



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ
KULLANILARAK ÜRETİLEN YÜZEY
TEKSTÜRLERİNİN MALZEMELERİN TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Mehtap TÜRKDAYI

Doç. Dr. Halim KOVACI
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN YÜZEY
TEKSTÜRLERİNİN MALZEMELERİN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

(Investigation of the Effect of Surface Textures Manufactured Using Selective Laser Melting
on the Tribological Properties of Materials)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehtap TÜRKDAYI

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI

Erzurum
Ağustos, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Mehtap TÜRKDAYI tarafından hazırlanan “Seçici Lazer Ergitme Yöntemi Kullanılarak retilen Yüzey Tekstürlerinin Malzemelerin Tribolojik zellikleri zerindeki Etkisinin İncelenmesi ” başlıklı çalışması 04 / 08 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mekanik Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI

Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri yesi: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve ğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, izelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Halim KOVACI danışmanlığında sunulan “Seçici Lazer Ergitme Yöntemi Kullanılarak Üretilen Yüzey Tekstürlerinin Malzemelerin Tribolojik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	8	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Metot	18	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar	1	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı(Öğrenci)	Tez Danışmanı
Mehtap TÜRKDAYI	Doç. Dr. Halim KOVACI
4.8.2023	4.8.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca düşünceleri ve önerileriyle bana yol gösteren, elinden gelen her türlü desteği sağlayan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Halim KOVACI' ya sonsuz teşekkür ederim.

Daima yol gösterici olan, bilgilerini ve ilgilerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK'e ve Sayın Prof. Dr. A. Fatih YETİM'e çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmam her aşamasında fikirleri ve deneyimleri ile bana yardımcı olan saygıdeğer hocam Arş. Gör. Yeşim SEÇER KAVASOĞLU' na ve deneysel çalışmalarım boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Yusuf Burak BOZKURT' a, Arş. Gör. Burak ATİK' e, ayrıca emeği geçen bütün hocalarıma ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında olduğu gibi tez çalışmam boyunca da bana inanıp destek olan sevgili annem Gönül TÜRKDAYI sevgili babam Mehmet TÜRKDAYI başta olmak üzere ablalarıma ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Mehtap TÜRKDAYI

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN YÜZEY TEKSTÜRLERİNİN MALZEMELERİN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehtap TÜRKDAYI

Danışman: Doç. Dr. Halim KOVACI

Amaç: Mühendislik uygulamalarında kullanılan, birbirleriyle temas halinde olan veya birbirlerine göre kayma hareketi yapan yüzeyler arasında mikroskobik ve karmaşık etkileşimler meydana gelmektedir. Sürtünme ve aşınma olarak adlandırılan bu etkileşimler, malzemelerin tribolojik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Malzemeler üzerinde meydana gelen bu olumsuz durumları ortadan kaldırmak amacıyla farklı yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bu işlemlere bakıldığında zamanla özellikle son yıllarda kullanılmaya başlanan yöntemlerden biri malzeme yüzeyinde tekstür/doku oluşturulmasıdır. Bu çalışmada, havacılık ve biyomedikal başta olmak üzere farklı pek çok endüstriyel uygulamada kullanılan AISI 316L çeliği yüzeyinde farklı geometrik özelliklerde tekstür oluşturularak, bu malzemenin farklı sürtünme ve aşınma koşullarındaki tribolojik performansının geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Yöntem: Seçici Lazer Ergitme (SLE/SLM) yöntemi kullanılarak AISI 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak kare, eşkenar dörtgen, altıgen, daire olmak üzere farklı yüzey dokusuna sahip numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler farklı ortam koşulları (kuru, tuzlu su ve yağ) altında sürtünme ve aşınma testlerine tabii tutulmuştur. Numunelerin yapısal, morfolojik ve mekanik özelliklerini incelemek için XRD, SEM ve mikro sertlik cihazı kullanılmıştır.

Bulgular: Yağ ve tuzlu su ortamında yapılan deneylerde meydana gelen ek hidrodinamik fayda sayesinde en iyi tribolojik performans elde edilirken tribolojik açıdan en iyi performans sırasıyla yağ, tuzlu su ve kuru ortamda gözlemlenmiştir. Aynı zamanda altıgen, eşkenar dörtgen, kare dokularındaki keskin köşelerin varlığı nedeniyle en iyi tribolojik davranışı daire dokusuna sahip numune sergilemiştir.

Sonuç: AISI 316L paslanmaz çelik üzerinde farklı yüzey tekstür işlemleri uygulanarak farklı ortam koşulları altında tribolojik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanmıştır. Ayrıca, tüm sürtünme ve aşınma koşulları altında en iyi performansı daire yüzey tekstürüne sahip numune sergilemiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekstür, Triboloji, Geometrik desen, Seçici Lazer Ergitme

Ağustos 2023, 71 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT of SURFACE TEXTURES MANUFACTURED USING SELECTIVE LASER MELTING on THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES of MATERIALS

Mehtap TÜRKDAYI

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Halim KOVACI

Purpose: Microscopic and complex interactions occur between surfaces used in engineering applications, in contact with each other or sliding relative to each other or sliding relative to each other. These interactions, called friction and wear, cause adverse effect on the tribological properties of materials. In order to eliminate these negative situations on materials, different surface treatments are applied. When we look at these processes, one of the methods that has been used especially in recent years is the creation of texture on the surface of the material. In this study, it is aimed to improve the tribological performance of this material in different friction and wear conditions by creating a texture with different geometric properties on the surface of AISI 316L stainless steel, which is used in many different industrial applications, especially in aerospace and biomedical applications.

Method: By using Selective Laser Melting (SLM) method, samples with different surface textures such as square, rhombus, hexagon and circle were produced using AISI 316L stainless steel powder. The produced samples were subjected to friction and wear tests under different ambient conditions (dry, salt water and oil). XRD, SEM and microhardness device were used to examine the structural, morphological and mechanical properties of the samples.

Findings: While the best tribological performance was obtained thanks to the additional hydrodynamic pressure occurring in the experiments performed in oil and brine environment, the best tribological performance was observed in oil, salt water and dry environments, respectively. At the same time, the sample with circle texture exhibited the best tribological behavior due to the presence of sharp corners in hexagon, rhombus, and square textures.

Results: By applying different surface texture treatments on AISI 316L stainless steel, improvements have been achieved on its tribological properties under different ambient conditions. In addition, the sample with the circular surface texture exhibited the best performance under all friction and wear conditions.

Keywords: Texture, Tribology, Geometric pattern, Selective laser melting

August 2023, 71 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Triboloji Tanımı ve Tarihçesi	5
Sürtünme	7
Bağıl harekete göre sürtünme mekanizmaları.....	9
Yağlama durumuna göre sürtünme mekanizmaları	9
Kuru sürtünme teorisi.....	10
Aşınma	13
Adhezif aşınma.....	14
Abrazif aşınma	16
Korozif aşınma	18
Erozif aşınma	19
Yorulma aşınması.....	21
Aşınmaya etki eden faktörler	21
Yağlama	23
Yağlama mekanizmaları.....	23
Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	25
Stereolitografi (SLA)	27
Eriyik yığma ve modelleme (SLS).....	27
Seçici lazer ergitme (SLM)	27
MATERYAL VE METOT.....	29
Malzeme.....	30

SOLIDWORKS yazılımı ile numunelerin tasarlanması ve üretimi	30
Testler ve Yüzey İşlemleri	32
Aşınma testleri	32
Analiz ve Karakterizasyon Çalışmaları.....	33
XRD analizi.....	33
Taramalı elektron cihazı (SEM).....	33
Mikrosertlik ölçümü.....	33
Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	34
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	35
XRD Analizleri	35
Mikrosertlik İncelemeleri.....	36
Sürtünme ve aşınma analizleri	37
SEM analizleri.....	44
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
KAYNAKÇA	53
ÖZGEÇMİŞ.....	57

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. AISI 316L Paslanmaz Çelik Kimyasal İçeriği	30
Tablo 2. AISI 316L Paslanmaz Çelik Mekanik Özellikleri.....	30
Tablo 3. Aşınma Testine Ait Parametreler	33
Tablo 4. İşlemsiz ve SLM ile Üretilen Numunelere Ait Pürüzlülük, Sertlik, Sürtünme Katsayısı (CoF) ve Kütle Kaybı Değerleri	44



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Tribolojik sistem yapısı	5
Şekil 2. Tribolojinin sınıflandırılması	7
Şekil 3. Sürtünme açısı ve sürtünme katsayısı ait formül	8
Şekil 4. Statik ve kinetik sürtünme arasındaki ilişki	8
Şekil 5. Tribosistem kinematiği	9
Şekil 6. Kuru, sınır ve sıvı sürtünme	10
Şekil 7. Kuru sürtünme modeli	11
Şekil 8. Mikrokaynak bağlarının oluşumu	12
Şekil 9. Aşınma-zaman (ömür) diyagramı	13
Şekil 10. Adeziv aşınmasının oluşumu)	15
Şekil 11. Abrasif aşınma mekanizmaları	17
Şekil 12. İki elemanlı ve üç elemanlı abrasif aşınma	18
Şekil 13. Eroziv aşınma mekanizmaları	20
Şekil 14. Stribeck eğrisi	24
Şekil 15. Hidrodinamik yağlama.....	24
Şekil 16. Elastohidrodinamik yağlama.....	25
Şekil 17. Eklemeli imalatın şematik akışı	26
Şekil 18. Eklemeli imalat yöntemleri	26
Şekil 19. SLM işleminin şematik gösterimi	28
Şekil 20. İş akış şeması	29
Şekil 21. Altıgen geometrik yüzey tekstürüne sahip numune	31
Şekil 22. Daire geometrik yüzey tekstürüne sahip numune	31
Şekil 23. Eşkenar dörtgen geometrik yüzey tekstürüne sahip numune	31
Şekil 24. Kare geometrik yüzey tekstürüne sahip numune	32
Şekil 25.İşlemsiz numune.....	32
Şekil 26. SLM yöntemi ile üretilmiş (SLM 316L) işlemsiz numune ve döküm yöntemiyle üretilmiş 316L işlemsiz numuneye ait XRD grafikleri	36
Şekil 27. Kuru ortamda yapılan aşınma deney sonuçları	40
Şekil 28. Tuzlu su ortamında yapılan aşınma deney sonuçları	41
Şekil 29. Yağ ortamında yapılan aşınma deney sonuçları.....	42
Şekil 30. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve ortalama kütle kayıp miktarları.....	43

Şekil 31. SLM ve döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri:	45
Şekil 32. SLM ve döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey morfolojilerine ait detay SEM görüntüleri	46
Şekil 33. Kuru ortamda yapılan aşınma deneyleri sonrası numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	47
Şekil 34. Tuzlu su ortamında yapılan aşınma deneyleri sonrası numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	48
Şekil 35. Yağ ortamında yapılan aşınma deneyleri sonrası numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	49



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

%	: Yüzde
°	: Derece
Ag	: Gümüş
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
g	: Gram
kW	: Kilovat
Ma	: Mili amper
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Newton
rpm	: Aşınma Hızı
sn	: Saniye
UV	: Ultraviyole
WC	: Tungsten Karbür
θ	: Teta

Kısaltmalar

316L	: Döküm Yöntemi ile Üretilmiş Numune
3DP	: Üç Boyutlu Yazıcı
AISL	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
HV	: Vickers Sertlik Değeri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLA	: Stereolitografi
SLM	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Eriyik Yığma ve Modelleme
XRD	: X- Işını Kırınım Difraktometresi

YMK : Yüzey Merkezli Kübik Yapısı
 γ : YMK Yapılı Demir Nitrür Fazı



GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında kullanılan metalik malzemelerde zamanla hasar meydana gelebilmektedir. Hasar, mühendislik yapı ve elemanlarının dış etkiler sonucunda zamanla işlevlerini yerine getiremez hale gelmesi olarak tanımlanmaktadır. Hasar mekanizmaları temel olarak; sürtünme, aşınma, yorulma, sürünme, korozyon ve kırılma olarak sınıflandırılmaktadır.

Makine elemanlarının çalışması esnasında birbirine temas eden parçaların ömrü gitgide kısalmaktadır. Makine elemanlarının sürtünmesini önlemek veya minimum seviyeye indirme için makine elemanlarının yağlanması, tasarımlarının değiştirilmesi gibi sürtünmeyi azaltıcı yöntemler uygulanmaktadır. Aşınma ise malzemelerin uzun süre ve yoğun olarak kullanıldıklarında ortaya çıkan ve malzemelerde zamanla oluşan malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma olayı gerçekleştiğinde makine elemanlarının boyutlarında, yüzey kalitelerinde ve şekillerinde farklılıklar meydana gelmektedir. Bu farklılıklar sonucunda makine elemanları kullanılamaz hale gelmektedir. Aşınma olayını daha iyi anlayabilmek ve aşınma kaybını azaltmak için aşınan ve aşındırıcı malzemenin, yağlama durumunun, izafi hareketin ve yük durumunun bilinmesi gerekmektedir. Aşınmayı azaltmak için temas yüzeylerinin kimyasal kompozisyonunu değiştirmek ve sertliğini iyileştirmek gerekmektedir.

Mekanik olarak sürtünme ve aşınmaya, temasta bulunan ve birbirine göre kayma hareketi yapan yüzeyler arasındaki mikroskobik ve karmaşık etkileşimler sebep olmaktadır. Yüzeylerde oluşan bu etkileşimler malzeme geometrisi, yüzey topografyası ve malzemenin maruz kaldığı sıcaklık ve yükleme türü gibi sebeplere bağlıdır. Tribolojik özellikler ve yüzey etkileşimleri yüzey temasının ve çevresindeki atmosferin fiziksel ve kimyasal şartlarından etkilenmektedir.

Triboloji birbiri üzerine kuvvet uygulayarak, birbirine göre izafi hareket halinde olan yüzeylerin ve bunlarla ilgili problemlerin bilimi ve tekniği olarak karşımıza çıkmaktadır. Triboloji bilimi sürtünme, aşınma ve yağlama olayları ve bu olayların birbirleriyle olan ilişkilerini incelemektedir. Triboloji bilimi birbirine göre izafi harekette bulunan yüzeylerin ekonomik, ekolojik ve fonksiyonel olarak optimizasyonunu sağlamaktadır.

Sürtünme temasta olan ve birbirine göre izafi hareket eden ya da izafi hareket etme eğiliminde olan malzemelerin harekete karşı gösterdikleri direnç olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürtünmenin günlük yaşantımızda önemli bir yeri vardır. Örneğin insanın yazı yazması, araç kullanması gibi birçok hareket sürtünme kuvvetinin etkisiyle açıklanmaktadır.

Sürtünme olayını bağıl harekete bağıl olarak ve yağlama durumuna bağıl olarak iki başlık altında incelemek mümkündür. Bağıl olarak bakıldığı zaman kinematik olarak sürtünme kayma, yuvarlanma ve kayma yuvarlanması olarak karşımıza çıkmaktadır. Yağlama durumuna göre incelediğimiz zaman karşımıza kuru, sıvı ve sınır sürtünme olarak çıkmaktadır (Lange 2001).

Aşınma birbirine göre izafi olarak hareket eden yuvarlanma, kayma ve çarpma hareketi sırasında yüzeylerin birinde veya ikisinden malzeme kaybı veya yüzey hasarı olarak tanımlanabilmektedir. Pürüzlerdeki yüzey etkileşimleri neticesinde meydana gelen aşınma; malzeme göreceli hareket halindeyken, malzeme etkileşen yüzeylerden yer değiştirebilmektedir. Fakat bunun tam tersi bir durum da meydana gelebilmektedir. Yani malzemede kayıp olmama olasılığı da bulunmaktadır. Yer değişimine uğrayan malzemeler etkileşim halindeki yüzeylerden çıkabilmektedir ve karşı yüzeye malzeme transferine neden olabilmektedir. Bu bölgelerde gerilmeler sonucunda elastik ve plastik deformasyonla karşılaşmak mümkündür. Bu yüksek gerilmeler yüksek sıcaklıklara sebep olduğundan dolayı basınçlar akma sınırına ulaşmaktadır ve kaynak bağlarının oluşmasına sebep olmaktadır (Jeyaparakash *et al.* 2020; Huntings 1992).

Mühendislik uygulamaları ve analizleri, yüzey dokularının temas ara yüzeylerinin tribolojik performansını önemli ölçüde etkileyebileceği, mikro yüzey tasarımı yüzey mühendisliğinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Tribolojik anlamda, mekanik bileşenlerin aşınma dirençleri, sürtünme katsayıları vb. özelliklerinde uygun yüzey dokularından faydalanılarak önemli iyileştirmeler sağlanabilmektedir. Tribolojik performansı iyileştirme mekanizmaları, yük taşıma kapasitesini artırmak için ek hidrodinamik fayda oluşturmak üzere tam ve karışık yağlama durumlarında bir mikro hidrodinamik yatak görevi yapmak, yetersiz yağlama durumunda yağlayıcı için mikro rezervuar görevi görmek ve yüzeylerde şiddetli aşınmayı önlemek için birikintileri hapsedmek olarak karşımıza çıkmaktadır (Yu *et al.* 2009).

Yu ve arkadaşları birbirinden farklı şekillerin ve yönelimlerin uygun temas yüzeyleri arasındaki hidrodinamik fayda üzerindeki etkisini araştırmak için daire, elips ve üçgen olmak üzere üç farklı model geliştirmiştir. Tekstür şekilleri ve kayma yönüne göre farklı oryantasyonlar incelenmiştir. Çukurların geometrik şekillerinin ve yönelimlerinin yük taşıma kapasitesi üzerinde etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı alan yoğunluğu ve çukur derinliğine sahip olmak koşuluyla hem elips hem de üçgen geometri ile kıyaslandığında dairesel yüzey tekstürlerinin daha düşük yük taşıma kapasitesine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Fakat üçgen ve elips daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir. Kayma yönüne

dik olarak yerleştirilen elipsler, 0.2 m/s kayma hızında dairesel çukur üzerinde %26,3 artan yük taşıma kapasitesiyle en iyi sonucu vermektedir (Yu *et al.* 2009).

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tekstürlü bir yüzeyin farklı malzeme türleri ile kuru, yağ ve su ile yağlanmış koşullar altında sürtünme ve aşınma performansı incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda tekstür derinliği ve tekstür şeklinin sürtünme ve aşınma performansını etkilediği ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra kuru, yağlı ve sulu ortam şartlarında tribolojik performans değişiklik göstermiştir. Yağlayıcı koşullar altında hidrodinamik faydanın etkisiyle malzemenin tribolojik özelliklerinde gelişme gözlenmiştir. Ayrıca dairesel dokulu ve oluk tekstürlü yapıya sahip numunelerin performansında iyileşmeler meydana gelmiştir (Zhang *et al.* 2021).

Yang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada lazer dokularının tribolojik faydaları, farklı yağlama koşulları altında deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda dokulu yüzeylerin tribolojik olarak iyileşmenin büyük ölçüde yağlama durumuna bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Yağlama durumunda uygulanan yüklerin artmasıyla birlikte, mikro çukurların etkisi ile hidrodinamik yağlama aralığının genişlediğini gözlemlemişlerdir. Bu durum sürtünme katsayısını korurken aşınma direncini artırmıştır (Yang *et al.* 2023).

Yapılan başka bir çalışmada alan yoğunluğu ve yüzey dokusunun SLM yöntemi ile üretilen AISI 316L paslanmaz çeliğinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir ve alan yoğunluğunun artmasıyla hidrodinamik faydanın arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra sürtünme katsayısı (Coefficient of Friction-CoF) üzerinde sürtünme-aşınma ortamının etkisi karşılaştırıldığında Simule Edilmiş Vücut Sıvısı (Simulated Body Fluid-SBF) testlerinde doğrudan temas olmadığı için sürtünme katsayısı değerleri kuru duruma kıyasla daha düşük olduğu ortaya konmuştur. Eliptik desenler keskin kenarları olmamaları ve ek bir hidrodinamik fayda sağlamaları sebebi ile en iyi tribolojik performansı sergilemiştir. En yüksek sürtünme katsayısı altıgen ve kare desenlerde gözlemlenmiştir (Kovacı *et al.* 2020).

Schafer ve arkadaşları yılan ve kurbağa derisinden esinlenerek oluşturdukları yüzey tekstürlerinin kuru ortam ve yağlama koşulları altında 100Cr6 çeliğinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Geniş alana sahip tekstürün, kuru ortamda yağlama koşuluna göre sürtünme katsayısının oldukça fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca her iki koşul incelendiğinde geniş alana sahip yüzeyin dar alana sahip yüzeyden daha üstün tribolojik performans sergilediği ortaya çıkarılmıştır (Schafer *et al.* 2015).

Song ve arkadaşları elmas tornalama ile kare ve sinüzoid olmak üzere iki farklı yüzey tekstürünün sürtünme ve aşınma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kare dokuda oluşan

aşınma izinin daha belirgin olduğunu ve sürtünme katsayısının da daha fazla olduğunu ortaya koymuşlardır. Kare tekstürlerde keskin kenarların varlığı söz konusudur. Abrasiv aşınma sinüzoidine göre oldukça yüksektir (Song *et al.* 2018).

Yapılan araştırmalardan görüldüğü üzere yüzey tekstürleri malzemelerin tribolojik özellikleri üzerinde iyileştirmeler meydana getirmektedir. Yüzey tekstürlerinin malzemelerin aşınma oranını ve sürtünme katsayısını azalttığı gözlemlenmektedir. Yapılan çalışmalarda tekstür geometrisi, alan yoğunluğu, derinlik gibi birçok parametre kullanılmıştır. Aynı zamanda SBF (Simule Edilmiş Vücut Sıvısı) ve saf su gibi yağlayıcılar kullanılarak farklı ortam koşulları altında malzemelerin tribolojik performanslarını iyileştirme üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada ise, %26 alan yoğunluğuna sahip farklı yüzey tekstür geometrilerinden (altıgen, eşkenar dörtgen, kare, daire) faydalanılarak kuru, tuzlu su ve yağ ortamında malzemelerin sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle kare, daire, eşkenar dörtgen ve altıgen olmak üzere dört farklı tekstür şekline faydalanılarak SOLIDWORKS 2022 ortamında numunelerin tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bu numuneler Seçici Lazer Ergitme (SLE/SLM) yönteminden faydalanılarak üretilmiştir. Bu numuneler üretilirken AISI 316L paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır. Kıyaslama yapmak amacıyla, herhangi bir tekstür içermeyen; SLM yöntemi ile üretilen SLM-316L işlemsiz ve döküm yöntemi ile üretilen 316L işlemsiz olmak üzere iki adet numune daha üretilmiştir. Üretilen numunelere kuru, tuzlu su ve yağ olmak üzere üç farklı ortamda aşınma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda AISI 316L paslanmaz çeliğin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda yapısal, morfolojik ve mekanik olarak numuneleri incelemek için XRD, SEM ve mikro sertlik cihazından cihazlarından faydalanılmıştır.

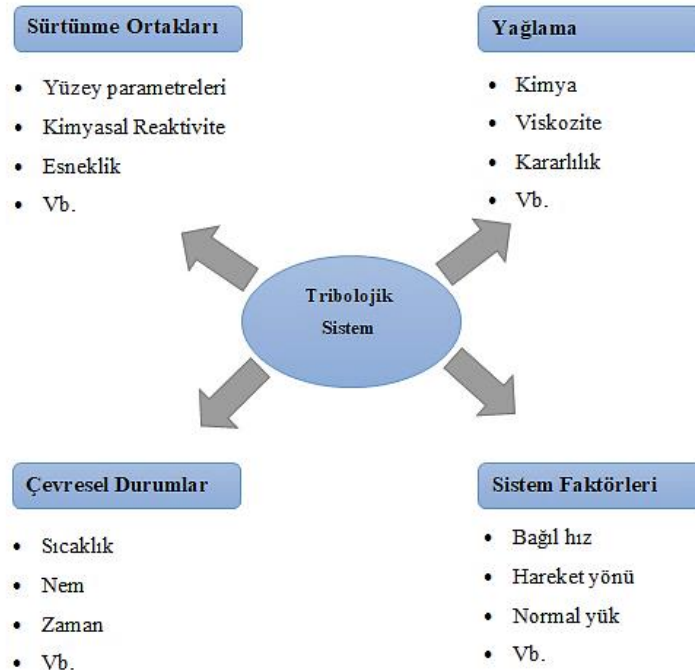
KURAMSAL TEMELLER

Triboloji Tanımı ve Tarihçesi

Bağıl hareket halinde bulunan iki yüzeyin, ilgili konu ve uygulamaların bilimi ve teknolojisine triboloji denilmektedir. Genel anlamda ise triboloji kelimesi sürtünme, aşınma ve yağlama bilimi olarak karşımıza çıkmaktadır (Brushan 2000).

Makine elemanlarının işlevsellikleri incelendiği zaman yaklaşık olarak %70'inin kullanılamaz duruma gelmesindeki en büyük sebebin aşınma olduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra sürtünme ve aşınmaya maruz kalan malzemelerde yüksek miktarda enerji kaybı meydana gelmektedir. Aşınma ve sürtünme olayları sonrasında malzemelerde meydana gelen olumsuz durumları ortadan kaldırmak için harcanan zaman değerlendirildiğinde triboloji biliminin önemini karşımıza çıkmaktadır (Akkurt 2012). Kayma anlamına gelen triboloji kelimesi yunanca bir kelime olan 'tribos' kelimesinden türemiş olup, triboloji kelimesinden ilk olarak 1966 yılında Dr. Peter tarafından yayınlanan raporda bahsedilmiştir (Brushan 1996).

Bir tribolojik sistemin incelenmesinde bütün etmenler bir bütün olarak değerlendirilmektedir. Olaya katılan unsurlar ile aktarma ve taşıma esnasında dönüşen hatta yok olan enerjinin tamamını kapsamaktadır. Şekil 1' de tribolojik sistem yapısı gösterilmektedir.



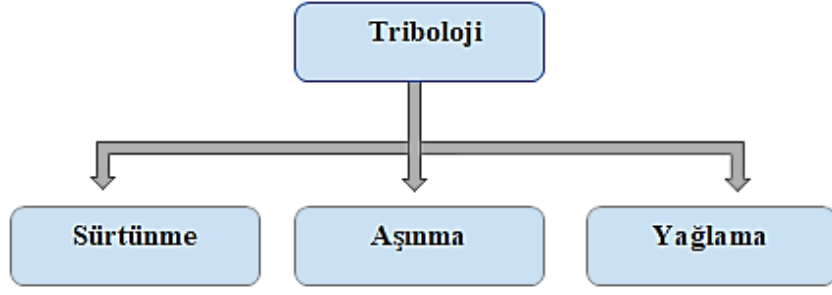
Şekil 1. Tribolojik sistem yapısı (Hatten 2015)

Aşınma, sürtünme ve yağlama bilimi olarak tanımlanan triboloji, geçmişten günümüze kadar incelenmekte olan ve zararlı etkilerini azaltmak için devamlı üzerinde çalışılan bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Triboloji tarihi incelendiği zaman birçok örnekle karşılaşmak mümkündür. Örneğin: M.Ö. 2400 yılında Tehuti-Hetep adlı bir mısır heykelinin taşınması esnasında kızak ile zemin arasında sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcı olarak bir sıvı dökülmektedir. Orta çağdaki gelişmelere bakılacak olursa, yağlama ve yapısal malzemelerde farklı gelişmeler meydana geldiği görülmektedir. Leonardo da Vinci 1452-1519 yılları arasındaki yaptığı çalışmalarda; sürtünme, aşınma ve yağlama olarak bilinen triboloji konusu üzerinde yaptığı araştırmalar dikkat çekmektedir. Leonardo da Vinci, sürtünme yasalarını bulan ve hareketi yöneten kuralları ortaya çıkaran ilk kişi olarak karşımıza çıkmaktadır. Düz bir yüzey üzerinde hareket eden dikdörtgen bir parçadaki sürtünme kuvveti katsayısı ve normal kuvvet arasındaki bağlantıyı ifade etmiştir. Aşınma modelleri üzerine araştırmalar yapmıştır. Bunun yanı sıra burç ve yuvarlanma elemanı yatakları tasarlamıştır (Besson 2013).

Orta çağda aynı zamanda Robert Hooke (yuvarlanma sürtünmesi ilişkileri), Isaac Newton (akışkanların iç sürtünmesinin tanımı ve viskozite), Euler (analitik sürtünme yaklaşımı ve sürtünme katsayısı) ve Guillaume Amontons (sürtünme kanunları ve deneysel çalışmalar) başta olmak üzere birçok bilim insanının da triboloji üzerinde araştırmalar yaptığı bilinmektedir (Baydemir 2021).

İkinci sanayi devrimine bakıldığında zaman triboloji biliminin temel taşı olarak, Reynolds' un yuvarlanma sürtünmesi çalışmaları (1886) ve Hertz' in elastik malzemeler arasında temas üzerine yaptığı çalışmalar karşımıza çıkmaktadır. Bu dönemde karşımıza ayrıca hızlı bir makine gelişimi çıkmaktadır. 1830'larda demiryollarının, 1900'lerin başlarında taşıtların ve 1940'larda uçakların gelişmesi sonrasında buhar gücünün kullanılması tribolojinin daha iyi bir şekilde ifade edilmesine sebep olmaktadır. 20.yy'ın başlarında endüstrinin inanılmaz şekilde büyümesi, triboloji biliminin daha iyi anlaşılmasına yol açmaktadır ve triboloji kavramı tüm alanlarda oldukça geniş bir alan kapsamaktadır (Baydemir 2021; Ciulli 2019).

Daha önce de bahsedildiği üzere Triboloji temel olarak malzemelerin sürtünme, aşınma ve yağlama durumlarını inceleyen bir bilim dalı olarak tanımlanmakta ve bu sebeple Şekil 2'de ki gibi üç başlık altında incelenmektedir.



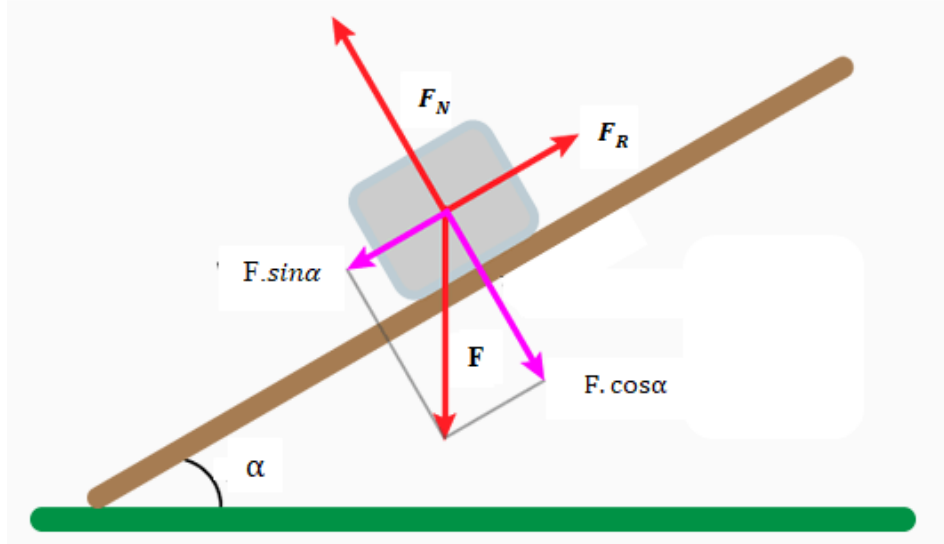
Şekil 2. Tribolojinin sınıflandırılması

Sürtünme

Sürtünme, izafi hareket halinde olan ve birbirine temasta bulunan iki cismin temas eden yüzeylerinde hareket ve ya hareket ihtimaline karşı oluşan direnç olarak ifade edilmektedir (Akkurt 2012).

Leonardo da Vinci, Coulomb ve Euler tarafından yapılan sürtünme ile ilgili ilk çalışmalar günümüzde hala kullanılmaktadır ve deneysel araştırmalarla desteklenmektedir. Klasik sürtünme yasaları 14 yy. sonlarında ilk olarak Leonardo da Vinci tarafından ifade edilmiştir. Daha sonra 1699 yılında Amontons bu yasaları tekrardan ele almıştır. Bunun sonucunda sürtünme kuvvetinin yüzeylerin alanından bağımsız olduğunu ve normal yük ile doğru orantılı olduğunu bulmuştur. 1785 yılında da Charles Auguste Coulomb, Amontons ile aynı sonuçları elde etmiştir. Bu sonuçlar daha sonraki dönemlerde Amontons-Coulomb kanunu olarak adlandırılmıştır. Günümüzde hala kullanılan bu kanun sürtünme ile ilgili yapılan çalışmalarda önemli adımlardan birisi haline gelmiştir (Barry *et al.* 2013).

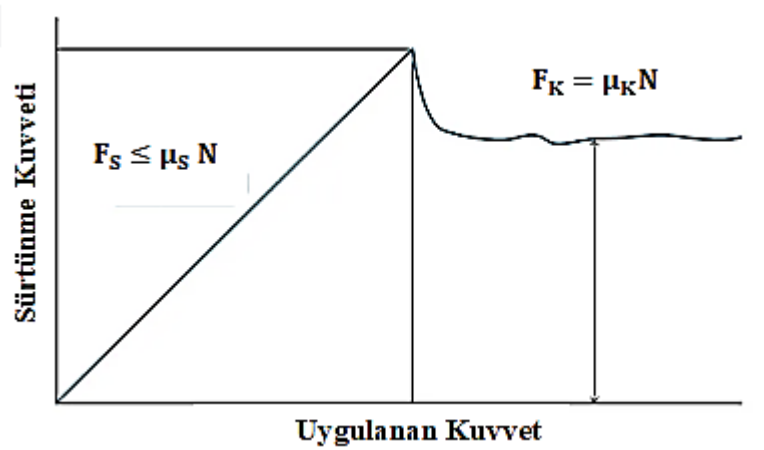
Sürtünme katsayısının elde edilmesine ait sürtünme açısı Şekil 3'te gösterilmiş ve ilgili formül, Denklem 1'de verilmiştir. Direnç kuvveti (F) hareket yönüne paralel ise F sürtünme kuvveti olarak ifade edilmektedir. Sürtünme sayısal bir parametre olan μ sürtünme katsayısı olarak ifade edilmektedir. Cisme uygulanan normal kuvvet ve sürtünme kuvveti arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu ilişki Coulomb sürtünmesi olarak da ifade edilmektedir (Bhushan 2000).



Şekil 3. Sürtünme açısı ve sürtünme katsayısı ait formül (Helmenstine 2014)

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} = \frac{F \sin \alpha}{F \cos \alpha} = \tan \alpha \quad (1)$$

Sürtünme katsayısı, teğetsel kuvvet (F_R) ile normal kuvvetin (F_N) oranı ile bulunmaktadır. Bir teğetsel kuvvet (F_R) söz konusuysa, kaymanın meydana gelebilmesi için gerekli olan teğetsel kuvvetin değeri statik sürtünme katsayısı (μ_s) olarak adlandırılmaktadır. Kayma durumunun devam edebilmesi için gerekli olan teğetsel kuvvet ise F kinetik sürtünme katsayısı (μ_k) olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4'te statik sürtünme ve kinetik sürtünme arasındaki ilişki verilmektedir.



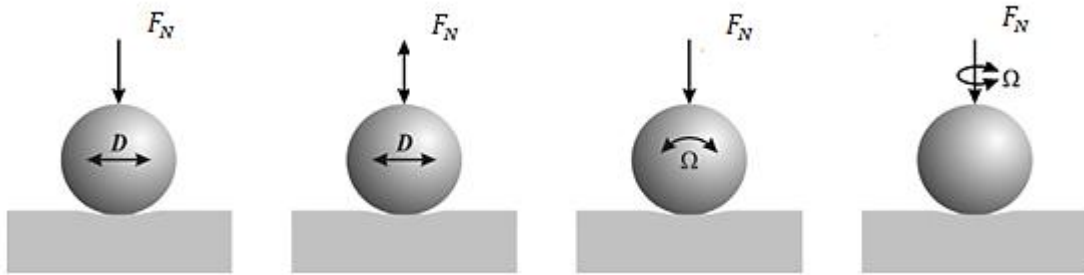
Şekil 4. Statik ve kinetik sürtünme arasındaki ilişki (Samuel 2010)

Kinetik sürtünme kuvveti ile statik sürtünme kuvveti karşılaştırıldığı zaman kinetik sürtünme kuvvetinin statik sürtünme kuvvetine oranla daha düşük veya eşit olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ise yüzeylerin adeziv bağlar sebebiyle 'yapışma' eğilimini göstermesinden kaynaklanmaktadır (Brushan 1996).

Bağıl harekete göre sürtünme mekanizmaları

İzafi hareket eden elemanlar arasında bir sürtünme söz konusuysa sürtünme kinematik bakımdan Şekil 5'te gösterildiği gibi kayma, yuvarlanma ve kayma yuvarlanması şeklinde meydana gelmektedir. Bu sürtünme çeşitlerinin meydana geldiği parçalara örnek olarak kaymalı yataklar, rulmanlar, hareketli dişliler ve kam mekanizmaları örnek olarak verilmektedir (Akkurt 2012).

Kayma sürtünmesi iki cismin birbiri üzerine hareket ettiği veya kaydığı durumlarda olarak tanımlanmaktadır. Bu sürtünme çeşidi mikroskopik yüzeyler arasındaki kenetlenme sonucunda meydana gelmektedir. Sürtünme kuvveti kayma durumunda olduğu zaman, cismin hareketine zıttır. Yuvarlanma sürtünmesi ise yuvarlanan cismin hareketine karşı gösterilen direnç olarak karşımıza çıkmaktadır. Temas alanı oldukça dardır ve yuvarlanma sürtünmesinin değeri kayma sürtünmesinin değeri ile kıyaslandığında oldukça küçüktür. Birbirleriyle temas halinde olan cisimlerin tam rijit olmaması sebebiyle yüzeylerde deformasyon meydana gelmesi ve iki yüzey arasında oluşan yapışma kuvveti yuvarlanma sürtünmesine neden olmaktadır (Laotreephet 2020).

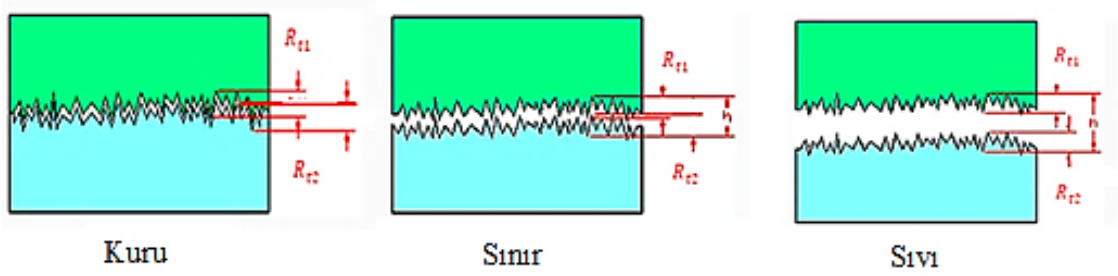


Şekil 5. Tribosistem kinematiği (Zhou 2011)

Yağlama durumuna göre sürtünme mekanizmaları

Sürtünme mekanizmalarını yağlama durumu dikkate alınarak genel anlamda kuru, sınır, sıvı ve hidrodinamik olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü gibi kuru sürtünme yağlayıcı madde kullanılmadan iki yüzeyin doğrudan teması sonucunda meydana gelmektedir. Yüzeyler arasına yağlayıcı maddeler konulması durumunda ise sınır ve sıvı sürtünme hali söz konusu olmaktadır. Yüzeyler yağlayıcı ile tamamen kaplanmadığı durumlarda yüzeylerin bazı noktalarda direk birbirleri ile temas etmesi sonucunda ortaya çıkan sürtünmeye sınır sürtünmesi denilmektedir. Yüzeylerin bir yağlayıcı tarafından tamamen kaplandığı zaman ortaya çıkan sürtünme ise sıvı sürtünme olarak adlandırılmaktadır (Lange 2001).

Şekil 6’da yüzeyler pürüzlü olarak gösterilmektedir. R_{t1} ve R_{t2} pürüzlülük durumunun maksimum olduğunu ifade etmektedir. Yani kuru sürtünme durumu maksimum pürüzler arasında meydana gelmektedir. Sınır sürtünme durumunda ise yağ tabakası arada bir boşluk (h) meydana getirmektedir. Fakat bu boşluk toplam pürüzlülük sayısından küçüktür. Bu da pürüzlerin bazı noktalarda temas etmesine neden olmaktadır. Sıvı sürtünme durumunda ise tam tersi durum söz konusudur yani toplam pürüz sayısından oluşan boşluk daha büyüktür ve bu durumda yüzeyler arasında hiçbir temas meydana gelmemektedir. Bu durumda sıvı sürtünme hali söz konusudur ve sürtünme sıvı molekülleri arasında oluşmaktadır (Owsalau 2012).

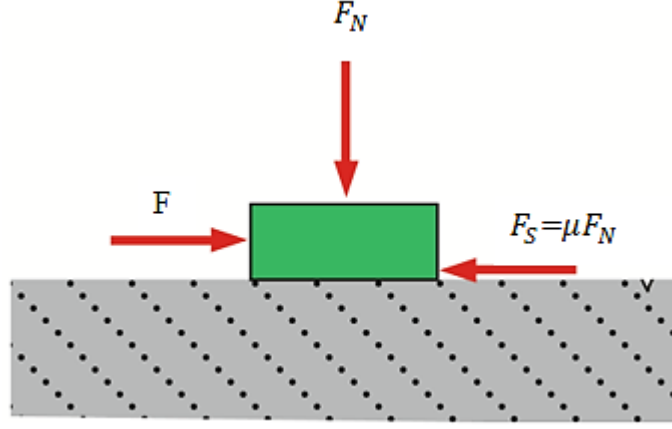


Şekil 6. Kuru, sınır ve sıvı sürtünme (Owsalau 2012)

Kuru sürtünme teorisi

Kuru sürtünme teorisi ile ilgili bilimsel çalışmalara bakıldığında zaman Leonardo da Vinci, Amontons ve Coulomb’un çalışmalarına uzanan uzun bir dönemi kapsadığı görülmektedir. Kuru sürtünme teorisi Şekil 7’de gösterilen model ile ifade edilmektedir. Kuru sürtünme modeli yüzeyler arasında meydana gelen kayma sonucunda oluşan kayma sürtünmesi için geçerli bir teoridir ve deneysel çalışmalar sonucunda aşağıda verilen hipotezlere dayanmaktadır (Demet 2013).

1. Sürtünme kuvveti, normal kuvvet sabit bir şekilde kalmaya devam ettiği sürece varolan temas alanından bağımsızdır.
2. Sürtünme kuvveti, basıncın üniform olarak dağılması şartıyla, arayüz boyunca etki eden toplam normal kuvvetle orantılıdır.
3. Maksimum statik sürtünme kuvveti dinamik sürtünme kuvvetinden daha büyüktür.
4. Düşük bağlı hızla kayma durumu söz konusuysa, sürtünme kuvveti bağlı hızdan bağımsızdır.

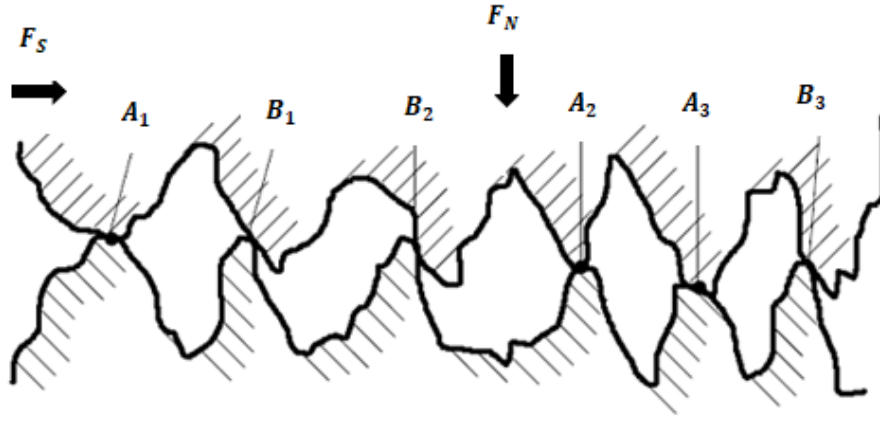


Şekil 7. Kuru sürtünme modeli (Khereddin 2013)

Kuru sürtünme olayını açıklayan birçok teori bulunmaktadır. Bu teorilerden en önemlileri;

- Mekanik
- Moleküler (Mikrokaynak) bağı teorileri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Mekanik (Amontons-Coulomb) teorisi sürtünme olayının pürüzlerin üzerine çıkması ve meydana gelen basıncın altında kalmasıyla elastik ve plastik şekil değişimi ve bunu takiben pürüzlerin kesilmesi ile açıklanmaktadır ve pürüzlerin kesilmesini sağlayan kuvvet sürtünme kuvvetidir (Akkurt 2012). Gerçeğe en yakın teori olan moleküler (mikrokaynak) teorisi: Bowden ve Tabor tarafından geliştirilmiş teoridir. Şekil 8’de görüldüğü üzere parçalar arasındaki etkileşimin pürüz tepelerinde meydana geldiği görülmektedir. Etkileşimin gerçekleştiği bu noktalarda tabakalar arasında bağlar oluşmaktadır. Uygulanan yükten sonra küçük temas bölgelerinde yüksek basınçlar oluşmaktadır. Bunun sonucunda basınç altında olan temas noktalarındaki tabakalar kopmaktadır. Aynı zamanda meydana gelen deformasyonlarda direnç artırıcı özelliğe sahiptir. Metalik temas olmaktadır ve daha sonrasında mikroskobik kaynak bağları metal yüzeyler arasında oluşmaktadır. Oluşan bu bağlar yüzey tabakalarında oluşan bağlardan daha kuvvetlidir. Cisimlerin hareket haline geçebilmesi için bağların kopması gerekir ve bu bağların kopması için gereken kuvvet sürtünme kuvvetidir (Demet 2013).



Şekil 8. Mikrokaynak bağlarının oluşumu (Huang *et al.* 2004)

Şekil 8’de A ile gösterilen noktalar kaynak bölgelerini, B ile gösterilen noktalar deformasyon noktalarını göstermektedir.

Bu teoriyi analitik olarak ifade etmek gerekirse Bowden ve Tabor’a göre sürtünme katsayısı:

$$\mu = \frac{F_S}{F_N} = k \frac{\tau_{km}}{\sigma_{ko}} + (1 - k) \frac{\tau_{ko}}{\sigma_{ko}} \quad (2)$$

σ_{ko} = basma-kopma mukavemeti

τ_{ko} = doğal tabaka arasındaki bağların kayma mukavemeti

τ_{km} = mikrokaynak bağların kesme mukavemeti

k = temas alanında oluşan metalik bağların yüzdesi

olarak elde edilmektedir. Gerçek temas bölgelerinin hepsi metalik temas noktalarında oluşuyorsa $k=1$ olmaktadır. Bunun sonucunda:

$$\mu = \frac{\tau_{km}}{\sigma_{ko}} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

- τ_{km} düşük olduğu (yumuşak malzeme) ve σ_{ko} yüksek olduğu (sert malzeme) durumunda sürtünme katsayısı düşük olur.
- Metal mikrokaynak bağı meydana gelmiş noktalardaki kesme mukavemeti temas halindeki cisimlerin türüne bağlıdır.

Yani düşük sürtünme katsayıları elde etmek ve aşınma olayının önüne geçebilmek için malzemelerin aynı veya kendileri arasında kolayca alaşım haline getirilen türden olmaması gerekmektedir. Tercih edilen malzemelerin birinin yumuşakken diğerinin sert olması gerekmektedir (Akkurt 2012).

Aşınma

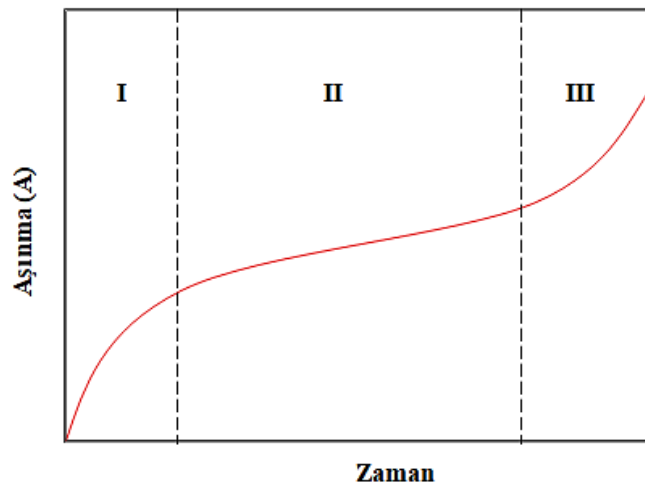
Yüzeyde kayma ve yuvarlanma hareketinin sonucu olarak cismin çalışma yüzeylerinde oluşan malzeme kaybına aşınma denilmektedir (Bahari 2017). Temas halindeki yüzeylerde pürüzlerin etkileşimi, yüzeylerin mekanik ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak aşınma olayına neden olmaktadır. Aşınma istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıksa da bazen aşınma, parça yüzeylerinin işlenmesinde kullanılmaktadır (Akinlabi 2018).

Aşınmanın meydana gelmesiyle birlikte birçok sorun ortaya çıkmaktadır. Aşınma makine parçaları arasında boşluk oluşmasına ve sistemlerin fonksiyonlarının yerine getirememesine sebep olabilmektedir. Bunun yanı sıra sistemde titreşimlerin ve gürültülerin meydana gelmesine, verimin düşmesine, sıcaklığın aşırı artmasından kaynaklı mekanik özelliklerin azalmasına ve yağlayıcı madde bulunma durumunda ise vizkozite ve yapışma durumunun artmasına sebep olmaktadır (Akkurt 2012).

Mühendislik malzemelerinde meydana gelen yıpranma olayının aşınma olarak ifade edilebilmesi için mevcut olan aşağıda verilen birkaç şartın sağlanması gerekmektedir:

- Mekanik bir etken olması
- Sürtünmenin (bağlı hareketin) olması
- Hareketin devamlı olması
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana gelmesi

Aşınma aniden ve zamana bağlı olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkmaktadır. Aniden meydana gelen aşınma olayında şekiller bozulur, kilitlenir ve işlev görmez duruma gelir. Zamana bağlı meydana gelen bir bozulma olayının gerçekleşmesi için ise belirli bir zamanın geçmesi gerekmektedir. Şekil 9'da aşınma-ömür diyagramı görülmektedir. Bu diyagrama bakıldığında, zamana bağlı aşınmanın üç aşamada meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 9. Aşınma-zaman (ömür) diyagramı (Barari *et al.* 2019)

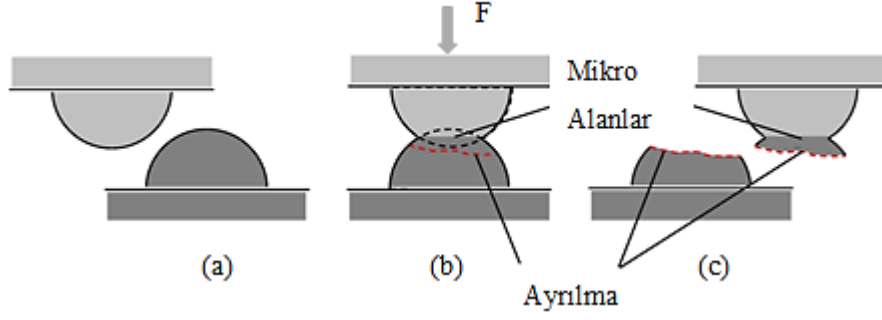
Birinci bölgede parçalar çalışmaya başladığında şiddetli bir aşınma meydana gelmektedir. Bu bölgeye rodaj bölgesi denilmektedir. Parçaların birbirine alışma safhası olarak bilinen rodaj bölgesidir ve parçanın daha sonraki safhalarda aşınmasını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden rodajların kısa sürede iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bunun için rodajların yapılması esnasında bu safhaya ait özel yağlar tercih edilmektedir. İkinci kısım esas çalışma durumunda meydana gelen aşınmaları kapsamaktadır. Bu bölgede aşınma hızı sabit yada çok düşüktür. Bu bölgede zaman ilerledikçe parçalar arası boşluklar gittikçe büyümeye başlamaktadır ve dinamik titreşimlerin artması ve kullanılan yağlama durumlarının kötüleşmesiyle birlikte aşınma miktarı gittikçe artmaya başlamaktadır. Bunun sonucu olarak şiddetli aşınma meydana gelmektedir. Şiddetli aşınma üçüncü bölgeyi kapsamaktadır. Şiddetli aşınma sonucunda malzemede iki durum söz konusudur. Bu durumlar malzemenin kırılması ve makinenin tamamen bozulması olarak karşımıza çıkmaktadır (Demet 2013).

Bunlara birlikte, malzemelerin özelliklerine göre aşınma olayı farklı mekanizmalar ile meydana gelmektedir. Farklı pek çok aşınma mekanizması olmakla birlikte, malzemelerde en fazla karşılaşılan aşınma türleri:

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Korozyon aşınma
- Erozyon aşınma
- Yorulma aşınması olarak karşımıza çıkmaktadır (Akinlabi 2018).

Adhezif aşınma

Farklı işlemlerden faydalanılarak üretilen mühendislik parçaları tamamen düz ve homojen bir yüzeye sahip değildirler. Mühendislik malzemelerinin yüzeylerindeki temaslar malzeme yüzeylerinin mikro pürüzlere sahip olması sebebi ile bazı farklı noktalarda meydana gelmektedir. Bu noktalar çevre kısımlarında çok yüksek gerilmelere sebep olmaktadır. Bunun sonucunda yüzeyde lokal temaslar sonucunda lokal plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Yüzeylerde meydana gelen bu yüksek gerilmeler cisimlerin yüzeylerinde oluşan tabakaları parçalamaktadır ve malzemelerin molekülleri direk temas ederek bölgesel olarak kaynak bağlarını oluşturmaktadır. Bu kaynak bağlarının kopmasıyla birlikte Şekil 10'da gösterildiği gibi adhezif aşınma meydana gelmektedir (Soleimani *et al.* 2017).



Şekil 10. Adeziv aşınmasının oluşumu (Pape *et al.* 2020)

Adhezif aşınma ile ilgili yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler şu şekilde ifade edilmektedir:

1. Adhezif aşınma kolay alaşım yapılabilen ve benzer yapılara sahip malzemeler arasında oluşmaktadır.
2. Yüzeylerin izafi hızına bağlı olan aşınma, pratik uygulamalarda nispeten yüksek hız ve yüksek yüklerde meydana gelen bir aşınma türüdür.
3. Adhezif aşınma, sürtünmenin meydana geldiği tüm kaynak bileşim noktalarında oluşmaktadır. Bu aşınma türü teorik olarak Archard eşitliği/denklemi (Denklem 4) ile açıklanmaktadır. Bu denkleme göre;

$$w_a = \frac{V}{L} = K \frac{W}{H} \text{ dır.} \quad (4)$$

w_a = Aşınma oranı

V = Aşınma hacmi

K = Aşınma katsayısı

F = Normal yük

L = Kayma mesafesi

H = Daha yumuşak olan malzemenin sertliği

olarak ifade edilmektedir.

4. Yüzeylerin birinin sertliği diğerine göre daha az bir değere sahipse yumuşak malzemelerde kaynak bağları kopmaktadır.
5. Adhezif aşınma olayında yağlama durumu da önemli bir yer kaplamaktadır. Yüksek basınç ve hıza maruz kalan yüzeylerde yağlama işlemi uygulandığında aşınma büyük ölçüde engellenmektedir.
6. Oksit ve nem gibi doğal koşullarda oluşan tabaka aşınma olayından büyük ölçüde etkilenmektedir (Owsalau 2012).

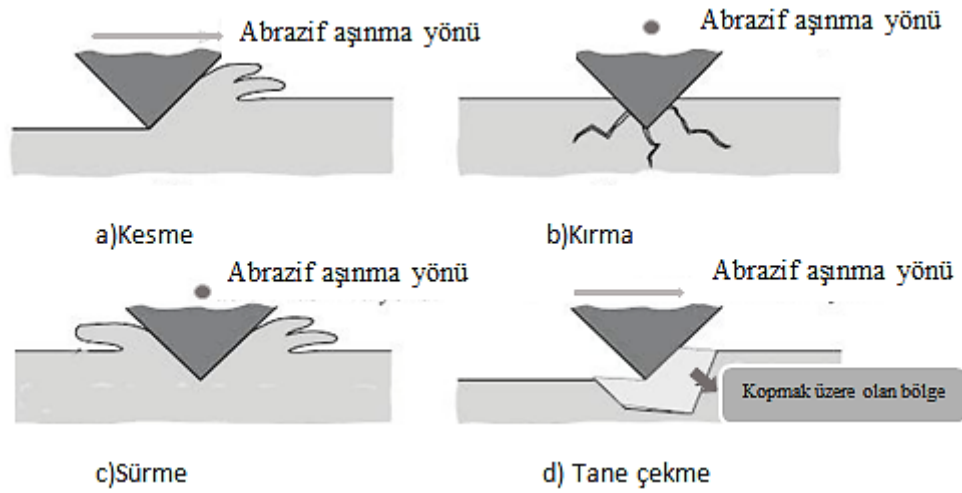
Adhezif aşınmanın meydana gelmesini engellemek için alınan önlemler şu şekilde sıralanabilir:

- Bölgesel sıcaklıkların yüksek olduğu kısımlarda meydana gelen adhezif aşınma, yağlayıcılardan yararlanılarak engellenebilir. Bunun sonucunda mikro-kaynak oluşumuna neden olabilen metal-metal temasının önüne geçilmiş olur.
- Yapışma ve mikrokaynak sonucunda meydana gelen adhesiv aşınmayı önleyebilmek için birbiri içinde çözünemeyen metaller tercih edilmelidir. Bu yüzden tercih edilen malzemelerin farklı kristal yapıya ve farklı kimyasal özelliklere sahip olması gerekmektedir.
- Düz ve pürüzsüz yüzeyler tercih edilmelidir. Çünkü düz ve pürüzsüz yüzeyler mikro boyutta meydana gelen teması azaltmaktadır ve bu durum aşınmanın büyük ölçüde azalmasına neden olmaktadır.
- Malzeme yüzeyine film tabakaları ve kaplamalar kullanarak metal metal teması önlenerek aşınma azaltılmaktadır. Bu kaplamalara yağlama özelliğine sahip olan yapısında klorür içeren yüzey filmleri örnek olarak verilmektedir (Ergüler 2005).

Abrazif aşınma

Abrazif aşınma malzemenin yüzeyinden sürekli geçiş nedeniyle meydana gelmektedir. Abrazif aşınmanın meydana gelebilmesi için yüzeye etki eden taneciklerin yüzey malzemesinden daha sert bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Eğimin daha fazla olduğu yüzeylerde, partiküllerin bu noktalara temas etmesi ve malzemeyi yüzeyden koparması nedeniyle daha kolay bir şekilde aşınma meydana gelmektedir (Martin 2020).

Abrazif aşınmanın Şekil 11’de gösterildiği gibi birden çok mekanizması vardır. Bu mekanizmalar karşımıza kesme, kırma, sürme ve tane çekme olarak çıkmaktadır. Bu mekanizmalar etkileştikleri yüzeyin özelliklerine bağlıdır. Sünnek bir malzeme ise, kesme ve sürme yöntemi, gevrek bir malzemeyse kırılma ve tane çekme meydana gelme olasılığı daha yüksektir. Sonuç olarak, bu mekanizmalar sünnek malzemelerde plastik deformasyon sonucunda, gevrek malzemelerde ise çok az bir plastik deformasyon sonucunda meydana gelmektedir. Fakat bazı sünnek malzemelerin yüzeyleri bazı kırılğan alanlara sahip olduğu için bu ifade her zaman doğru kabul edilmemektedir. Abrazif aşınma mekanizmasında sertlik, tane yapısı, pürüzlerin boyutu ve şekli, kayma hızı, aşındırıcı tane ve uygulanan normal yük gibi temel faktörler etkilidir (Martin 2020).



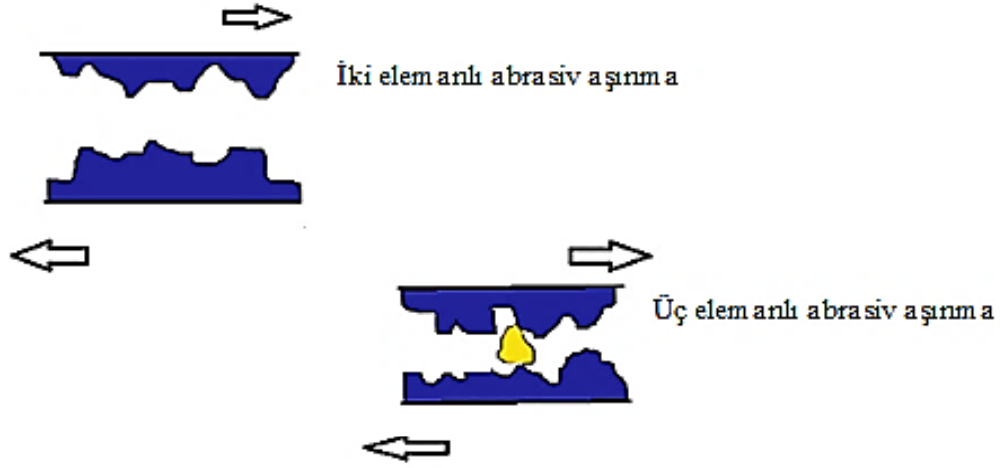
Şekil 11. Abrazif aşınma mekanizmaları (Martin 2020)

Aşınma partiküllerinin aşınmış yüzeyi üzerindeki geçiş şekli abrazif aşınmanın doğasını belirlemektedir. Şekil 12’de görüldüğü üzere abrasiv aşınmanın iki elemanlı ve üç elemanlı abrasiv aşınması olmak üzere iki modu vardır.

İki elemanlı abrazif aşınma birbirinden farklı sertliğe ve yüzey pürüzlülüğüne sahip iki katı cisim arasında meydana gelen aşınma türü olup genellikle makinelerde ve yataklarda karşımıza çıkmaktadır. Sert aşınma partikülleri kırılma yoluyla oluşmaktadır ve bu durum aşınmanın şiddetinin artmasına sebep olmaktadır. Üç elemanlı abrazif aşınmada aşındırıcı partiküller yüzey üzerinde hem kayarak hemde yuvarlanarak hareket etmektedir. Kayma hareketi kesme aşınmasına yol açarken yuvarlanma hareketi ise temas yüzeyinde plastik deformasyona neden olmaktadır. Mekanizma ve parçacık boyutu dikkate alındığında kayma hareketi aynı zamanda iki parça arasındaki boşluğa bağlı olmaktadır (Gupta 2023).

Abrazif aşınmayı önlemek için alınacak önlemler şu şekildedir:

- Yüzey sertliğini arttırarak abrasiv aşınma sorunu önüne geçilebilir. Fakat bu alınan önlem aynı zamanda malzemenin gevrekliğini artırarak kırılma riskini artırabilir.
- Aşınma meydana gelen sistemdeki sert partükülleri sistemden uzaklaştırarak aşınma önlenabilir. Yağlarda kullanılan partiküller, kullanılan hava ve su filtre edilerek sistemden uzaklaştırılabilir.
- Abrazif aşınmaya maruz kalan malzemelerin kolay bir şekilde değiştirilebileceği tasarımların yapılması ile aşınma azaltılabilir (Akkurt 2012).



Şekil 12. İki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınma (Selvaraj *et al.* 2021)

Korozif aşınma

Metal ve alaşımlardan oluşan parçalar için korozif bir ortam söz konusu olduğu zaman bu parçalar birleşik oluşturmak için çevre ile kimyasal bir reaksiyona girmektedir. Bunun sonucunda farklı bileşikler oluşturarak metalin içyapısını zayıflatmaktadır. Meydana gelen bu bileşiklerin ana metal ile bağlantıları zayıf olduğu için oluşan birleşikler ana metalden kopmaktadır. Metallerde aşınma ve korozyon olaylarının aynı anda meydana gelmesi olayına korozif aşınma denilmektedir (Owsalou 2012).

Korozif aşınma esnasında oluşan reaksiyon ürünleri alt tabakadan farklı malzeme gibi davranmaktadır. Bu yüzden aşınmaya çoğunlukla bu ürünler sebep olmaktadır. Korozif aşınmanın aşınma modu olarak hareket ettiği dört durum söz konusudur. Bu durumlar:

1. Dayanıklı bir film tabaka olarak genellikle yağlayıcılar kullanılarak aşınma ve korozyonun önüne geçilmektedir.
2. Yağlayıcılar kullanılarak oluşturulan tabaka, zayıflığı ve kayması nedeniyle hasara sebep olmaktadır. Bunun sonrasında alt tabaka ve tutma pini arasında etkileşim meydana geldiğinde önemli ölçüde bir aşınma miktarı meydana gelmektedir. Bu durumda hem koruyucu tabaka da hemde alt tabaka da aşınma kalıntıları olmaktadır. Bu durumun sonucunda malzemenin kaldırıldığı yerde film büyümesi meydana gelmektedir.
3. Orta derecede aşınmış koruyucu tabaka ve alt zemin ile geriye kalan tabakalar arasında bağlantı bulunmaktadır. Bu durum çok yüksek aşınma miktarlarına sahip paslanmış bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır.
4. Korozyon ve mekanik aşınma süreçleri ayrı bir şekilde hareket etmektedir. Aşınmanın en çok meydana geldiği davranıştır (Martin 2020).

Koroziv aşınmadan kaynaklanan hasarı teorik olarak ifade etmek mümkündür. Hasar şu şekilde ifade edilebilir :

$$v_t = (v_w + v_c + v_s) \quad (5)$$

v_t = Koroziv aşınmanın neden olduğu toplam hacim kaybı

v_w = Aşınmadan kaynaklanan hacim kaybı

v_c = Korozyonun neden olduğu hacim kaybı

v_s = Aşınma ve korozyon sinerjisinden kaynaklanan hacim kaybı (Nouri 2017).

Erozif aşınma

Erozif aşınma, sıvı ve katı partiküllerin sürekli geçişinden ziyade bir yüzey etkisi olarak karşımıza çıkması yönüyle adeziv aşınmadan farklıdır. Tüm aşınma çeşitlerinde görüldüğü üzere, eroziv aşınma da parçacık ve etkileşim halindeki yüzeye bağlıdır. Eroziv aşınmadaki kilit nokta ise partiküllerin yüzeye çarpmasını içeren her tür aşınmayı kapsıyor olması ve etki edemediği için "darbe" kelimesi olmasıdır ve diğer aşınma modlarında kategorize edilebilmesidir. Kısaca eroziv aşınma yüzeye çarpan sert partiküllerin ürettiği yüzey hasarıdır. Aynı zamanda bu aşınma çeşidi çok hızlı bir şekilde kusurlara neden olmaktadır ve kontrol edilmesi zor olduğu için oldukça zararlı bir aşınma çeşidi olarak karşımıza çıkmaktadır (Martin 2020).

Erozif aşınma mekanizmaları Şekil 13'te gösterildiği gibi kesme erozyonu, yüzey yorgunluğu, plastik deformasyon, yüzey erimesi ve makroskobik etki olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 13-a'da gösterildiği gibi kesme erozyonu, aşınan partiküllerin düşük açıyla malzeme yüzeyine çarpması neticesinde aşınan yüzeyde yırtılma oluşması durumuna denilmektedir. Malzemenin aşınması, aşınma döküntüsünün oluşmasına neden olan darbe kısmında meydana gelmektedir. Şekil 13-b'de gösterildiği gibi yüzey yorulması, aşınan partikülün çok yüksek darbe açısıyla düşük hızda malzeme yüzeyine çarpması ile ortaya çıkmaktadır. Darbe hızının düşük olması sebebiyle plastik deformasyonla uyumlu olmayan gerilmeler meydana gelmektedir. Şekil 13-c'de plastik deformasyon ile eroziv aşınmaya yer verilmektedir. Bu durum ortalama bir hızda aşınan parçacığın olması ve yüksek darbe açısının mevcut olduğu durumlarda karşımıza çıkmaktadır. Malzeme sünek olduğu zaman, aşınma kalıntılarının olduğu yüzeylerde plastik deformasyon meydana gelmektedir. Gevrek malzemeler söz konusu olduğunda ise yüzeyde aşınma kalıntıları büyük olup çatlak oluşumları meydana gelmektedir (Verma 2016).

Plastik deformasyon ile oluşan erozyon ile yüzeye çarpan partiküllerin kütlesi arasındaki oran şu şekilde ifade edilmektedir:

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \quad (6)$$

K=Aşınma katsayısı

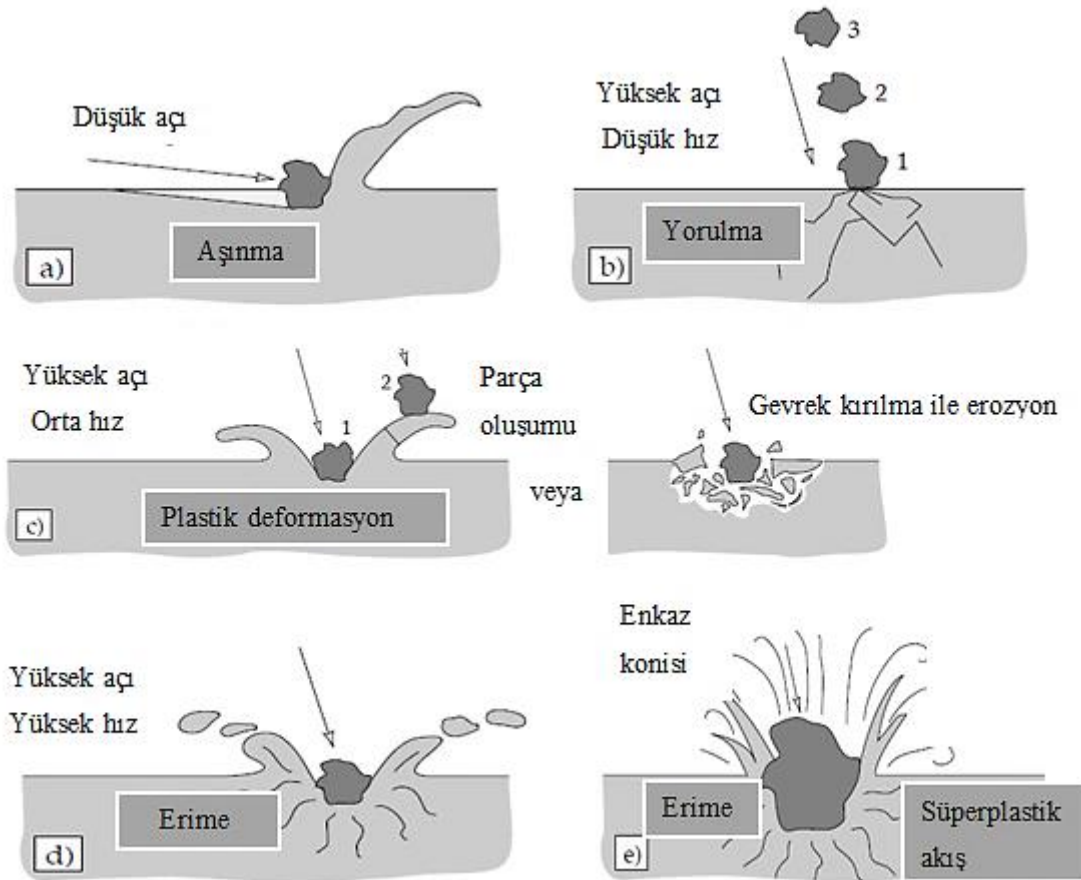
ρ = Aşınan malzeme yoğunluğu

U= Hız

H= Sertlik

Bu denklem çarpma açısının oluşturduğu etkiyi hesaba katmamaktadır.

Şekil 13.d’de eroziv aşınma ile yüzey erimesine yer verilmektedir. Bu durum karşımıza çok yüksek bir hızda yüzeye gelen partikülün olması ve yüzeyin yüksek darbe açısıyla etkilendiği durumlarda karşımıza çıkmaktadır. Malzeme yüzeyinin ergime noktası, yüzeyde ciddi hasarlara yol açabilen darbe sıcaklığından daha az bir değere sahip olduğunda ortaya çıkmaktadır. Bir diğer erozyon mekanizması ise makroskobik etki ile meydana gelmektedir ve Şekil 13-e’deki gibi gösterilmektedir. Bu durum malzemenin yüzeyinin ergimesi, yüksek miktarlarda aşınma döküntülerini kapsamaktadır. Yüzeye etki eden patiküllerin büyüklüğünden kaynaklanmaktadır (Verma 2016).



Şekil 13. Eroziv aşınma mekanizmaları: a) kesme erozyonu, b) yüzey yorgunluğu, c) plastik deformasyon d) yüzey ergimesi ve e) makroskobik etki (Martin 2020)

Erozyon mekanizmaları değiştiren ve erozyon hızını kontrol edebilen birçok faktör karşımıza çıkmaktadır. Bu faktörleri üç başlık altında sıralanmaktadır:

1. Çalışma Koşulları: Hız, ivme, çarpma açısı, tortu parçacıklarının konsantrasyonu, akış ortamı, sıcaklık.

2. Aşınan Partiküller: Aşınan partiküllerin boyutu, şekli, sertliği, malzemesi.

3. Alt Tabakalar: Alt tabakanın elastik özelliği, sertliği, yüzey morfolojisi (Martin 2020).

Yorulma aşınması

Yuvarlanma ve kayma durumlarında yüzeye uygulanan yük değişken ve sürekli ise yüzeyin altında gerilmelerin bulunduğu yerlerde plastik deformasyon ve dislokasyona bağlı olarak mikroçatlaklar meydana gelmesine ve bu çatlaklar yüzeye yüzey altı bölgelere ilerleyerek yüzeyden parçacıkların ayrılmasına sebep olmaktadır. Bu tür aşınmalara yorulma aşınması denilmektedir. Bu aşınma türü dişli çarklar, rulmanlı yataklar, kam mekanizmaları gibi birbirleriyle sürekli temas halindeki yüzeylerde sıklıkla görölmektedir. Yorulma aşınması önlemek için alınacak önlemler şu şekildedir:

- Yüzey pürüzlölüğünü azaltmak
- Parçanın yüzeyine karbürleme, nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri uygulamak
- Çevre koşullarını değiştirmek (Bahari 2017).

Aşınmaya etki eden faktörler

Aşınmaya etki eden faktörler incelendiğinde karşımıza ilk olarak sertlik ve kimyasal kompozisyon çıkmaktadır. Tercih edilen malzemelerde sertlik arttıkça malzemelerin mukavemetinde artış meydana gelmektedir ve bu durum malzemenin yüzeyinden parça kopmasını zorlaştırmaktadır. Malzemelerin kimyasal kompozisyonu incelendiği zaman malzemedeki kimyasal bileşen yapışmayı azaltacak özelliklere sahip olduğunda ve aynı zamanda korozyona dayanıklı ise aşınma miktarlarında azalmalar meydana gelmektedir. Aşınma söz konusu olduğu durumlarda malzeme seğimi, pürüzlölük, tane boyutu, yüzey işlemleri, yağlama, temas/kontak geometrisi, yük, hız ve sıcaklık kriterleri de önemli bir yer kaplamaktadır. Aşınma dayanımını daha üst seviyelere çıkarmak için birbiriyle etkileşim halinde olan malzemelerin farklı tercih edilmesi gerekmektedir. Farklı tercih edilen malzemeler arasında kaynak yapabilme kabiliyeti iyi olmadığı için adhezif aşınmasına olumlu yönde bir etki sağlayacaktır. Malzemelerdeki pürüzlölük oranı arttıkça etkileşim noktalarındaki yükü taşıyacak olan gerçek alan azalacaktır ve bu durumda aşınma miktarının

artmasına sebep olacaktır. Bunu tersi bir durumda, yüzeylerin pürüzsüz sayılabilecek kadar düzgün yüzeylerde aşınma kalıntılarının kalması ve çekim kuvvetinin iki yüzey arasında fazla olması durumuyla karşılaşıldığı zaman aşınma miktarlarında artış meydana gelmektedir. Fakat pürüzlülük yönüne hareketin yönü dik olarak geliyorsa aşınma miktarında azalmalar meydana gelmektedir. Malzemelerde tane boyutu ve malzeme arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Malzemenin tane boyutu ne kadar küçükse malzemedeki tokluk oranında o derece yüksek olmaktadır. Malzemelere uygulanan yüzey işlemleri aşınmayı azaltıcı yönde etki etmektedir. Yüzeylerde çeşitli termo kimyasal ve elektro kimyasal yöntemler kullanılarak elde edilecek tabakalar kullanılan iki metal arasındaki sürtünme katsayısını ve tutunabilme özelliğini düşürücü etki yarattığı için, malzemelerde oluşan aşınmaları azaltıcı yönde etki sağlamaktadır. Aynı zamanda elde edilen bu reaksiyon tabakalarının farklı çalışma koşullarında yüzeyden ayrılarak abrasiv aşınmalara sebep olmaması gerekmektedir. Bu durumda malzeme yüzeylerine PVD, CVD, vb. ile kaplama gibi yüzeyin mekanik özelliklerini iyileştirici işlemler uygulanmaktadır. Malzemenin aşınmasına etki eden bir diğer faktör olarak karşımıza temas/kontak geometrisi çıkmaktadır. Tercih edilen malzemelerin yüzeyleri arasında oluşan aşınma artıkları ortamdan uzaklaştıkça malzemedeki aşınma miktarında olumlu yönde artmaya başlamaktadır. Bir diğer etki ise yüzeye gelen kuvvettir. Eğer yüzeye gelen kuvvetler normal ve bileşke kuvvet olarak karşılaştırılırsa bileşik bileşke kuvvet geldiği durumlarda aşınma miktarının daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Malzemelere uygulanan yük miktarı arttığı durumlarda aşınma oranında da bir artış meydana gelmektedir. Aşınma ile kayma hızı karşılaştırıldığı zaman aralarında ters bir orantı olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi olarak karşımıza sürtünme halindeki yüzey alanının azalması ve sürtünme katsayısını ısı sebebiyle azaltıcı yönde etki etmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Makine parçalarında meydana gelen ısınma aşınma oranlarında artış meydana getirmektedir. Yükselen sıcaklık malzeme yüzeyindeki sertliğe azaltıcı yönde etki etmektedir. Bu durum plastik deformasyonun kolaylaşmasına ve aynı zamanda yüzeylerde oksidasyona sebebiyet verdiği için aşınma miktarına olumsuz yönde etki etmektedir. Aşınma şiddetinin hızlı olduğu durumlarda çevre sıcaklığının yüzeyin özelliklerini iyileştirmesi sebebiyle aşınmaya katkısı olumlu yönde karşımıza çıkmaktadır. Aşınmaya karşı alınabilecek en ekonomik ve kolay tedbir olarak karşımıza yağlama çıkmaktadır. Yağlayıcı madde tercih edilmesinin sebebi yüzeyde oluşabilecek metal-metal sürtünmesini engelleyerek sıvı-metal sürtünmesini sağlamaktır (Aksoy *et al.* 1991 ; Seçer 2019).

Yağlama

Yağlayıcı maddeler sürtünmeyi en aza indirmek ve aşınmayı kısmen veya tamamen ortadan kaldırmak için ve artan sıcaklıkları kontrol altına alabilmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra kalıntıları gidermek ve mekanik sistemlerin verimliliğini ve ömrünü iyileştirme yönünde olumlu yönde katkılar sağlamaktadır. Yağlayıcı maddeler incelendiği zaman karşımıza katı, sıvı ve gaz yağlayıcılar olmak üzere dört ana başlık halinde çıkmaktadır. Bu yağlayıcılara örnek olarak:

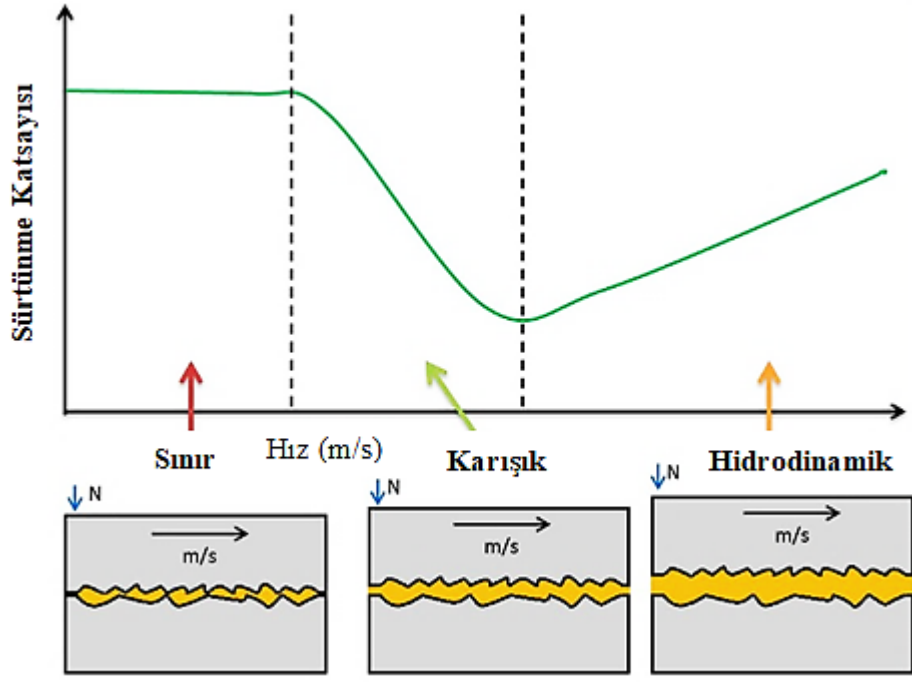
- Sıvı yağlayıcılar: Organik (bitkisel ve hayvansal), mineral (madensel) ve sentetik yağlar
- Katı yağlayıcılar: Grafit ve molibden disülfid
- Yarı katı yağlayıcılar: Gresler
- Gaz yağlayıcılar : Hava, hidrojen, azot vb. verilmektedir (Menezes 2013).

Yağlayıcı olarak ifade edilen bir maddenin şu özelliklere sahip olması gerekmektedir:

- Kimyasal olarak malzeme yüzeylerine etki edip bozmaması
- Korozyona engel olması
- Atmosfer koşullarına ve sıcaklığa karşı dayanımının yüksek olması
- Isıyı çalışma bölgesinden uzaklaştırması
- Temas halinde olan yüzeylerde tutunma kabiliyetinin yüksek olması
- Gerekli durumlarda yüzeyleri ıslatması ve zararlı parçacıkları uzaklaştırması (Seçer 2019).

Yağlama mekanizmaları

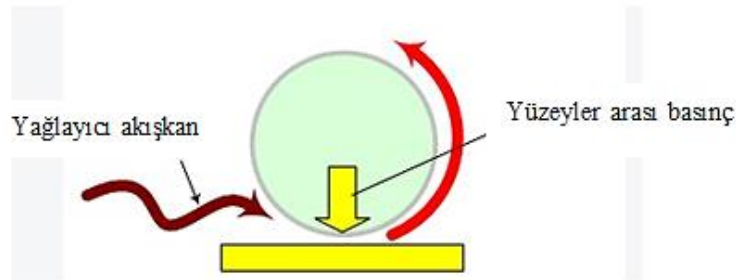
Yağlama mekanizmalar karşımıza tam film yağlama, karışık yağlama ve sınır yağlama olmak üzere üç ana başlık altında çıkmaktadır. Yağlama rejimlerini ifade edebilmek için Şekil 14'te gösterilen Stribeck eğrisinden faydalanılmaktadır. Karışık ve sınır yağlama durumlarında temas tamamen önlenemediği için sürtünme katsayısının artmasına sebep olmaktadır. İki yüzeyin birbiriyle tamamen ayrıldığı yağlama mekanizmasına tam film yağlama denilmektedir. Tam film yağlama olduğu zaman düşük sürtünme katsayısı büyük ölçüde azalmaktadır. Bu yağlama mekanizması elastohidrodinamik ve hidrodinamik yağlama olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir (Gao 2021).



Şekil 14. Stribeck eğrisi (Zhou *et al.* 2015)

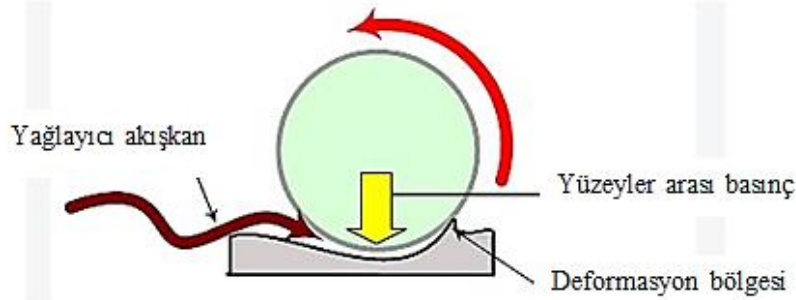
Şekil 15'te gösterilen, tam film yağlama veya sıvı yağlama olarak da ifade edilebilen hidrodinamik yağlama rejimi kullanılan malzemelerdeki kayma hızları içeri giren yağlayıcı maddeyi ara yüzde oluşan boşluğa çektiğinde, tutucu olan yüzeyleri birbirinden ayırmak için basınç uygulamaktadır. Yağlayıcı maddenin viskozitesi ara yüzeyde ani sıkışmaya engel olan bir yük taşıma kapasitesi oluşturmaktadır. Bu yağlama çeşidi endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun nedeni, yüzeyde meydana gelen pürüzlerin yüksekliğinin film kalınlığından kat kat daha ince olmasından kaynaklanmaktadır (Rebai 2014).

Fakat düşük hızlar söz konusu olduğu zaman bazı noktalarda temas meydana gelme durumu sonucunda adhezif aşınma meydana gelmektedir. Yüksek hızlar söz konusu olduğunda ise sürtünmedeki artış sebebiyle eroziv aşınma meydana gelmektedir. Bu durumun meydana gelmesini önlemek için kullanılacak yağın viskozitesinin tüm çalışma koşullarında hidrodinamik durumu devam ettirebilecek şekilde tercih edilmesi gerekmektedir (Rebai 2014).



Şekil 15. Hidrodinamik yağlama (Rodgers 2019)

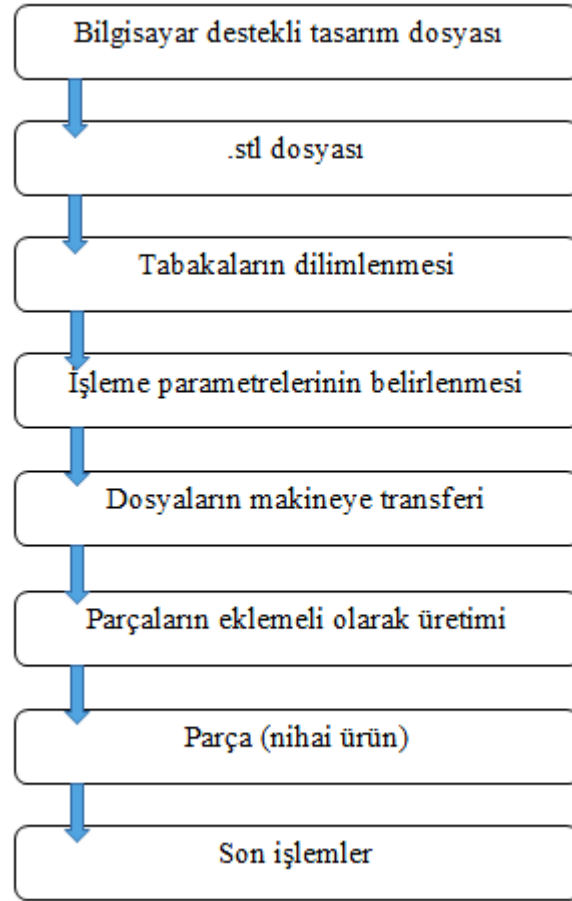
Hidrodinamik yağlamanın ve tutucu ara yüzlerdeki pürüzlerin elastik deformasyonun bileşimi elastohidrodinamik yağlama olarak ifade edilmektedir. Yağlayıcı madde, yük ve basınç üzerinde bulunduğu yüzeyden daha çok kayma gerilmesine sebep olmaktadır. Bu durum söz konusu olduğunda kuvvet altında olan parçacıkların elastik şekil değişimine uğradığı Şekil 16’de verilmektedir. Bu durum söz konusu olduğunda yüksek basınç katkı maddeleri barındıran yağlayıcı türleri, filmin kopmasını yüzey üzerindeki temas alanını artırarak engellemektedir (Hamrock 1991).



Şekil 16. Elastohidrodinamik yağlama (Rodgers 2019)

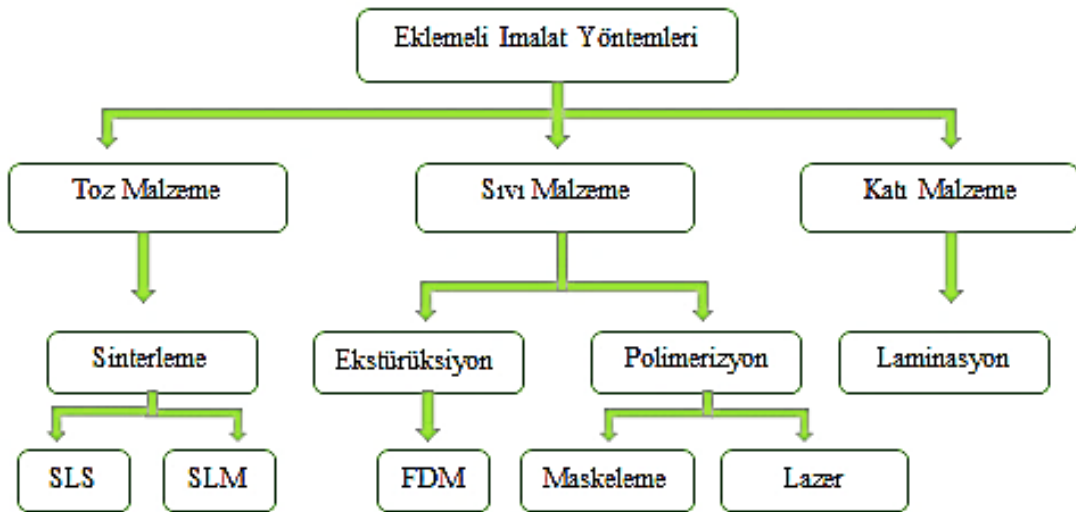
Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri üç boyutlu (3B) verileri kullanarak karmaşık geometrili parçaların hızlı bir şekilde imalatını gerçekleştirmek için malzemelerin katman katman birbiri ardına eklenmesiyle malzemelerin imalatını gerçekleştiren bir teknik olarak bilinmektedir. Eklemeli imalat eskiden hızlı prototipleme yapılırken tercih edildiği için hızlı prototipleme olarak da karşımıza çıkmaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri Şekil 17’de gösterildiği gibi birçok aşamadan meydana gelmektedir (Fotovvati *et al.* 2018).



Şekil 17. Eklemeli imalatın şematik akışı

Eklemeli imalat yöntemlerine Şekil 18’de ki gibi sınıflandırılmaktadır. Bu imalat yöntemlerine bakıldığı zaman en çok tercih edilen imalat yöntemleri olarak karşımıza, Stereolitografi (SLA), Eriyik yığma ve modelleme (SLS), Seçici Lazer Ergitme (SLE/Selective Laser Melting-SLM) çıkmaktadır (Minshall and Deradjat 2016).



Şekil 18. Eklemeli imalat yöntemleri (Minshall and Deradjat 2016)

Stereolitografi (SLA)

Eklemeli imalat yöntemlerinin en yaygın türlerinden biri SLA' da hammadde bir sıvıdır ve bir ışık ışınından (lazer, UV vb.) faydalanılmaktadır. Katman kalınlıkları malzemeler sertleştirilirken ışıktan faydalandığı için, yayılan ışının yoğunluğuna ve malzeme özelliklerine bağlı olan belirli bir değeri geçmemektedir. Katmanların her biri katılaştıktan sonra numune tutucunun şahmerdanı aşağıya doğru inmektedir ve katmanlar art arda birleştirilip katılaştırılmaktadır. Aynı zamanda geometrik karmaşıklıklara bağlı olarak bazı modifikasyonlar ve değerlendirmeler olmaktadır. Bu özellikler destekler, çıkıntılar ve alttan kesmeler olarak karşımıza çıkmaktadır (Fotovvati *et al.* 2018).

Eriyik yığma ve modelleme (SLS)

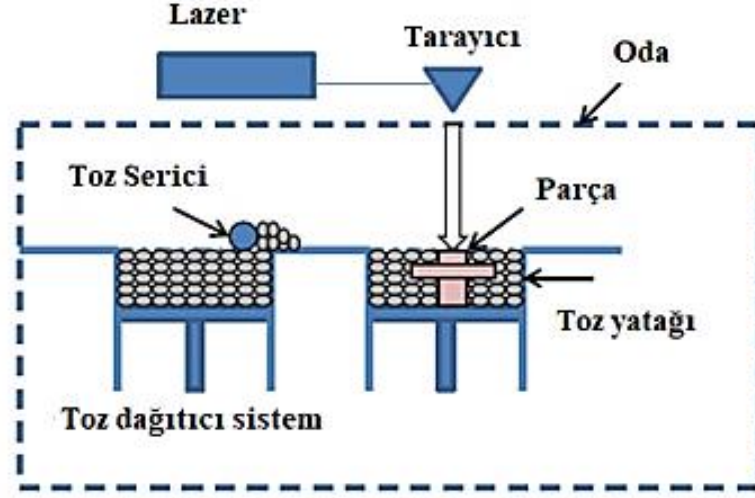
İnce tozların katman katman yayıldığı ve sinterlendiği bir eklemeli imalat yöntemi olan SLS' de bir düzleştirici silindir vasıtasıyla düzgün bir yüzey oluşturmak için silindir yardımıyla yüzey tamamen toz eşit bir şekilde kaplanmaktadır. Toz katmanı üzerine yönlendirilen lazer ışını parçanın enine kesitini taramaktadır. Katmanlar sırayla üretilmektedir ve üretim bitene kadar her katman üretildikten sonra rulo ile bir yatak üzerine taze toz tabakası yayılmaktadır (Özer 2020).

Seçici lazer ergitme (SLM)

Şekil 19'da şematik olarak gösterilen seçici lazer ergitme yöntemi, yüksek hassasiyette ve yüksek kalitede işlevsel ürünlerin üretimindeki en başarılı eklemeli imalat yöntemlerinde biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Seçici lazer ergitme işleminde toz esaslı teknikler kullanılmasının yanı sıra asal (inert) bir gaz odası ve bir toz dağıtım platformuna içine almış bir sisteme sahiptir. Yeniden kaplama silindirinin dağıtım platformundan hareketi, toz karışımını üretim platformuna bırakmaktadır. 3D CAD modeli takip eden SLM, eşit olarak dağıtılmış ve yeniden biriken tozu katılaştırmak ve ergitmek için yoğunluğu daha yüksek lazer ışınları kullanmaktadır. Lazer ışını tozu taradığında, kütle birleştirme mekanizması ve toz birleştirme mekanizması ile enerjiyi absorbe etmektedir. İlk başta, ısı enerjisinin soğurulması, sabit bir hale gelene kadar parçacığın merkezine daha fazla akan, tek tek toz parçacıklarından oluşan dar bir tabaka aracılığıyla gerçekleşmektedir. İlk katman elde edildikten sonra bir sonraki katmanın biriktirilmesi için önceden tanımlanmış bir mesafeye inmektedir. Dilimlenmiş CAD modelinin ayrı katmanları için devam etmektedir ve parça üretimi bitene kadar bu süreç devam etmektedir.

Üretilen parçada gözenekler, mikro çatlaklar, delaminasyon ve bozulma gibi kusurların oluşmasını önlemek için işlem parametreleri hassas bir biçimde kontrol

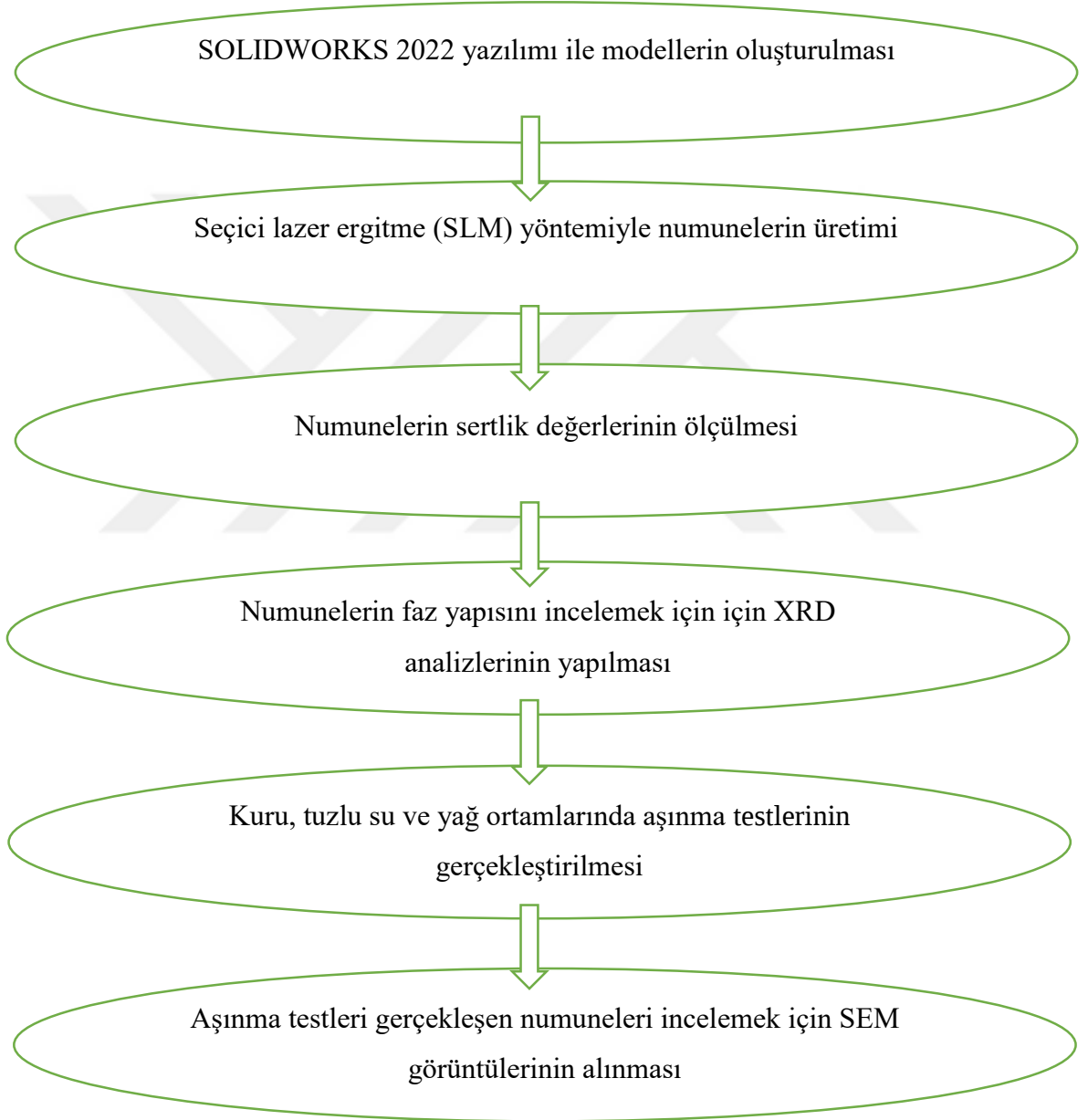
edilmektedir. Özellikle lazer parametrelerinin düzgün kontrol edilmesi durumunda yüksek kalitede ürünler elde edilmektedir (Padmakumar 2020).



Şekil 19. SLM işleminin şematik gösterimi (Kaya 2021)

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada farklı yüzey tekstürlerinin malzemelerin farklı sürtünme ve aşınma ortamlarındaki tribolojik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmaya ait iş akış şeması Şekil 20 'de verilmiştir.



Şekil 20. İş akış şeması

Malzeme

Bu çalışmada malzeme olarak yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu için korozyona, oksidasyona karşı yüksek direnç gösteren ve havacılık, otomotiv, sağlık gibi alanlarda kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik kullanımı tercih edilmiştir. Tablo 1’de AISI 316L paslanmaz çeliğin kimyasal içeriğine yer verilirken, Tablo 2’de çeliğin mekanik özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 1. AISI 316L Paslanmaz Çelik Kimyasal İçeriği (Seçer 2019)

Kimyasal Bileşim	Değerler (%)
Fe	Salt Çoğunluk
Cr	16.5-18.5
Ni	10-13
Mo	2-2.5
Mn	0-2
Si	0-1
P	0-0.045
C	0-0.030
S	0-0.030

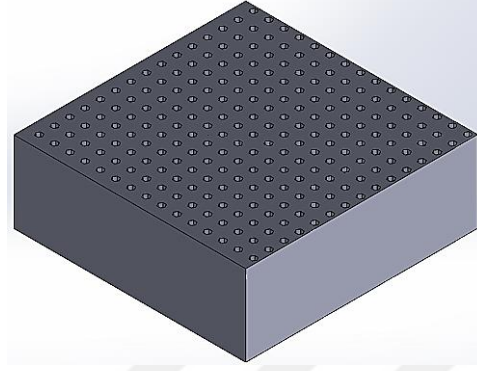
Tablo 2. AISI 316L Paslanmaz Çelik Mekanik Özellikleri (Seçer 2019)

Malzeme Özellikleri	Değerler
Akma Dayanımı	470 MPa
Çekme Dayanımı	570 MPa
Sertlik	20 HRC / 180 HV
Elastisite Modülü	200 GPa

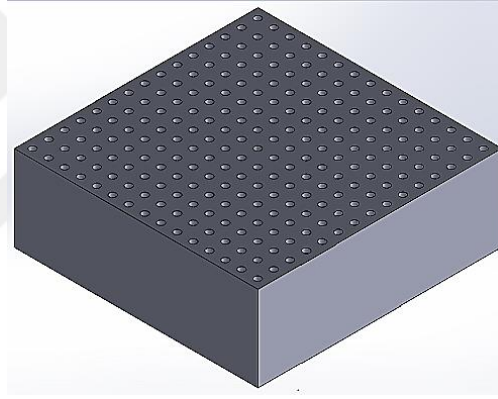
SOLIDWORKS yazılımı ile numunelerin tasarlanması ve üretimi

Bu çalışmada üretilecek olan numunelerin tasarımı Solidworks 2022 yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerindeki tekstürlerin geometrileri ve yoğunlukları dikkate alınarak; %26 tekstür yoğunluğuna sahip, 10×10×3.5mm boyutlarında altıgen, daire, kare, eşkenar dörtgen ve işlemsiz yüzey tekstürüne sahip numuneler Şekil 21-Şekil 25’ da ki gibi tasarlanmıştır. SLM yöntemi ile üretilen numuneler ile kıyaslama gerçekleştirmek amacıyla döküm ile üretilen ve herhangi bir yüzey tekstürüne sahip olmayan

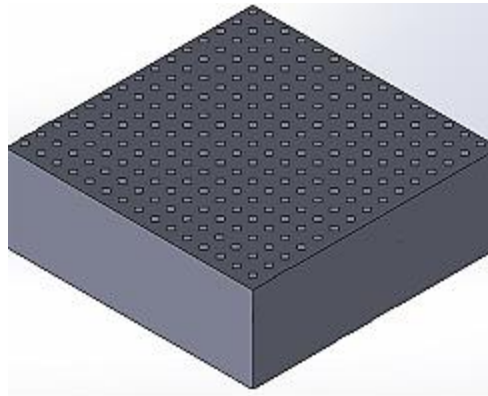
numune de kullanılmıştır. Numuneler Solidworks 2022 yazılımında tasarlandıktan sonra, Erzurum Teknik Üniversitesi YUTAM bünyesinde bulunan, Concept Lazer MCusing R+ markalı seçici lazer ergitme cihazı kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Concept Lazer MCusing R+ markalı seçici lazer ergitme cihazı katman kalınlığı 15 - 50 μm , 100W fiber lazer, maksimum tarama hızı 7 m/s gibi üretim parametrelerine sahiptir.



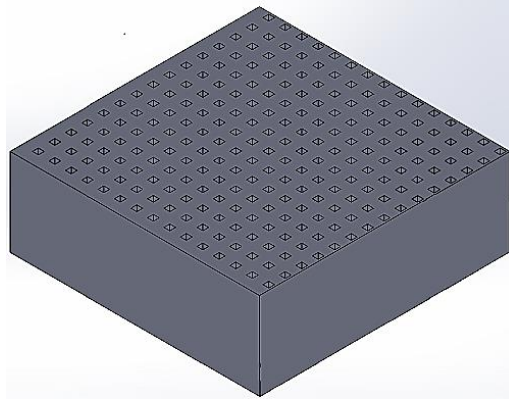
Şekil 21. Altıgen geometrik yüzey tekstürüne sahip numune



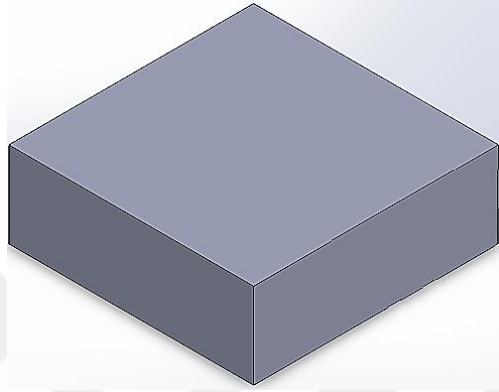
Şekil 22. Daire geometrik yüzey tekstürüne sahip numune



Şekil 23. Eşkenar dörtgen geometrik yüzey tekstürüne sahip numune



Şekil 24. Kare geometrik yüzey tekstürüne sahip numune



Şekil 25.İşlemsiz numune

Testler ve Yüzey İşlemleri

Aşınma testleri

Üretilen numunelerin tribolojik özelliklerini belirlemek için belirli koşullar altında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri için Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan TURKYUS PODWT&RWT markalı aşınma cihazı kullanılmıştır. Cihazda aşınma deneyleri yapılabilmesi için belirlenen parametrelere Tablo 3'te yer verilmiştir. Aşınma deneyleri, doğrusal aşınma yöntemi kullanılarak kuru ve sıvı ortamda doğrusal aşınma olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri yapılmadan önce numune yüzeylerine herhangi bir zımparalama işlemi uygulanmamıştır. Sadece numunelerin alt yüzeylerine üretim sonrası oluşan destekleri (support) temizlemek için zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıvı durumda yapılan aşınma için %3.5 tuzlu su ve 0.85 g/mol yoğunluğa ve yüksek viskozite oranına sahip Mobil Süper 2000 X-E markalı motor yağı kullanılmıştır. Sıvı ortamda yapılan deneylerde numune ile aşındırıcı malzeme arasında tuzlu su ve motor yağı hidrodinamik yatak etkisi oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak da tungsten karbür (WC) kullanılmıştır.

Tablo 3. Aşınma Testine Ait Parametreler

Ortam	Kuru	Tuzlu Su	Yağ
Uygulanan Yük (N)	3	3	3
Aşınma Hızı (rpm)	60	60	60
Aşınma Süresi (sn)	2700	2700	2700
Aşınma mesafesi (mm)	8	8	8
Ortam Sıcaklığı (° C)	25	25	25

Analiz ve Karakterizasyon Çalışmaları

XRD analizi

SLM yöntemi ve farklı bir yöntemle üretilmiş AISI 316L paslanmaz çelik numunelerine ait XRD (X-Işını Kırınımı) analizleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan Malvern PANalytical EMPYREAN markalı cihazda gerçekleştirilmiştir. XRD deney cihazı numunelerde meydana gelen fazların kimyasal kompozisyonunun anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. XRD cihazı X-ray tüp gücü 4kW (Max 60 Kv max 100 Ma), tüp voltajı 15-60 kV, maksimum kullanılabilir ölçüm aralığı $-111 \leq 2\theta \leq 168$ derece, $0,4\text{mm} \times 12\text{ mm}$ çizgisel odaklı $2\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ nokta odaklanma boyutuna sahiptir. Faz analizleri, CuK α ($\lambda=1.5406\text{ Å}$) radyasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tarama açısı (2θ) 10° ile 110° arasında seçilmiştir.

Taramalı elektron cihazı (SEM)

SLM yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey morfolojilerini ve aşınma görüntülerini incelemek için, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan ZEISS marka Sigma 300 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

Mikrosertlik ölçümü

İşlemsiz ve SLM ile elde edilen numunelerin sertlik değerlerini belirlemek için Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinde Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan SHIMADZU HMV-G marka ve modele sahip sertlik cihazından faydalanılmıştır. SLM ve döküm üretim yöntemi ile elde edilen numuneler üzerinde sertlik ölçümleri Vickers yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 10 sn süre ile 100 g yük etkisi altında ölçümler yapılmıştır. Ölçümler, yüzeylerin farklı noktalardan alınmış olup her bir numuneden en az beş adet ölçüm alınmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri, Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) bulunan Kla Tencor Stylus Profiler P7 Dokunarak Taramalı Profilometre ölçülmüştür.

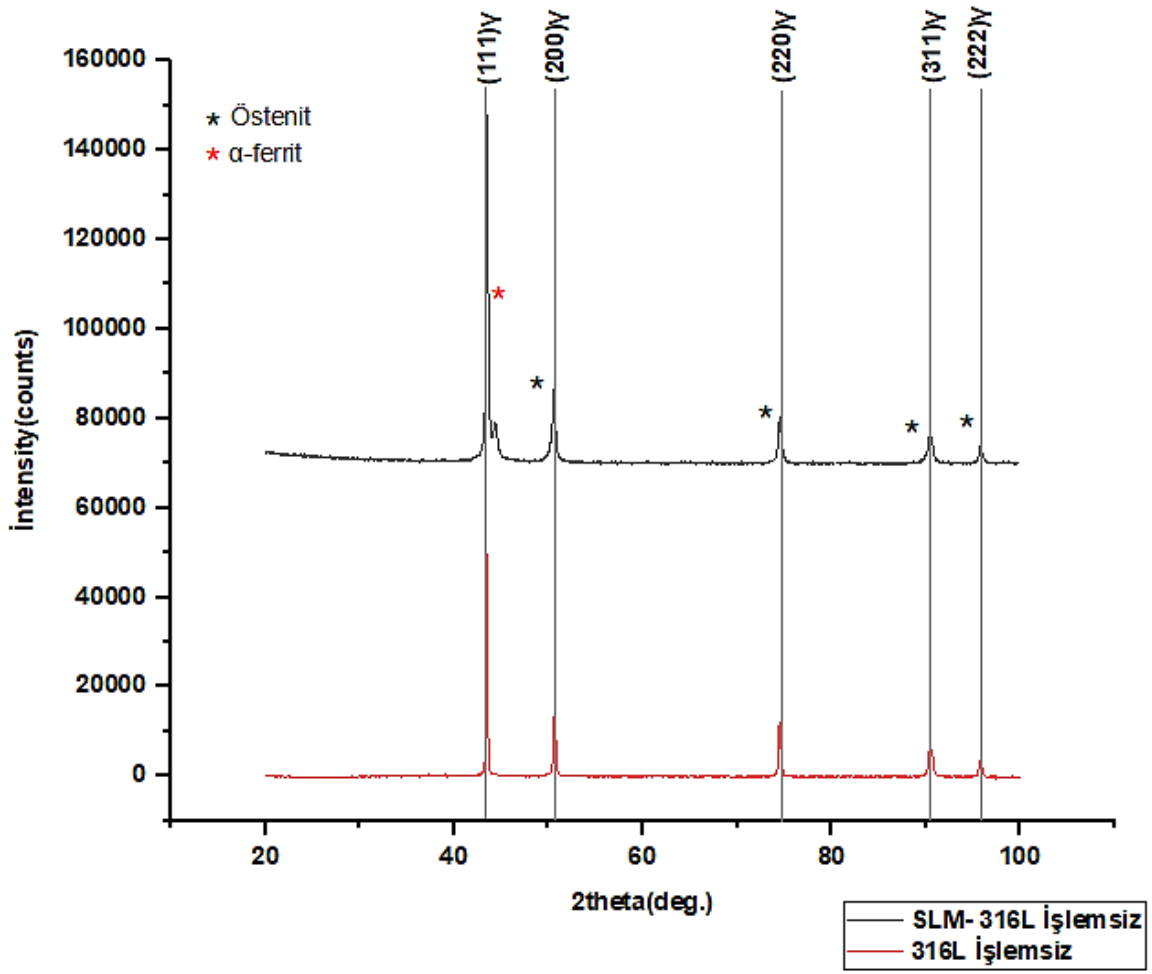


ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

XRD Analizleri

SLM yöntemi ile üretilmiş işlemsiz numune ile döküm yöntemi ile elde edilmiş işlemsiz numuneye ait XRD sonuçları Şekil 26'da verilmiştir. AISI 316L paslanmaz çeliğin yapısı incelendiği zaman yapıda sadece östenit piklerinin mevcut olduğu gözlemlenmiştir. YMK östenit fazı hem SLM hem de döküm yönteminde gözlemlenmiştir. Aynı zamanda SLM numunesine ait XRD grafiğinde α -ferrit oluşumları gözlemlenmiştir. Alves ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada döküm yöntemiyle üretilen işlemsiz numune ile SLM ile üretilen numuneler karşılaştırıldığı zaman XRD spektrumlarında önemli bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca hem SLM ile hem de döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yapısında östenit piklerinin olduğu gözlemlenmiştir. (Alves *et al.* 2017). Yapılan başka çalışmalarda ise SLM yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin yapısında östenit ve α -ferrit oluşumları gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeninin SLM esnasında meydana gelen hızlı ısıma ve hızlı soğutmadan kaynaklandığı belirtmişlerdir (Kaynak 2020; Molin 2017). Bu durum literatür sonuçlarını destekler niteliktedir.

Yu ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada SLM işlemi sonrasında piklerde genişlemeler olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak SLM işlemi sırasında ortaya çıkan artık gerilmelerin ve pürüzlerin varlığından söz edilmiştir. SLM işlemi sırasında hızlı ısıtma/soğuma sebebiyle yoğunlukta da önemli derecede bir artış meydana geldiğini gözlemlenmiştir (Yu *et al.* 2016). Yang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada AISI 316L paslanmaz çelik yapısı incelendiği zaman SLM ile üretilmiş numunelerin 2θ konumu, kafes bozulmasının lazer kaynaklı termal gerilmeler nedeniyle meydana gelebileceğini ifade eden daha büyük Bragg açılarına hafif kaydığını gözlemlenmiştir (Yang *et al.* 2016). Burada bahsedilen durumlar gerçekleştirdiğimiz çalışma da gözlemlenmiştir.



Şekil 26. SLM yöntemi ile üretilmiş (SLM 316L) işlemsiz numune ve döküm yöntemiyle üretilmiş 316L işlemsiz numuneye ait XRD grafikleri

Mikrosertlik İncelemeleri

Yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçlarına göre SLM ile üretilen SLM 316L işlemsiz numuneye ait sertlik değeri 265-275 HV olarak ölçülürken döküm yöntemi ile üretilen 316L işlemsiz numunenin sertlik değeri ise 235-245 HV olarak ölçülmüştür (Tablo 4). Dwivedi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada SLM ve döküm yöntemiyle üretilmiş AISI 316L paslanmaz çelik numunelerinin sertlikleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda SLM yöntemi ile üretilen üretilmiş numunelerdeki sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. SLM numunesindeki sertlik değeri sonuçlarında artış gözlemlenmiştir (Dwivedi *et al.* 2022). Alves ve arkadaşları yaptıkları çalışmada SLM ve döküm yöntemi ile üretilen AISI 316L paslanmaz çeliklerin yapısını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda SLM yöntemi ile üretilen malzemenin mukavemet, sertlik, akma ve çekme dayanımlarının döküm yöntemiyle üretilen malzemedan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. SLM ile üretilen malzemenin daha iyi sonuçlar vermesini Denklem 7’de verilen Hall-Petch teorisi ile açıklamışlardır.

$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (7)$$

Bu denklemde;

σ_T =Akma dayanımı

σ_0 =Akma gerilmesi

K=Sabit

d= Ortalama tane çapını ifade etmektedir.

Hall-Petch teorisine göre tane boyutunun küçülmesiyle birlikte yüksek bir mukavemet ve sertlik değerleri elde edildiğini açıklamaktadır. Yapılan çalışmalarda mikro yapılar analiz edildiği zaman, SLM ile üretilen numunelerin daha yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olması daha ince bir mikro yapıya bağlı olduğunu göstermektedir. SLM ile üretilen numunenin daha ince bir mikro yapıya sahip olması hızlı ısıma ve soğumadan kaynaklanmaktadır (Alves *et al.* 2017; Yang *et al.* 2020). Buradan anlaşılabacağı üzere, çalışma sonucunda elde edilen sertlik sonuçları daha önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile uyumludur.

Sürtünme ve aşınma analizleri

Farklı yüzey tekstürlerine sahip SLM ile üretilmiş AISI 316L ve döküm yöntemi ile üretilen tekstürsüz AISI 316L numunelere ait numunelerin kuru, tuzlu su ve yağ kayma ortamlarında elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29’da gösterilmiştir. Ayrıca ortalama sürtünme katsayısı değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Grafiklere bakıldığında zaman farklı ortam koşulları altında en yüksek sürtünme katsayısına sahip numuneler SLM 316L-işlemsiz ve daha sonrasında AISI 316L işlemsiz olarak karşımıza çıkmıştır. En yüksek sürtünme katsayısı değerinin SLM 316L işlemsiz ve 316L işlemsiz çıkmasının sebebi, yüzey tekstürlerinin malzemelerin tribolojik performansını iyileştirmeye yönelik bir tutum sergilemesinden kaynaklandığı ve aynı zamanda SLM 316L’ nin 316L’ den daha iyi mekanik davranış sergilemesi döküme göre daha ince bir mikro yapıdan kaynaklandığı düşünülmüştür. Quazi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yüzey tekstüründen faydalanılarak takım parçaları üzerindeki kesme performansını iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda yüzey tekstürüne sahip parçaların işlemsiz parçalara göre tribolojik özelliklerinde iyileşmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir (Quazi *et al.* 2016). Alves ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada SLM ve geleneksel döküm yöntemiyle üretilen malzemelerin tribolojik performansını incelemiştir. SLM yöntemi ile üretilen numune ile döküm yöntemiyle üretilen numune karşılaştırıldığında döküm yöntemi ile üretilen numunenin daha yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma oranları sergilediği gözlemlenmiştir. SLM ile üretilen numunelerin yüksek aşınma direnci ve mekanik performansının nedeni ise döküme göre daha ince bir mikro yapıdan oluşmasından

kaynaklandığını belirtilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar deney sonuçlarını doğrular niteliktedir (Alves *et al.* 2017).

Aynı zamanda tuzlu su ve yağ kullanılarak SLM 316L ve 316L işlemsiz numuneleri farklı ortam koşulları altında yapılan aşınma deneyleri sonucunda sürtünme katsayılarında ve kütle kayıplarında iyileşmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun sıvı ortamda yapılan deneylerde kullanılan yağlayıcıların aşınan ve aşındırıcı malzeme arasında bir hidrodinamik fayda oluşturarak hidrodinamik yatak görevi yapmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Schafer ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada kuru ortam ve yağlama koşulları altında 100Cr6 çeliğinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yağlayıcı kullanılarak yapılan deneylerin kuru ortam koşullarıyla yapılan deneylerle kıyaslandığı zaman tribolojik özelliklerinde iyileşmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir (Schafer *et al.* 2015).

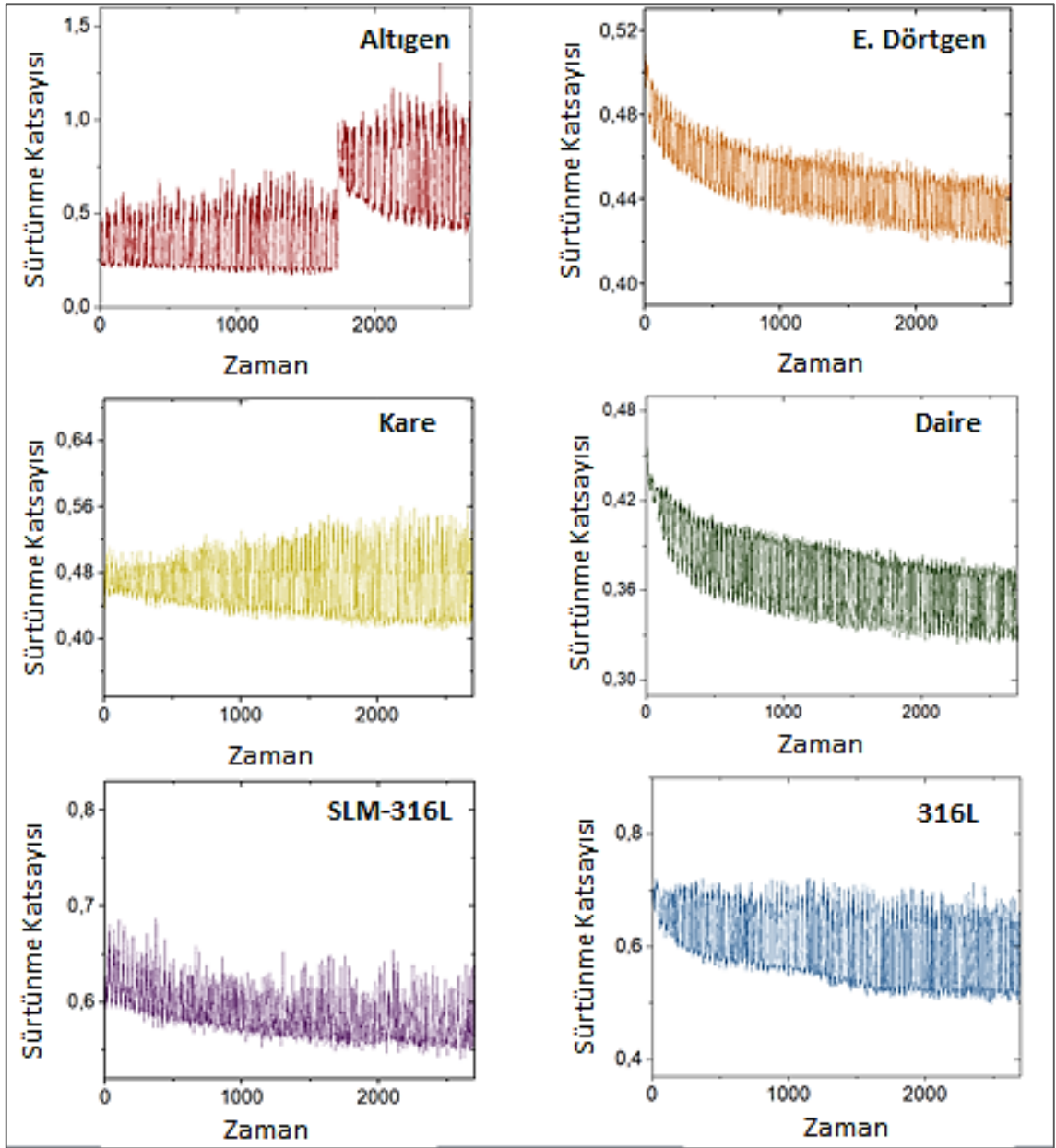
Altıgen, kare, eşkenar dörtgen ve daire yüzey tekstürüne sahip numunelere kuru kayma ortamında yapılan aşınma testleri sonucundaki sürtünme katsayısı-zaman grafiklerine bakıldığı zaman; altıgen, eşkenar dörtgen ve kare tekstüre sahip numunelere kıyasla daire yüzey tekstürüne sahip numunelerin en düşük sürtünme katsayısı değerini verdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi; altıgen, eşkenar dörtgen ve kare yüzey tekstürüne sahip numunede bulunan keskin kenarların gerilme yoğunluğunu (gerilme yığılması) artırmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Joshi ve arkadaşları yaptığı çalışmada keskin köşelere sahip yüzey tekstürlerinin gerilme yığılmalarında artış meydana getirmesi sonucunda aşınma oranlarının arttığını gözlemlemiştir (Joshi *et al.* 2018). Aynı zamanda dairesel yüzey tekstürünün en iyi tribolojik performans sergilemesinin sebebi, yük taşıma kapasitesinin daha iyi olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Yu ve arkadaşları malzemenin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için elips, daire ve üçgen yüzey tekstürleri kullanılarak araştırma yapmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda aynı alan ve aynı tekstür derinliğine sahip olduğu zaman dairesel yüzey tekstürünün en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum deney sonuçlarını doğrular niteliktedir (Yu *et al.* 2009).

Keskin köşelere sahip yüzey tekstürleri arasında en yüksek sürtünme katsayısı değerini altıgen yüzey geometrisi vermiştir. Joshi ve arkadaşları yaptığı çalışmada dikdörtgen, altıgen, üçgen yüzey tekstürleri farklı yağlama koşulları altında incelenmiştir. Farklı ortamlarda yapılan deneylerde en yüksek sürtünme katsayısı değeri ve aşınma oranının altıgene ait olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Joshi *et al.* 2018). Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada dairesel, dikdörtgen ve altıgen yüzey tekstürlerinin tribolojik performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. En düşük ortalama sürtünme katsayısı %10.8 ile dairesel yüzey tekstürüne ait

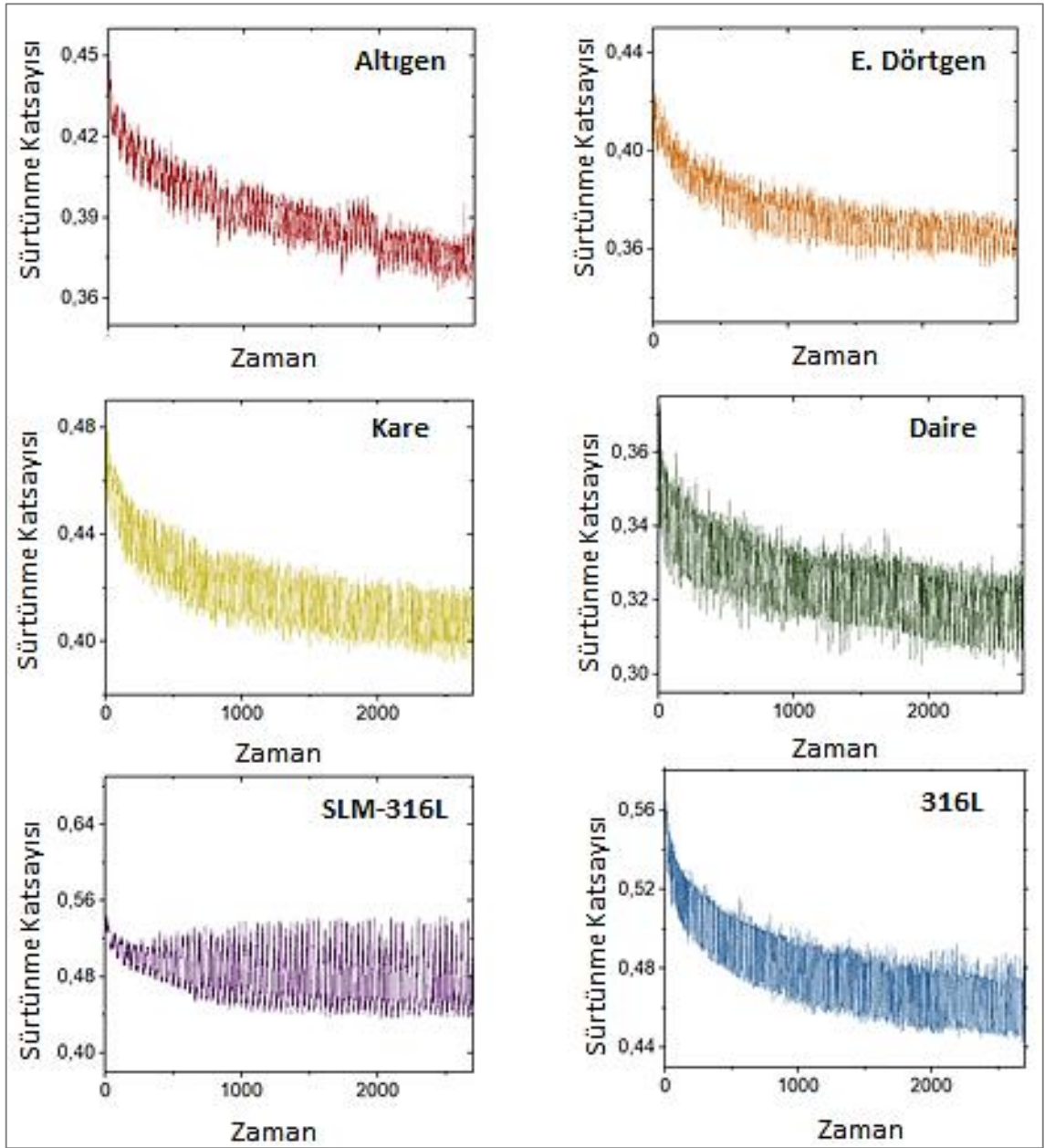
olduğunu, altıgen ve dikdörtgen ile kıyaslandığı zaman sırasıyla %12.5 ve %9.16 oranında daha düşük ortalama sürtünme katsayısına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda keskin köşeli yüzey tekstürleri ek gerilmeler ve gerilme yığılmalarının meydana gelmesine sebep olmuştur. Bunun sonucunda keskin köşelere sahip yüzey tekstürleri aşınma oranının artmasına sebep olmuştur (Yang *et al.* 2023).

Altıgen, kare, eşkenar dörtgen ve daire yüzey tekstürüne sahip numuneler tuzlu su ve yağ kayma ortamında yapılan deney sonuçlarına bakıldığında zaman tribolojik özelliklerinde önemli iyileşmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi tuzlu su ve yağın aşınan ve aşındırıcı malzeme arasında hidrodinamik fayda oluşturarak hidrodinamik etki oluşturmamasından ve katı-katı temasının önemli ölçüde engellenmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Li ve arkadaşları polimer kaplamaların yağ, deniz suyu ve kuru ortam koşulları altında tribolojik ve mekanik özellikleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Yaptıkları araştırmalar sonucunda sürtünme çiftinin yüzeyindeki yağ filminin kaplama üzerinde bir yağlama ve koruma etkisine sahip olduğunu, kuru ve tuzlu su ile karşılaştırıldığında, yağlama altında kaplamanın sürtünme katsayısı en iyi performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir (Li *et al.* 2023). Yapılan başka bir araştırmada ise CuNiAl' in 42CrMo4'e karşı davranışı yağ, filtrelenmiş su, yapay deniz suyu ve kuru aşınma ortamlarında tribolojik özellikleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda aşınma hacmi ve sürtünme katsayısı, yağda en düşük kuru ortamda ise en yüksek değeri vermiştir (Lu *et al.* 2018). Zhao ve arkadaşları PI/FEB Lamine kompozitlerin kuru, su ve yağlama koşulları altında tribolojik özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı kuru ortamda, en düşük sürtünme katsayısına ise yağ ortamında rastlamışlardır. Bunun sebebi olarak yağlayıcı koşullar altında hidrodinamik basıncın birlikte malzemenin tribolojik özelliklerinin iyileşmesini göstermişlerdir (Zhao *et al.* 2012).

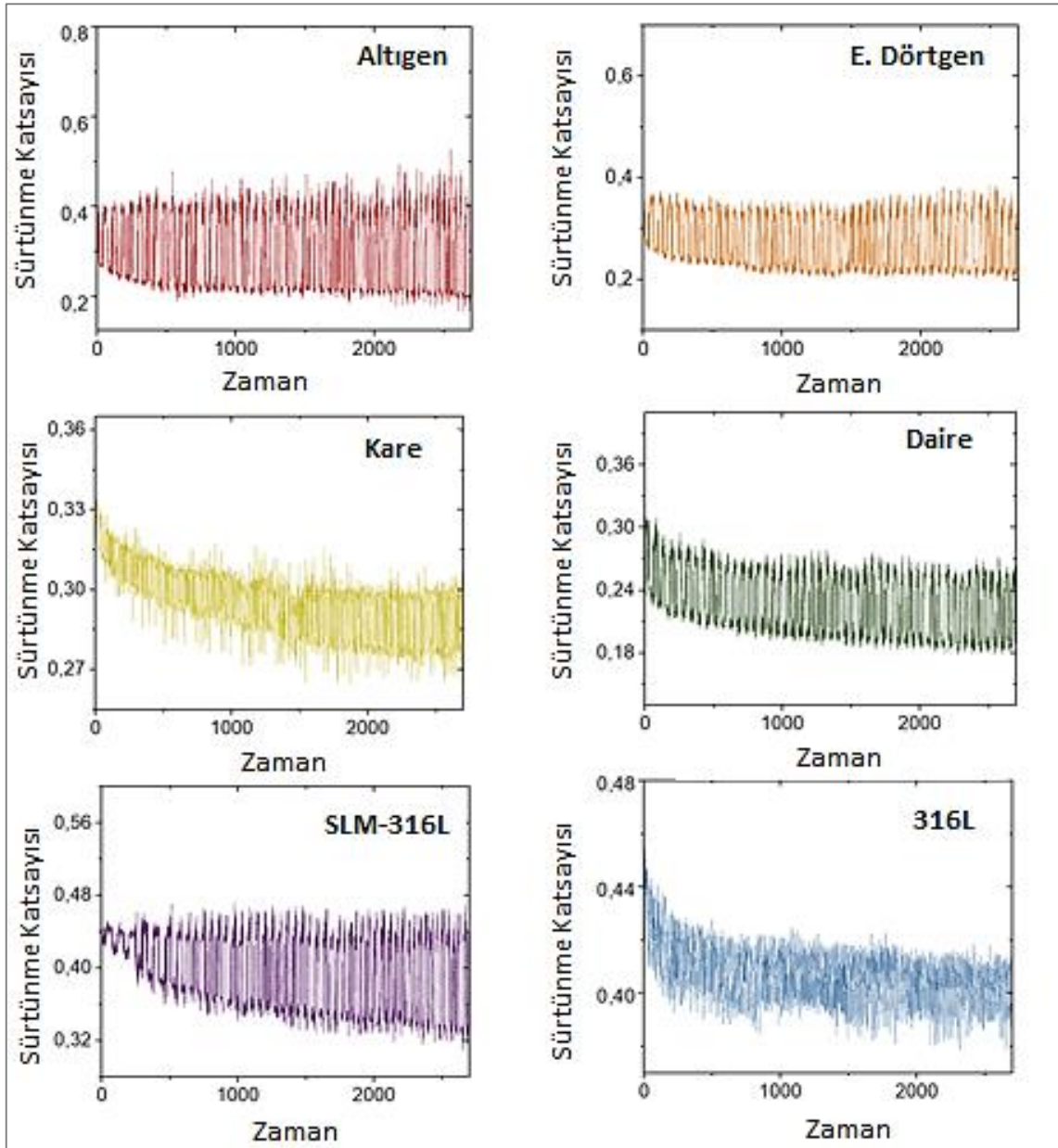
Sıvı ortamda yapılan deneyler sonucunda en iyi tribolojik performansı yağ göstermiştir. Bunun sebebi yağlayıcılar içinde daha kalın sıvı filmleri oluşturmak için yağın daha yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Warneke ve arkadaşları su bazlı ve petrol bazlı yağlayıcıların malzemelerin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda petrol bazlı yağlayıcıların daha iyi performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bu durumun sebebi olarak petrol bazlı yağların su bazlı yağlara göre viskozite ve yoğunluk değerlerinin daha yüksek olmasını göstermişlerdir (Warneke *et al.* 2021). Bu durum, burada elde edilen sonuçları desteklemektedir.



Şekil 27. Kuru ortamda yapılan aşınma deney sonuçları



Şekil 28. Tuzlu su ortamında yapılan aşınma deney sonuçları

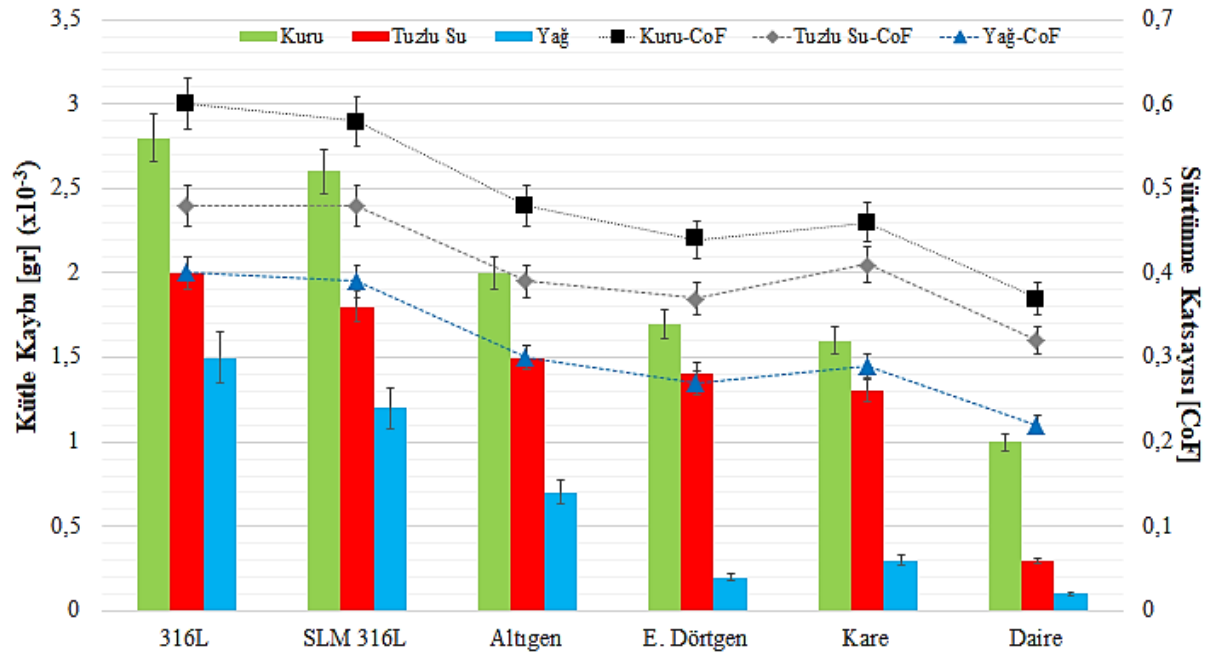


Şekil 29. Yağ ortamında yapılan aşınma deney sonuçları

Yapılan deney sonuçları numunelerde meydana gelen ortalama kütle kaybı ve ortalama sürtünme katsayısı değerlerine Tablo 4 ve Şekil 30’da verilmiştir. Deneyler sonucunda kuru ortam koşulları altında en fazla ortalama sürtünme katsayısı ve ortalama kütle kaybı değeri tekstürsüz numunelerde meydana gelmiştir. Bu durumun sebebinin tekstürlü numunelerin tekstürsüz numunelere göre temas alanının daha az olmasından ve tekstürlerin aşınma kalıntılarını hapsedme yeteneğinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Aynı zamanda tekstürsüz numunelerde SLM yöntemi ile üretilmiş numune 316L işlemsiz numunden daha iyi sonuçlar tribolojik sonuçlar vermiştir. Bu durumun sebebinin SLM yöntemi ile üretilmiş numunenin Tablo 5’de gösterildiği gibi daha iyi sertlik değerine sahip olmasından kaynaklandığını ve daha iyi aşınma direncinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Alves ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada SLM yöntemi ile üretilen numunenin döküm yöntemi ile

üretileen numuneden daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlenmişlerdir. SLM ile üretileen numunelerin mikro yapısının ince olmasından kaynaklı daha iyi mukavemet, sertlik ve aşınma direncine sahip olmasından kaynaklandığını gözlemlenmişlerdir (Alves 2017). En yüksek ortalama sürtünme katsayısı ve ortalama kütle kaybı kuru ortamda yapılan deneyler sonucunda meydana gelmiştir. En düşük sürtünme katsayısı ve kütle kaybı değeri ise yağ kullanılarak yapılan deneyler sonucunda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun sıvı ortamda yapılan deneylerde kullanılan yağlayıcıların aşınan ve aşındırıcı malzeme arasında bir hidrodinamik fayda oluşturarak hidrodinamik yatak görevi yapmasından kaynaklandığını ve aynı zamanda yağlayıcıların aşınma parçacıklarını hapsediği için, meydana gelecek sürtünme ve kütle kaybının büyük oranda azaltıldığını düşünölmüşür.

Wu ve arkadaşları yaptığı çalışmada elmas kaplamalara sırasıyla eşkenar dörtgen, altıgen ve eş merkezli yüzey tekstürleri entegre etmişlerdir. Aşınma deneylerine göre kütle kaybı oranının eş merkezli daireler, altıgen ve eşkenar dörtgen sırasına göre arttığı gözlemlenmiştir. (Wu *et al.* 2022). Yang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada PI VE PI/FG nanokompozit kaplamaların tribolojik özellikleri kuru ve sıvı (su ve yağ) ortam koşullarında incelenmiştir. İncelemeler sonucunda numune kuru ortamda en fazla kütle kaybı oranına sahipken yağ ortamında ise en düşük kütle kaybı oranına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durumu hidrodinamik yatak etkisiyle olduğunu ileri sürmüşlerdir. Yapılan bu araştırmaların sonucu deney sonuçları ile paralellik göstermektedir (Yang *et al.*2016).



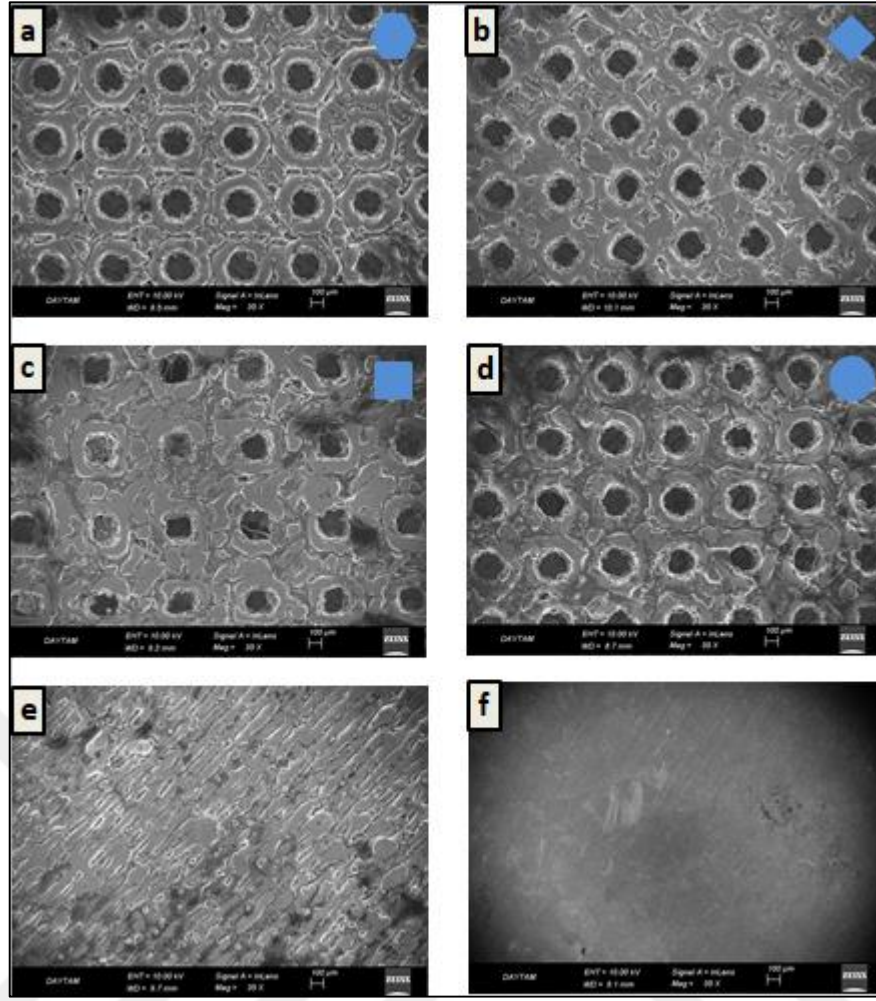
Şekil 30. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları ve ortalama kütle kaybı miktarları

Tablo 4. İşlemsiz ve SLM ile Üretilen Numunelere Ait Pürüzlülük, Sertlik, Sürtünme Katsayısı (CoF) ve Kütle Kaybı Değerleri

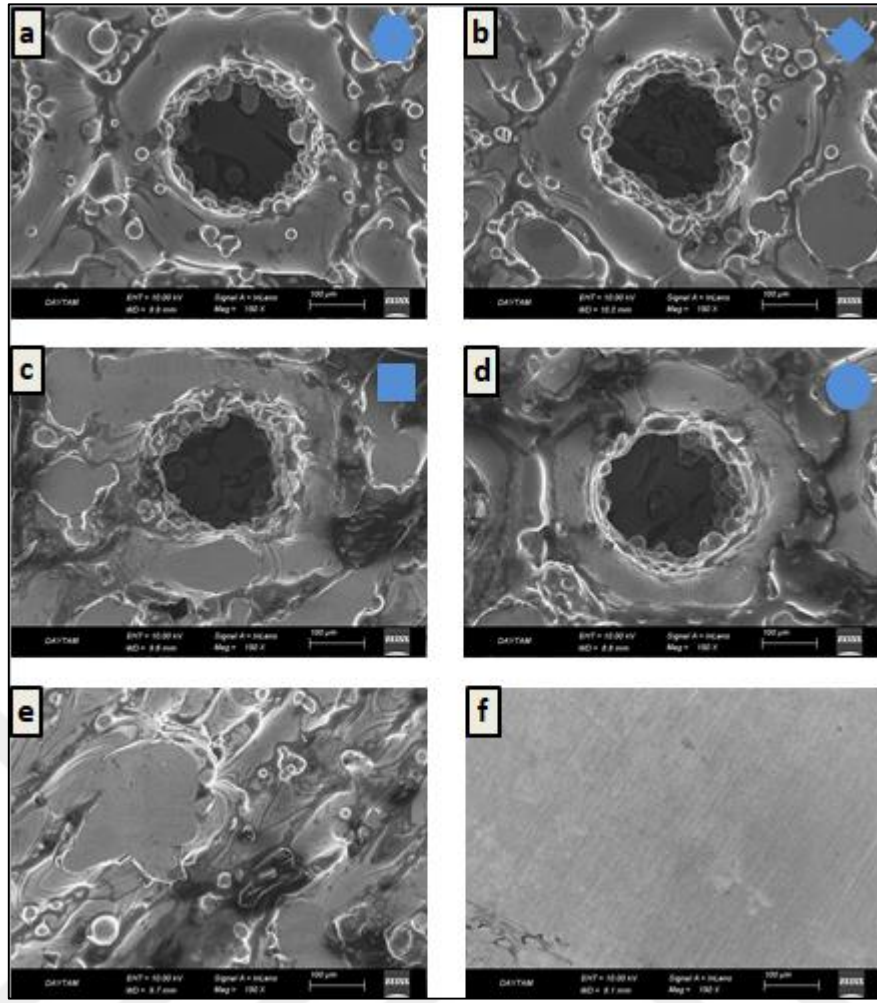
	Pürüzlülük (Ra)	Sertlik (HV0.1)	Kuru		Tuzlu Su		Yağ	
			CoF	Kütle Kaybı (gr)-[x10 ⁻³]	CoF	Kütle Kaybı (gr)-[x10 ⁻³]	CoF	Kütle Kaybı (gr)-[x10 ⁻³]
Altıgen	4.5-4.7	265-275	0.48	2.0	0.39	1.5	0.30	0.7
E. Dörtgen	4.5-4.7	265-275	0.44	1.7	0.37	1.4	0.27	0.2
Kare	4.5-4.7	265-275	0.46	1.6	0.41	1.3	0.29	0.3
Daire	4.5-4.7	265-275	0.37	1.0	0.32	0.3	0.22	0.1
SLM- 316L	4.5-4.7	265-275	0.58	2.6	0.48	1.8	0.39	1.2
316L	1.6-1.8	235-245	0.60	2.8	0.48	2.0	0.4	1.5

SEM analizleri

SLM yöntemi ile üretilen altıgen, eşkenar dörtgen, kare, işlemsiz numuneler ve karşılaştırma yapmak için döküm yöntemi ile üretilmiş 316L numunesine ait yüzey morfolojileri Şekil 31 ve Şekil 32’de gösterilmiştir. Şekil 31 ve Şekil 32’de gösterilen altıgen, eşkenar dörtgen, kare ve daire yüzey tekstürlerin birbirlerine eşit mesafede ve % 26 alan yoğunluğuna sahiptirler. Üretilen bu numuneler katı, tuzlu su ve yağ ortamında aşınma deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 31. SLM ve döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri: **a)** altıgen, **b)** eşkenar dörtgen, **c)** kare, **d)** daire, **e)** SLM-316L ve **f)** 316L

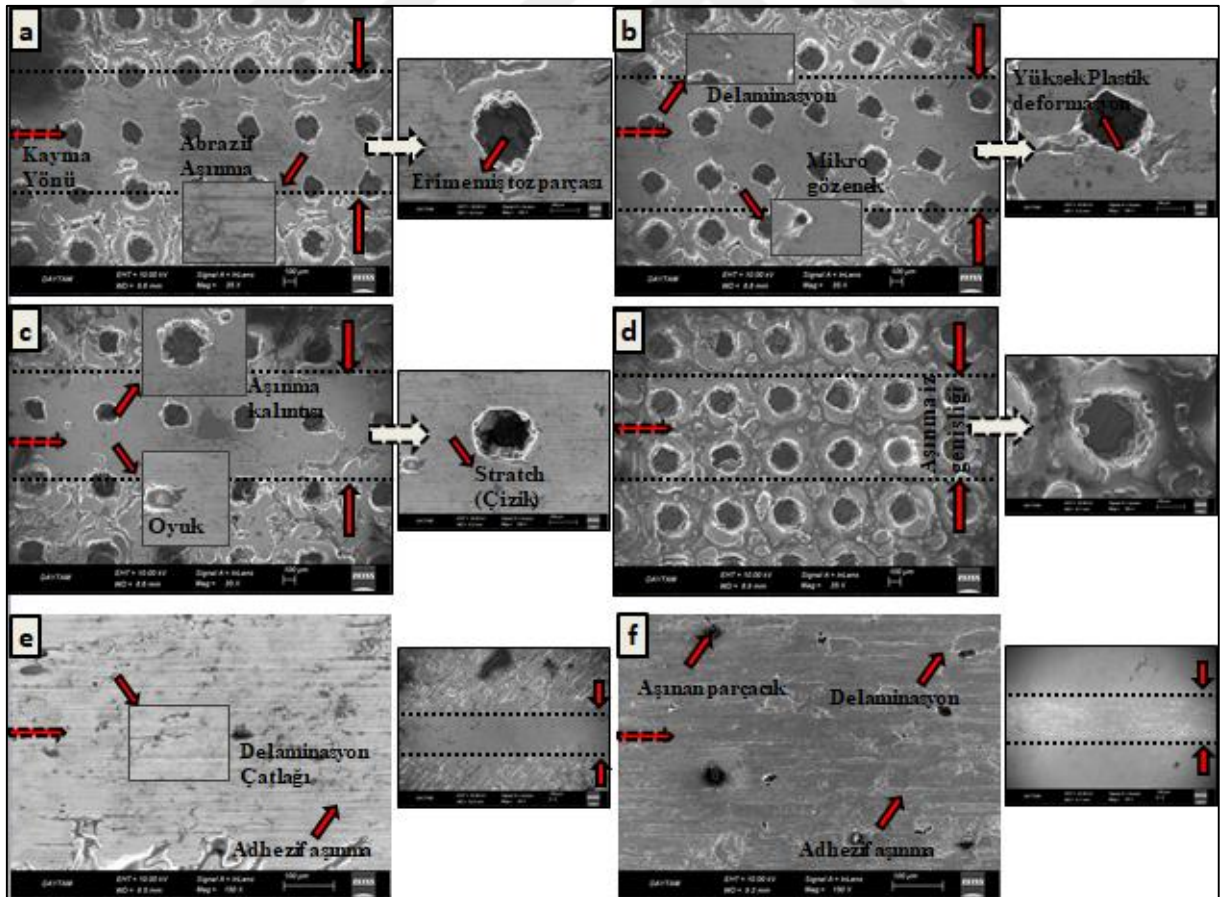


Şekil 32. SLM ve döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey morfolojilerine ait detay SEM görüntüleri: **a)** altıgen, **b)** eşkenar dörtgen, **c)** kare, **d)** daire, **e)** SLM-316L ve **f)** 316L

Kuru ortamda gerçekleştirilen aşınma deneyinden sonra oluşan yüzey morfolojileri Şekil 33'te gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, tekstürlü numunelerin tekstürsüz numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Kuru aşınma sonrasında tekstürlü numunelerde geometrik desenlerin varlığı ile yüzeyler arası temas tekstürsüz numuneye göre daha azı indirmiştir. Aynı zamanda görüntüler incelendiğinde, geometrik desenler içerisinde aşınma kalıntılarının hapsoldüğü de görülmüştür. Bu iki durum yüzey tekstürünün malzemelerin tribolojik özellikleri üzerindeki olumlu etkisini kanıtlar niteliktedir (Yu 2009).

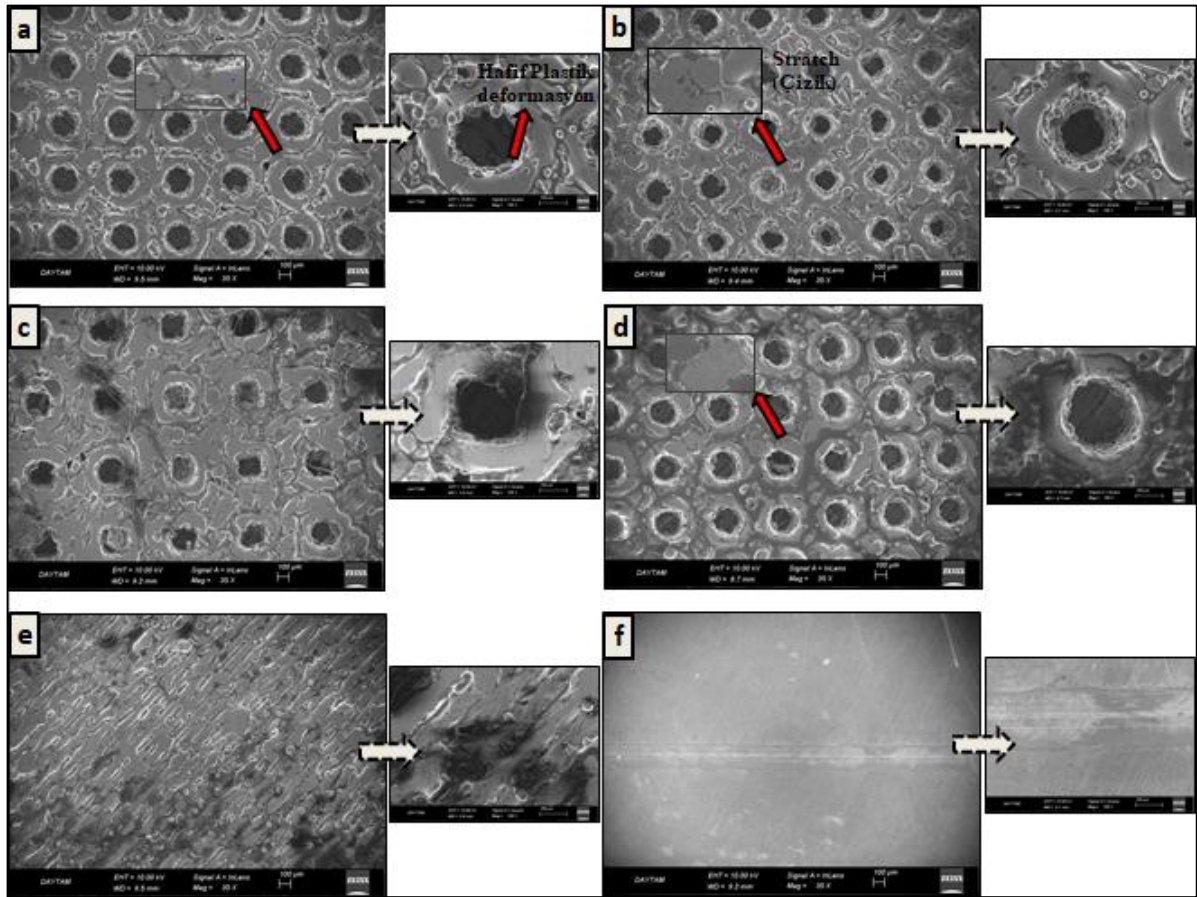
SLM ve döküm yöntemi ile üretilen numuneler karşılaştırıldığı zaman, aşınma oluklarının ve aşınma çizgilerinin döküm numunelerinde daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda en geniş aşınma izinin de döküm numunesine ait olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, döküm numunesinin yüzey hasarının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Döküm numunesinde SLM numunesine kıyasla daha yüksek yüzey bozulması ortaya çıkmıştır. Bu durum sertlik, kütle kaybı ve sürtünme katsayısı için elde edilen değerlerle paralellik göstermiştir (Alves *et al.* 2017).

Kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonucunda yüzey tekstürüne sahip numunelerin SEM görüntüleri incelendiği zaman delaminasyon, adhezif ve abrazif aşınmanın birlikte meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kuru aşınma şartları altındaki numunelerde katı-katı temasından dolayı çok sayıda aşınma kalıntıları meydana gelmiştir. Bu aşınma kalıntıları abraziv aşınmaya neden olmaktadır. Bu durum aşınma miktarını artırıcı yönde tutum sergilemiştir. Aynı zamanda numune yüzeylerinde mikro gözeneklere ve çiziklere de rastlanmıştır. Kuru kayma durumunda özellikle keskin kenarlı geometrik şekillerde aşırı plastik deformasyondan kaynaklı geometrik şekillerde bozulmalar meydana gelmiştir. Sürtünme sonrasında keskin kenarlarda kırılma hasarları başlamıştır. Aşınma izlerine bakıldığı zaman tekstürlü numuneler içerisinde en geniş aşınma izi altıgen numunede meydana gelirken, genel anlamda keskin kenarlara sahip geometrilerin en geniş aşınma izi genişliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Keskin köşelere sahip numunelerde meydana gelen plastik deformasyonlar gerilmeleri lokal olarak artırdığı için numunelerin aşınma oranında artışa sebep olmuştur. Daire geometrisine sahip numunede, keskin köşelerin olmayışı ve aşınma kalıntılarını hapsedme yeteneğinin iyi olması sebebiyle en dar aşınma izi daire numunesine aittir (Kovacı *et al.* 2020; Joshi *et al.* 2018).



Şekil 33. Kuru ortamda yapılan aşınma deneyleri sonrası numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri: **a)** altıgen, **b)** eşkenar dörtgen, **c)** kare, **d)** daire, **e)** SLM-316L ve **f)** 316L

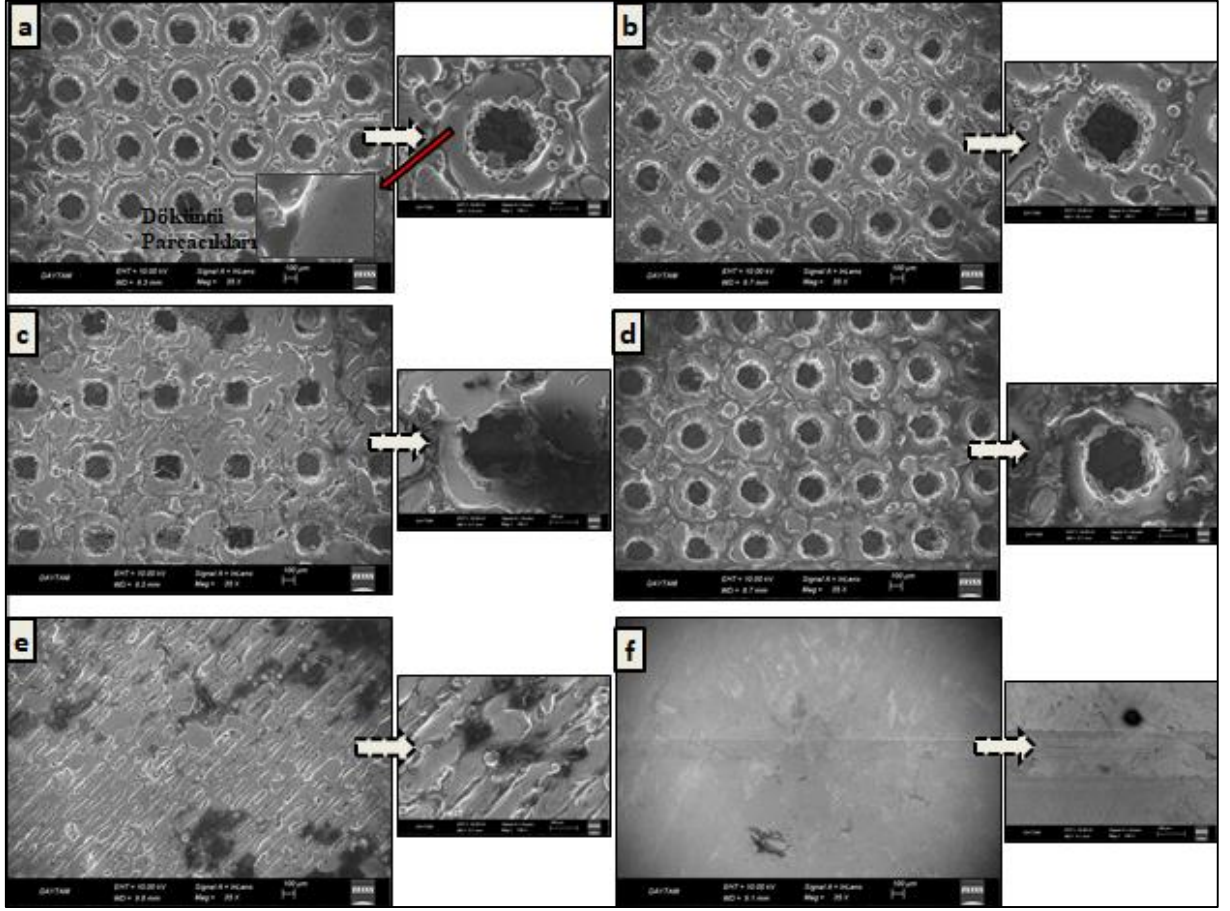
Tuzlu su ve yağ ortamlarında gerçekleştirilen aşınma deneylerinden sonra oluşan yüzey morfolojileri Şekil 34 ve Şekil 35’de gösterilmiştir. Tuzlu su ile yapılan deneyler sonucunda numunelerde, kuru ortam deneylerine kıyasla daha düşük bir plastik deformasyon gözlemlenmiştir. Kuru aşınmaya göre daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Yüzeyde aşınma parçacıklarının birikmesi engellenmiştir. Bu durum yüzeyin daha pürüzsüz olmasına sebep olmuştur. Abrasiv aşınmanın büyük ölçüde önüne geçilmiştir. Tuzlu suyun etkisi, karşı yüzeyle teması etkili bir biçimde azaltmıştır. Bu durum sonucunda, aynı zamanda yüzeyde çizikler meydana gelmiştir. Yüzeyde çiziklerin meydana gelmesinin sebebi tuzlu suyun mikro rezervuar görevi yapmasından kaynaklı hapsolmuş partiküllerin aşındırıcı top hareketi ile yüzeye çıkmasından kaynaklanmıştır. Bu durum tuzlu suyun tribolojik özellikler üzerindeki kuru aşınmaya göre olumlu etkisini ispatlar niteliktedir (Yang *et al.* 2012; Kovacı *et al.* 2018).



Şekil 34. Tuzlu su ortamında yapılan aşınma deneyleri sonrası numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri: **a)** altıgen, **b)** eşkenar dörtgen, **c)** kare, **d)** daire, **e)** SLM-316L ve **f)** 316L

Yağ ortamında gerçekleştirilen aşınma deneyi sonucunda belirsiz bir aşınma izi ve düşük döküntülere rastlanmıştır. Görüntüler incelendiği zaman tuzlu suya göre daha iyi sonuç elde edildiği gözlemlenmiştir. Tuzlu su ile karşılaştırıldığı zaman yüksek viskozite ve yoğunluğu daha iyi bir koruyucu tabaka meydana getirdiği için daha iyi sonuçlar vermiştir.

Yani tuzlu suya kıyasla ikili temasın olmadığı ve hidrodinamik etkinin yüksek olduğu bir yüzey elde edilmiştir (Warneke *et al.* 2021).



Şekil 35. Yağ ortamında yapılan aşınma deneyleri sonrası numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri: **a)** altıgen, **b)** eşkenar dörtgen, **c)** kare, **d)** daire, **e)** SLM-316L ve **f)** 316L

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; otomotiv ve biyomedikal başta olmak üzere kullanımı geniş bir alanı kapsayan AISI 316L paslanmaz çeliği yüzeyinde tekstürler oluşturarak tribolojik performansının artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, SLM yöntemi kullanılarak kare, daire, eşkenar dörtgen, altıgen ve işlemsiz olmak üzere farklı geometrik desenli numuneler üretilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapmak için döküm yöntemi ile üretilen Forg-AISI 316L işlemsiz numune kullanılmıştır. Numunelerin sürtünme ve aşınma özellikleri farklı ortam koşulları (kuru, tuzlu su ve yağ) altında incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizler ve incelemeler sonucunda aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- SLM 316L ve 316L işlemsiz numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda SLM yöntemi ile üretilen numunelerin daha ince bir mikro yapıya sahip olduğu için döküm yöntemi ile üretilen numunelere kıyasla daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir.
- AISI 316L paslanmaz çeliğin yapısı incelendiğinde yapıda östenit piklerinin varlığına rastlanmıştır. SLM sonrası ortaya çıkan artık gerilmeler ve pürüzlerin varlığı sebebiyle piklerde genişlemeler meydana gelmiştir. SLM işleminde hızlı ısıtma ve soğutma sebebiyle yapıdaki pik şiddetinde artış meydana gelmiştir. SLM yönteminde lazer kaynaklı termal stres nedeniyle Bragg açılarında düşük miktarda kaymalar meydana gelmiştir.
- Üretilen numunelere kuru, tuzlu su ve yağ ortamında doğrusal aşınma testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı ve en yüksek kütle kaybı değerleri kuru ortam koşulları altında meydana gelirken en düşük sürtünme katsayısı ve kütle kaybı değerleri yağ ortamında meydana gelmiştir.
- Kuru ortamda meydana gelen sürtünme katsayısı ve kütle kaybı değerinin sıvı ortamlardan daha yüksek olmasının sebebi olarak, sıvı ortamda kullanılan yağlayıcıların aşınan ve aşındırıcı malzeme arasında hidrodinamik fayda oluşturarak hidrodinamik yatak görevi yapmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca yağlayıcılar aşınma parçacıklarını hapsederek malzemede meydana gelecek aşınma ve sürtünmeyi engellemesinden kaynaklı olarak sürtünme katsayısında meydana gelmektedir.

- Tuzlu su ve yağ karşılaştırıldığı zaman sürtünme katsayısı ve kütle kaybı en fazla tuzlu su ortamında ortaya çıkmıştır. Bu durum, yağlayıcılar içerisinde daha kalın sıvı film oluşturmak için yağın daha fazla viskozite ve yoğunluk içermesinden kaynaklanmaktadır.
- Altıgen, kare, eşkenar dörtgen, daire, SLM-316L işlemsiz ve 316L işlemsiz numunelere yapılan aşınma testleri sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı geometrik yüzey tekstürüne sahip olmayan işlemsiz numunelerde meydana gelmiştir.
- SLM-316L ve 316L işlemsiz numunelerin sürtünme katsayılarına ve kütle kaybı oranlarına bakıldığı zaman en yüksek değer 316L'ye aittir. SLM yöntemi ile üretilen numunenin yüksek aşınma direnci ve mekanik performansının döküm numunesinden daha iyi olmasının nedeni döküm numunesine kıyasla daha ince bir mikro yapıya sahip oluşmasından kaynaklanmaktadır.
- Altıgen, daire, kare, eşkenar dörtgen yüzey tekstürüne sahip numunelere farklı ortamlarda yapılan aşınma deneyleri sonucunda en iyi tribolojik performansı daire yüzey tekstür geometrisine sahip numune sergilemiştir. Daire geometrik yüzey tekstürünün tribolojik performansının iyi olmasının sebebi, keskin köşelerin varlığının olmaması ve aşınma kalıntılarını hapsetme yeteneğinin iyi olmasından kaynaklanmaktadır.
- Tekstürlü numuneler içerisinde, daire geometrisine kıyasla altıgen, kare, eşkenar dörtgen gibi yüzey tekstürüne sahip numuneler daha yüksek sürtünme katsayısı değerine sahiptirler. Bu geometrik desenlerin keskin köşeleri sebebiyle köşe noktalarında gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Bu durum sürtünme katsayılarında ve kütle kayıplarında artış meydana getirmektedir.
- SEM incelemelerine göre; tekstürlü numuneler tekstürsüz numunelere göre daha az hasarlı yüzey morfolojisine sahiptir. 316L ve SLM 316L numunesi karşılaştırıldığı zaman 316L numunesinin aşınma izi daha belirgindir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü SLM 316L'ye göre daha fazladır. Kuru ortamda yapılan deneyler sonucunda, yüzey tekstürlerinde bozulmalar meydana gelmiştir. Aynı zamanda aşınma izi keskin köşeye sahip tekstürlerde fazla iken daire geometrisinde daha az olduğu gözlemlenmiştir. Tuzlu su ve yağ ortamında yapılan aşınma deneyi sonucunda yüzey morfolojilerinde belirgin bir değişikliğe rastlanmamıştır. Aşınma izi belirgin değildir. Çok az miktarlarda abrasif aşınma meydana gelmiştir. Aynı zamanda tuzlu su ile yağ karşılaştırıldığı zaman yoğunluk ve vizkositeden kaynaklı yağ ortamında aşınma izi daha belirsizdir.

Yapılan bu çalışmada SLM yöntemi ile üretilen farklı yüzey tekstürlerinin kuru, tuzlu su ve yağ ile yağlama koşulları altında AISI 316L paslanmaz çeliğinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapmak için döküm yöntemi ile üretilen numuneden faydalanılmıştır. Bu tez çalışmasında ele alınmayan fakat daha sonrasında yapılması durumunda ilgili araştırma alanına olumlu yönde katkı sağlayabilecek çalışma önerileri şu şekildedir:

- Bu çalışmada aynı özelliklere sahip farklı yüzey tekstürleri üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu konu ile ilgili daha sonra yapılacak olan çalışmalarda; tekstür derinliği, alan yoğunluğu, geometriler arası mesafe, farklı yüzey tekstürlerin ve tekstür çapı gibi parametrelerden faydalanılarak farklı yüzey tekstürleri oluşturularak çalışmalara devam edilebilir.
- Yapılan bu çalışmada AISI 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Yapılacak olan başka çalışmalarda mekanik ve kimyasal özellikleri farklı malzemeler tercih edilebilir.
- Bu çalışmada tuzlu su ile yağ kullanılmıştır. Aradaki fark yoğunluk ve viskoziteden kaynaklı olduğu için, yoğunluğu ve viskozitesi farklı yağlayıcılar tercih edilebilir.
- Bu çalışmada doğrusal aşınmadan (pin-on-disc) faydalanılmıştır. Farklı türde aşınma deneyleri (dairesele vb.) yapılabilir.
- Bu çalışmada döküm yöntemi ile mukayese edilmiştir. Yapılacak farklı çalışmalarda farklı üretim yöntemleri ile mukayese edilebilir.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, sürtünme ve aşınmanın kritik öneme sahip olduğu farklı ürün gruplarına (makine elemanları, tıbbi cihazlar vs.) uygulanabilir.

KAYNAKÇA

- Akkurt, M., 2012. Makine Elemanları, Birsen Yayınevi, 757, İstanbul.
- Aksoy, T., Özmen, Y., Can, A.Ç., 1991. Aşınmaya etki eden faktörler ve aşınmanın azaltılması için alınabilecek önlemler. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli.
- Alves, N., Silva, F.S., Carvalho, O., Miranda, G., Pinto, P., Buciumeanu, M., Bartolomeu, F., 2017. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior- A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting . Additive manufacturing, 81-89.
- Bahari, A., 2017. Investigation into tribological performance of vegetable oils as biolubricants at severe contact conditions. Licence thesis, The University of Sheffield, England.
- Barari, A., Umaras, E., Tsuzuki, M., 2019. Intelligent design tolerate allocation for optimum/Adaptability to manufacturing using a monte carlo approach. Science Direct, 52(10), 165-170.
- Barry, B., Milburn, P., 2013. Tribology ,friction and traction : understanding shoe- surface interaction. Footwear Science, 137-145.
- Baydemir, T., 2021. Enerji ve Doğal kaynakları daha verimli kullanmanın yolu mu? . TUBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 1-49
- Besson, U., 2013. Historical scientific models and theories as resources for learning and teaching: The case of friction. Springer science+ Business media, 1001-1042.
- Brushan, B., 2000. Modern Tribology Handbook, Two Volume Set. CRC Press, 1760 p, Italy.
- Brushan. B., 1996. Tribology and mechanics of magnetic storage devices. Springer, 1125p, America.
- Ciulli, E., 2019. Tribology and industry: From the origins to 4.0 . Frontiers in mechanical engineering, 1-12.
- Demet, S.M., 2013. PTFE alaşımlarından yapılmış perno yataklarının bozulma davranışının deneysel analizi. Ms. Thesis , Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Dwivedi, S., Dixit, A.R., Das, A.K. Wetting behavior of selective laser melted (SLM) biomedical grade stainless steel 316L. Materials today: processing, 46-50.
- Ergüler, M., 2005. Buzdolabı kompresörlerinin aşınma davranışının incelenmesi. Ms. Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Fotovvati, B., Namdari, N., Mohammadian, B., 2018. Additive manufacturing methods a brief overview. ResearchGate, 2394-2630.
- Gao, L., 2021. Lubrication modelling of hip joint implants. Computational modelling of biomechanics and biotribology in the musculoskeletal system (second edition), Jin, Z., Li, J. and Chen, Z. London, 415-436.
- Gupta, B.R., 2023. Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites. Tribology of polymers, polymer composites, and Polymer nanocomposites. George, S.C., Haponiuk, J.T. Indian Institute of Technology, India, 51-117.
- Hamrock, B.J., 1991. Fundamental of fluid film lubrication. National Aeronautics and Space Administration, 676p, Columbus.

- Hatten,H.,2015. Tribology – SlidePlayer- <https://slideplayer.com/slide/3866995/> 28.07.2023.
- Helmenstine, T., 2014. Friction example problem- Coefficient of static friction. Science notes learn science do science, <https://sciencenotes.org/friction-example-problem-2-coefficient-static-friction/> 11.07.2023.
- Huang, Z., Zhai, H., 2004. Instabilities of sliding friction governed by asperity interference mechanism. Science Direct, 257, 414-422.
- Jeyaprakash, N., Yang, C.H., 2020: Friction, Lubrication, and Wear. Licence IntechOpen, 9-10.
- Joshi, G.S., Putignano, C., Gaudioso, C., Stark, T., Kiedrowski, T., Ancona, A., Carbone,G., 2018. Effect of the surface texturing in lubricated non- conformal point contact. Tribology International, 127, 296-301.
- Kaynak, Y., Taşcıoğlu, E., Karabulut,Y., 2020. Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing. The international journal of advanced manufacturing technology, 107, 1947-1956.
- Khereddin, B.A., 2013. Tribological properties of nanoparticle –Based lubrication systems.Doctora thesis. Texas A&M University America.
- Kovacı, H., Seçer, Y. 2020. Improved tribological performance of AISL 316L stainless steel by a combined surface treatment: Surface texturing by selective laser melting and plasma. Surface & Coatings Technology, 1-17.
- Kovacı, H., Yetim, A.F., Baran, Ö., Çelik,A., 2018. Tribological behavior of DLC films and duplex ceramic coating under different sliding conditions. Ceramics international, 44, 7151-7158.
- Kuilenburg, J.V., 2013. A mechanistic approach to tactile friction. Recherche, 4-6.
- Lange, K., 2001. Metal Forming: Surface Quality of Products. Encycloedia of Materials: Science and Tecnology, Buchchow, K.H.J., Cahn, R.W., Flemings, M.C., Ilshner, B., Kramer, E.J., Mahajan, S. and Veyssiere, P. University of Cambridge, UK ,5433-5436.
- Science and Tecnology, Buchchow, K.H.J., Cahn, R.W., Flemings, M.C., Ilshner, B., Kramer, E.J., Mahajan, S. and Veyssiere, P. University of Cambridge, UK ,5433-5436.
- Laotreephet, P., 2020. Determination of the coefficient of rolling friction of a hollow cylinder rolling on a curved track using a smartphone's sensor. MS thesis, Srivakharinwirot University, Thailand.
- Li, X., Huang, H., Li, S., Cao, J., Yu, S., 2023. The tribological and mechanical properties of PI/PAI/EP polymer coating under oil lubrication, sea water corrosion and dry sliding wear. MDPI, 15(6), 1-14.
- Lu, W., Zhai, W., Zhou, M., Wang, J., Liu, X., Zhang, P., 2018. Fretting wear behavior of CuNiAl against 42CrMo4 under different lubrication conditions. Tribology International, 117, 59-67.
- Martin, S., İnigo., 2020. Study of the wear behavior of SS316L+ WC composites: Roleof the counter material. MS Thesis, University of Liege, French.
- Menezes, P. L., Nosonovsky, M., Ingole, S. P., Kailas, S. V., Lovell, M. R., 2013.Tribology for Scientists and Engineers (248 p), Springer, New York.

- Minshall, T., Deradjat, D., 2016. Implementation of rapid manufacturing for mass customisation. ResearchGate, 1-35.
- Molin, S., Gazda, M., Kusz,B., Jasinski,p., 2017. Net shape processed electrolyte on 316L porous supported sofc. ResearchGate, 1-7.
- Nouri, M., 2017. The effect of yttrium on wear , corrosion and corrosive wear of Mg-Al alloys. Licance thesis, University of Alberta, Canadian.
- Owsalou, R.G., 2012. Aşınmaya maruz kalan parçaların aşınma dayanımlarının araştırılması. Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Özer, G., 2020. Eklemeli üretim yöntemleri üzerine bir derleme. NOHU. Mühendislik Bilim - leri Dergisi, 9(1), 606-621.
- Padmakumar, M., 2020. Additive manufacturing of tungsten carbide hardmetal parts by selective laser melting, selective laser sintering and binder jet 3D printing techniques. Spiringer Science+ Business Media,7, 338-371.
- Pape, F., Terwey,J.T., Poll, G., 2020. Energy- based modelling of adhesive wear in the mixed lubrication regime. Lubricants, 8(2), 2-15.
- Quazi, M.M., Khoung, L.S., Mosarov, M.H., Mufti, R.A., Varman, M., Kalam, M.A.,Masjuki, H.H., Arslan, A., 2016. Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance : A rewiew, Critical Reviews in Solid State and Materiald Sciences, 447-481.
- Rebai, H., 2014. Mechanical engineering and production technology. Bachelor's thesis, Hame University Of Applied Sciences, Finland.
- Rodgers, N., 2019. Topic: Lubricants & Mechanism of lubrication. <https://slideplayer.com/slide/14594234/> 01.08.2023.
- Samuel, R., 2010. Friction factors: What are they for torque, drag, vibration, battom hole assembly and transient surge/swab analyses. Journal of petroleum science and engineering, 73, 258-266.
- Schafer, M.,Greiner, C., 2015. Bio-inspired scale-like surface textures and their tribological properties. Bioinspration & Biomimetics, 10, 1-7.
- Seçer, Y., 2019. Seçici lazer ergitme yöntemi ile oluşturulan farklı yüzey tekstürlerinin ve plazma nitrüleme işleminin AISI 316L paslanmaz çeliğin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerine etkileri. Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Soleimani, H., Moavenian, M., 2017. Tribological aspects of Wheel- rail contact: A rewiev of wear mechanisms and effective fectors on Rolling contact fatigue. CrossMark, 3(4), 227-237.
- Song,Y.L., Zhang, J.G., Rosenkranz, A., Zhao,X.L., Zhang, J.J., 2018. Surface textures fabricated by laser surface texturing and diamond cutting- Influence of texture depth on friction and wear. Advanced Engineering Materials, 1-8.
- Verma, S., Chaudhary, S., Agarval, T., 2016. Numerical and experimental analysis of silt erosion in pumb as türbine. Trans stellar, 47-60.
- Warneke, H., Rahman, M.H., Webbert, H., Rodriguin, J., Austin, E., Tokunaga, K., Rajak, D.K., Menezes, P., 2021. Water-Based Lubricants: Development, Properties, and Performances. Lubricants, 9(8), 1-26.

- Wu, F., Liu, N., Zhang, X., Han, Y., 2022. Research on the influence of diamond coating microtexture on graphitization law and friction coefficient. *Diamond & Related Materials*, 1-11.
- Yang, C.H., Jeyaprakash, N., Ramkumar, K.R., 2020. Correlation of microstructural evolution with mechanical and tribological behavior of SS 304 specimens developed through SLM technique. *Metals and materials international*, 27, 5179-5190.
- Yang, H., Mawignon, F.J., Qin, L., Hussain, M., Huang, X., Makanda, I.L., Rafique, F., Zhang, H., 2023. Laser surface texturing under transformer oil conditions for improved process quality and tribological behaviors. *Materials chemistry and physics*, 295, 1-11.
- Yang, Y., Bai, Y., Song, C. and Wang, D., 2016. Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. *Materials and Design*, 100, 291-299.
- Yang, Z., Wang, Z., Wang, H., Wang, J., Yang, S., Liu, X., Ye, X., 2016. Tribological properties of fluorinated graphene reinforced polyimide composite coatings under different lubricated conditions. *Composites: Part A*, 81, 282-288.
- Yang, J., Liu, W., Zhu, S., Bi, Q., Cui, G., 2012. Tribological behavior of Cu- 6Sn- 6Zn-3Pb under sea water, distilled water and dry- sliding conditions. *Tribology international*, 55, 126-134.
- Yu, H., Wang, X., Zhou, F., 2009. Geometric Shape Effect of Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure between Conformal Contacting Surfaces. *Springer Science + Business Media*, 37, 123-130.
- Yu, J.H., Lee, C.W., Yang, D.Y., Kim, K.T., Yang, S.S., Kim, Y.J., Brochu, M., Shin, G.H., Chou, J.P., 2016. Densification behavior of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting by variation in laser energy density. *The Japan institute of metals and materials*, 1952-1959.
- Zhang, H., 2023. Laser surface texturing under transformer oil conditions for improved process quality and tribological behaviors. *Materials chemistry and physics*, 295, 1-11.
- Zhang, P., Khan, A., Sun, J., Bai, L., 2021. Friction behavior of a textured surface against several materials under dry and lubricated conditions. *Publisher of open Access journals*, 14(18), 1-21.
- Zhao, H., Zhang, J., Ji, T., Yang, M., Chao, M., Kou, K., 2012. Investigation of tribological properties of PI/FEB laminated composites under drysliding, water and oil lubricated conditions. *Springer Science+ Business media*, 45, 333-339.
- Zhou, Y., Robinson, J.W., Bhattacharya, P., Erck, R., Bays, J.T., Cosimbescu, L., 2015. Probing the molecular design of hyper-branched aryl polyesters towards lubricant applications. *Scientific reports*, 1-10.
- Zhou, Z.R., Zhu, M.H., 2011. On the mechanism of various fretting wear modes. *Tribology international*, 44, 1378-1388.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Mehtap TÜRKDAYI
Uyruğu:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Yomra Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği (2019)
Yüksek Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi