



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNDE LAZERLE YÜZEY
MODİFİKASYONUNUN AŞINMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

TURGAY ÇAKIR

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMRE ALTAŞ

BARTIN-2025



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNDE LAZERLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN
AŞINMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Turgay ÇAKIR

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ

Üye : Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

BARTIN-2025

KABUL VE ONAY

Turgay ÇAKIR tarafından hazırlanan “AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNDE LAZERLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN AŞINMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 17.06.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serkan BATI

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Zafer CEYLAN
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNDE LAZERLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN AŞINMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

13.05.2025

Turgay ÇAKIR

ÖN SÖZ

AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNDE LAZERLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN AŞINMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ" adlı bu çalışma, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Öncelikle, tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma boyunca değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, çalışmalarım süresince bana her konuda rehberlik eden ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin akademik titizliği, yapıcı eleştirileri ve sabırlı yaklaşımı, bu tezin başarıyla tamamlanmasında ve mesleki gelişimimde büyük katkı sağlamıştır.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi, bu yoğun tez çalışması sürecinde de yanımda olan, sonsuz sabır ve anlayışla bana destek veren sevgili eşim Aynur'a ve varlığıyla bana güç veren, çalışma azmimi artıran canım oğlum Kerem'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların sevgisi ve desteği bu çalışmanın tamamlanmasında büyük önem taşımıştır.

Bu çalışmanın, lazer yüzey işleme ve triboloji alanlarında gelecekteki araştırmalara ışık tutması ve endüstriyel uygulamalarda takım çeliklerinin performansını artırmaya yönelik çözümler sunması dileğiyle...

Turgay ÇAKIR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNDE LAZERLE YÜZEY MODİFİKASYONUNUN AŞINMA PERFORMANSINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Turgay ÇAKIR

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Emre ALTAŞ

Bartın-2025, sayfa: 60

Bu çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliği üzerindeki farklı lazer tekstür desenlerinin tribolojik davranışları, ball-on-disk aşınma test düzeneğinde kuru kayma ve MoS₂ yağlayıcı koşulları altında, farklı yükler (2N ve 4N) ve kayma süreleri (15 ve 30 dakika) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, lazerle yüzey modifikasyonunun tüm tekstür desenli yüzeylerde aşınma direncini ve sürtünme özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Kuru kayma koşullarında 4N yük ve 30 dakika kayma süresi altında en yüksek hacim kaybı ($0,894 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) ve sürtünme katsayısı ($\mu=0,90$) değerleri lazersiz yüzeyde elde edilmiştir. Buna karşın, büyük daire deseni tüm koşullarda en üstün performansı göstermiş, 2N yük ve 15 dakika kayma süresi altında hacim kaybını lazersiz yüzeye kıyasla %19 ($0,801 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'ten $0,647 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'e) ve sürtünme katsayısını %24 (0,90 μ 'den 0,68 μ 'ye) düşürerek belirgin iyileşme sağlamıştır. MoS₂ yağlayıcı kullanımı ise performansı daha da artırmış, büyük daire desenli yüzeyde en etkili sonuçlar elde edilmiştir. Büyük daire deseni ile MoS₂ yağlayıcının birlikte kullanımı, 2N yük ve 15 dakika kayma süresi altında tüm test koşulları içerisinde en düşük hacim kaybı ($0,106 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) ve minimum sürtünme katsayısı ($\mu=0,109$) değerleriyle mükemmel performans sergilemiştir. Kuru koşullara kıyasla, hacim kaybında %84 ve sürtünme katsayısında %82-84 oranında iyileşme sağlanmıştır. SEM, EDS ve 3D profilometre analizleri, tekstürlü yüzeylerde çukurların

aşınma kalıntılarını hapsediğini ve MoS₂ varlığında aşınma derinliğinin %85-90 (4 µm'den 0,4-0,6 µm'ye) azaldığını göstermiştir. Artan yük ve kayma süresi tüm yüzeylerde hacim kaybını artırsa da, lazer tekstürlü yüzeyler yüksek yük koşullarında bile üstün direnç göstermiştir. Sonuç olarak, optimum lazer tekstür desenlerinin ve MoS₂ yağlayıcının birlikte kullanımı, AISI D2 takım çeliğinin tribolojik performansını önemli ölçüde iyileştirmekte ve endüstriyel uygulamalarda takım ömrünün uzatılması için umut verici çözümler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: AISI D2 çeliği, aşınma, lazer tekstürleme, MoS₂ yağlayıcı, sürtünme katsayısı, yüzey modifikasyonu.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LASER SURFACE MODIFICATION ON WEAR PERFORMANCE IN AISI D2 TOOL STEEL

Turgay ÇAKIR

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Emre ALTAŞ

Bartın-2025, pp: 60

This study investigates the tribological behavior of different laser texture patterns on AISI D2 cold work tool steel using a ball-on-disk wear test rig under both dry sliding and MoS₂ lubricant conditions, at various loads (2N and 4N) and sliding durations (15 and 30 minutes). Experimental results demonstrated that laser surface modification significantly improved wear resistance and friction properties across all textured surfaces. Under dry sliding conditions at 4N load and 30 minutes sliding duration, the highest volume loss ($0.894 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) and friction coefficient ($\mu=0.90$) values were obtained on the untextured surface. In contrast, the large circle pattern exhibited superior performance under all conditions, reducing volume loss by 19% (from $0.801 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ to $0.647 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) and friction coefficient by 24% (from $\mu=0.90$ to $\mu=0.68$) compared to the untextured surface under 2N load and 15 minutes sliding duration. The application of MoS₂ lubricant further enhanced performance, with the most effective results achieved on the large circle patterned surface. The combination of large circle pattern and MoS₂ lubricant exhibited excellent performance with the lowest volume loss ($0.106 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) and minimum friction coefficient ($\mu=0.109$) values among all test conditions under 2N load and 15 minutes sliding duration. Compared to dry conditions, improvements of 84% in volume loss and 82-84% in friction coefficient were achieved. SEM, EDS, and 3D profilometer analyses revealed that the dimples in

textured surfaces effectively trapped wear debris and wear depth decreased by 85-90% (from 4 μm to 0.4-0.6 μm) in the presence of MoS_2 . Although increased load and sliding duration raised volume loss across all surfaces, laser-textured surfaces demonstrated superior resistance even under high load conditions. In conclusion, the combined use of optimum laser texture patterns and MoS_2 lubricant significantly improves the tribological performance of AISI D2 tool steel, offering promising solutions for extending tool life in industrial applications.

Keywords: AISI D2 steel, friction coefficient, laser texturing, MoS_2 lubricant, surface modification, wear.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNİN YAPISAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ.....	4
3. YÜZEY MODİFİKASYON TEKNİKLERİ	6
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	8
5. MATERYAL VE METOT	13
5.1. MoS ₂ Yağlayıcı Üretimi	14
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	15
6.1. Aşınma davranışının değerlendirilmesi	15
6.2. Aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesi	27
6.3. Sürtünme katsayısının değerlendirilmesi	35
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
5.1: AISI D2 çeliği üzerine uygulanan a) lazersiz, b) ızgara, c) küçük daire ve d) büyük daire farklı lazer tekstür desenlerinin 3D boyutlu optik profilometre görüntüleri.....	14
6.1: AISI D2 çeliği üzerine uygulanan ızgara desenin optik profilometre görüntüsü.....	15
6.2: AISI D2 çeliği üzerine uygulanan küçük daire desenin optik profilometre görüntüsü.....	16
6.3: AISI D2 çeliği üzerine uygulanan büyük daire desenin optik profilometre görüntüsü.....	17
6.4: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin kuru kayma aşınması altında hacim kaybı performansı.....	18
6.5: 2N ve 4N yüklerde 15 dakikalık kayma test sürelerinde gerçekleşen lazersiz ve büyük daire yüzeylerin kuru kayma aşınma sonucu oluşan 3D aşınma görüntüleri.....	21
6.6: 2N ve 4N yüklerde 30 dakikalık kayma test sürelerinde gerçekleşen lazersiz ve büyük daire yüzeylerin kuru kayma aşınma sonucu oluşan 3D aşınma görüntüleri.....	21
6.7: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin MoS ₂ yağlayıcı koşullar altında hacim kaybı performansı.....	22
6.8: 2N ve 4N yük altında 15 dakika test süresince MoS ₂ yağlayıcı aşınma sonucu 3D aşınma görüntüleri.....	25
6.9: 2N ve 4N yük altında 30 dakika test süresince MoS ₂ yağlayıcı aşınma sonucu 3D aşınma görüntüleri.....	26
6.10: 2N ve 4N yük altında 15 dakika test süresinde kuru kayma aşınma sonucu SEM görüntüleri.....	29
6.11: 2N ve 4N yük altında 30 dakika test süresinde kuru kayma aşınma sonucu SEM görüntüleri.....	30
6.12: 2N ve 4N yük altında 15 dakika test süresinde MoS ₂ yağlayıcı oluşan aşınma sonucu SEM görüntüleri.....	31
6.13: 2N ve 4N yük altında 30 dakika test süresinde MoS ₂ yağlayıcı oluşan aşınma sonucu SEM görüntüleri.....	33

6.14: Kuru kayma koşullarında 4N yük altında 30 dakikalık test süresince elde edilen EDS çizgi analizi.....	34
6.15: MoS ₂ yağlayıcı koşullarında 2N yük altında 15 dakikalık test süresince elde edilen EDS çizgi analizi.....	35
6.16: 2N yük ve 15 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	37
6.17: 4N yük ve 15 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	38
6.18: 2N yük ve 30 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	40
6.19: 4N yük ve 30 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	41
6.20: 2N yük ve 15 dak kayma süresi altında MoS ₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	43
6.21: 4N yük ve 15 dak kayma süresi altında MoS ₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	44
6.22: 2N yük ve 30 dak kayma süresi altında MoS ₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	477
6.23: 4N yük ve 30 dak kayma süresi altında MoS ₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.....	48
6.24: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin kuru kayma koşullar altında sürtünme katsayısı performansı.....	49
6.25: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin MoS ₂ yağlayıcı koşullar altında sürtünme katsayısı performansı.....	51

TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
5.1: AISI D2 çeliği numunelerinin lazer tekstür desenlerine ait tribolojik test parametreleri	13

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MoS ₂	: Molibden Disülfür
µm	: Mikrometre
C	: Karbon
O	: Oksijen
Cr	: Krom
Fe	: Demir
V	: Vanadyum
Mo	: Molibden
Hz	: Hertz
W	: Watt
s	: Saniye
dk	: Dakika

KISALTMALAR

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
LYM	: Lazerle Yüzey Modifikasyonu
LPT	: Lazer Peening Tekstürlenmiş

1. GİRİŞ

Takım çelikleri yüksek sertlik, aşınma direnci ve tokluğun eş zamanlı olarak gerektiği zorlu üretim koşullarında sıkça tercih edilen mühendislik malzemeleridir. Bu çeliklerden biri olan AISI D2 takım çeliği, yüksek karbon ve krom içeriği sayesinde olağanüstü aşınma direnci, yüksek sertlik ve boyutsal kararlılık gibi üstün özellikler sergilemektedir. Soğuk iş takım çeliği özellikle endüstriyel bıçaklar, kesme, şekillendirme, delme ve kalıplama gibi yüksek yüzey geriliminin ve sürtünmenin yoğun olduğu uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Yasavol ve Ramalho, 2015). Bununla birlikte, bu çeliklerin performansı ve kullanım ömrü büyük ölçüde yüzey özelliklerine bağlıdır. Geleneksel metotlar ile malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmek mümkün olabilir, ancak modern teknolojiler arasında özellikle lazerle yüzey modifikasyonu, aşınma performansını daha ileri seviyelere taşımak için umut vadeden bir yaklaşımdır (Lesyk vd., 2017). Lazerle yüzey modifikasyonu, yüzeyin mikro yapısını ve sertliğini geliştirerek, malzemenin aşınma direncini artırmayı hedefler. AISI D2'nin iç yapısı ne kadar sağlam olursa olsun, özellikle sürtünme ve aşınmanın etkili olduğu sistemlerde, yüzey modifikasyonu kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu tür durumlarda, malzemenin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Moradiani vd., 2022).

Son yıllarda geleneksel kaplama ve ısıl işlem yöntemlerinin ötesine geçilerek, kontrol edilen enerji girişine dayalı yöntemlere ilgi artmıştır. Bu doğrultuda, malzemelerin performansını artırmak amacıyla yüzey katmanlarını değiştiren çeşitli teknolojik uygulamalar tercih edilmektedir. Yüzey sertliğinin artırılması, mikro yapının iyileştirilmesi, tribolojik davranışın optimize edilmesi ve yüzey enerjisinin kontrol altına alınması gibi uygulamalar, takım çeliklerinin performansını önemli ölçüde artırmaktadır (Daodon ve Saetang, 2023). Bu doğrultuda geliştirilen lazerle yüzey modifikasyonu (LYM) gibi yüzey işlem yöntemleri, son yıllarda takım çeliklerinin tribolojik performansını artırmak için yaygın olarak araştırılmaktadır (Kurella ve Dahotre, 2005). Lazer ışını kullanılarak yüzeyde kontrol edilmiş bir ergime ve hızlı katılaşma süreci oluşturulur. Bu sürecin sonucunda ince taneli, homojen ve daha sert bir yüzeyin elde edilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca, çözünmüş karbürlerin tekrar dağıtılması veya mikro yapının inceltilmesi ile aşınma davranışında kayda değer iyileşmeler sağlanmaktadır. Lazerle yüzey modifikasyonunun başarısı, doğru bir şekilde seçilen lazer parametrelerine (güç yoğunluğu, tarama hızı, odak uzaklığı vb.)

bağlıdır. Bu parametreler, yüzeyde oluşacak mikro yapıyı ve sertlik profilini doğrudan etkilemektedir (Tian vd., 2005). Özellikle AISI D2 gibi yüksek alaşımlı çeliklerde, lazer işleminin sonucunda meydana gelen mikro yapısal değişiklikler; martenzitik dönüşümler, karbür çökelmeleri ve olası faz dönüşümleri gibi karmaşık metallurjik süreçleri içermektedir. Bu süreçlerin doğru analiz edilmesi, elde edilen yüzeyin aşınma direncini anlamak ve optimize etmek açısından kritik öneme sahiptir (Yang vd., 2021).

Ancak yüzey modifikasyonu tek başına yeterli olmayabilir. Özellikle dinamik yükler altında çalışan yüzeylerde, sürtünmenin azaltılması ve malzeme kaybının minimuma indirilmesi için uygun bir yağlama stratejisi de gereklidir. Molibden Disülfür (MoS_2) kullanılarak yapılan çalışmada, bu madde bir yağlayıcı olarak uygulandığında yüksek performans elde edilmesini sağlayan etkili bir çözüm olarak değerlendirilmiştir (Libório vd., 2020). MoS_2 , düşük sürtünme katsayısına sahip olması, yüksek sıcaklıklarda kararlılığını koruyabilmesi ve sınır yağlama koşullarında dahi etkili olmasıyla bilinmektedir. Katmanlı kristal yapısı, atomlar arası zayıf van der Waals bağları sayesinde kolayca kayabilir; bu da iki yüzey arasındaki sürtünmenin ciddi şekilde azalmasına neden olmaktadır (Rapoport vd., 2008). Lazerle şekillendirilen yüzeylerin, MoS_2 yağlayıcının yüzeye yapışmasını ve yerinde kalmasını kolaylaştırabileceği tahmin edilmektedir. Bu durum yağlayıcının etkili kullanm süresini uzatmanın yanı sıra yüzey korumasını güçlendirmektedir (Hu vd., 2012).

Bu tez çalışmasında, lazerle modifiye edilmiş AISI D2 takım çeliğinin aşınma davranışı, MoS_2 yağlayıcı kullanımı altında sistematik olarak incelenecektir. Çalışmada, lazerle modifiye edilen yüzeylerdeki mikro yapısal değişiklikler, sertlik dağılımları ve bunların aşınma performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilecektir. Ayrıca, MoS_2 yağlayıcının yüzey üzerindeki tutunma yeteneği, film oluşumu ve bu filmin lazerle işlenmiş yüzeydeki stabilitesi de değerlendirilecektir. Böylece yüzey modifikasyonu ile yağlayıcı uygulamasının birlikte nasıl çalıştığı ve tribolojik performansa olan katkıları daha iyi anlaşılacaktır.

Bu araştırmanın amacı, AISI D2 takım çeliğinin aşınma performansı üzerinde lazerle gerçekleştirilen yüzey modifikasyonunun etkilerini incelemek ve bu yüzey modifikasyonunun, MoS_2 yağlayıcı ile birlikte kullanılmasının aşınma davranışı üzerindeki karşılıklı etkilerini değerlendirmektir. Elde edilen bulgular, sadece teorik anlamda katkı sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda takım çeliği kullanılan endüstriyel uygulamalarda

yüzey kalitesine odaklı sürdürülebilir ve yüksek performanslı çözümlerin geliştirilmesine imkan verecektir. Çalışma sonucunda, lazer parametreleri ve yağlayıcı özelliklerinin birlikte optimize edilerek hem yüzey dayanımı hem de sürtünme davranışının iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

2. AISI D2 TAKIM ÇELİĞİNİN YAPISAL VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ

AISI D2 çelik, yüksek karbon ve yüksek krom içeriğine sahip olan, soğuk iş uygulamaları için tasarlanmış yüksek alaşımlı bir çelik türü olarak sınıflandırılmaktadır. Bu çelik türünde yaklaşık olarak %1,50 karbon ve %12 krom elementi bulunmaktadır ve bu bileşim çeliğin sertliği, aşınma direnci ve boyutsal kararlılığını doğrudan etkilemektedir (Yasavol ve Ramalho, 2015). Bunun sonucu olarak, AISI D2 çeliği kesme, delme, şekillendirme ve soğuk kalıplama gibi yüksek yüzey yükleri ve tekrarlı gerilmelerin yaşandığı uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir (Tang vd., 2013).

Isıl işlem uygulanarak bu çelik türünde 58-62 HRC arasında yüksek sertlik değerleri elde edilebilmektedir. Bu sertlik, martenzitik matris içinde homojen olarak dağılmış olan primer ve sekonder krom karbürlerine (Cr_7C_3 ve $Cr_{23}C_6$) dayanmaktadır. Bu karbür fazlarının, çeliğin yüzey ve hacim özelliklerine katkı sağladığı bilinmektedir. Bu fazlar, plastik deformasyonları sınırlarken aynı zamanda mikroyapısal stabiliteyi korumaktadır (Kaba vd., 2024).

AISI D2 çeliği, boyutsal kararlılık açısından avantajlı bir yapı göstermektedir. Isıl işlem sonrası hacimsel değişimlerin minimum seviyede olması, ölçü hassasiyeti yüksek parçalarda deformasyon riskini azaltmaktadır. Bu özellik, hassas kalıp ve takım parçalarının üretiminde sıkça tercih edilmesini sağlamaktadır. Ancak çelik, yapısındaki yüksek karbon ve karbür fazları nedeniyle darbe dayanımı açısından sınırlı olabilir; bu sebeple çelik, ani yüklemelere dikkatlice tasarlanmalıdır (Jeon vd., 2025).

AISI D2 çeliğin tribolojik özellikleri, yapısal karakteristiklerle doğrudan ilişkilidir. Aşınma ve sürtünme gibi temas kaynaklı hasar mekanizmalarına karşı AISI D2 çeliğinin yüksek direnç gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle abrasiv aşınma koşullarında, mikroyapıdaki sert karbür fazlarının önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Bu fazlar, temas yüzeylerinde mikro kesici etkileri azaltarak aşınma hızını düşürmektedir (Das vd., 2007).

Sürtünme, iki yüzey arasındaki bağıl hareketten kaynaklanan direnç kuvveti olarak tanımlanmakta olup, yüzey kalitesi, mikroyapı homojenliği ve yağlayıcı varlığı gibi birçok

parametreden etkilenmektedir (Tang vd., 2013). AISI D2 çeliği, sert yapısıyla sürtünme sonucunda oluşan plastik deformasyonları sınırlamakta ve bu şekilde yüzeydeki hasar mekanizmalarını azaltmaktadır. Fakat yüzey pürüzlülüğü ve düzensiz karbür dağılımı gibi mikroyapısal farklılıklar, yerel aşınma eğilimlerini artırabilmektedir (Yasavol ve Ramalho, 2015).

Bu çeliğin tribolojik performansının artırılması amacıyla çeşitli yüzey işlem teknikleri uygulanmaktadır. Lazerle yüzey modifikasyonu, plazma nitrürleme, kriyojenik tavlama ve yüzeye yağlayıcı uygulamaları bu teknikler arasında yer almaktadır (Li vd., 2023). Özellikle MoS₂ gibi yağlayıcılar kullanılarak, çelik yüzeyinde koruyucu bir film oluşturulmakta ve bu şekilde sürtünme katsayısı düşmekte ve aşınma direnci artmaktadır. MoS₂, lamelli kristal yapısı sayesinde kayganlık özelliği sunmakta ve lazerle modifiye edilmiş yüzeylere uygulandığında tribolojik performansa olumlu katkı sağlamaktadır (Vazirisereshk vd., 2019).

Sonuç olarak, AISI D2 çeliği; sert mikro yapısı, yüksek karbür içeriği ve boyutsal kararlılığıyla tribolojik uygulamalarda güvenilir performans sunan bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Aşınma ve sürtünme koşullarının yoğun olduğu sistemlerde etkin bir şekilde kullanılmakta olup, yüzey modifikasyonu ve uygun yağlama stratejileri ile bu performans daha da artırılabilir (Reséndiz-Calderón vd., 2024).

3. YÜZEY MODİFİKASYON TEKNİKLERİ

Mühendislik malzemelerinin performansı, iç yapı özelliklerinin yanı sıra yüzey karakteristikleriyle de belirlenmektedir. Aşınma, oksidasyon, yorulma ve sürtünme gibi mekanizmaların yüzeyde meydana gelmesi, birçok mekanik parçanın servis ömrünü doğrudan etkilemektedir (Qu vd., 2021). Bu sebeple, özellikle yüksek yüzey dayanımı ve uzun ömür gerektiren uygulamalarda, yüzey modifikasyonu tekniklerine başvurulmaktadır. Yüzey modifikasyonu; malzemenin yüzey tabakasına yönelik fiziksel, kimyasal veya termomekanik işlemleri içeren bir süreç olup, son zamanlarda malzeme mühendisliğinde önemli bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmiştir (Amanov vd., 2023).

Yüzey modifikasyon teknikleri genel olarak kaplama işlemleri ve yüzeyin doğrudan işlenmesine dayalı yöntemler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Kaplama teknikleri, genellikle başka bir malzeme fazının alt tabakaya bir film veya katman şeklinde uygulanmasını içermektedir. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) (Dobrzański vd., 2008), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), elektro kaplama, termal sprey ve sol-jel gibi yöntemler bu kategoriye girmektedir (D.-w. Zhang ve Cui, 2019). Bu kaplamalar sayesinde malzemenin yüzeyi, aşınma, korozyon ve yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı hale getirilebilir. Ancak, bu tür kaplamalarda alt tabaka ile kaplama arasındaki yapışma sorunları veya kaplamanın çatlamaya yatkınlığı gibi zayıf yönler göz önünde bulundurulmalıdır (Fotovvati vd., 2021).

Yüzeyin doğrudan işlenmesine dayalı teknikler ise, malzemenin kendi yapısal özelliklerini kullanarak yüzeyin özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemlerde dış bir katman eklenmez, yüzeyin kendisi değiştirilmektedir. Isıl işlem, yüzey sertleştirme, plazma nitrüleme, iyon implantasyonu ve lazerle yüzey modifikasyonu bu kategoriye girmektedir (Tian vd., 2005). Özellikle lazerle yüzey modifikasyonu, kontrollü ısı girdisi ve lokal uygulama yeteneği sayesinde son yıllarda önemli bir ilgi görmektedir. Lazer ışınının yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması nedeniyle, lazerle yüzey modifikasyonu işlemi, malzeme yüzeyine kısa süreli ve lokal olarak uygulanmaktadır. Bu süreçte, yüzeyde ani bir ergime ve hızlı bir katılma gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, ince taneli, homojen, sert ve gerilim açısından dengeli bir mikro yapı elde edilmektedir. Bu yapı, aşınma direnci ve mikroyapısal stabilite açısından avantaj sağlamaktadır (Saran vd., 2023). Yüzey sertleştirme işlemi

sırasında, çözülmüş karbürlerin yeniden çökmesi ve mikro çatlak oluşumunun engellenmesi sağlanarak daha dayanıklı ve kararlı bir yapı oluşturulmaktadır. Yüksek soğuma hızları sayesinde lazer yöntemi ile geleneksel ısıtma yöntemleriyle elde edilemeyen mikro yapılar üretilebilir. Lazerle yüzey modifikasyonu, mikroyapısal ve mekanik açıdan çeşitli avantajlar sunmaktadır (Jegadheesan vd., 2023).

Lazer işleminin sadece yüzeyle sınırlı kalması, malzemenin iç yapısının korunmasına ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesine olanak tanır. Özellikle takım çelikleri gibi malzemelerde lazerle modifikasyonun olumlu sonuçlar verdiği çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik profili hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir (Zhang vd., 2025).

Lazerle yüzey modifikasyonunun tribolojik performansa etkisi, sadece sertlik artışıyla değil; yüzeyde oluşan dokusu, artık gerilim dağılımı ve ısıtma davranışı gibi parametreler üzerinde de etkilidir. Bu parametreler, yağlayıcı ile yüzey arasındaki etkileşimi doğrudan etkilediğinden, yağlayıcıların kullanıldığı sistemlerde performansın iyileştirilmesine olanak sağlar (Yang vd., 2024). Yapılan çalışmalarla, lazerle oluşturulan mikro yapıların yağlayıcının yüzeye tutunmasını kolaylaştırarak yağlayıcı filminin sürekliliğini sağladığı gösterilmiştir. Sonuç olarak, yüzey modifikasyon teknikleri, mühendislik malzemelerinin performansını artırmaya yönelik etkili yöntemler olarak kabul edilmektedir (Ma vd., 2025). Özellikle lazer tabanlı uygulamaların sağladığı mikro yapısal kontrol, yüksek hassasiyet ve termal yönetim avantajları sayesinde; aşınma, sürtünme ve yorulma gibi yüzey kaynaklı hasar mekanizmaları önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Wang vd., 2024). Bu bağlamda, AISI D2 takım çeliği gibi yüksek performanslı malzemeler üzerinde lazerle yüzey modifikasyonunun uygulanması, tribolojik verimliliğin artırılması açısından stratejik bir çözüm olarak kabul edilmektedir.

4. LİTERATÜR TARAMASI

AISI D2 takım çeliği, yüksek karbon ve krom içeriğine sahip olması nedeniyle yüksek sertlik, iyi aşınma direnci ve boyutsal kararlılık gibi özellikler gösteren, endüstride soğuk şekillendirme uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen bir çeliktir. Son yıllarda, bu malzemenin yüzey özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak lazerle yüzey modifikasyonu (LYM) gibi ileri yüzey işlemlerine olan ilgi artmıştır. Lazerle yüzey modifikasyonu, metal yüzeylerinin aşınma, korozyon ve oksidasyon direncini artırmak için sıkça tercih edilen bir teknolojidir. Yüksek enerjili ve kontrollü yapısıyla lazer, malzemenin yüzeyinde hızlı mikro yapı değişikliklerine neden olarak daha sert ve aşınma direnci yüksek yüzeylerin elde edilmesini sağlar. Yapılan araştırmalar, lazerle yüzey modifikasyonunun yüzey sertliği ve aşınma direnci üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu ortaya koymaktadır (Moravčíková vd., 2018; Ferreira vd., 2022).

Jervis vd. (1997) yaptığı bir çalışmada, lazerle işlem görmüş çeliklerin yüzey sertliğinin belirgin şekilde arttığı ve bu sertleşmenin aşınma performansını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir. Aynı çalışmada, lazer parametrelerinin (özellikle güç ve odaklama parametrelerinin) doğru bir şekilde ayarlanmasının kritik olduğu ve aşırı enerji yoğunluğunun istenmeyen faz dönüşümlerine ve yüzey çatlaklarına yol açabileceği vurgulanmıştır.

Sun vd. (2015), TC11 alaşımının yüzeylerinde farklı çap ve alan yoğunluklarına sahip altı tür mikro- dokunun üretildiği ve 500 °C'de aşınma özelliklerinin incelendiği bir çalışma yapmışlardır. Düzenli mikro-dokuların, malzeme yüzeylerinde daha fazla oksijen adsorbe edilmesini sağladığı ve bu sayede daha fazla tribo-oksit oluşumunu teşvik ettiği bulunmuştur. Sonuç olarak, mikro-çukur (küçük daire ve yüksek yoğunluklu) yapıların, TC11 alaşımının 500 °C'de tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Xing vd. (2017) yaptığı bir çalışmada ise, Al₂O₃/TiC seramik yüzeyine Nd lazer ile farklı aralıklara sahip iki tür oluklu doku uygulamış ve kuru kayma koşullarında tribolojik özellikler test edilmiştir. Dokulu yüzeylerin, pürüzsüz yüzeylere göre daha yüksek sürtünme katsayısı ve mükemmel aşınma direnci sergilediği rapor edilmiştir. Küçük aralıklı dokular

sürtünme katsayısını artırırken, dalgalı oluklu dokular en yüksek sürtünme katsayısını ve en sığ aşınma derinliğini sağlamıştır. Artan sürtünme katsayısı ve aşınma direnci, yüzey pürüzlülüğü, gerçek temas alanındaki azalma, doku kenarlarının mikro-kesme etkisi ve aşınma artıkları ile açıklanmaktadır.

Martinez vd. (2019), lazerle işlenmiş yüzeylerin Ti6Al4V titanyum alaşımının tribolojik davranışını araştırmıştır. İncelemelerde lazer işleme parametreleri, tarama hızı ve enerji yoğunluğu değiştirilerek analiz edilmiştir. Dokulu yüzeylerin boyutsal ve geometrik özellikleri ile temas açısı ölçümleri yapılmış, ardından tribolojik performansları hem ıslak hem de kuru koşullarda reciprocating tribometre ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, aşınma mekanizmaları elektron ve optik mikroskopi kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, lazerle işleme yapılmış yüzeylerin geleneksel yüzeylere göre sürtünmeyi %70 oranında azaltabileceğini ve aşınma davranışının lazer desenleme parametrelerine güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir.

Kumar vd. (2020), kuru kayma koşullarında 100Cr6 rulman çeliği üzerindeki dimple (çöküntü) yoğunluğu ve şeklinin sürtünme ve aşınma özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Dairesel ve bi-triangular (iki-üçgen) dimple'lı dört lazer-dokulu disk ile bir dokusuz disk, %7 ve %20 yoğunlukta test edildi. Testler farklı hızlarda (0,2, 0,6 ve 1 m/s) ve sabit bir yük altında (15N) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bi-triangular dimple'ların daha yüksek yoğunlukta olduğunda daha az aşınma ve daha düşük sürtünme katsayısı sağladığını göstermiştir. Bu durum, spiral dizilimde daha fazla dimple sayısının, aşınma parçacıklarını daha iyi tutmasına ve dolayısıyla aşınmayı azaltmasına bağlanmaktadır. Sürtünme katsayısı, düşük hızlarda daha yüksek iken yüksek hızlarda daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Dimple'lar, aşınma parçacıklarını tutma etkinliğini kaybettiğinde, kuru temas altında etkisiz hale geldiği belirtilmiştir.

Li vd. (2014), lazer peening tekstürlenmiş (LPT) bakır yüzeylerinde mikro-çukur dizilerinin oluşturulmasını ve bunların sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Yağlama koşullarında gerçekleştirilen pin-on-disk testleri, LPT uygulanan yüzeylerin sürtünme performansını belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Mikroskop ve EDS analizi, dokulu yüzeylerin hem abrasiv hem de adheziv aşınmayı azaltabileceğini ve en iyi performans için optimum çukur yoğunluğunun gerekliliğini ortaya koymuştur.

Lazerle yüzey modifikasyonunun başarısı, kullanılan lazer parametrelerine büyük ölçüde bağlıdır. Bu sebeple, literatürde lazer parametrelerinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalarda, yüzeyde homojen bir modifikasyon elde etmek ve istenmeyen mikroyapısal bozulmaları önlemek amacıyla lazerin odak uzaklığı, lazer gücü, tarama hızı ve frekans gibi parametrelerin optimize edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Literatürdeki optimizasyon çalışmalarına göre; Segu vd. (2021), Nd lazerle oluşturulan düzenli kanallar ve mikro-çukur dokuların sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemiştir. Yağlı koşullarda yapılan pin-on-disk testleri, dokulu yüzeylerin sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Optimum performans, 100 µm genişliğindeki doku deseni ile sağlanmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen analizler, çukur yoğunluğunun sürtünme katsayısını etkileyen en önemli parametre olduğunu ve en iyi sonuçların bu parametrenin optimize edilmesiyle elde edildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, lazer parametrelerinin malzemeye uygun şekilde ayarlanması durumunda, aşınma performansında ve diğer mekanik özelliklerde önemli iyileşmelerin sağlanabileceği vurgulanmaktadır.

Yuan vd. (2022), dört metal malzeme (316 SS, NiTi, TA2, Ti6Al4V) üzerinde lazerle oluşturulan çukur şeklindeki yüzey dokularının kuru kayma tribolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada Taguchi L16 deney tasarımı kullanılarak dokuların parametreleri ile tribolojik davranış arasındaki ilişki belirlenmiş ve yağlı koşullarda optimize edilmiş dokuların geçerliliği test edilmiştir. Yapılan analizler, malzeme türü, karşıt tipi, doku yoğunluğu ve uygulanan yük gibi faktörlerin kütle kaybı üzerindeki etkilerini sıralamıştır. Optimal çukur yoğunluk değerleri %5, %7, %5 ve %11 olarak bulunmuştur. Araştırma sonuçları, yüzey dokulandırmanın aşınma direncini artırmada olumlu bir rol oynadığını göstermektedir.

Moradiani vd. (2022) çalışmasında, AISI D2 çeliğine lazerle yüzey eritme işlemi uygulayarak mikroyapıyı değiştirdiklerini ve bu işlemin yüzeydeki artık östenit miktarını artırdığını, yüzey sertliğini yaklaşık 600 HV10 seviyesine çıkardıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca, aşınma testlerinde lazerle işlenmiş numunelerin daha düşük hacimsel kayıplar gösterdiği rapor edilmiştir.

Lesyk vd. (2017), AISI D2 çeliği üzerinde lazerle sertleştirme ve ardından uygulanan ultrasonik darbe işleminin etkilerini değerlendirmiştir. Araştırma sonucunda kombine işlem uygulanan yüzeylerde aşınma oranlarının %77 oranında azaldığı, mikro sertliğin ise belirgin

şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Dzhemelinsky vd. (2024), lazerle modifiye edilmiş AISI D2 yüzeylerinin aşınma direncini artırdığını, yüzey sertliği ile birlikte karşı yüzeyde meydana gelen hasar seviyesinin de azaldığını belirtmiştir.

Lesyk vd. (2017) çalışmalarında, lazer darbe enerjisinin katılma çatlakları üzerindeki etkisini araştırmışlar ve lazer enerjisi arttıkça mikro yapı daha homojen hâle geldiğini ve çatlakların azaldığını belirtmişlerdir.

Daodon ve Saetang (2023) çalışmasında, AISI D2 yüzeylerinde lazer ile oluşturulan mikro yapılarının, sürtünme katsayısını azalttığını ve yağlayıcının tutulmasını kolaylaştırdığını göstermiştir.

Zeng vd. (2020) araştırmasında, stator yüzeyine PTFE içerikli bir malzeme uygulanarak hazırlanan 1-gözlü ve 3-gözlü numuneler üzerinde 100 saatlik deney süresince aşınma davranışı analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, çukur oluşumundaki artış nedeniyle, stator yüzeyinde biriken transfer malzemesi miktarında azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yüzey boyunca paralel olarak sürtünmeye maruz kalan bölgelerde yapışma kaynaklı aşınmada azalma olduğu tespit edilmiştir. Kuru sürtünme koşullarında 1 N yük altındaki testlerde; çukur sayısının az olduğu bölgelerde aşınmanın daha fazla olduğu, çukur yoğunluğunun artmasıyla aşınma ve sürtünme katsayısının düştüğü rapor edilmiştir (Demircan vd., 2021). Benzer şekilde, Kovalchenko vd. (2011) çalışmasında ise, farklı viskozitelere sahip yağların kullanıldığı tribolojik deneylerde, çukurlu ve düz yüzeyli numuneler test edilmiştir. 5100 çelikten üretilen bilyalı diskler üzerinde yapılan testlerde, yüzeyde yüksek çukur miktarının abrasiv aşınmayı artırdığı görülmüştür.

AISI D2 çeliğinde lazerle yüzey modifikasyonunun aşınma performansına etkileri üzerine yapılan literatür incelemeleri, bu teknolojinin malzemenin aşınma direncini artırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Ancak, doğru lazer parametrelerinin belirlenmesi ve istenmeyen faz dönüşümlerinin engellenmesi sonuçlar açısından hayati öneme sahiptir. Literatür taraması, lazerle yüzey modifikasyonunun AISI D2 çeliği için umut verici bir yüzey işleme teknolojisi olduğunu ve bu çalışmanın mevcut bilgi birikimine önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir. Bu tez çalışmasında, AISI D2 çeliğinde lazerle yüzey

modifikasyonunun farklı koşullarda aşınma davranışları incelenmiştir. Çalışmada, çeşitli lazer tekstürleri kullanılarak AISI D2 çeliğinin oda sıcaklığında hazırlanan MoS₂ yağlayıcı ile farklı yük ve kayma hızları altında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin ardından hacimsel aşınma kayıpları ölçülmüş ve aşınma izleri üzerinden SEM ve EDS analizleri ile aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

5. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada iş parçası olarak AISI D2 takım çeliği numuneleri kullanılmıştır. Deney numuneleri 20 mm çapında dairesel numune şeklinde hazırlanmıştır. Öncesinde malzemenin yüzeyi alkol ile temizlenmiştir.

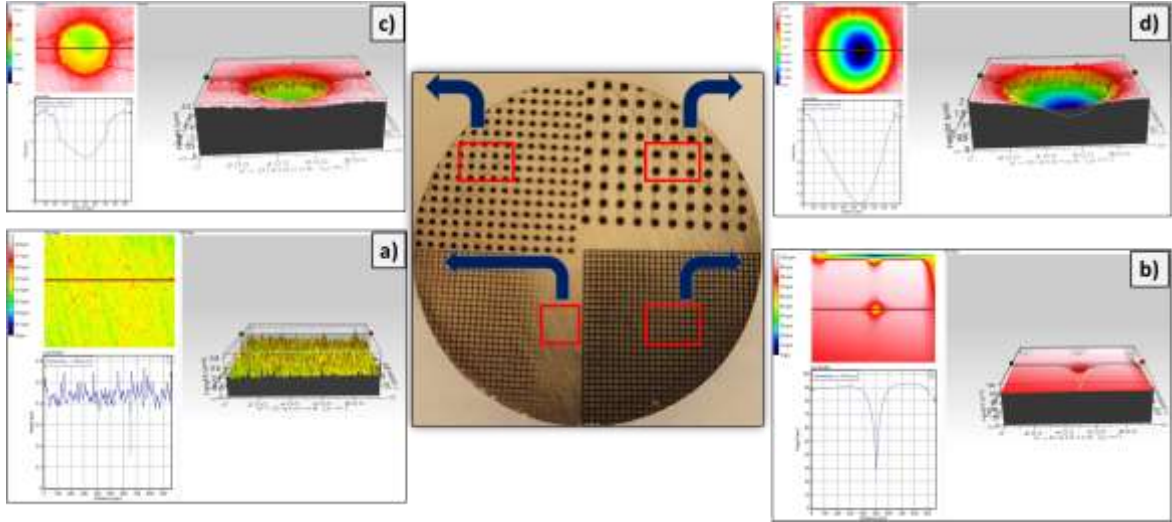
Bu çalışmada, AISI D2 takım çeliği üzerinde yüzey ablasyonu işlemi uygulanmıştır. İşlem, femtosaniye lazer kullanılarak gerçekleştirilmiş olup 400 kHz frekans, 1,25 W ortalama güç, 10 mm/s tarama hızı, 15 µm ışın çapı ve 250 fs darbe süresi parametreleriyle gerçekleştirilmiştir. Lazer işlemleri, herhangi bir koruyucu gaz kullanılmadan normal atmosfer koşullarında yapılmıştır (Küçük vd., 2024). Aşınma test parametrelerinin belirlenebilmesi için lazerle yüzey işleme sonrası ön aşınma testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda Tablo 5.1’de belirtilen aşınma deney parametreleri oluşturulmuştur.

Tablo 5.1: AISI D2 çeliği numunelerinin lazer tekstür desenlerine ait tribolojik test parametreleri.

Numune	Aşındırıcı bilye	Ortam koşulu	Yük (N)	Kayma hızı (m/sn)	Test süresi (dak)
Lazersiz					
Izgara	Al ₂ O ₃ Ø6 mm	Kuru	2	0.017 m/s	15
Küçük daire		MoS ₂ yağlayıcı			
Büyük daire			4		30

Çalışmada dört farklı yüzey profili (lazersiz, ızgara, küçük daire ve büyük daire) tribolojik testler için hazırlanmıştır. Kırmızı karelerle işaretlenen bölgelerde her bir yüzey dokusunun karakteristik özellikleri görülmektedir. Aşınma testleri öncesinde optik profilometre kullanılarak elde edilen 3D topografik görüntüler, üretilen yüzey dokularının geometrik özellikleri ve boyutsal parametrelerini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır (Şekil 5.1). Aşınma testleri, hem kuru ortamda hem de MoS₂ yağlayıcı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yüzey desenleme işleminin aşınma performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, lazerle işlenmiş yüzeyler ile lazer uygulanmamış yüzeyler karşılaştırmalı olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu karşılaştırmada; aşınma hacmi kaybı,

spesifik aşınma oranı, aşınma izi morfolojisi (SEM ve 3D profilometre analizleri) ve sürtünme katsayısı (μ) değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, lazerle oluşturulan yüzey desenlemesinin aşınma davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiştir.



Şekil 5.1:AISI D2 çeliği üzerine uygulanan a) lazersiz, b) ızgara, c) küçük daire ve d) büyük daire farklı lazer tekstür desenlerinin 3D boyutlu optik profilometre görüntüleri.

5.1. MoS₂ Yağlayıcı Üretimi

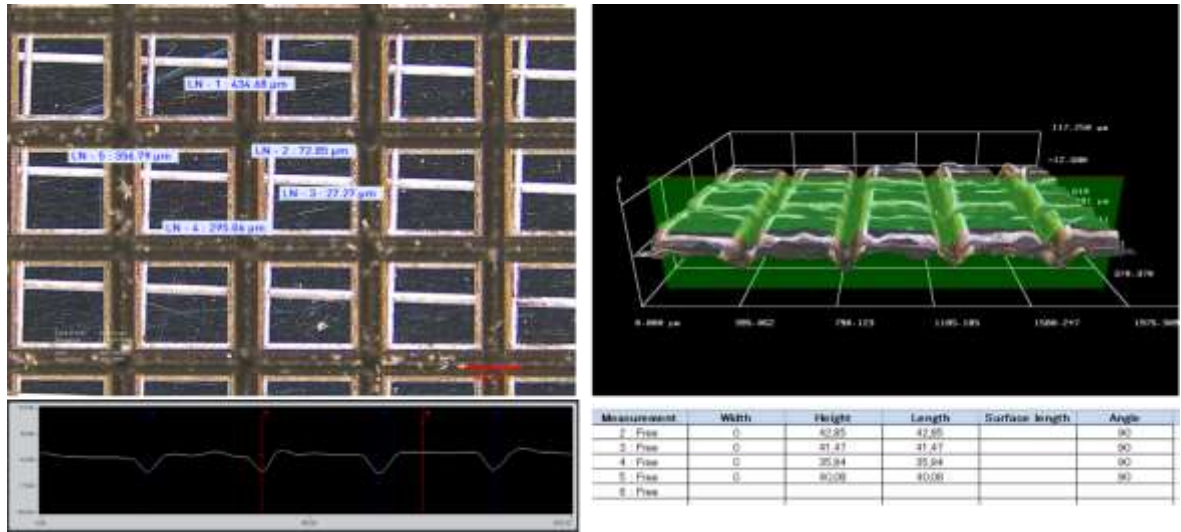
Tribolojik testlerde kullanılmak üzere molibden disülfür (MoS₂) sıvı yağlayıcı üretimi için öncelikle yüksek saflıkta MoS₂ tozları temin edilmiştir. Temin edilen tozlar inert atmosfer altında mekanik bilyalı öğütme işlemine tabi tutularak 1-5 μ m aralığında düzgün partikül boyutu dağılımı elde edilmiştir. Ardından tozlar nem ve kirleticileri gidermek için 400-600°C'de ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. İşlenen tozlar mineral yağ bazlı taşıyıcı sıvılar içinde ultrasonik karıştırıcı yardımıyla dağıtılmış ve stabilitesi için gerekli katkı maddeleri eklenmiştir. Son olarak, hazırlanan karışım homojenize edilmiş ve filtrelenerek MoS₂ içerikli sıvı yağlayıcı elde edilmiştir. Üretilen bu sıvı yağlayıcı, ball-on-disk tribolojik test düzeneklerinde çeşitli yük ve hız koşulları altında sürtünme katsayısı ve hacim kaybı ölçümlerinde kullanılmıştır. Elde edilen ürün, özellikle yüksek temas basınçlarında, düşük sürtünme katsayısı sağlayabilme ve hacim kaybı değerini minimize edebilme potansiyeline sahiptir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Lazer yüzey işlemi ve MoS₂ yağlamasının AISI D2 takım çeliğinin tribolojik performansı üzerindeki etkileriyle ilgili ayrıntılı sonuçlar ve tartışmalar aşağıdaki alt bölümlerde açıklanmıştır.

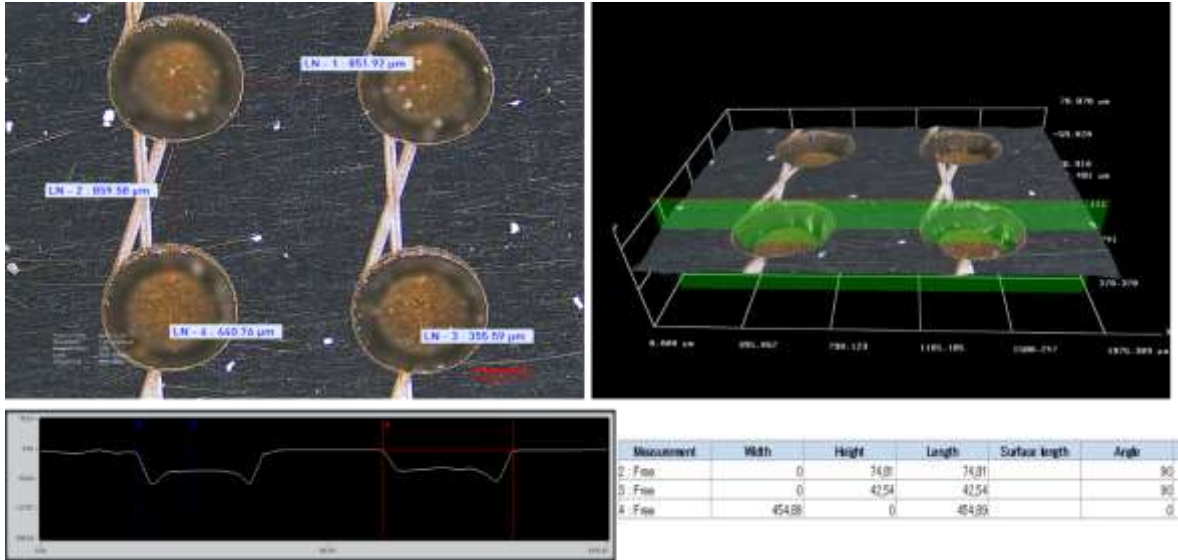
6.1. Aşınma davranışının değerlendirilmesi

Şekil 6.1’de sunulan optik mikroskop analizleri incelendiğinde, AISI D2 çeliği üzerinde ızgara formunda lazer tekstür deseninin başarıyla oluşturulduğu gözlemlenmektedir. Sol taraftaki mikroskop görüntüsünde, birbirine dik konumlandırılmış çizgisel kanallardan oluşan ızgara yapısı net biçimde görülmektedir. Ölçüm değerlerine göre, yatay kanalların 426,48 µm ve dikey kanalların 356.79 µm genişliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Kanal kesişim noktaları arasındaki mesafeler yaklaşık 295,06 µm ve 272,85 µm olarak ölçülmüştür. Profil kesit analizlerinden anlaşıldığı üzere, kanalların derinlikleri 35,84 µm ile 42,85 µm arasında değişmekte olup, kanal kenarlarında 41,47 µm yüksekliğe ulaşan termal etki kaynaklı malzeme birikimi bulunmaktadır. Sağ taraftaki 3D topografik harita, ızgara yapısının düzenliliğini ve kanal geometrisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu tekstür deseni, tribolojik uygulamalarda yağlayıcı dolaşımı ve dağılımını iyileştiren birbirine bağlı kanal ağı sağlamak amacıyla tasarlanmıştır



Şekil 6.1: AISI D2 çeliği üzerine uygulanan ızgara deseninin optik profilometre görüntüsü.

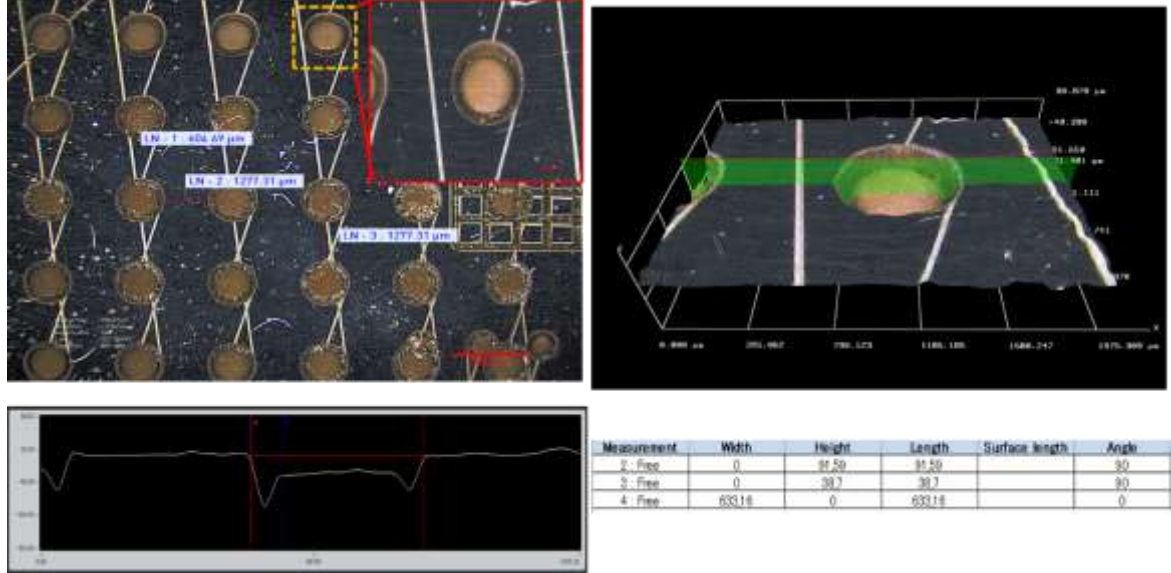
Şekil 6.2’de görüldüğü üzere, AISI D2 çeliği üzerinde oluşturulan dairesel tekstür deseninin detaylı optik mikroskop analizleri sunulmaktadır. Mikroskop görüntülerinde, yaklaşık 440 µm çapında dairesel ablastasyon bölgeleri ve bu bölgelerin merkez noktaları arasında 850 µm mesafe olacak şekilde düzenli bir matris yapıda dağıtıldığı gözlemlenmektedir. Profil kesit analizlerinde görüldüğü gibi, oluşturulan çukurlar konik geometriye sahip olup, ortalama yüzey derinlikleri 42 µm civarındadır. Özellikle dikkat çeken nokta, dairesel lazer tarama izinin kesişim noktalarında yaklaşık 72 µm derinliğe ulaşan belirgin girintilerin oluşmasıdır. Bu durumun, lazer ışınının takip yolunda yoğunlaşan enerji girdisi neticesinde meydana geldiği değerlendirilmektedir. Yapılan hesaplamalara göre, oluşturulan yüzey dokusunun alansal yoğunluğu toplam yüzeyin %34’ünü kapsamaktadır (Küçük vd., 2024).



Şekil 6.2: AISI D2 çeliği üzerine uygulanan küçük daire deseninin optik profilometre görüntüsü.

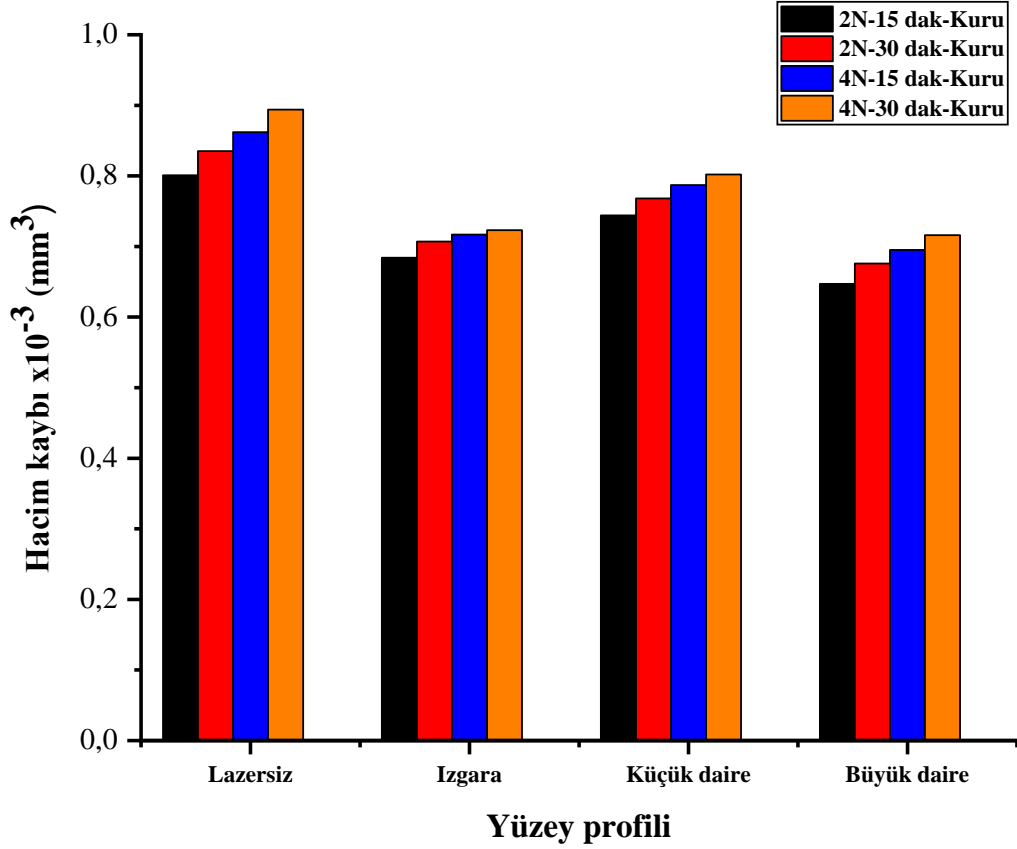
Şekil 6.3’de optik mikroskopta görüldüğü üzere, AISI D2 çeliği üzerinde makro boyutlu dairesel tekstür deseni başarıyla oluşturulmuştur. Sol taraftaki mikroskop görüntüsünde, yaklaşık 604 µm çapında dairesel ablastasyon bölgeleri ve bunların 1277 µm merkez-merkez mesafesinde matris düzeninde dağıtıldığı tespit edilmiştir. Kırmızı çerçeve içerisinde büyütülmüş görüntü, tek bir dairesel çukurun morfolojik özelliklerini daha detaylı göstermektedir. Profil kesit analizlerinde görülebildiği gibi, oluşturulan çukurlar 91,58 µm derinliğe sahip olup, köşelerde 38,7 µm yüksekliğinde termal etki kaynaklı malzeme birikimi gözlenmektedir. Sağ üst köşedeki 3D topografik haritası, çukur geometrisini ve çevresindeki malzeme yığılmasını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Tabloda sunulan ölçüm verileri,

çukurlar arasındaki 683 µm mesafeyi doğrulamaktadır. Bu tekstür deseni, özellikle tribolojik uygulamalarda yağlayıcı tutma kapasitesi ve aşınma direnci açısından avantaj sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 6.3: AISI D2 çeliği üzerine uygulanan büyük daire deseninin optik profilometre görüntüsü.

Şekil 6.4, farklı yüzey profilleri için kuru kayma koşulları altında iki farklı yük (2N ve 4N) ve iki farklı test süresi (15dk ve 30dk) sonrası ölçülen hacim kaybı değerlerini göstermektedir. Lazersiz yüzey tüm test koşullarında en yüksek hacim kaybını sergilemiştir. Başlangıçta adheziv aşınma ve mikropullanma hakimdir, ancak uzun süreli kayma, aşınma kalıntılarının birikmesine yol açarak aşınmayı ciddi iki gövdeli ve üç gövdeli aşınmaya dönüştürmektedir (Pashechko vd., 2019). Yüzey dokusu olmadığında, gerçek temas alanı yüksektir ve bu da güçlü pürüz etkileşimlerine neden olmaktadır. 2N yük altında lazersiz yüzeyde pürüzler yapışkan bağlantı (soğuk kaynak) oluşumuna uğrayarak kopmaktadır. Bu soğuk kaynak mekanizması, kayan çift arasında malzeme transferine ve aşınma kalıntılarının birikmesine yol açmaktadır.



Şekil 6.4: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin kuru kayma aşınması altında hacim kaybı performansı.

Test süresinin 30 dakikaya uzaması, tüm yüzeylerde hacim kaybının artmasına neden olmuştur. Daha uzun kayma süresi daha fazla aşınma kalıntısı oluşumuna ve ısı üretimine yol açarak aşınmayı şiddetlendirmektedir. Başlangıçta oluşan oksit tribofilm aşınarak aşınma mekanizmasını daha çok metalik adheziv aşınmaya dönüştürmektedir (Zawadzki vd., 2024). 4N yük altında ve 30 dakika kayma süresinde lazersiz yüzey maksimum hacim kaybı değeri olan $0,894 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'e ulaşmıştır. 3D aşınma görüntülerinde, lazersiz yüzeylerde 2N yükte yaklaşık 2-2,5 μm , 4N yükte ise 4 μm derinliğe ulaşan belirgin V-şekilli aşınma izleri görülmektedir. Bu gözlemler, elde edilen 3D optik profilometre görüntüleri tarafından güçlü bir şekilde desteklenmektedir (Şekil 6.5 ve Şekil 6.6).

Şekil 6.1'de görüldüğü üzere, ızgara desen yüzeyleri 426,48 μm genişliğinde yatay ve 356,79 μm genişliğinde dikey kanallardan oluşan birbirine bağlı ağ yapısı ile karakterize edilmektedir. Izgara yüzeyler, lazersiz yüzeylere kıyasla hacim kaybı değerinde yaklaşık %15-19'luk bir azalmayı temsil eden gelişmiş performans ($0,69-0,72 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) göstermiştir. Bu iyileşme, temas basıncını daha düzgün bir şekilde dağıtan kesintiye uğramış

temas geometrisine atfedilebilir. Izgara kanalların derinlikleri 35,84-42,85 µm arasında değişmekte olup, bu yapı aşınma kalıntılarının tahliyesi için etkin bir yol sağlamaktadır.

Şekil 6.2'de gösterilen küçük daire deseni, yaklaşık 440 µm çapında dairesel çukurlar ve bunların merkezleri arasında yaklaşık 850 µm mesafe ile düzenli bir dağılım sergilemektedir. Küçük dairesel çukurlu numuneler, lazersiz yüzeylere kıyasla hacim kaybı değerinde %6-12'lik bir azalmaya karşılık gelen orta düzeyde iyileşme ($0,75-0,80 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) göstermiştir. Bu çukurların yaklaşık 42 µm derinliğinde olduğu profil analizlerinden tespit edilmiştir. Çukurlar, temas gerilimlerini yeniden dağıtmaya ve aşınma sırasında sıkışan kalıntılardan lokalize tribofilmler oluşturmaya yardımcı olarak sürtünmeyi daha stabil hale getirip malzeme kaybını azaltmaktadır (Kumar vd., 2024).

Şekil 6.3'de görüldüğü gibi, büyük daire deseni yaklaşık 604 µm çapında dairesel çukurlar ve aralarında 1277 µm merkez-merkez mesafesi ile daha geniş dokusal özellikler sergilemektedir. 3D profilometrik analizde görülebildiği üzere, bu çukurların derinliği 91,58 µm'ye ulaşmakta olup, kenar bölgelerinde 38,7 µm yüksekliğinde malzeme birikimi mevcuttur. Büyük daire delik yüzeyi tüm test koşullarında en düşük hacim kaybını göstermiştir. 2N yük ve 15 dakika kayma süresi koşulları altında sadece $0,647 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ değeriyle lazersiz yüzeyden %19 daha düşük aşınma sergilemiştir. Bu durum, minimum malzeme yer değiştirmesi gösteren 3D aşınma görüntüsüyle uyumludur.

Büyük daire delik yüzeyler aşınma sırasında sıkışan kalıntıları başlangıçtan itibaren etkili bir şekilde hapsederek abrasiv aşınmayı en aza indirmektedir. Geniş çaplar, daha büyük aşınma parçalarını bile etkili bir şekilde barındırarak kayan ara yüzeyde aşınma kalıntılarının birikmesini önler. Kayma süresi 30 dakikaya uzadığında, hacim kaybı değeri yalnızca ılımlı bir şekilde artmaktadır çünkü çukurlar kalıntıları depolamaya ve koruyucu bir tribo-oksit filminin oluşumunu desteklemeye devam etmektedir.

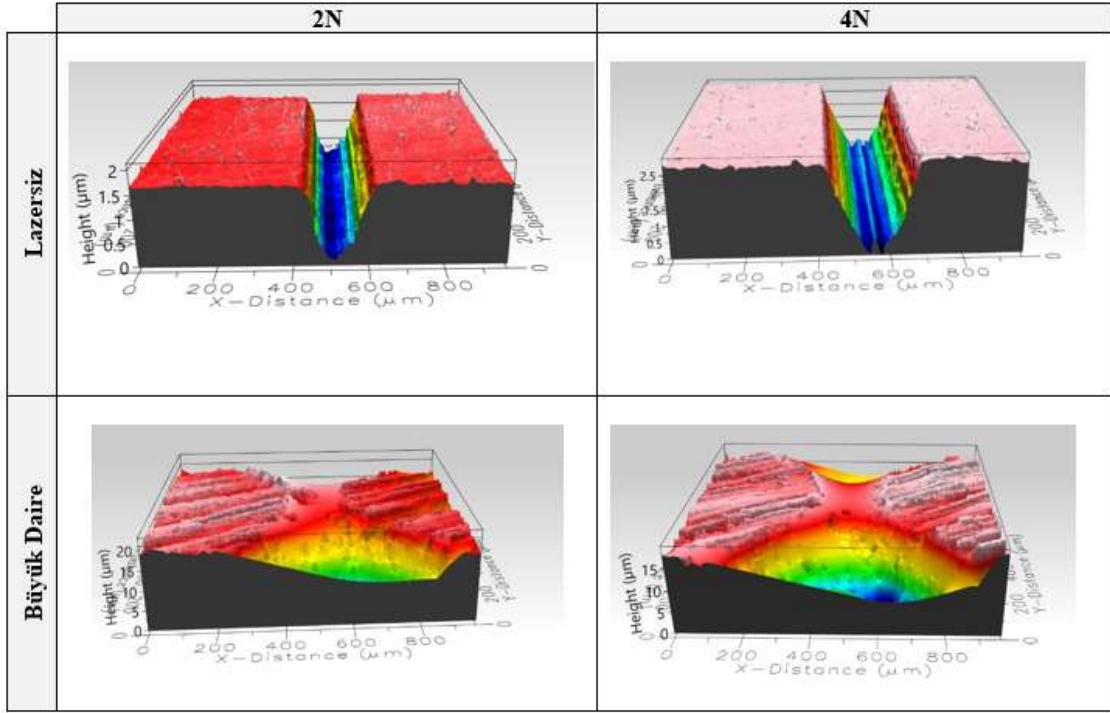
4N yük altında, tüm yüzeylerin hacim kaybı artmıştır. Büyük daire delik yüzeyi 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında bile $0,716 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ değeriyle en düşük hacim kaybını korumaktadır. Bu değer, lazersiz yüzeyin hacim kaybı değerinden ($0,894 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) yaklaşık %20 daha düşüktür. Büyük daire delik yüzeyler aktif temas alanını etkili bir şekilde azaltmakta, plastik deformasyonu güvenli bir şekilde lokalize etmekte ve düzgün geometrileri nedeniyle gerilim konsantrasyonlarını en aza indirmektedir. Adheziv aşınma,

büyük daire delik yüzey kenarlarının yakınında sınırlı kalırken, abrasiv aşınma kalıntılarının hızlı bir şekilde hapsedilmesiyle etkin bir şekilde kontrol edilmektedir (Salguero vd., 2022).

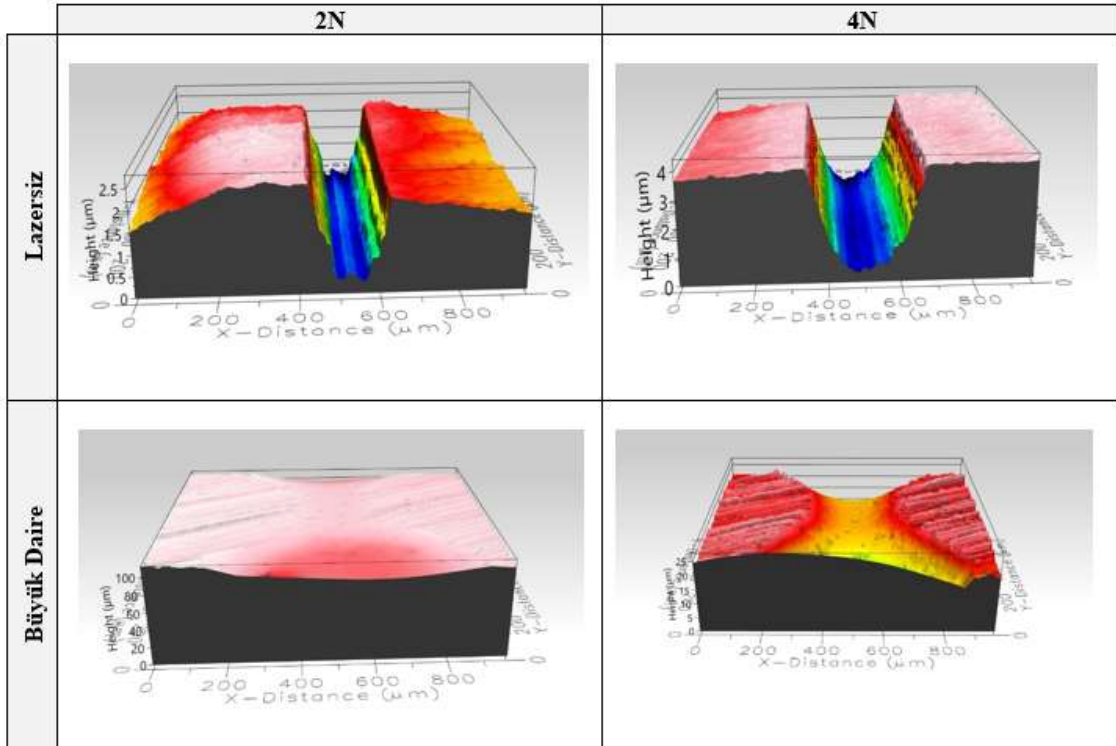
Izgara ($0,69-0,72 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) ve küçük daire delik ($0,75-0,80 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) yüzeyleri orta düzeyde aşınma direnci göstermiştir. Bu yüzeylerin hacim kaybı değerleri, lazersiz yüzeylerden daha düşük ancak büyük daire delik yüzeylerinden daha yüksektir. Artan kayma süresi ve yük ile birlikte tüm lazer tekstürlenmiş yüzeylerin hacim kaybı değeri artmasına rağmen, lazersiz yüzeyden sürekli olarak daha düşük kalmıştır. Bu sonuçlar, her yüzey deseninin kendine özgü aşınma mekanizmasıyla ilişkili olduğunu ve uygun tekstür tasarımının tribolojik performansı önemli ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir (Shen vd., 2021).

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da gösterilen 3D aşınma görüntüleri, lazersiz ve büyük daire desenli yüzeylerin aşınma davranışlarındaki belirgin farkları ortaya koymaktadır. Lazersiz yüzey, 2N yükte yaklaşık 2-2,5 μm , 4N yükte ise 4 μm derinliğe ulaşan belirgin V-şekilli aşınma izleri sergilemektedir. Buna karşılık, büyük daire desenli yüzey çok daha sığ aşınma profilleri göstermektedir. Büyük daire desenli yüzeyler, 3D aşınma görüntülerinde açıkça görüldüğü gibi, lazersiz yüzeylere kıyasla çok daha sığ ve düzenli aşınma profilleri sergilemektedir. Bu gelişmiş aşınma direnci, yüzey dokusunun temas mekaniğini değiştirmesi ve aşınma mekanizmalarını hafifletmesi ile ilişkilidir.

15 dakikalık test süresinden 30 dakikalık test süresine geçildiğinde, lazersiz yüzeyde aşınma derinliği belirgin şekilde artarken, büyük daire desenli yüzeylerde bu artış çok daha sınırlı kalmıştır. Yükün 2N'den 4N'e çıkarılması, her iki yüzey tipinde de aşınmayı artırmıştır, ancak büyük daire desenli yüzeyler daha iyi direnç göstermeye devam etmiştir. Bu durum, büyük daire deseninin hem adheziv hem de abrasiv aşınma mekanizmalarını etkili şekilde baskıladığını göstermektedir. Uzun süreli temas ve yüksek yük koşullarında bile büyük daire yüzey deseninin korunduğu ve aşınma direncini sürdürdüğü görülmektedir.



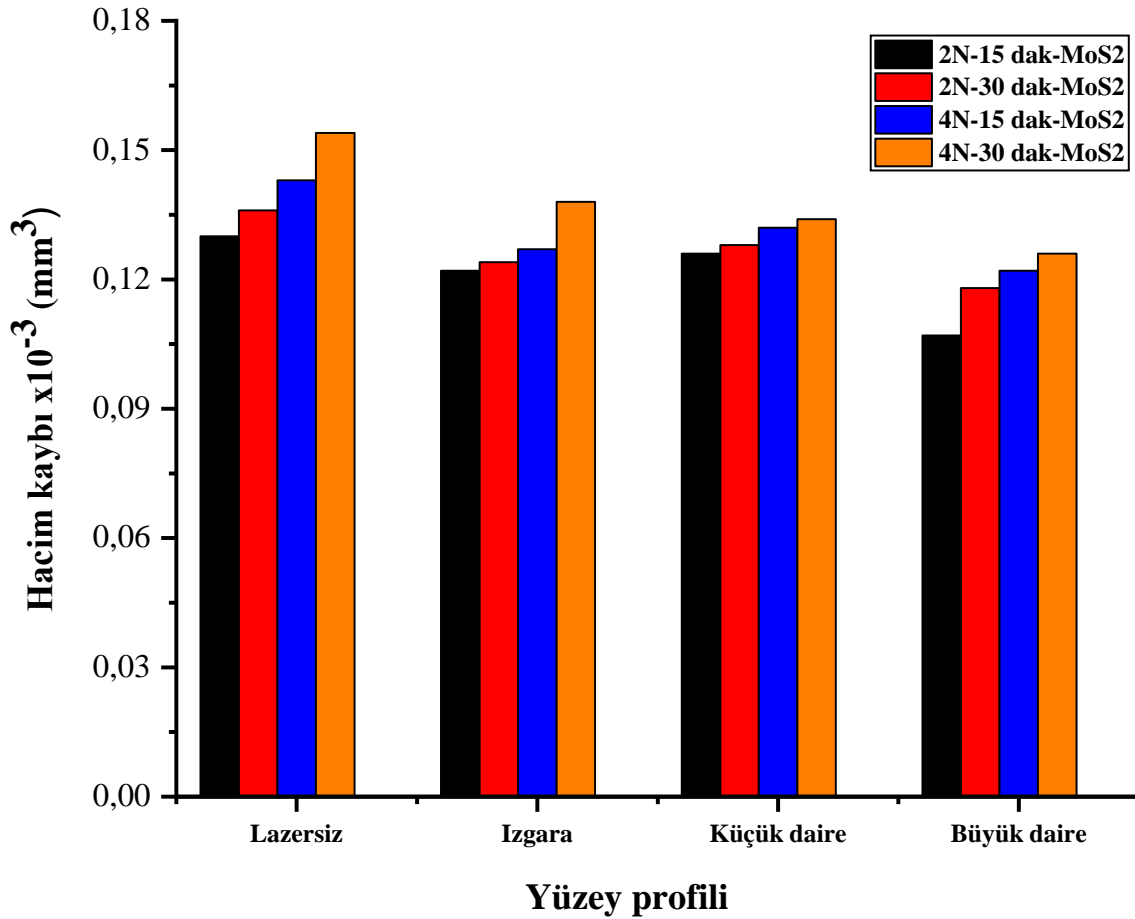
Şekil 6.5: 2N ve 4N yüklerde 15 dakikalık kayma test sürelerinde gerçekleşen lazersiz ve büyük daire yüzeylerin kuru kayma aşınma sonucu oluşan 3D aşınma görüntüleri.



Şekil 6.6: 2N ve 4N yüklerde 30 dakikalık kayma test sürelerinde gerçekleşen lazersiz ve

büyük daire yüzeylerin kuru kayma aşınma sonucu oluşan 3D aşınma görüntüleri.

Şekil 6.7, farklı yüzey profilleri için farklı test koşulları altında MoS₂ yağlayıcı ile hacim kaybı değerlerini göstermektedir. Lazersiz yüzey, yağlayıcı tutma özelliklerinden yoksun olduğu için tüm test koşullarında en yüksek hacim kaybını sergilemektedir. 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında $0,155 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ve 2N yük ve 15 dakika kayma süresi koşulları altında $0,130 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ değerlerine ulaşmaktadır. Bununla birlikte, bu değerler kuru kayma koşullarına kıyasla önemli bir %82-83 azalmayı temsil etmektedir. Bu iyileşme, Şekil 6.8'deki 3D topografik görüntülerde doğrulanmıştır ve aşınma izleri hem 2N hem de 4N yükleri altında yaklaşık $0,4 \mu\text{m}$ derinlikte, oldukça sık görülmektedir.



Şekil 6.7: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin MoS₂ yağlayıcı koşullar altında hacim kaybı performansı.

MoS₂ yağlayıcı, sürtünmeyi azaltan ve metal-metal temasını sınırlayan bir transfer filmi oluşturmaktadır. Ancak, MoS₂ rezervuarları olmayan düz bir yüzeyde yağlayıcı film

periyodik olarak parçalandığında, lokal yapışkan bağlantılar oluşabilmekte ve sert üçüncü cisim parçacıkları yüzeyin sürekli aşınmasına neden olmaktadır. Bu zayıf performans, Rosenkranz ve arkadaşının (Rosenkranz vd., 2019) araştırmasında açıklandığı gibi, kayma sırasında temas arayüzünden MoS₂'nin hızla uzaklaşmasına neden olan yağlayıcı tutma mekanizmalarının eksikliğine bağlanabilir.

Şekil 6.1'de gösterilen ızgara deseni, optik profilometre ölçümlerine göre 42,85 µm derinliğe ulaşan kanallar ve çevresinde 41,47 µm yüksekliğinde kenar oluşumları sergilemektedir. Bu yapısal özellikler sayesinde, ızgara desen yüzeyleri iki farklı yük koşulu altında 0,122-0,138x10⁻³ mm³ hacim kaybı değerleriyle orta düzeyde iyileşme göstermektedir, bu da lazersiz yüzeye kıyasla yaklaşık %11-14'lük bir azalmayı temsil etmektedir. Bu iyileşme, Etsion (2005) tarafından da belirtildiği gibi, yüzeyin yapısal bütünlüğünü korurken kısmi yağlayıcı rezervuarları oluşturan birbirine bağlı kanal ağının varlığından kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.2'de görüldüğü üzere, küçük daire deseni yaklaşık 440 µm çapında ve 74,81 µm derinliğinde çukurlardan oluşmaktadır. Bu çukurlar düzenli bir dağılım göstermekte ve kenarlarında belirgin yükselti oluşumları gözlenmektedir. Küçük daire deseni, tribolojik arayüzde tutarlı MoS₂ varlığını koruyan ve doğrudan metal-metal temasını azaltan dağıtılmış mikroskobik yağlayıcı rezervuarları sayesinde gelişmiş performans göstermektedir. 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında 0,133x10⁻³ mm³ ve 2N yük ve 15 dakika kayma süresi koşulları altında 0,127x10⁻³ mm³ hacim kaybı değerleriyle, dokusuz yüzeye göre %13-15'lik bir iyileşme sağlamaktadır. Holmberg ve Matthews (2009) tarafından açıklandığı gibi, bu düzgün dağıtılmış rezervuarlar, temas basıncını dağıtmak için yeterli yük taşıma alanını korurken arayüzde tutarlı bir MoS₂ varlığını sürdürmektedir

Şekil 6.3'de sunulan büyük daire deseninin optik profilometre analizleri, bu deseni yaklaşık 604 µm çap ve 91,58 µm derinliğe sahip çukurlardan oluştuğunu göstermektedir. Bu geniş ve derin yapılar, yüzeyde 38,7 µm civarında termal malzeme birikimini de beraberinde getirmektedir. Büyük daire deseni tüm test koşullarında en düşük hacim kaybını göstermiştir. 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında 0,126x10⁻³ mm³ ve 2N yük ve 15 dakika kayma süresi koşulları altında 0,106x10⁻³ mm³ değerleriyle, lazersiz yüzeye kıyasla %18-22 azalma sağlamıştır. Bu, kuru kayma koşullarındaki benzer yüzeylere kıyasla %84-85'lik bir iyileşme anlamına gelmektedir. Bu üstün performans, optimize edilmiş çukur boyutu ve dağılımının, rezervuar kapasitesini ve yapısal bütünlüğü dengeleyerek yağlayıcı etkinliğini

önemli ölçüde artırabileceğini gösteren Wang vd., (2001) bulgularıyla örtüşmektedir. Şekil 6.8'deki 3D aşınma görüntülerinde de malzemenin yaklaşık 2-2,5 µm derinliklerde minimal aşınma gösterdiği görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar, hem yükün (2N'den 4N'ye) hem de sürenin (15dk'dan 30dk'ya) artırılmasının, Archard'ın (1953) aşınma denklemiyle tutarlı olarak tüm yüzey profillerinde daha yüksek hacim kaybına yol açtığını göstermektedir. Ancak artış oranı, dokulu ve dokusuz yüzeyler arasında önemli ölçüde değişmektedir. Dokulu yüzeyler artan yüklenme koşullarına karşı daha dirençli davranmaktadır. Bu farklı tepki, yüzey dokusunun, tutarlı yağlayıcı tedariki yoluyla yapışkan aşınmayı hafifleterek ve dokulu özellikler içinde aşınma kalıntılarını hapsederek üç gövdeli aşındırıcı aşınmayı azalttığını göstermektedir (Bhushan, 2013).

Uzun süreli testlerde aşınma hızı kuru kayma koşullarına kıyasla önemli ölçüde azalmaktadır. 30 dakikalık testler, özellikle lazer tekstür uygulanmış yüzeyler için 15 dakikalık testlerden yalnızca biraz daha derin aşınma izleri göstermektedir. Bu zamana bağlı davranış, Şekil 6.9'daki aşınma görüntülerinde de görüldüğü gibi, sürekli kayma etkileşimiyle giderek daha etkili hale gelen faydalı tribokimyasal arayüzlerin gelişimini göstermektedir.

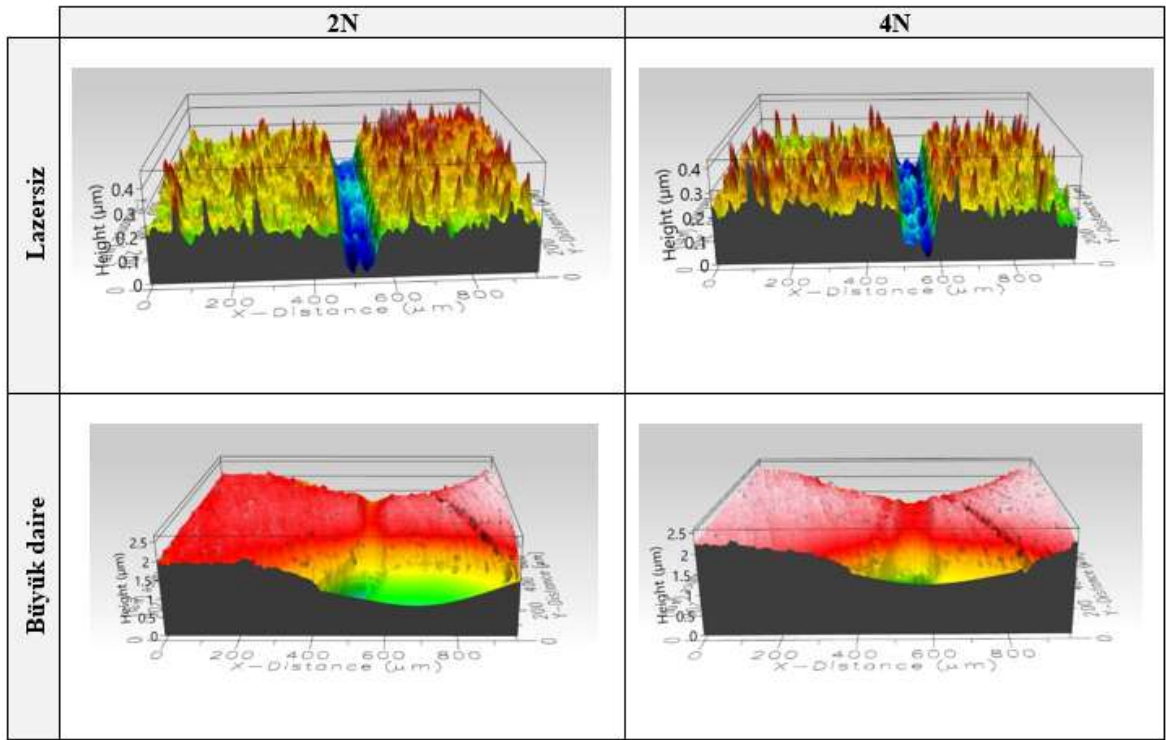
Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterilen 3D aşınma görüntüleri, MoS₂ yağlayıcı varlığında lazersiz ve büyük daire desenli yüzeylerin aşınma davranışlarındaki belirgin farkları ortaya koymaktadır. Lazersiz yüzey, 2N yükte yaklaşık 0,4 µm, 4N yükte ise 0,6 µm derinliğinde aşınma profilleri sergilemektedir. Bu değerler, kuru kayma koşullarına kıyasla önemli ölçüde daha azdır.

Büyük daire desenli yüzeyler, 3D aşınma görüntülerinde açıkça görüldüğü gibi, lazersiz yüzeylere kıyasla çok daha düzenli ve pürüzsüz aşınma profilleri göstermektedir. Özellikle yüzey topografisinde daha az dalgalanma ve daha uniform bir yapı gözlenmektedir. Bu gelişmiş tribolojik davranış, yüzey dokusunun MoS₂ yağlayıcıyı daha etkili bir şekilde tutabilmesi ve temas bölgesinde sürekli bir yağlayıcı film oluşturabilmesi ile ilişkilidir.

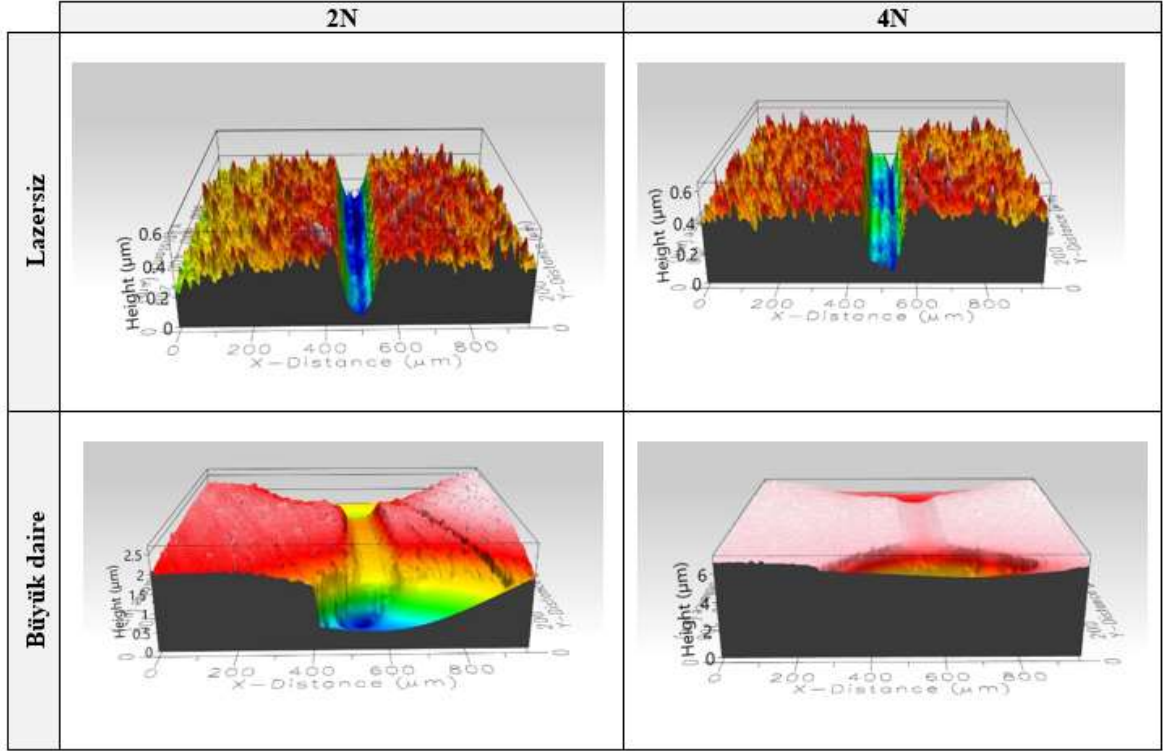
15 dakikalık test süresinden (Şekil 6.8) 30 dakikalık test süresine (Şekil 6.9) geçildiğinde, lazersiz yüzeyde aşınma profili daha pürüzlü hale gelirken, büyük daire desenli yüzeylerde

yüzey topografisi nispi düzgünlüğünü korumaktadır. 4N yük altında ve 30 dakika kayma süresi koşullarında bile büyük daire desenli yüzeyin, lazersiz yüzeye göre daha iyi bir aşınma profili sergilediği açıkça görülmektedir.

Yükün 2N'dan 4N'a çıkarılması her iki yüzey tipinde de aşınma yükseklik profillerini değiştirmiştir. Lazersiz yüzey, artan yükle birlikte daha pürüzlü ve düzensiz bir topografiye sahip olurken, büyük daire desenli yüzeyler daha kontrollü bir aşınma davranışı göstermeye devam etmiştir. MoS₂ yağlayıcının varlığı, her iki yüzey tipinde de aşınma derinliğini önemli ölçüde azaltmakla birlikte, büyük daire deseninin yağlayıcıyı daha etkili kullanabildiği ve böylece daha üstün bir tribolojik performans sergilediği gözlenmektedir (Fan vd., 2018).



Şekil 6.8: 2N ve 4N yük altında 15 dakika test süresince MoS₂ yağlayıcı aşınma sonucu 3D aşınma görüntüleri.



Şekil 6.9: 2N ve 4N yük altında 30 dakika test süresince MoS₂ yağlayıcı aşınma sonucu 3D aşınma görüntüleri.

Şekil 6.4 (kuru koşullar) ve Şekil 6.7 (MoS₂ ile yağlanmış koşullar) arasındaki karşılaştırma, test edilen tüm yüzey profilleri arasında tribolojik performansta dikkate değer farklılıklar ortaya koymaktadır. Lazersiz yüzey için, MoS₂ yağlayıcı kullanımı, en zorlu test koşulunda (4N-30dk) hacim kaybı değerinde yaklaşık %83'lük olağanüstü bir azalmaya yol açmış ve değerler $0,900 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'den sadece $0,155 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'ye düşmüştür. Bu çarpıcı iyileştirme, özel dokuya sahip olmayan yüzeylerde bile MoS₂'nin bir yağlayıcı olarak olağanüstü etkinliğini göstermektedir.

Izgara deseni yüzeyi incelendiğinde, hacim kaybı değeri 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında MoS₂ yağlamasıyla yaklaşık %81 oranında azalmış ve $0,720 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'den $0,138 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'ye düşmüştür. Izgara deseninin birbirine bağlı kanalları, lazersiz yüzeylere kıyasla yağlayıcı tutma kapasitesini açıkça artırmakta ve bunun sonucunda hem kuru hem de yağlanmış ortamlarda hacim kaybı sürekli olarak daha düşük olmaktadır.

Küçük daire deseni 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında MoS₂ yağlamasıyla hacim kaybı değerinde etkileyici bir %83,4 azalma göstermiş ve değerler $0,800 \times 10^{-3}$

mm^3 'den $0,133 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'ye düşmüştür. Bu yüzey dokusu yağlamayla mükemmel performans gösterir ve yağlayıcı rezervuarlarının optimize edilmiş dağılımı nedeniyle tüm yük-zaman kombinasyonlarında dikkate değer derecede tutarlı aşınma davranışı göstermektedir.

En dikkat çekici olan sonuç ise, büyük daire deseninin kuru teste kıyasla yağlanmış koşullar altında hacim kaybında %82,3 azalma ile en iyi genel performansı göstermesidir; bu desende değerler 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında $0,710 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'den $0,126 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ 'ye düşmüştür. Bu yüzey dokusu, hem kuru hem de yağlanmış durumlarda sürekli olarak en düşük hacim kaybını göstererek, yeterli yük taşıma yüzey alanını korurken optimum yağlayıcı tutma kapasitesi sağlayan daha büyük çukurlu yapıların üstün tribolojik faydalarını doğrulamıştır (Lu ve Wood, 2020).

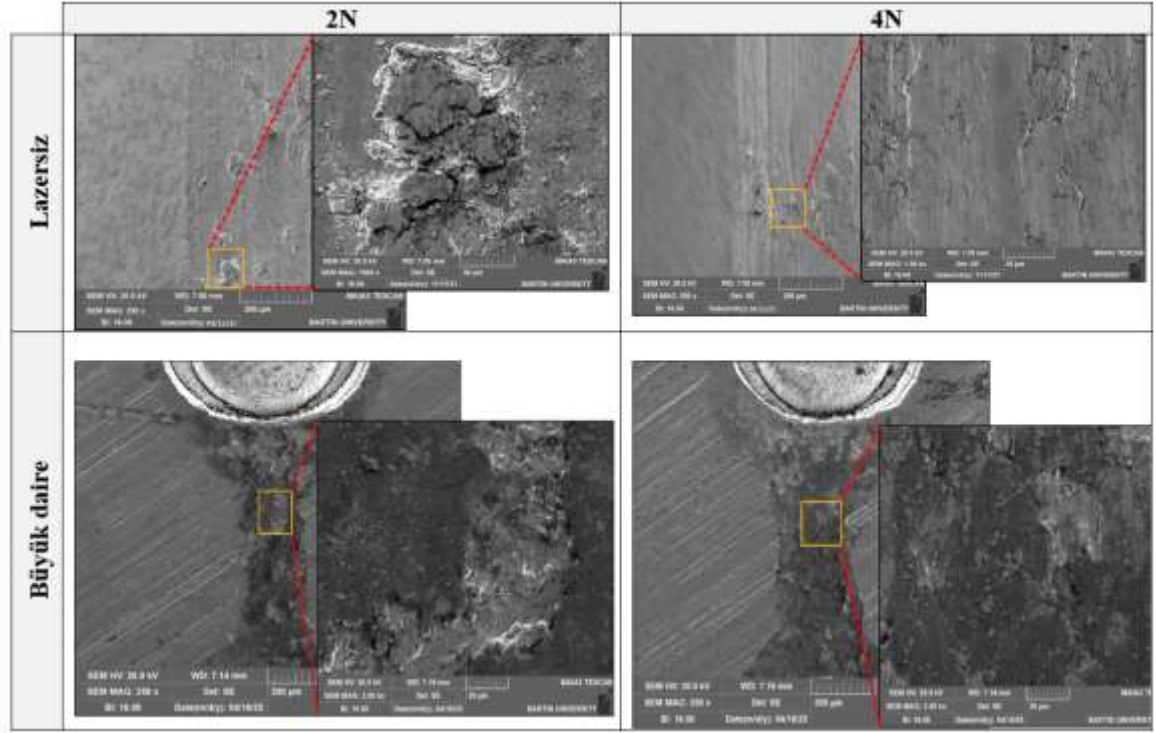
Karşılaştırmalı veriler, MoS_2 yağlamasının tüm yüzey profillerinde aşınmada %81-83 oranında olağanüstü bir azalma sağladığını ve en yüksek faydanın lazer tekstür uygulanmış dokulu yüzeylerde gözlemlendiğini kesin olarak göstermektedir. Bu önemli iyileştirme, MoS_2 'nin yüzeylerin birbirine karşı kolayca kaymasını sağlayan katmanlı bir yapıya (birbirinin üstüne istiflenmiş tabakalar gibi) sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeylerdeki dokulu desenler ayrıca yağlayıcıyı yerinde tutan ve sürtünmeyi azaltan küçük rezervuarlar gibi davranmaktadır. Yağlama faydasının büyüklüğü, artan yük ve zamanla orantılı olarak artmakta, ve bu da MoS_2 'nin performans avantajının, sınır yağlama mekanizmalarının baskın olduğu zorlu çalışma koşulları altında daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Dahası, veriler kuru ve yağlanmış koşullar arasında aşınma mekanizmalarında temel bir geçiş olduğunu, adheziv ve abrasiv aşınmanın kuru koşullarda baskın olduğunu ve koruyucu tribofilm oluşumunun yağlanmış koşullar altında baskın olduğunu ortaya koymaktadır (Fan vd., 2018).

6.2. Aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesi

Şekil 6.10'da, 15 dakikalık bir test süresi boyunca 2N ve 4N yükleri uygulanarak kuru kayma koşulları altında üretilen aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. 4N kuru kayma koşulu altında, belirli yerel bölgelerde görüldüğü gibi, lazersiz yüzeyde abrasiv aşınma izleri görünmektedir. Bu aşınma yüzey ile aşındırıcı arasına girmiş olan bir partikülün yüzeyi sürtmesiyle oluşur. Bu tür aşınma özelliklerinin varlığı, lazersiz

yüzeyin nispeten daha düşük sertlik gösterdiğini ve aşındırıcı mekanizmalara karşı daha hassas hale getirdiğini göstermektedir. Buna karşılık, lazerli yüzeylerde abrasiv aşınma görünmemekle beraber yer yer mikro çatlaklar görünmektedir. Bu mikro çatlaklar, lazerli yüzeylerin gevrek bir yapıya sahip olduğunu gösterirken daha sonrasında bu çatlakların büyüyerek delaminasyon hasarına sebep olduğu görülmektedir. Ek olarak, 2N yük altında dokusuz yüzeyin büyütülmüş SEM görüntüsü, kısmi yüzey dökülmesiyle kanıtlandığı gibi, delaminasyonun ilk belirtilerini de göstermektedir ve bu, yeterli yağlama veya yapısal takviyenin olmadığı düşük yüklemelerde bile yorulma destekli aşınma süreçlerinin başladığını desteklemektedir. Bu davranış, aşınma hacminin uygulanan normal yük ile doğru orantılı olduğunu belirten Archard'ın aşınma yasasıyla uyumludur (Archard, 1953)

Buna karşılık, büyük dairesel çukurlara sahip yüzeyler önemli ölçüde farklı aşınma karakteristiği sergilemektedir. 2N yük altında, çukurlu yapıların içinde ve çevresinde birikmiş aşınma kalıntılarıyla birlikte, tekstürlü yüzeyin neden olduğu kesintiye uğramış aşınma desenleri gözlemlenmektedir. Çukur kenar bölgelerinde, Hamilton ve Goodman tarafından tanımlanan gerilim yoğunlaşması etkisinin bir sonucu olarak malzeme yığılması ve lokalize plastik deformasyon belirgin şekilde görülmektedir (Hamilton ve Goodman, 1966). 4N yük altında ise, SEM analizi vurgulanan bölgede belirgin delaminasyon aşınması ile birlikte çukur kenarlarında şiddetli plastik deformasyon ortaya koymaktadır. Kayma yönüne dik, döngüsel yüklemeye kaynaklı karakteristik yorulma çatlakları oluşmuştur. Bu yüksek yük koşulunda daha şiddetli aşınma göstermesine rağmen, tekstürlü yüzey, aynı yüklemeye koşulları altında test edilen tekstürsüz muadiline kıyasla önemli ölçüde daha az malzeme kaybı sergilemektedir.

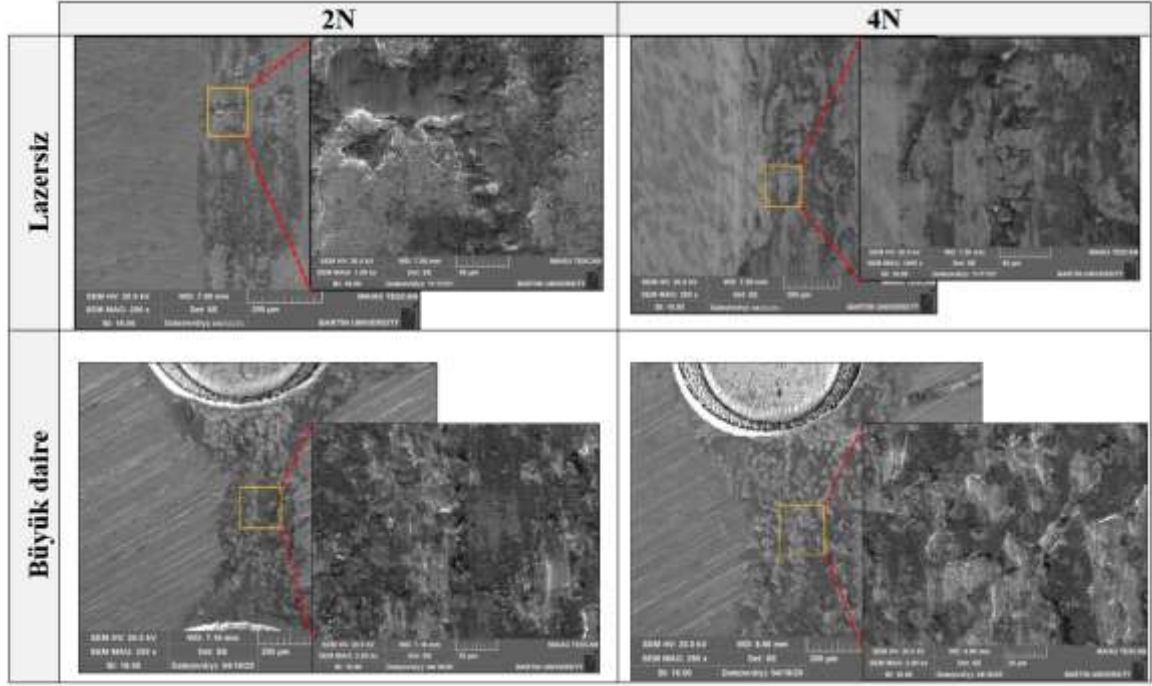


Şekil 6.10: 2N ve 4N yük altında 15 dakika test süresinde kuru kayma aşınma sonucu SEM görüntüleri.

Şekil 6.11'de, 2N ve 4N yükler altında 30 dakikalık kuru kayma aşınma testlerinden sonra lazersiz ve büyük daire yüzeylerin aşınma izlerini karşılaştıran taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, Şekil 6.10'a benzer şekilde, 4N yük altındaki lazersiz yüzey, aşınma izi boyunca belirgin aşındırıcı oluklar ve ciddi plastik deformasyon sergilemektedir. Bu derin paralel çizgiler, sıkışmış üçüncü gövde parçacıkları nedeniyle baskın abrasiv aşınma mekanizmalarını düşündürmektedir. Ayrıca yük 4N'a yükseldiğinde, uygulanan yük ile aşınma hacmi arasında doğrudan bir ilişki kuran Archard (1953) aşınma yasasına uygun olarak, aşınma izi belirgin şekilde genişlemiş ve daha yoğun plastik deformasyon gözlemlenmiştir (Bhushan, 2013). Bu durum, yetersiz yağlama koşullarında sert çeliklerde tipik olarak görülen yoğun malzeme kaybı ve oksidatif aşınma mekanizmalarıyla uyumlu bir davranış sergilemektedir (Hutchings ve Shipway, 2017). Lazersiz yüzeyde 2N'da, yüzey dökülmesi ve yüzey altı çatlak başlangıcı ile karakterize edilen erken aşama delaminasyonunu göstermektedir.

Buna karşın, büyük daire yüzeyler aşınma morfolojisinde önemli iyileşmeler göstermektedir. 2N yük altında, yüzeydeki çukurlar aşınma kalıntılarını etkili bir şekilde hapsederek üçüncü cisim aşınmasını minimize etmekte ve aktif temas alanını azaltarak

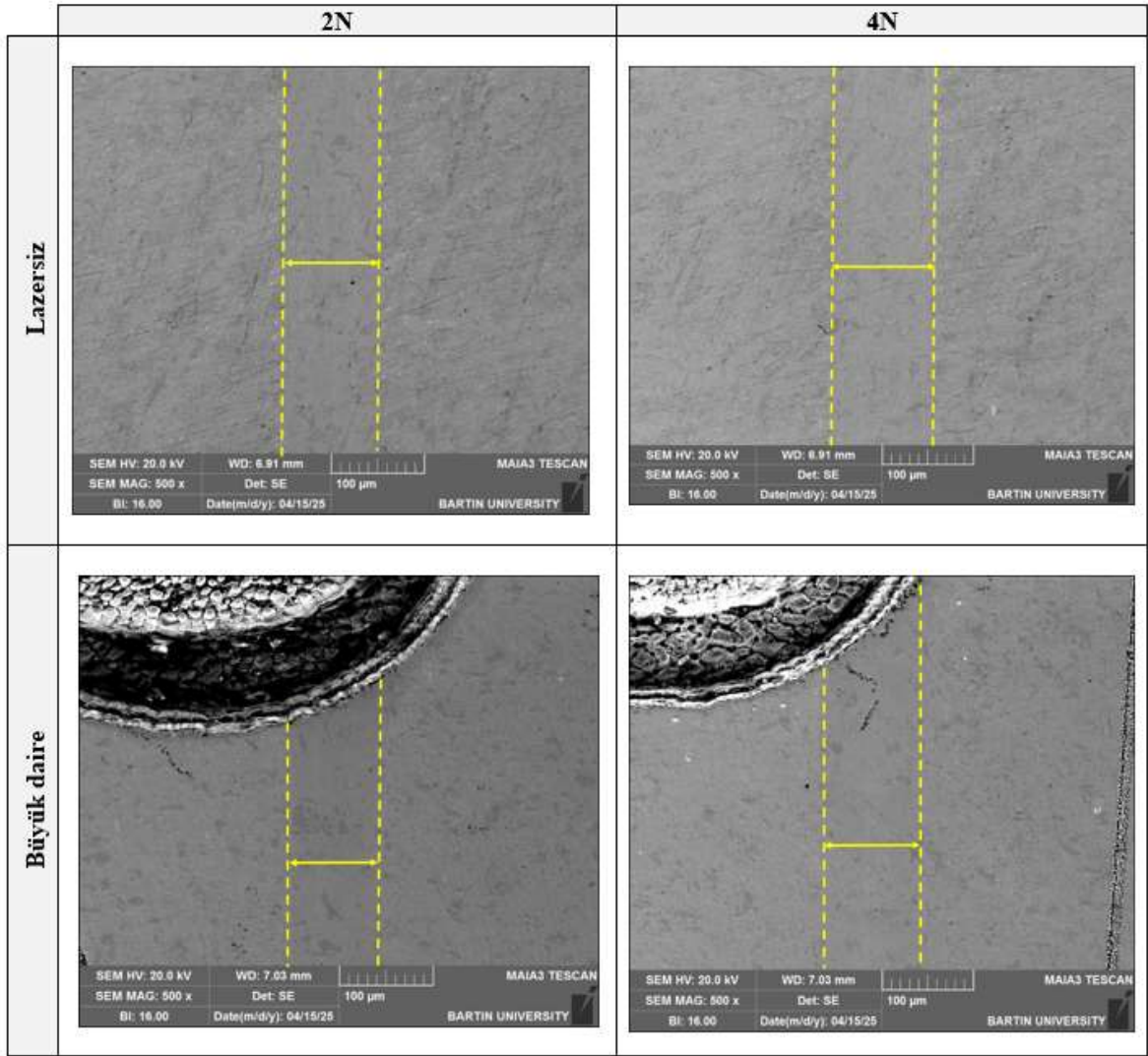
yüzey hasarını hafifletmektedir. 4N yük uygulandığında aşınma yoğunluğu artmasına rağmen, çukurlu yapıların içinde ve çevresinde biriken aşınma kalıntıları, kesintiye uğramış aşınma desenleri oluşturmakta ve bu durum sürekli delaminasyona karşı gelişmiş direnç sağlamaktadır.



Şekil 6. 11: 2N ve 4N yük altında 30 dakika test süresinde kuru kayma aşınma sonucu SEM görüntüleri.

Şekil 6.12'de, 2N ve 4N yüklerde MoS₂ yağlaması altında 15 dakikalık kayma aşınmasından sonra lazersiz ve büyük daire yüzeylerin aşınma izlerini karşılaştıran SEM görüntüleri verilmiştir. Lazersiz yüzeyler, kuru kayma aşınma koşullarına kıyasla minimum yüzey hasarıyla son derecede sığ ve dar aşınma izleri sergileyerek MoS₂'nin olağanüstü yağlama özelliklerini kanıtlamaktadır. Bu durum, MoS₂'nin karşıt yüzeyler arasında doğrudan teması sınırlayan ve böylece adheziv ve abrasiv aşınma mekanizmalarını bastıran koruyucu bir tribofilm oluşturma kabiliyetiyle açıklanabilir (Spikes, 2004). 2N yük altında aşınma izi neredeyse fark edilemez durumdadır ve sadece sarı işaretli bölgede hafif yüzey değişiklikleri gözlemlenmektedir. 4N yük altında, 2N'ye kıyasla biraz daha belirgin bir aşınma izi görülmesine rağmen, kuru kayma koşullarında tespit edilen ciddi hasara kıyasla yüzey bütünlüğü büyük ölçüde korunmuştur.

Büyük daire yüzeyler ise daha da üstün aşınma performansı sergilemektedir. 2N yük altında aşınma izi neredeyse ayırt edilemez seviyededir; bu durum, çukur yapısı içinde hapsolan yağlayıcının minimum temas gerilimi oluşturarak etkili bir yağlama filmi sağlamasından kaynaklanmaktadır. 4N yük altında, artan yüklemeye bağlı olarak aşınma izinin görünürlüğünde hafif bir artış gözlenirse de, yüzey delaminasyon, çatlak oluşumu veya üçüncü cisim aşındırıcı etkileri gibi ciddi hasar mekanizmalarından arınmış şekilde yapısal bütünlüğünü korumaktadır.

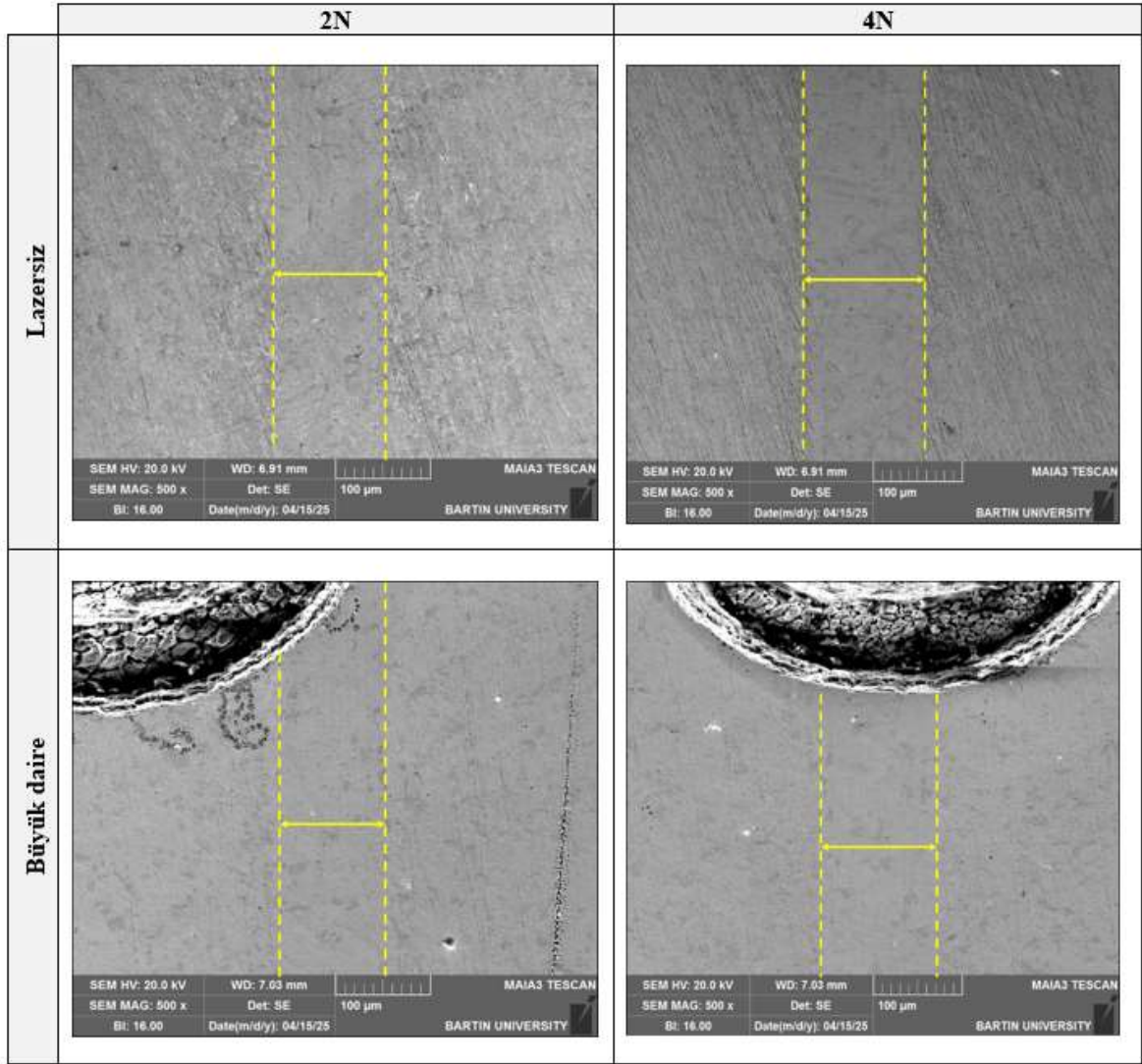


Şekil 6.12: 2N ve 4N yük altında 15 dakika test süresinde MoS₂ yağlayıcı oluşan aşınma sonucu SEM görüntüleri.

Şekil 6.13'de, 2N ve 4N yüklerde MoS₂ yağlaması altında 30 dakikalık kayma aşınmasından sonra lazersiz ve büyük daire yüzeylerin aşınma izlerini karşılaştıran SEM görüntüleri

verilmiştir. Lazersiz yüzeyler, her iki yük koşulunda da kuru kayma aşınma durumlarına kıyasla minimum yüzey hasarıyla son derecede sığ ve dar aşınma izleri sergileyerek MoS₂'nin olağanüstü yağlama özelliklerini kanıtlamaktadır. Bu durum, MoS₂'nin koruyucu bir bariyer görevi gören ve metal-metal temasını en aza indiren kararlı, düşük kesme mukavemetli bir tribofilm oluşturma özelliğini güçlü bir şekilde göstermektedir (Spikes, 2004). 4N yük altında bile yüzey bütünlüğü dikkate değer şekilde korunmakta ve MoS₂ yağlayıcının hem adheziv hem de abrasiv aşınma mekanizmalarını azaltmadaki üstün yeteneği gözlemlenmektedir.

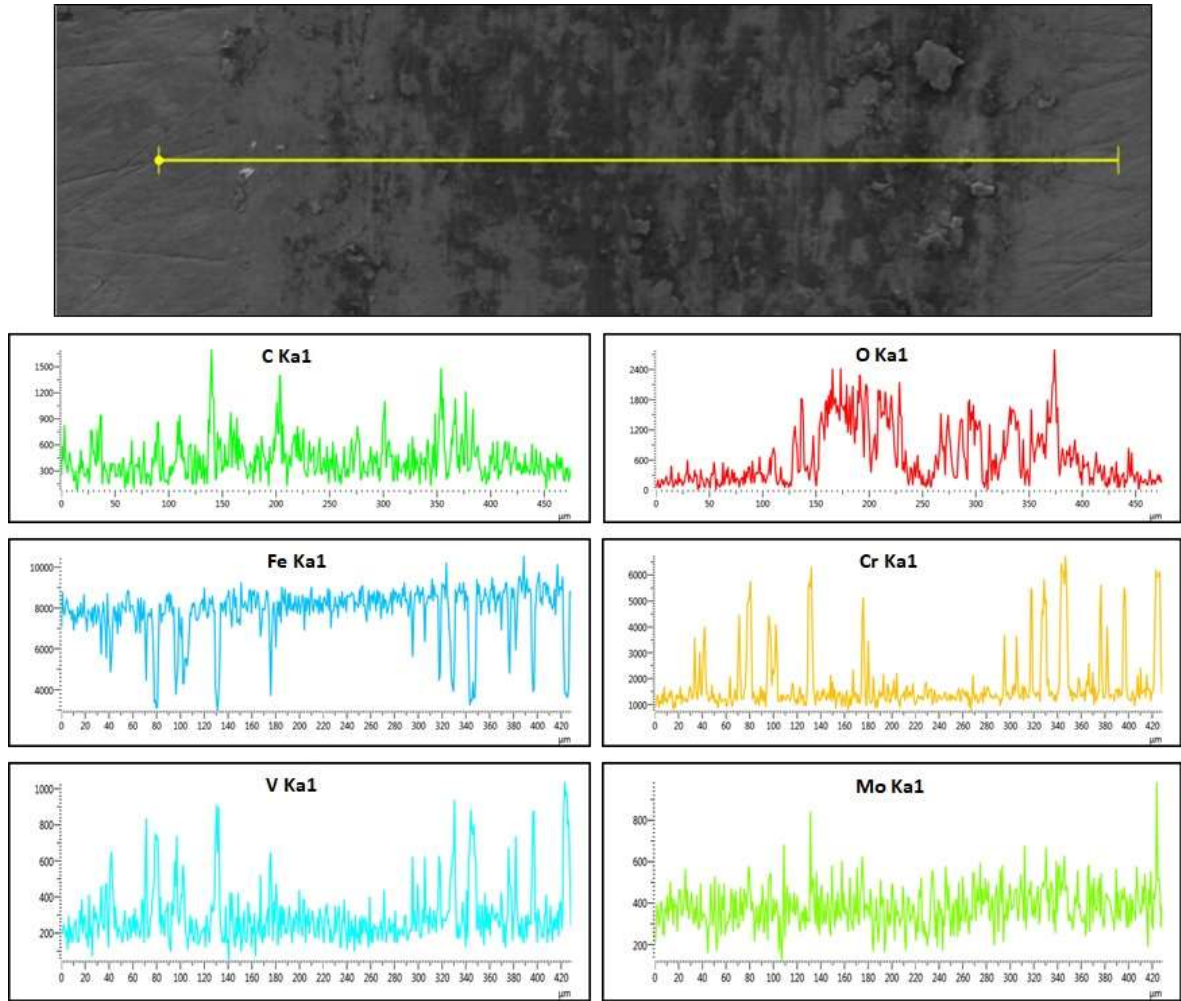
Büyük daire delikli yüzeylerde 2N yük altında aşınma izi neredeyse görünmez durumdadır ve yüzeydeki çukurluklar yağlayıcıyı tutmak için etkili mikro rezervuarlar görevi görmektedir. Bu yapının, sadece sürekli bir yağlama etkisi sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda temas arayüzü boyunca daha düzgün bir gerilim dağılımına da katkıda bulunduğu düşünülmektedir. 4N yükte, aşınma izinde hafif bir artış kaydedilmesine rağmen, yüzey delaminasyon, çatlama veya üçüncü cisim aşınma kalıntılarından arınmış durumdadır. Bu tür hasar biçimleri, benzer yüklerde kuru kayma koşulunda (Şekil 6.11) belirgin şekilde gözlemlenmektedir.



Şekil 6.13: 2N ve 4N yük altında 30 dakika test süresinde MoS₂ yağlayıcı oluşan aşınma sonucu SEM görüntüleri.

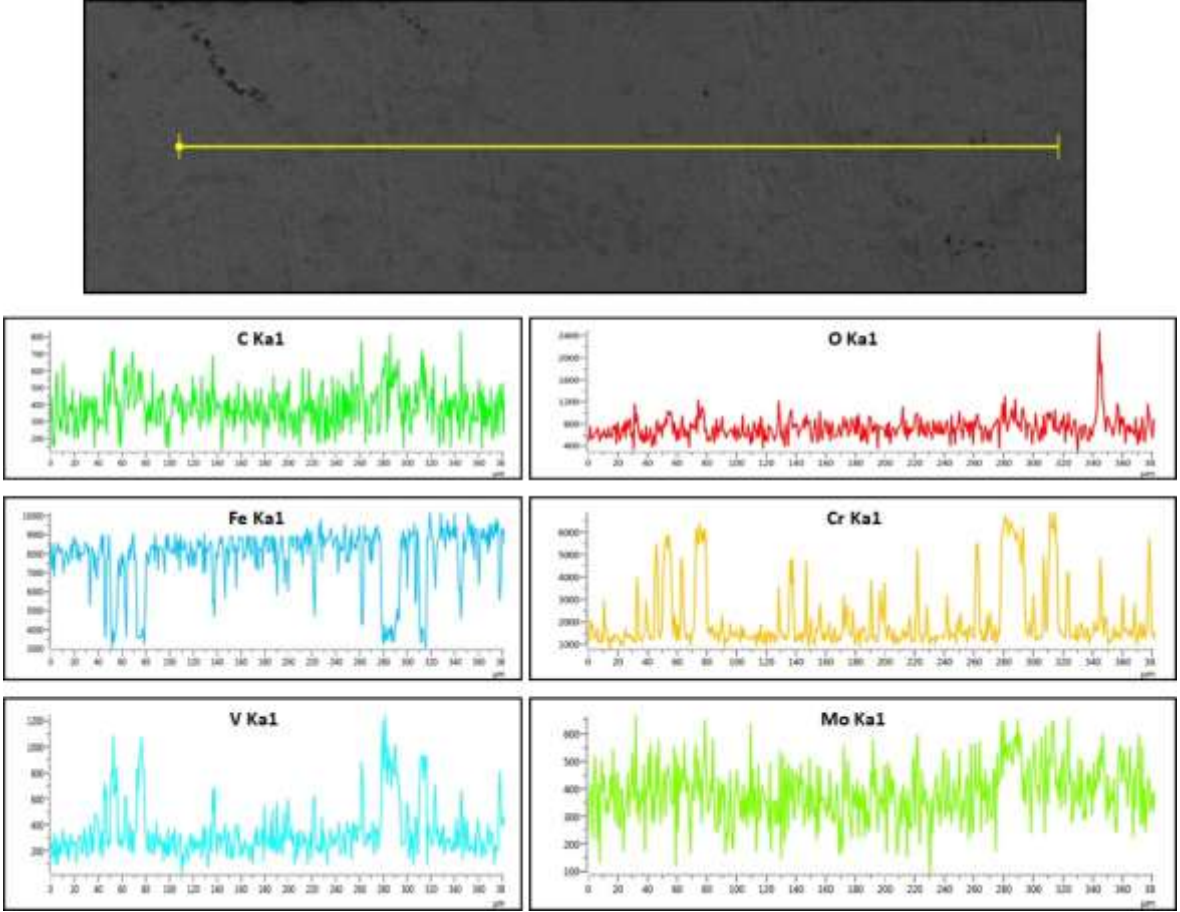
Şekil 6.14, 4N yük altında 30 dakikalık kuru kayma koşulları altında gerçekleştirilen EDS (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi) çizgi analizi sonuçlarını göstermektedir. SEM mikrografisinde sarı çizgi ile işaretlenen tarama hattı boyunca AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin elementel kompozisyonu incelenmiştir. Spektral grafikler, substrat malzemenin karakteristik bileşenlerini açıkça ortaya koymaktadır. Cr K α 1 spektrumundaki belirgin pikler, D2 çeliğinin yüksek krom içeriğini doğrularken, Fe K α 1 profilindeki periyodik dalgalanmalar karbür-matris geçiş bölgelerini işaret etmektedir. V K α 1 ve Mo K α 1 dağılımları, malzemenin aşınma direncini artıran sekonder karbürlerin varlığını kanıtlamaktadır. O K α 1 sinyalleri, tribolojik etkileşim sürecinde oluşan oksit tabakalarını gösterirken, C K α 1 dağılımı hem matris içindeki karbonu hem de tribokimyasal reaksiyonlar

sonucu oluşan karbon-zengin yapıları yansıtmaktadır.



Şekil 6.14: Kuru kayma koşullarında 4N yük altında 30 dakikalık test süresince elde edilen EDS çizgi analizi.

Şekil 6.15'de, 2N yük altında ve 15 dakikalık test süresinde MoS₂ yağlayıcı koşullarında gerçekleştirilen EDS çizgi analizi sonuçları gösterilmektedir. SEM görüntüsünde sarı çizgi ile belirtilen tarama hattı boyunca elementlerin konsantrasyonları grafiklerle temsil edilmiştir. Analiz, substrat malzemesi olan çeliğin ana bileşenlerini (Fe, Cr) ve yağlayıcı madde bileşeni olarak Mo'nin dağılımını ortaya koymaktadır. Fe sinyalindeki dalgalanmalar muhtemelen yüzey topografisi veya tribolojik etkileşimlerden kaynaklanırken, Mo'nin varlığı yüzey üzerinde MoS₂ yağlayıcısının etkin bir şekilde tutunduğunu göstermektedir. C ve diğer elementlerin dağılımı, kayma aşınması sırasında oluşan tribofilm yapısı hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 6.15: MoS₂ yağlayıcı koşullarında 2N yük altında 15 dakikalık test süresince elde edilen EDS çizgi analizi.

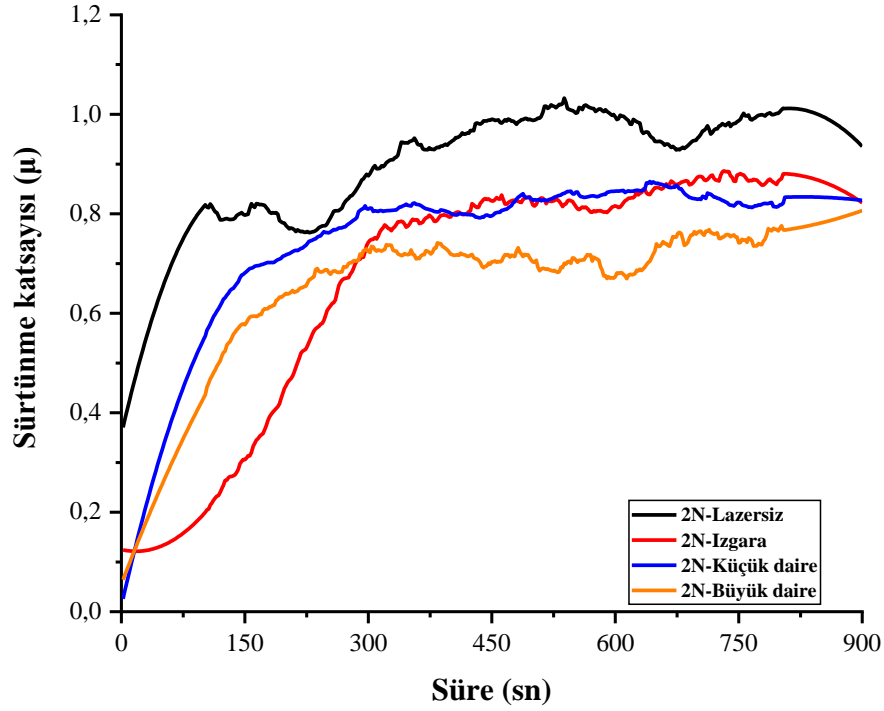
6.3. Sürtünme katsayısının değerlendirilmesi

Şekil 6.16, 2N yük altında 15 dakikalık kuru kayma testi süresince farklı lazer tekstür desenli AISI D2 çeliği yüzeylerinin sürtünme katsayısı davranışını göstermektedir. Şekilde belirgin performans farklılıkları görülmekte olup, büyük daire yüzey en düşük sürtünme katsayısını ($\mu \approx 0,7$) sergilemektedir. Şekil 6.4'de sunulan hacim kaybı değerleri de bu durumu desteklemekte, büyük daire yüzeyin en düşük aşınma oranına sahip olduğunu doğrulamaktadır. Bu bulgu, Li vd. (2010) ile Kovalchenko vd. (2011) çalışmalarındaki sonuçlarla uyumlu bulunmuştur; çünkü daha geniş çaplı çukurlar, kuru sürtünme durumlarında bile aşınma artıklarının tutulmasını ve lokal yağlayıcı film oluşumunun daha fazla kapasiteye sahip olmasını sağlamıştır. Bu çukurlu yapılar gerçek temas alanını azaltmış, mikro rezervuarlar gibi davranmış ve yapışkan temasın geçişini geciktirerek arayüz kayma gerilimini en aza indirmiştir. Bu üstün performans, Şekil 6.5'deki 3D optik görüntülerde de doğrulanmaktadır.

Küçük daire çukurlu yüzeyler, en büyük çukurlara göre biraz daha yüksek sürtünme katsayılarına sahip olmuştur. 3000 saniyeden sonra $\mu \approx 0,8$ seviyesinde kararlı bir seyir izlemesi, küçük çukurların sınırlı aşınma kalıntısı tutma kapasitesini göstermektedir. Çukur büyüklüğü azaldıkça, yağlayıcı tutma kapasitesi ve aşınma döküntüsü uyumluluğu azalmış, bu da metal-metal temasının artmasına neden olmuştur. Bu durum, Şekil 6.4'deki hacim kaybı verilerinde de doğrulanmaktadır.

Izgara desenli yüzey, kuru kayma koşullarında sürtünme katsayısında (μ) orta düzeyde bir azalma göstermiştir. Başlangıçta en düşük sürtünme katsayısını göstermekte, ancak 300 saniyeden sonra $\mu \approx 0,8$ seviyesine yükselmektedir. Bu düzenli oluklar, aşınma döküntülerini hapsedmeye yardımcı olmuş, ancak keskin köşeleri kayma sırasında gerilim noktaları oluşturmuştur. Özellikle yağlayıcının bulunmadığı kuru koşullarda bu bölgeler mikro kesme ve abrasiv aşınmayı teşvik etmiştir. Bu nedenle, ızgara deseninin genel sürtünme performansı, düz yüzeyle karşılaştırıldığında daha iyi bulunmuş, ancak büyük dairesel desenler kadar etkili olmamıştır.

Lazersiz bir yüzey, 2N yük koşullarında en yüksek sürtünme katsayısını ($\mu \approx 1,0$) sergilemiştir. Yüzeyde herhangi bir dokunun olmaması, geniş ve sürekli temas alanı oluşturarak kayan yüzeyler arasındaki yapışkan etkileşimleri artırmıştır. Mikro yapısal özelliklerin yokluğu, aşınma parçacıklarının arayüzde birikip üçüncü cisim aşınmasına katkıda bulunmasına neden olmuştur. Ayrıca lazersiz yüzeyler, temas basıncını dağıtacak özelliklerden yoksun olduğundan, plastik deformasyon ve yüzey yorgunluğuna karşı daha savunmasızdır. Bu bulgular, Xing vd. (2017) çalışmalarıyla uyumludur.



Şekil 6.16: 2N yük ve 15 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.

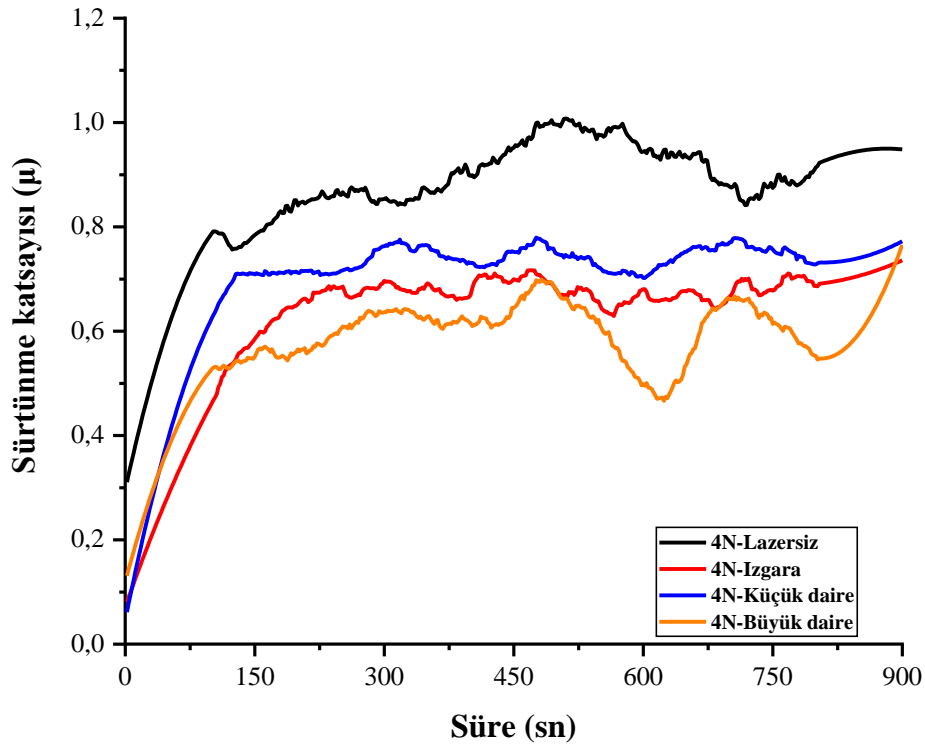
Şekil 6.17, 4N yük altında 15 dakikalık kuru kayma testi süresince farklı lazer tekstür desenli AISI D2 çeliği yüzeylerinin sürtünme katsayısı davranışını göstermektedir. Büyük daire delik yüzeyi, 4N yük altında test edilen tüm dokular arasında en düşük sürtünme katsayısını ($\mu \approx 0,45-0,65$) sergilemektedir. Özellikle 500-600 saniye aralığında belirgin bir düşüş göstermesi, çukurların aşınma kalıntılarını etkili şekilde hapsetme kapasitesine işaret etmektedir. Şekil 6.5'deki 3D optik görüntülerde görülen daha sığ aşınma derinliği ve Şekil 6.4'deki düşük hacim kaybı değerleri bu performansı doğrulamaktadır. Büyük daire desen yapıları, gerçek temas alanını etkili bir şekilde azaltarak kayma sırasında adheziv hasar oluşumunu engellemiştir. Buna ek olarak, daha derin ve daha geniş çukur yapıları, aşınma kalıntıları için etkili rezervuarlar oluşturmuş, üçüncü cisim partiküllerinin abrasiv hasara katkıda bulunmasını önlemiştir. Şekil 6.10'daki SEM görüntülerinde, büyük daire yapılarının 4N yük altında bile bütünlüğünü koruduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, lazerle işlenmiş yüzeyler için üstün tribolojik performans sergileyen Li vd. (2010) çalışması ile literatürdeki bulgularla tutarlı bulunmuştur.

Küçük daire doku yüzeyinde Şekil 6.16'ya göre Şekil 6.17'de sürtünme katsayısında belirgin bir artış ($\mu \approx 0,70-0,75$) meydana gelmiştir. Çukurların sığ derinliği ve dar çapı, artan temas

basıncını desteklemekte yetersiz kalmıştır. Bu durum, çukurların plastik deformasyona uğrayarak işlevsel rollerini kaybetmelerine yol açmıştır. Şekil 6.4'deki hacim kaybı verileri, yük artışıyla küçük daire yüzeylerin performansının azaldığını göstermektedir.

Izgara yüzey, test süresince nispeten kararlı bir sürtünme davranışı ($\mu \approx 0,65$) sergilemektedir. Bu değer, büyük çukurlu yüzeyden daha yüksek olmasına rağmen, makul düzeydedir. Keskin oluk kesişimleri ve yüksek kenar yoğunluğu, yüksek normal basınca maruz kaldığında stres konsantrasyon bölgeleri oluşturmuştur.

Lazersiz yüzey doku 4N yük altında belirgin şekilde keskin bir artışla en yüksek sürtünme katsayısı değerlerine ($\mu \approx 0,95-1,0$) ulaşmıştır. Bu sonuç, literatürde çok sayıda çalışmayla (Kovalchenko vd., 2011; Qiao vd., 2022) örtüşmüştür. Yüzey dokularının olmaması durumunda, gerçek temas alanı artmış, bu durum eşleşen yüzeyler arasında güçlü yapışkan etkileşimleri teşvik etmiştir. Şekil 6.5'deki 3D görüntülerde lazersiz yüzeyde daha derin ve belirgin aşınma izleri gözlemlenmekte, bu da Şekil 6.4'deki en yüksek hacim kaybı değerleriyle uyumludur.



Şekil 6.17: 4N yük ve 15 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19, sırasıyla 2N ve 4N yük altında 30 dakikalık uzun süreli kuru kayma testlerinde farklı yüzey dokularının sürtünme katsayısı davranışını göstermektedir. Sonuçlar, lazerle oluşturulan yüzey tekstürlerinin takım çeliği yüzeylerinin tribolojik performansını önemli ölçüde artırdığını tutarlı bir şekilde kanıtlamaktadır.

Büyük daire çukurlu yüzey, her iki yük koşulunda da en düşük sürtünme katsayısını ($\mu \approx 0,65-0,75$) sergilemektedir. Bu üstün performans, Şekil 6.4'deki hacim kaybı verileriyle tam bir uyum içindedir. Büyük daire yüzeyleri tüm test koşullarında en düşük aşınma değerlerini göstermiştir. Bu çukurların gerçek temas alanını etkili bir şekilde azaltması, aşınma artıklarını daha iyi tutması ve temas gerilimlerini daha homojen bir şekilde yayması, üstün performansın temel nedenleridir.

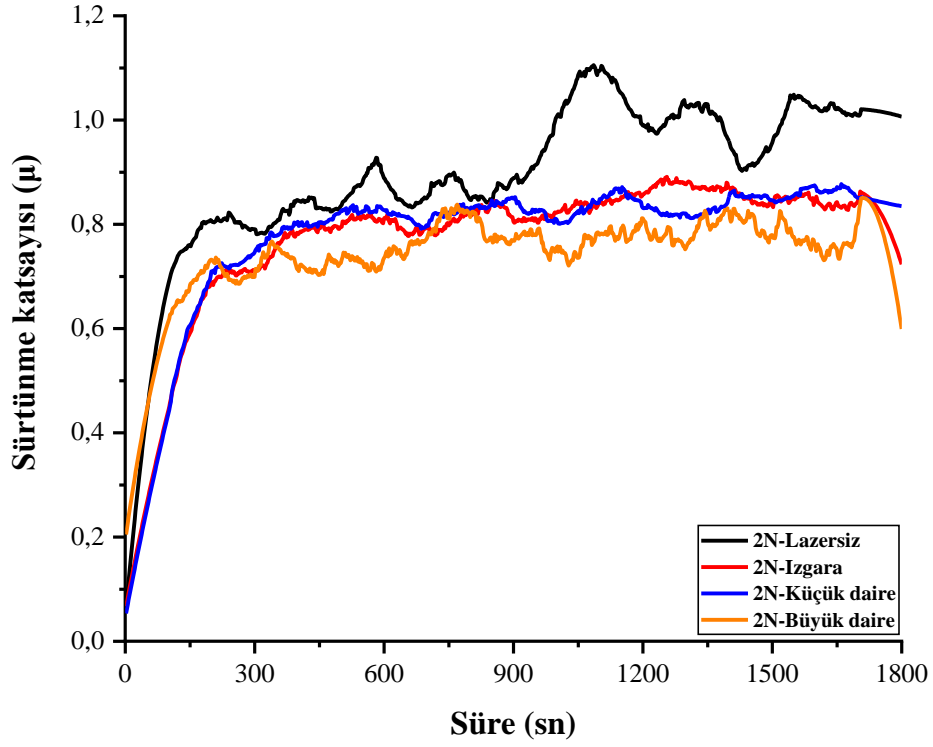
Şekil 6.6'daki 3D optik görüntüler, büyük daire yüzeylerinin lazersiz yüzeylere kıyasla belirgin şekilde daha az aşınma derinliği sergilediğini doğrulamaktadır. 4N yük altında bile büyük daire yapılarının aşınma direncini koruduğu görülmektedir. Bu bulgular, büyük çukurların uzun süreli testlerde bile işlevselliğini koruduğunu göstermektedir.

Lazersiz yüzey, her iki test koşulunda da en yüksek sürtünme katsayısını göstermiştir. Şekil 6.18'de $\mu \approx 1,0-1,1$ seviyesine, Şekil 6.19'da ise $\mu \approx 0,9$ seviyesine ulaşmıştır. Bu yüksek sürtünme, Şekil 6.4'deki en yüksek hacim kaybı değerleriyle doğrudan ilişkilidir. Mikro yapıların bulunmaması, adheziv etkileşimleri artırmış ve sürekli bir temas alanı oluşturarak arayüz kaymalarını teşvik etmiştir. Ayrıca, aşınma parçacıklarını yönetecek rezervuarların olmaması, üçüncü cisim aşınmasını hızlandırmıştır.

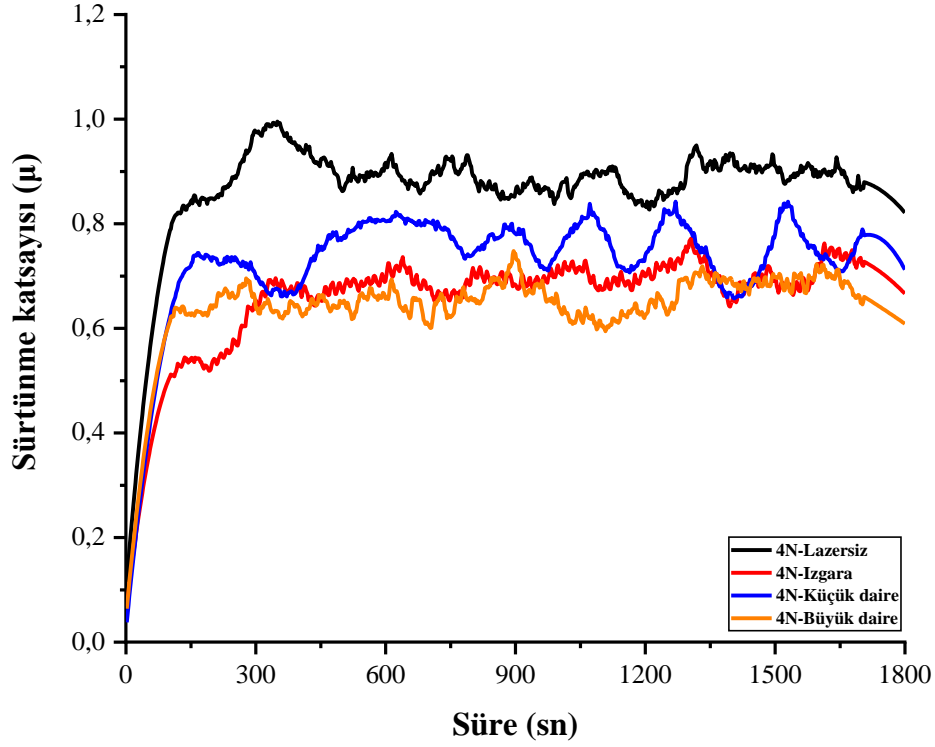
Şekil 6.11'de SEM'de gösterildiği gibi, 30 dakikalık test sonrasında bile büyük daire yapıları bütünlüğünü büyük ölçüde korurken, lazersiz yüzeylerde belirgin aşınma izleri oluşmuştur. Bu durum, dokusuz yüzeylerin herhangi bir doku olmadığında daha büyük yükler altında aşınmaya daha savunmasız olduklarını göstermiştir.

Küçük daire ve ızgara desenleri, orta düzeyde performans sergilemiştir. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da bu yüzeylerin sürtünme katsayıları $\mu \approx 0,70-0,85$ arasında değişmektedir. Bu değerler, Şekil 6.4'deki hacim kaybı sonuçlarıyla uyumludur. Küçük dokular, yük arttıkça etkinliklerini kısmen kaybetmişlerdir. Bunun sebebi çukurların aşınma kalıntıları ile dolması veya geometrilerinin kısmen deforme olması olarak değerlendirilmiştir.

Test süresinin 30 dakikaya uzaması, tüm yüzeylerde sürtünme katsayısında artışa neden olmuştur. Şekil 6.4'deki hacim kaybı verileri, test süresinin uzamasıyla aşınmanın arttığını göstermektedir ve bu durum sürtünme katsayısı artışıyla tam bir uyum içindedir. Bu artış eğilimi, zamanla aşınma kalıntılarının kademeli olarak birikmesine ve uzun süreli kayma sırasında yüzey dokusu etkinliğinin azalmasına bağlanmıştır.



Şekil 6.18: 2N yük ve 30 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.



Şekil 6.19: 4N yük ve 30 dak kayma süresi altında kuru kayma koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.

Lazer yüzey tekstür uygulanmış yüzeyler, yağlama ile birleştirildiğinde, tribolojik performansı artırmak için umut verici bir strateji sunmaktadır. Şekil 6.20 ve Şekil 6.21, sırasıyla 2N ve 4N normal yükler altında, 15 dakikalık kayma sürelerinde, MoS₂ (molibden disülfür) yağlayıcı koşullarında farklı yüzey modifikasyonları için sürtünme katsayısının (μ) zaman içindeki değişimini göstermektedir. Şekil 6.12'deki SEM görüntüleri, sürtünme katsayısı sonuçlarıyla uyumlu olarak MoS₂ yağlayıcının aşınmayı azalttığını ve büyük daire yüzeylerde daha etkili olduğunu doğrulamaktadır.

Büyük daire çukurcuklara sahip yüzey, çukurcuk rezervuarlarında MoS₂ parçacıklarını tutma yeteneğine atfedilebilen tüm test süresi boyunca en düşük ve en kararlı sürtünme katsayısını ($\mu \approx 0,10$) göstermiştir. Bu rezervuarlar, kayan arayüzde kayma gerilimini düşüren bir tribofilmin sürekli oluşumunu teşvik eden bir yağlayıcı havuzu görevi görmüştür. Bu mekanizma, optimum çukur yoğunluğunun MoS₂ tutulmasını artırdığı ve yüksek sıcaklıklar ve uzun süreli kayma altında etkinliğini uzattığı Gachot vd. (2017) bulgularıyla uyumlu bulunmuştur. Şekil 6.8'deki 3D optik görüntüler, hacim kaybı değerleriyle (Şekil 6.7) uyumlu olarak, lazersiz yüzeylere kıyasla büyük daire yüzeylerde aşınmanın minimum düzeyde kaldığını göstermektedir.

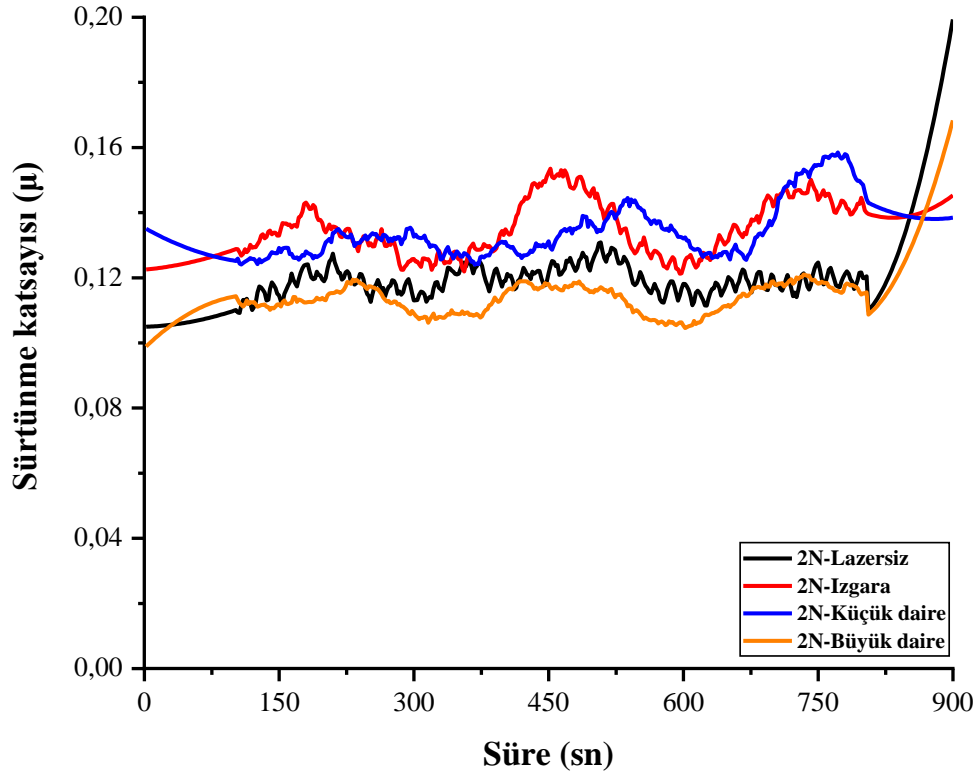
Şekil 6.21'de gösterilen 4N normal yük altındaki sonuçlar, artan yük etkisiyle daha belirgin performans farklılıkları ortaya koymaktadır. Büyük daire yüzey 300-700 sn aralığında belirgin biçimde diğer yüzeylerden ayrılarak, özellikle 500-600 sn aralığında sürtünme katsayısını $\mu \approx 0,08$ seviyelerine kadar düşürmektedir. Bu sonuç, büyük çukurların yüksek gerilim altında bile yağlayıcı filmin bütünlüğünü koruma ve üçüncü cisim aşınmasını geciktirme kapasitesini göstermektedir. Diğer yüzeyler ise benzer sürtünme davranışları ile yaklaşık $\mu \approx 0,12-0,13$ seviyelerinde ilerlemiştir. Şekil 6.7'deki hacim kaybı verileri, sürtünme katsayısı grafiklerindeki performans sıralamasını doğrulamakta ve büyük daire yüzeyin tüm test koşullarında en düşük aşınma gösterdiğini kanıtlamaktadır.

Lazersiz yüzey, her iki yük koşulunda da istikrarlı ancak göreceli olarak yüksek sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0,12-0,13$) sergilemektedir. Bu bulgu, Şekil 6.7'deki en yüksek hacim kaybı değerleriyle ve Şekil 6.8'deki 3D optik görüntüler ile doğrulanmaktadır. Yüzey dokusu olmaması, MoS₂ tutunumunu zayıflatmış ve metal-metal temasını artırmıştır. Bu davranış, Adeyemi vd. (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer şekilde rapor edilmiştir. Bu çalışmalarda mikro yapıları olmayan lazersiz seramik veya metal yüzeyler kuru veya sınır koşullarında kararlı yağlamayı devam ettirememiştir.

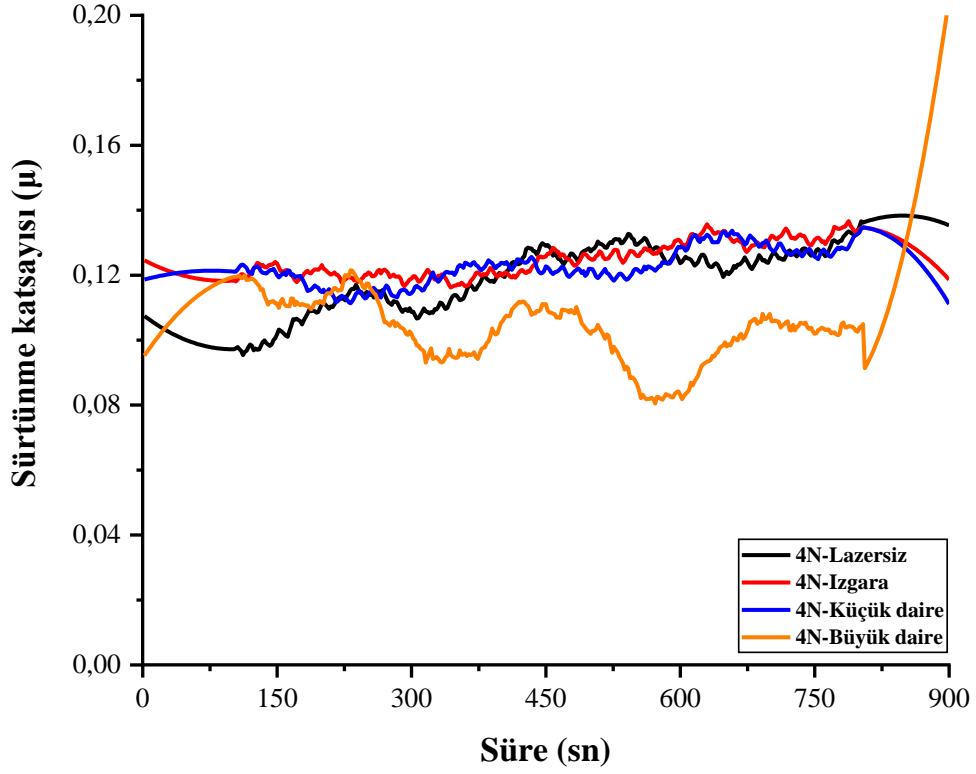
Küçük daire ve ızgara desenleri, Şekil 6.20'de özellikle test süresinin 450-800 sn aralığında daha yüksek sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0,13-0,15$) ile orta düzeyde performans sergilemiştir. Bu değerler, Şekil 6.7'deki hacim kaybı sonuçlarıyla uyumludur. Mikro dokular MoS₂'yi tutmada bir miktar fayda sağlayabilmiş, ancak çukurların sığ derinliği ve ızgara deseninin keskin kenarlı geometrisi nedeniyle etkinlikleri sınırlı kalmıştır. Özellikle, ızgara deseninin kesişen çizgileri, yerel alanlarda daha yüksek gerilim konsantrasyonuna sebep olabilmiş ve kayma esnasında yüzeyin kesilme hasarına daha duyarlı hale gelmesine neden olabilmıştır. Bu etki benzer şekilde Gachot vd. (2017) tarafından vurgulanmış keskin kenarlı mikro dokuların yüke maruz kaldığında yüzey bütünlüğünü olumsuz etkileyebileceğini belirtmişlerdir.

Şekil 6.21'de 4N yük altında diğer yüzeylerin (lazersiz, ızgara, küçük daire) performansları benzer seviyede ($\mu \approx 0,12-0,13$) ilerlemektedir. Bu durum, Şekil 6.12'deki test sonrası SEM görüntüleriyle uyumludur; artan yük altında küçük dokular etkinliklerini kısmen kaybetmektedir.

Her iki grafikteki dikkat çekici ortak nokta, test süresinin sonlarına doğru (800-900 sn) tüm yüzeylerde sürtünme katsayısında artış eğilimi gözlenmesidir. Bu artış, Şekil 6.7'deki tüm koşullarda test süresi artışıyla gözlenen hacim kaybı artışıyla uyumludur. Bu durum, uzun süreli kayma sonucunda yağlayıcı film etkinliğinin azalması veya aşınma kalıntılarının birikmesiyle açıklanabilir. Ancak büyük daire yüzeylerin her iki yük koşulunda da gösterdiği tutarlı üstünlük, doku geometrisinin yağlayıcı tutma özelliğini, tribofilm oluşumunu ve temas mekaniğini doğrudan etkilediğini kanıtlamaktadır. MoS₂'nin katmanlı yapısı ve düşük kesme direnci sürtünmeyi azaltmada etkilidir, ancak bu etki tasarlanmış yüzey rezervuarları içinde tutulduğunda maksimum verime ulaşmaktadır. Sonuç olarak, büyük daire yüzeyler MoS₂ yağlayıcı koşullarında en iyi tribolojik performansı göstermiştir.



Şekil 6.20: 2N yük ve 15 dak kayma süresi altında MoS₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.



Şekil 6.21: 4N yük ve 15 dak kayma süresi altında MoS₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.

Şekil 6.22'de 2N yük altında ve 30 dakikalık kayma test süresinde MoS₂ yağlamalı lazer tekstür yüzeylerinin sürtünme katsayısına etkisi görülmektedir. Tüm dokulu yüzeyler, lazersiz yüzeylere göre sürtünme katsayısında belirgin bir azalmaya neden olmuştur. Bu durum, Şekil 6.13'de gösterilen SEM görüntülerinde de açıkça görülmektedir. MoS₂ yağlayıcı varlığında lazersiz yüzeylerde bile aşınma izlerinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Büyük daire çukurcuklara sahip yüzey, çukurcuk rezervuarlarında MoS₂ parçacıklarını tutma yeteneğine atfedilebilen en düşük ve en kararlı sürtünme katsayısını ($\mu \approx 0,10$) göstermiştir. Şekil 6.9'daki 3D optik görüntülerdeki minimum aşınma derinliğiyle doğrulanmaktadır. Şekil 6.13'de SEM görüntülerinde görüldüğü gibi, büyük daire yüzeyler kayma sonrasında bile yapısal bütünlüğünü korumuş ve çukurların etrafında MoS₂ birikimi oluşmuştur. Bu rezervuarlar, kayan arayüzde kayma gerilimini düşüren bir tribofilmin sürekli oluşumunu teşvik eden bir yağlayıcı havuzu görevi görmüştür. Bu mekanizma, optimum çukur yoğunluğunun MoS₂ tutulmasını artırdığı ve yüksek sıcaklıklar ve uzun süreli kayma altında etkinliğini uzattığı Li vd. (2010) bulgularıyla uyumlu bulunmuştur.

Şekil 6.22'de gözlemlenen sürtünme katsayısındaki ilk zirve ve ardından gelen stabilizasyon

(0-300 sn arası), sınır yağlamasından yağlayıcı transferi tarafından yönetilen bir davranış sergilemiş, yağlayıcının etkili tutulması sayesinde kalıcı bir düşük kayma gerilimli ara yüzeyin oluştuğunu göstermiştir. Buna karşın lazersiz yüzey, 1800 saniyeye kadar uzayan test süresi boyunca yüksek bir sürtünme katsayısını ($\mu \approx 0,13$) sürdürmüştür. Şekil 6.9'daki 3D aşınma görüntüleri, bu sürtünme davranışı farkını destekleyecek şekilde, lazersiz yüzeylerde yaklaşık 0,6 μm derinliğinde aşınma izleri gösterirken, büyük daire yüzeylerde aşınma derinliğinin çok daha az olduğunu kanıtlamaktadır. Yüzey dokusu olmayan numunelerde, zayıf yağlayıcı tutunumu ve yetersiz aşınma kalıntısı yerleşimi, metal-metal temasını ve güçlü adheziv etkileşimleri artırmıştır. Bu davranış, Xing vd. (2017) ile Kovalchenko vd. (2011) çalışmalarında da rapor edilmiştir; mikro yapıları olmayan lazersiz yüzeyler sınır koşullarında kararlı yağlamayı sürdürememiştir. Şekil 6.7'deki hacim kaybı sonuçları da lazersiz yüzeyin en yüksek aşınma değerlerine sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Şekil 6.22'de görülen ve Şekil 6.7'deki hacim kaybı grafiğinde doğrulanan sonuçlara göre, küçük daire ve ızgara desenleri, orta düzeyde sürtünme performansı sergilemiştir. Mikro dokular MoS_2 'yi tutmada bir miktar fayda sağlayabilmiş, ancak çukurların sığ derinliği ve ızgara deseninin keskin kenarlı geometrisi nedeniyle etkinlikleri sınırlı kalmıştır. Özellikle, ızgara deseninin kesişen çizgileri, yerel alanlarda daha yüksek gerilim konsantrasyonuna sebep olabilmiş ve kayma esnasında yüzeyin kesilme hasarına daha duyarlı hale gelmesine neden olabilmektedir. Bu etki benzer şekilde Gachot vd. (2017) diğerleri tarafından vurgulanmış, keskin kenarlı mikro dokuların yüke maruz kaldığında yüzey bütünlüğünü olumsuz etkileyebileceğini belirtmişlerdir.

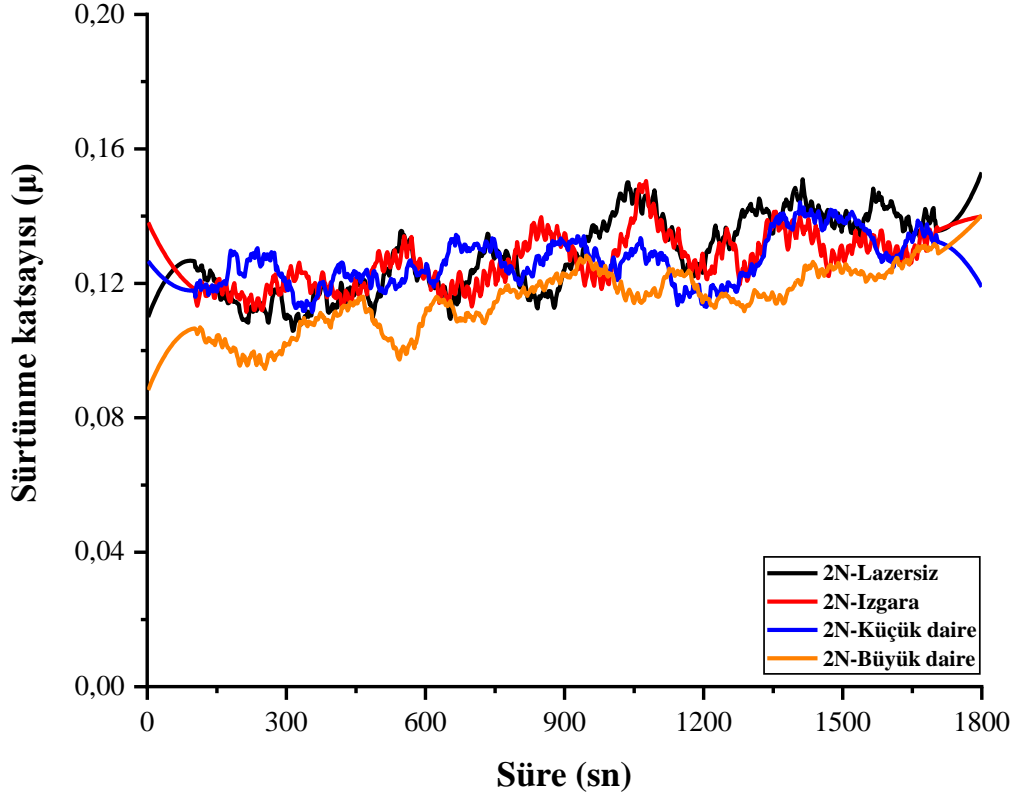
Şekil 6.23'de 4N yük altında tüm yüzeyler başlangıçta benzer sürtünme katsayıları ($\mu \approx 0,11-0,12$) sergilemekte, ancak test ilerledikçe (600-1500 sn arası) performans farklılıkları belirginleşmektedir. Özellikle büyük daire yüzey, en düşük ve en kararlı sürtünme katsayısının $\mu \approx 0,10$ seviyesinde kararlı bir davranış göstermiştir. Şekil 6.7'deki hacim kaybı verileri de bu üstünlüğü doğrulamaktadır. Bu durum öncelikle kayma işlemi boyunca etkili yağlayıcı rezervuarları olarak işlev gören daha derin çukurlar içindeki MoS_2 parçacıklarının gelişmiş tutulmasına ve dağıtımına atfedilmiştir. Bu rezervuarlar, tribolojik olarak aktif bir filmin sürekli oluşumunu kolaylaştırmış, arayüz kaymasını azaltmış ve yüksek gerilim altında bile kararlı bir düşük sürtünme katsayısı rejimini korumuştur.

Şekil 6.23'de dikkat çekici bir bulgu olarak ve Şekil 6.13'deki SEM görüntülerinde de

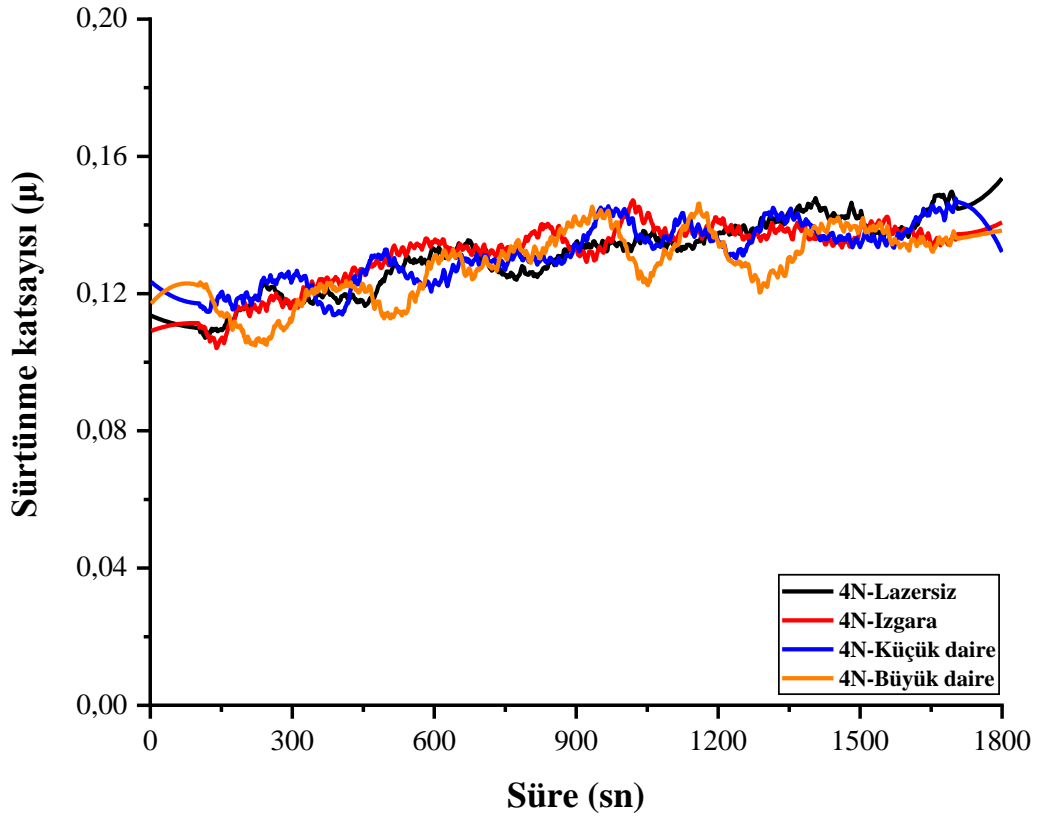
doğrulandığı gibi, lazersiz yüzey 4N yük altında 2N'dan daha kötü performans sergilemiş ve $\mu \approx 0,135$ 'i aşan sürtünme katsayısına sahip olmuştur. Şekil 6.9'daki 3D görüntülerde, 4N yük altında lazersiz yüzeylerdeki aşınma derinliğinin arttığı, buna karşın büyük daire yüzeylerde sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu yüzey üzerindeki MoS₂, yüksek kesme ve termal etkilere maruz kaldığı için hızla tükenmiş ve yağlayıcının hapsedilip tutulacağı yüzey özellikleri olmadığından, partiküller kararlı bir tribofilm oluşturamamıştır. Bu durum, dengesiz arayüz temasına ve hızlı üçüncü cisim aşınmasına neden olmuştur. Benzer bulgular, Li vd. (2010) Ni esaslı kompozitler üzerinde yaptıkları çalışmada açıklanmıştır; burada bu tür tutma yapılarının eksikliği, yüksek yük ve sıcaklık koşulları altında MoS₂ yağlamasının kullanım ömrünü önemli ölçüde azaltmıştır.

Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'de küçük daire ve ızgara yüzeyleri orta düzeyde performans sergilemektedir. Bu durum, Şekil 6.7'deki hacim kaybı sonuçlarıyla tam bir uyum içindedir. Bu yüzeyler lazersiz yüzeyden daha iyi ancak büyük daire yüzeyinden daha kötü performans göstermektedir.

Şekil 6.22 ve Şekil 6.23 karşılaştırıldığında, uzun süreli testlerde büyük daire yüzeyin üstünlüğü açıkça görülmektedir. Şekil 6.7'deki hacim kaybı verileri, büyük daire yüzeyinin tüm test koşullarında en düşük aşınma değerlerini gösterdiğini doğrulamaktadır. Sonuç olarak, uzun süreli MoS₂ yağlayıcı testlerinde büyük daire yüzeyler, çukurların yağlayıcıyı etkili şekilde hapsetme kapasitesi sayesinde en üstün tribolojik performansı göstermiştir. Bu sonuç, yüzey tekstür geometrisinin ve boyutunun, tribolojik uygulamalarda uzun vadeli performans için kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 6.22: 2N yük ve 30 dak kayma süresi altında MoS₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.



Şekil 6. 23: 4N yük ve 30 dak kayma süresi altında MoS₂ yağlayıcı koşullarında farklı yüzey tekstürlerinin sürtünme katsayısı davranışı.

Şekil 6.24'de, kuru kayma koşulları altında iki farklı yük (2N ve 4N) ve iki farklı kayma süresi (15 dakika ve 30 dakika) için ölçülen ortalama sürtünme katsayısı değerleri gösterilmiştir. Genel olarak, lazersiz yüzeyler tüm test koşullarında tutarlı bir şekilde en yüksek sürtünme katsayısı değerleri sergilemiştir. Bu durum sürtünmeyi azaltmada yüzey dokusunun kritik rolünü doğrulamıştır. Bu sürtünme davranışı, lazer yüzey tekstür geometrisinin özellikle kuru sınır koşulları altında sürtünme katsayısının değişimini önemli ölçüde düzenlediğini gösteren Gachot vd. (2017) tarafından bildirilen gözlemlerle uyumlu bulunmuştur. Bu sonuçlar, Şekil 6.4'deki hacim kaybı verileriyle tam bir uyum içindedir; her iki grafikte de lazersiz yüzeyler en yüksek, büyük daire yüzeyleri ise en düşük değerleri sergilemektedir.

Lazersiz yüzey, 2N yük altında ve 15 dakika kayma süresi boyunca en yüksek sürtünme katsayısı değeri 0,89 μ elde edilmiştir. Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'deki SEM görüntülerinde görüldüğü gibi, lazersiz yüzeylerde belirgin aşınma izleri oluşmuştur. Bu yüksek sürtünme, artan gerçek temas alanına ve doku kaynaklı gerilim konsantrasyonu yeniden dağılımının olmamasına bağlanabilmektedir. Dikkat çekici bir şekilde, sürtünme katsayısı her iki yükleme koşulu için de artan test süresiyle birlikte azalan bir eğilim göstermiştir, bu durum da kaymayı kolaylaştıran bir tribo tabakanın oluşumunu düşündürmüştür.

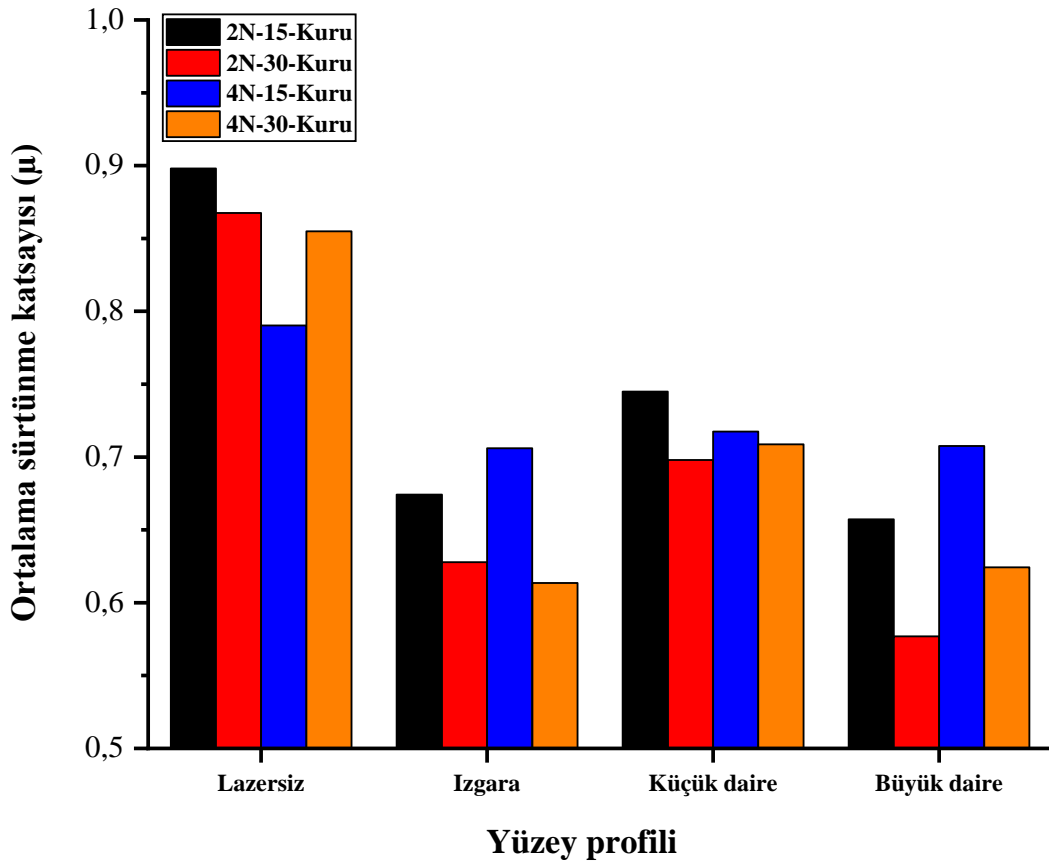
Izgara yüzeyler, lazersiz yüzeye kıyasla önemli ölçüde azaltılmış sürtünme katsayıları sergilemiş, değerleri 0,61 ila 0,71 arasında ölçülmüştür. Bu yüzeyler 4N yük ve 30 dakika kayma süresi koşulları altında en düşük sürtünme katsayısı değerini ($\mu \approx 0,61$) göstermiştir. Bu azalma, Şekil 6.4'deki hacim kaybı verilerindeki azalmayla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca temas alanının azalması ve ızgara deseninin çöküntüler içindeki aşınma kalıntılarının sıkışmasıyla açıklanabilmektedir.

Küçük daire yüzeyler için, sürtünme katsayısı değerleri lazersiz yüzeye kıyasla orta derecede azalmış ($\mu \approx 0,70-0,74$) ancak ızgara yüzey konfigürasyonundan daha yüksek elde edilmiştir.

Dokulu yüzeyler arasında, büyük dairesel çukur dokusu en düşük sürtünme katsayısı değerini göstermiş, bu sonuç gerçek temas alanını en aza indirme ve aşınma kalıntılarını

hapsetmedeki etkinliğini vurgulamıştır. Büyük dairesel dokulu yüzeyde 2N yük altında ve 30 dakikalık kayma süresi boyunca kuru kayma koşulları altında en düşük ortalama sürtünme katsayısı 0,58 μ değerinde gözlemlenmiştir. Bu üstün performans, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki 3D aşınma görüntülerinde açıkça görülmektedir. Büyük daire yüzeyleri minimum aşınma derinliği sergilemektedir.

Şekil 6.24'de görülen yük ve test süresindeki artışın sürtünme üzerindeki etkisi, Şekil 6.4'deki hacim kaybı değişimleriyle paralellik göstermektedir. Her iki grafikte de yük ve süre artışı, aşınma ve sürtünmede artışa neden olmaktadır. Bu durum, uzun süreli ve yüksek yüklü kayma sırasında yüzey hasarının birikmesi ve yoğunlaşan abrasiv etkileşimlerle açıklanabilir. Büyük dairesel yüzey dokusu, sürekli yüzey etkileşiminin kesintiye uğraması ve aşınma sırasında oluşan döküntülerinin tutulmasının kolaylaştırılması yoluyla sürtünmeyi azaltmadaki çukurların rolünü vurgulayan literatürdeki bulgularla örtüşmüştür (Chen ve Tang, 2024).



Şekil 6.24: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin kuru kayma koşullar altında sürtünme katsayısı performansı.

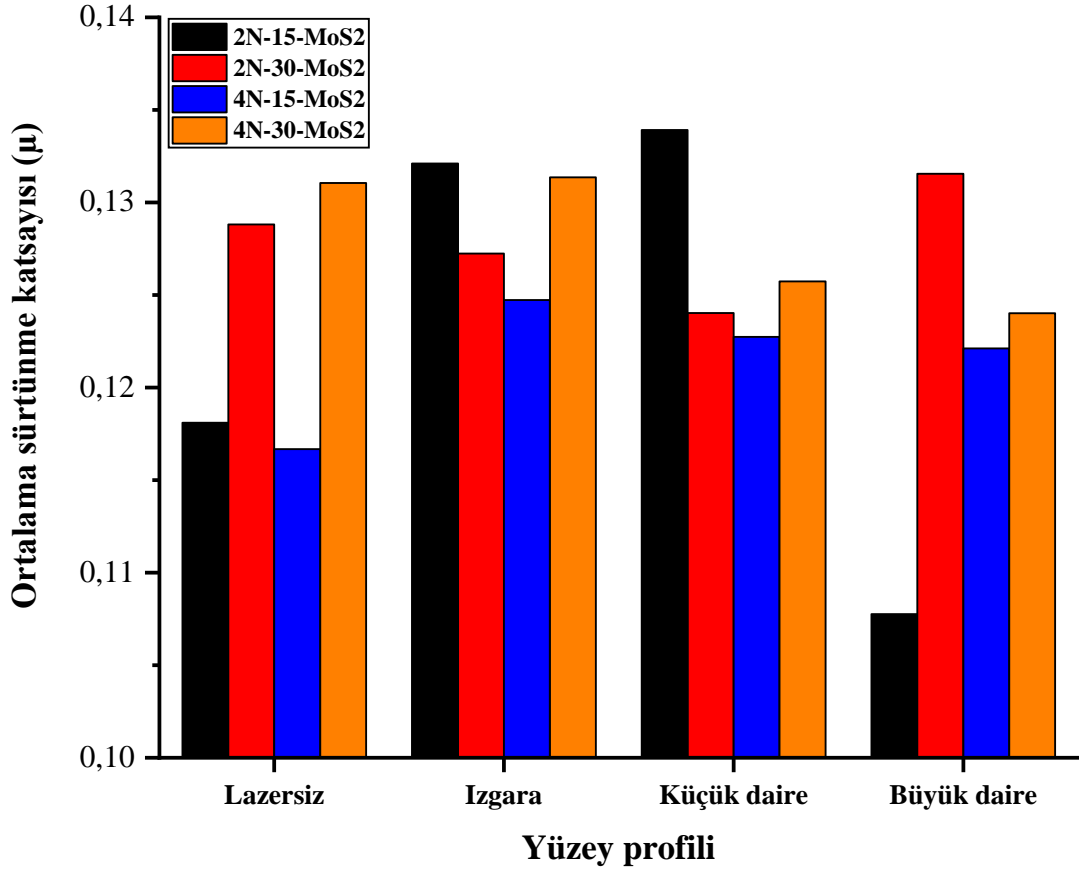
Şekil 6.25, iki farklı yük (2N ve 4N) ve iki farklı kayma süresi (15 dakika ve 30 dakika) için MoS₂ ile yağlanmış koşullar altında aşınma sonucu elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri gösterilmektedir. MoS₂'nin bir yağlayıcı olarak tanıtılması, tüm yüzey profillerindeki sürtünme katsayılarını önemli ölçüde azaltmıştır. Lazersiz yüzeyler için, sürtünme katsayısı kuru koşullar altında yaklaşık 0,79-0,90 μ 'dan MoS₂ yağlamasıyla 0,117-0,132 μ 'na düşmüştür ve bu da %85-87'lik etkileyici bir azalmayı temsil etmektedir. Bu önemli azalma, Holmberg ve Matthews (2009) tarafından bildirildiği gibi, katmanlar arasındaki zayıf van der Waals bağları aracılığıyla kayan yüzeyler arasında kolay kesmeyi kolaylaştıran MoS₂'nin lameller yapısına atfedilebilir.

Izgara yüzeyler için, MoS₂ yağlaması altındaki sürtünme katsayısı değerleri 0,125 μ ile 0,132 μ arasında değişmiş olup, kuru kayma muadillerine (0,61-0,71 μ) kıyasla %77-82'lik önemli bir azalmayı temsil etmektedir. Doku geometrisi ve yağlama arasındaki sinerjik etki özellikle belirgindir, çünkü ızgara yüzeyler muhtemelen yağlayıcı için mikro ölçekli rezervuarlar olarak hizmet ederek, test süresi boyunca kayan ara yüzeyde MoS₂'nin sürekli olarak yenilenmesini sağlamıştır.

Küçük dairesel yüzeyler MoS₂ yağlaması altında 0,123 ile 0,134 μ arasında sürtünme katsayıları sergilemiş olup, kuru koşullara (0,69-0,74 μ) kıyasla %78-82'lik bir azalmayı temsil etmektedir. Doku-yağlayıcı etkileşimi, kayan temas sırasında yağlayıcı parçacıklarını tutma ve dağıtmada dairesel geometrilerin etkinliğini göstermektedir. Bu mekanizma, Etsion'ın (2004) yağlanmış temaslarda yüzey dokulandırmasının rolüne ilişkin bulgularıyla uyumludur.

Büyük dairesel dokulu yüzeyde 2N yük altında ve 15 dakikalık kayma süresi boyunca MoS₂ ile yağlanmış koşullar altında en düşük ortalama sürtünme katsayısı 0,109 μ değeri elde edilmiştir. Bu durum Şekil 6.7'deki hacim kaybı verileriyle tam bir uyum içindedir. Karşılaştırıldığında, aynı yüzey aynı kuru kayma koşulları altında 0,68 μ 'lük önemli ölçüde daha yüksek bir ortalama sürtünme katsayısı sergilemiştir. Bu durum MoS₂ yağlayıcının kullanımı ile ortalama sürtünme katsayısında %84'lük bir azalma elde edilmiştir. Bu düşüş, Şekil 6.8'deki 3D aşınma görüntülerindeki belirgin farklılıklarla doğrulanmaktadır. Yağlanmış ortamda sürtünme katsayısı değerleri genellikle kuru koşullardan daha düşüktür, bu durum MoS₂'nin bir yağlayıcı olarak etkinliğini yansıtmaktadır. Büyük dairesel yüzeyler, geliştirilmiş yağlayıcı tutma kabiliyetleri nedeniyle en düşük sürtünme katsayısı değerlerini

koruyarak üstün sürtünme performansı sergilemektedir. Üstün performans, daha önce Rapoport vd. (2008) tarafından yapılan araştırmalarda gösterildiği gibi, kayma sırasında temas bölgesine kademeli olarak MoS₂ salan etkili rezervuarlar görevi gören daha büyük çukurların geliştirilmiş yağ tutma kapasitesine atfedilebilir. Yağlanmış koşullarda, yük ve test süresindeki değişikliklerin sürtünme davranışı üzerinde nispeten küçük bir etkisi olduğu açıktır; bu durumun, MoS₂'nin etkili film oluşturma ve yük taşıma yeteneklerine bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu durum, Şekil 6.13'deki SEM görüntülerinde görülen minimum aşınma izleriyle tutarlıdır. Ayrıca, büyük çukur geometrisi ile yağlayıcının davranışı arasındaki sinerjik etki ile açıklanabilir, çünkü çukurlar etkili yağlayıcı rezervuarları olarak hizmet eder ve kayma sırasında temas bölgesine kademeli olarak MoS₂ salar, bu daha önce Rahnejat vd. (2006) tarafından açıklanan bir mekanizma olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 6.25: AISI D2 çeliğinde farklı yüzey profillerinin MoS₂ yağlayıcı koşullar altında sürtünme katsayısı performansı.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AISI D2 takım çeliği üzerinde oluşturulan farklı yüzey tekstürlerinin (ızgara, küçük daire ve büyük daire) tribolojik davranışları sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, hem kuru kayma koşullarında hem de MoS₂ yağlayıcı varlığında, farklı yükler (2N ve 4N) ve kayma süreleri (15 ve 30 dakika) altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Lazerle yüzey modifikasyonu, AISI D2 takım çeliğinin aşınma direncini ve sürtünme özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Tüm lazer tekstür desenli yüzeyler, lazersiz yüzeye kıyasla daha düşük hacim kaybı ve sürtünme katsayısı sergilemiştir.
- Kuru kayma koşullarında, büyük daire deseni en üstün tribolojik performansı göstermiştir. 2N yük altında ve 15 dakikalık kayma süresi koşulunda $0,647 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ hacim kaybı değeri, lazersiz yüzeye kıyasla ($0,801 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) %19'luk bir azalma sağlamıştır. Bununla birlikte, sürtünme katsayısında 0,68 μ ile 0,90 μ arasında %24'lük bir düşüş gözlenmiştir.
- MoS₂ yağlayıcı kullanımı, tüm yüzeylerde tribolojik performansı önemli ölçüde iyileştirmiştir. Lazersiz yüzeyde bile hacim kaybı, kuru kayma koşullarına kıyasla %82-83 oranında azalmıştır. En belirgin iyileşme, büyük daire desenli yüzeyde gözlenmiş, kuru kayma koşullarına kıyasla hacim kaybında %84-85'lik bir azalma sağlanmıştır.
- Lazersiz yüzeylerde, SEM analizleri adheziv aşınma ve mikropullanmanın başlangıçta baskın olduğunu, uzun süreli kayma ile iki ve üç gövdeli aşınmaya dönüştüğünü göstermiştir. Aşınma derinliği 2N yükte 2-2,5 μm iken, 4N yükte 4 μm 'ye ulaşmıştır. MoS₂ varlığında ise aşınma derinliği önemli ölçüde azalarak 0,4-0,6 μm seviyelerine düşmüştür.
- Büyük daire desenli yüzeylerin üstün tribolojik performansı, aşınma kalıntılarını etkili şekilde hapsetme ve yağlayıcıyı depolama kabiliyetlerine bağlanmıştır. Bu durum, SEM ve 3D optik profilometre analizleriyle doğrulanmıştır. Büyük çukurlar, en üstün yüzey tasarımını temsil etmekte olup, optimal rezervuar kapasitesi sağlamaktadır.

- Küçük daire deseni ve ızgara deseni, orta düzeyde tribolojik performans sergilemiştir. Izgara deseni, aşınma kalıntılarının tahliyesini kolaylaştırırken, küçük daire deseni temas gerilimlerini daha düzenli dağıtmıştır.
- Artan yük (2N'den 4N'e) ve test süresi (15'ten 30 dakikaya), tüm yüzeylerde hacim kaybını artırmıştır. Ancak lazer tekstürlü yüzeyler, yüksek yük koşullarında daha az etkilenmiştir. Bu durum, lazer tekstürünün aşınma mekanizmalarını değiştirerek yüzey dayanımını artırdığını göstermiştir.
- Sürtünme katsayısı analizlerinde, büyük daire deseninin en düşük değerleri sergilediğini göstermiştir. Kuru kayma koşullarında 0,58-0,68 μ , MoS₂ varlığında ise 0,109-0,112 μ değerleri ölçülmüştür. MoS₂ varlığında önemli ölçüde düşüş (%84), yağlayıcının lazer tekstürüyle sinerjik etkileşimini doğrulamıştır.
- EDS analizleri, MoS₂ yağlayıcı testlerde tribofilm oluşumunu doğrulamıştır. Büyük daire desenli yüzeylerde Mo elementi dağılımı, çukurlarda etkili MoS₂ tutulumunu göstermiştir.
- En etkili tribolojik performans, büyük daire desenli yüzey ve MoS₂ yağlayıcı sürecinde, 2N yük ve 15 dakikalık kayma süresi koşullarında uygulanmasıyla elde edilmiştir. Bu ideal test parametreleri, tüm deneysel koşullar arasında en düşük hacim kaybı (0,106 $\times 10^{-3}$ mm³) ve minimum sürtünme katsayısı (0,109 μ) değerlerini sağlamıştır.

Bu çalışma, lazerle yüzey modifikasyonu ve yağlayıcı kullanımının, AISI D2 takım çeliğinin tribolojik performansını geliştirmede etkili bir strateji olduğunu göstermiştir. Büyük daire desenli çukurlar, aşınma kalıntılarını hapsedme ve yağlayıcı tutma kapasiteleri sayesinde üstün tribolojik özellikler sergilemiştir. Bu bulgular, takım çeliklerinde aşınma direncini artırmak için yüzey tekstür tasarımı ve yağlama stratejilerine yönelik pratik endüstriyel uygulamalar için yol gösterici niteliktedir.

Bu çalışmanın sonuçları doğrultusunda, gelecekteki araştırmalar ve endüstriyel uygulamalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Büyük daire deseninin optimum performans gösterdiği tespit edilmiş olup, çukur çapı, derinliği ve dağılımının daha ince ayarlarla optimize edilmesi, tribolojik performansı daha da artırabilir.

- Yüksek sıcaklık koşulları altında, tekstürlü yüzeyler ve MoS₂ yağlayıcının performansı incelenebilir.
- MoS₂ dışında grafit veya PTFE gibi diğer yağlayıcılarla karşılaştırmalı testler yapılarak, her bir yağlayıcının tekstürlü yüzeylerle etkileşimi değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Adeyemi, K., Sun, B., Xue, W., Liu, W. ve Cao, Y. (2021). Friction and wear characteristics modification via laser surface textured grooves. *Surface Engineering*, 37(5), 658-668.
- Amanov, A., Karimbaev, R., Li, C. ve Wahab, M. A. (2023). Effect of surface modification technology on mechanical properties and dry fretting wear behavior of Inconel 718 alloy fabricated by laser powder-based direct energy deposition. *Surface and Coatings Technology*, 454, 129175.
- Archard, J. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981-988.
- Bhushan, B. (2013). Principles and applications of tribology: John Wiley & Sons.
- Chen, K. ve Tang, Y. (2024). Research Progress on the Design of Surface Texture in Tribological Applications: A Mini-Review. *Symmetry*, 16(11), 1523.
- Daodon, W. ve Saetang, V. (2023). Improvement of frictional property of AISI D2 tool steel surface against JIS SPFC 980Y advanced high-strength steel by using laser texturing process. *Lubricants*, 11(2), 68.
- Das, D., Dutta, A., Toppo, V. ve Ray, K. (2007). Effect of deep cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behavior of D2 steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(4), 474-480.
- Demircan, Y., Gemici, S. ve Sert, A. (2021). Laser Surface Texturing and Techniques to Improve the Tribological Properties of Materials. *Open Journal of Nano*, 6(2), 41-58.
- Dobrzański, L., Jonda, E., Lukaszewicz, K., Labisz, K. ve Klimpel, A. (2008). Surface modification of the X40CrMn5-1 steel by laser alloying and PVD coatings deposition. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 27(2), 179-182.
- Dzhemelinskyi, V., Hruska, M., Mordyuk, B., Grochala, D. ve Lesyk, D. (2024). Surface Hardness Improvement of AISI D2 Tool Steel by Laser Transformation Hardening Process Using High-Power Disk Laser *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (pp. 178-187): Springer.
- Etsion, I. (2004). Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing. *Tribology Letters*, 17, 733-737.
- Etsion, I. (2005). State of the art in laser surface texturing. *Journal of Tribology*, 127(1), 248-253.
- Fan, K., Chen, X., Wang, X., Liu, X., Liu, Y., Lai, W. ve Liu, X. (2018). Toward excellent tribological performance as oil-based lubricant additive: particular tribological behavior of fluorinated graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(34), 28828-28838.

- Ferreira, D. F., Vieira, J. S., Rodrigues, S., Miranda, G., Oliveira, F. J. ve Oliveira, J. M. (2022). Dry sliding wear and mechanical behaviour of selective laser melting processed 18Ni300 and H13 steels for moulds. *Wear*, 488, 204179.
- Fotovvati, B., Dehghanhadikolaei, A. ve Namdari, N. (2021). Laser-Assisted coating techniques and surface modifications: A short review. *Particulate Science and Technology*, 39(6), 738-747.
- Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S. ve Costa, H. (2017). A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*, 372, 21-41.
- Hamilton, G. M. ve Goodman, L. (1966). The stress field created by a circular sliding contact. *Journal of Applied Mechanics*, 33(2), 371-376.
- Holmberg, K. ve Matthews, A. (2009). *Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering* (Vol. 56): Elsevier.
- Hu, T., Zhang, Y. ve Hu, L. (2012). Tribological investigation of MoS₂ coatings deposited on the laser textured surface. *Wear*, 278, 77-82.
- Hutchings, I. ve Shipway, P. (2017). *Tribology: friction and wear of engineering materials*: Butterworth-Heinemann.
- Jegadheesan, C., Somasundaram, P., Praveen Kumar, S., Vivek Anand, A. ve Jeyaprakash, N. (2023). State of art: Review on laser surface hardening of alloy metals. *Materials Today: Proceedings*.
- Jeon, M.-S., Park, S.-Y., Cho, Y.-H., Baek, M., Kim, H.-S. ve Lee, K.-A. (2025). High-Strength D2 tool steel via material extrusion additive manufacturing and post-heat treatment. *Materials & Design*, 114070.
- Jervis, T., Nastasi, M., Griffin Jr, A., Zocco, T., Taylor, T. ve Foltyn, S. (1997). Tribological effects of excimer laser processing of tool steel. *Surface and Coatings Technology*, 89(1-2), 158-164.
- Kaba, M., Filiz, H., Cui, Z., Baydogan, M., Cimenoglu, H. ve Alpas, A. (2024). Microstructural effects on impact-sliding wear mechanisms in D2 steels: The roles of matrix hardness and carbide characteristics. *Wear*, 538, 205224.
- Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A. ve Fenske, G. (2011). Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact. *Wear*, 271(9-10), 1719-1725.
- Kumar, M., Ranjan, V. ve Tyagi, R. (2020). Effect of shape, density, and an array of dimples on the friction and wear performance of laser textured bearing steel under dry sliding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29, 2827-2838.
- Kumar, R., Rezapourian, M., Rahmani, R., Maurya, H. S., Kamboj, N. ve Hussainova, I. (2024). Bioinspired and multifunctional tribological materials for sliding, erosive, machining, and energy-absorbing conditions: a review. *Biomimetics*, 9(4), 209.
- Kurella, A. ve Dahotre, N. B. (2005). Surface modification for bioimplants: the role of laser

- surface engineering. *Journal of Biomaterials Applications*, 20(1), 5-50.
- Küçük, Y., Altaş, E., Bahar, H. ve Gök, M. (2024). Effect of Laser Surface Texturing Process on Dry Sliding Wear Behavior of NiTi Shape Memory Alloy Used in Airplane. *Journal of Aviation*, 8(3), 229-234.
- Lesyk, D., Martinez, S., Mordyuk, B., Dzhemelinskyi, V., Lamikiz, A., Prokopenko, G. ve Grinkevych, K. (2017). Microstructure related enhancement in wear resistance of tool steel AISI D2 by applying laser heat treatment followed by ultrasonic impact treatment. *Surface and Coatings Technology*, 328, 344-354.
- Li, J., Xiong, D., Dai, J., Huang, Z. ve Tyagi, R. (2010). Effect of surface laser texture on friction properties of nickel-based composite. *Tribology International*, 43(5-6), 1193-1199.
- Li, K., Yao, Z., Hu, Y. ve Gu, W. (2014). Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication. *Tribology International*, 77, 97-105.
- Li, Y., Zhou, Z. ve He, Y. (2023). Solid lubrication system and its plasma surface engineering: a review. *Lubricants*, 11(11), 473.
- Libório, M., Praxedes, G., Lima, L., Nascimento, I., Sousa, R., Naeem, M. ve Iqbal, J. (2020). Surface modification of M2 steel by combination of cathodic cage plasma deposition and magnetron sputtered MoS₂-TiN multilayer coatings. *Surface and Coatings Technology*, 384, 125327.
- Lu, P. ve Wood, R. J. (2020). Tribological performance of surface texturing in mechanical applications—A review. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 8(4), 043001.
- Ma, L., Fu, S., Li, J., Lu, Y., Li, X., Qi, J. ve Chen, J. (2025). Combining laser biomimetic surface microtextured and PTFE solid lubricant for improved friction property of Ti6Al4V. *Scientific Reports*, 15(1), 10457.
- Moradiani, A., Beiranvand, Z. M., Ratnayake, R. C., Aliabadi, A. ve Rasoulinia, M. (2022). The effect of laser surface melting on the retained austenite and wear properties of AISI D2 tool steel. *Optik*, 252, 168469.
- Moravčíková, J., Moravčík, R., Kusý, M. ve Nepochal, M. (2018). Influence of laser surface texturing on tribological performance of tool steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 5417-5426.
- Pashechko, M., Marchuk, V., Kindrachuk, M., Tisov, O., Kornienko, A. ve Dukhota, O. (2019). Fretting-Wear Mechanism of Textured Surfaces. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 13(3).
- Qiao, C., Yu, J., Zhang, S., Liu, Z. ve Wang, J. (2022). Combined effect of a laser clad coating and surface texture on tribological performance under dry sliding and starved lubrication. *Metals and Materials International*, 28(3), 666-678.
- Qu, S., Wang, J., Hu, X., Lai, F., Deng, Y. ve Li, X. (2021). Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification process on fretting wear behavior of laser

- surface textured 20CrMoH steel. *Surface and Coatings Technology*, 427, 127827.
- Rahnejat, H., Balakrishnan, S., King, P. ve Howell-Smith, S. (2006). In-cylinder friction reduction using a surface finish optimization technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 220(9), 1309-1318.
- Rapoport, L., Moshkovich, A., Perfilyev, V., Lapsker, I., Halperin, G., Itovich, Y. ve Etsion, I. (2008). Friction and wear of MoS₂ films on laser textured steel surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 202(14), 3332-3340.
- Reséndiz-Calderón, C., Cao-Romero-Gallegos, J., Farfan-Cabrera, L., Campos-Silva, I. ve Soriano-Vargas, O. (2024). Influence of boriding on the tribological behavior of AISI D2 tool steel for dry deep drawing of stainless steel and aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 484, 130832.
- Rosenkranz, A., Costa, H. L., Profito, F., Gachot, C., Medina, S. ve Dini, D. (2019). Influence of surface texturing on hydrodynamic friction in plane converging bearings-An experimental and numerical approach. *Tribology International*, 134, 190-204.
- Salguero, J., Sol, I. D., Dominguez, G., Batista, M. ve Vazquez-Martinez, J. M. (2022). Tribological wear effects of laser texture design on AISI 630 stainless steel under lubricated conditions. *Metals*, 12(4), 543.
- Saran, R., Ginjupalli, K., George, S. D., Chidangil, S. ve VK, U. (2023). LASER as a tool for surface modification of dental biomaterials: A review. *Heliyon*, 9(6).
- Segu, D. Z., Lu, C., Hwang, P. ve Kang, S.-W. (2021). Optimization of tribological characteristics of a combined pattern textured surface using Taguchi design. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(5), 3786-3794.
- Shen, G., Zhang, J., Kang, C. ve Fang, F. (2021). Study on surface texture patterns for improving tribological performance of bioimplants. *Surface and Coatings Technology*, 422, 127567.
- Spikes, H. (2004). The history and mechanisms of ZDDP. *Tribology Letters*, 17(3), 469-489.
- Sun, Q., Hu, T., Fan, H., Zhang, Y. ve Hu, L. (2015). Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500 C: influence of laser surface texturing. *Tribology International*, 92, 136-145.
- Tang, L., Gao, C., Huang, J., Zhang, H. ve Chang, W. (2013). Dry sliding friction and wear behaviour of hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels. *Tribology International*, 66, 165-173.
- Tian, Y., Chen, C., Li, S. ve Huo, Q. (2005). Research progress on laser surface modification of titanium alloys. *Applied Surface Science*, 242(1-2), 177-184.
- Tian, Y., Chen, C., Wang, D. ve Lei, T. (2005). Laser surface modification of titanium alloys—a review. *Surface Review and Letters*, 12(01), 123-130.

- Vazirisereshk, M. R., Martini, A., Strubbe, D. A. ve Baykara, M. Z. (2019). Solid lubrication with MoS₂: a review. *Lubricants*, 7(7), 57.
- Vazquez Martinez, J. M., Del Sol Illana, I., Iglesias Victoria, P. ve Salguero, J. (2019). Assessment the sliding wear behavior of laser microtexturing Ti6Al4V under wet conditions. *Coatings*, 9(2), 67.
- Wang, H., Deng, D., Zhai, Z. ve Yao, Y. (2024). Laser-processed functional surface structures for multi-functional applications-a review. *Journal of Manufacturing Processes*, 116, 247-283.
- Wang, X., Kato, K., Adachi, K. ve Aizawa, K. (2001). The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed. *Tribology International*, 34(10), 703-711.
- Xing, Y., Deng, J., Wu, Z. ve Wu, F. (2017). High friction and low wear properties of laser-textured ceramic surface under dry friction. *Optics & Laser Technology*, 93, 24-32.
- Yang, F., Zhao, T., He, P., Zhou, L., Pan, X., Liang, X. ve Zhang, H. (2024). Effect of pulsed femtosecond laser shock peening surface modification on anti-wear failure properties of AISI 9310 gear steel. *Engineering Failure Analysis*, 159, 108146.
- Yang, L., Deng, Z., He, B. ve Özel, T. (2021). An experimental investigation on laser surface texturing of AISI D2 tool steel using nanosecond fiber laser. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 8(2), 140-156.
- Yasavol, N. ve Ramalho, A. (2015). Wear properties of friction stir processed AISI D2 tool steel. *Tribology International*, 91, 177-183.
- Yuan, S., Lin, N., Wang, W., Zhang, H., Liu, Z., Yu, Y. ve Wu, Y. (2022). Correlation between surface textural parameter and tribological behaviour of four metal materials with laser surface texturing (LST). *Applied Surface Science*, 583, 152410.
- Zawadzki, P., Dobrotvorskiy, S., Aleksenko, B. ve Talar, R. (2024). Effect of Nanosecond Laser Texturization on Tribological Behavior of AISI 321 Stainless Steel. *Materials*, 17(23), 5870.
- Zeng, S., Li, J., Zhou, N., Zhang, J., Yu, A. ve He, H. (2020). Improving the wear resistance of PTFE-based friction material used in ultrasonic motors by laser surface texturing. *Tribology International*, 141, 105910.
- Zhang, B., Sun, L., Zhao, N. ve Li, J. (2025). Applications of laser surface treatment in gears: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(1), 1-35.
- Zhang, D.-w. ve Cui, Y.-x. (2019). Surface chemical modification of CVD diamond films by laser irradiation. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 81, 36-41.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller :

Bilimsel :

Faaliyet/Yayınlar

İş Deneyimi

Stajlar :

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih :