

17-4 PH Paslanmaz Çeliğin MoS₂ Nanoakışkan Koşulları Altında Sürtünme/Aşınma Performansının İncelenmesi

Emine ŞİRİN^{1*} 

¹Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 28/01/2023
Revision: 03/03/2023
Accepted: 17/03/2023

Anahtar Kelimeler

17-4 PH
Pin-disk
Sürtünme/aşınma,
Nanoakışkan

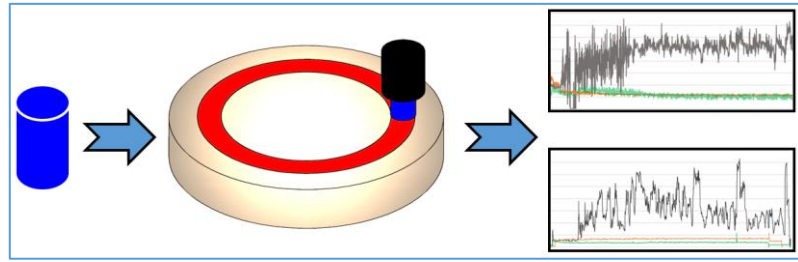
Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/01/2023
Düzeltilme: 03/03/2023
Kabul: 17/03/2023

Keywords

17-4 PH
Pin-on-disc
Friction/Wear
Nanofluids

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)



Şekil A: Grafiksel sunum /Figure A: Graphical representation

Önemli noktalar (Highlights)

- 17-4 PH paslanmaz çeliğin sürtünme-aşınma performansı araştırıldı. / Friction-wear performance of 17-4 PH stainless steel was investigated.
- Performans kriterleri olarak sürtünme katsayısı, titreşim, aşınma analizi, yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik seçilmiştir. / The coefficient of friction, vibration, wear analysis, surface roughness, and microhardness was selected as performance criteria.
- MoS₂ nanoakışkanı tüm kriterlerde en iyi performansı sergilemiştir. / MoS₂ nanofluid showed the best performance in all criteria.

Amaç (Aim): Bu çalışmada nanoakışkan koşullarının 17-4 PH paslanmaz çeliği üzerine sürtünme/aşınma performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. / This study aims to investigate the friction/wear performances of nanofluid conditions on 17-4 PH stainless steel.

Özgünlük (Originality): 17-4 PH paslanmaz çeliğin nanoakışkan koşullarında değerlendirilmesinde sürtünme katsayısı, titreşim seviyesi, yüzey kalitesi ve aşınma durumu incelenmiştir. / In evaluating 17-4 PH stainless steel under nanofluid conditions, friction coefficient, vibration level, surface quality, and wear condition were investigated.

Bulgular (Results): MoS₂ nanoakışkan koşulu kuru koşula göre sürtünme katsayısını% 74,51, titreşim seviyesini% 87,22, yüzey pürüzlülüğünü % 38,69 ve mikrosertliği % 6,41 azaltmıştır. / MoS₂ nanofluid condition reduced friction coefficient by 74.51%, vibration level by 87.22%, surface roughness by 38.69%, and microhardness by 6.41% compared to dry condition.

Sonuç (Conclusion): Genel olarak değerlendirildiğinde, MoS₂ nanoakışkan koşulu 17-4 PH malzemede yağ ve kuru koşula kıyasla daha iyi sürtünme/aşınma performansı sergilemiştir. / Overall, the MoS₂ nanofluid condition exhibited better friction/wear performance in 17-4 PH material compared to oil and dry condition.



17-4 PH Paslanmaz Çeliğin MoS₂ Nanoakışkan Koşulları Altında Sürtünme/Aşınma Performansının İncelenmesi

Emine ŞİRİNİ*

¹Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Research article
Received: 28/01/2023
Revision: 03/03/2023
Accepted: 17/03/2023

Anahtar Kelimeler

17-4 PH,
Pim-Disk,
Sürtünme/aşınma,
Nanoakışkan

Öz

Bu çalışmada 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin farklı koşullar altında, sürtünme/aşınma performansları incelenmiştir. Deneysel kuru, baz sıvı (bitkisel bazlı yağ) ve molibden de sülfür (MoS₂) nanoakışkan koşulları altında gerçekleştirilmiştir. MoS₂ nanoakışkanın çökeltme veya topaklanmasının önüne geçme adına karışıma sodyum dodesil sülfat (SDS) sürfaktanı ilave edilmiştir. Sürtünme/aşınma deneylerinde bir pim-disk test cihazı kullanılmıştır. Deneylerde performans değerlendirilmesinde, sürtünme katsayısı, mikrosertlik, titreşim seviyesi, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve pim yüzey aşınması kullanılmıştır. Pim-disk deneyleri sonucu elde edilen verilere göre, MoS₂ nanoakışkan koşulunun diğer koşullara göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. MoS₂ nanoakışkan koşulu kuru koşula göre sürtünme katsayısı, titreşim ortalaması, yüzey pürüzlülük Ra ve mikrosertlik değerlerini sırasıyla % 74,51, % 87,22, % 38,69 ve % 6,41 oranında azaltmıştır.

Investigation of Friction/Wear Performance of 17-4 PH Stainless Steel under MoS₂ Nanofluid Conditions

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 28/01/2023
Düzeltilme: 03/03/2023
Kabul: 17/03/2023

Keywords

17-4 PH,
Pin-on-disc,
Friction/wear,
Nanofluid

Abstract

This study investigated the friction/wear behaviour of 17-4 PH stainless steel material under different conditions. Experiments were carried out under dry, base liquid (vegetable-based oil) and molybdenum disulfide (MoS₂) nanofluid conditions. Sodium dodecyl sulfate (SDS) surfactant was added to the prepared mixture due to prevent sedimentation or agglomeration of the MoS₂ nanofluid. A pin-on-disc tester was used in the friction/wear experiments. The coefficient of friction, microhardness, vibration level, average surface roughness (Ra) and pin surface wear were used to evaluate the performance in the experiments. According to the data obtained as a result of pin-on-disc experiments, it was determined that the MoS₂ nanofluid condition showed the best performance compared to the conditions. MoS₂ nanofluid condition decreased friction coefficient by 74.51%, vibration average by 87.22%, Ra value by 38.69%, and microhardness values by 6.41% compared to dry condition.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birçok endüstride yüksek korozyon direnci ve mukavemeti yüksek malzemelere olan talep her geçen gün artış göstermektedir. 17-4 PH, kimyasal içeriğinde % 17 krom (Cr) ve % 4 nikel (Ni) barındıran yüksek korozyon ve sıcaklık direnci, iyi süneklik ve yüksek mukavemet özelliği sergileyen paslanmaz çelik malzemeleri arasındadır. 17-4 PH paslanmaz çelikler günümüz sanayisinde, yüksek hızlı uçakların dış yüzeylerinde, füze gövdelerinde, deniz taşıtlarının parçalarında, yakıt tanklarında, uçakların iniş-kalkış takımlarında, pompalarda, millerde, somun, civata, kesici aletler ve

kavramalarda yoğun olarak tercih edilmektedirler [1–4]. Ancak bu kadar yaygın kullanılmalarına rağmen, 17-4 PH paslanmaz çelik malzemeler yüksek mukavemet ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle son derece zor şekillendirilebilmektedirler [5]. Sürtünme/aşınma, malzeme kaybı ve enerji tüketimine neden olan en önemli faktörler arasında yer almaktadır. Şekillendirme proseslerinde verimliliği artırmak, makine ekipmanların ömrünü uzatmak adına sürtünme katsayısının ve aşınma düzeyinin düşürülmesi büyük önem taşımaktadır [6,7]. Bu durum uygun yağlama tekniklerinin kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir [8]. Yağlama sayesinde

birbiriyle temas halinde olan iki yüzey arasında sürtünme minimize olmakta ve enerji verimliliği sağlanabilmektedir. Ayrıca yağlayıcı tribofilm tabakası, yüzeylere nüfuz ederek hasarların önüne geçebilmektedir. Bu amaçla özellikle sürtünme kaynaklı oluşan yüzey hasarlarını, ortama yağlayıcı ajan göndererek geciktirmek mümkündür. Global ölçekte kullanılan yağlar petrol bazlı oldukları için çevre ve çalışan sağlığı açısından son derece zararlı olabilmektedir. Petrol bazlı yağların kullanımını azaltan veya ortadan kaldıran yeni yöntemler geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir [9]. Bu nedenle, çeşitli endüstriler ekolojik ve çevreye duyarlı sürdürülebilir imalat teknikleri aramaktadırlar. Son zamanlarda özellikle petrol bazlı yağlar yerine bitkisel bazlı yağların tercih edildiği çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Bitkisel bazlı yağlar biyolojik olarak bozunabilmesinin yanında toksik olmamaları, dönüştürülebilir ve yenilenebilirlik gibi özelliklere sahiptirler [10]. Ne var ki yağlar, ağır koşullarda etkinliğini yitirebilmekte veya yüzey hasarlarının hızlı gelişimine bir noktadan sonra engel olamamaktadırlar. Bu amaçla özellikle ekolojik bitkisel bazlı yağların etkinliğini artırmak adına sıvı içerisine yağlayıcılık sağlayan, katı nano parçacıklar eklenebilmektedir. Nanopartikül adı verilen bu zerrecikler, bir akışkan içerisine genelde 1-100 nm boyutlarında eklenmektedir. Katı halde üstün yağlayıcılık, ısı taşıma kapasitelerinin yüksek olması, mekanizma oluşturması bu zerrecikleri çok iyi bir katkı maddesi alternatifi haline getirmiştir. Nanopartiküller metal esaslı, karbon esaslı, seramik esaslı olmak üzere farklı yapıda olabilirler. Ancak literatürde en fazla hBN, MoS₂, grafen, grafit, TiO₂, SiO₂ vb. nanopartiküllerin kullanıldığı görülmektedir. MoS₂ nanopartikülleri Van der Waals kuvvetleri tarafından bir arada tutulan zayıf etkileşimli katmanları sayesinde, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı oluşturmaktadırlar [11,12]. Bu sebeple MoS₂, yüksek sıcaklık ve basınç gerektiren katı yağlama, nanoakışkanlar ve kendinden yağlamalı polimer malzemeler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir katkı maddesidir [13,14]. Farklı boyutlarda veya şekillerde bir sıvının içerisine nanopartikül eklenmesiyle oluşan karışıma nanoakışkan adı verilmektedir. Nanoakışkanlar, üstün yağlayıcılık ve yüksek ısı iletkenlik özellikleri nedeniyle birçok alanda yaygın olarak kullanım potansiyeline sahiptirler. Nanoakışkanlar kayan yüzeyler arasında tamir etkisi, yuvarlanma etkisi, parlatma etkisi ve koruyucu film oluşumu ile daha etkili yağlama yaparak aşınma ve sürtünmeyi azaltmaktadırlar. Ayrıca çok az miktarda yağ kullanılması nedeniyle

hem ekonomik hem de çevreyi ve çalışan sağlığını korumaktadır.

Literatürde nanoakışkanlarla yapılan bazı çalışmalara aşağıda değinilmiştir. Akıncioğlu ve Şirin, AISI 316 L malzemeye kuru, yağ ve hBN ilaveli nanoakışkan koşullarında aşınma ve sürtünme testi uygulamışlardır. Araştırmacılar bilye-disk test cihazında ve farklı yükler (2 N, 5 N ve 8 N) altında gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, hBN ilaveli nanoakışkan koşulunun en iyi sonucu gösterdiğini ifade etmişlerdir [15]. Yücel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada mineral esaslı yağ içerisine MoS₂ nanopartikülleri ekleyerek nanoakışkan elde etmişlerdir. Yüzey kalitesi ve sıcaklık değerlerinde önemli oranlarda iyileştirmeler elde ettiklerini iddia etmişlerdir [16]. Hu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada parafin ile birleştirdikleri MoS₂ nanopartiküllerin, parafinin özelliğini iyileştirdiği için aşınma ve sürtünme açısından iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [14]. Shi ve arkadaşları [17], yaptıkları çalışmada katkısız parafin yağı ve Cyanex 301 ile modifiye edilmiş MoS₂ mikropartikülü içeren parafin yağının, tribolojik özelliklerini test etmişlerdir. Çalışmada MoS₂ içeren parafin yağının iyi bir sürtünme/aşınma önleyici özelliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ünlüoğlu ve Çelik yaptıkları çalışmada AISI H11 çeliğinin kuru, yağ ve farklı oranlarda (ağırlıkça % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 25) grafit katkılı nanoakışkanlarla sürtünme/aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, bilye-disk test cihazı ile grafit partiküllerinin yağın aşınma ve sürtünme özelliklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [18]. Kumar ve Reddy Ti-6Al-4V ve EN 31 malzemenin kuru, ıslak ve MoS₂ nanoakışkan koşulları altında pim-disk test cihazı ile sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. MoS₂ nanoakışkan koşullarının sürtünme ve aşınma davranışlarını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [19]. Şirin ve arkadaşları, Titanyum Grade 2 malzemeye kuru, baz sıvı ve bitkisel esaslı yağ içerisine hBN ve GNPs ilaveli nanoakışkan koşullarında pim disk test cihazı ile sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Nanoakışkan koşulunun diğer koşullara göre sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü, titreşim değerlerinde önemli oranda düşüşler sağladığını gözlemlemişlerdir [20]. Yıldırım ve arkadaşları, Waspaloy süperalaşım malzemeyi kuru, bitkisel esaslı baz sıvı ve CuO ve ZnO ilaveli nanoakışkan koşullarına sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Nanoakışkan koşullarının tribolojik özellikleri iyileştirdiğini tespit etmişlerdir [21].

Literatür araştırmalarından elde edilen veriler ışığında nanoakışkanların malzeme şekillendirme proseslerinde son derece olumlu etkiler gösterdiği anlaşılmıştır. Buradan yola çıkarak bu çalışmada 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin kuru, yağ ve MoS₂ ilaveli nanoakışkan koşullarında sürtünme/aşınma davranışları incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda sürtünme katsayısı, mikrosertlik, titreşim seviyesi, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve pim yüzey aşınması performans kriteri olarak tercih edilmiştir. Çalışma sonunda farklı nanoakışkan yağlama koşullarının sürtünme/aşınma davranışları incelenerek literatüre

katkıda bulunulması amaçlanmaktadır. Çalışmaya ait detaylar, bulgular, tartışma ve sonuçlar aşağıda bölümler halinde sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Sürtünme/aşınma testlerinde 10 mm çapında 20 mm uzunluğunda 17-4 PH paslanmaz çelik numuneler kullanılmıştır. 17-4 PH paslanmaz çelik numunelere ait kimyasal bileşim Tablo 1’de ve mekanik özellikler Tablo 2’de sunulmuştur.

Table 1. 17-4 PH malzeme kimyasal bileşimi (%) (Chemical composition of 17-4 PH material (%))

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	S
0,014	0,298	0,805	4,510	15,289	0,133	3,125	0,0215

Table 2. 17-4 PH malzeme mekanik özellikleri (Mechanical properties of 17-4 PH material)

Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
1090	910	15	355

Sürtünme/aşınma testleri öncesi her bir numune temas yüzeyine sırasıyla 200, 600, 100 ve 1200 SiC zımpara ile aşındırma işlemi uygulanmıştır. Son olarak ayna görüntüsünün elde edilmesi adına sırasıyla 6 ve 3 µm Metkon Diapat elmas parlaticı kullanılmıştır. Sürtünme/aşınma deneylerinde Türkyus pim-disk test cihazı kullanılmıştır. Pim-disk test cihazı her ölçüm öncesinde kalibre edilerek verilerin doğruluğu sağlanmıştır. Testler ASTM G99-05 standardına göre gerçekleştirilmiştir. 17-4 PH pim malzemesine karşı sertleştirilmiş AISI D2 soğuk iş takım çeliği diski kullanılmıştır. Her deney öncesinde disk yüzeyi dikkatli temizlenerek testlere hazır hale getirilmiştir. Sürtünme/aşınma deneylerinde kullanılan parametreler Tablo 3’de verilmiştir.

Table 3. Sürtünme/aşınma test koşulları

(Friction/wear testing conditions)

Pim malzemesi	17-4 PH
Disk malzemesi	AISI D2 (56 HRC)
Devir	500 dev/dak
İz çapı	40 mm
Süre	30 dak (1800 sn)
Toplam yol	1884900 mm
Örnekleme frekansı	3 Hz

Nanoakışkanların hazırlanma prosesi kullanım kolaylığı ve maliyetten tasarruf için iki-adım

yöntemi tercih edilmiştir. İki adım yönteminde akışkan sıvı içerisine nanopartiküller doğrudan eklenerek nanoakışkan karışımlar elde edilmektedir. Nanoakışkan karışım hazırlamada baz sıvı olarak Falcon K 151 bitkisel esaslı sentetik yağ kullanılmıştır. Bitkisel esaslı yağa ait teknik özellikler Tablo 4’te gösterilmiştir.

Table 4. Bitkisel yağa ait teknik özellikler

(Technical properties of vegetable oil)

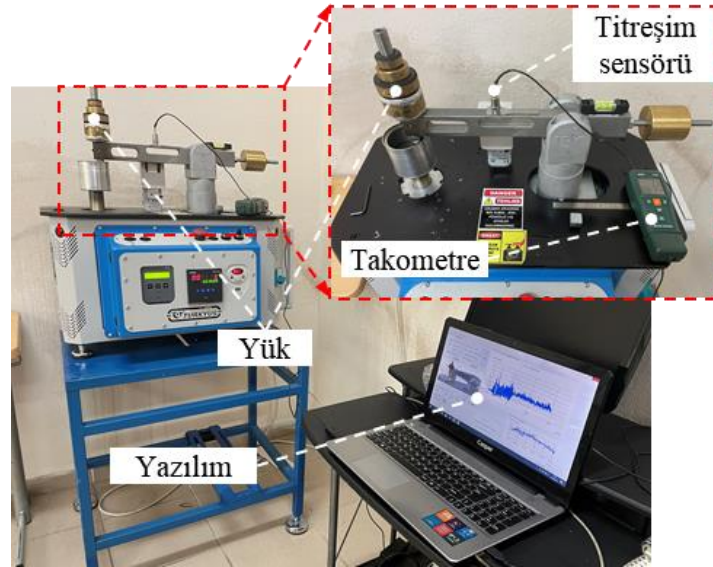
Görünüm	açık sarı
Viskozite (40°C’de)	8,5 mm ² /s ASTM D 7042
Yoğunluk (20°C’de)	0,860 g/cm ³ ASTM D 7042
Alevlenme noktası	200 °C DIN EN ISO 2592

Bitkisel esaslı yağ içerisine literatürden elde edilen bilgilere göre, hacimce % 0,65 oranında MoS₂ nanopartikülleri eklenerek nanoakışkan karışımlar elde edilmiştir. Nanoakışkan karışımlarda karşılaşılan en büyük zorluk topaklanma veya çökelmedir. Araştırmacılar topaklanma ve çökelmenin kısmen önlenmesi veya raf ömrünü artırmak için farklı sürfaktanları nanoakışkan karışımlara eklemiştir. Karışımın stabilitesinin sağlanması adına bu çalışmada sodyum dodesil sülfat (SDS) sürfaktanı kullanılmıştır. SDS, organik bir bileşik olup anyonik sürfaktan özelliği sergilemektedir. Nanoakışkanların çökelme veya

topaklanmasını önleme adına nanopartikül ağırlığının % 0,25 oranında SDS sürfaktanı karışıma eklenmiştir. Karışım prosesi üç farklı adımda uygulanmıştır. Birinci karıştırma prosesinde bitkisel esaslı yağın içerisine önce sürfaktan eklenerek 800 dev/dak ile 10 dakika boyunca bir mekanik karıştırıcı ile karışıma başlanmıştır. Mekanik karıştırıcı karışıma devam ederken MoS₂ nanopartikülleri eklenerek karışıma 50 dakika daha devam edilerek ilk karıştırma prosesi bitirilmiştir. Ardından ikinci karıştırma prosesinde Bandelin Sonopuls HD3200 ultrasonik homojenizatör kullanılarak karışıma 30 dakika daha devam edilmiştir. Üçüncü ve son karıştırma prosesinde ise Termal N11151M manyetik karıştırıcı ile 1500 dev/dak 60 dakika süreyle karışım nihayete erdirilmiştir. Elde edilen MoS₂ nanoakışkan karışımı taze bir şekilde bekletilmeden testlerde kullanılmıştır.

Sürtünme/aşınma testleri esnasında titreşim seviyelerinin tespit edilmesinde Extech 461880 titreşim takometresi kullanılmıştır. Tüm titreşim ölçümleri manyetik sensör test cihazının koluna sabitlenerek kayıt altına alınmıştır. Titreşim tepe değerleri dikkate alınarak ölçümler sürtünme aşınma test süresince devam ettirilmiştir. Böylece sürtünme/aşınma testleri esnasında meydana gelen

titreşimlerin analiz tahmini yapılması hedeflenmiştir. Sürtünme/aşınma testleri sonrasında ise aşınan yüzeylere ait fotoğrafların elde edilmesinde Dino Lite AM791MZT dijital mikroskobu kullanılmıştır. Aşınan yüzeylerin pürüzlülük tespitinde Mahr Marsurf PS10 mobil pürüzlülük ölçer kullanılmıştır. Pürüzlülük cihazının kalibrasyonu her ölçüm öncesinde doğrulama mastarı ile sağlanmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde ISO 4287 standardı dikkate alınmış olup, değerlendirme kriteri olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra tercih edilmiştir. Ölçüm mesafesi standartlara göre 4,8 mm olarak alınmış olup, aşınan yüzeylerin aynı noktasında üç farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen üç farklı yüzey pürüzlülük ölçümün aritmetik ortalaması alınarak Ra sonuçları elde edilmiştir. Aşınan 17-4 PH paslanmaz çelik pim malzemelerin dış silindirik yüzeylerinden itibaren 10 µm mesafe ile beş adet mikrosertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümlerde Metkon Duroline M mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri ASTM E384-17 standardına göre 1000 gf yük ve 15 saniye bekleme zamanına göre yürütülmüştür. Deney setine ait görüntü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Sürtünme-aşınma deney seti (Friction-wear test set-up)

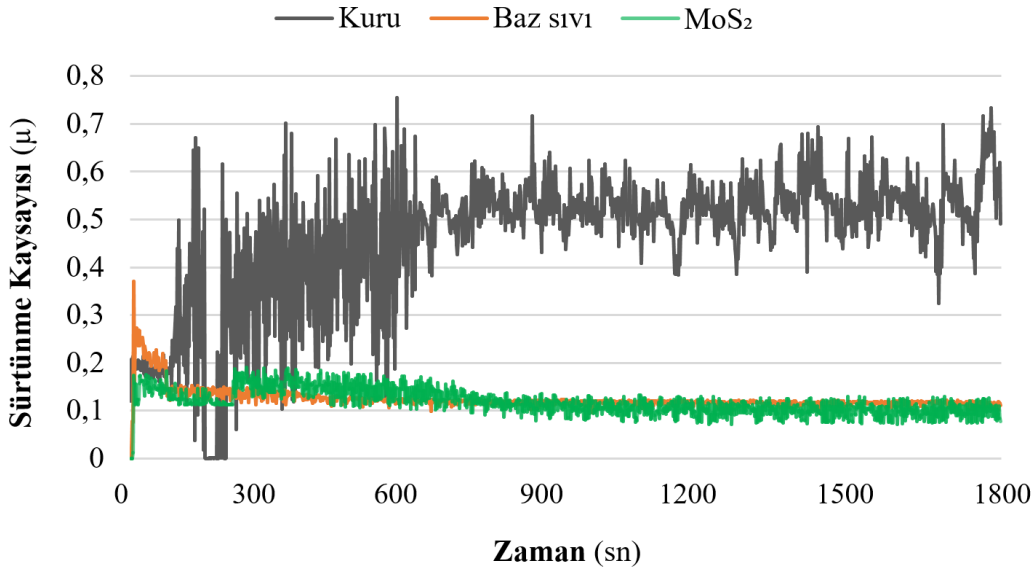
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Sürtünme Katsayısının Değerlendirilmesi (Evaluation of Coefficient of Friction)

Birbiriyle temas halinde çalışan parçalarda oluşan sürtünme, makine parçalarının çalışma ömrünü ve çalışma verimini etkilemektedir. Malzemelerin sürtünme/aşınma davranışı farklı koşullarda değişiklik gösterebilmektedir. Sürtünme ve

aşınmayı önlemek için çeşitli yağlayıcılar kullanılmaktadır. 17-4 PH paslanmaz çeliğinin aşınma testlerinde elde edilen sürtünme katsayı değerleri, farklı koşullarda (kuru, baz sıvı ve MoS₂) değerlendirilmiştir. Sürtünme katsayısının zamana göre değişimi, Şekil 2’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı trendinin beklenildiği üzere kuru koşulda gerçekleştiği görülmektedir. Sürtünme/aşınma testinin 600 sn. süresine kadar değişken olan grafik, sonrasında nispeten daha düzenli hale gelmiştir. Bu durum 17-4 PH malzemenin rodaj süresinin

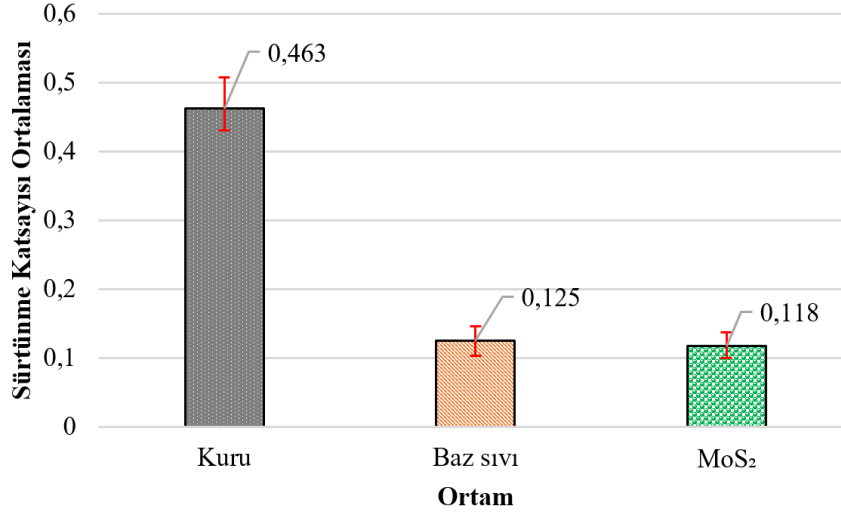
aşılması ile ifade edilebilir. Baz sıvıda elde edilen sürtünme katsayısı trendinin kuru koşula göre iyileşme gösterdiği açıkça görülmektedir. Ancak özellikle MoS₂ nanoakışkan koşulu ile kuru ve baz sıvı karşılaştırıldığında daha stabil ve düzgün bir trendin olduğu anlaşılmaktadır. MoS₂ nanoakışkan koşulunda sürtünme katsayısı değerlerinin nispeten daha düzgün trendde elde edilmesi, katı nanopartiküllerin sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olması, parlatma, yuvarlama, tamir ve yastıklama mekanizmaları ile daha etkili bir tribofilm tabakası oluşumu sağlaması ile açıklanabilir [22].



Şekil 2. Farklı koşullar altında elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları (The coefficient of friction results obtained under different conditions)

Sürtünme katsayısı ortalamalarını gösteren grafik, Şekil 3’te verilmiştir. Grafik incelendiğinde kuru koşulda sürtünme katsayısı ortalaması 0,463 ile en yüksek değer elde edilmiştir. Bu durum yağlayıcı hiçbir ajanın kullanılmamasıyla ifade edilebilir. Kuru koşulu, baz sıvı 0,125 ile takip etmektedir. Bir başka ifadeyle baz sıvı, kuru koşula göre % 73 oranında azalma göstermiştir. Yağlayıcı ajanın kullanılması ile sürtünen iki yüzeye tribofilm yağlayıcı tabaka oluşması sürtünmenin minimize olmasına yardımcı olmaktadır. Kumar ve Reddy yaptıkları çalışmada kuru koşula göre nanoakışkan kullanımı ile sürtünme katsayılarının düştüğünü ifade etmişlerdir [19]. MoS₂ koşulunda ise 0,118 sürtünme katsayısı ortalaması ile en düşük değer elde edilmiştir. Bir başka deyişle MoS₂ nanoakışkanı, sürtünme katsayısı ortalamasını kuru

koşula göre % 74,51, baz sıvıya göre ise % 5,60 oranında azaltmıştır. Nanopartiküllerin eklendikleri akışkanın yağlama özelliğini artırmada önemli katkılar sağladığı bilinmektedir. Bu durum akışkan içerisinde yer alan nanopartiküllerin sürtünmeyi azaltmaya yardımcı olması, tamir, parlatma, yuvarlanma ve yastıklama mekanizmaları ile etkili bir tribofilm tabakası oluşturması ile açıklanabilir. Nanopartiküller sürtünen yüzeyler arasında bariyer görevi görerek yüzeyleri kaplamakta, sürtünme ve aşınmayı önleyici özellikler sergilemektedirler [22–24]. Dolayısıyla bu çalışmada da benzer durum olduğundan, nanoakışkan içindeki MoS₂ nanopartiküllerinin sürtünme katsayısının düşük seviyelerde gerçekleştirilmesine katkı sağladığı düşünülmektedir.



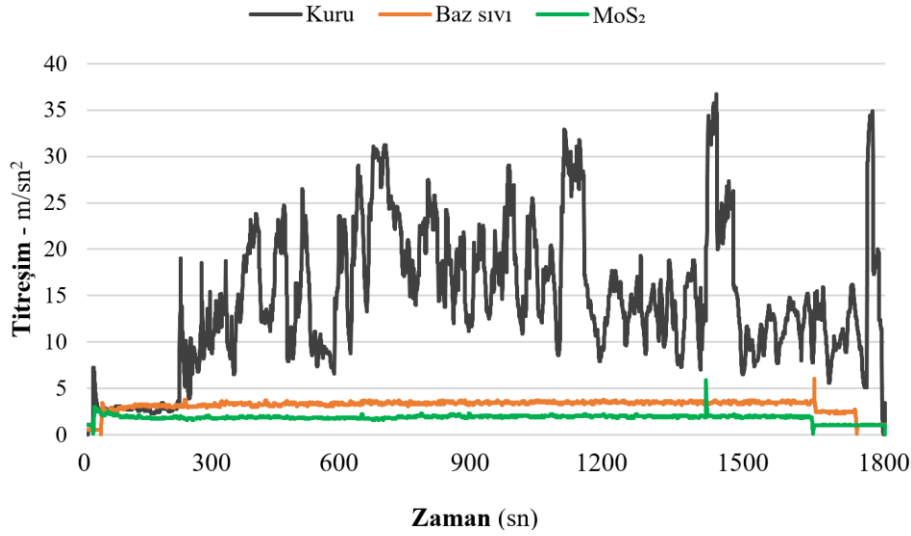
Şekil 3. Sürtünme katsayı değerleri ortalama grafiği (Friction coefficient values average graph)

3.2. Titreşim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

(Evaluation of Vibration Results)

Sürtünme/aşınma deneyleri süresince titreşim seviyelerindeki artış, sürtünme katsayısını belirleyen kuvvet trendini de etkiler. Bu nedenle, titreşim seviyelerin artış göstermesi sürtünme

katsayısını da artırmaktadır. Şekil 4'te sürtünme/aşınma deneyleri süresince meydana gelen değişimler verilmiştir.



Şekil 4. Farklı koşullar altında elde edilen titreşim değerleri (Vibration values obtained under different conditions)

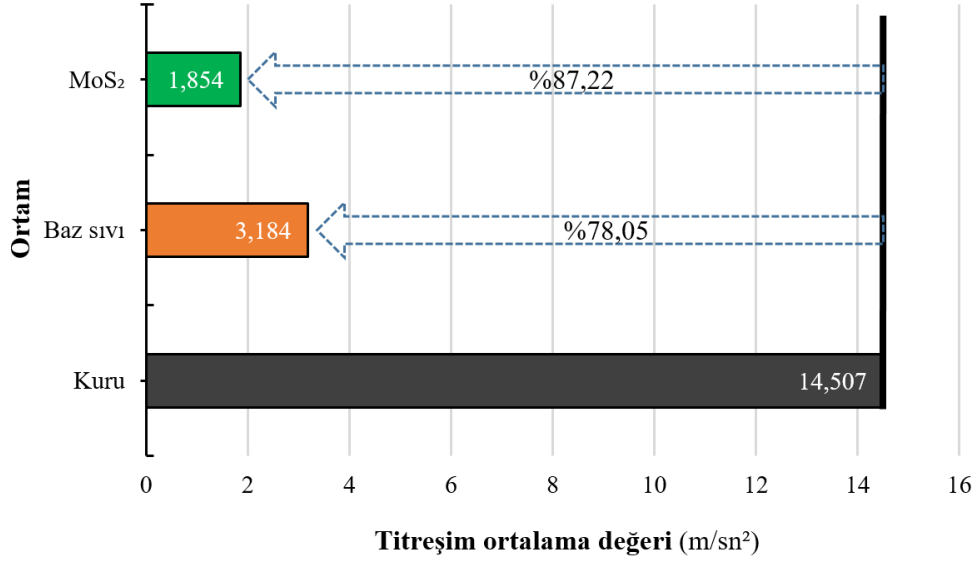
Grafikteki zaman değişimine göre titreşim trendi de değişiklik göstermektedir. Titreşim sonuçları değerlendirildiğinde, kuru koşulda yapılan testlerde titreşim değerleri en yüksek seviyededir. Bu, kuru koşullarda artan sürtünme ile açıklanabilir. Kuru koşulda zamana bağlı olarak titreşim trendinin belirgin oranda değişim gösterdiği görülmektedir. Baz sıvı ve MoS₂ koşullarındaki zamana bağlı değişimin ise daha az seviyelerde olduğu görülmektedir. Akışkan koşulunda gerçekleştirilen

testlerin ilk periyotlarında yüksek olan titreşim trendi, ilk birkaç saniyeden sonra azalmaya başlamıştır. Aşınma sırasında bozulmaya başlayan yüzeyler titreşimi etkileyen en büyük sebeplendir. Yağ koşulunda aşınma daha az olduğu için yüzeyler daha az bozulur ve titreşim de daha az ölçülür. Ayrıca nanoakışkan içeriğindeki nanopartiküller yüzeylerdeki boşlukları doldurarak daha kaliteli yüzeyler oluşturur. Pürüzsüz yüzey

sayesinde titreşim trendinin düşük seviyede olduğu söylenebilir [15,25].

Titreşim ortalama değeri grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde kuru koşuldaki titreşim değerinin ($14,507 \text{ m/sn}^2$) en yüksek, MoS₂ nanoakışkanındaki titreşim değerinin ise en düşük ($1,854 \text{ m/sn}^2$) olduğu görülmektedir. Kuru koşula göre MoS₂ ve baz sıvı değerleri sırasıyla % 87,22 oranında ve % 78,05 oranında azalma göstermiştir. Bu durum sürtünme katsayısı değerleriyle (Şekil 3)

benzerlik göstermektedir. Titreşim değerindeki bu değişim MoS₂ nanoakışkan yağlama koşulunun etkin bir yağlama sağlamasına bağlı olarak sürtünme katsayısını azaltmasına bağlanabilir. Şirin yaptığı çalışmada nanoakışkan koşullarının titreşim seviyelerini azaltmada son derece etkili olduğunu vurgulamıştır [26]. Benzer şekilde nanoakışkan yağlama koşullarındaki etkili tribo film tabakasının yüzeyi koruyarak sürtünmeyi ve titreşimi azaltması ile bu durum açıklanabilir.



Şekil 5. Farklı koşullar altında elde edilen titreşim ortalama değerleri (Vibration average values obtained under different conditions)

3.3. Aşınan Yüzeylerin Değerlendirilmesi

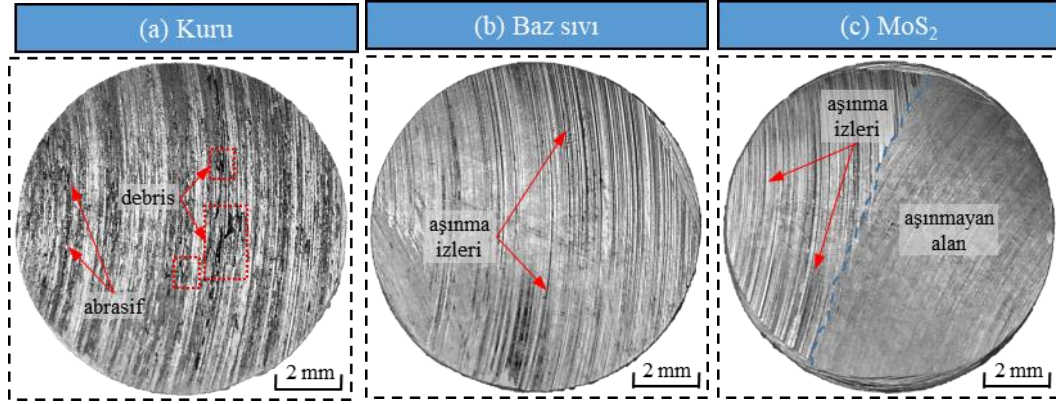
(Evaluation of Worn Surfaces)

Aşınan yüzeylere ait görseller, Şekil 6'da verilmiştir. Mikroskop görüntüleri incelendiğinde, aşınan yüzeylerin kuru koşulda daha geniş alana sahip olduğu görülmektedir. 17-4 PH pim malzemesi ile sertleştirilmiş AISI D2 disk malzemesi sürekli temas halindedir. Temas halindeki pim malzeme yüzeylerinden ayrılan debris kalıntılarının, aşınmayı hızlandırdığı düşünülmektedir. Kopan bu debris oluşumları pim ve disk arasında kayarak aşınma mekanizmalarının hızlı oluşmasına neden olabilmektedir. Alemani ve arkadaşları, aşınma debrislerinin yüzeylerde hasara sebep olduğunu ve aşınma mekanizmalarının oluşumunu hızlandırdığını ifade etmişlerdir [27]. Benzer şekilde kuru koşulda herhangi bir yağlayıcı ajanın kullanılmaması yüzey temasını artırmış, artan yüzey temasıyla aşınan debris parçacıklarının aşınma alanının büyük bir alanda oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Baz sıvı koşulunda

aşınmanın kuru koşula göre nispeten daha az bir alanda gerçekleştiği görülmektedir. Baz sıvının temas halindeki pim-disk yüzeylerinde etkin tribofilm tabakası sayesinde yüzey hasarının sınırlı bir alanda gerçekleşmesini sağladığı anlaşılmaktadır. Ayrıca baz sıvının yüzeylerde aşınma debris oluşumlarını da önlediği anlaşılmaktadır. Sürtünen iki yüzey arasında sınır yağlamanın gerçekleşmesiyle aşınma mekanizmaları gecikmekte ve yüzey hasarlarının nispeten önüne geçilmektedir [28]. Şekil 6c incelendiğinde pim yüzeyinde aşınma alanının en az MoS₂ nanoakışkan koşulunda gerçekleştiği görülmektedir. MoS₂ nanopartikülleri sürtünen pim ve disk yüzeyleri arasında yuvarlanma etkisi göstermesiyle aşınmayı geciktirdiği ön görülmektedir. Ne var ki literatürde yapılan çalışmalarda, nanopartiküllerin bir baz sıvıya eklenmesiyle oluşan nanoakışkanların tamir, yuvarlanma, cilalama, kayma ve yastıklama etkileri sayesinde sürtünmenin minimize edildiği ve aşınmanın geciktiği ifade edilmektedir [22,29].

Yağlayıcıların kullanımı ile yüksek ısı oluşumuna bağlı aşınma tipleri de önlenmektedir [30]. Aşınan yüzeylerde görülen baskın aşınma tipi sert yüzeylerin kayması sonucu malzeme kaybına neden olan çizikler veya olukların oluşturduğu abrasif

aşınmadır. Yine görülen diğer aşınma tipi ise; malzeme üzerinde kopan kalıntıların oluşturduğu adheziv aşınmadır. Aşınan yüzeylere ait görüntüler yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve sürtünme katsayısı sonuçlarını doğrular niteliktedir.

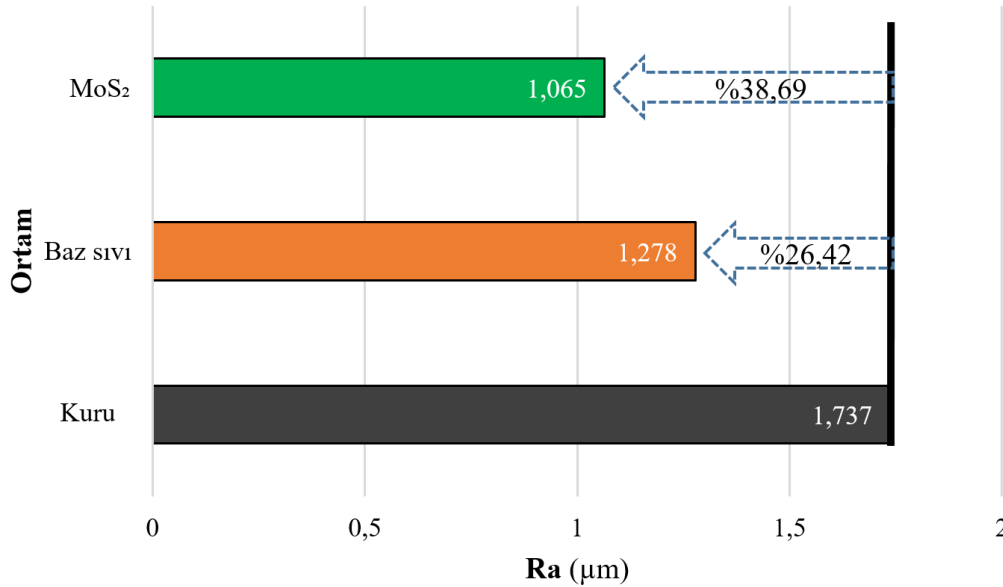


Şekil 6. Farklı koşullar altında aşınan pim yüzeyleri (Pin surfaces worn under different conditions): (a) Kuru (Dry), (b) Baz sıvı (Base fluid), (c) MoS₂ (MoS₂)

3.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughness)

Aşınan pim yüzeylerinden alınan yüzey pürüzlülük ortalama Ra değerleri, Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’ye göre en yüksek yüzey pürüzlülük değeri hiçbir yağlamanın olmadığı kuru koşulda elde edilirken en düşük yüzey pürüzlülük Ra değeri MoS₂ nanoakışkanın kullanıldığı yağlama koşulunda elde edilmiştir. MoS₂ ve baz sıvıya ait yüzey pürüzlülük

değerleri kuru koşulda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine göre sırasıyla % 38,69 ve % 26,42 oranında azalma göstermiştir. Yüzey pürüzlülük Ra değerleri Şekil 3’teki sürtünme katsayısı değerleri ile paralellik göstermektedir. Bu durum nanoakışkan yağlama koşulunun sürtünmeyi azaltmasına bağlı olarak, yağlamanın da etkisiyle yüzey pürüzlülük değerinde iyileşmelerin olmasına bağlanabilir.



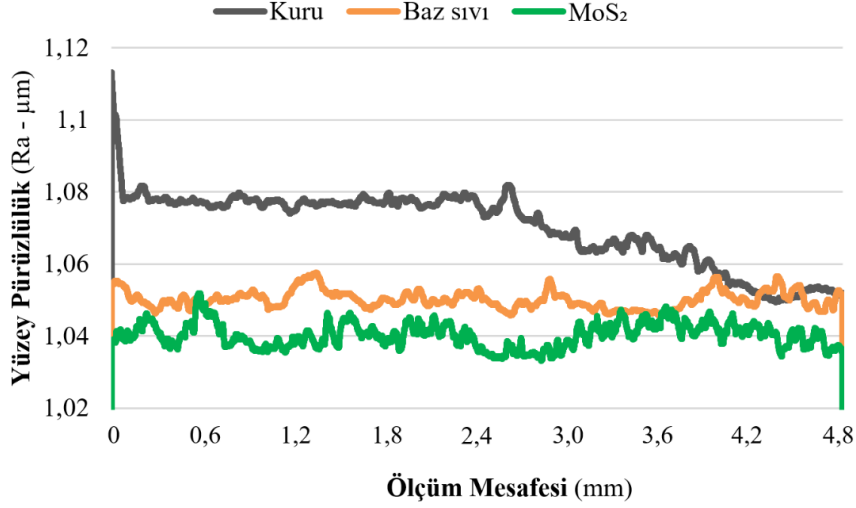
Şekil 7. Farklı koşullar altında elde edilen Ra pürüzlülük değerleri (Ra roughness values obtained under different conditions)

Ölçüm mesafesine göre yüzey pürüzlülük profilleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde kuru

koşulda yüzey pürüzlülük değerlerinde daha fazla değişim gözlemlenmektedir. Baz sıvıda bu değişim

trendi kuru koşula göre daha düzenli haldedir. Özellikle MoS₂ nanoakışkan koşulunda kuru ve baz sıvı koşuluna göre daha düzenli ve stabil bir trendin olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7 ve Şekil 8 birlikte

değerlendirildiğinde nanoakışkanların oluşturduğu yağlama, tamir, yuvarlanma ve yüzeye tutunma mekanizmalarının etkisi ile yüzey hasarlarını geciktirmesine de atfedilebilir [31,32].



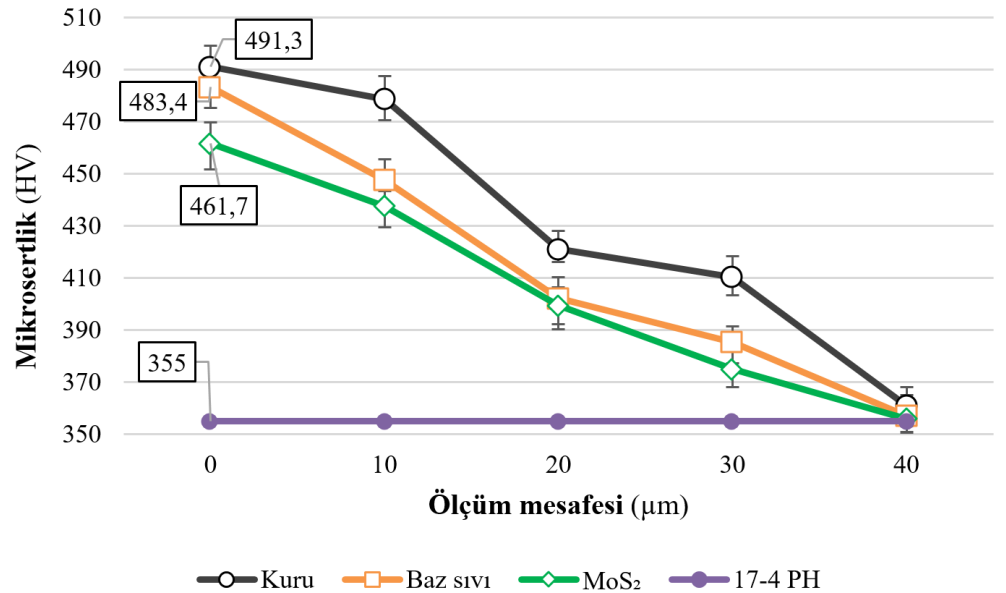
Şekil 8. Farklı koşullar altında elde edilen Ra pürüzlülük profilleri (Ra roughness profiles obtained under different conditions)

3.5. Mikrosertlik Sonuçlarının

Değerlendirilmesi (Evaluation of Microhardness Result)

doğrultuda mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Farklı koşullarda ölçülen mikrosertlik sonuçları Şekil 9’da verilmiştir.

Pim-disk testleri sonrasında aşınan pim yüzeylerin dış yüzeyinden 10 µm mesafede 5 farklı paralel



Şekil 9. Farklı koşullar altında elde edilen mikrosertlik sonuçları (Microhardness results obtained under different conditions)

Mikrosertlik sonuçları değerlendirildiğinde en düşük mikrosertlik değeri (355 HV) işlenmemiş ham malzemede elde edilmiştir. En yüksek mikrosertlik değeri (491,3 HV) kuru koşulda elde edilmiştir. Kuru koşullarda daha yüksek ısı üretimine bağlı olarak daha yüksek mikrosertlik değeri görülmektedir. Sürtünme/aşınma testleri sonrasında numunelerin temas bölgelerinde sertlik değerlerinin arttığı grafikten de görülmektedir. Aşınan yüzeydeki 10 µm mesafelerle ölçülen mikrosertlik değerlerine bakıldığında en yüksek değer, aşınma yüzeyine yakın olan mesafede elde edilirken aşınan yüzeyden uzaklaştıkça sertlik değerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum aşınma yüzeyinde aşınma esnasında yükün etkisiyle aşınan yüzeyin daha fazla sertleşmesine bağlanabilir. Mikrosertlik sonuçları aşınan yüzey görüntüleri (Şekil 6) ile paralellik göstermektedir. Sürtünme/aşınma testleri sonrası kuru koşula göre mikrosertlik değeri baz sıvıda % 1,63 oranında, MoS₂ nanoakışkanında ise % 6,41 oranında azalma göstermiştir. Bu durum Şekil 7 yüzey pürüzlülük sonuçlarıyla da açıklanabilir. Nanoakışkanların baz sıvıya göre tribolojik performanslarının daha yüksek olmasına bağlı olarak, aşınma mekanizmalarını geciktirdiği ve yüzey kalitesini iyileştirdiği bilinmektedir [15,33]. Elde edilen sertlik değişimleri sürtünme katsayısı ve titreşim sonuçları ile de örtüşmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada MoS₂ nanoakışkanların PH 17-4 paslanmaz çeliğin sürtünme/aşınma davranışları üzerine etkisi incelenmiştir. Sürtünme/aşınma deneylerinde sürtünme katsayısı, mikrosertlik, titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma yüzey kriterleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdadır.

- En düşük sürtünme katsayısı değerleri MoS₂ nanoakışkan koşulunda elde edilmiştir. Kuru koşuldaki sürtünme katsayısı ortalaması değeri baz sıvı ve MoS₂ ye göre sırasıyla % 73 ve % 74,51 oranında artış göstermektedir.
- MoS₂ nanoakışkan koşulunda elde edilen titreşim ortalaması en düşük değere sahiptir. Titreşim ortalama değerinde, kuru koşula göre MoS₂ ve baz sıvı değerleri sırasıyla % 87,22 oranında ve 78,05 oranında azalma göstermiştir.

- Aşınan yüzeyler incelendiğinde en çok aşınmanın kuru koşulda gerçekleştiği görülmektedir. En az aşınmanın ise MoS₂ nanoakışkan koşulunda gerçekleştiği görülmektedir. Nanoakışkan koşulunda baz sıvıya eklenen nanopartiküllerin aşınmanın azalmasında oldukça etkili olduğu görülmektedir.
- En yüksek yüzey pürüzlülük değeri hiçbir yağlamanın olmadığı kuru koşulda elde edilirken en düşük yüzey pürüzlülük değeri MoS₂ nanoakışkanın kullanıldığı yağlama koşulunda elde edilmiştir. MoS₂ ve baz sıvıya ait yüzey pürüzlülük değerleri kuru koşulda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine göre sırasıyla % 38,69 ve % 26,42 oranında azalma göstermiştir.
- Sürtünme/aşınma testleri sonrasında kuru koşula göre mikrosertlik değeri baz sıvıda % 1,63 oranında, MoS₂'de ise % 6,41 oranında azalma göstermiştir.
- Genel olarak nanoakışkan koşulunun 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin sürtünme/aşınma performansını iyileştirildiği tespit edilmiştir. Ayrıca farklı nanopartikül çeşidi ve farklı karışım oranlarında çalışmalar yapılarak nanoakışkanların sürtünme ve aşınma üzerine etkisi araştırılarak literatüre yeni çalışmalar kazandırılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Emine ŞİRİN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Klim Z., Ennajimi E., Balazinski M., Fortin C. Cutting tool reliability analysis for variable feed milling of 17-4PH stainless steel. *Wear*. 1996; 195: 206–213.
- [2] Kochmański P., Nowacki J. Activated gas nitriding of 17-4 PH stainless steel. *Surfaces Coatings Technology*. 2006; 200: 6558–6562.
- [3] Mohanty A., Gangopadhyay S., Thakur A. On applicability of multilayer coated tool in dry machining of aerospace grade stainless steel. *Material Manufacturing Process*. 2015; 31: 869–879.
- [4] Mirzadeh H., Najafizadeh A., Moazeny M. Flow curve analysis of 17-4 PH stainless steel under hot compression test, *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2009; 40: 2950–2958.
- [5] Yaşar SA, Uzun G, Korkut İ. 17-4 PH ve 15-5 PH paslanmaz çeliklerinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2020; 10: 71–81.
- [6] Xiong S., Liang D., Wu H., Lin W., Chen J., Zhang B. Preparation, characterization, tribological and lubrication performances of Eu doped CaWO₄ nanoparticle as anti-wear additive in water-soluble fluid for steel strip during hot rolling, *Applied Surface Science*. 2021; 539: 148090.
- [7] Ishikawa T., Choi J. Effect of water adsorption on the frictional properties of hydrogenated amorphous carbon films in various relative humidities, *Langmuir*. 2021;37:1012–24.
- [8] Karthikeyan K.M.B., Vijayanand J., Arun K., Rao V.S. Thermophysical and wear properties of eco-friendly nano lubricants. *Materials Today: Proceedings*. 2021;39: 285–291.
- [9] Hong S.Y., Broome M., Hong S.Y., Broome M. Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Clean Products and Processes*. 2000; 2: 157–66.
- [10] Shashidhara YM., Jayaram SR. Vegetable oils as a potential cutting fluid-An evolution, *Tribology International*. 2009; 43:1073–81.
- [11] Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J., Giacometti V., Kis A. Single-layer MoS₂ transistors. *Nature Nanotechnology*. 2011; 6: 147–150.
- [12] Sahoo R. R., Biswas S. K. Microtribology and friction-induced material transfer in layered MoS₂ nanoparticles sprayed on a steel surface. *Tribology Letters*. 2010;37: 313–326.
- [13] Shen B., Malshe A. P., Kalita P., Shih A. J., Performance of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. *Transactions of NAMRI/SME*. 2008;36:357–364.
- [14] Hu K. H., Liu, M., Wang Q. J., Xu Y. F., Schraube S., Hu X.G. Tribological properties of molybdenum disulfide nanosheets by monolayer restacking process as additive in liquid paraffin. *Tribology International*. 2009;42:33–39.
- [15] Akincioğlu S., Şirin Ş. Evaluation of the tribological performance of the green hBN nanofluid on the friction characteristics of AISI 316L stainless steel. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2021; 73:(9).1176–1186.
- [16] Yücel A., Yıldırım Ç. V., Sarıkaya M., Şirin Ş., Kıvak T., Gupta M. K., Tomaz İ. V. Influence of MoS₂ based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021; 15:1688–1704.
- [17] Shi, H., Fu, X., Zhou, X., Wang, D., Hu, Z. A low-temperature extraction–solvothel route to the fabrication of micro-sized MoS₂ spheres modified by Cyanex 301. *Journal of Solid State Chemistry*. 2006;179:(6)1690–1697.
- [18] Ünlüoğlu O, Çelik O.N. Grafit partiküllerinin yağ katkısı olarak AISI H11 çeliğinin sürtünme ve aşınma davranışı üzerine etkisi. *Politeknik*. 2012;1: 1-1.
- [19] Kumar G.R, Suresh Kumar Reddy N. Tribological studies of EN31 steel and Ti-6Al-4V alloy materials using pin-on-disc

- tribometer. *Material Today Proceedings*, 2020;28:1216–1220.
- [20]Şirin Ş, Akıncıoğlu S, Gupta MK, Kıvak T, Khanna N. A tribological performance of vegetable-based oil combined with GNPs and hBN nanoparticles on the friction-wear tests of titanium grade 2. *Tribology International*. 2023; 181:108314.
- [21]Yıldırım ÇV, Şirin Ş, Kıvak T, Sarıkaya M. The effect of nanofluids reinforced with different surfactants on the machining and friction-wear properties of Waspaloy. *Tribology International*. 2023; 181:108316.
- [22]Şirin E, Kıvak T, Yıldırım Ç.V. Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X, *Tribology International*. 2021; 157: 106894.
- [23]Şirin Ş, Kıvak T. Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy. *Tribology International*. 2019; 137: 180–192.
- [24]Yıldırım Ç.V, Sarıkaya M, Kıvak T, Şirin Ş. The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625. *Tribology International*. 2019; 134: 443–456.
- [25]Lee K, Hwang Y, Cheong S, Choi Y, Kwon L, Lee J, Kim S.H. Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication, *Tribol Letters*. 2009; 35: 127–131.
- [26]Şirin Ş. AISI 904L süper dubleks paslanmaz çeliğin tornalanmasında MMY, hBN ve N2 soğutma/yağlama koşullarının performans değerlendirilmesi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*. 2022; 6: 103–110.
- [27]Alemani M, Gialanella S, Straffelini G, Ciudin R, Olofsson U, Perricone G, Metinoz I. Dry sliding of a low steel friction material against cast iron at different loads: Characterization of the friction layer and wear debris. *Wear*. 2017; 376 :1450–1459.
- [28]Sundh J, Olofsson U, Sundvall K. Seizure and wear rate testing of wheel–rail contacts under lubricated conditions using pin-on-disc methodology. *Wear*. 2008; 265:1425–1430.
- [29]Çelik O.N, Ay N, Göncü Y., Effect of nano hexagonal boron nitride lubricant additives on the friction and wear properties of AISI 4140 steel. *Particulate Science and Technology*. 2013; 31: 501–506.
- [30]Wulpi D. J. (2013). *Understanding How Components Fail*. America: ASM International.
- [31]Chatha S.S, Pal A, Singh T. Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 137: 537-545.
- [32]Yi S, Li G, Ding S, Mo J. Performance and mechanisms of graphene oxide suspended cutting fluid in the drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017; 29:182–93.
- [33]Sen B., Gupta M. K., Mia M., Mandal U. K., Mondal S. P. Wear behaviour of TiAlN coated solid carbide end-mill under alumina enriched minimum quantity palm oil-based lubricating condition. *Tribology International*. 2020; 148: 106310.