izafi hareket eden ve yük altında olan iki yüzey arasındaki bu pürüz tepeciklerinin birbirine madeni kaynaklaşma mekanizmasından ötürü uzaklaştığı için nispeten azalmaktadır. Bu azalma, hem kaynaklaşmadan dolayı oluşan sürtünme kuvvetini (F_{ad}) hem de deformasyondan dolayı oluşan sürtünme kuvvetini (F_{def}) azaltmaktadır. Bu iki sürtünme kuvvetindeki (F_{ad} ve F_{def}) azalma, toplam sürtünme kuvvetinin (F_s) azalmasına etki etmektedir. Bu sebepten, yağlı ortamdaki normal kuvvet artışı, μ değerini kuru ortamdaki kadar fazla etkileyememektedir. Bunlara ilaveten, kuru ortam deneylerinden sonra numune ve disk yüzeyinde görülen ısınma, yağlı ortam deneylerinde görülmemiştir. Bunun sebebi; yağ molekülleri çalışan yüzeylere yapışarak yüzey üzerindeki boşlukları doldurup yüzey pürüzlerini birbirinden ayırdığı ve bu sayede sürtünmeden dolayı oluşan ısıyı ortamdaki uzaklaştırdığı şeklinde açıklanabilir.

Şekil 11'de grafit kaplanmış numunelerin farklı ortam şartlarında ve farklı deney ağırlıklarında yapılmış deneylerdeki μ_{ort} değerleri görülmektedir. Şekil 10'a benzer şekilde, Şekil 11'de grafit kaplanmış numunelerin kuru ortam deneylerindeki μ_{ort} değerlerinin, diğer ortamlara nazaran oldukça büyük olduğu tespit edilmiştir. SAE 80W yağı kullanılarak yapılan deneylerdeki μ_{ort} değerleri, tüm deney ağırlıklarında kuru ortam şartlarına göre yaklaşık 8 kat azalmaktadır (Şekil 11). Bu çerçevede, yağlı ortam deneyleri hakkında MoS₂ kaplama için yapılan yorumlar grafit kaplamanın yağlı ortam deneyleri içinde geçerlidir. SAE 80W yağı içerisine %5 Molykote-A katkısıyla hazırlanan karışımda gerçekleştirilen deneylerde elde edilen μ_{ort}



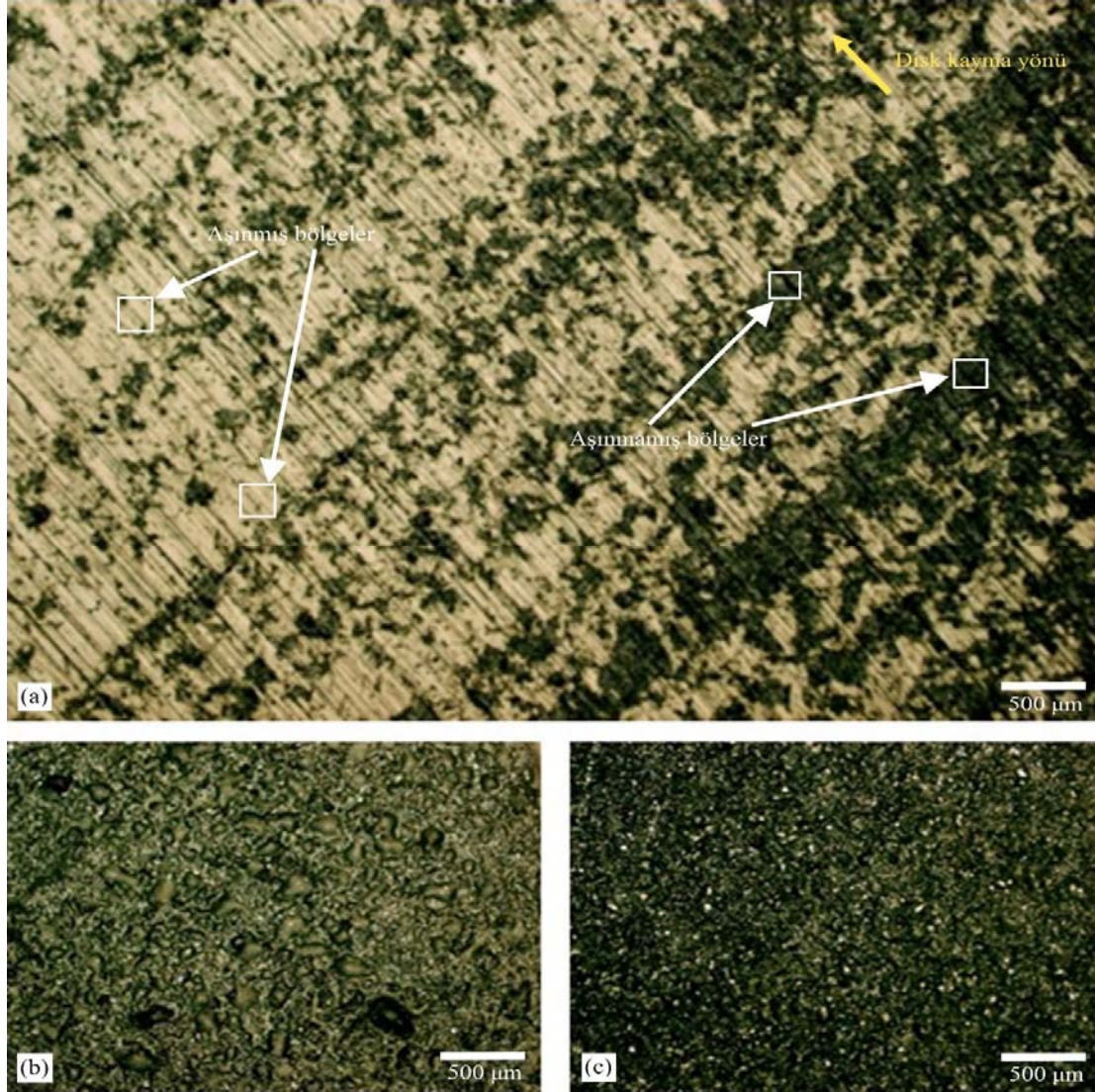
Şekil 10. MoS₂ kaplanmış numunelerin farklı ortamlardaki μ_{ort} değerleri
(The μ_{ort} values of the MoS₂ coated specimens in different medium)



Şekil 11. Grafit kaplanmış numunelerin farklı ortamlardaki μ_{ort} değerleri
(The μ_{ort} values of the graphite coated specimens in different medium)

değerleriyle katkısız yağ ortamında elde edilen μ_{ort} değerleri kıyaslandığında; katkının μ_{ort} değerini ortalama olarak %7 oranında düşürdüğü görülmüştür. Yağ içerisine katılan Molykote-A, MoS₂ kaplanmış numunelerin aksine grafit kaplanmış numunelerde sinerji etkisinden dolayı μ_{ort} değerlerinin biraz düşmesine yardımcı olmuştur. Yağ içerisindeki Molykote-A, grafit kaplanmış yüzeylere daha homojen dağıldığı ve tribolojik olarak nispeten daha uyumlu çalışabildiği söylenebilir. Aslında Molykote-A gibi ticari yağ katkılarının amacı sürtünme katsayısını düşürmekten çok, katkı yapılan yağın çalışma ömrünü uzatmak olduğu da göz ardı edilmemelidir. Kuru ortamda yapılan deneylerde, deney ağırlığının artırılması μ_{ort} değerlerini daha çok artırırken, yağlı ortamlarda yapılan deneylerde deney ağırlığının artırılması μ_{ort} değerlerini nispeten daha az artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum; MoS₂ kaplama için yapılan yorumlara benzer şekilde, birbirine göre izafi hareket eden ve yük altında olan iki yüzey arasına giren yağ moleküllerinin yüzeyleri birbirinden uzaklaştırmasının sebep olduğu düşünülmektedir. MoS₂ kaplanmış deney numunelerinin aşınmış yüzeyleri optik mikroskopla incelendiğinde, MoS₂ kaplamanın kuru ortam deneyinde daha çok aşındığı ve bölgesel kaplama kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 12). Şekil 12a'ya bakıldığında, diskin kayma yönüyle örtüşen kazınma izlerinin olduğu göze çarpmaktadır. Yağlı ortam deneylerinde kaplamanın, kazınma şeklinde aşınmadığı açıkça görülebilmektedir (Şekil 12b-12c). Şekil 12b'de, MoS₂ kaplamasında yüzeysel kopmaların olduğu fakat bu kopmaların metal yüzeyine kadar inemediği tespit edilmiştir. Benzer durum, Molykote-A katkılı yağla yapılan deney numunesinin aşınmış yüzeyi

için de geçerlidir (Şekil 12c). Yine, grafit kaplanmış deney numunelerinin aşınmış yüzeyleri için yapılan incelemede, kuru ortamda yapılan deneyde kaplamanın oldukça aşındığı ve kaplama kayıplarının MoS₂ kaplanmış numuneye nazaran daha çok olduğu görülebilmektedir (Şekil 13a). Zaten grafit kaplamanın daha çok aşındığı tespiti; hem aşınma miktarı grafiklerinde (Şekil 7) ve hem de aşınma hızı grafiklerinde (Şekil 8) belirtilmiş olup yapılan yüzey incelemeleriyle de görsel olarak ispatlanmıştır. Ayrıca, Şekil 13a'da diskin kayma yönüyle aynı olan kazınma izleri çok belirgin şekilde görülebilmektedir. Grafit kaplamanın yağlı ortam deneylerinde yüzeysel olarak aşındığı görülürken aşınmış yüzeylerde herhangi bir metal bölgesine rastlanılmamıştır (Şekil 13b-13c). Şekil 14'de MoS₂ kaplanmış numunelerin aşınmış yüzeylerinin TEM ile incelenmesinde, kuru ortamda kazınma izleri 500 kat büyütmede çok net görülebilmektedir (Şekil 14a). Ayrıca, kuru ortam deneyinde aşınmış yüzeyde küçük çaplı bölgesel çöküntüler tespit edilmiştir. Yağlı ortamda aşındırılmış yüzeyde 500 kat büyütmede herhangi bir kazınma izine rastlanılmazken MoS₂ kaplamanın sivri çıkıntılar halinde korunduğu görülebilmektedir (Şekil 14b). Şekil 15a'da grafit kaplanmış numunenin kuru ortamda yapılmış deneyinde aşınmış yüzeyinde kazınma izleri MoS₂ kaplamaya benzer şekilde görülmektedir. 500 kat büyütmede metal yüzeyindeki mikro çatlakların oluşu ve bölgesel yırtılmaların tespiti, aşınmanın MoS₂ kaplamaya nazaran daha şiddetli gerçekleştiği şeklinde yorumlanmıştır. Yağlı ortamda aşındırılmış yüzeyde kazınma izine rastlanılmazken grafit kaplamanın MoS₂ kaplamasına nazaran daha pürüzsüz şekilde aşındığı ve sivri çıkıntıların yuvarlatıldığı görülebilmektedir (Şekil 15b).



Şekil 12. 2 kg ağırlık kullanılan deneylerdeki MoS₂ kaplanmış numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri a) kuru ortam b) yağlı ortam c) yağ + %5 Molykote-A ortamı (The abrasioned surface images of MoS₂ coated specimens in experiments with 2 kg weight a) dry medium b) oily medium c) the 5% Molykote-A added oil medium)

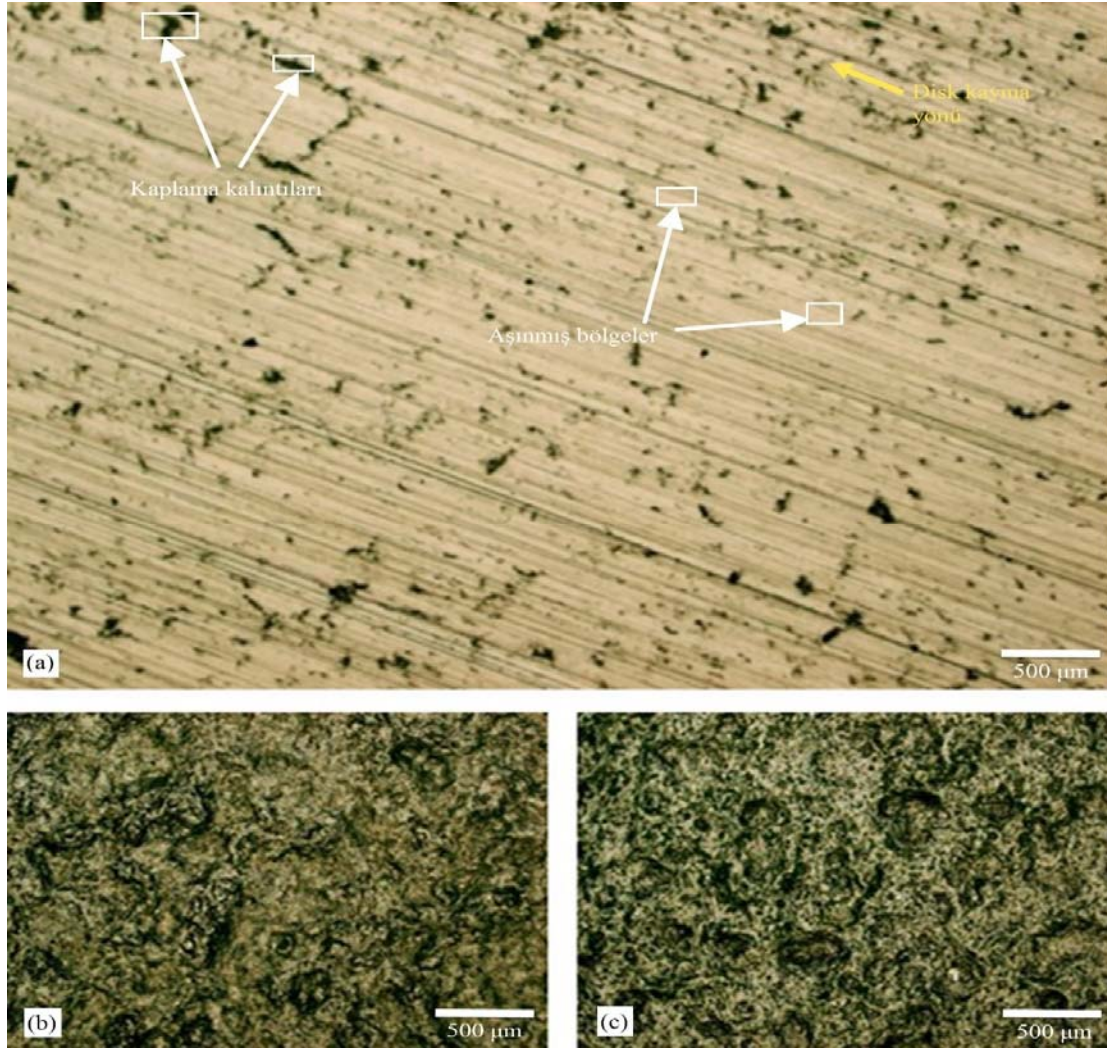
3.2. Farklı Güvenilirlik Değerlerine Karşılık Gelen Kaplama Ömürleri

(The Coating Lifetimes of Corresponding to Different Reliability Values)

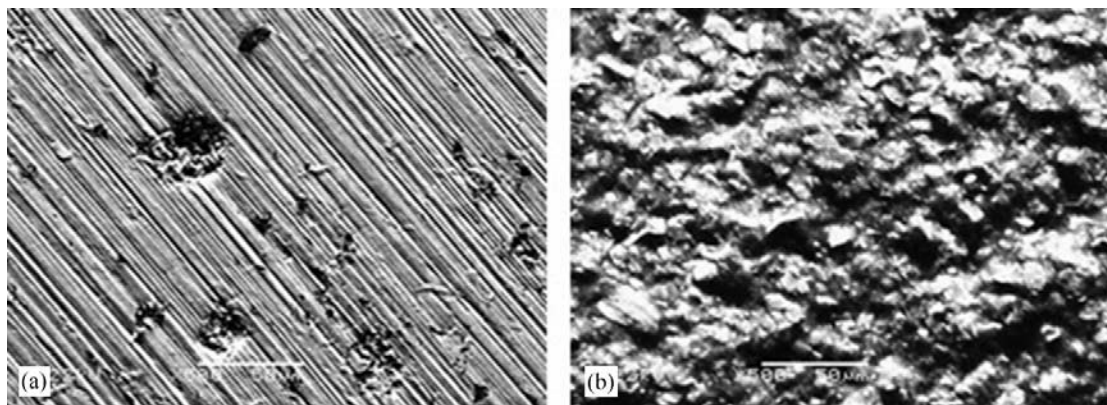
%95, %60 ve %30 güvenilirliğe karşılık gelen kaplama ömrü (a.c) hesabına geçmeden önce, MoS₂ ve grafit kaplanmış numuneler için gerekli olan parametreler hesaplanmış ve Tablo 6'da verilmiştir. Kaplama ömrü hesabında, kuru ortamda 2 kg deney ağırlığıyla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. $\alpha = 0,95$ için $z_\alpha = -1,7$; $\alpha = 0,6$ için $z_\alpha = -0,25$ ve $\alpha = 0,30$ için $z_\alpha = 0,5$ değerleri normal dağılım tablosundan elde edilmiştir. Eş. 15 ve Tablo 6'daki ortalama ve standart sapma ömür değerleri kullanılarak istenen güvenilirlik değerlerinde kaplama ömürleri hesaplanmıştır (Şekil 16). Kuru ortamda yapılmış deneylerin sonuçlarıyla, MoS₂ kaplanmış numune için kaplama ömrü (a.c) yaklaşık 31,7 dakika olarak ve grafit kaplanmış numune

için a.c yaklaşık 32 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar şu şekilde yorumlanabilir; MoS₂ ve grafit kaplanmış numunelerin 15 µm olan kaplama kalınlıkları 2 kg'lık deney ağırlığıyla %95 güvenilirlik için yaklaşık 32 dakika boyunca aşındırmaya dayanabilmektedir. İstatistiksel olarak 32 dakikadan sonra, aşınma yüzeyinde kaplama malzemesinin artık h_{em} sınırının altına düşeceği şeklinde yorumlanabilir. Bu yorum, deney numunelerinin aşınmış yüzeyleri için yapılmış yüzey incelemeleriyle de tutarlılık göstermektedir.

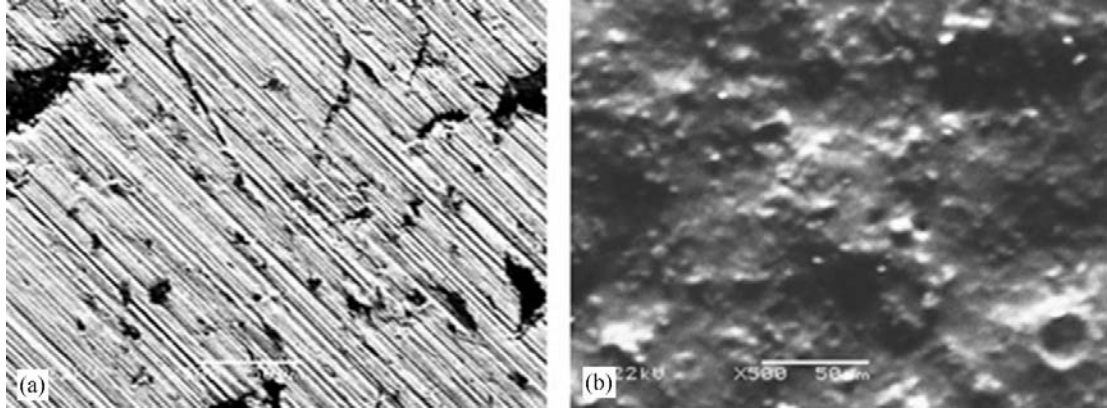
Yukarıdaki hesaplama göre MoS₂ kaplama için sapma (eğrinin azalış eğimi) daha fazla olduğundan güvenilirliği daha düşük olduğu söylenebilmekle beraber grafit kaplamayla kıyaslandığında ömür açısından önemli bir farkın olmadığı görülebilmektedir. Ayrıca istatistiksel olarak hesaplanan ömür değerleri tutarlı olup yapılan deneysel çalışma sonucundaki yüzey incelemeleriyle örtüşmektedir.



Şekil 13. 2 kg ağırlık kullanılan deneylerdeki grafit kaplanmış numunelerin aşınmış yüzey görüntüleri a) kuru ortam b) yağlı ortam c) yağ + %5 Molykote-A ortamı (The abrasioned surface images graphite coated specimens in experiments with 2 kg weight a) dry medium b) oily medium c) the 5% Molykote-A added oil medium)



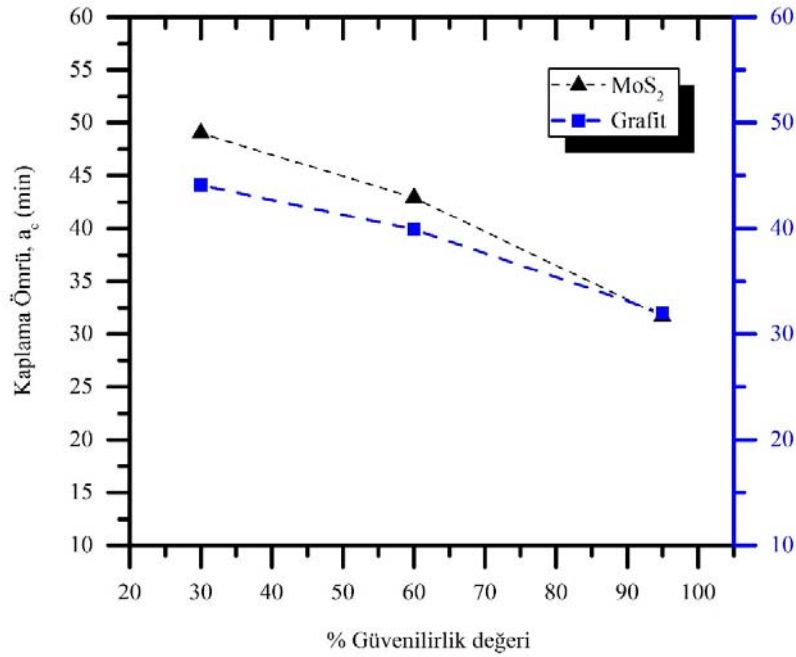
Şekil 14. 2 kg ağırlık kullanılan deneylerdeki MoS₂ kaplanmış numunelerin aşınmış yüzeylerinin TEM görüntüleri a) kuru ortam b) yağlı ortam (The abrasioned surface SEM images of MoS₂ coated specimens in experiments with 2 kg weight a) dry medium b) oily medium)



Şekil 15. 2 kg ağırlık kullanılan deneylerdeki grafit kaplanmış numunelerin aşınmış yüzeylerinin TEM görüntüleri a) kuru ortam b) yağlı ortam
(The abraded surface SEM images of graphite coated specimens in experiments with 2 kg weight a) dry medium b) oily medium)

Tablo 6. Kaplama ömrünün hesaplanması için gereken parametreler (The required parameters for calculating of coating lifetime)

Numune tipi	Deney No	h (mm)	λ_c (mm/h)	a_c (h)	\bar{a}_c (h)	\hat{a}_c (h)
MoS ₂ kaplanmış	1	0,003474	0,016702	0,898097	0,748501	0,129554
	2	0,004632	0,022270	0,673552		
	3	0,004630	0,022260	0,673854		
Grafit kaplanmış	1	0,0049	0,023558	0,636726	0,689361	0,092289
	2	0,00392	0,018846	0,795925		
	3	0,00491	0,023606	0,635432		



Şekil 16. Farklı güvenilirlik değerleri için kaplama ömürleri (The coating lifetimes for different reliability values)

4. SİMGELER (SYMBOLS)

F_A : Deney ağırlığı (kg)
 F_S : Toplam sürtünme kuvveti (N)
 h : Gerçek aşınma miktarı (mm)
 h_{em} : Emniyet derinliği (mm)

m : Kütleli aşınma miktarı (g)
 m_{ort} : Ortalama aşınma miktarı (g)
 N : Normal kuvvet (N)
 R_a : Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)
 a : Deney süresi (h)
 a_c : Gerçek ömür (h)

\bar{a}_c	: Ömür değerlerinin ortalaması (h)
\hat{a}_c	: Ömür değerlerinin standart sapması (h)
V	: Gerilim (V)
V	: Hacim (mm ³)
α	: Güvenilirlik
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_{ort}	: Ortalama sürtünme katsayısı
λ	: Aşınma oranı (mm/h)
λ_c	: Gerçek aşınma oranı (mm/h)

4.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

HRC	: Rockwell C sertliği (Hardness of Rockwell C)
HB	: Brinell sertliği (Hardness of Brinell)
SCD	: Serbest cisim diyagramı
TEM	: Taramalı elektron mikroskop

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu deneysel çalışma kapsamında, sürtünme ve aşınma testlerini gerçekleştirmek için pin-disk tipi bir tribometre tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tribometre sayesinde kaplamasız, MoS₂ ve grafit kaplanmış numunelerin istenilen zaman aralığında, istenilen sayıda ve istenilen ortam şartlarında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız, MoS₂ ve grafit kaplanmış deney numunelerinin aşınmış yüzeyleri optik mikroskop ve TEM altında incelenmiştir. MoS₂ ve grafit kaplanmış numuneler için %95, %60 ve %30 güvenilirlik değerlerine karşılık gelen kaplama ömürleri hesaplanmıştır. MoS₂ ve grafit kaplama için yapılmış deneysel çalışma sonuçları ve genel yargılar elde edilmiştir.

Kuru ortam deneylerinde, tüm deney ağırlıkları göz önünde bulundurulduğunda; grafit kaplanmış deney numuneleri, MoS₂ kaplanmış deney numunelerine nazaran ortalama %30 oranında daha fazla aşındığı tespit edilmiştir. Ayrıca, her iki kaplama içinde deney ağırlığı arttıkça kütleli aşınma miktarının arttığı görülmüştür. Buna ilaveten, her iki kaplanmanın da aşınma eğiliminin (doğrusala yakın) aynı olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma-deney ağırlığı ilişkisinde her iki tip kaplama için de aşınma davranışı aynı olup daha düşük yük altında aşınma hızının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. MoS₂ kaplamanın grafit kaplamaya göre nispeten daha yavaş aşındığı ve dolayısıyla MoS₂ kaplamanın grafit kaplamaya göre aşınmaya karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir.

Kuru ortamda tüm deney ağırlıklarında kaplanmış deney numunelerinin μ_{ort} değeriyle kaplama yapılmamış deney numunelerinin μ_{ort} değerleriyle kıyaslandığında; MoS₂ kaplamanın sürtünmeyi ortalama %42 oranında azalttığı, grafit kaplamanın sürtünmeyi ortalama %51 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Kuru ortamda grafit kaplamanın MoS₂ kaplamaya nazaran daha çok aşındığı fakat sürtünmeyi de daha çok azalttığı tespit edilmiştir. Aslında bu farklılıklar çok büyük derecede olmasa da, aşınan grafit malzemesinin deney ortamında MoS₂ malzemesine göre daha iyi bir yağlayıcı olarak davrandığı gözlemlenmiştir. MoS₂ kaplanmış numunelerin farklı ortam şartlarında ve farklı

ağırlıklarla yapılmış deneylerinde; kuru ortam deneylerindeki μ_{ort} değerlerinin, diğer ortamlara nazaran oldukça büyük olduğu görülmüştür. Deney ortamı, SAE 80W yağ olarak değiştirildiğinde ise; μ_{ort} değerleri tüm deney ağırlıklarında kuru ortam şartlarına göre yaklaşık 10 kat azaldığı tespit edilmiştir. MoS₂ kaplanmış numuneler kullanılarak yağ içerisine %5 Molykote-A katkısıyla hazırlanan karışımda gerçekleştirilen deneylerde elde edilen μ_{ort} değerleriyle katkısız yağ ortamında elde edilen μ_{ort} değerleri arasında neredeyse fark olmadığı saptanmıştır. Grafit kaplanmış numunelerin farklı ortam şartlarında ve farklı deney ağırlıklarında yapılmış deneylerinde ise; kuru ortam deneylerindeki μ_{ort} değerlerinin MoS₂ kaplamaya benzer şekilde, diğer ortamlara kıyasla oldukça büyük olduğu tespit edilmiştir. Grafit kaplama için SAE 80W yağı kullanılarak yapılan deneylerdeki μ_{ort} değerleri, tüm deney ağırlıklarında kuru ortam şartlarına göre yaklaşık 8 kat azaldığı görülmüştür. Grafit kaplanmış numuneler kullanılarak yağ içerisine %5 Molykote-A katkısıyla hazırlanan karışımda gerçekleştirilen deneylerde elde edilen μ_{ort} değerleriyle katkısız yağ ortamında elde edilen μ_{ort} değerleri kıyaslandığında; katkının μ_{ort} değerini ortalama olarak %7 oranında düşürdüğü görülmüştür. Yağ içerisine katılan Molykote-A, MoS₂ kaplanmış numunelerin aksine grafit kaplanmış numunelerde sinerji etkisinden dolayı μ_{ort} değerlerinin biraz düşmesine yardımcı olduğu görülmüştür.

Her iki kaplama için kuru ortamda yapılan deneylerde, deney ağırlığının artırılması μ_{ort} değerlerini daha çok artırırken, yağlı ortamlarda yapılan deneylerde deney ağırlığının artırılması μ_{ort} değerlerini nispeten daha az artırdığı gözlemlenmiştir. MoS₂ kaplanmış deney numunelerinin aşınmış yüzeyleri incelendiğinde, MoS₂ kaplamanın kuru ortam deneyinde daha çok aşındığı ve bölgesel kaplama kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, diskin kayma yönüyle örtüşen kazınma izlerinin olduğu tespit edilmiştir. Yağlı ortam deneylerinde kaplamanın, kazınma şeklinde aşınmadığı görülürken, MoS₂ kaplamasında yüzeyel kopmaların olduğu fakat bu kopmaların metal yüzeyine kadar inemediği tespit edilmiştir.

Grafit kaplanmış deney numunelerinin aşınmış yüzeylerinde ise; kuru ortamda yapılan deneyde kaplamanın oldukça aşındığı ve kaplama kayıplarının MoS₂ kaplanmış numuneye nazaran daha çok olduğu görülmüştür. Grafit kaplamanın yağlı ortam deneylerinde yüzeyel olarak aşındığı görülürken aşınmış yüzeylerde herhangi bir metal bölgesine rastlanılmamıştır. MoS₂ kaplama için ömür-güvenilirlik eğrisindeki sapma (eğrinin azalış eğimi) daha fazla olduğundan güvenilirliği daha düşük olduğu söylenebilmekle beraber grafit kaplamayla kıyaslandığında ömür açısından önemli bir farkın olmadığı görülmüştür. Ayrıca istatistiksel olarak hesaplanan ömür değerleri tutarlı olup yapılan deneysel çalışma sonucundaki yüzey incelemeleriyle örtüşmektedir. Deney sonuçlarına göre; kuru bir ortamda ve deneysel çalışmadaki benzer yükler altında birbirleriyle temas halinde çalışacak herhangi bir makina elemanlarının yüzeylerini MoS₂ veya grafit kaplamak, sürtünme katsayısını azaltacağı tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, bu çalışmanın deneysel kısmında gereken desteği sağlayan Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü ve Erkunt Traktör Sanayii A.Ş.'ye teşekkür ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Zhenga D., Caia Z., Shenb M., Lia Z., Zhu M., Investigation of the tribology behaviour of the graphene nanosheets as oil additives on textured alloy cast iron surface, *Applied Surface Science*, 387 (2), 66–75, 2016.
- Berman D., Erdemir A., Sumant A. V., Graphene: a new emerging lubricant, *Materials Today*, 17 (1), 31-42, 2014.
- Xiong L., He Z., Han S., Tang J., Wu Y., Zeng X., Tribological properties study of N-containing heterocyclic imidazoline derivatives as lubricant additives in water-glycol, *Tribology International*, 104 (1), 98–108, 2016.
- Brostow W., Khoja S., Simoes R., Sliding wear behavior of polymers studied with mesoscopic molecular dynamics, *Journal of Material Science*, 52 (2), 1203–1213, 2016.
- Zhang P., Zhang F.C., Yan Z.G., Wang T.S., Qian L.H., Wear property of low temperature bainite in the surface layer of a carburized low carbon steel, *Wear*, 271 (3), 697–704, 2011.
- Rabinowicz E., *Friction and Wear of Materials*, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 2005.
- Guezmil M., Bensalah W., Khalladi A., Elleuch K., Depetris-Wery M., Ayed H. F., Friction coefficient and microhardness of anodized aluminum alloys under different elaboration conditions, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 25 (2), 1950–1960, 2015.
- Grzesik W., Malecka J., Zalisz Z., Zak K., Nieslony P., Investigation of Friction and Wear Mechanisms of TiAlN Coated Carbide Against Ti6Al4V Titanium Alloy Using Pin-on-disk Tribometer, *Archieve of Mechanical Engineering*, 13(1), 113-127, 2016.
- Prabakaran V., Sivakumaran I., Palimar S. P., Experimental investigation of wear characteristics on TiCN-coated AISI 410 steel, *Appl. Phys. A*, 468 (2), 1-8, 2016.
- Qiu Z. K., Zhang P. Z., Wei D. B., Wei X. F., Chen X. H., A study on tribological behavior of double-glow plasma surface alloying W-Mo coating on gear steel, *Surface & Coatings Technology*, 278 (1), 92–98, 2015.
- Ünal H., Yetgin S. H., The Investigation of Tribological Performance of Polyamide 6 Polymer and Polyamide 6/Wax Blend Against Themselves, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (2), 457-463, 2016.
- Gençer G. M., Owsalou R. G., Karadeniz S., Determination of abrasive wear resistances of Fe-based hardfacing coated wear plates that were used as grinders in cement production in cases where clinker and farin were used as abrasives, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (3), 511-520, 2016.
- Kahraman F., Gençer G. M., Karadeniz S., Investigation of Wear Behaviour of Plasma Nitrided X40CrMoV5-1 High Alloy Steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (1), 7-14, 2013.
- Kaçal A., Yıldırım F., Determining the Effects of CBN Cutting Insert's Cutting Performance on Surface Roughness and Tool Wear at Turning of PMD 23 Steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (1), 181-189, 2016.
- Liu F., Wang T., Wang Q., Meng J., Lu J., Improved frictional behavior of SiC derived carbon coating using MoS₃ as a solid lubricant, *Tribology International*, 94 (2), 61–66, 2016.
- Alazemi A. A., Dysart A. D., Phuah X. L., Pol V. G., Sadeghi F., MoS₂ nanolayer coated carbon spheres as an oil additive for enhanced tribological performance, *Carbon*, 110 (2), 367-377, 2016.
- Hovsepiana P. E., Mandala P., Ehasariana A. P., Safranb G., Tietemac R., Doerwaldca D., Friction and wear behaviour of Mo–W doped carbon-based coating during boundary lubricated sliding, *Applied Surface Science*, 366 (2), 260–274, 2016.
- Cruz J. F., Botelho T. S., Caron I. L., Durand A. M., Messenger D., Role of WS₂, WS₂+CrC and bonded coatings on damage and friction of Inconel718 flat rough surfaces at high temperature, *Tribology International*, 100 (3), 430–440, 2016.
- Arora R., Kumar S., Singh G., Pandey O., Influence of particle size and temperature on the wear properties of rutile-reinforced aluminium metal matrix composite, *Journal of Composite Materials*, 49 (7) 843–852, 2015.
- Su L., Gao F., Han X., Chen J., Effect of copper powder third body on tribological property of copper-based friction materials, *Tribology International*, 90 (1), 420–425, 2015.
- Xie H., Jiang B., He J., Xia X., Pan F., Lubrication performance of MoS₂ and SiO₂ nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts, *Tribology International*, 93 (2), 63–70, 2016.
- Zhang W., He W., Jing X., Preparation of a stable graphene dispersion with high concentration by ultra sound, *J. Phys. Chem. B*, 114 (32), 10368–10373, 2010.
- Kim H., Abdala A. A., Macosko C. W., Graphene/polymer nanocomposites, *Macro molecules*, 43 (16), 6515–6530, 2010.
- Guezmila M., Bensalah W., Mezlini S., Tribological behavior of UHMWPE against TiAl6V4 and CoCr28Mo alloys under dry and lubricated conditions, *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 63 (4), 375–385, 2016.
- Sayuti M., Erh O.M., Sarhan A.A.D, Hamdi M., Investigation on the morphology of the machined surface in end milling of aerospace AL6061-T6 for novel uses of SiO₂ nano lubrication system, *J. Clean Prod*, 66 (2), 655–663, 2014.
- Cizaire L., Vacher B., Mogne T. L., Martin J., Rapoport L., Margolin A., Tenne R., Mechanisms of ultra-low

- friction by hollow inorganic fullerene-like MoS₂ nanoparticles, *Surf. Coat. Technol.*, 160 (2), 282–287, 2002.
27. Shi S. C., Wu J. Y., Huang T. F., Peng Y. Q., Improving the tribological performance of biopolymer coating with MoS₂ additive, *Surface & Coatings Technology*, 303 (4), 250–255, 2016.
 28. Brogly M., Fahs A., Bistac S., Surface properties of new-cellulose based polymer coatings for oral drug delivery systems, *Polym. Prepr.*, 52 (2), 1054-1063, 2011.
 29. Vadiraj A., Kamaraj M., Sreenivasan V.S., Wear and friction behavior of alloyed gray cast iron with solid lubricants under boundary lubrication, *Tribology International*, 44 (3), 1168–1173, 2011.
 30. Cho M. N., Ju J., Kim S. J., Jang H., Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂S₃, MoS₂) for automotive brake friction materials, *Wear*, 260 (3), 855-860, 2005.
 31. Zhang, X.R., Pei, X.Q., Qi-Hua, W., Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO₂, *Materials and Design*, 30 (5), 4414-4420, 2009.
 32. Koyun A., Kaymakçı Ö. T., Reliability Analysis of a Tram Line, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (4), 615-626, 2015.
 33. Gatignon H., *Statistical Analysis of Management Data*, Springer, New York, A.B.D., 2014.
 34. Balakrishnan N., Cramer E., *The Art of Progressive Censoring Applications to Reliability and Quality*, Springer, New York, A.B.D., 2014.