



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE OLUŞTURULAN
FARKLI YÜZEY TEKSTÜRLERİNİN VE PLAZMA
NİTRÜLEME İŞLEMİNİN AISI 316L PASLANMAZ
ÇELİĞİNİN YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Yeşim SEÇER

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI
2019**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE OLUŞTURULAN
FARKLI YÜZEY TEKSTÜRLERİNİN VE PLAZMA NİTRÜRLEME
İŞLEMİNİN AISI 316L PASLANMAZ ÇELİĞİNİN YAPISAL,
MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Yeşim SEÇER

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Mekanik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE OLUŞTURULAN FARKLI YÜZEY
TEKSTÜRLERİNİN ve PLAZMA NİTRÜLEME İŞLEMİNİN AISI 316L
PASLANMAZ ÇELİĞİNİN YAPISAL, MEKANİK VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI danışmanlığında, Yeşim SEÇER tarafından hazırlanan bu çalışma ~~11.07~~ 18.07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu (3./3)~~ ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

İmza:

Üye: Prof. Dr. A. Fatih YETİM

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu ~~18.07~~ 18.07/2019 tarih ve ~~29~~ 29./...76..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI YÜZEY TEKSTÜRLERİ VE PLAZMA ESASLI YÜZEY İŞLEMLERİNİN AISI 316L PASLANMAZ ÇELİĞİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yeşim SEÇER

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI

Birçok mühendislik uygulamasında kullanılan metalik malzemeler ömürleri boyunca aşınma, yorulma ve korozyon gibi istenmeyen etkilere maruz kalmaktadırlar. Metalik malzemelerin maruz kaldığı bu etkileri azaltmak ve kullanım ömrünü uzatmak için farklı işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemlerden en çok tercih edilenlerden biri de yüzey işlemleridir. Yüzey doku/tekstür tasarımı, özellikle tribolojik özelliklerin iyileştirilmesi açısından yüzey mühendisliğinin önemli bir parçasıdır. Bu çalışmada amaç, farklı yüzey desenlerinin/tekstürlerinin metalik malzemelerin tribolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, eklemeli üretim yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) üretim yöntemi ile 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak farklı yüzey desenlerine (altıgen, dağınık, elips, kare, üçgen ve yeni model) sahip numuneler üretilmiştir. Üretim iki aşamada gerçekleştirilmiştir: 1. grup numuneler alan yoğunluğunun optimum değerini tayin etmek için, 2. grup numuneler ise geometrik desenin şeklinin tribolojik özellikler üzerindeki etkisini gözlemlemek için üretilmiştir. Ayrıca, 2.grup olarak üretilen numunelere plazma nitrüleme işlemi uygulanarak, yüzey desenleri ve bu plazma nitrüleme işleminin mekanik özellikler üzerindeki sinerjik etkisi incelenmiştir. Numunelerin morfolojik, yapısal ve mekanik özelliklerini incelemek için XRD, SEM, üç boyutlu profilometre ve mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. Numuneler kuru ve simüle edilmiş vücut sıvısı-simulated body fluid (SBF) ortamında dairesel (pin-on-disk) aşınma testine tabii tutulmuştur. Kuru ortamda yapılan deneylerde, geometrik desende keskin köşelerin olmaması ve aşınma hapsedme yeteneğinden dolayı, sıvı ortamda ise pozitif net hidrodinamik fayda elde edildiğinden dolayı en iyi tribolojik özellik elips geometrik desen göstermiştir. Plazma nitrüleme sonucunda sertlikte meydana gelen artış aşınma oranında azalma meydana getirmiştir ve bütün numune grupları için plazma nitrüleme işlemi sonrasında en düşük aşınma oranı elde edilmiştir.

2019, 99 sayfa

Anahtar Kelimeler: Geometrik desen, tekstür, eklemeli üretim, seçici lazer ergitme, triboloji, plazma nitrüleme

ABSTRACT

MS. Thesis

EFFECTS OF DIFFERENT SURFACE TEXTURES PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING AND PLASMA NITRIDING TREATMENT ON THE STRUCTURAL, MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AISI 316L STAINLESS STEEL

Yeşim SEÇER

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Mechanical Science

Supervisor: Assist Prof. Dr. Halim KOVACI

Metallic materials used in many engineering applications are exposed to undesirable effects such as wear, fatigue and corrosion throughout their lifetime. Different processes are applied to reduce these effects to which metallic materials are exposed and to extend their service life. One of the most preferred of these processes is surface treatments. Surface pattern/ texture design is an important part of surface engineering, especially in terms of improving tribological properties. The aim of this study is to investigate the effects of different surface patterns / textures on tribological properties of metallic materials. For this purpose, samples with different surface patterns (hexagonal, scattered, ellipse, square, triangular and new model) were produced by using 316L stainless steel powder together with selective laser melting (SLM) production method, which is one of the additive manufacturing methods. The production was carried out in two stages: Group 1 samples were produced to determine the optimum value of field density and group 2 samples were produced to observe the effect of the shape of the geometric pattern on tribological properties. In addition, plasma nitriding process was applied to the samples produced as group 2 and the surface patterns and the synergistic effect of this plasma nitriding process on the mechanical properties were investigated. XRD, SEM, three dimensional profilometer and micro hardness tester were used to examine the morphological, structural and mechanical properties of the samples. The samples were subjected to a circular (pin-on-disk) wear test in a dry and simulated body fluid (SBF) medium. The ellipse geometric pattern showed the best tribological feature due to the absence of sharp corners and the ability to trap wear in the geometric pattern in dry experiments, and that the positive net hydrodynamic benefit was obtained in the liquid environment. The increase in hardness as a result of plasma nitriding resulted in a reduction in wear rate and the lowest wear rate after plasma nitriding was achieved for all sample groups.

2019, 99 pages

Keywords: Geometric pattern, texture, additive manufacturing, selective laser melting, tribology, plasma nitriding.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca benden yardımlarını, desteklerini, bilgisini hiçbir zaman esirgemeyen, bana her konuda yol gösteren çok değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi 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,

Tez çalışmam boyunca destek ve teşviklerini her daim hissettiren, kıymetli vaktini ve deneyimlerini paylaşan değerli hocam Sayın Arş. Gör. Yusuf Burak BOZKURT'a, Arş. Gör. Dr. Ayşenur KELEŞ'e, Arş. Gör. Taha ACAR'a ve Arş. Gör. Burak ATİK'e deneysel çalışmalarım sırasında ve yapılan analizlerde bana yardımcı olan Sayın Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya, Sayın Öğr. Gör. Hasan Feyzi BUDAK 'a ve Sayın Öğr. Gör. Kerem TURALIOĞLU'na tezin her aşamasında bana yardımcı olan Mekanik Mühendisi Burak KAVASOĞLU'na, tez çalışması boyunca sıkılmadan beni dinleyen ve manevi olarak desteğini esirgemeyen Makine Mühendisi Merve TÜZEMEN'e ve Makine Mühendisi Halil Çelik'e, ayrıca emeği geçen bütün hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli annem Şengül SEÇER başta olmak üzere sevgili ağabeylerim ve ablalarıma teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Yeşim SEÇER

Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. Tribolojinin Tanımı	8
2.2. Sürtünmenin Tanımı	11
2.2.1. Sürtünme mekanizmaları	14
2.2.2. Kuru sürtünme teorisi	16
2.3. Aşınma	19
2.3.1. Aşınma mekanizmaları	21
2.3.2. Aşınmaya etki eden faktörler	33
2.4. Yağlama	35
2.4.1. Yağlama türleri	35
2.4.2. Stribeck eğrisi	37
2.5. Eklemeli Üretim Yöntemleri	38
2.5.1. Eriyik yığıma ve modelleme (SLA)	40
2.5.2. Üç boyutlu yazıcı (3DP)	40
2.5.3. Stereolitografi (SLA)	41
2.5.4. Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM)	41
2.6. Yüzey İşlemleri	42
2.6.1. Plazma ile yüzey işlemi	43
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	48
3.1. Malzeme	49
3.1.1. Bilgisayar destekli tasarım programı ile geometrilerin oluşturulması	50
3.1.2. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi (SLM) ile numunelerin üretilmesi	54

3.2. Testler ve Yüzey İşlemleri	55
3.2.1. Aşınma testleri.....	55
3.2.2. Plazma nitrürleme işlemi.....	56
3.3. Analiz ve Karakterizasyon Çalışmaları	57
3.3.1. XRD analizi	57
3.3.2. Taramalı Elektron Cihazı (SEM) ile görüntü alınması	58
3.3.3. 3D Profilometre analizi	59
3.3.4. Mikrosertlik ölçümü	60
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	61
4.1. Yüzey Araştırma Bulguları	61
4.2. XRD Analizleri.....	63
4.3. Mikrosertlik İncelemeleri	65
4.4. Sürtünme ve Aşınma Analizleri	67
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	100

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μ_k	Dinamik Sürtünme Katsayısı
μ_s	Statik Sürtünme Katsayısı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$^{\circ}\text{K}$	Kelvin derece
μ	Mikron
C	Karbon
Fe	Demir
g	Gram
kV	Kilowatt
m	Metre
MPa	Megapaskal
n	Nano
N	Newton
N_2	Azot
$^{\circ}$	Derece
Ra	Yüzey pürüzlülüğü
τ	tau
Θ	Teta

Kısaltmalar

3DP	Üç Boyutlu Yazıcı
EHL	Elasto-hidrokinamik Yağlama
HV	Vickers sertlik
SBF	Simüle Edilmiş Vücut Sıvısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLA	Eriyik Yığıma ve Modelleme
SLM	Seçici Lazer Ergitme
Wa	Aşınma oranı
XRD	X ışını Kırınım Difraktometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Triboloji etki şeması	8
Şekil 2.2. Büyük bir heykelin taşınması	9
Şekil 2.3. Leonardo da Vinci tarafından önerilen yatak konstrüksiyonları ve sürtünme deney düzenekleri	10
Şekil 2.4. Sürtünme açısı ve sürtünme katsayısına ait formül	12
Şekil 2.5. Tribosistemlerin kinematığı	13
Şekil 2.6. Sürtünme direncinin açıklanmasında kullanılan fiziksel model	17
Şekil 2.7. Gerçek temas alanının gösterimi	17
Şekil 2.8. Kuru sürtünme halinde adezyon ve deformasyon bileşenleri	18
Şekil 2.9. Tribolojik sistem	20
Şekil 2.10. Pürüz tepcikleri arasında adeziv bağ oluşmuş sürtünme çiftlerinin ayrılma durumları	21
Şekil 2.11. Adeziv aşınmada aşınma bölgeleri	23
Şekil 2.12. Abraziv aşınma türlerinin gösterimi	25
Şekil 2.13. Sert piramit pürüzün metalin yüzeyinden kaldırdığı aşınma ürünü	27
Şekil 2.14. Parametrelerin eroziv aşınmaya etkisi	28
Şekil 2.15. Küresel iki pürüzün değme durumu	30
Şekil 2.16. Koroziv madde ve aşınma yüzeyleri arasındaki model	31
Şekil 2.17. Sürtünme oksidasyon mekanizması	32
Şekil 2.18. İnce film (sınır tabaka) yağlaması durumu	36
Şekil 2.19. Elasto-hidrodinamik yağlama durumu	36
Şekil 2.20. Hidrodinamik yağlama durumu	37
Şekil 2.21. Stribeck eğrisinin genel biçimi	38
Şekil 2.22. Eklemeli üretim kademeleri	39
Şekil 2.23. Eklemeli üretim çeşitleri	40
Şekil 2.24. Seçici lazer ergitme yönteminin şematik olarak gösterimi	42
Şekil 2.25. Yüzey Modifikasyonu sınıflandırılması	43
Şekil 2.26. Plazma nitrüleme mekanizması	44
Şekil 2.27. Mikrosertlik ile modifiye olmuş bölge arasındaki ilişki	46

Şekil 2.28. Plazma nitrürleme deney sistemi	47
Şekil 3.1. Yapılan çalışmaya ait iş akış şeması.....	48
Şekil 3.2. 1. Grup %6.6 alan yoğunluğuna sahip daire tekstürlü numune	50
Şekil 3.3. 1. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip daire tekstürlü numune	51
Şekil 3.4. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan yeni dağınık model	51
Şekil 3.5. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan elips tekstürlü numune	51
Şekil 3.6. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan altıgen tekstürlü numune	52
Şekil 3.7. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan kare tekstürlü numune	52
Şekil 3.8. 2. Grup %26 alan yoğunluğu sahip olan üçgen tekstürlü numune	52
Şekil 3.9. 2. Grup %26 alan yoğunluğu sahip olan yeni model numune	53
Şekil 3.10. Seçici lazer ergitme (SLM) cihazı	54
Şekil 3.11. Aşınma cihazı	56
Şekil 3.12. Plazma nitrürleme cihazı	57
Şekil 3.13. XRD analiz cihazı.....	58
Şekil 3.14. Taramalı elektron mikroskobu.....	59
Şekil 3.15. 3D profilometre	59
Şekil 4.1. SLM sonrası 1. grup 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	62
Şekil 4.2. SLM üretim sonrası 2. grup 316L paslanmaz çeliklerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri.....	63
Şekil 4.3. a. İşlemsiz 316L numuneye ait XRD grafiği b. %50H ₂ ve %50 N ₂ karışımında 2 saatlik süre, 400°C sıcaklıkta plazma nitrürlenmiş numuneye ait XRD grafiği	65
Şekil 4.4. Plazma nitrürleme sonrasında a. işlemsiz numuneye ait b. yüzey geometrik desenli numuneye ait kesit görüntüsü	67
Şekil 4.5. %6,6 ve %26 alan yoğunluğuna sahip geometrik desenlerin sürtünme katsayısı (CoF)- Zaman (s) grafiği	68
Şekil 4.6. SLM üretim sonrası 1. grup %6,6 alan yoğunluğuna sahip numunenin aşınma sonrasında yüzey morfolojisine ait SEM görüntüsü	69
Şekil 4.7. SLM üretim sonrası 1. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip numunenin aşınma sonrasında yüzey morfolojisine ait SEM görüntüsü	69

Şekil 4.8. SLM yöntemi ile üretilmiş 2. grup numunelerin a. kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonucu Sürtünme katsayısı (CoF)–zaman (s) grafiği ve b. sıvı ortamda yapılan aşınma deneyi sonucu Sürtünme katsayısı (CoF)–zaman (s) grafiği	73
Şekil 4.9. SLM üretim yöntemi ile üretilen farklı yüzey desenlerine sahip numunelerin kuru ve sıvı aşınma sonrasında sürtünme katsayısı ve aşınma oranları	73
Şekil 4.10. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin kuru ortamda aşınma sonrası SEM görüntüleri	75
Şekil 4.11. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin kuru ortamda aşınma sonrası SEM görüntüleri	76
Şekil 4.12. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş 316L numunelerin kuru aşınma sonrası profilometre görüntüleri	78
Şekil 4.13. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş 316L numunelerin sıvı aşınma sonrası profilometre görüntüleri	79
Şekil 4.14. SLM yöntemi ile üretilmiş numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrası sürtünme katsayısı-zaman grafikleri	81
Şekil 4.15. SLM üretim yöntemi ile üretilen numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında kuru ve sıvı aşınma sonrasında sürtünme katsayısı ve aşınma oranları	81
Şekil 4.16. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında kuru ortamda aşınma sonucu SEM görüntüleri	83
Şekil 4.17. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında sıvı ortamda aşınma sonucu SEM görüntüleri	84
Şekil 4.18. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş 316L numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında kuru aşınma profilometre görüntüleri	85
Şekil 4.19. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında sıvı aşınma profilometre görüntüleri	86
Şekil 4.20. SLM ile üretilmiş farklı geometrik desene sahip 316L paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri karşılaştırılması	87

Şekil 4.21. 316L paslanmaz çelik numunelerin işlem görmemiş durumu ve plazma nitrülenmiş durumu sonucunda elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.....	88
Şekil 4.22. 316L paslanmaz çelik numunelere uygulanan farklı yüzey işlemleri sonrası deney sonucu.....	88



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 316L paslanmaz çelik kimyasal içeriği	49
Çizelge 3.2. 316L paslanmaz çelik mekanik özellikleri	49
Çizelge 3.3. Tasarımı yapılan numunelere ait bazı parametreler.....	53
Çizelge 3.4. Aşınma testine ait parametreler	55
Çizelge 4.1. 316L paslanmaz çelik işlemlili ve işlemsiz numune sertlik değerleri	66
Çizelge 4.2. Farklı alan yoğunluğundaki numunelerin kütle değişimi	70
Çizelge 4.3. SLM yöntemi ile üretilmiş geometrik desenli işlemsiz numunelerin aşınma oranları	74
Çizelge 4.4. Yüzey pürüzlülük değerleri	80
Çizelge 4.5. SLM yöntemi ile üretilmiş geometrik desenli plazma nitrüleme yapılmış numunelerin aşınma oranları	82

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun işlerini kolaylaştıran ve hızlandıran araç ve gereçlerin tümüne teknik ürün, bu teknik ürünlerin birden fazlasının bir araya getirilmiş haline teknik sistem (makine, tesisat, cihaz gibi) adı verilir. Giriş-çıkış büyüklükleri teknik sistemlerin tanımlanmasında en önemli büyüklüklerdir. Teknik sistem, enerji ve malzeme gibi giriş büyüklüklerini fonksiyonlarına bağlı olarak tasarlanmış süreçlerde dönüştürerek çıkış büyüklüklerini üretir. Yapılan çalışmalarda temel amaç, teknik sistemin en yüksek verimle çalışmasıdır. Yani, giriş büyüklükleri istenildiği çıkış formlarına en az kayıpla dönüştürülmesi istenilir. Bu giriş ve çıkış büyüklükleri dikkate alındığı zaman, tribolojinin önemi açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Makine ve konstrüksiyon elemanlarında meydana gelen hasarların en önemli sebeplerinden birisi aşınmadır. Fabrikalarda, uçak, roket sistemlerinde ve daha pek çok ileri teknolojinin uygulandığı sistemlerde sürtünme, aşınma ve yağlama gibi tribolojinin temelini oluşturan parametreler en önemli tasarım kriteri olarak kabul edilmektedir. Sanayileşmiş ülkelerde yapılan istatistiksel çalışmalar, dünyada kullanılan enerjinin büyük bir kısmının sürtünme direncini yenmek için kullanıldığını göstermektedir. Bu nedenle, sürtünme ile ilgili yapılacak çalışmalar önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanacağını işaret etmektedir. Çünkü enerjinin çoğu sürtünme, malzemenin önemli bir kısmı ise aşınma ile ilgilidir.

Mekanik olarak temasta bulunan ve birbirlerine göre kayma hareketi yapan yüzeyler arasındaki karmaşık ve mikroskobik etkileşimler sürtünme ile aşınmaya sebep olur. Bu etkileşimler malzemenin geometrisi, yüzey topoğrafyası ve malzemenin maruz kaldığı yükleme şartı, bulunduğu ortam, sıcaklık, temas tipi gibi sebeplere bağlıdır. Yüzey temasının ve çevresindeki atmosferin tüm mekanik, fiziksel, kimyasal ve geometrik yönleri yüzey etkileşimlerini ve dolayısıyla sisteme ait tribolojik özellikleri etkiler. Triboloji bilimi sürtünme, aşınma ve yağlama olayları ve bu olayların birbiriyle etkileşimini inceler. Triboloji bilimi birbirine göre izafi hareket halinde bulunan yüzeylerin ekonomik, ekolojik ve fonksiyonel olarak optimizasyonunu sağlamaktadır. Sürtünme, temas halinde bulunan yüzeyler arasında kaymaya karşı oluşan direnç olarak tanımlanmaktadır. Statik ve dinamik olmak üzere iki çeşit sürtünme vardır. Statik

sürtünme temas eden iki yüzey arasında hareketi başlatabilmek için ya da iki yüzey arasında oluşan bağları kırmak için gereklidir. Dinamik sürtünme ise bir yüzeyin diğerinin üzerinde kayması, yuvarlanması veya dönmesi ile ilişkilidir (Buchley 2000).

Aşınma, izafi olarak hareket eden farklı tribolojik etkilerle oluşan istenmeyen malzeme kaybıdır. Aşınma tamamen engellenemeyen bir prosestir. Çok iyi işlenmiş yüzeye sahip bile olsa malzeme yüzeyinde küçük pürüzler mevcuttur. Bu pürüzler aşınmanın meydana gelmesine sebebiyet verir. Birbirlerine göre temas halinde bulunan ve kayan yüzeylerde, gerçek temas alanı nominal temas alanından oldukça küçüktür. Uygulanan yük, gerçek temas alanını oluşturan çok sayıda küçük pürüzler tarafından taşınır ve sürtünme, aşınma davranışı bu çok sayıda yerel temaslar arasındaki etkileşim sonucu oluşur. Bu bölgelerde yüksek yerel basınçlar (gerilme) meydana gelmektedir. Bu bölgelerde önce elastik daha sonra plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Yüzeyler arasında birbirine göre izafi hareket başladığı zaman yüksek yerel basınçlara ek olarak sıcaklık yükselmeleri de meydana gelmektedir. Bu nedenle, temas noktalarında ortaya çıkan yüksek basınçlar, küçük yük bölgelerinde bile akma sınırına ulaşmakta ve kaynak bağlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Sürtünme direncinin ana unsurunu bu bağlar oluşturur (Zum Gahr 1987; Hutchings 1992).

Aşınma oranı ile temas halinde bulunan yüzeyler arasında adezyon, deformasyon ve histerisiz bileşenlerinden oluşan ve izafi olan harekete karşı engel anlamına gelen sürtünme direnci arasında doğrudan bir ilişki kurmak mümkün değildir. Sürtünme katsayısı değerleri aynı olan malzeme çiftleri arasında aşınma oranlarında çok büyük farklılıklar meydana gelebilir. Bu nedenle malzemeye belli işlemler uygulanmaktadır ve bu işlemler ile malzemelerin yüzey özellikleri geliştirilerek malzemeye ait işlevsellikleri ve kullanılabilirlikleri artırılabilir. Bu amaçla; yüzey mühendisliği, bir malzemenin normal şartlar altında herhangi bir fonksiyonu karşılayamaz durumdayken karşılayabilir hale getirmek amacıyla yüzey veya yüzeye yakın bölgelerde yapılan işlemlerin tümü ile ilgilenir (Cotell and Sprague 1994). Korozyon direnci, aşınma direnci, sürtünme enerji kaybı, yorulma, sertlik tokluk vb gibi birçok özellik malzemelerin yüzeylerine uygulanan

işlemler ile iyileştirilebilir. Bu işlemler kimyasal, metalürjik ve mekanik yollarla yapılabilmektedir.

Yüzey doku tasarımı, yüzey mühendisliğinin önemli bir parçasıdır ve doku tasarımı ile yüzeylerde mikron mertebesinde geometrik desenler oluşturarak aşınma direnci, sürtünme katsayısı vb. özelliklerde önemli derecede iyileşmeler sağlanabilir. İyileştirme mekanizmaları şu şekilde açıklanabilir:

- Yüzeyde oluşturulan geometrik desenler, tam veya karışık yağlama durumlarında mikro hidrodinamik yatak görevi yaparak ek hidrodinamik basınç üretimini ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesini artırır (Hamilton *et al.* 1966).
- Sınır yağlamadurumunda yağlama maddesi için mikro rezervuar görevi yapar (Pettersson and Jacobson 2003).
- Yüzeylerde ciddi şekilde oluşan aşınmayı önlemek için aşınma kalıntılarını hapsetme görevi yapar (Suh *et al.* 2010).

Bu üç mekanizma arasında mikro yatak görevi görerek ek hidrodinamik basınç üretmek, düşük yük ve yüksek hız koşullarında yüzey dokusunun en önemli etkisi olarak kabul edilmektedir (Ronen *et al.* 2001; Wang *et al.* 2001; Brizmer *et al.* 2003; De Kraker *et al.* 2007; Brenner *et al.* 2007).

Tribolojik performansı en iyi düzeye çıkarmak için yüzey doku tasarımı ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Etsion, yüzey dokusunun etkisini incelemek için çeşitli derinliklerde mikro çukurlara sahip çelik malzemeden yapılmış conta halkaları üzerinde çalışma yapmıştır. Optimize edilmiş küresel geometrik desene sahip numunelerin film sertliğini ve nötralizasyondaki PV faktörünün geometrik desene sahip olmayan numunelerin üzerindeki yağlamada en az %150 oranında fazla olduğunu bulmuştur (Etsion 1997). Ayrıca son zamanlarda, bu yüzeylerin optimizasyonunda kullanılan sayısal simülasyonu içeren birçok çalışma yayınlanmıştır (Etsion 1996; Kligerman 2001; Raeymaekers 2007). Araştırmacıların çoğu, üretimi kolay olduğundan dolayı dairesel geometrik desenlerin üretimini yapmış ve çukur yoğunluğu, geometrik desenin derinliği, boyutları gibi

parametrelerin yağlama üzerindeki etkilerini incelemişlerdir ve bu incelemeler sonucunda optimum değerleri bulmaya çalışmışlardır. Nanbu ve arkadaşları, elasto-hidrokinamik bir simülasyon kullanarak farklı doku alt geometrilerinin yağlamayı geliştirme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kama şeklindeki bir alt desenin daha kalın film tabakası oluşturduğunu göstermişlerdir (Nanbu *et al.* 2008).

Yu ve arkadaşları hidrokinamik yağlama şartlarında ve conformal temas durumunda yüzeyde oluşturulan geometrik desenin etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, geometrik desen olarak elips, üçgen ve daire kullanmışlardır. Bütün parametreleri sabit tutarak sadece geometrik desenin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, hidrokinamik fayda oluşturma açısından sadece dokunun şeklinin değil aynı zamanda kayma yönüne göre yönlendirilmesinin de oldukça büyük öneme sahip olduğunu göstermişlerdir. Elips geometrik desenin kayma yönüne göre dik pozisyonu en iyi hidrokinamik fayda sağladığını gözlemlemişlerdir. Bunun sebebinin ise elips geometrik desenin kayma yönüne göre dik pozisyonunun daha yakınsak bir alan sağlaması olarak tanımlamışlardır. En kötü sonucun ise üçgen geometrik desenin tepe noktasından tabana doğru kayma yönünde dizilimde elde edildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, hızın ortalama boyutsuz basınç üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hızın 0,1 m/s'den 0,2 m/s'ye çıkması durumunda ortalama boyutsuz basınç değerinin arttığını gözlemlemişlerdir (Yu *et al.* 2010).

Yu ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında, farklı derinlik ve yoğunluklara sahip dairesel, dikdörtgen ve elips geometrik desenli çukurlar analiz edilmiştir. Sonuç olarak, elips geometrik desenin kayma yönüne göre dik koşulu en iyi sonucu verdiğini göstermişlerdir (Yu *et al.* 2011).

Joshi ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, non-conformal temas durumunda üçgen, altıgen ve dikdörtgen geometrik desenleri kullanarak yüzey geometrik desenin etkisini incelemişlerdir. Keskin köşelerin varlığında (üçgen ve altıgen geometrik desen) ani olarak gerilme artışı meydana geldiğini ve aşınma oranının artırdığını ifade etmişlerdir. Dikdörtgen geometrik desenin aşınma kalıntılarını hapsedme yeteneğinin yüksek

olduğunu ve neredeyse %20 aşınma oranında iyileşme görüldüğünü bildirmişlerdir. %53 boşluk oranına sahip dikdörtgen geometrik desenin en iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir (Joshi *et al.* 2018).

Shen ve arkadaşları, asimetrik geometrik dokuların (elips, zikzak gibi) yaygın olarak kullanılan daire geometrik desenlerden sürtünme ve aşınma açısından daha iyi performans sergilediğini belirterek, bu desenlerin yük taşıma kapasitesinde iyileşmeye ve sürtünme azalmaya sebep olduğunu ifade ederek bu geometrik dokuların diğer dokulara birer alternatif olabileceğini ifade etmişlerdir (Shen and Khonsari 2013).

Sun ve arkadaşları lazer yüzey tekstürünün TC11 alaşımının kuru aşınma sonucundaki davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, çukurların yoğunluğundaki artış ile aşınma oranının azaldığını ifade etmişlerdir. Mikro sertlik değerlerinin artan alan yoğunluğu ile arttığını ve çukur yoğunluğunun artması ile yüzey üzerinde absorbe edilen oksijen miktarının arttığını ifade etmişlerdir (Sun *et al.* 2015).

Yüzey mühendisliğinde kullanılan bir diğer yüzey morfolojisi yöntemi ise termokimyasal bir yöntem olan plazma yardımıyla difüzyon işlemidir. Plazma yardımıyla difüzyon işleminin bir çeşidi olan plazma nitrüleme işlemi özellikle çelik malzemelerde mekanik özellikler iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Çelik malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirerek yorulma dayanımlarının artmasını sağlayan bir işlemdir. Bu yöntemde, plazma ortamında malzemenin yüzeyine azot gazının difüzyonu sağlanarak malzemenin yüzeyinde ve yüzeye yakın tabakada sertlik artışına ve demir nitrür fazlarının oluşmasına sebep olunur (Edenhofer 1974).

Plazma nitrüleme işlem sonrasında oluşan fazlar sayesinde sertlik artışı meydana gelir. Malzemenin yüzeyinin sertliğindeki artış ile plastik şekil değiştirme (deformasyona uğrama) olasılığı da azalmaktadır. Ayrıca plazma nitrüleme işlemi ile yüzeydeki pürüzlülük artar. Böylece birbirine göre izafi olarak hareket eden malzemeler arasında adezyon bağlarının oluşma ihtimali azalır ve daha az aşınma meydana gelir (Li and Bell 2004; Yetim 2009; Kovacı 2016).

Plazma nitrüleme işlemi sonucunda oluşan fazlar sayesinde mekanik özelliklerde iyileşmeler meydana gelir. Fakat işlem sıcaklığı ve süresi oldukça önemlidir. İşlem süresi ve sıcaklığı arttıkça meydana gelen tabaka kalınlığı artmaktadır. AISI 316L gibi paslanmaz çeliklerde tabaka kalınlığı arttıkça oluşan fazlar değişkenlik göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda (450°C) oluşan tabakada s-fazı meydana gelmektedir. Düşük sıcaklıklarda Cr atomlarının aktivasyonu yetersiz olduğundan CrN ve Cr_2N oluşturma eğilimi azdır. 450°C ve daha yüksek sıcaklıklarda CrN, Fe_4N gibi fazlar meydana gelmektedir. Oluşan bütün bu fazlar sayesinde aşınma direncinde artış meydana gelmektedir. Fakat yüksek sıcaklıklarda oluşan CrN fazı malzemenin korozyon direncinde azalmaya sebep olmaktadır (Borgioli *et al.* 2005; Çelik vd 2008). Sadece s-fazının mevcut olduğu ya da yoğun olarak bulunduğu tabakalarda korozyon direnci işlem görmemiş numuneye göre çok daha iyidir (Baranowska and Arnold 2006).

Plazma nitrüleme işleminin aşınma oranına etkisi pek çok çalışmada incelenmiştir. 450 °C ve daha düşük sıcaklıklarda s-fazı meydana gelmiştir. Oluşan bu faz sayesinde aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir (Li *et al.* 2008; Çelik vd 2008; Yetim 2009).

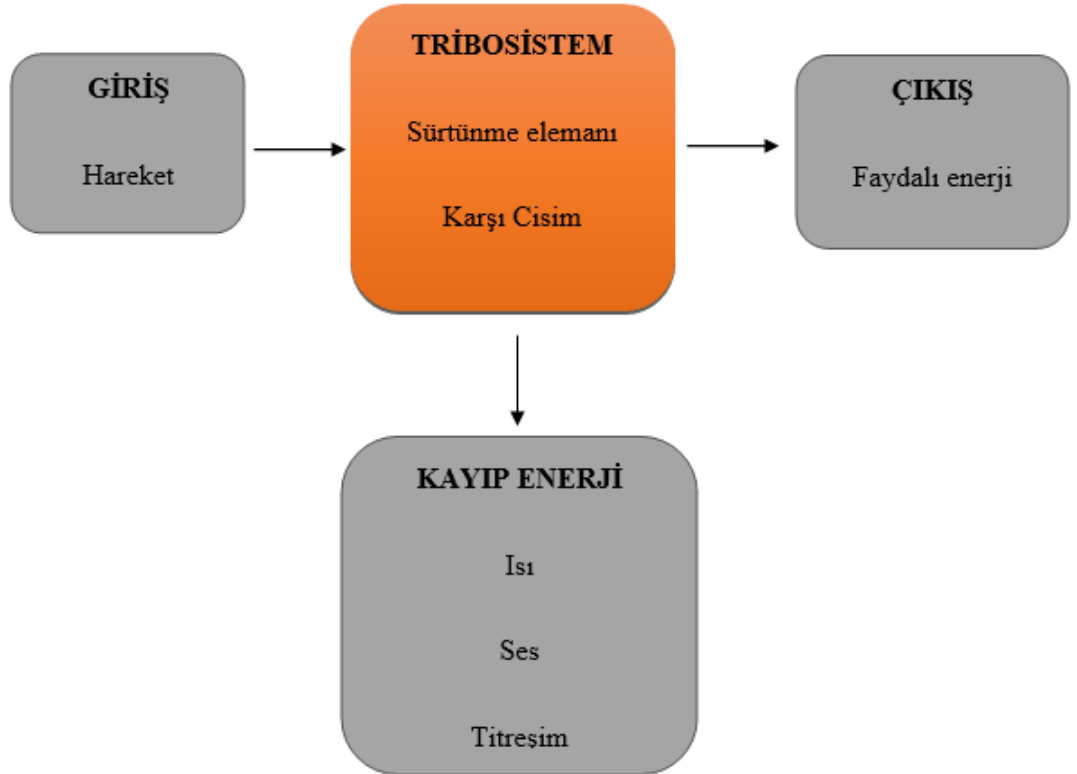
Literatür araştırmasından görüldüğü gibi malzemeye uygulanan yüzey modifikasyonları tribolojik açıdan olumlu sonuçlar vermektedir. Yüzey desenleme/tekstürleme tekniğinde oluşturulan geometrik desenlerin malzemenin aşınma direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, eklemeli üretim yöntemi olan SLM yöntemi ile üretilen numunelerin yüzeyinde oluşturulan geometrik desenlerin ve bu numunelere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemektir. Bu amaçla öncelikle SLM yöntemi ile üretim yapılabilmesi için SolidWorks yazılımı ile numunelerin ve geometrik desenlerin tasarımı yapılmıştır. Literatür incelemesinde görüldüğü gibi genellikle elips, üçgen, kare gibi bilinen geometrik desenler kullanılmıştır. Bu çalışmada, bilinen geometrik desenlerin yanında yeni tasarlanan geometrilerde kullanılmıştır. Üçgen ve elips geometrisinin birleşimi olarak kullanılan ve yeni model olarak adlandırılan bir model geliştirilmiştir. Bu iki geometrinin birleşiminin tribolojik davranış üzerindeki etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, örgü olarak da adlandırılan geometrilerin numune üzerindeki dizilimi değiştirilerek de numune üretimi yapılmıştır ve dağınık

model olarak adlandırılan bu model yine üçgen ve elips geometrik desenlerin birleşimi olarak üretilmiştir. Geometrik desen olarak altıgen, dağınık model, elips, kare, üçgen ve yeni model (üçgen + elips) olmak üzere 6 farklı geometri kullanılmıştır. Belirlenen bu geometrik desene sahip numuneler eklemeli üretim yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak AISI 316L paslanmaz çelik tozu ile üretilmiştir. İlk aşamada; alan yoğunluğunun etkisini belirlemek için %6,6 ile %26 alan yoğunluğuna sahip daire geometrik desenli numuneler üretilmiş ve aşınma deneyi sonucuna bağlı olarak diğer geometrilerin üretimi yapılmıştır. İkinci aşamada ise sadece geometrik desenin şeklinin etkisini incelemek amacıyla %26 alan yoğunluğuna ve 0,5 mm derinliğe sahip numuneler üretilmiş ve bu numunelere kuru ve sıvı (simüle edilmiş vücut sıvısı-SBF) ortamında pin-on-disk aşınma testleri yapılarak ve yüzey tekstürünün tribolojik özellikler üzerinde etkisi incelenmiştir. Ayrıca, üretimi yapılmış olan numunelere %50 H_2 + %50 N_2 gaz karışımında 400°C sıcaklık ve 2 saatlik süre plazma nitrüleme işlemi uygulanmıştır ve tribolojik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Böylece hem yüzey desenlemenin hem de plazma nitrüleme işleminin 316L paslanmaz çelik tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında kuru ile sıvı ortamda aşınma testleri yapılmıştır. Ayrıca, numunelerin yapısal, morfolojik ve mekanik özellikleri SEM, XRD ve üç boyutlu profilometre ve sertlik cihazı ile tayin edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Tribolojinin Tanımı

Triboloji kelimesi, Yunanca bir kelime olan *tribos* kelimesinden türetilmiştir. *Tribos* kelimesi Yunanca'da kayma anlamına gelmektedir. İlk olarak 1966 yılında İngiltere'de Dr. H. Peter Jost tarafından o zamanki hükümet raporunda sürtünme, aşınma ve yağlama konularını tanımlayabilmek için kullanılmıştır. Triboloji, karşılıklı etkileşim halinde bulunan ve birbirlerine göre bağıl olarak hareket yapan malzemeler arasında meydana gelen sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarıyla bu olayların arasındaki ilişkilerin bilimi, teknolojisi ve de mühendisliği şeklinde tanımlanmaktadır (Stachowiak and Batchelor 2014). Şekil 2.1'de tribolojik bir sistemde giriş- çıkış verileri ve bu sırada meydana gelen kayıp enerji gösterilmiştir.

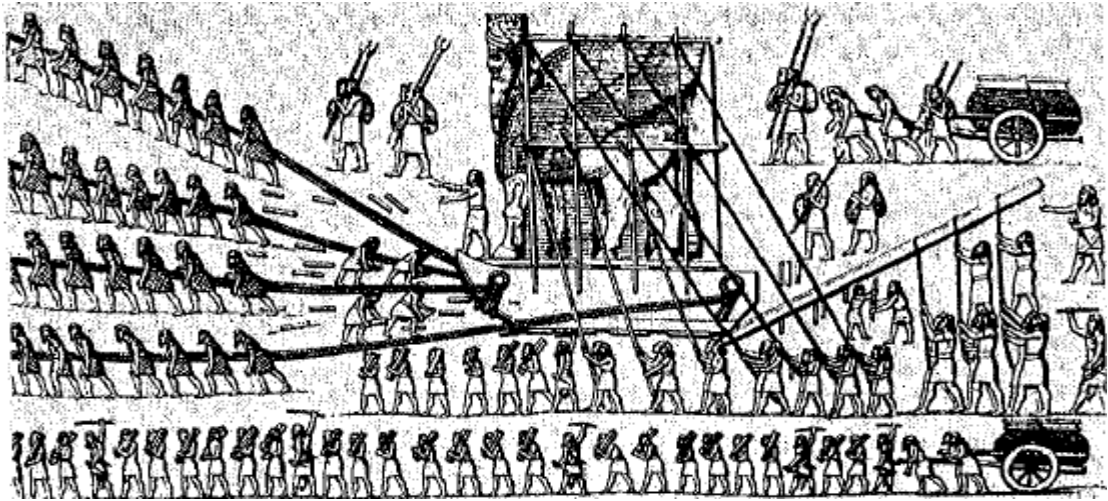


Şekil 2.1. Triboloji etki şeması (Koç 2017)

Triboloji biliminin hedefi, birbirine göre izafi olarak hareket halinde olan malzemelerin (yüzeylerin) hem ekolojik hem ekonomik hem de fonksiyonel olarak optimizasyonunu sağlamaktır. Günlük hayatta kullandığımız bıçakların aşınması, metallerin paslanması, giysilerimizin yıpranması gibi olaylar da sürtünme etkilidir. Bütün bu olayların çözümleri triboloji bilimi içerisinde incelenmektedir (Olçay 2014).

Tribolojinin ilgi alanına giren sürtünme ve aşınma olayları çok eski tarihlerden itibaren incelenen ve azaltmak için çözümler aranılan problemlerdendir. Sümerlere ait olduğu bilinen mezardan çıkarılan tekerlek muylusu ve bu tekerlek muylusunun üzerinde eser halinde bulunan don yağı kalıntıları M.Ö. 2500 yıllarında yağlamanın kullanıldığını göstermektedir (Stolarski 1999).

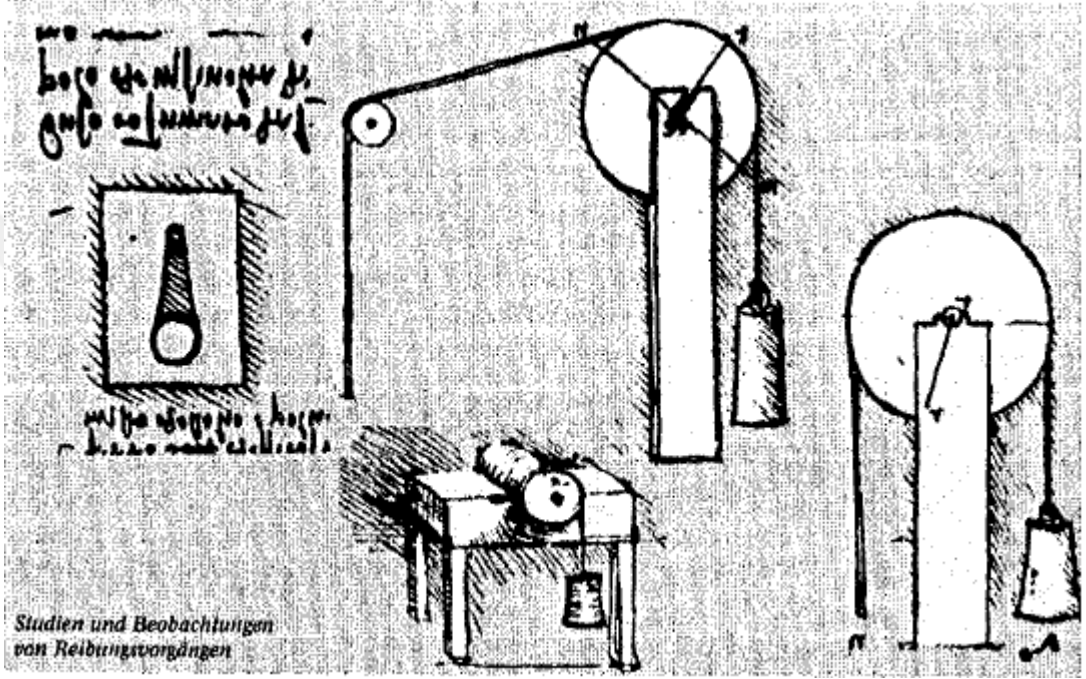
Şekil 2.2’de M.Ö. 700’lü yıllarda Asur Medeniyetine ait olan büyük bir heykelin taşınması görülmektedir ve bu taşıma işleminde kullanılan tribolojik sistemler dikkat çekmektedir.



Şekil 2.2. Büyük bir heykelin taşınması (Asur medeniyeti-M.Ö.700) (Stolarski 1999)

Avrupa’da triboloji ile ilgili ilk bilimsel çalışmalar Rönesans (1450-1600) ile başlamıştır. Sürtünme konusunda bilinen ilk sistematik olarak çalışma yapan Leonardo da Vinci (1452-1519) yapmıştır. Leonardo da Vinci 5000 sayfanın üzerinde bir doküman

hazırlamıştır. Hatta Leonardo da Vinci tarafından ileri sürülen küçük sürtünme dirençli yatak konstrüksiyonu ve alaşımları prensip bakımından günümüzde pek çok makinede halen daha kullanılmaktadır. Şekil 2.3’de Leonardo da Vinci tarafından önerilen konstrüksiyon ve sürtünmeye ait deney düzeneği verilmiştir (Stolarski 1999).



Şekil 2.3. Leonardo da Vinci tarafından önerilen yatak konstrüksiyonları ve sürtünme deney düzenekleri (Stolarski 1999)

Ortaçağda Fransız fizikçiler Amontons (1663-1705) ve Coulomb (1736-1806) mekanik ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Sıvı sürtünme ile ilgili Newton (1643-1727), Poiseuille (1799-1869), Hagen (1797-1884), Stokes (1819-1903), Reynolds (1842-1912) çeşitli araştırmalar yapmışlardır. Ayrıca bugünkü triboloji biliminin temelini atmışlardır (Akkurt 2012).

Alman makine mühendisi Richard Stribeck (1861-1950), kaymalı yataklar üzerine çalışmalar yapmış ve yaptığı deneylerde sürtünmeye etki edecek parametreleri sabit olarak ele almış, devir sayısını ve çevresel hızı değiştirerek Stribeck eğrisi olarak bilinen günümüzde de kullanımı yaygın olan eğriyi elde etmiştir (Akkurt 2012).

Triboloji bilimi kendi içerisinde 3 ana başlık altında toplanır (Olçay 2014);

- Sürtünme
- Aşınma
- Yağlama

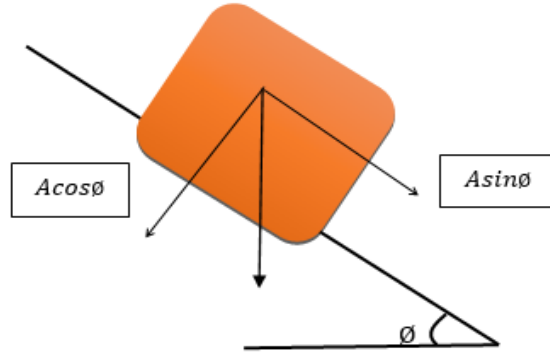
2.2. Sürtünmenin Tanımı

Sürtünme, birbirine göre bağıl olarak hareket eden veya hareket etme eğiliminde olan malzemeler arasında harekete karşı oluşan dirençtir (Buckley 2000).

Günlük yaşantımızda sürtünme büyük bir öneme sahiptir. Örneğin insan vücudunun hareketi, yön değişimi yada aniden durmaya çalışması gibi olayların hepsi sürtünmeye bağlı olan olaylardır. Dişli bağlantıların çalışması ve sürtünme kaynağı gibi endüstriyel olaylarda da sürtünmenin rolü vardır (Stolarski 1999).

Fransız bilim adamı Guillaume Amontons tarafından yayınlanan bir çalışma sonucu sürtünme kuvveti ile normal kuvvetin doğru orantılı olduğu ve bu kuvvetin değerinin normal kuvvetin değerinin yaklaşık olarak $1/3$ 'ü kadar olduğu ortaya çıkarılmıştır (Soydan ve Ulukan 2013).

Fransız bilim adamı Charles Auguste Coulomb, Amontons'un bulduğu sonuçlardan habersiz bir şekilde 1785 yılında Amontons ile aynı sonuçları bulmuştur. Daha sonraları ise Amontons-Coulomb kanunu olarak uzun yıllar geçerliliğini koruyan bu bulgu, sürtünme ile ilgili yapılan araştırmaların en önemli adımlarından biri olmuştur (Farrow 1986).



Şekil 2.4. Sürtünme açısı ve sürtünme katsayısına ait formül (Menezes *et al.* 2013)

$$\mu = \frac{F}{A} = \frac{A \sin \theta}{A \cos \theta} = \tan \theta \quad (2.1)$$

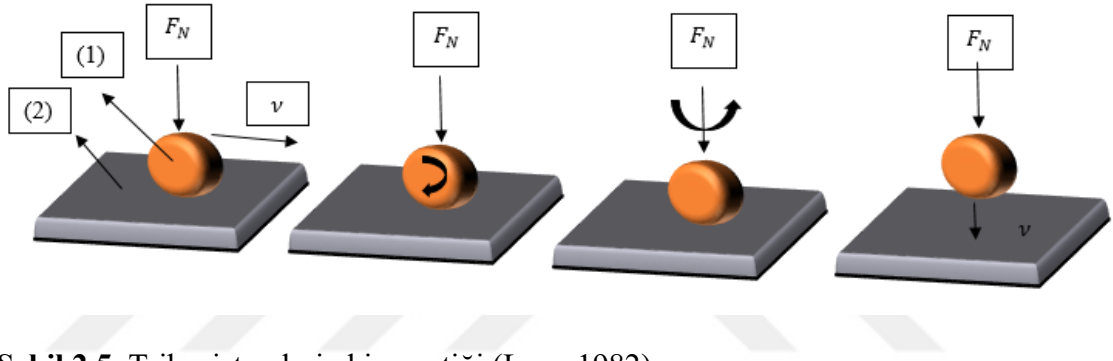
Şekil 2.4’de sürtünme katsayısının formülüne ait sürtünme açısını gösterimi verilmiştir ve formül 2.1’de sürtünme katsayısının elde edilmesi gösterilmiştir. Sürtünme kuvveti cismin kütlesine, yerçekimine ve sürtünme katsayısına bağlıdır. Ayrıca, sürtünme katsayısı hacmin ya da kütlenin bir fonksiyonu değil sadece temas eden elemanlara ve test koşullarına bağlıdır. Sürtünme katsayısı deney ile bulunan bir parametredir (Menezes *et al.* 2013).

Sürtünme, genellikle μ sürtünme katsayısı olarak tanımlanan sayısal bir parametre ile ifade edilir. Sürtünme kuvveti ile cisme uygulanan normal kuvvet arasında doğrusal olan bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişkiye Coulomb sürtünmesi denilir. Sürtünmeye ait olan katsayı, yatay kuvvet (F) ile normal kuvvetin (A) oranı ile bulunur ve birimsiz bir değerdir (Bhushan 2000).

Statik sürtünme, birbirine göre hareket halinde olmayan iki cisim arasında meydana gelen sürtünmedir. Dinamik sürtünme ise iki cisim birbirine göre hareket etmeye başladığında geçerli olmaktadır. Örnek olarak, bir cismin eğimli olan bir yüzey üzerinde aşağıya kaymadan durmasını statik sürtünme sağlar. Statik sürtünme katsayısı μ_s olarak gösterilmektedir ve genellikle dinamik sürtünme katsayısından (μ_k) daha büyüktür. Bunun sebebi ise yüzeylerin adeziv bağlardan dolayı “yapışma” eğiliminde olmasıdır.

Herhangi bir cismin harekete geçmesi için uygulanan kuvvetin statik sürtünme kuvvetini yenmesi gerekir. Kayma başladığı anda artık statik sürtünmeden bahsedilemez ve bu kuvvet yerini dinamik sürtünme kuvvetine bırakır (Menezes *et al.* 2013).

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi, sürtünme hareketin cinsine bağlı olarak kayma, yuvarlanma veya kayma yuvarlanması sürtünmesi şeklinde meydana gelebilir (Gediktaş 1968; Gemalmayan 1984).



Şekil 2.5. Tribosistemlerin kinematığı (Lang 1982)

Sürtünmeyi oluşturan fiziksel etkiler incelendiği zaman kayma ve yuvarlanma arasında mikroskobik açıdan her iki sürtünme hali içinde benzer olduğu fakat makroskobik açıdan farklılıklar olduğu görülür. Teorik olarak yüzeyi tamamen pürüzsüz ve tam olarak rijit olan küresel ya da silindirik bir elemanın, pürüzsüz ve rijit bir karşı yüzey üzerinde serbest olarak yuvarlanmasında sürtünme direncinin oluşmaması gerekir. Fakat pratikte kayma sürtünmesine göre küçük bir miktarda bile olsa bir sürtünme direnci oluşmaktadır. Birbiriyle temasta olan elemanların tam olarak rijit olmaması nedeniyle elastik ve plastik deformasyonların meydana gelmesi, temas şeklinin noktasal veya çizgisel formdan yüzeysel bir forma dönüşmesi harekete karşı dirence sebep olmaktadır. Ayrıca işleme kusurlarından dolayı tüm yüzeyler pürüzlü bir yapıya sahiptir ve bu pürüzler hareket esnasında da bir direnç oluştururlar. Genel olarak yuvarlanma hareketinde meydana gelen direnç;

- Mikro seviyede meydana gelen kaymalar,

- Histerisiz olayı ile buna bağlı olarak enerji kayıpları
- Yüzey pürüzlülüğü ile geometrik düzgünsüzlükler şeklinde üç ana nedene bağlanmaktadır (Halling 1975; Soydan ve Ulukan 2013).

Kayma ve yuvarlanma kavramı kesin olarak birbirinden ayrılması zordur. Kayma ve yuvarlanma halleri arasında doğru ayırım yapabilmek için en önemli 2 pratik şart vardır.

- Yuvarlanma hareketinin meydana gelebilmesi için birbiriyle temasta olan yüzeylerden en az bir tanesinin eğrisel (daireysel, küresel vb.) olması gerekir.
- Yapılan hareketin yuvarlanma tanımına girebilmesi için sistemdeki en az iki elemana ait bağlı olarak yer değiştiren yay uzunluklarının eşit olması gerekmektedir. Daha doğru bir ifade ile yuvarlanma hız vektörünün aynı büyüklükte olması gerekmektedir.

Dış sürtünme, birbiriyle temas halinde bulunan elemanların arasındaki pürüzlülükten kaynaklanan aralığın sifira yaklaşması halindeki limit değer olarak alınmaktadır. Fakat gerçekte böyle bir hali tanımlamak çok da mümkün değildir. En hassas bir şekilde dahi işlenmiş yüzeyler arasında dahi mikron mertebesinde bir aralık mevcuttur. Ayrıca yüzeyler, temiz veya ara tabakalardan tam olarak arındırılmış değildir. Bu nedenle temas eden yüzey çifti arasında tanımlanmış olan bir ara yüzey, dış sürtünme yüzeyi olarak adlandırılmaktadır. İç sürtünme kavramı ise yüzeyleri meydana getiren malzemelerin, molekül kümeleri arasında meydana gelen kayma direnci olarak tanımlanır. İç sürtünme direnci malzemelerin fiziksel halleri ile ilişkilidir. Katı, sıvı ve gaz halleri gibi hallerde katıların sıvılara göre, sıvıların gazlara göre iç sürtünme direnci daha yüksektir (Soydan ve Ulukan 2013; Hutchings 2017).

2.2.1. Sürtünme mekanizmaları

Birbirine göre izafi olarak hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı olarak adlandırılan madde konulup, konulmamasına bağlı olarak temas yüzeylerinin durumuna göre 5 grupta incelenmektedir:

- Kuru sürtünme: Sürtünmeyi meydana getiren elemanların yüzeyleri sıkı bir şekilde temas halinde, tamamen temizlenmiş ve yağlayıcı madde ile kaplanmamıştır.
- Yüzey tabaka sürtünmesi: Sürtünmeyi meydana getiren elemanların yüzeyleri sıkı bir şekilde temas halindedir ve yüzeyleri katı yağlayıcılar ile kaplanmıştır.
- Limit Sürtünmesi: Sürtünmeyi meydana getiren yüzeylerin sıkı bir şekilde temasta olması halinde ve ince bir yağlayıcı film ile kaplanması halinde meydana gelir. Aşınma oldukça yüksektir.
- Karışık Sürtünme: Sürtünmeyi meydana getiren yüzeyler kısmi temas halindedir. Aşınma olayı kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.
- Akışkan Sürtünme: Sürtünme meydana getiren yüzeyleri yağ filmi ile tamamen ayrılmıştır (Olçay 2014).

Gerçek anlamda kuru sürtünme, yabancı maddelerden tam anlamıyla arındırılmış yüzeylerin, mutlak vakum altında birbirlerine göre izafi olarak hareket ettirilmeleri durumunda meydana gelen sürtünme şeklidir. Bu durumda sürtünme katsayısı oldukça yüksek değerlere çıkmaktadır. Bunun sebebi ise yüzeyler arasındaki adezyon bağlarıdır. Böyle bir durum özellikle de uzay çalışmalarında önem kazanır. Burada meydana gelen sürtünme direncini düşürebilmek için birbirine sürtünen yüzeylere, yüksek sıcaklıklara dayanabilen yumuşak metal esaslı filmler ya da katı yağlayıcılar uygulanmaktadır. Oysaki mevcutta olan sistemlerin çoğu atmosfer şartlarında çalışmaktadır (Hutchings 2017).

Atmosfer şartlarında meydana gelen sürtünme durumunda yüzeyler çok iyi bir şekilde yabancı maddelerden arındırılmış olsalar dahi, sürtünme sonucunda aktif olan ve sıcaklığı artan yüzeylerde, tribo-kimyasal reaksiyonlar sonucunda farklı miktarda, kalınlıkta ve bileşimde oldukça ince oksit tabakalar oluşmaktadır. Bu oksit tabakaları, yüzeylerin sürtünme ve aşınma davranışı üzerinde oldukça büyük etkiye sahiptir. Oksit tabakaları genellikle bir ara madde görevi yaparak sürtünme direncini düşürür. Değme alanı büyümesini oldukça azaltmaktadır. Sürtünme yüzeylerinde oksidasyon reaksiyonlarından başkasülfid reaksiyonları, karbonil oluşumu, ayrışım reaksiyonları ve katalitik reaksiyonları meydana gelebilmektedir (Zum Gahr 1987).

Teorik olarak film sürtünmesi ile kuru sürtünme arasındaki sürtünme şekline sınır sürtünmesi denilmektedir. Birbiriyle temasta olan iki yüzeyin sürtünen yüzeylerinin arasına belli bir özelliğe sahip yağlayıcı madde konulup, belli bir yük ve kayma hızında kesintisiz bir yağlayıcı film oluşmadığı kabul edildiğinde, sürtünme direncine ait üç temel bileşen olacaktır. Bu bileşenler, adeziv bileşen, yağ filmi bileşeni ve deformasyon bileşeni şeklindedir (Takadoum 2013).

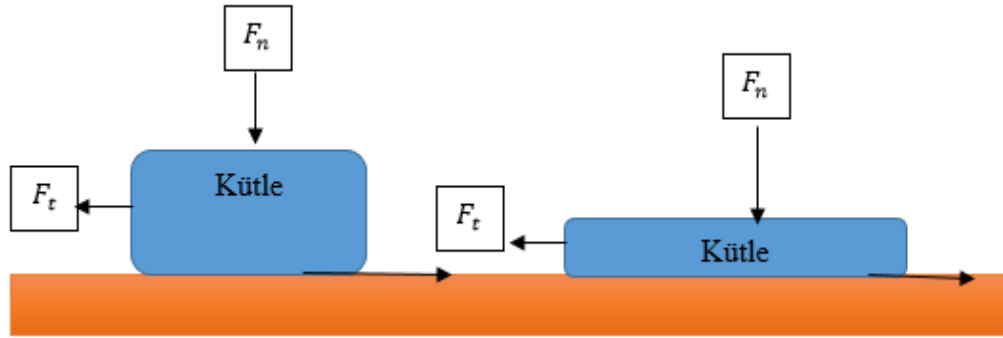
$$\text{Sürtünme kuvveti; } F_f = F_{adh} + F_{def} + F_{yağ} \quad (2.2)$$

İdeal olarak kabul edilen tribolojik ortam, iç sürtünmeye karşı gösterilen direncin çok düşük olduğu kesintisiz bir ara tabakanın oluşması ile ortaya çıkar. Böyle bir durumda bağlı olarak hareket yapan yüzeyler arasında oluşacak adezyon ve deformasyon bağları ortadan kalkar. Uygun bir yağlayıcının seçimi ile sürtünme ve aşınma olayı kontrol altına alınabilir. Yağlayıcı olarak akışkan maddelerin kullanılması durumunda Navier-Stokes denklemleri ile modelleme mümkün olur.

2.2.2. Kuru sürtünme teorisi

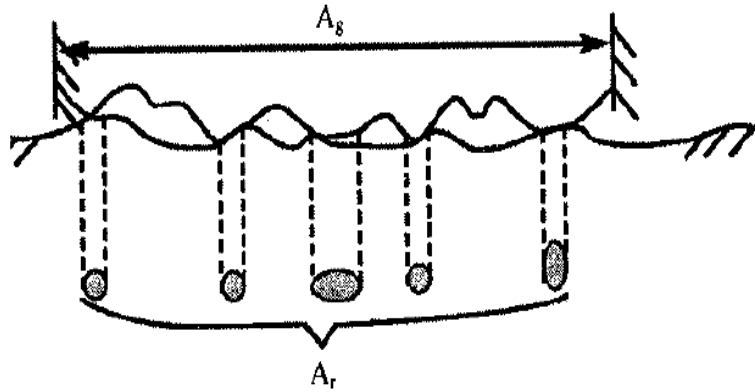
Şekil 2.6’da verilmiş olan sürtünme modeli temel olarak alındığı zaman “Coulomb Kanunu” olarak bilinen teoriye göre (Halling 1975; Takadoum 2013; Soydan ve Ulukan 2013; Hutchings and Shipway 2017):

- Sürtünme kuvveti, normal kuvvetle orantılıdır,
- Sürtünme kuvveti, geometrik alana bağlı değildir,
- Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir,
- Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür.



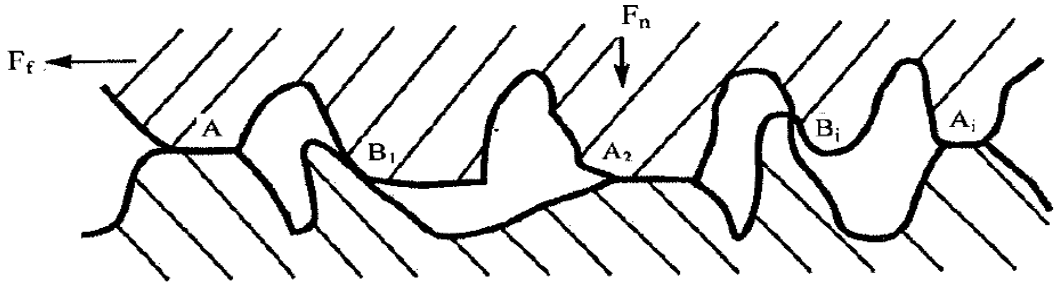
Şekil 2.6. Sürtünme direncinin açıklanmasında kullanılan fiziksel model (Hutchings and Shipway 2017)

Günümüze kadar sürtünme ile ilgili birçok teori sunulmuştur. Bu teoriler içerisinde en çok benimsenmiş olan, deney sonuçları ile de büyük bir uygunluk gösteren Bowden ve Tabor'un “kaynama-kesme-sürme” teorisidir. Bowden ve Tabor sürtünmenin oluşmasında en büyük etkenin yüzeylerin birbirine değdiği tepeciklerde meydana gelen adeziv ve koheziv bağlar olduğunu ve bunlara ek olarak bu tepeciklerdeki deformasyonlarında direnç artırıcı etkisi olduğunu ileri sürmüşlerdir. Birbirine temas eden iki yüzey arasında, adezyon ve kohezyon bağlarının oluşması, çoğunlukla tekstür yapılarına ve bunların temas halindeki değme geometrilerine bağlıdır. İşleme kusurları nedeniyle çok iyi bir şekilde parlatılmış yüzeylerde dahi Şekil 2.7’de olduğu gibi temas eden malzeme çiftinin gerçek temas alanı geometrik temas alanından çok daha küçüktür (Farrow 1986).



Şekil 2.7. Gerçek temas alanının gösterimi (Farrow 1986)

Bowden ve Tabor teorisine göre, temas eden yüzeylere normal bir kuvvetin etki etmesi durumunda, gerçek temas alanları çok küçük olduğundan, temas eden noktalarda yerel basınçlar oldukça yüksektir. Bu bölgelerde öncelikle elastik daha sonra plastik deformasyonlar meydana gelir. Yüzeyler arasında birbirine göre izafi hareket başladığında bu yüksek yerel basınçlara ek olarak yerel sıcaklık artışları meydana gelmektedir. Bu sıcaklık artışlarından dolayı ise temas noktalarında küçük kaynak bağları oluşmaktadır. Sürtünme direncinin ana unsuru bu bağlardır. Bunun yanı sıra, tepeliklerdeki deformasyonlarda direnç artırıcı etkiye sahiptir. Bu durumda, birbirine göre izafi olarak hareket eden ve temas eden iki yüzey arasında Şekil 2.8’de görülen iki bileşenden meydana gelen bir sürtünme kuvveti oluşur (Takadoum 2013).



Şekil 2.8. Kuru sürtünme halinde adezyon ve deformasyon bileşenleri (Soydan ve Ulukan 2013)

A ile gösterilen noktalar kaynak bölgelerini, B ile gösterilen noktalar deformasyon noktalarını temsil etmektedir (Takadoum 2013; Soydan ve Ulukan 2013).

$$F_f = F_{adh} + F_{def} \quad (2.3)$$

F_f : Sürtünme kuvveti

F_{adh} : kaynak bağı oluşan yüzeyleri ayırmak için gerekli kuvvet

F_{def} : birbirine yan taraftan dayanan pürüzlerin eğilmesi ya da kesilmesi için gerekli kuvvet

Bu denklem normal kuvvete bölünürse, sürtünme katsayısının bileşenleri elde edilir.

$$\mu = \mu_{adh} + \mu_{def} \quad (2.4)$$

Pürüzlü malzeme çiftinin yüzeyi katı bir yağlayıcı ile film sürtünmesi oluşturmayacak şekilde yağlanır. Bu durumda sürtünmenin deformasyon bileşeni bulunur. Eğer yüzeyler neredeyse tamamen temiz hale getirilirse, belirli bir alıştırma safhasından sonra sürtünmenin adezyon bileşeni bulunur (Takadoum 2013).

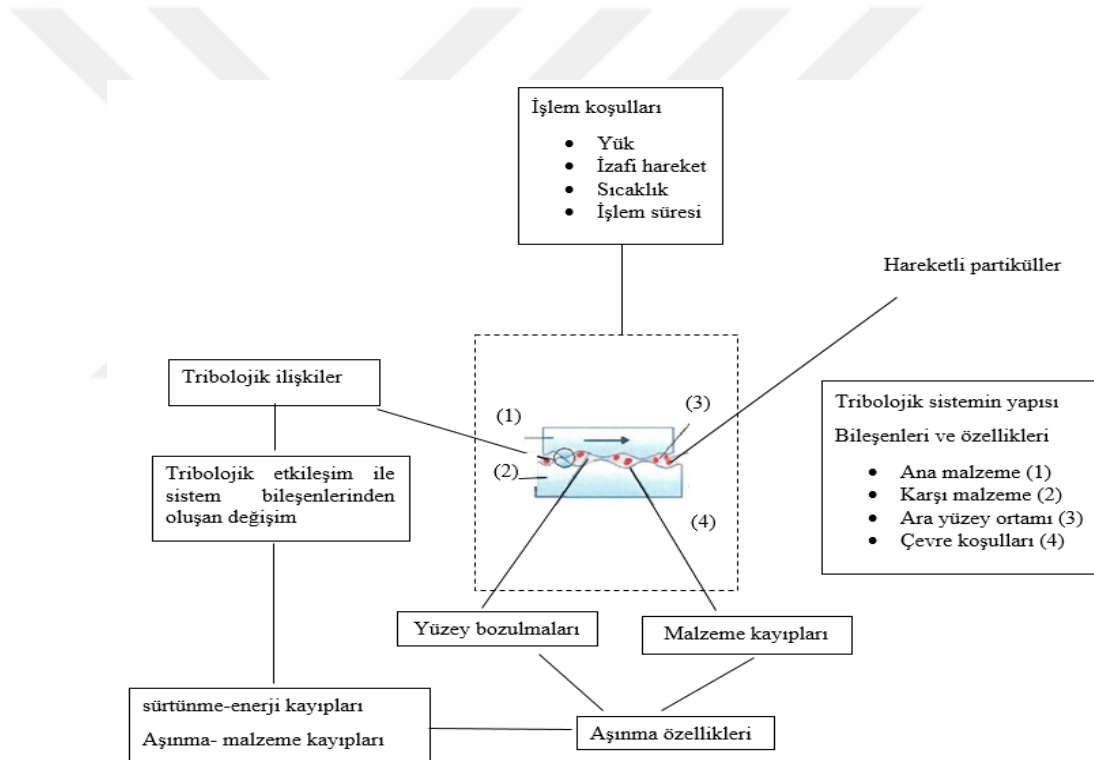
Deneysel olarak bulunan sürtünme katsayısı oldukça büyük değerler vermektedir. Fakat göz önüne alınmayan iki önemli fiziksel olay mevcuttur. Bunlarında sürtünmeye etkisi oldukça fazladır. Bunlardan birisi “değme alanı büyümesi”, diğeri ise “pekleşme” olayıdır. Courtney ve Eisner tarafından yapılan deneylerde bir disk yüzeyi ile küresel uçlu deney çubuğu arasındaki deformasyon alanının aralarında bağıl kayma olması durumunda durma ve hareket halinde farklı oldukları, hareket halinde değme yüzeyinin büyüklüğü durma halindeki değme yüzeyinin büyüklüğünden neredeyse 10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, pürüz tepeliklerinde durgun halde bulunan mikro deformasyon alanlarının, kayma hareketine bağılı olarak temas yüzeylerinde meydana gelen kayma gerilmelerinin etkisiyle büyümeleri şeklinde açıklanmaktadır. Pek çok metalik malzeme de plastik şekil değişimine bağılı olarak elasto-plastik temas hali incelenirken bir sertleşme (pekleşme) halinin meydana geldiği gözlenir. Pürüzlü yüzeylerin birbiri üzerinde kayma hareketi yapmaları sonucunda, yüzeyler üzerinde önemli bünyesel değişimler meydana gelir. Plastik sertleşmenin sürtünme katsayısına etkisi, temas alanının büyümesi etkisinden daha azdır (Soydan ve Ulukan 2013).

2.3. Aşınma

Aşınma, temas halinde olan ve birbirine göre izafi olarak kayma, yuvarlanma veya darbe hareketi şeklinde hareket eden yüzeylerden birinin ya da her ikisinin de yüzeyinde meydana gelen hasar ya da istenmeyen malzeme kaybıdır. Aşınma, genel olarak temas eden yüzeylerin pürüz tepelerinde oluşur. Hareket ederken ilk olarak pürüz tepeleri temastan etkilenir ve katı yüzeyin özelliği değişir ancak bu safhada malzeme kaybı beklenmez. Daha sonrasında ise, gerçek yüzeyde malzeme kaybı meydana gelebilir.

Aşınma genellikle tanım olarak malzeme kaybı diye bilinir fakat malzemenin hacminde ya da ağırlığında değişim olmadan malzemenin yer değişimi ile de meydana gelen hasarlar aşınmayı oluşturur. Aşınma malzeme özelliği değildir, içinde bulunduğu sistemin tepkisidir (Tpu 2017).

Aşınma sisteminde; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındırıcı), ara malzeme, temas kuvveti (yük), birbirine göre izafi olan hareket ve çevre olmak üzere temel elemanlar mevcuttur. Bu elemanların oluşturduğu sistem Şekil 2.9’da gösterildiği gibidir ve tribolojik sistem olarak adlandırılır.



Şekil 2.9. Tribolojik sistem (Demir 2012)

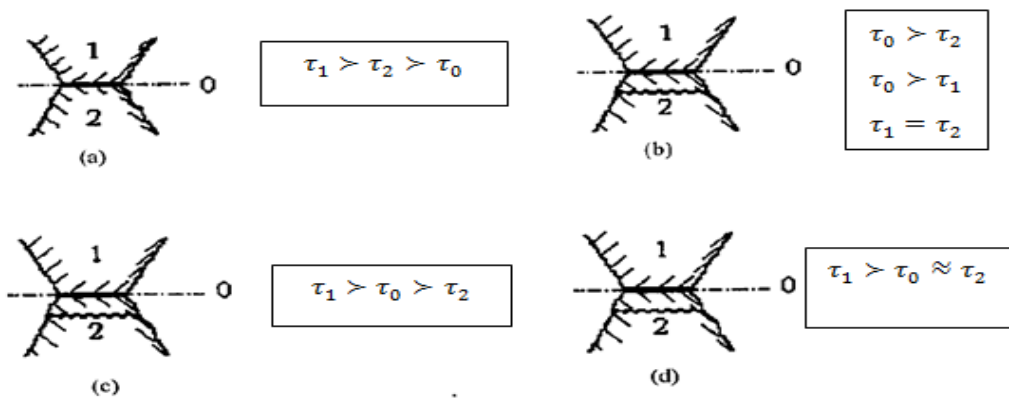
Aşınmayı meydana getiren tribolojik mekanizmalar;

- Adeziv aşınma
- Abraziv aşınma
- Eroziv aşınma
- Sürtünme oksidasyonu

- Korozyon aşınma
- Yorulma aşınması
- Yenme, pitting (pulcuk kalkması) ve diğerleri şeklinde sınıflandırılmaktadır (Frank 2005).

2.3.1. Aşınma mekanizmaları

Adeziv aşınma, birbirine göre izafi hareket eden ve temas halinde olan, pratik anlamda kuru kayma yüzeylerinde, diğer aşınma türleri önlense bile mevcut olan aşınma türüdür. İşleme kusurlarından dolayı temas eden yüzeylerde pürüzlerin olması, pürüzlere bağlı olarak gerçek temas alanının küçük olması, etki eden yükün etkisi ile temas eden bu bölgelerde aşırı gerilmeler oluşmaktadır. Özellikle de malzemenin akma sınırı aşıldığında küçük yerel kaynak bağları oluşmaktadır. Buna soğuk kaynama-adezyon adı da verilir. Kayma durumunda bu yüksek yerel basınçlara ek olarak, temas eden noktalarda aşırı derecede sıcaklık yükselmelerinin de olması kaynak bağlarının oluşumunu kolaylaştırır. Buna da sıcak kaynama-kohezyon denir. Oluşan bağ, etki eden yüzeyler ne kadar temiz ise, o oranda kuvvetli olmaktadır. Rutubet, oksitler, absorbe gazlar ve yağlayıcı gibi maddelerin mevcudiyeti bağ kuvvetini azaltır dolayısıyla aşınmayı da azaltır. Temasta olan iki malzeme arasındaki pürüz tepelerinde bu tür bağlar oluşmuşsa birbirine göre kaydırıldığı zaman, bağlanmış tepeliklerin ayrılması Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Bowden and Tabor 1966).



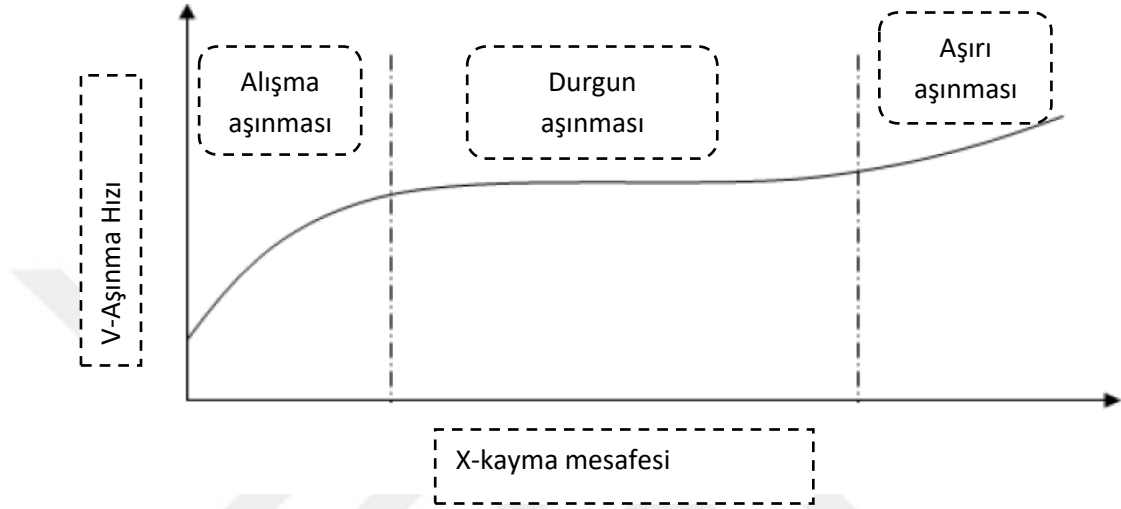
Şekil 2.10. Pürüz tepelikleri arasında adeziv bağ oluşmuş sürtünme çiftlerinin ayrılma durumları (Tabor 1966)

- a) Bağ ara yüzeyinde meydana gelen kesme direnci, birbiri ile temasta olan her iyi yüzeye ait malzemelerin kesme direncinden daha küçük ise bu durumda ayrılma, ara yüzeyden meydana gelir. Çelik-kalay çifti bu durum için örnek verilebilir.
- b) Bağ ara yüzeyinde meydana gelen kesme direnci, birbirine temas eden her iki yüzey malzemesinin kesme direncinden büyüktür. Kuvvetli şekil değişimi sonucunda pekleşme ve kırılmalık özelliği meydana gelir. Adeziv aşınmaya ek olarak abrazyon aşınma da meydana gelir. Mukavemet olarak birbirine yakın olan malzemelerde meydana gelir. Çelik-çelik çifti bu durum için örnek verilebilir.
- c) Bağ ara yüzeyinde meydana gelen kesme direnci, birbirine temas halinde olan 1. malzemedeki küçük, 2. malzemedeki büyük ise bu durumda ayrılma, 2. malzeme de meydana gelir. Çelik-kurşun çifti bu durum için örnek verilebilir.
- d) Bağ ara yüzeyinde meydana gelen kesme direnci, temas halinde olan 1. malzemedeki küçük, 2. malzemedeki ise çok az farklıdır. Bu durumda yumuşak malzemedeki sert malzemeye bir malzeme geçişi vardır. Madde geçişinin yanı sıra, madde ayrılmaları şeklinde daha büyük bir madde kaybı ortaya çıkacaktır. Çelik-bakır çifti bu durum için örnek verilebilir.

Farklı sürtünme çiftleri arasında meydana gelen bu dört adeziv aşınma mekanizmasında ölçülen sürtünme katsayıları arasındaki fark oldukça azdır. Kısaca bu dört hal içinde sürtünme direnci neredeyse aynı kalabilir. Ancak a ve b mekanizmalarında aşınma miktarları farkı neredeyse 100 katı gibi bir değerde olduğundan aşınma miktarı çok fazladır.

Adeziv aşınma üç aşınma bölgesinden oluşur. Birbirine temas eden yüzeylerin hareketi başladığında ilk durumda yüzeylerin teması sivri olan tepeliklerde meydana geldiğinden yüksek gerilmeler meydana gelmektedir. Böylece de aşınma da hızlı bir şekilde artar. Aşınmanın bu başlangıç evresine alıştırma aşınması veya rodaj denir. Bu aşamada yüklerin fazla olması oldukça tehlikelidir. Alıştırma aşamasında malzemenin yüzeyi düzgünleşir. Sivri olan tepeliklerin düzleşmesi sonucunda yüzey çok daha geniş bir alana yayılır ve böylece gerilme düşer ve aşınma miktarında düşüş meydana gelir. İkinci bölge olarak adlandırılan bu bölgeye durgun aşınma bölgesi denir. Durgun aşınma sonunda aşırı bir

şekilde aşınma meydana gelir. Bu bölgeye aşırı aşınma bölgesi denir. Bu bölgede malzeme çiftlerinde birbirine tamamen yapışma görülür. Şekil 2.11’de de açıklanan bu bölgeler görülmektedir (Demir 2012).



Şekil 2.11. Adeziv aşınmada aşınma bölgeleri (Demir 2012)

1950 yılında Holm yaptığı çalışmalarla, kaymanın başlamasıyla değme noktalarına yakın olan kristal atomlarının, çok sayıdaki karşılıklı etkileşimi sonucunda belirli bir kayma mesafesinde, V kadar aşınma hacminin A_f gerçek değme alanı ile orantılı olarak meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır. Holm denklemi olarak bilinen bu denklem,

$$A_f = \frac{F_n}{P_{p1}} \quad (2.5)$$

olmak üzere,

$$V = K \cdot A_f \cdot L = \frac{K \cdot F_n \cdot L}{P_{p1}} \quad (2.6)$$

şeklinde düzenlenmektedir. Burada;

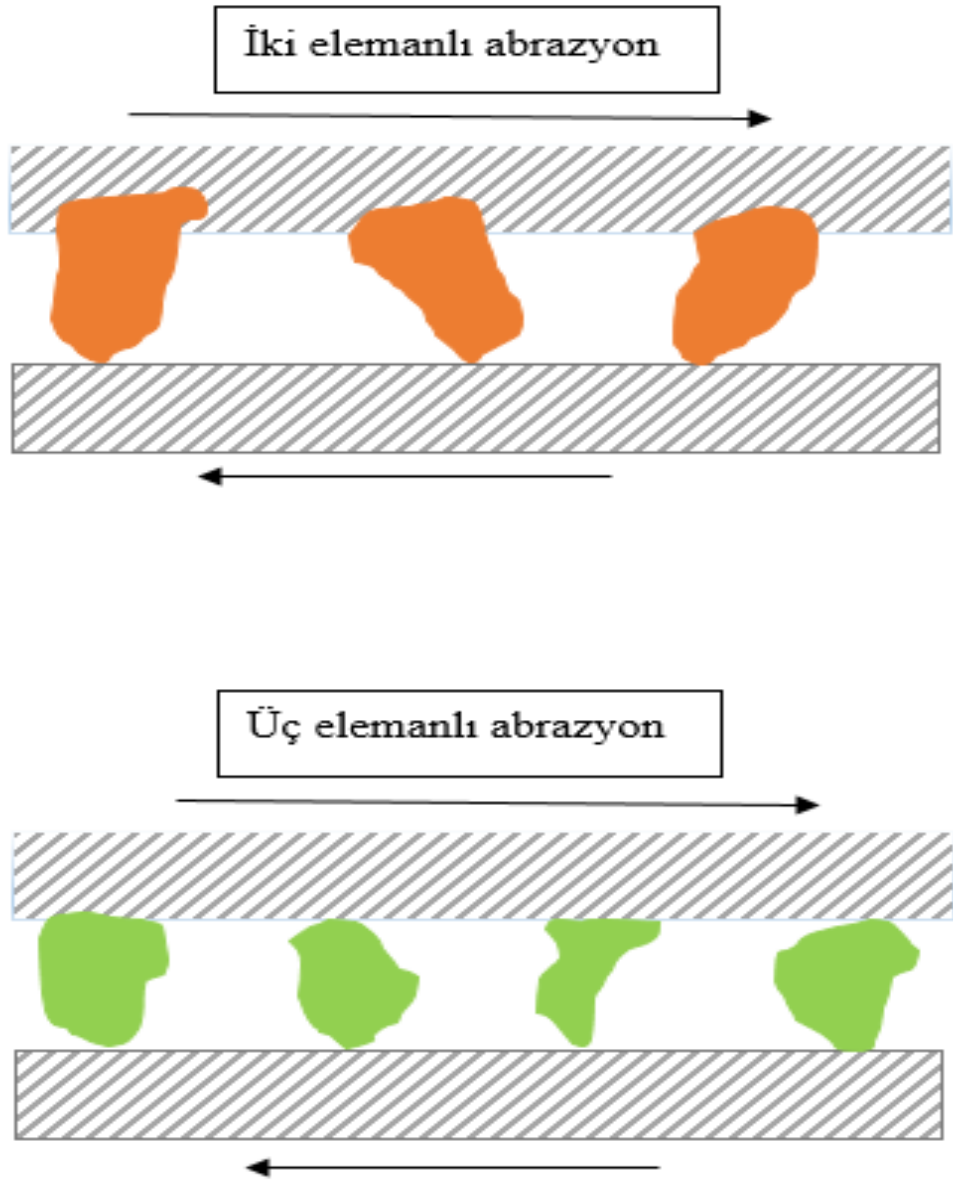
K :Her biri temas eden yüzeyden ayrılan atom sayısı,

L :Sürtünme mesafesini göstermektedir (Archard 1980; Yıldız 2006).

Adeziv aşınmayı önlemek için alınabilecek önlemler şu şekildedir (Hutchings 1992):

- **Düz yüzeyler kullanmak:** Birbiriyle temasta olan malzemeler soğuk kaynama meydana getirebilecek şekilde çıkıntılar mevcut değil ise, adeziv aşınma meydana gelme ihtimali azalacaktır.
- **Metal-metal teması önlemek:** Metal yüzeyinde kaplamalar yapmak, kimyasal filmler oluşturmak aşınmayı engeller.
- **Birbiri içerisinde çözünmeyen metaller kullanmak:** Birbiri içerisinde çözünmeyen metallerin bir arada kullanılması adeziv aşınma mekanizmasını ortadan kaldıracaktır.
- **Yağlama yapmak:** Sıcaklığın yerel olarak arttığı bölgelerde, iyi bir yağlama yapılması hem sürtünmeyi azaltabilir hem de yağlayıcı madde ile ısı uzaklaştırılması yapılabilir.

Abraziv aşınma, temasta olan yüzeyler arasında aşındırıcı sert partiküllerin bulunması durumunda meydana gelir. Bu partiküller ya sisteme dışarıdan girer ya da adeziv aşınma sonucunda kopan ürünler olarak sistem içerisinde meydana gelir. Yağlayıcı madde içerisinde bulunabilecek partiküllerde bu tip bir aşınmaya sebep olmaktadır. Ayrıca malzemelerin yüzeylerine yapışmış olan kir veya sert bir yüzey de karşı tarafta bir abraziv aşınma meydana getirir. Abraziv aşınma iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere iki şekilde meydana gelir. İki elemanlı abraziv aşınma da sürtünen yüzey çiftlerinde sert veya pürüzlü olanın diğer bir yüzeyi kazınması durumu görülür. Üç elemanlı abraziv aşınma da ise sürtünen yüzey çiftlerinin dışında üçüncü bir elemanın da serbest aşındırıcı olarak yüzeylerin arasında bulunması ve kazıyıcı etki yapması söz konusudur. Her iki durumun şematik gösterimi Şekil 2.12'de verilmiştir (Hutchings 1992).



Şekil 2.12. Abraziv aşınma türlerinin gösterimi (Hutchings 1992)

Abraziv aşınma mekanizmasında, aşındırıcı tane(parçacık), pürüzün boyutu ve şekli, atak açısı, sertlik, uygulanan normal kuvvet, kaymanın meydana geldiği hız ve malzemelerin kırılma tokluğu gibi temel faktörler etkilidir. Hutchings'e göre, abraziv aşınma plastik deformasyon ve gevrek kırılma olmak üzere iki şekilde meydana gelir. Birinci durumda malzeme kaybı özellikle metaller gibi yüksek kırılma tokluğuna sahip olan malzemelerde

plastik deformasyon ile meydana gelir. Bu durumda birinci derece önemli olan faktör malzemenin sertliğidir ve hacimsel olarak malzeme kaybı;

$$V = K \cdot \frac{F_n \cdot L}{H} \quad (2.7)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Bu belirtilen denklem adeziv aşınma ile verilen denklem ile aynıdır. Farkı sadece K sabitinde ortaya çıkmaktadır. İkinci durumda malzeme kaybı, özellikle seramikler gibi düşük kırılma tokluğuna sahip malzemelerde gevrek kırılma sonucunda meydana gelmektedir. Bu durumda birinci derecede önemli faktör kırılma tokluğudur (Hutchings 1992).

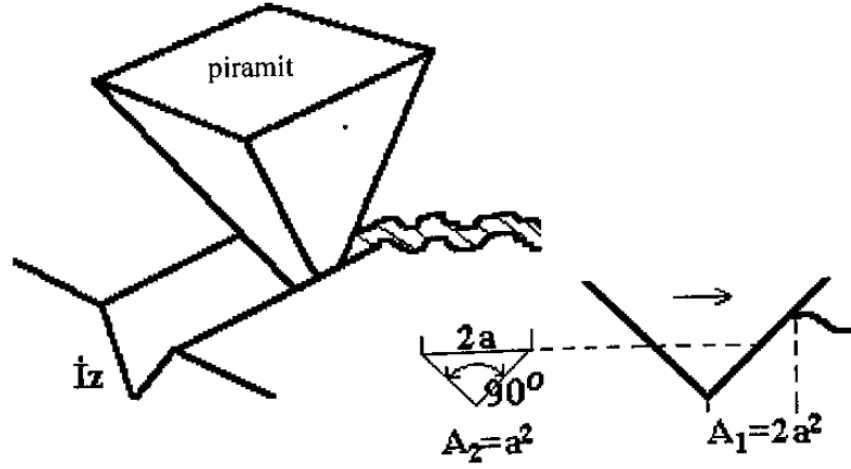
Bowden ve Tabor Şekil 2.13’de görüldüğü gibi bir partikülün ya da sert bir malzemenin yüzeyindeki pürüzün yumuşak olan malzemeye batması ve bunun üzerinde bir sürme hareketi yapması durumunda pürüzün her cm kayma hareketi için oluşturduğu oyuğun hacminin,

$$V = \frac{F_n}{2 \cdot P_{p1}} \quad (2.8)$$

ayrıca aşınma direncinin,

$$R = \frac{2 \cdot P_{p1}}{F_n} \quad (2.9)$$

olduğunu göstermişlerdir (Matuschka 1980).



Şekil 2.13. Sert piramit pürüzün metalin yüzeyinden kaldırdığı aşınma ürünü (Matuschka 1980)

Abrasif aşınmanın engellenmesi ya da en uygun değer değere indirilmesi için;

- Yüzey sertliğini artırma
- Abrasif parçacıkları uzaklaştırma
- Aşınma parçaları değiştirme gibi yöntemler kullanılabilir (Demir 2012).

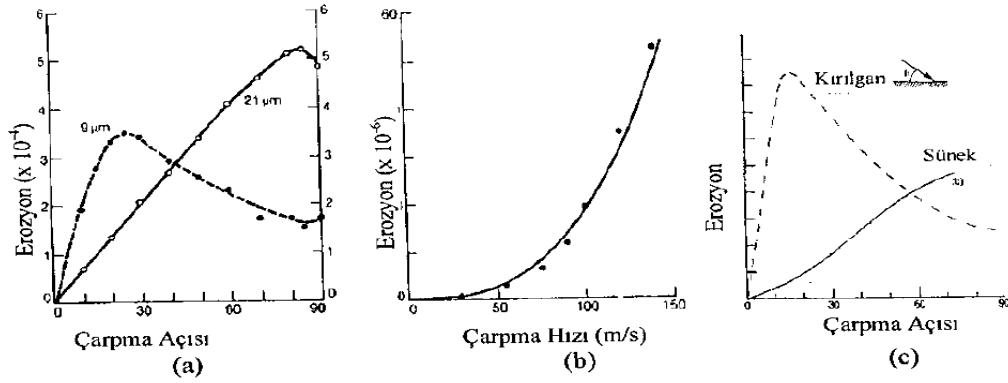
Eroziv aşınma, abrazif aşınma ile birçok yönden benzerlik göstermektedir. Eroziv aşınmanın üç elemanlı abrazif aşınmadan farkı, abrazif aşınmada mekanizma sert partikülün yüzeyi kazınması ile gerçekleşmesine rağmen eroziv aşınma da sert partikülün yüzeye çarpması sonucu meydana gelmesidir. Eroziv aşınma, aşındırıcı partiküllerin taşındığı veya aşındırıcı partiküllerin olduğu ortama bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlar;

- Katı partiküllerden oluşan erozyon,
- Kavitatif erozyon,
- Akışkanların meydana getirdiği erozyon,
- Kıvılcım erozyonudur (Budinski 1988; Soydan ve Ulukan 2013).

Bu eroziv aşınma mekanizmalarından en etkili olan katı partiküllerinin oluşturduğu eroziv aşınma mekanizmasıdır. Eroziv aşınma mekanizması üç ana grup altında incelenir. Bunlar;

- Aşınmaya maruz kalan elemanın özellikleri: Elemanın sertliği, kırılma tokluğu, yüzey kalitesi, artık gerilme durumu ve sertlik dağılımı.
- Aşındırıcı partikül özellikleri: Aşındırıcı elemanın şekli, boyutu, sertliği, sünekliği ve kırılma tokluğu.
- Aşınmanın meydana geldiği ortamın özellikleri: Partikülün çarpma hızı, çarpma açısı ve birim zamanda çarpma meydana getiren partikül sayısı şeklinde açıklanabilir (Soydan ve Ulukan 2013).

Bu üç gruba ayrılmış parametrelerin etkileri izafi olarak farklılıklar gösterebilir. Şekil 2.14'de bu parametrelerden bazılarının etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Parametrelerin eroziv aşınmaya etkisi

a. aşındırıcının çarpma açısı ve malzemenin süneklik veya gevreklik durumu b. aşındırıcının çarpma hızı c. aşındırıcı boyutunun eroziv aşınmaya etkisi (Buckley 2000; Hutchings 1992)

Eroziv aşınma için aşınma oranı,

$$e = K.A.I \quad (2.10)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada;

K: deneysel katsayı

A: çarpma açısı fonksiyonu

I: akış yoğunluk fonksiyonudur (Soydan ve Ulukan 2013).

Pulcuk kalkması aşınması, daha çok yuvarlanma sürtünmesine maruz kalmış noktasal veya çizgisel temas halindeki çok küçük temas alanlarına sahip olan yüzey çiftlerinde görülmektedir. Genel olarak görünüşü, yüzeylerden küçük küçük pulcuk veya parçacıkların kalkarak çukurların meydana gelmesi şeklinde olmaktadır. Genel olarak dinamik zorlamaların etkisi ile oluşan malzeme yorulması sonucunda meydana gelmektedir. Yani belirli bir yükün tekrarı sonucunda meydana gelir. Dubley, dişlilerde pulcuk kalkmasının oluşması için en az 100000 yük tekrarının meydana gelmesi gerektiğini ileri sürmüştür (Soydan ve Ulukan 2013).

Şekil 2.15’de iki silindirin birbirine değme hali verilmiştir. Hertz teorisine göre, değme bölgesinde maksimum bir basınç ve malzemenin içerisinde maksimum bir kayma gerilmesi meydana gelir. Hertz’in teorisine göre, temas noktasındaki şekil değiştirme alanının genişliği olan $2a$, r_1 ve r_2 silindir yarıçaplarına göre oldukça küçük olduğu ve temas noktasında hiçbir kayma olmadığı şekil değişiminin ise elastik bölgede kaldığı varsayılmaktadır. Yüzeylerde oluşan maksimum basınç;

$$p_0 = \frac{3.F_n}{2.\pi.a^2} \quad (2.11)$$

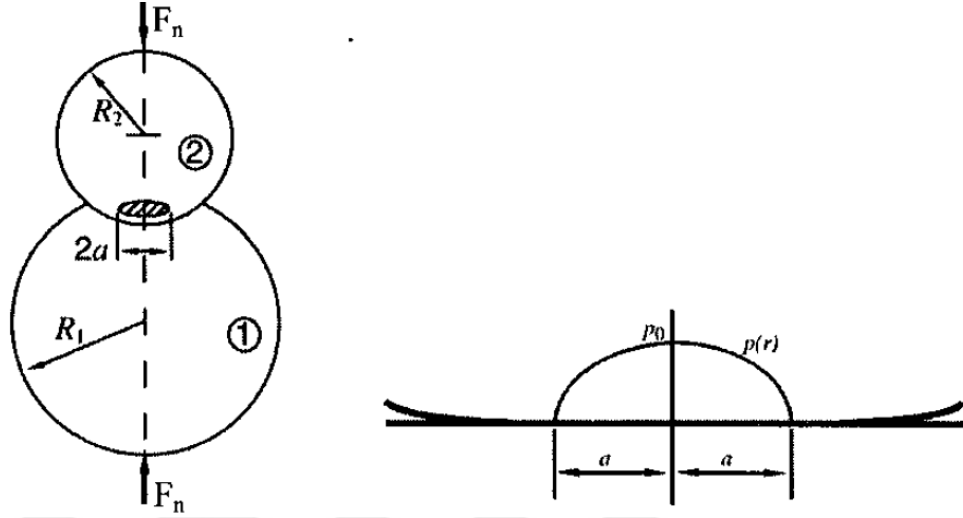
olmaktadır. Temas bölgesinde elastisitemodülü;

$$\frac{1}{E^*} = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. Temas genişliği ise;

$$a = \left(\frac{3.F_n.R}{4.E} \right)^{1/3} \quad (2.13)$$

şeklinde gösterilmektedir (Bhushan 2000; Soydan ve Ulukan 2013).



Şekil 2.15. Küresel iki pürüzün değme durumu

a. iki küre elastik temas durumunda b. temas sonucunda oluşan yarı eliptik basınç dağılımı (Hutchings 2017)

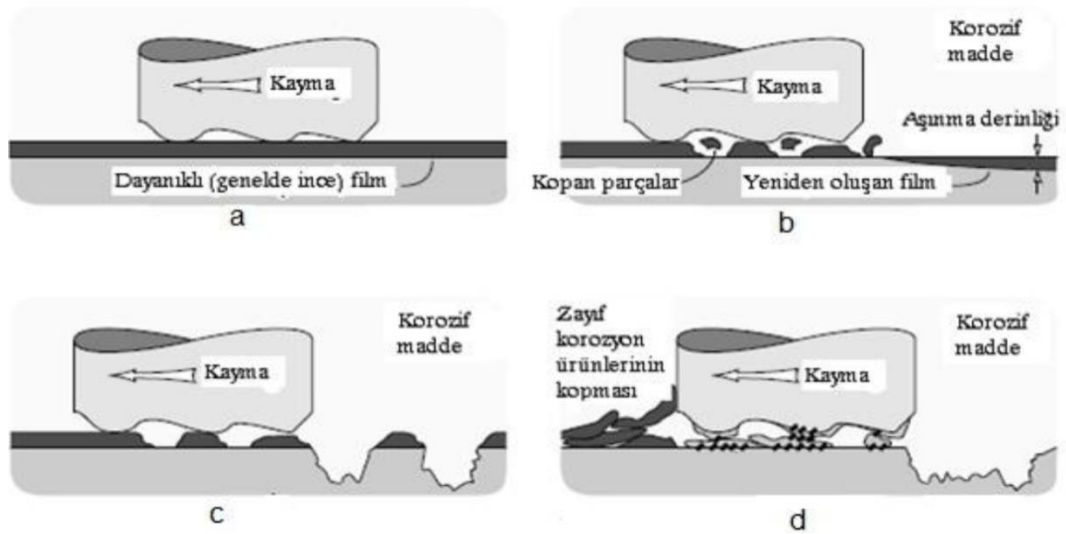
Fink'e göre, pulcuk kalkması olayı esas olarak sürtünme oksidasyonuna bağlıdır. Çok küçük temas alanlarında oluşan yüksek hertz gerilmeleri özellikle malzeme yüzeyinin altındaki maksimum kayma gerilmesi, o bölgede plastik şekil değişimi meydana getirerek bölgede kimyasal olarak aktifleşme sağlamakta ve difüzyon yolu ile yüzeyden içeriye nüfuz eden oksijen ile oksit tabaka oluşmaktadır. Oksidin büyük çentik etkisi ile olay ilerlemekte ve mevcut hacim büyümesi sonunda üstteki zar patlayarak çukurcuklar oluşmaktadır. Cameron ve Dubley ise maksimum Hertz gerilmeleri ve yüzeydeki kayma olayına bağlı olarak meydana gelen kuvvetler sonucunda dış yüzeyden içeriye doğru ince çatlaklar oluşmakta ve bu çatlağın olduğu bölgede basınçlı bir şekilde etki eden yağın yüzeyden pulcukların kalkmasına neden olduğunu ileri sürmektedirler (Soydan ve Ulukan 2013).

Koroziv aşınma, özellikle sıvı ve gaz gibi akışkanların bulunduğu ortamda meydana gelmektedir. Malzeme yüzeyinde kimyasal ya da elektrokimyasal etkiler ile reaksiyon ürünleri oluşur. Eğer oluşan bu ürünler malzeme yüzeyine yapışır ve malzeme gibi

davranırsa, aşınma mekanizması tıpkı ana malzemenin aşınma durumu gibi olabilmektedir (Bhushan 2000; Bhushan 2001).

Şekil 2.16'da gösterildiği gibi eğer bir malzeme yüzeyinde tabaka oluşacak şekilde korozyona uğramış durumda ise ve malzeme yüzeyi üzerinde kayabilen bir başka cisimle temas halinde ise aşağıda belirtilen dört durumdan herhangi biri ortaya çıkmaktadır:

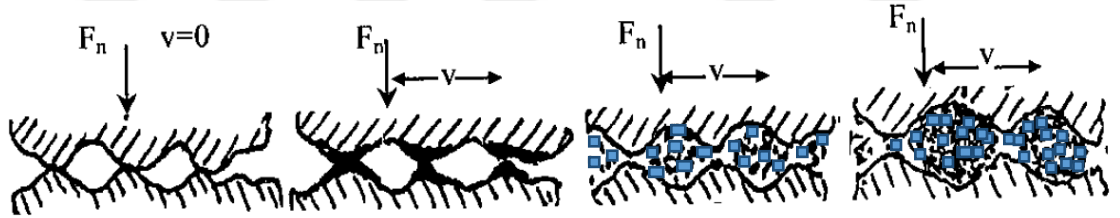
- Dayanıklı bir yağlayıcı katman meydana gelir. Bu tabaka hem aşınmayı hem de korozyonu önler.
- Koruyucu yüzey filmi pitting gibi herhangi bir nedenle aşınabilir. Geriye kalan film parçası ile ana malzeme arasında bir galvanik pil teşekkül eder. Bu durumun sonucu olarak da yüzeyde hızlı bir şekilde aşınma meydana gelir.
- Temas eden yüzeylerin birbirini üzerinde kayması durumunda kısa ömürlü ve de dayanıksız bir film tabakası meydana gelir. Bu filmin hasar görmesi ile oldukça yüksek miktarda aşınma meydana gelir.
- Aşınma ve korozyon mekanizmaları ayrı ayrı etki ederler ve bu her iki mekanizmanın da oluşturabileceği aşınmanın toplamı kadar aşınma meydana gelir (Stachowiak *et al.* 2005).



Şekil 2.16. Koroziv madde ve aşınma yüzeyleri arasındaki model

a. adeziv aşınma önlenmiş, b. temas eden yüzeyler sonucunda film de hasar oluşmuştur ama adeziv aşınma önlenmiş c. aşınan film üzerinde oyuklar meydana gelen çözülme sonucunda yoğun korozyon (Bhushan 2001)

Sürtünme oksidasyonu, hem koroziv aşınma hem de mekanik aşınmanın birlikte olduğu bir durumdur. Genellikle sürtünme oksidasyonu, yeterince sıkı olmayan mil göbek geçmelerin yüzeylerinde meydana gelmektedir. Birbirine temas eden az pürüzlü yüzeylerin arasında 0.2 mm'den daha küçük bir titreşim genliğinin oluşması sonucunda sürtünme oksidasyonu meydana gelir. Sürtünme oksidasyonu olayı kuru ve az yağlı yüzeylerde görülmektedir. Eğer yüzey kuru ise ve birbirine yeterli sıkılıkta geçmemiş yüzey çiftleri mevcutsa küçük genliklerde titreşim hareketi sonucunda yüzeyde koyu kırmızı bir tabaka oluşmaktadır. Zamanla bu tabaka yerel olarak kalınlaşarak yüzeylerde bozulmalar meydana getirir. Böylece çatlamlar ve kırılmalar meydana gelir. Şekil 2.17'de birbirine temas eden tepecikler yük etkisi ile elasto-plastik şekil değişimine uğramakta ve küçük genlikte kayma titreşimi yapmaları halinde yüksek lokal sıcaklıklar ve ortamdaki oksijen etkisi ile yüzeyler arasında ince bir oksit film oluşur. Değişen yükler yön ve kuvvetlerin etkisi ile bu tabaka parçalanmakta ve oksit filmi ufak tozcuğ haline gelmektedir (Soydan ve Ulukan 2013).



Şekil 2.17. Sürtünme oksidasyon mekanizması (Soydan ve Ulukan 2013)

Bazı araştırmacılar ise ilk olarak adeziv aşınma partiküllerinin meydana geldiğini, daha sonradan bunların okside olduklarını ileri sürmektedir. Fakat araştırmacılar ilk durumun daha geçerli olduğunu ispatlamışlardır. Az miktarda yağlanmış yüzeylerde de sürtünme oksidasyonu meydana gelmektedir. Ayrıca metalin yanında yağ da okside olmaktadır. Aralarında çok az da olsa bağıl hareket yapan ve oksitlenmeye uygun bütün malzeme türleri arasında sürtünme oksitlenmesi meydana gelmektedir. Özellikle alaşımlı ve alaşımsız çeliklerde ortam koşulları müsait olduğunda bu aşınma türü daima gözlenmektedir (Hallings 1975; Takadoum 2013; Soydan ve Ulukan 2013).

Fink, temas halinde bulunan ve birbiri üzerinde kayan veya yuvarlanan yüzeylerde küçük temas alanlarında plastik deformasyonlar olduğunu ileri sürmüştür. Oluşan bu plastik deformasyon sonucunda malzemenin kristal kafesinin bozulduğunu ve buna da bağlı olarak malzeme yüzeyi kimyasal bakımdan aktifleştğini ileri sürmüştür. Malzeme, ortamda bulunan oksijen ile reaksiyona girmektedir. Böylece oksit tabakası meydana gelmektedir. Hareket devam etmesi sonucunda oksit tabakası kırılmakta ve oksit partikülleri düşerek aşınma ürünlerini meydana getirmektedir (Fink 1962).

Yorulma aşınması, tekrarlı sürekli veya değişken yükler altında makine parçalarının yüzeylerinin alt bölgelerinde çatlaklar meydana gelmektedir. Bu yorulma çatlakları zamanla ilerlemektedir ve böylece malzeme yüzeyinden partiküllerin kopmasına sebep olmaktadır. Genellikle yuvarlanma hareketi olan dişli çark, kam veya rulmanlarda görülmektedir (Boz 2003; Sarıkaya 2007; Kurt 2010).

2.3.2. Aşınmaya etki eden faktörler

Aşınma mekanizmalarının oluşmasının en önemli nedenlerinden biri malzeme seçimidir. Doğru bir şekilde malzeme seçimi yapılmadığı takdirde istenilen şekilde performans elde edilemeyecek ve kayıplar meydana gelmektedir. Temas eden yüzeylere uygulanan yük ile aşınma doğru orantılı olarak artar. Temas halinde bulunan malzemelerin sürtünme mesafesinin artması aşınma miktarının da zamana bağlı bir şekilde artış meydana getirir. Yağlama aşınmanın önlenmesini sağlayan en önemli parametrelerdendir. Yüzeylerin birbirine teması önleyerek aşınma miktarı da azaltılır. Ortamdaki basınç, sıcaklık, nem gibi parametrelerin aşınma üzerinde etkisi vardır. Bu çalışmada, yüzey ve yüzey işlemlerinin etkisi üzerinde durulmuştur.

Yüzey ve yüzey işlemlerinin etkisi: Yüzey sertliği aşınma miktarı üzerinde etkisi oldukça fazladır. Aşındırıcı malzemenin sertliği ne kadar fazla olursa aşınan malzemeden malzeme koparmak o kadar fazla olur. Yüzey pürüzlülüğünün de aşınma üzerinde etkisi vardır. Eğer temas eden yüzeyler çok temiz ise yüzeylerin arasında soğuk kaynama

meydana gelir. Yüzeyler çok kaba işlenmiş ise aşınmada artış meydana getirir. Genellikle yüzeyin pürüzlülüğü 10 ila 70 μm arasında olması istenir (Uzuner 2001).

Yüzeyin topoğrafyası birbirine temas eden iki malzemenin tribolojik özellikleri üzerinde önemli derecede etkiye sahiptir. Temas halinde bulunan yüzeyler arasında ideal bir düzgünlük mevcut değildir. Malzemenin üretim yöntemine, üretim teknolojisine, uygulanan yüzey işçiliğinin kalitesine, yüzey işlemine bağlı olarak değişik şekilde yüzey topoğrafyaları oluşur. Aslında, çok iyi bir şekilde yüzey işlemine maruz kalmış yüzeylerde bile mikroskopla inceleme yapılırsa tepe, çukur oluşumu gözlenir. İşte yüzeyin bu gerçek yapısına tekstür adı verilmektedir. Tekstür terimi ile pürüz terimi birbirine karıştırılmamalıdır. Tekstür, malzemenin bütünü kapsar. Pürüz ise tekstürün alt elemanı denilebilir. Yüzey tekstüründen alınacak kesitler, bu kesitlerdeki pürüz yapısını gösterir. Yüzey tekstür tasarımı, yüzey mühendisliğinin önemli bir parçasıdır. Malzemenin yüzeyinde tekstür oluşturularak yük taşıma kapasitesi, sürtünme katsayısı, aşınma oranı vb. gibi özelliklerde önemli bir derecede iyileşme sağlanabilir. Tam yağlama ya da karışık yağlama durumunda yük taşıma kapasitesinin artırılması için oluşturulan tekstür, mikro-hidrokinamik yatak görevi görerek ek olarak hidrodinamik basınç üretir. Yağlama yapılmayan kuru veya sınır sürtünme durumunda ise tekstür mikro rezervuar görevi görerek aşınma kalıntılarını hapseder (Hamilton 1966; Pattersson 2003).

İlk olarak 1966'da Hamilton ve Allen tarafından yüzeyde mikro düzensizlik oluşturma üzerinde çalışılmıştır. Hamilton ve Allen bir döner şaftın bir yüz contasının yüzeyine mikro çukurlar oluşturmuş ve contanın taşıma kapasitesini iyileştirmişlerdir. Böylece yüzey tekstürün ilk adımları atılmıştır. Yüzeyde oluşturulan mikro çukurlar yağlamanın durumuna göre, tam film veya karma yağlama durumlarında mikro-hidrokinamik bir yatak oluştururken sınır yağlama durumunda ise aşınma kalıntıları için mikro tuzak yani aşınma kalıntılarının hapsolabileceği bir yer olarak kullanılabilir. Bu tip mikro yapılar uygun bir şekilde tasarlanırsa yüzeylerin yük taşıma kapasitesinde, aşınma ve sürtünme özellikleri gibi tribolojik özelliklerinde iyileşme meydana getirir (Joshi *et al.* 2018).

2.4. Yağlama

Birbirine sürtünen yüzeyler arasında meydana gelen adeziv bağlar ve bunlarda oluşan kesilme direnci sürtünme direncinin en önemli parametreleridir. Temas eden yüzeylere ya da bu yüzeyler arasına adezyonu azaltacak iç sürtünme direnci düşük maddeler ilave edildiğinde sürtünme direnci önemli bir derece de azaltılmaktadır. Birbirine göre izafi olarak hareket eden yüzeyler arasında sürtünme direncini azaltmak ve aşınma miktarını azaltmak için ilave edilen katı, sıvı, gaz halde bulunan maddelere yağlayıcı adı verilmektedir. Ayrıca temas halinde bulunan malzemeler arasında meydana gelen sıcaklık artışı da yağlama sayesinde önlenebilmektedir (Halling 1975).

Bir maddenin yağlayıcı olarak tanımlanabilmesi için şu özelliklere sahip olmalıdır:

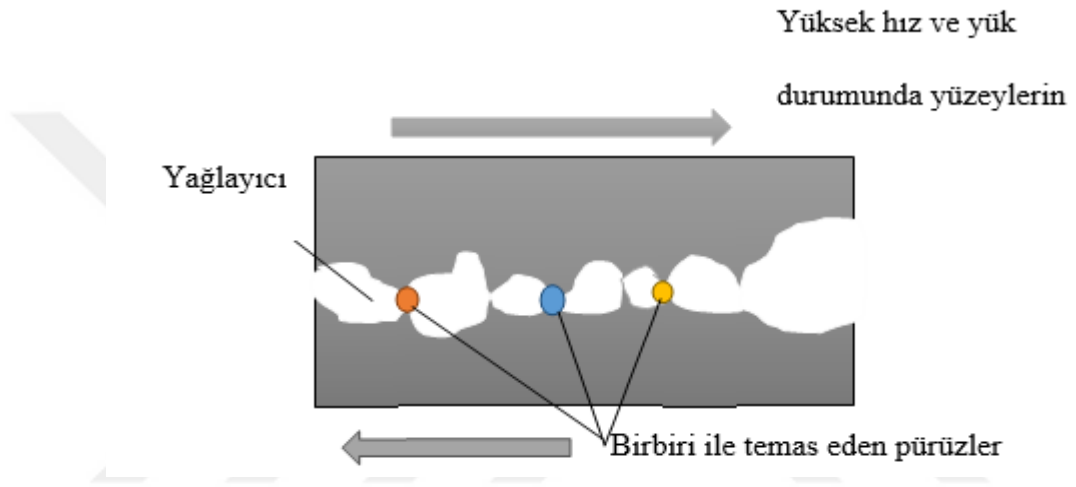
- Yüzeyleri kimyasal olarak etkileyip bozmaması gerekir.
- Korozyonu engellemesi gerekir.
- Sıcaklığa ve atmosfer şartlarına karşı dayanıma sahip olması gerekir.
- Çalışma bölgesinden ısıyı uzaklaştırabilmesi gerekir.
- Temas eden yüzeylere kuvvetli bir şekilde tutunma kabiliyetine sahip olması gerekir.
- İstenildiği durumlarda yüzeyleri ıslatma ve zararlı olan partikülleri uzaklaştırması gerekir (Soydan ve Ulukan 2013).

2.4.1. Yağlama türleri

Birbiri ile temas halinde olan cisimlerin temas şartlarına ve yağlayıcı olarak kullanılan malzemenin fiziksel şartlarına göre yağlama türleri değişmektedir. Genel olarak yağlama; sınır yağlama, hidrodinamik yağlama ve elasto-hidrodinamik yağlama olmak üzere üç bölümde incelenmektedir.

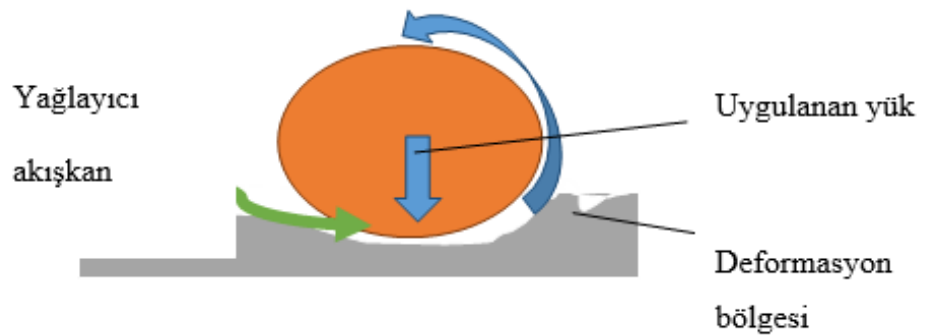
Sınır tabaka yağlamasına ince film yağlaması da denilmektedir. Birbirine temas eden malzemelere uygulanan yükün artması veya yağlayıcının fiziksel özelliğinin değişmesi

gibi durumlar sonucunda yağ filminde incelme meydana gelir. Böylece yağ filmi bazı noktalardan kopmaya başlar. Yağ filminin kopması sonucunda birbirine temas halinde olan malzemelerin yüzeylerindeki çıkıntılar da direk olarak birbiri ile temas eder. Yani yağ filmi görevini yerine getiremez. Yağ filminin taşınması gereken yükü filmde çok yüzeyde bulunan çıkıntılar taşır (Beşergil 2009; Çöl 2013). Şekil 2.18’de sınır tabaka yağlaması durumunda teması ifade eden bir şekil verilmiştir.



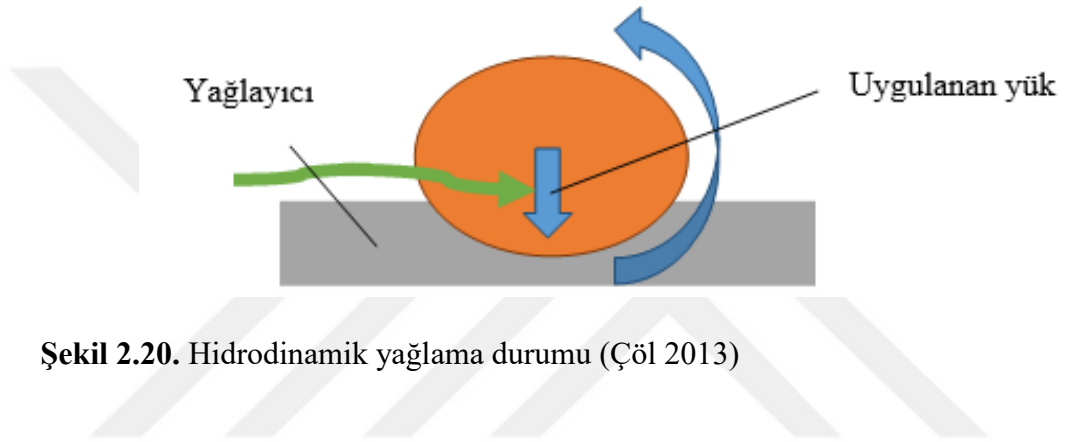
Şekil 2.18. İnce film (sınır tabaka) yağlaması durumu (Çöl 2013)

Elasto-hidrodinamik yağlama (Şekil 2.19), yüzeylere uygulanan yükün yüzeylerden çok aradaki yağlayıcı tarafından karşılanması sonucunda yağ filminde yüzeylerden daha fazla kayma gerilmesi meydana gelir. Böyle bir durum meydana gelmesi ise yağ filminde kopmaya sebep olur ve yüzeylerde temastan dolayı deformasyon oluşur (Beşergil 2009).



Şekil 2.19. Elasto-hidrodinamik yağlama durumu (Çöl 2013)

Hidrodinamik yağlama (Şekil 2.20), birbirine temas eden malzemelerin arasında sürekli bir yağ filminin var olduğu durumu ifade eder. Yağ filmi her iki yüzeyde de sürekli bir şekilde temas halindedir. Malzemelerin herhangi bir noktasında temas yoktur. Bu nedenle yüzeylerde herhangi bir deformasyon meydana gelmez. Yağın viskozitesinin artırılması ile yağ filminin kalınlığı da artar. Yüzeyleri birbirine temasa zorlayan kuvvetin artması durumunda ise yağ filminin kalınlığında düşüş meydana gelir (Beşergil 2009).



Şekil 2.20. Hidrodinamik yağlama durumu (Çöl 2013)

2.4.2. Stribeck eğrisi

Sürtünen yüzeylerin arasına herhangi bir yağlayıcı madde girmesi durumunda kuru sürtünme hali devre dışı kalmaktadır. Artık bu duruma sınır sürtünmesi ya da film sürtünmesi denilmektedir. Yüzeyler arasında yağlayıcı madde bulunması durumunda sürtünme direncinin azaldığı deneysel olarak bilinmektedir. Stribeck tarafından 1901 yılında yayınlanan bir çalışmada radyal kaymalı yatağın sınır, kuru ve sıvı sürtünmesi şeklinde üç farklı şekilde sürtünme durumunda çalışabileceğini belirtmiştir. Milin hızı sıfır veya sıfıra yakın değerlerdeyken yüzeyler arasında metelsel bir değme mevcuttur. Bu aşamadaki sürtünme direncinin büyüklüğünü birbirine temas eden malzemelerin pürüzlülüğü belirler. Mil hızı arttıkça sürtünme katsayısında azalma meydana gelir ve belirli bir minimumdan geçtikten sonra da tekrar artış gösterir. Minimum değerinde kalan bölgedeki yüzeyler birbirinden kesintisiz bir yağ filmi ile ayrılmıştır. Bu durumdaki sürtünme direncini, hız ve yağın fiziksel özellikleri belirler. Stribeck tarafından tanımlanan bu dar kaymalı yatakların yüksek hızlarda daha iyi sürtünme özelliği

göstermesi günümüzde de modern test teknikleri ile deneysel olarak kanıtlanmış olan önemli bir özelliktir (Soydan ve Ulukan 2013).

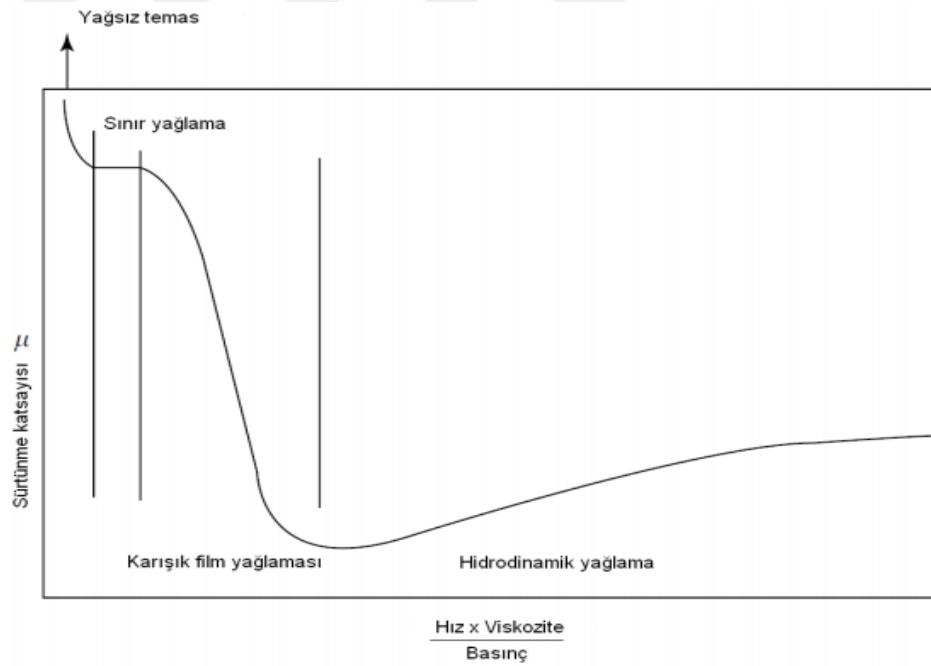
Stribeck yasasına göre, aşağıdaki verilen formül hidrodinamik şartlarda yağlama sınırlarını vermektedir (Çöl 2013).

$$\log U + \log v - \log W = \text{sabit} \quad (2.14)$$

U: Yüzeylerin birbirine izafi hızı (m/s)

v: Kinematik viskozite (m²/s)

W: Yük (N)

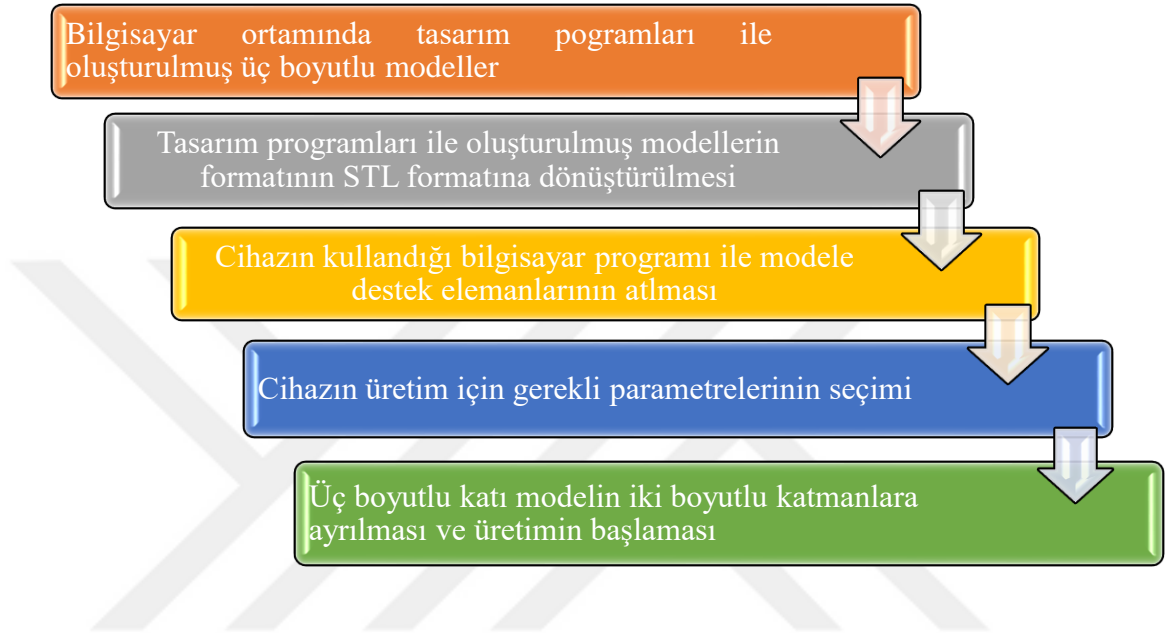


Şekil 2.21. Stribeck eğrisinin genel biçimi (Çöl 2013)

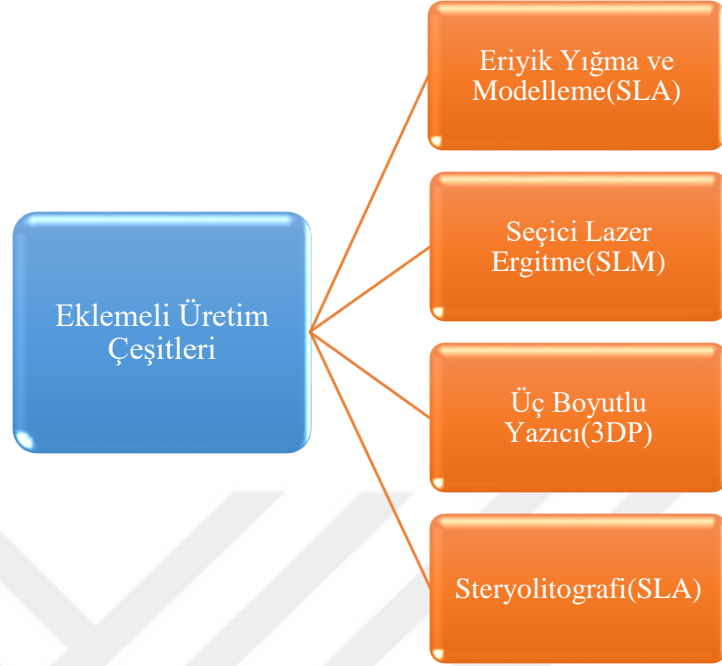
2.5. Eklemeli Üretim Yöntemleri

Eklemeli üretim yöntemi, bilgisayar ortamında tasarım programları ile oluşturulmuş geometrilerin, üretim yapılan makine içerisinde bulunan levha üzerine kullanılan tozun belli bir kalınlıkta serilerek istenilen malzemenin üretimidir. Eklemeli üretim yöntemi

kompozit, plastik, metal gibi malzemeler üretimine imkân sağlamaktadır. Şekil 2.22’de üretim aşamaları ve Şekil 2.23’de eklemeli üretim yöntemleri gösterilmiştir (Anonymus 2018; Turalıoğlu 2018).



Şekil 2.22. Eklemeli üretim kademeleri (Turalıoğlu 2018)



Şekil 2.23. Eklemeli üretim çeşitleri (Turalıoğlu 2018)

2.5.1. Eriyik yığıma ve modelleme (SLA)

Bu üretim yönteminde, malzemeler üretilirken yığıma sırasında ergitme işlemi kullanılarak oluşturulur. Bu yöntem kompozit, polimer, seramik ve metalik malzemelere uygulanmasına rağmen genellikle metal tozu kullanılarak üretim yapılır. Bu üretim yönteminde, toz malzemeyi ergitmek için lazer veya elektron ışını kullanılır ve ekstrüzyon işlemine benzer şekilde bir üretim ile üç boyutlu parçalar oluşturulur.

2.5.2. Üç boyutlu yazıcı (3DP)

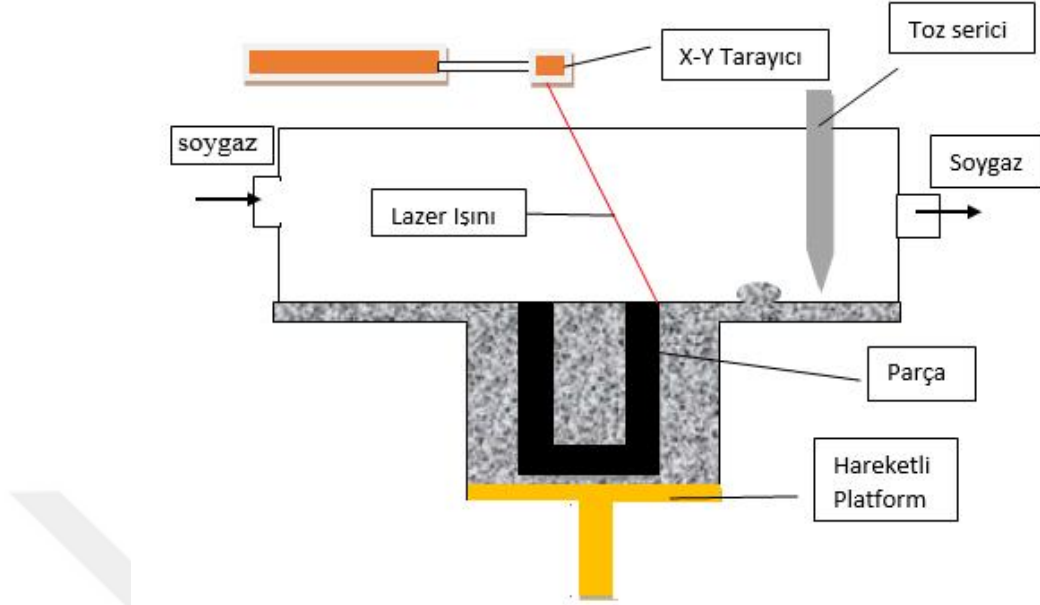
Üç boyutlu yazıcı üretiminde, toz serme aparatı ile toz plak üzerine ince bir şekilde serilir. Çok ağızlı nozullar sayesinde verilerden gelen belli sınırlara göre yapıştırıcı püskürtme işlemi yapılır. Böylece tutunma artırılır (Turalıoğlu 2018).

2.5.3. Stereolitografi (SLA)

Işığa karşı duyarlı ve sıvı fotopolimerik reçine ultraviyole ışın kaynağı ile belirlenmiş olan konumlarda katılma meydana getirir. Belirlenmiş olan bu sınırlar iki boyutlu katmana ait olan sınırlardır. İlk aşamada belli bir katman ultraviyole ışın kaynağı ile tarandıktan sonra, katılmış tabaka aşağı doğru çekilir ve yeni katman aynı şekilde devam ettirilerek üretilir. İşlem sonlanana kadar bu şekilde devam eder (Turalıoğlu 2018).

2.5.4. Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM)

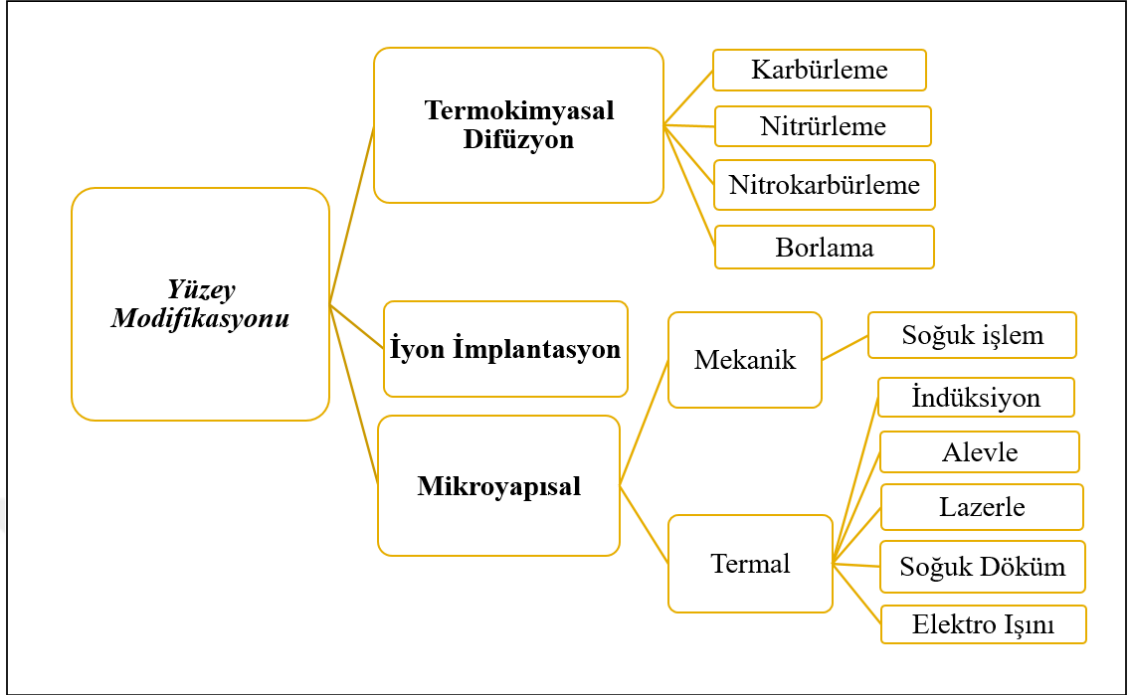
Seçici lazer ergitme yöntemi medikal, otomotiv, askeri savunma ve havacılık gibi pek çok alanda kullanımı olan bir üretim yöntemidir. Öncelikle üretilmesi istenilen parçanın hangi malzemeden olması isteniyorsa o malzemenin tozu, toz odasına üretilecek katman kalınlığına uygun bir şekilde doldurulur. Daha sonra üst seviyeye getirilir. Ayrıca toz odasının ikinci bölmesine artmış olan tozu toplasın diye ayrıca bir hazne yerleştirilir. Çünkü toz, eleme işlemi gerçekleştirildikten sonra tekrar kullanılabilir. Seçici lazer ergitme yönteminde kullanılan tozlar, üretilecek parçanın geometrisine göre serme aparatı ile platform üzerine serilir. Ardından 100-400 W güce sahip olan yüksek voltaja sahip bir lazer ile ergitme işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra bir katmanı üretecek şekilde katılır. Platform bir katmanın kalınlığı kadar aşağı indirilir. Tekrar toz serme aparatı ile toz serme işlemi gerçekleştirilir. Bu şekilde üretim tamamlanana kadar devam edilir. Genel olarak bu üretim sürecinde azot gazı yada argon gazı gibi soy gaz bulunan bir ortamda gerçekleşir. Gaz kullanımının sebebi hem lazerin odaklanmasının sağlanması hem de oksidasyon oluşmasına engel olmaktır. Şekil 2.24'de seçici lazer ergitme yönteminin şematik olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.24. Seçici lazer ergitme yönteminin şematik olarak gösterimi (Anonim 2018)

2.6. Yüzey İşlemleri

Günümüzde kullanılan makine elemanlarından belli fonksiyonları yerine getirmesi beklenir. Fakat bu fonksiyonları yerine getirirken elemanların yüzeyleri iç kısımlarından daha fazla gerilme ve aşınma gibi etkilere maruz kalır. Maruz kaldığı bu etkiler sonucunda malzemenin dayanım sınırı aşılsa, malzemenin yüzeyinde hasar meydana gelmeye başlar. Bu sebeple, malzeme yüzeyinde dayanımı artırmak için bazı yüzey işlemleri yapılır. Son yıllarda yüzey mühendisliğinde meydana gelen gelişmeler, yeni ve değişik yüzey modifikasyonlarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Genel olarak yapılan yüzey işlemleri, malzemenin yüzey sertliğini, aşınma direncini, korozyon direnci, yorulma dayanımı gibi etkileri artırmak için yapılır. Şekil 2.25’de yüzey modifikasyonunun sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.25. Yüzey Modifikasyonu sınıflandırılması (Kovacı 2016)

2.6.1. Plazma ile yüzey işlemi

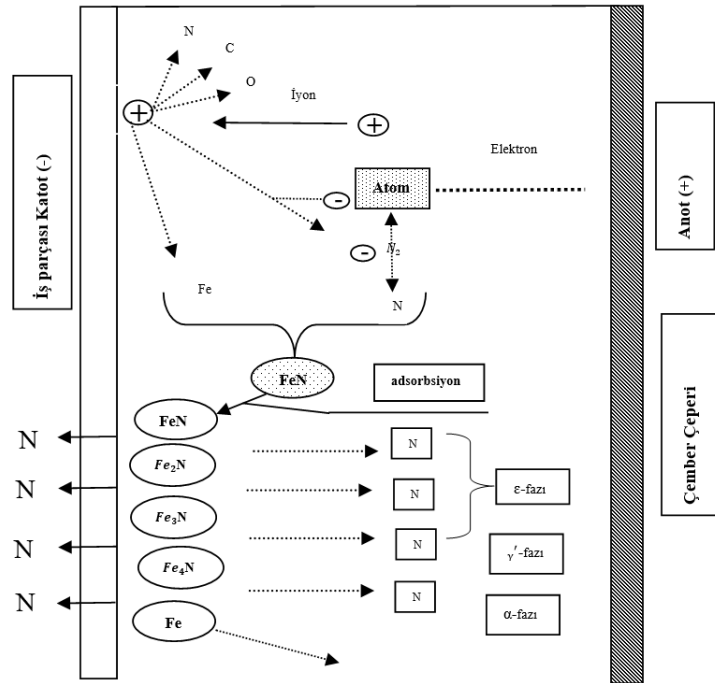
Plazma hali, pozitif ve negatif iyonlar, elektronlar, atomlar, moleküller, fotonlar ve radikallerin bir kısmını veya tamamını içeren yüklü, uyarılmış ve nötr parçacıkların tamamından oluşan maddenin en yüksek enerji konumuna sahip ayrıca gaz halindeki bir maddeye enerji verilerek elde edilen bir hali olarak tanımlanmaktadır (Rauscher *et al.* 2010).

Gaz fazında bulunan bir maddeye ısı verilerek (termal), sıkıştırma işlemi yapılarak (mekanik), elektron tatbiki edilerek, elektron boşalması gibi birçok yöntemle plazma hali elde edilebilir (Bayrak 2007).

Şekil 2.25’de verilen sınıflandırmaya göre, plazma nitrürleme işlemi termokimyasal bir olaydır. Nitrürleme olayı, malzemenin yüzeyine azot difüzyonunun sağlanması ile yüzeyin sertleştirilme işlemidir. Plazma nitrürleme işlemi, sertliği ve ayrıca demir ve demir dışı malzemelerin yorulma ve aşınma dirençlerini iyileştirmek için kullanılan

ekonomik bir yöntemdir (Hochman *et al.* 1988; Czerwiec 2000). Bu yöntem ilk olarak 1930'ların sonunda Berghaus'un yaptığı çalışmalar ile ortaya atılmıştır ve 1970'lerde endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Plazma nitrüleme işlemi yüksek ve düşük basınçlarda yapılabilir. Yüksek basınçta genellikle 100 ila 1000Pa basınçta ve 0,3 ila 1 kV voltajda nitrüleme işlemi yapılabilir. Düşük basınçta plazma nitrüleme işlemi genellikle 10Pa'dan daha küçük basınçlarda yapılabilir. Ancak plazma, harici bir kaynak tarafından muhafaza edilmelidir (Totten 2004). Elde edilmek istenen yüzey sertliği miktarı; işlemin süresine, sıcaklığına, taban malzeme içeriğinde bulunan alaşım miktarına ve gazdaki karışım miktarına bağlıdır (Strafford *et al.* 1994).

Plazma nitrüleme işlemi elektriksel boşalma esasına dayanarak oluşur. Elektriksel olarak iletken olan malzeme yüzeyine difüzyonla N ara yer atomu yayılmasını sağlayarak gerçekleştirilen bir işlemdir. Azotun atom çapının küçük olmasından dolayı kafes yapı içerisine nüfus etmesi kolay olur (Özdemir vd 2003).

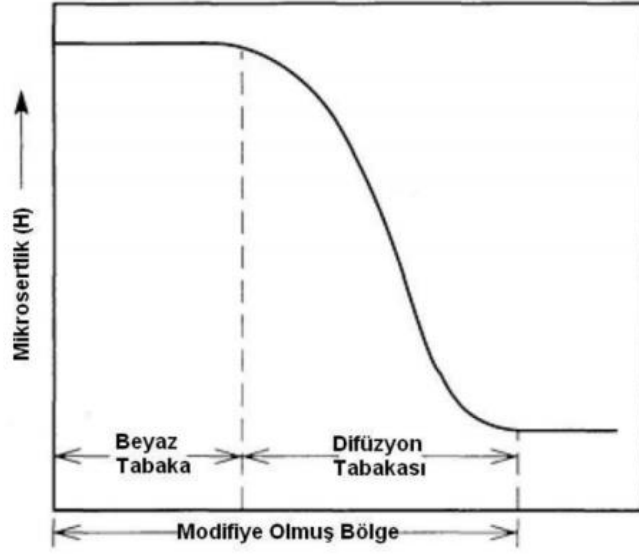


Şekil 2.26. Plazma nitrüleme mekanizması (Totten *et al.* 1997)

Şekil 2.26'da plazma nitrüleme mekanizması demir esaslı malzeme için verilmiştir. Elektriksel boşalma (glow discharge) mekanizması ile azot iyonize olur. İyonize olan azot iyonları elektrostatik alana doğru ivmelenir ve katoda bağlı olan iş parçasında bombardımana sebep olur. Malzeme yüzeyine çarpan iyonlar, yüzeyde buharlaşmaya sebebiyet verir. Böylece, malzeme (iş parçası) yüzeyinde demir ve alaşım elementleri, C, O, N gibi atomlar ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır ve saçılma işlemi gerçekleşir. Yüzeye çarpan iyonların az bir kısmı iş parçasına yayılır. Saçılan demir atomları ile N atomları, yüzeyde FeN birleşği oluşturarak malzeme yüzeyinde birikir. FeN kararsız halde bulunmaktadır. Bu yüzden yapı içerisinde Fe_2 , Fe_3 , Fe_4 gibi nitrürlere dönüşür. Bu dönüşüm sırasında serbest kalan N atomları ya metal yüzeyine yayılır yada plazmaya geri döner. Kimyasal olarak absorpsiyon olayı gerçekleşmiş olur (Edenhofer 1974; Totten *et al.* 2004; Yetim vd 2008; Yıldız vd 2011).

Nitrüleme yüzey sertleştirme işlemi ile kazanılan özellikler şu şekilde sıralanabilir (Özdemir vd 2003):

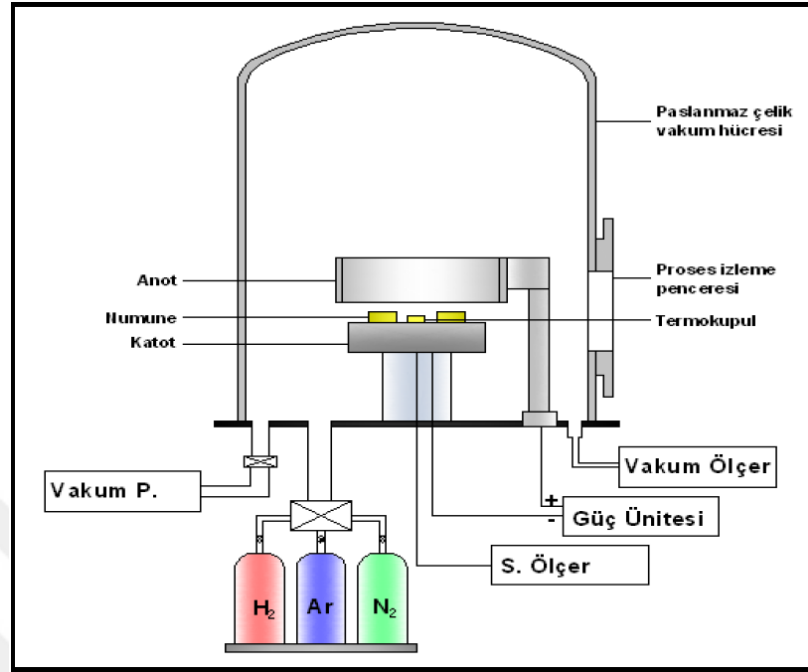
- Yüksek derecede yüzey sertliği ve aşınma direnci,
- Temperleme işlemine karşı yüksek direnç ve yüksek sıcaklık sertliği,
- Yüksek yorulma dayanımı ve düşük yorulma çentik hassasiyeti,
- Korozyon direnci,
- Yüksek boyutsal kararlılık.



Şekil 2.27. Mikrosertlik ile modifiye olmuş bölge arasındaki ilişki (Özdemir vd 2003)

Plazma nitrüleme sonrasında, en dış kısımda beyaz tabaka ve bir alt kısmında difüzyon tabakası oluşmaktadır. Beyaz tabaka kimyasal dağlama işleminden etkilenmemektedir. Genellikle farklı fazların bulunduğu bir tabakadır. Al, Cr, Mo, V, W, Ti gibi elementlerin nitrür bileşikleri bu tabakada bulunabilecek fazlardandır. Bu fazlar malzemenin yüzeyinde sertlik, mukavemet gibi özelliklerin değişmesine sebep olur. Demir esaslı malzemelerde beyaz tabaka 400°C'den daha düşük sıcaklıklarda oluşmaz ve sıcaklık arttıkça tabaka kalınlığında artış gözlemlenir (Bayrak 2007). Fakat bu tabaka içerisinde meydana gelen farklı fazlar gevrekliğe sebebiyet verebilir. Bu yüzden sıcaklığın ne kadar olduğu önemli bir parametredir. Yapılan çalışmalar tek faza sahip ve düşük kalınlığa sahip beyaz tabakanın en iyi sonuç verdiğini göstermiştir (Yetim 2009).

Beyaz tabakanın hemen altında oluşan difüzyon tabakasının kalınlığı zaman ve sıcaklıkla ilişkilidir. Bu tabaka yüzeyden taban malzemeye geçiş sağlar. Bu tabaka sert nitrür fazları içerir. Şekil 2.27'de görüldüğü gibi modifiye olmuş tabakanın cinsi ile sertlik değeri değişmiştir. Difüzyon tabakasında kalınlık arttıkça sertlik değerinde düşüş meydana gelir (Bayrak 2007). Şekil 28'de kullanılan plazma nitrüleme sistemi verilmiştir.



Şekil 2.28. Plazma nitrürleme deney sistemi (Yetim 2009)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Şekil 3.1’de bu çalışma boyunca yapılan işlemler kısaca verilmiştir.



Şekil 3.1. Yapılan çalışmaya ait iş akış şeması

3.1. Malzeme

Bu çalışmada, mikro yüzey tekstürlü yüzeyler elde etmek için seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) kullanılmıştır. Seçici lazer ergitme üretim yönteminde kullanılan toz 316L paslanmaz çelik olmakla birlikte 20mmx20mmx4mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretim yönteminde kullanılan toza ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1’de ve toza ait mekanik özellikler ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. 316L paslanmaz çelik kimyasal içeriği (Üretici firma kataloğuna göre)

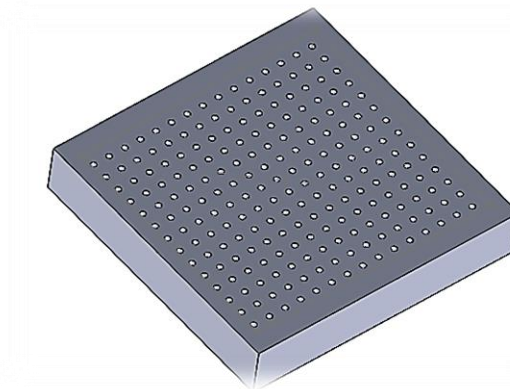
Kimyasal Bileşim	Değerler(%)
Fe	Salt çoğunluk
Cr	16,5 – 18,5
Ni	10 – 13
Mo	2 – 2,5
Mn	0 – 2
Si	0 – 1
P	0 – 0,045
C	0 – 0,030
S	0 – 0,030

Çizelge 3.2. 316L paslanmaz çelik mekanik özellikleri (Üretici firma kataloğuna göre)

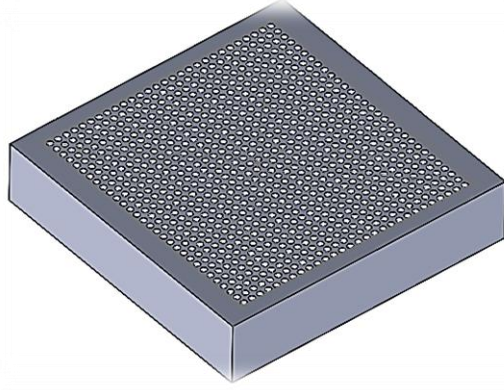
Malzeme Özellikleri	Değerler
Akma Dayanımı	470 N/mm ²
Çekme Dayanımı	570 N/mm ²
Sertlik	20 HRC / 180 HV
Elastisite Modülü	200000 N/mm ²

3.1.1. Bilgisayar destekli tasarım programı ile geometrilerin oluşturulması

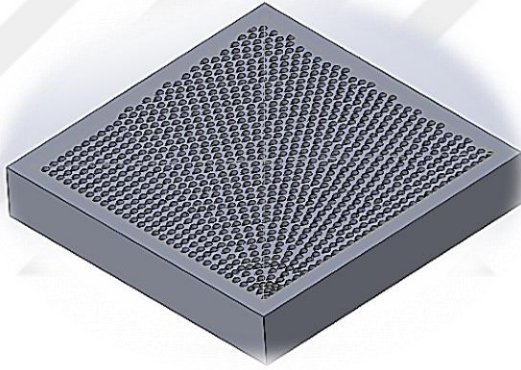
Bu çalışmada, seçici lazer ergitme yönteminde üretim yapılması için öncelikle bilgisayar destekli bir tasarım programında numunelerin çizimlerinin yapılması gerekmektedir. Çizimler için SolidWorks 2017 yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle numune üzerindeki tekstür sayısını ve geometrilerin yatay ile dikey doğrultuda aralarındaki uzaklığı belirlemek için ilk grup numunelerin çizimi gerçekleştirilmiştir. İlk grup numuneler, boşluk alanlarının numunenin tüm alanına oranının verdiği alan yoğunluğu terimine göre isimlendirilmiş ve %6,6 ve %26 alan yoğunluklu olacak şekilde numunelerin çizimi yapılmıştır. Ayrıca karşılaştırma parametresi olarak kullanılmak üzere yüzeyinde tekstür olmayan numune çizimi yapılmıştır. İlk grup numunelerin yüzeylerinde dairesel geometriler mevcuttur. Yapılan deneylere göre ikinci grup numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu numuneler %26 alan yoğunluklu olarak tasarlanmış olup üçgen, kare, elips, altıgen, üçgen ve elipsin birleşimi olan kendi tasarladığım geometri ve tasarlanan bu geometrinin örgüsünün farklı şekilde yapılmış hali olmak üzere 6 adet geometri çizimi yapılmıştır. Üçüncü grup numuneler ise ikinci grup numunelerle aynı geometride olan fakat yüzeyine plazma nitrürleme yapılmak üzere çizimi yapılmış numunelerdir. Çizimi yapılan numunelere ait özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Tasarımı yapılmış numunelerin resimleri aşağıda verilmiştir (Şekil 3.2-Şekil 3.9).



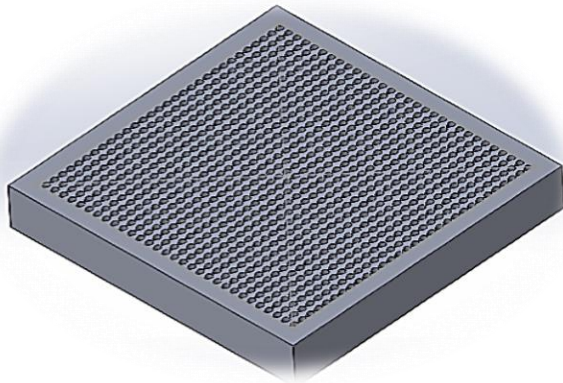
Şekil 3.2. 1. Grup %6.6 alan yoğunluğuna sahip daire tekstürlü numune



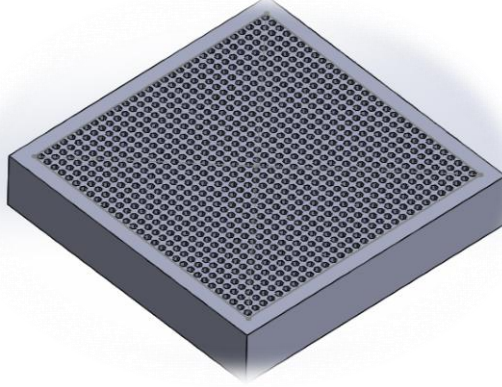
Şekil 3.3. 1. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip daire tekstürlü numune



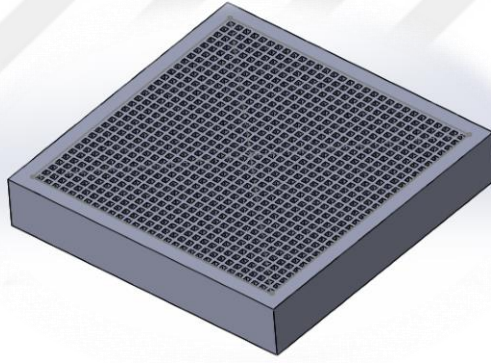
Şekil 3.4. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan yeni dağınık model



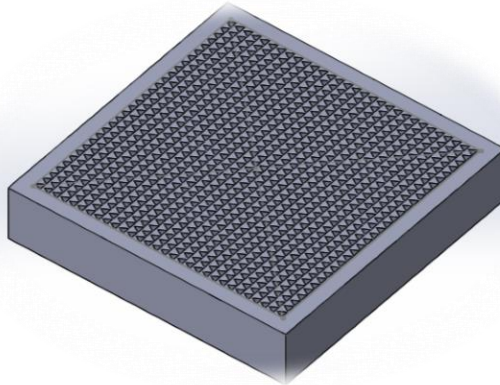
Şekil 3.5. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan elips tekstürlü numune



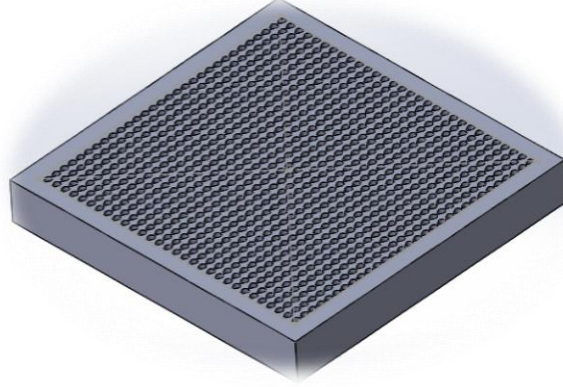
Şekil 3.6. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan altıgen tekstürlü numune



Şekil 3.7. 2. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip olan kare tekstürlü numune








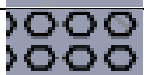



Şekil 3.8. 2. Grup %26 alan yoğunluğu sahip olan üçgen tekstürlü numune



Şekil 3.9. 2. Grup %26 alan yoğunluğu sahip olan yeni model numune

Çizelge 3.3. Tasarımı yapılan numunelere ait bazı parametreler

		Tekstür Şekli	Alan Yoğunluğu (%)	Tekstür Sayısı	Tekstür uzaklığı (mm)	Çukur Alanı (mm ²)
1. GRUP		Tekstürsüz	X	X	X	X
		Daire	%6.6	211	0,4	0,12566
		Daire	%26.6	841	0,4	0,12566
2. GRUP		Elips	%26.6	900	0,6	0,12566
		Üçgen	%26.6	900	0,6	0,12566
		Kare	%26.6	900	0,6	0,12566
		Altıgen	%26.6	900	0,6	0,12566
		Yeni model	%26.6	900	0,6	0,12566
		Yeni dağımk	%26.6	900	0,6	0,12566

3.1.2. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi (SLM) ile numunelerin üretilmesi

SolidWorks programında çizimi tamamlanan numuneler *.STL uzantısı ile kaydedildikten sonra AutoFab yazılımı kullanılarak numunelerin üretim platformu ile temas eden yüzeylerine alt destek elemanları eklenmiştir ve CLS formatına dönüştürülmüştür. Üretim Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (YÜTAM) bünyesindeki Consept Lazer MCusing R+ markalı seçici lazer ergitme cihazı kullanılmıştır. Consept Lazer MCusing R+ markalı SLM cihazı katman kalınlığı 15 – 50 μm , 100 W fiber lazer, maksimum tarama hızı 7 m/s gibi üretim parametrelerine sahiptir. Öncelikle 3 adet ilk grup numuneleri (1. grup) üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunelere yapılan deneylerde alınan sonuçlara göre belirlenen diğer geometrilerin üretimi yapılmıştır. Üretime başlamadan önce cihazın üretim ortamı azot gazı ile vakuma alınmıştır. Cihaz üretim alanının oksijen miktarı %0,8 değerinin altına düşürüldükten sonra üretime başlanmıştır. Üretim için kullanılan seçici lazer ergitme cihazı Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Seçici lazer ergitme (SLM) cihazı

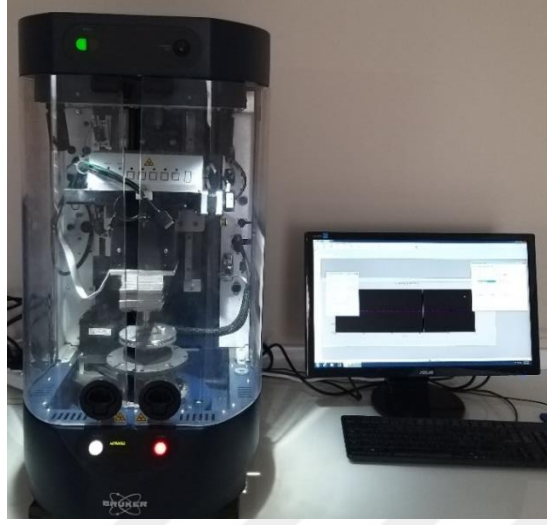
3.2. Testler ve Yüzey İşlemleri

3.2.1. Aşınma testleri

Malzemelerin tribolojik özelliklerini tayin etmek için belli şartlarda aşınma deneylerine tabi tutulur. Aşınma deneyleri için Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (YÜTAM)'deki Bruker UMT markalı cihaz kullanılmıştır. Kullanılan aşınma cihazına ait fotoğraf Şekil 3.11'de verilmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan temel parametreler Çizelge 3.4'de verilmiştir. Aşınma deneyinde belirlenen parametreler cihazda ayarlanarak deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları cihazdan sürtünme katsayısının zamanla değişimini *.txt dosyası olarak alınmıştır. Aşınma deneyi 2. grup numuneler için sıvı ve kuru ortam olmak üzere iki koşulda yapılmıştır. Sıvı durumda yapılan aşınma için NaCl 7,996 g, NaHCO₃ 0,350 g, KCl 0,224 g, K₂HPO₄*3H₂O 0,228 g, MgCl₂*6H₂O 0,305 g, 1 kmol/m³ HCl 40 cm³, CaCl₂ 0,278 g, Na₂SO₄ 0,071 g, (CH₂OH)₃CNH₂ 6,057 g içeriğine sahip SBF çözeltisi kullanılmıştır. Sıvı ortamda yapılan aşınma hidrodinamik yağlama modeli oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Aşındırıcı olarak 2 mm yarıçapında AISI 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Aşınma testine ait parametreler

Parametreler	1. Grup		2. Grup	
	Kuru aşınma	Kuru Aşınma	Sıvı Aşınma	Sıvı Aşınma
Ortamin Durumu				
Uygulanan Yük (N)	2	10	10	10
Aşınma Hızı (rpm)	100	100	100	100
Aşınma Süresi (s)	2100	2700	2700	2700
Aşınma Mesafesi (m)	141	141	141	141
Aşındırma Çapı (mm)	12	10	10	10



Şekil 3.11. Aşınma cihazı

3.2.2. Plazma nitrürleme işlemi

Plazma nitrürleme işlemi için Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan laboratuvar tipi iyon nitrürleme deney cihazı kullanılmıştır. Kullanılan plazma nitrürleme cihazı Şekil 3.11’de verilmiştir. Nitrürleme işlemine başlamadan önce ortam vakuma alınmıştır. Üzerinde tutulabilecek kirleri gidermek amacıyla, 15 dakikalık bir sürede 5 mBar basınç değeri ve 100°C sıcaklıkta H_2 gazı ile sputtering (ön saçılma) işlemi uygulanmıştır. %50 N+%50 H oranında bir karışım ortamında 400°C sıcaklıkta 2 saatlik bir sürede ve 5 mBar basınç değerinde plazma nitrürleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen sıcaklığa ve karışım oranına ulaşıldıktan sonra süre başlatılmıştır. Şekil 3.12’de plazma nitrürleme cihazı verilmiştir.



Şekil 3.12. Plazma nitrüleme cihazı

3.3. Analiz ve Karakterizasyon Çalışmaları

3.3.1. XRD analizi

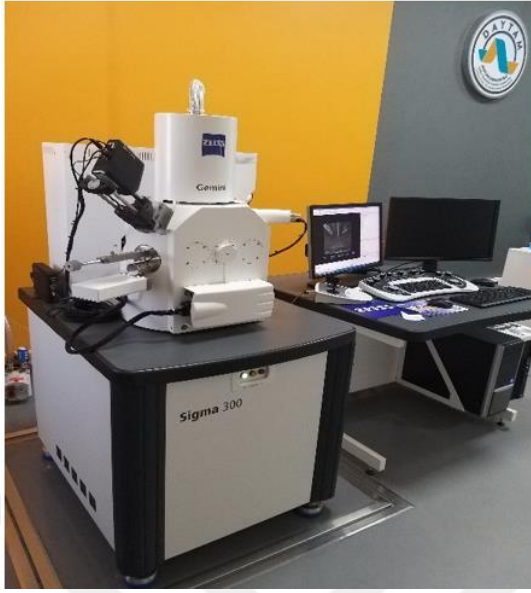
Plazma nitrüleme işlemi yapılmış numune ile işlem görmemiş 316L paslanmaz çelik numuneye ait X ışını kırınım ölçer (XRD) analizi Atatürk Üniversitesi DAYTAM bünyesindeki Malvern PANalytical EMPYREAN markalı cihazda gerçekleştirilmiş ve oluşan fazların kimyasal kompozisyonu bulunmuştur. X-ray tüpü gücü 4 kW (Max 60 kV max 100 mA), tüp voltajı 15-60 kV, maksimum kullanılabilir ölçüm aralığı $-111 < 2\theta < 168$ derece, 0.4 mm x 12 mm çizgisel odaklı 2 mm x 12 mm nokta odaklanma boyutlu cihaz Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. XRD analiz cihazı

3.3.2. Taramalı Elektron Cihazı (SEM) ile görüntü alınması

Bu çalışmada, taramalı elektron mikroskobu olarak Atatürk Üniversitesi bünyesindeki Doğu Anadolu İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'da bulunan Zeiss marka Sigma 300 modeli ve ETÜ YÜTAM'da bulunan FEI-QUANTA FEG 250 modeli kullanılmıştır. SLM ile üretilen malzemelerin yüzey morfolojilerini incelemek amacıyla SEM cihazı kullanılmıştır. Ayrıca, üretilen malzemelerin aşınma görüntüleri de SEM cihazı ile incelenmiştir. Kullanılan SEM cihazlarına ait görüntüler Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Taramalı elektron mikroskobu

3.3.3. 3D Profilometre analizi

Yapılan aşınma deneyi sonucunda aşınma hacminin hesabı ve görüntüsünün alınması için Erzurum Teknik Üniversitesi bünyesindeki YÜTAM biriminde bulunan Bruker ContourGT markalı profilometre cihazı kullanılmıştır. Aşınma hacmi programdan direk olarak alınmaktadır. Kullanılan 3D profilometre cihazı Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15. 3D profilometre

3.3.4. Mikrosertlik ölçümü

SLM yöntemi ile üretilmiş olan numunelerin sertlik değerlerini ölçmek için ETÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi yüzey işlemleri laboratuvarındaki SHIMADZU HMV-G mikro Vickers ölçüm cihazı kullanılmıştır.

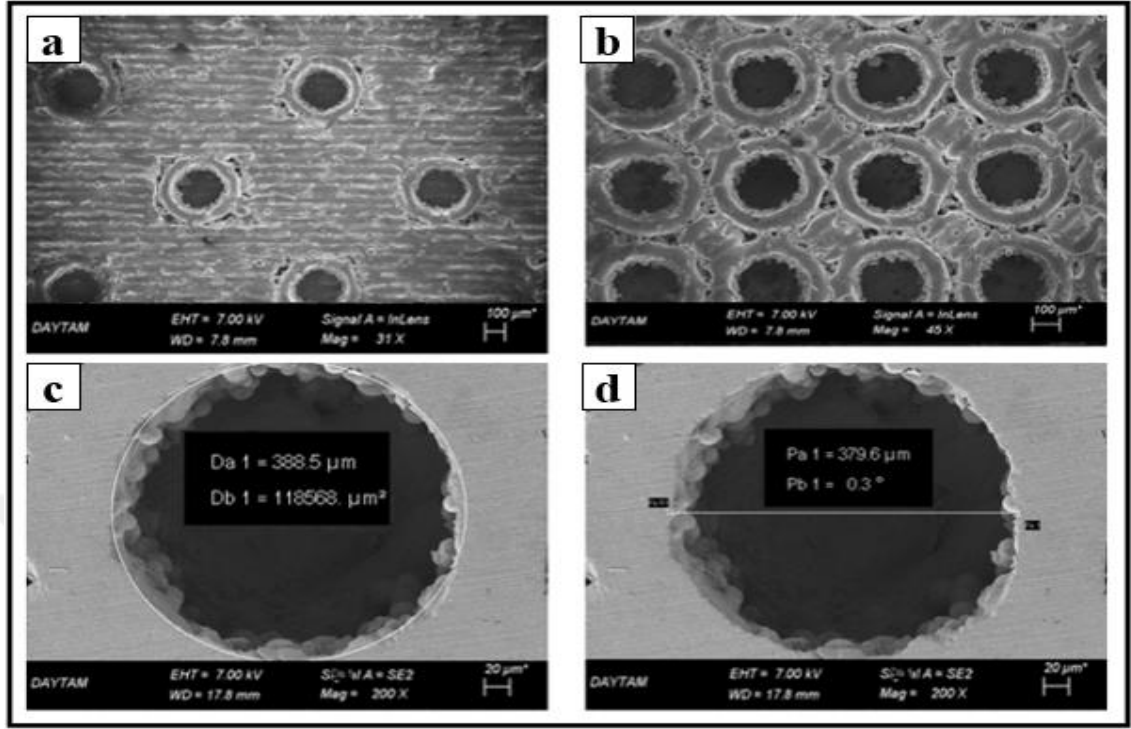
Yüzeyinde sadece geometrik desen mevcut olan ve zımparalanmamış numune ile yüzeyine plazma nitrürleme işlemi yapılmış olan numunenin sertlik değerleri mikro sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. 100 g yük etkisi altında, 10 saniye süre ile ölçüm yapılmıştır. Ölçüm yüzeyden iç kısma doğru olacak şekilde yapılmış ve her bir noktadan üç ölçüm yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Yüzey Araştırma Bulguları

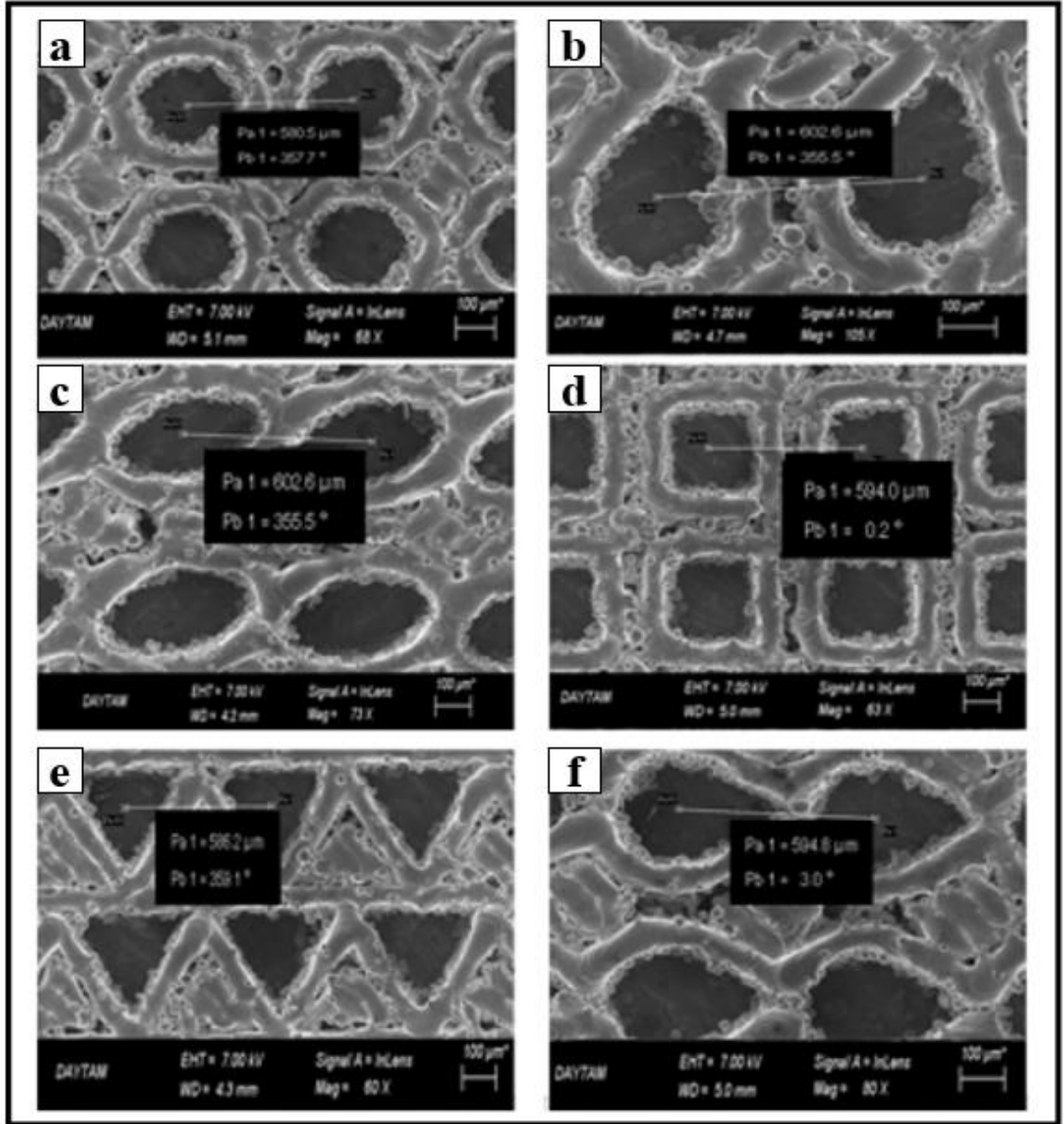
SLM ile üretilen aynı geometrik desene ve farklı alan yoğunluğuna sahip 1.grup ile farklı desene ve aynı alan yoğunluğuna sahip 2.grup AISI 316L paslanmaz çelikler yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. 1. grup numuneler incelendiğinde %26 alan yoğunluğuna sahip desenlerin uzaklıkları $650\mu\text{m}$ ve %6,6 alan yoğunluğuna sahip desenlerin uzaklıkları ise $1640\mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, desenlerin çapları incelendiğinde %6,6 alan yoğunluğuna sahip olan numunenin çapı yaklaşık olarak $388\mu\text{m}$ iken %26 alan yoğunluğuna sahip olan numunenin çapı ise yaklaşık olarak $390\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Tasarım aşamasında $400\mu\text{m}$ çap değerinde numunelerin üretilmesi amaçlanmıştır. Üretim yönteminin toz esaslı olmasından dolayı bir miktar fark oluşmuştur.

2.grupta SLM yöntemiyle yüzeyde altıgen, dağınık, elips, kare, üçgen ve yeni model (üçgen+elips) olmak üzere altı farklı geometrik desenin üretimi yapılmıştır. SEM görüntüleri (Şekil 4.2) incelendiğinde bütün geometrik desenlerin arasındaki mesafe birbirine yakın ve $\sim 600\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. SEM görüntüleri sonucu SolidWorks 2016x64 yazılımı ile tasarlanan ve SLM yöntemiyle üretilen numunelerin geometrik olarak benzer özellikte olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. SLM sonrası 1. grup 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri

a. %6,6 alan yoğunluğuna sahip numunenin genel görünüşü b. %26 alan yoğunluğuna sahip numunenin genel görünüşü c. %6,6 alan yoğunluğuna sahip geometrinin genel görünüşü d. %26 alan yoğunluğuna sahip geometrinin genel görünüşü

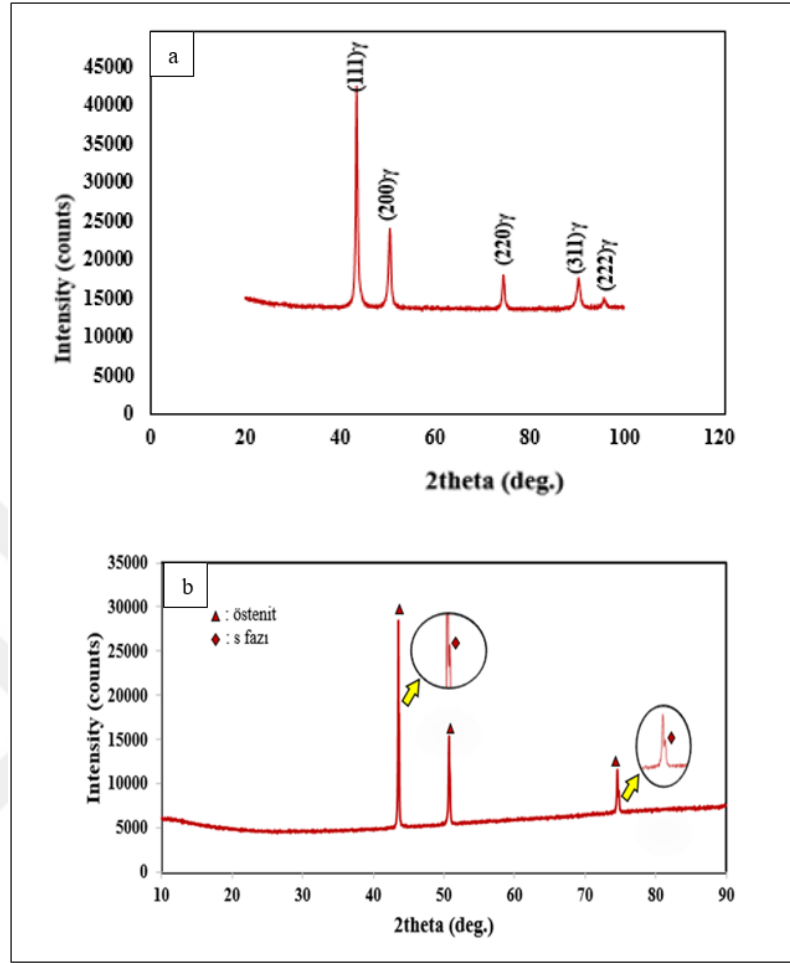


Şekil 4.2. SLM üretim sonrası 2. grup 316L paslanmaz çeliklerin yüzey morfolojilerine ait SEM görüntüleri
a. altıgen b. dağınık c. elips d. Kare e. üçgen f. yeni model

4.2. XRD Analizleri

Yüzeyinde sadece geometrik desen bulunan herhangi bir işlem görmemiş numuneye ait XRD sonuçları Şekil 4.3a'da verilmiştir. XRD grafiği incelendiğinde, AISI 316L paslanmaz çelikte sadece östenit piklerinin mevcut olduğu görülmüştür. Yüzeyinde geometrik desen mevcut olan ve aynı zamanda plazma nitrüleme işlemi görmüş

numuneye ait XRD sonuçları Şekil 4.3b'de verilmiştir. Plazma nitrüleme işleminde sıcaklık, zaman gibi parametrelere bağlı olarak farklı fazlar meydana gelmektedir. Eğer plazma nitrüleme sıcaklığı 723 K'den düşükse, oluşan katmanlar esas olarak s-fazından oluşur. Plazma nitrüleme sıcaklığı 743 K'e eşit veya yüksekse s-fazı ile birlikte CrN veya γ' -Fe₄N fazları da oluşur (Fossati 2006). Bu çalışmada, 400°C sıcaklık ve 2 saatlik bir süre de plazma nitrüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, Şekil 4.3b'de görüldüğü gibi plazma nitrüleme sonucunda tabaka içinde ostenit fazının hala mevcut olduğu ve s-fazının da dönüşümünün meydana geldiği görülmüştür. Belirlenen süreden dolayı ostenit fazların s-fazına tamamına dönüşümü gerçekleşmemiştir. Belirlenen parametrelerde, nitrüleme işlemi boyunca azot atomları ostenit fazda bulunan kafes yapılarına kolay bir şekilde difüze olabilir. Difüze olmaya çalışan bu arayer atomları ostenit kafes yapılarında çarpılmalar meydana getirir. Azot yoğunluğu arttıkça daha fazla çarpılma meydana gelir. Bunun sonucu olarak da malzemenin mekanik özellikleri değişir. Fakat optimum azot yoğunluğu artışında mekanik özelliklerde (sertlik vb.) iyileşme görülür (Fossati 2006). Li ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, 316L paslanmaz çeliğe yaptıkları plazma nitrüleme sonrasında oluşan fazları ve bu fazların mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. 350-400°C aralığındaki sıcaklıklarda ve 4 saatlik bir nitrüleme süresinde sadece s-fazının mevcut olduğunu bulmuşlardır (Li *et al.* 2008). Ayrıca, Yang ve arkadaşları SLM üretim tekniği ile ürettikleri 316L paslanmaz çelik numunelerin faz karakterizasyonu sonucunda aynı fazları buldukları gözlemlenmiştir (Yang 2019).



Şekil 4.3. a. İşlemsiz 316L numuneye ait XRD grafiği b. %50H₂ ve %50 N₂ karışımında 2 saatlik süre, 400°C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş numuneye ait XRD grafiği

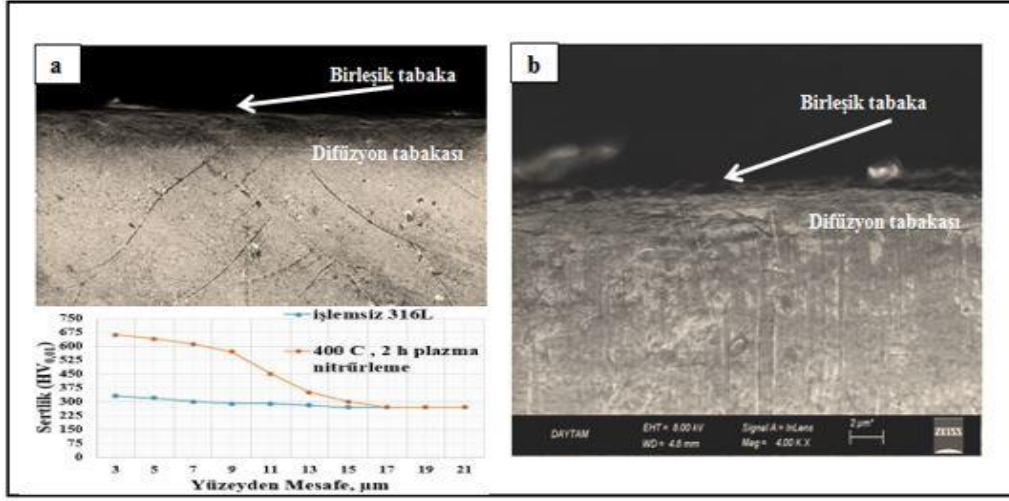
4.3. Mikrosertlik İncelemeleri

Şekil 4.4’de plazma nitrüleme sonucunda elde edilen tabakalara ait SEM kesit görüntüleri verilmiştir. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında en dışta beyaz tabaka onun altında difüzyon tabakası oluşur. Kesit görüntüleri alınmadan önce numunelerin kesit alınacağı yüzeyi parlatılmış ve sonrasında dağlama işlemine tabii tutulmuştur. En üstte bulunan beyaz tabaka bu dağlama işleminden etkilenmemektedir. Çok ince bir tabaka olup demir nitrürler içerir. Difüzyon tabakasının yüzeyden içeriye doğru olan inildikçe azot yoğunluğunda ve sertliğinde azalma görülür (Karadeniz 1990; Kovacı 2016). SLM yöntemi ile üretilmiş, %26 alan yoğunluğunda, yüzeyinde geometrik desene sahip numuneye ait sertlik değeri 280-300 HV olarak ölçülmüştür. Geleneksel yöntemle göre

üretmiş olan 316L paslanmaz çeliğin sertlik değeri ile SLM ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin sertlik değerinin (Çizelge 4.1) yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür (Singh *et al.* 2002; Fu *et al.* 2012). Plazma nitrürleme işlemi yapılmış %26 alan yoğunluğuna ve geometrik desene sahip numunenin yüzey sertliği değeri ise 580-600 HV olarak ölçülmüştür. Li ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, 316L paslanmaz çelik üzerine yapılan plazma nitrürleme işleminin yüzey sertliğini artırdığını göstermiştir (Li *et al.* 2008). Abedi ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, 316L paslanmaz çelik malzemeye yapılan plazma nitrürleme işleminin yüzey sertliğini, aşınma direncini ve korozyon direncini artırdığını ileri sürmüşlerdir (Abedi *et al.* 2010). Alınan ölçümler sonucunda, numunenin yüzeyinden iç kısma (merkeze) doğru inildikçe sertlik değerinde azalma meydana gelmiştir. Plazma nitrürleme işlemi yapılmış numunenin sertlik değeri ile işlemsiz numunenin sertlik değeri karşılaştırıldığında sertlik değerinde yaklaşık olarak 2 kat artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi plazma nitrürleme işlemi sonrasında tabaka içerisinde fazların oluşmasıdır. Oluşan bu fazların sertlik gibi malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkisi oldukça fazladır. 400°C ve 2 saat yapılan nitrürleme işlemi sonrasında malzemede s-fazı meydana gelmiştir. Aslında s-fazı sonradan oluşan bir durum olmayıp ostenit fazın azot ile aşırı doymuş halidir. Nitrürleme işlemi gerçekleştirilirken ortama gönderilen azot atomları, ara yer atomu olarak ostenit kafes yapısını bozmaya çalışması ve sonucunda kafes yapısında çarpılmalar meydana gelmesi ile sertleşme yani plastik deformasyona karşı direnç oluşur. Böylece sertlik değerinde artış meydana gelir (Borgioli *et al.* 2006; Wu *et al.* 2009; Li *et al.* 2010). Elde edilen sonuçlar bu durumu destekler niteliktedir.

Çizelge 4.1. 316L paslanmaz çelik işlemlili ve işlemsiz numune sertlik değerleri

NUMUNELER	SERTLİK DEĞERİ (HV)
%26 alan yoğunluklu yüzey işlemsiz numune	280-300
%26 alan yoğunluklu yüzeyi nitrürlenmiş numune	580-600



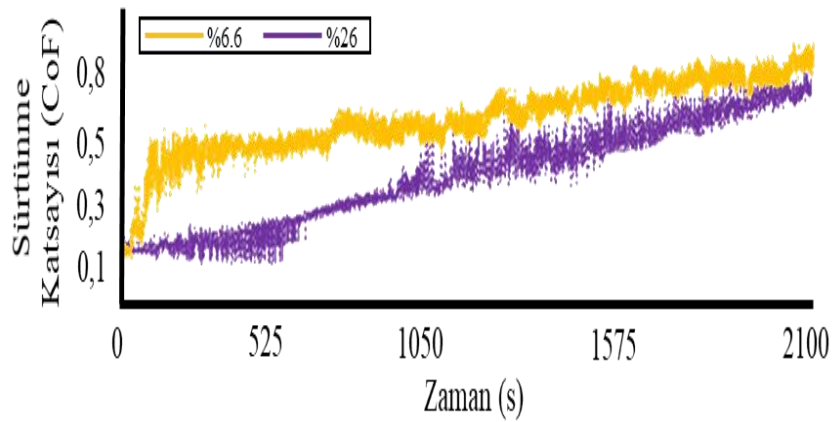
Şekil 4.4. Plazma nitrüleme sonrasında a. işlemsiz numuneye ait b. yüzey geometrik desenli numuneye ait kesit görüntüsü

4.4. Sürtünme ve Aşınma Analizleri

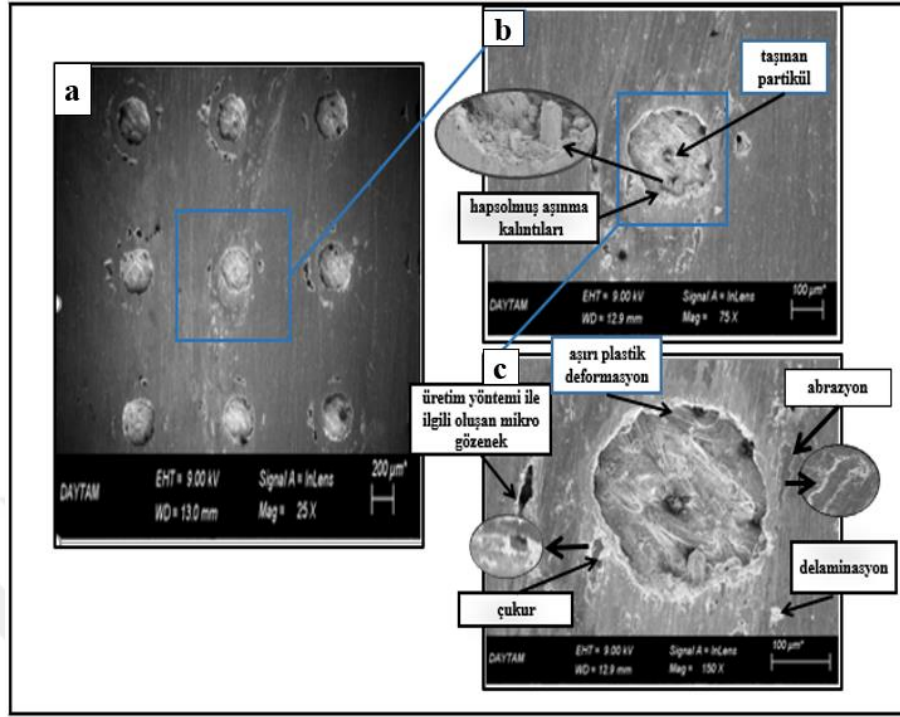
Şekil 4.5’de %6,6 ve %26 alan yoğunluğuna sahip dairesel geometrik desenlere ait sürtünme katsayısı zaman grafiği verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde, %6,6 alan yoğunluğuna sahip geometrik desenin sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu görülmektedir. Alan yoğunluğunun artışı ile sürtünme katsayısı değerinde düşüş meydana gelmiştir. Yu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bor-bakır alaşımli dökme demirlerin alan yoğunluğu arttıkça sürtünme katsayısının azaldığını rapor etmiştir (Yuet *al.* 2011). Uddin ve Liu artan alan yoğunluğuyla film basıncının arttığını bildirmiştir. Artan film basıncının ise sürtünme katsayısını düşürdüğünü açıklamışlardır (Uddin and Liu 2016). Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de 1. grup numunelerin 35 dakikalık bir sürede ve 2 N yük altında pin-on-disk aşınma cihazı ile yapılan deney sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Çizelge 4.2’de 1. gruba ait %6,6 ve %26 alan yoğunluğuna sahip geometrik desenli numunelerin kütle değişimi verilmiştir. 1. gruptaki numunelerin aşınma öncesi ve sonrası kütleleri incelendiğinde, geometrik desenler arasındaki mesafe azaldıkça, kütle kaybı azalmaktadır. Aşınma görüntüleri incelendiğinde %6,6 alan yoğunluğuna sahip numunede geometrik desen etrafında, desenden çıkış noktasında aşırı plastik deformasyon meydana geldiği görülmüştür. Aşınma sonucu kopan partiküllerin aşınma topu ile taşınması sonucu üçüncü parçacık (third body) etkisi meydana gelmiş ve abrazyon

aşınma gözlemlenmiştir. Aşındırıcı top ile numune arasında oluşan aşınma ürünleri, aşınma mekanizmasını ikili temastan üçlü temas haline dönüştürerek abraziv aşınma meydana getirir (Sun *et al.* 1998; Li and Bell 2004). Aşındırıcı bilye yüzeyine aşınma sonucu kopan partiküllerin yapışması sonucu olarak adezyon için daha güçlü bir film meydana gelmiştir ve bu durumda da numune yüzeyinden daha fazla malzeme kopmasına sebep olmuştur. Böylece aşınma oranında artış meydana gelmiştir.

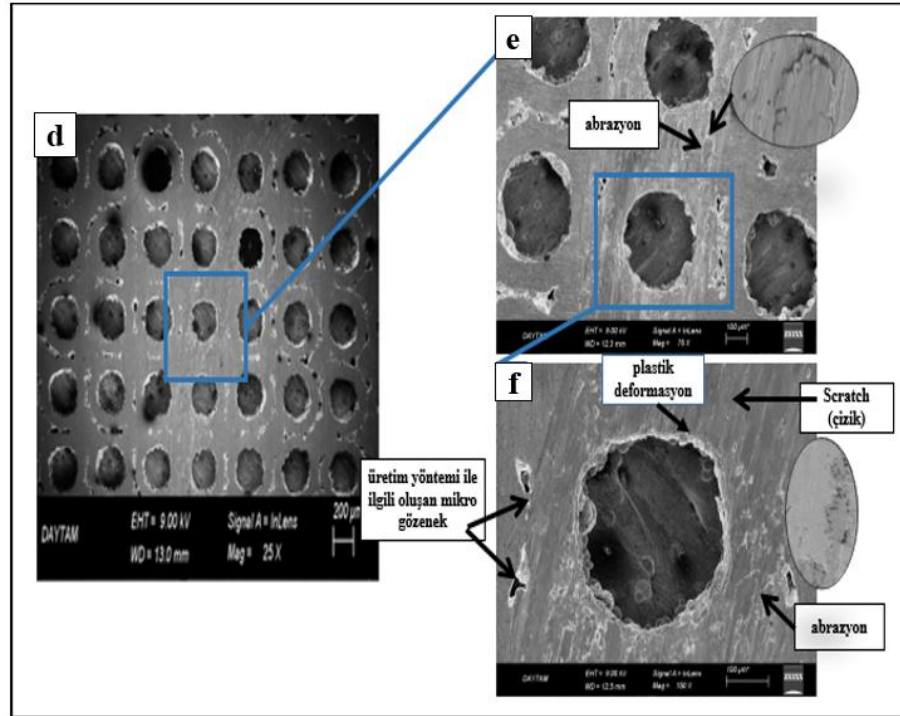
%26 alan yoğunluğuna sahip numuneye ait SEM görüntüsü (Şekil 4.7) incelendiğinde geometrik desen etrafında plastik deformasyon, abraziv aşınma ve çiziklerin meydana geldiği görülmektedir. Aşınma izi incelendiğinde %6,6 alan yoğunluğuna sahip numunenin daha geniş ve derin bir görünüm sergilemektedir. Aşınma miktarları incelendiğinde %6,6'lık alan yoğunluğuna sahip geometrik desende daha çok aşınma meydana gelmiştir. Bunun sebebi %26'lık alan yoğunluğuna sahip geometrik desenlerin yük taşıma kapasitesinin %6,6'lık alan yoğunluğuna sahip geometrik desene göre daha fazla olmasıdır. Sun ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, alan yoğunluğu arttıkça aşınma oranının azaldığını belirtmişlerdir (Sun *et al.* 2015). Alan yoğunluğunun tayini için üretilen 1. grup numuneler için yapılan aşınma deneyi sonucunda, %26 alan yoğunluğuna sahip geometrik desenli numunenin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerinin daha az olduğu görülmüştür ve bu bilgiler ışığında diğer numunelerin üretimleri %26 alan yoğunluğu esas alınarak yapılmıştır.



Şekil 4.5. %6,6 ve %26 alan yoğunluğuna sahip geometrik desenlerin sürtünme katsayısı (CoF)- Zaman (s) grafiği



Şekil 4.6. SLM üretim sonrası 1. grup %6,6 alan yoğunluğuna sahip numunenin aşınma sonrasında yüzey morfolojisine ait SEM görüntüsü



Şekil 4.7. SLM üretim sonrası 1. Grup %26 alan yoğunluğuna sahip numunenin aşınma sonrasında yüzey morfolojisine ait SEM görüntüsü

Çizelge 4.2. Farklı alan yoğunluğundaki numunelerin kütle değişimi

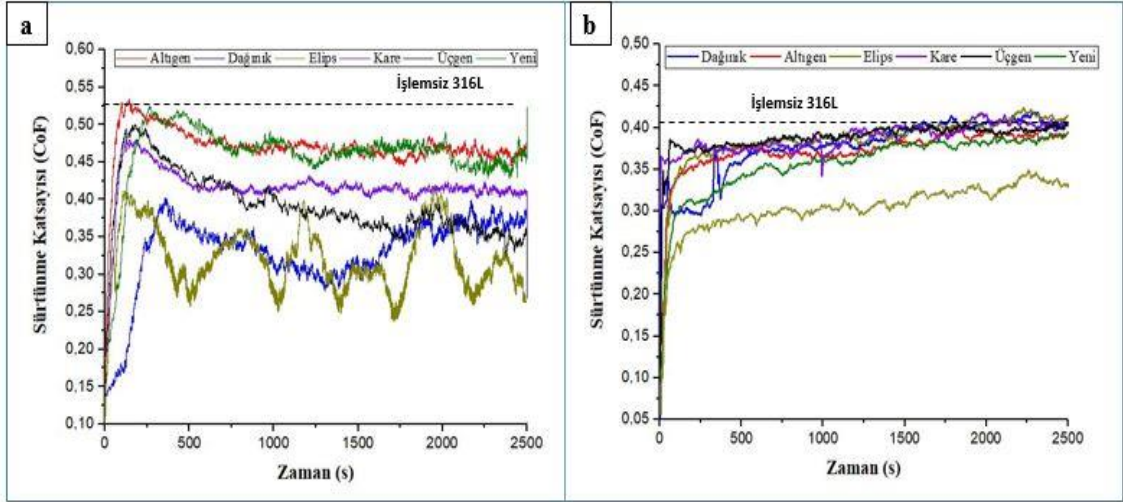
Geometriler	İlk Kütle	Son Kütle	Kütle Kaybı	%Kütle Kaybı
%6,6 alan yoğunluğu	12,5411 g	11,4813 g	1,0598 g	8,45 (%)
%26 alan yoğunluğu	12,3780 g	12,0563 g	0,3217 g	2,405 (%)

Aynı alan yoğunluğuna sahip ve farklı geometrik desenlerde üretimi yapılmış 2.grup numunelerin kuru ve sıvı ortamdaki sürtünme katsayısı-zaman grafikleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Ayrıca, kuru ve sıvı ortamdaki sürtünme katsayısı ve aşınma oranları Çizelge 4.3 ve Şekil 4.9’da verilmiştir. AISI 316L paslanmaz çelik numuneye yapılan pin-on-disk aşınma testi sonucunda aşınma oranı değeri $66 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ olarak bulunmuştur. Yazıcı ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, yaklaşık böyle bir sonuç elde etmişlerdir (Yazıcı vd. 2018). Çizelge 4.3’te bulunan aşınma oranları sonuçlarına bakıldığında, yüzey desenleme işlemi aşınma oranında azalma meydana getirmiştir. Sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında, sıvı ortamda elde edilen sürtünme katsayıları kuru ortamda elde edilen sürtünme katsayılarından daha düşük çıkmıştır. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.9 incelendiği zaman, sıvı ortamdaki aşınma oranları kuru ortamdaki aşınma oranlarına göre azalmıştır. Sürtünme anında meydana gelen adeziv bağlar aşınma oranını etkilemektedir. Yüksek sürtünme katsayısında yüksek Hertz basınç meydana gelmekte ve yüksek Hertz basıncın sebep olduğu güçlü adeziv bağlar aşınma oranının artmasına sebep olmaktadır. Suh ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, hidrodinamik yağlamanın mevcut olduğu bir aşınma durumunda, arada bir yağlayıcının mevcudiyetinden dolayı katı-katı teması engellendiğini ve daha düşük sürtünme katsayısı meydana geldiğini bildirmişlerdir (Suh *et al.* 2010). Çizelge 4.3 incelendiği zaman, hem sıvı hem de kuru ortamda en az aşınma oranı gözlenen geometrik desen elips olmuştur. Elips geometrik desende giriş kenar uzunluğu (yakınsak alan) daha fazla olduğu için yataklama kapasitesini yani taşıma kapasitesini artırmakta ve hidrodinamik fayda sağlamaktadır. Yu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, geometrik desenin etkisini incelemişlerdir ve yakınsak alanı fazla olan desenin daha fazla net pozitif hidrodinamik fayda sağladığını göstermişlerdir (Yu *et al.* 2010).

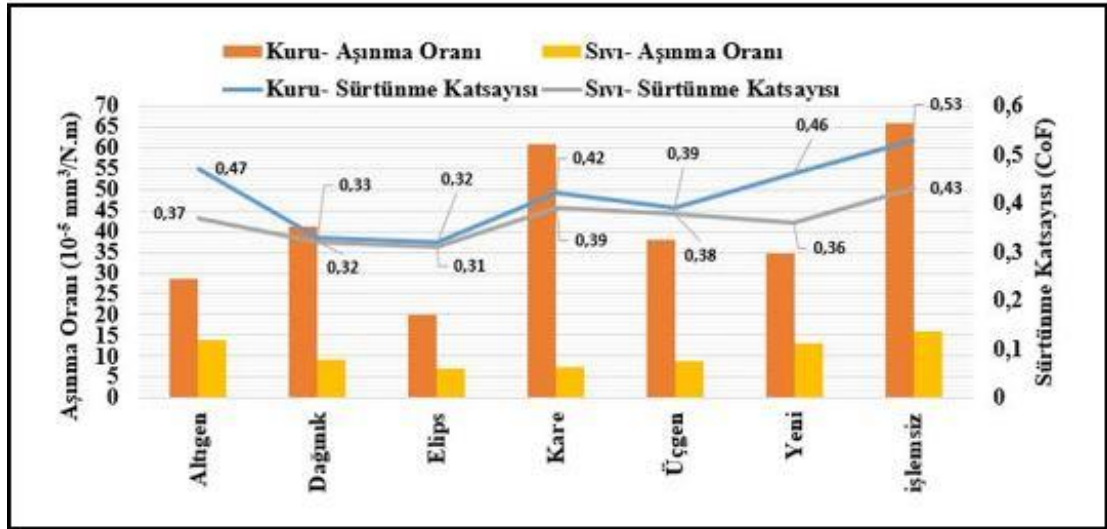
Kuru ortamda sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında en düşük sürtünme katsayısı elips geometrik desenli üretimde $\mu \approx 0,32$ olarak ve en yüksek sürtünme katsayısı ise altıgen geometrik desenli üretimde $\mu \approx 0,47$ olarak elde edilmiştir. Konformal olmayan temas durumunda mikro dokulu yüzeylerin varlığı 2 mekanizma meydana getirmektedir. Bunlardan ilki, geometrik desen kenarlarının varlığı gerilme dağılımının yoğunlaşmasına ve aşınma oranının artmasına sebep olur. Diğer durumda ise, geometrik desenler aşınma işlemi ile ilgili kalıntıları yakalayabilir ve temas eden yüzeyler arasında yumuşak bir geçiş oluşturabilir. Bunun sonucunda ise daha düşük sürtünme katsayısı elde edilir (Joshi *et al.* 2018). Kare, üçgen ve dağınık desen en büyük aşınma oranına sahiptir. Geometrik desende keskin kenarlar gerilme dağılımının artışına sebep olmuştur ve bu durum sürtünme katsayısını artırmıştır. Bu durum aynı zamanda aşınma oranında da artışa sebep olmuştur. Elips desende ise, keskin köşelerin olmayışı ve aşınma kalıntılarını daha çok hapsedme yeteneği sürtünme katsayısının düşmesine sebep olmuştur ve aşınma oranında azalma meydana getirmiştir. Elips desende sürtünme davranışı lineer olmayan bir özelliğe sahiptir. Bunun sebebi, aşınma sırasında aşınan partiküllerin önce sürtünme katsayısını arttırması daha sonra aşınma partiküllerinin elips desenlerle hapsedilmesi ise sürtünme katsayısında ani düşüş meydana getirmiştir. Joshi ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, altıgen ve üçgen geometrik desene sahip numune ile geometrik desen olmayan numuneyi karşılaştırmış ve keskin köşelerin varlığından dolayı köşe noktalarında gerilme artışının meydana geldiğini ve bu durumda kavitasyon olayına sebep olduğunu açıklamıştır. Sonuç olarak da sürtünme katsayısında artış meydana geldiğini bildirmişlerdir (Joshi *et al.* 2018). Ayrıca Gachot ve arkadaşları farklı geometrik desenleri karşılaştırmış ve elips geometrisinin daha fazla giriş alanına sahip olmasından dolayı en büyük hidrodinamik fayda sağladığını belirtmiştir (Gachot *et al.* 2017). Literatürde bahsedilen çalışmalar ile bizim çalışmamız karşılaştırılırsa, birbirini destekler sonuçlar elde edilmiştir.

Sıvı ortamda sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında en düşük sürtünme katsayısı elips geometrik desenli üretimde ($\mu \approx 0,31$) ve en yüksek sürtünme katsayısı ise üçgen geometrik desenli üretimde ($\mu \approx 0,39$) elde edilmiştir. Genel olarak sıvı ortamdaki sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında, ortalama sürtünme katsayıları $\mu \approx 0,35-0,39$ arasında değer almıştır. Tekstürlü yüzeyler için, mikro desenler bir nevi yataklama görevi

yapar. Oluşturulmuş mikro desenlerin kayma yönüne göre arka kenarlarında (çıkış) basınç artışı meydana gelirken ön kenarlarında (giriş) basınç düşüşü meydana gelir. Bu nedenle, sadece arka kenardaki basıncın artması, desenin ön kenarındaki basıncın düşmesinden daha fazla ise, geometrik desenin varlığından dolayı pozitif bir net artış olması mümkündür. Bu durum kavitasyon sonucu meydana gelmektedir. Her desende oluşan kavitasyon kabarcığı, çıkış kenarlarındaki basınç artışının etkisini ortadan kaldıran yerel negatif basınç piklerinin görünümünü önler (Gachot *et al.* 2017). Aşınma oranları incelenirse, elips geometrik desenin en düşük aşınma oranına sahip olduğu gözlenmektedir. Lestari ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, malzeme yüzeyinde oluşturulan geometrik desenin ve uygulanan yükün von Misses gerilme dağılımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, farklı yük değerleri kullanarak von Misses gerilme dağılımını kuru aşınma şartlarında incelemişlerdir. Bütün yükleme hallerinde kare geometrik desenin gerilme değeri en büyük çıkmıştır. Bu durumda aşınma oranını artırmaktadır (Lestari *et al.* 2017). Bu durum bizim çalışmamızda da meydana gelmiş ve kare geometrik desene sahip numunenin aşınma değeri en fazla çıkmıştır. Kare geometrik desende köşelerde meydana gelen aşırı gerilme dağılımı aşınma oranını artırmıştır. Ayrıca, sürtünme katsayısı değeri ile aşınma oranlarına bakıldığı zaman birbiri ile paralellik gösterdiği söylenemez. Yani sürtünme katsayısı değeri arttıkça aşınma oranında da artış gözlenir gibi bir değerlendirme yapılamaz. Birbirinden bağımsız 2 parametre olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. SLM yöntemi ile üretilmiş 2. grup numunelerin a. kuru ortamda yapılan aşınma deneyi sonucu Sürtünme katsayısı (CoF)–zaman (s) grafiği ve b. sıvı ortamda yapılan aşınma deneyi sonucu Sürtünme katsayısı (CoF)–zaman (s) grafiği



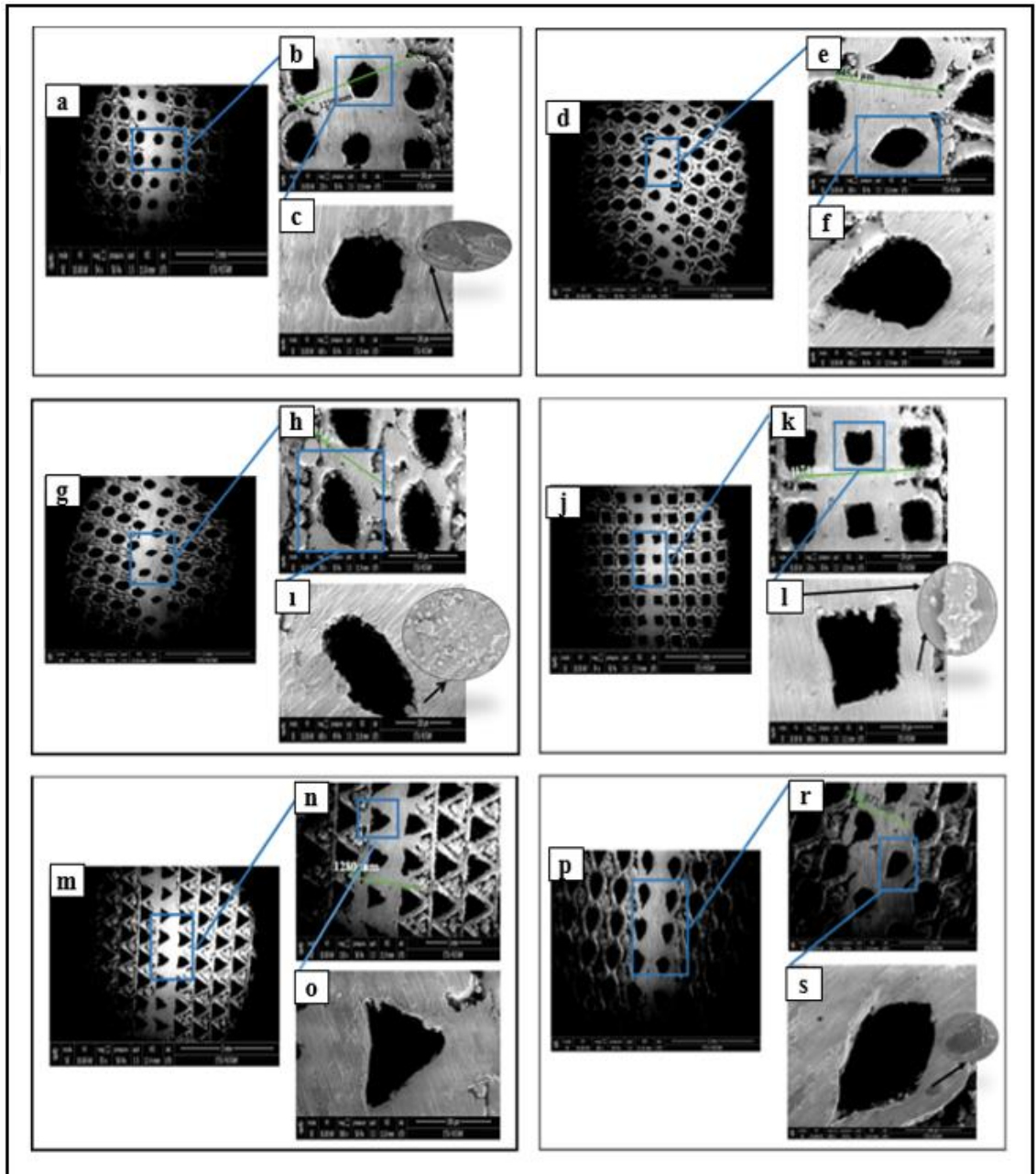
Şekil 4.9. SLM üretim yöntemi ile üretilen farklı yüzey desenlerine sahip numunelerin kuru ve sıvı aşınma sonrasında sürtünme katsayısı ve aşınma oranları

Çizelge 4.3. SLM yöntemi ile üretilmiş geometrik desenli işlemsiz numunelerin aşınma oranları

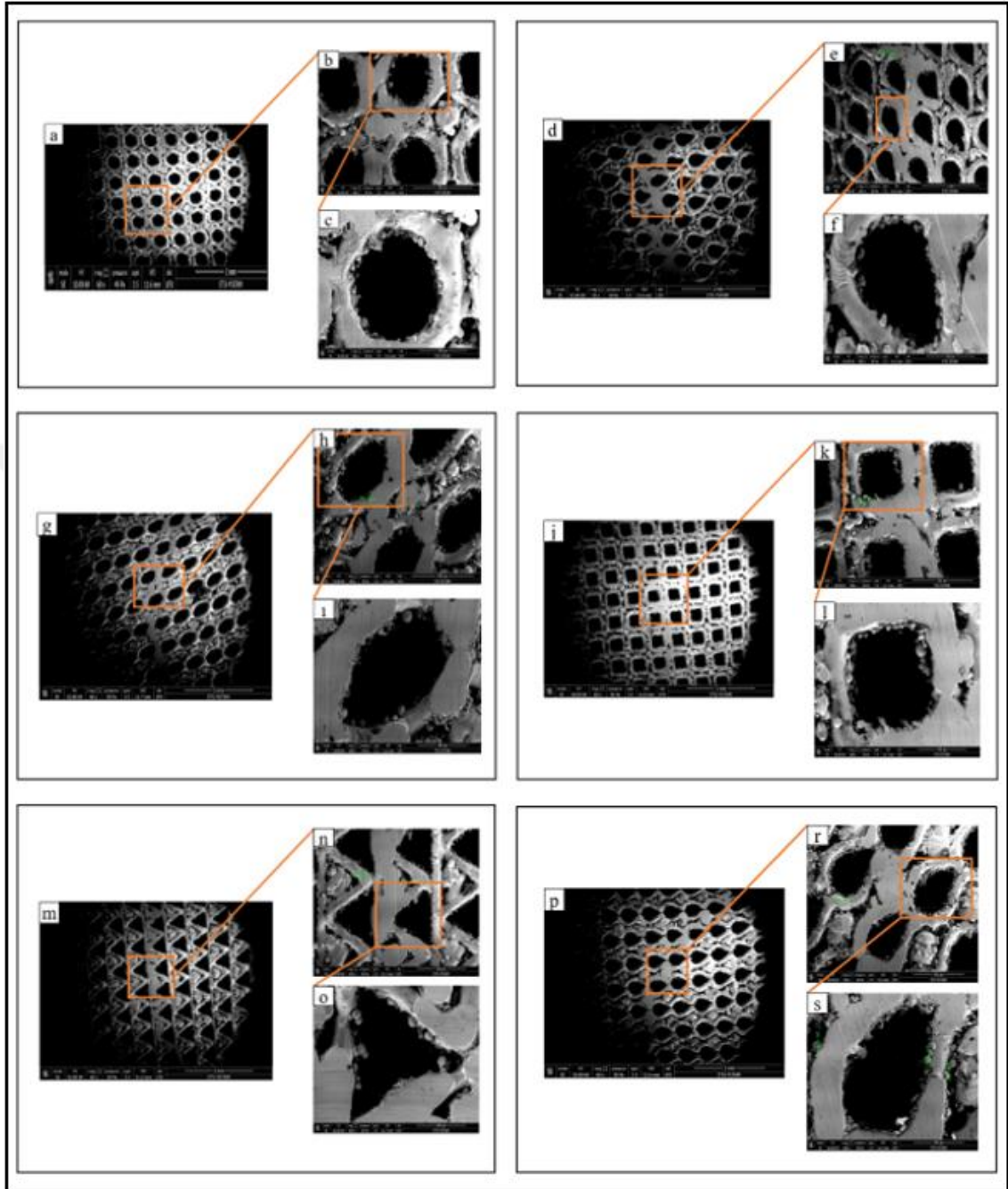
GEOMETRİLER	KURU		SIVI	
	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Oranı ($10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N.m}$)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Oranı ($10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N.m}$)
Altıgen	0,47	28,55	0,37	14,05
Dağınık	0,33	41,17	0,32	9,29
Elips	0,32	20,07	0,31	6,98
Kare	0,42	60,67	0,39	7,39
Üçgen	0,39	37,78	0,38	8,94
Yeni	0,46	34,78	0,36	13,10
İşlemsiz	0,53	66,01	0,43	16,08

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de 2. grup numunelerin farklı desenlerine ait kuru ve sıvı ortamda aşınma sonucu SEM görüntüleri verilmiştir. Aşınma görüntüleri incelendiğinde bütün desenlerde adeziv ve abraziv aşınmanın birlikte meydana geldiği görülmektedir. Bunun yanı sıra, numune yüzeyinde, geometrik desenin etrafında aşınma kalıntılarının varlığı gözlenmiştir. Özellikle kare geometrik desene sahip numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde, çukurlar etrafında oldukça fazla aşınma kalıntılarının mevcut olduğu görülmektedir. Bu partiküller abraziv aşınmayı da beraberinde getirdiğinden dolayı aşınma oranını artırmaktadır. Hem üretim için kullanılan cihazın programlamasından dolayı hem de aşınma miktarı fazla olmasından dolayı Şekil 4.10a’da görüldüğü gibi altıgen geometrinin deseninde bozulmalar meydana gelmiştir. Altıgen geometrik desen dairesel desen olarak davranış sergilemiştir. Görüntüler incelendiğinde, aşınma izinin genişliği arttıkça ve çukurun geometrisinde meydana gelen bozulmaya bağlı olarak aşınma oranında artış meydana gelir. En fazla aşınma izi altıgen desende gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı değeri en yüksek geometri ise yine altıgen geometridir. Aşınma izi görüntüleri incelendiğinde elips geometrinin aşınma izi (Şekil 4.10h) en düşük değere sahiptir. 1. grup numunelerde olduğu gibi abraziv ve adeziv aşınma meydana gelmiştir. Scratch (çizik) ve delaminasyonlar gözlemlenmiştir. Şekil 4.10 ile Şekil 4.11 karşılaştırıldığı zaman, sıvı ortamda yapılan aşınma sonucunda malzeme yüzeyinde fazla aşınma meydana gelmemiştir. Şekil 4.10c’de bulunan altıgen geometrik desene ait SEM görüntüsü ile Şekil 4.11c’de bulunan görüntü karşılaştırıldığında, kuru ortamda yapılan

aşınma sonucunda geometrik desenin şeklinde bozulmalar meydana gelirken sıvı ortamda yapılan aşınma sonucu SEM görüntüsünde herhangi bir şekilde bozulma meydana gelmediği gözlemlenmiştir. SEM görüntülerinde açıkça belirlenen bu durum, katı-katı temasın herhangi bir yağlayıcı ile önlenmesi sonucu aşınma oranının azaldığını ispatlar niteliktedir (Suh *et al.* 2010).



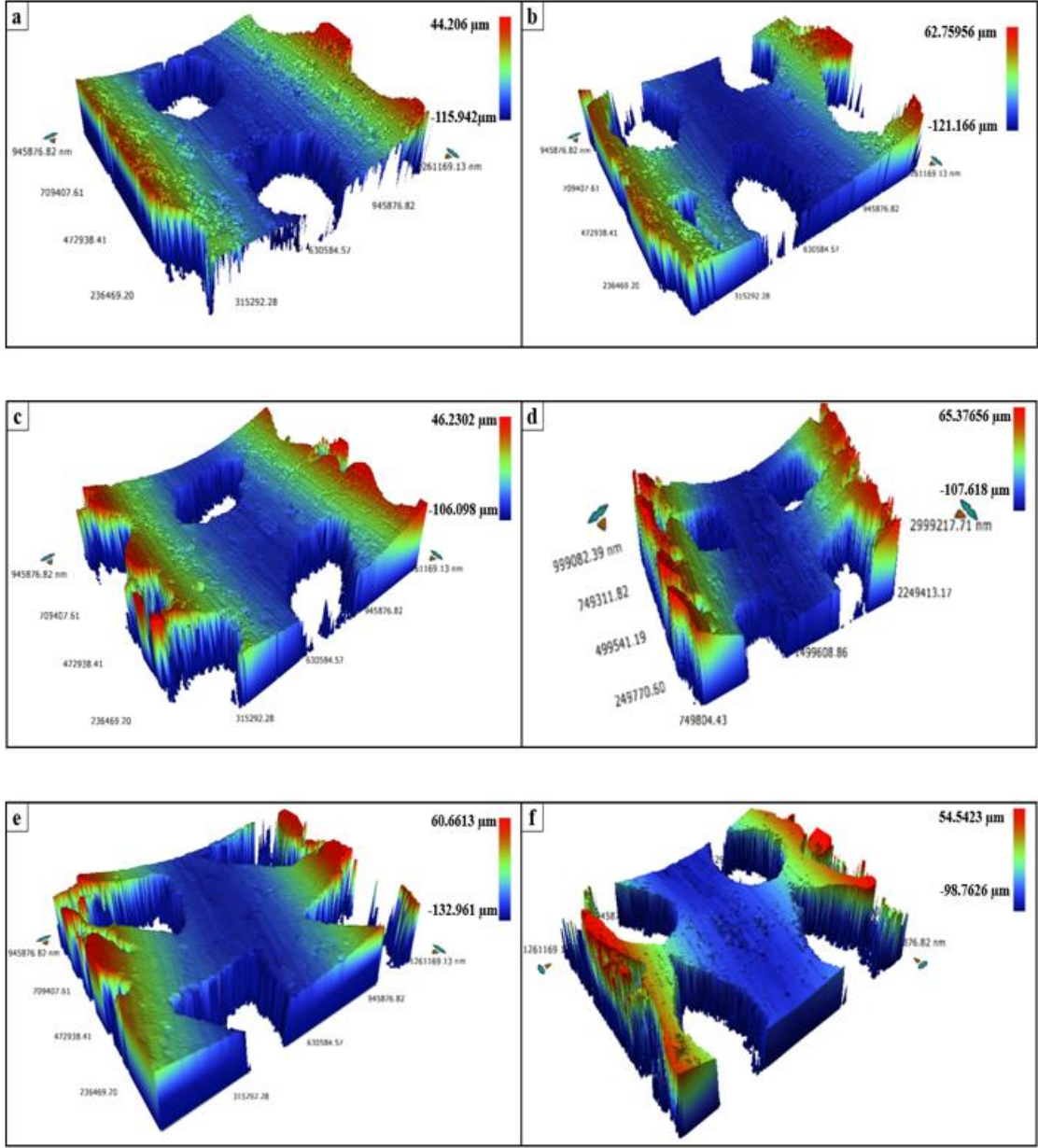
Şekil 4.10. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin kuru ortamda aşınma sonrası SEM görüntüleri



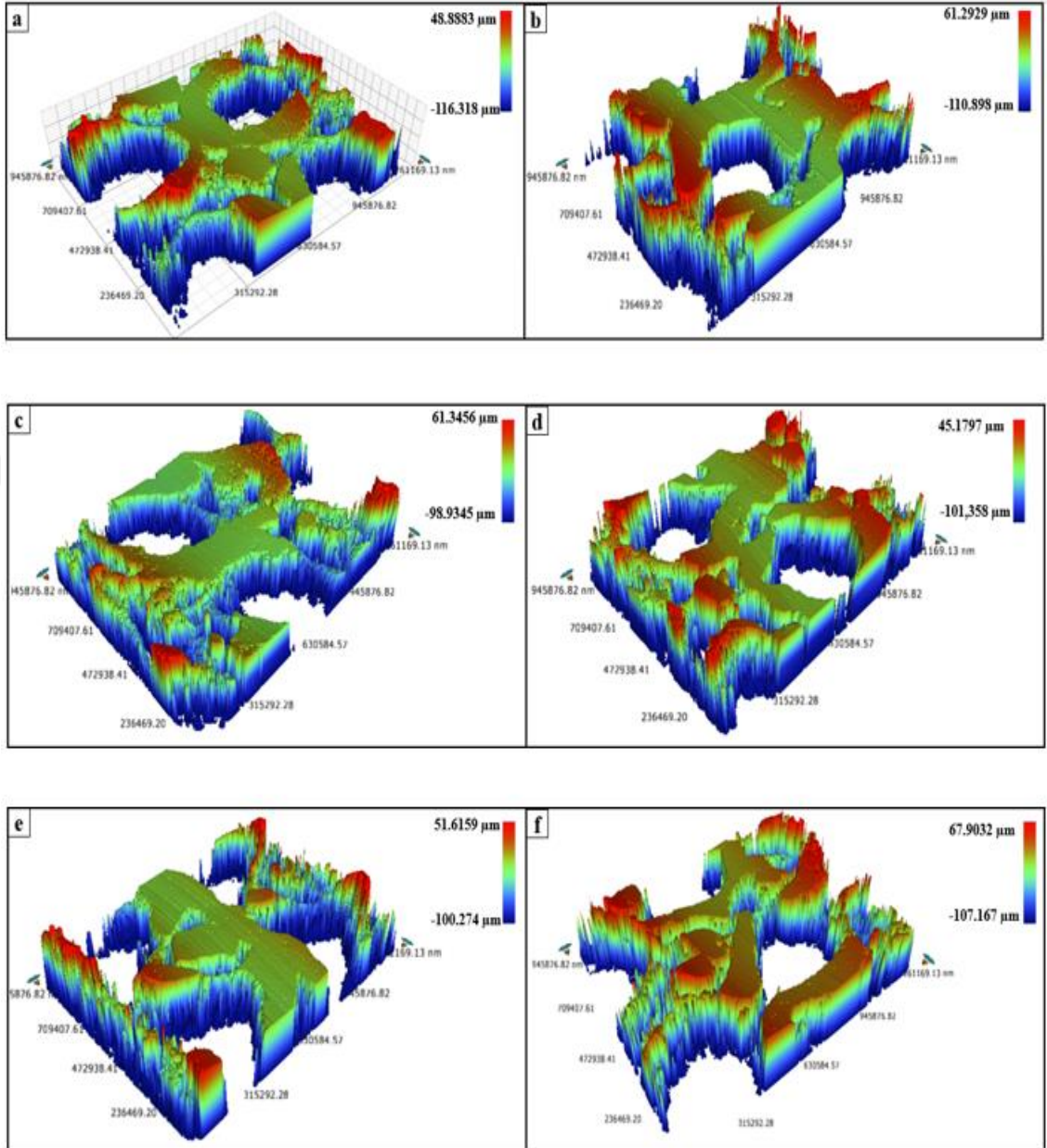
Şekil 4.11. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin kuru ortamda aşınma sonrası SEM görüntüleri

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te %26 alan yoğunluğuna ait 316L paslanmaz çelik numunelerin kuru ve sıvı aşınma sonrasında üç boyutlu profilometre görüntüleri verilmiştir. Profilometre aşınma sonucunda birçok parametrenin sonucunu vermektedir. Profilometreden alınan aşınma hacmi sonuçlarına göre aşınma oranı hesaplanmıştır.

Profilometre de alınan aşınan hacimlerin değerlerine bakıldığı zaman hem kuru hem de sıvı ortamda yapılan aşınma sonucunda aşınma hacminin en düşük değeri elips geometrisinde meydana gelmiştir. Aşınma hacminin en yüksek değeri ise kare ve altıgen geometrik desende meydana gelmiştir. Fakat aşınma izi incelendiği zaman altıgen ve elips geometrilerde aşındırıcı bilye 2 adet geometrik desen üzerinden geçmiştir ve diğer geometrilerde 4 adet geometrik desen üzerinden geçmiştir. Aşındırıcı bilyenin geçtiği geometrik desen sayısı da aşınma hacmi değerlerinde etkili olmuştur. Ayrıca dikkat edilmesi gereken hususlardan biri aşındırıcı bilyenin geometrik desenin hangi bölgesinden giriş-çıkış yaptığı aşınma derinliği, sürtünme katsayısı, aşınma oranı üzerinde önemli etkiye sahip olduğudur. Örnek olarak, aşındırıcı bilye elips geometrik desenin uzun olan kenarından giriş-çıkış yapması ile kısa kenarından giriş-çıkış yapması durumu birbirinden çok farklı sonuçlar doğurmaktadır. Aşındırıcı bilyenin elips geometrik desene uzun kenardan giriş-çıkış yapması durumu, kısa kenarından giriş-çıkış yapması durumundan çok daha iyi sonuç vermektedir. Hatta elipsin uzun kenarından giriş-çıkış yapma durumu belirlenen geometrilerden çok daha iyi sonuç vermektedir. Gachot ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, bütün parametreleri sabit tutarak sadece geometrik desenin etkisini incelemiştir. Sonuç olarak, en iyi sürtünme katsayısı değeri ve aşınma miktarını elipsin verdiği, üçgenin aşınma yönüne göre aşağıdan yukarıya göre(▲↑) yönleneceği durumunun en kötü sonuçları sergilediğini ifade etmişlerdir ve elips, üçgen gibi geometrilerin yönleneceği şeklinin de önemli olduğunu vurgulamışlardır (Gachot *et al.* 2017). Bizim yaptığımız çalışmada, elips geometrik desene sahip numune en iyi sonuç sonucu verirken üçgen desen kötü sonuç vererek yapılan çalışmayı destekler niteliktedir.



Şekil 4.12. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş 316L numunelerin kuru aşınma sonrası profilometre görüntüleri
a. altıgen b. Dağımk c. elips d. kare e. üçgen f. Yeni (üçgen+elips)



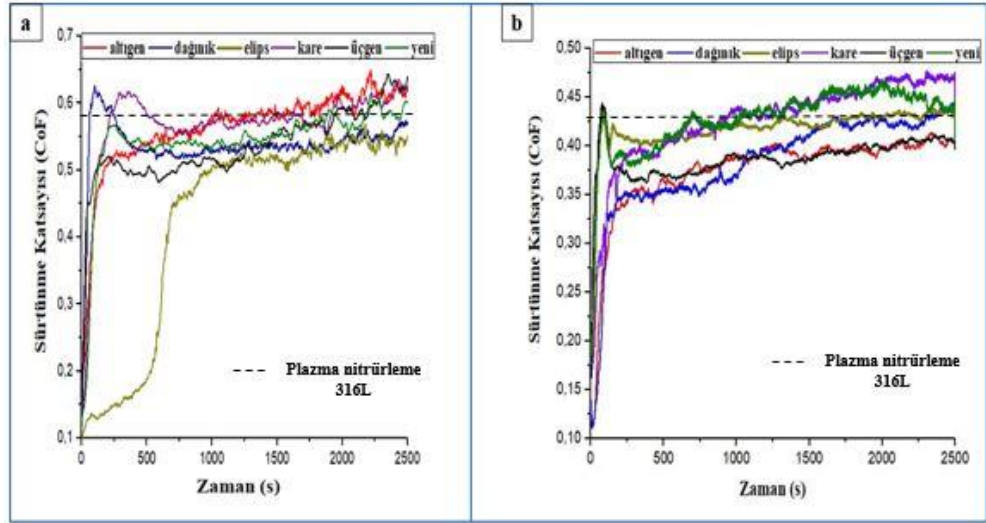
Şekil 4.13. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş 316L numunelerin sıvı aşınma sonrası profilometre görüntüleri
a. altıgen b. Dağınık c. elips d. kare e. üçgen f. Yeni (üçgen+elips)

Aynı alan yoğunluğu, derinlik ve farklı geometrik desenlerde üretilen 2.grup numunelerin yüzeylerine plazma nitrüleme işlemi yapıldıktan sonra kuru ve sıvı ortamdaki sürtünme katsayısı-zaman grafikleri Şekil 4.14'de verilmiştir. Herhangi yüzey işlemi görmemiş numunelerdeki gibi en düşük sürtünme katsayısı elips geometrik desenli numuneden $\mu \approx 0,43$ olarak ve en yüksek sürtünme katsayısı ise altıgen geometrik desenli numuneden

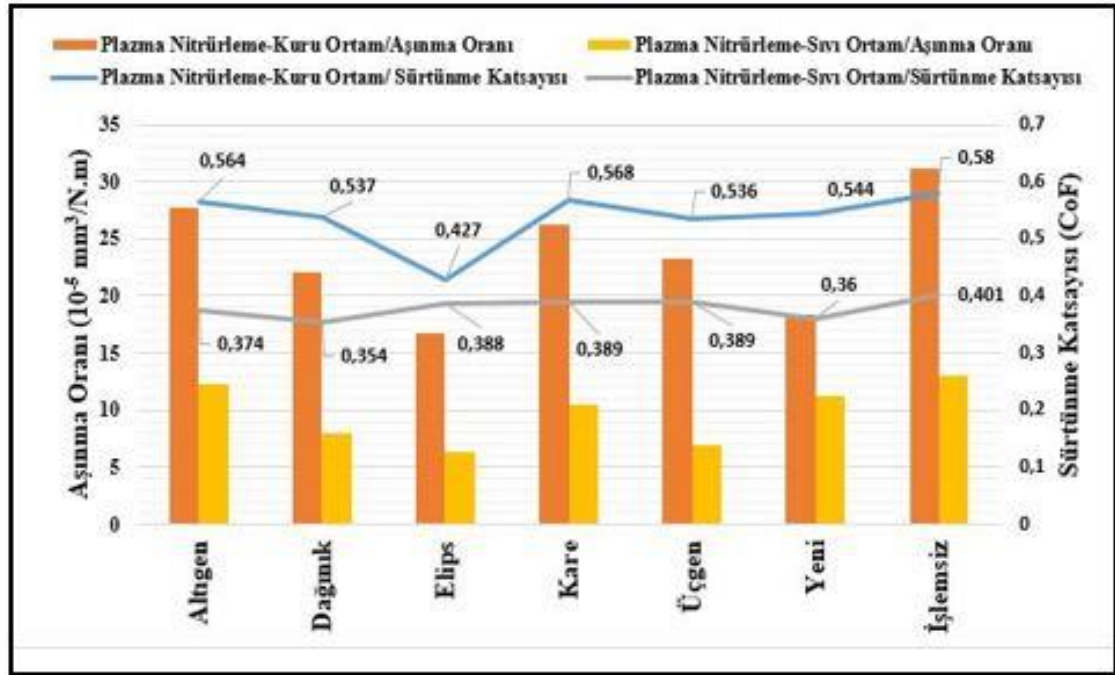
$\mu \approx 0,56$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.14a ile Şekil 4.8a karşılaştırıldığı zaman, plazma nitrürleme işlemi yapılmış numunelerin sürtünme katsayısı değerinde artış meydana gelmiştir. Staia ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, plazma işlemi sırasında yüzeyde oluşan bileşik tabakanın varlığından dolayı sürtünme katsayısının arttığını ifade etmişlerdir (Staia *et al.* 1999). Çizelge 4.4’de yüzey pürüzlülük değerinin plazma nitrürleme sonrasında arttığı gözlemlenmiştir. Taban malzeme ile anot arasındaki gerilim farkı arttıkça taban malzemedeki saçılma ve akabinde taban malzemedeki yoğunlaşma olayı meydana gelmektedir. Bu olay plazma nitrürleme sırasında çok sık bir şekilde meydana gelir. Bu nedenle malzeme çok fazla iyon bombardımanına maruz kalmaktadır. Bu durumda yüzey pürüzlülüğünü artıracaktır. Ayrıca, plazma işlemi kayma bantlarında artış meydana getirir ve yüzey pürüzlülüğünü artırır. Yüzey pürüzlülüğünün artması ile sürtünme katsayısında artış meydana gelir (Yetim 2009). Şekil 4.15’de plazma nitrürleme işlemi sonrasındaki aşınma değerleri ve sürtünme katsayısı (CoF)-zaman (s) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yüzey pürüzlülük değerleri

Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	SLM üretim sonrası	4,50
	SLM üretim sonrası parlatılmış	0,18
	Plazma nitrürleme işlemi görmüş	0,22



Şekil 4.14. SLM yöntemi ile üretilmiş numunelerin plazma nitrürleme işlemi sonrası sürtünme katsayısı-zaman grafikleri



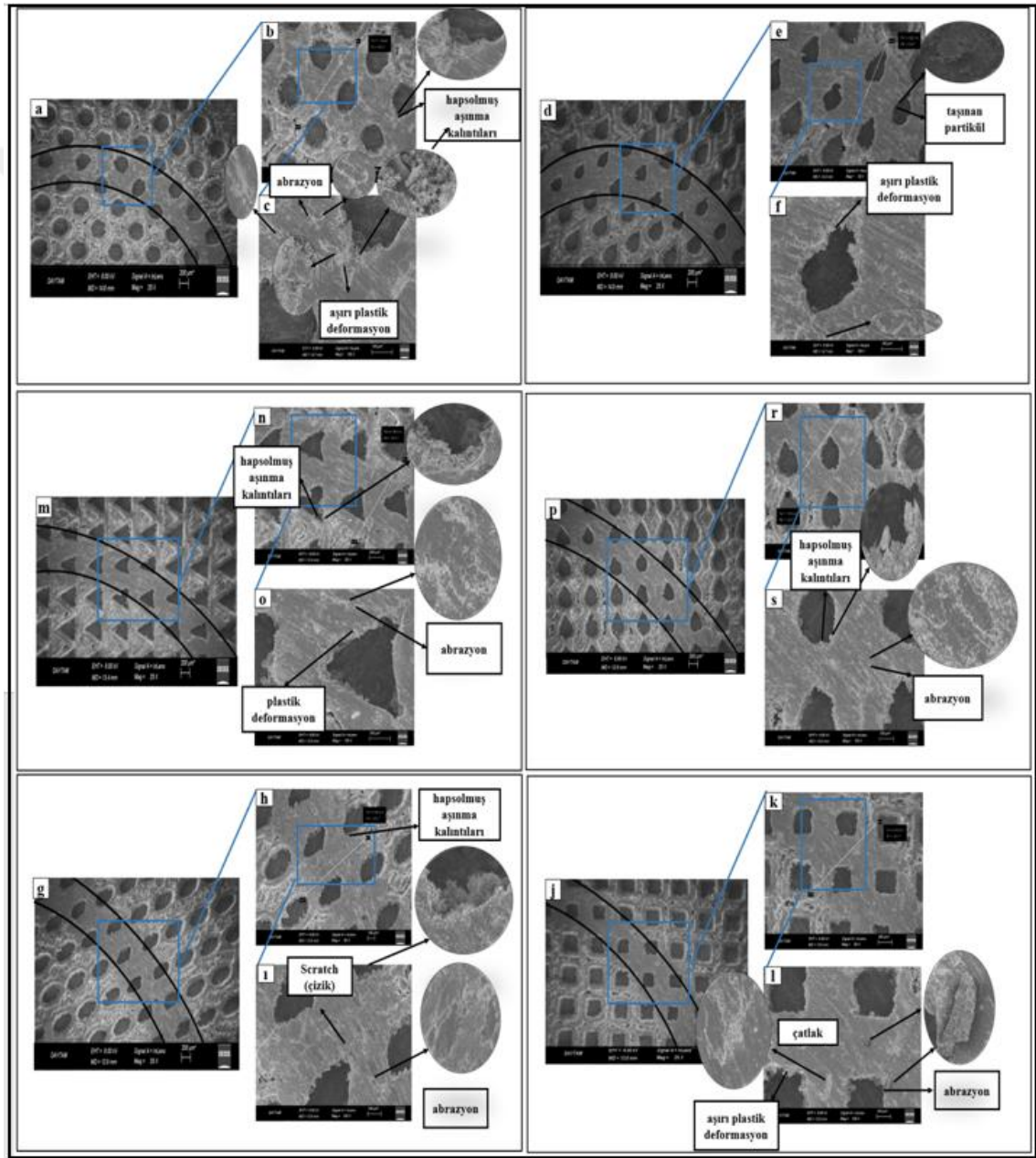
Şekil 4.15. SLM üretim yöntemi ile üretilen numunelerin plazma nitrürleme işlemi sonrasında kuru ve sıvı aşınma sonrasında sürtünme katsayısı ve aşınma oranları

Çizelge 4.5. SLM yöntemi ile üretilmiş geometrik desenli plazma nitrüleme yapılmış numunelerin aşınma oranları

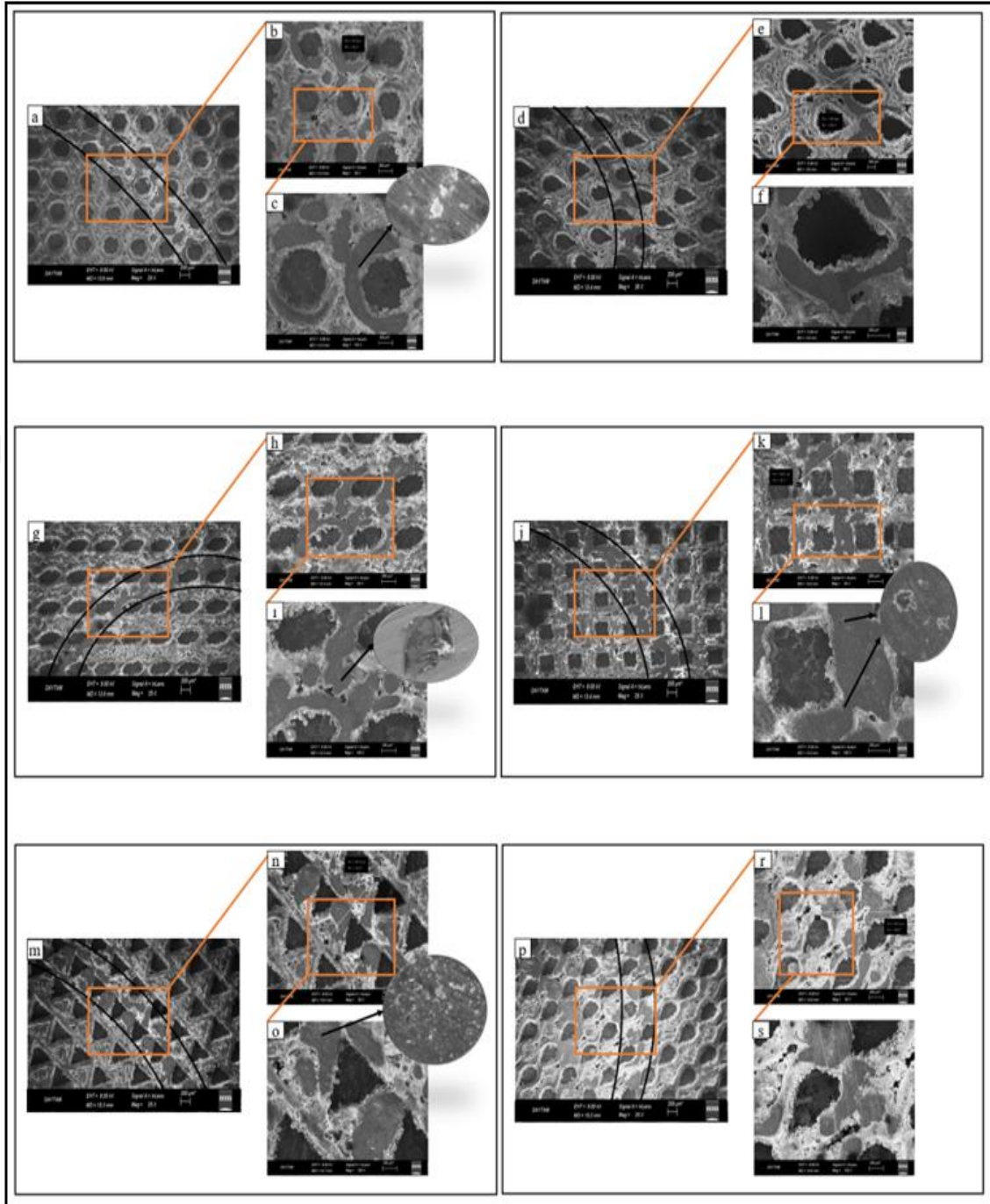
GEOMETRİLER	KURU		SIVI	
	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Oranı ($10^{-5}\text{mm}^3/\text{N.m}$)	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Oranı ($10^{-5}\text{mm}^3/\text{N.m}$)
Altıgen	0,564	27,754	0,374	12,315
Dağıncık	0,537	22,111	0,354	7,972
Elips	0,427	16,680	0,388	6,390
Kare	0,568	26,211	0,389	10,467
Üçgen	0,536	23,271	0,389	6,993
Yeni	0,544	18,350	0,360	11,246
İşlemsiz	0,58	31,14	0,401	13,05

316L paslanmaz çelik yüzeyine uygulanan plazma nitrüleme işlemi sonucunda tabakada s-fazı meydana gelmiştir. Plazma nitrüleme işlemi sonucunda meydana gelen bu faz sayesinde malzeme yüzeyinde sertlik değerinde artış meydana gelmiştir. Çizelge 4.1’de gösterildiği gibi plazma nitrüleme sonucunda malzemenin sertliğinde 2 kat artış meydana gelmiştir. Sertlik, malzemenin plastik deformasyona karşı oluşan direnç anlamına gelmektedir. Yani sertlik değeri arttıkça malzemenin aşınma direnci de artar. Ayrıca nitrüleme işleminde amaç, oluşan nitrür tabaka sayesinde taban malzeme ile aşındırıcı arasındaki adezyon oluşum ihtimalini düşürmektir. Çizelge 4.5 ve Şekil 4.14’de ayrıntılı bir şekilde aşınma oranları verilmiştir. Plazma nitrüleme işlemi sonucunda aşınma oranında ciddi oranda bir azalma meydana gelmiştir. Plazma nitrüleme sonucunda birbirine göre izafi olarak hareket eden aşındırıcı bilye ve malzeme arasına yağlayıcı olarak görev yapan bir sıvı madde girdiği zaman aşınma oranında ve sürtünme katsayısında azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de plazma nitrüleme işlemi görmüş numunelerin kuru ve sıvı ortamda aşınma sonucundaki yüzey morfolojilerini gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiği zaman, işlem görmemiş numunelere kıyasla daha az aşınma meydana geldiği açık bir şekilde görülmektedir. Özellikle kuru aşınma sonucunda, geometrik desenlerin içerisine hapsolmuş aşınma kalıntılarının mevcudiyeti görülmektedir. Bu durum geometrik desenlerin aşınma oranını azaltmasının sebebini oldukça açık bir şekilde göstermektedir.(Joshi *et al.* 2018). Geometrik desenler etrafında plastik deformasyonlar ve çizikler gözlenmektedir. Abraziv aşınmaya sebebiyet veren üçüncü partiküller de yüzey de gözlenmektedir. İşlem görmemiş numuneler ile karşılaştırıldığında aşınma izinin

bulunduğu yerde gri tonda izlerin varlığı gözlenmektedir. Bu gri tonda renkler s-fazını içeren beyaz tabakayı işaret etmektedir (Quinn 1992). Ayrıca, plazma nitrürlenmiş numuneler için sıvı ortamda yapılan aşınma sonucunda meydana gelen aşınma izlerinin belirsiz olduğu görülmüştür. Plazma nitrüleme işlemi görmüş ve sıvı ortamda aşınma testi gerçekleştirilen numunelerin en iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.



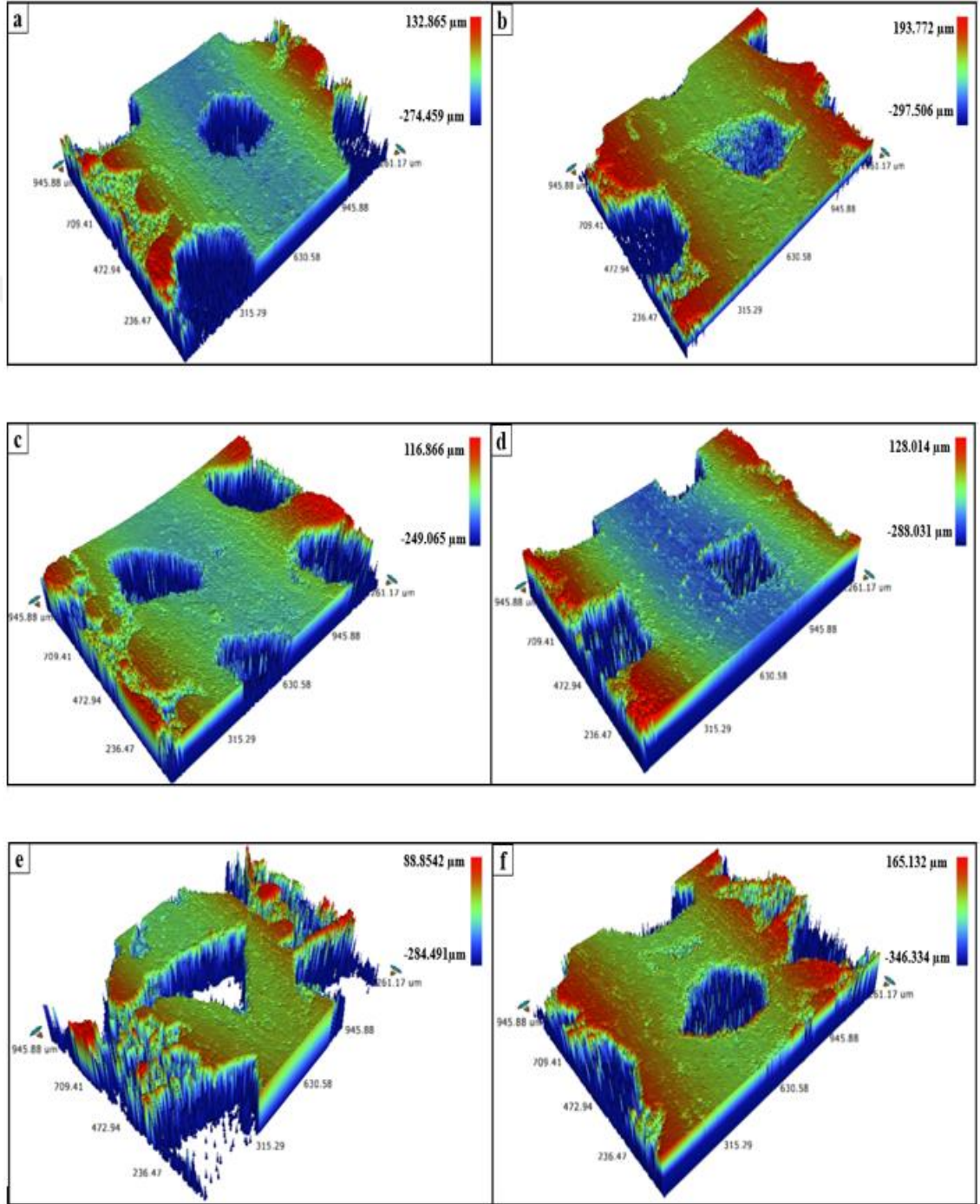
Şekil 4.16. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında kuru ortamda aşınma sonucu SEM görüntüleri



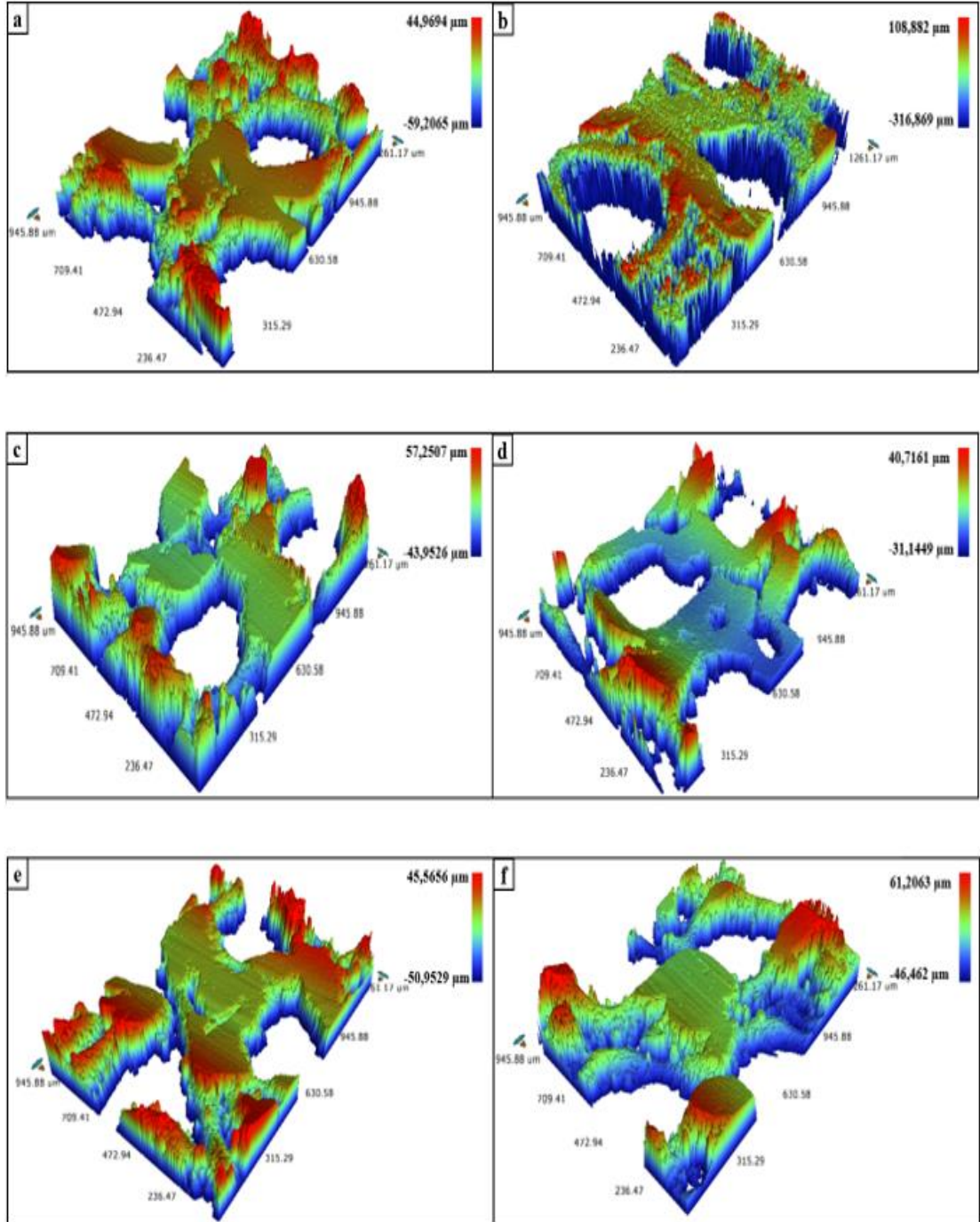
Şekil 4.17. 2. grup farklı geometrik desene sahip numunelerin plazma nitrülleme işlemi sonrasında sıvı ortamda aşınma sonucu SEM görüntüleri

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da plazma nitrülenmiş numunelerin kuru ve sıvı ortamda aşınmaları sonucunda profilometre görüntüleri verilmiştir. Plazma nitrülleme işlemi sonucunda yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiğinden dolayı işlem görmemiş

numunelerin görüntülerinden daha pürüzlü bir görüntü elde edilmiştir. Profilometre görüntülerinden elde edilen aşınma alanları ile aşınma oranları hesaplanmıştır.



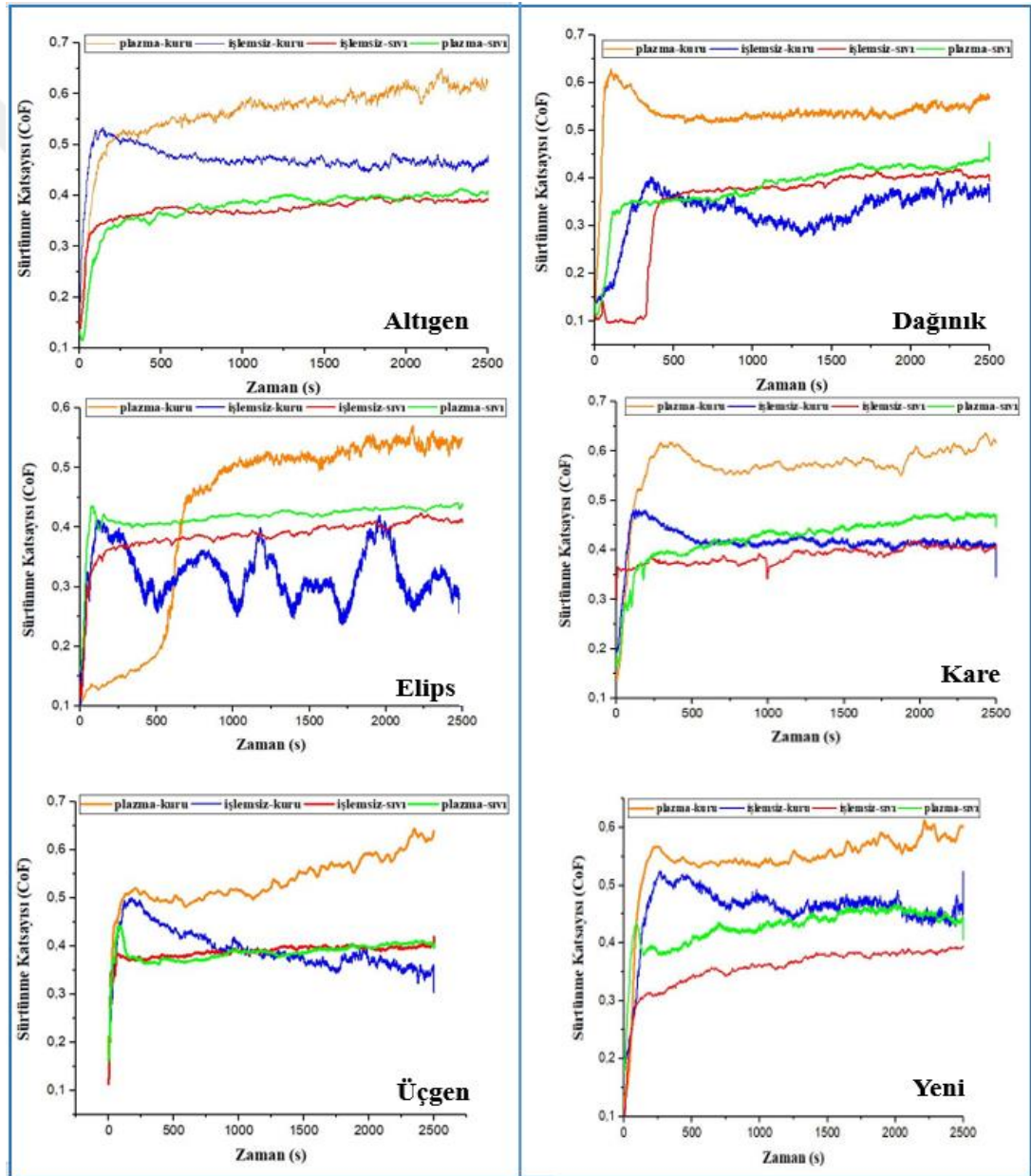
Şekil 4.18. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş 316L numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında kuru aşınma profilometre görüntüleri a. altıgen b. dağınık c. elips d. kare e. üçgen f. Yeni (üçgen+elips)



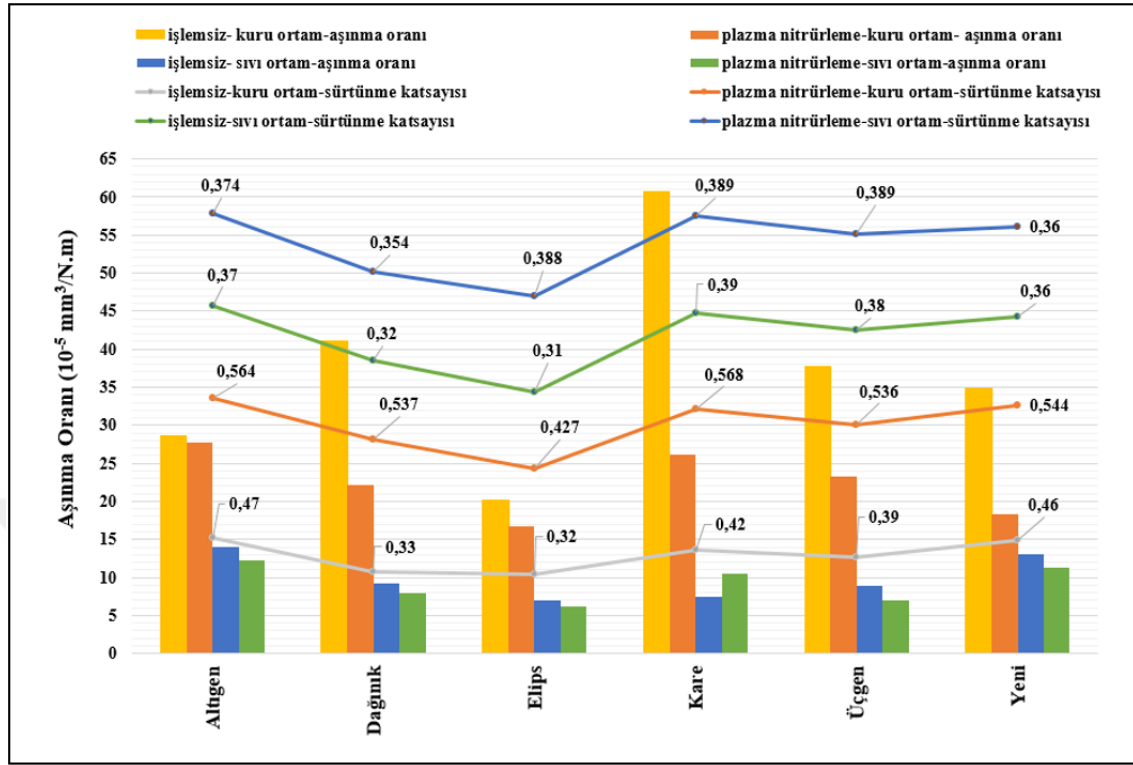
Şekil 4.19. %26 alan yoğunluğuna sahip SLM yöntemi ile üretilmiş numunelerin plazma nitrüleme işlemi sonrasında sıvı aşınma profilometre görüntüleri
a. altıgen b. dağınık c. elips d. kare e. üçgen f. Yeni (üçgen+elips)

Bu çalışma kapsamında üretimi yapılmış olan 316L paslanmaz çeliklerin aşınma sonrasındaki sürtünme katsayısının zamanla değişimi Şekil 4.20'de ve aşınma oranı ile

sürtünme katsayısı değerleri Şekil 4.21’de her geometrik desen için verilmiştir. Grafiklerin genelinde görüldüğü üzere, plazma nitrüleme işlemi sonrasında 316L paslanmaz çelik numunelerin sürtünme katsayısında bir artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi yüzey pürüzlülüğünün artışı ile açıklanmıştır. Grafiklerin geneline bakıldığında, plazma nitrüleme yapılmış kuru ortamdaki aşınma sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı meydana gelmektedir.



Şekil 4.20. SLM ile üretilmiş farklı geometrik desene sahip 316L paslanmaz çeliklerin sürtünme katsayısı-zaman grafikleri karşılaştırılması



Şekil 4.21. 316L paslanmaz çelik numunelerin işlem görmemiş durumu ve plazma nitrürlenmiş durumu sonucunda elde edilen aşınma oranı ve sürtünme katsayılarının karşılaştırılması

GEOMETRİLER	Sürtünme Katsayısı				Aşınma Oranı (10^{-5} mm ³ /N.m)			
	KURU		SIVI		KURU		SIVI	
	İşlemsiz	Plazma Nitrüleme	İşlemsiz	Plazma Nitrüleme	İşlemsiz	Plazma Nitrüleme	İşlemsiz	Plazma Nitrüleme
Altgen	0,47	0,564	0,37	0,374	28,55	27,754	14,05	12,315
Dağınık	0,33	0,537	0,32	0,354	41,17	22,111	9,29	7,972
Elips	0,32	0,427	0,31	0,388	20,07	16,680	6,98	6,390
Kare	0,42	0,568	0,39	0,389	60,67	26,211	7,39	10,467
Üçgen	0,39	0,536	0,38	0,389	37,78	23,271	8,94	6,993
Yeni	0,46	0,544	0,36	0,360	34,78	18,350	13,10	11,246

NUMUNELER	Yüzey Pürüzlülüğü (μ m)	Sertlik (HV _{0,01})
İşlemsiz	0,18	280-300
Plazma Nitrüleme İşlemi	0,22	580-600

Şekil 4.22. 316L paslanmaz çelik numunelere uygulanan farklı yüzey işlemleri sonrası deney sonucu

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günlük hayatımızın neredeyse her alanında kullanılan 316L paslanmaz çelik malzemenin üretimi yeni üretim yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme üretim yöntemi ile yapılmıştır. Seçici lazer ergitme yöntemi ile yüzeyde geometrik desenler oluşturulmuştur. Geometrik desenli numune üretimindeki amaç tribolojik özellikleri iyileştirmektir. Ayrıca, yüzey işlemlerinden biri olan plazma nitrürleme işlemi ile aşınma dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1.grup %6,6 ve %26 alan yoğunluğuna sahip 316L paslanmaz çelik numunelerin üretimi ile ilgili elde edilen sonuçlar

- Bilgisayar ortamında oluşturulan tasarımlarda mevcut olan ölçüler ile SLM üretim sonucundaki numunelerin ölçüleri benzerlik göstermiştir. Çukur çapı, derinlik, uzaklık gibi parametrelerde küçük farklılıklar oluşmasının sebebi üretimin toz esaslı olmasından ve mikron boyutunda ölçülerle çalışılmasından kaynaklanmaktadır. Oluşturmak istenilen çukurların geometrik desenleri istenildiği gibi üretilmiştir fakatsadece altıgen geometrisinin üretiminde cihazın üretim şeklinden dolayı biraz farklılık oluşmuştur.
- Yüzeyde çukurlar oluşturmak için alan yoğunluğu, çukur derinliği, geometrik desen, desen yönlenmesi vb. gibi kullanılan birçok parametre vardır. Bu grup numune de alan yoğunluğunu değiştirip diğer parametreler aynı tutulmuştur. %6,6 ve %26 alan yoğunluğuna sahip daire geometrik desenler üretilmiş olup, alan yoğunluğunun artması ile aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir.
- En fazla kütle kaybı %6,6 alan yoğunluğuna sahip numunede meydana gelmiştir.
- Sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırıldığı zaman, %6,6 alan yoğunluğuna sahip numunenin sürtünme katsayısı değeri yaklaşık olarak $\mu=0,7$, %26 alan yoğunluğuna sahip numunenin sürtünme katsayısı değeri ise $\mu=0,5$ olarak bulunmuştur.

2.grup 316L paslanmaz çelik numunelerin üretimi ile ilgili elde edilen sonuçlar

- 2. Grup numuneler kuru ve sıvı ortamda aşınma testine tabii tutulmuştur. Sürtünme anında meydana gelen adeziv bağlar aşınma oranında artışa sebep olmaktadır. Birbirine göre izafi hareket eden malzemeler arasında herhangi bir yağlayıcının mevcudiyeti durumunda, katı-katı temas engellenir ve daha düşük sürtünme katsayısı değeri vermektedir. Bu nedenle kuru ortamda yapılan aşınma sonucunda hem aşınma oranı hem de sürtünme katsayısı değeri daha fazla çıkmıştır.
- Kuru ortamda altıgen, dağınık model, elips, kare, üçgen ve yeni modele yapılan aşınma sonucunda en düşük sürtünme katsayısı değerini elips geometrik desen vermiştir. Elips geometrik desene hem keskin köşelerin olmayışı hem de aşınma kalıntılarını hapsetme yeteneğinin diğer geometrilere göre fazla olmasından dolayı düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı davranışı sergilemiştir.
- Kuru ortamda altıgen, dağınık model, elips, kare, üçgen ve yeni modele yapılan aşınma sonucunda kare, üçgen, altıgen gibi geometrik desenler en yüksek sürtünme katsayısı değeri vermişlerdir. Bu geometrik desenlerin ortak noktası keskin köşelerin mevcudiyetidir. Köşe noktalarında gerilme artışı meydana gelmekte ve böylece sürtünme katsayısı ve aşınma oranında artış meydana gelmektedir.
- Sıvı ortamda altıgen, dağınık model, elips, kare, üçgen ve yeni modele yapılan aşınma sonucunda en düşük sürtünme katsayısı değerini elips geometrik desen vermiştir. Elips geometrik desen, sıvı ortamda bir nevi yüksek yataklama görevi görmektedir. Aşındırıcı bilyenin geometriye giriş-çıkış sırasında, çıkış kenarında basınç artışı meydana gelirken giriş kenarında basınç da düşüş meydana gelir. Eğer çıkış kenarındaki basınç artışı giriş kenarındaki basınç düşüşünden fazla ise pozitif net hidrodinamik fayda oluşur. Elips geometrik desen, hidrodinamik basınç artışına sebebiyet vererek sürtünme katsayısı değerinde azalmaya sebep olur.
- Sıvı ortamda altıgen, dağınık model, elips, kare, üçgen ve yeni modele yapılan aşınma sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı değerini keskin köşelere sahip olan geometriler vermiştir.
- SEM incelemelerine göre, aşınma sonucu meydana gelen aşınma izi ile geometrik desenlerin meydana getirdiği aşınma oranları arasında paralellik gözlenmiştir.

- Kuru ortamda yapılan aşınma sonucunda, yüzeydeki geometrik desenlerin şeklinde oldukça fazla değişim gözlenmiştir. Fakat sıvı ortamda yapılan aşınma sonucunda yüzeylerinde değişim gözlenmemekle birlikte aşınma izi de çok net belirgin değildir.
- Kuru ve sıvı ortamda yapılan aşınma testinde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri de aşındırıcı bilyenin geometrik desenin hangi noktasından giriş-çıkış yaptığıdır. Çünkü giriş-çıkış köşelerinin uzunluğu, keskin köşe olup olmaması gibi durumlar aşınma oranı üzerinde oldukça fazla etkilidir.

2.grup 316L paslanmaz çelik numunelerin yüzeylerine yapılan plazma nitrürleme işlemi ile elde edilen sonuçlar

- Numunelerin üzerine yapılan plazma nitrürleme işlemi ile yüzeyde morfolojik bir tabaka oluşturulmuştur. Oluşan bu tabaka içerisinde s-fazının varlığı gözlemlenmiştir. İşlem sıcaklığı ve süresinden dolayı henüz s-fazına dönüşmemiş ostenit fazları mevcuttur. Zaten s-fazı yeni bir faz değil, ostenit fazının azot ile doymuş bir halidir.
- Nitrürleme sonucunda meydana gelen s-fazı sayesinde malzemenin yüzeyinde 2 kat kadar sertlik artışı meydana gelmiştir. S-fazının sertliği artırmasının sebebi, ara yer atomu olan azot atomlarının ostenit kafes yapısına difüze olmaya çalışırken kafes yapısında çarpılmalar meydana getirmesidir. Malzemenin yüzeyinden iç kısma doğru alınan ölçümlerde sertlik değerinde azalma meydana gelmiştir.
- Plazma nitrürleme işlemi sonucunda bütün geometrilerde elde edilen sürtünme katsayısı değeri, işlem görmemiş numunelere göre artmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerindeki artış sürtünme katsayısı değerinde de artışa sebep olmuştur.
- Plazma nitrürleme yüzey işlemi yapılmış altıgen, dağınık model, elips, kare, üçgen ve yeni modele yapılan kuru ortamda aşınma sonucunda en düşük sürtünme katsayısı değeri elips geometrik desenden elde edilmiştir.
- Plazma nitrürleme yüzey işlemi yapılmış altıgen, dağınık model, elips, kare, üçgen ve yeni modele yapılan sıvı ortamda aşınma sonucunda en yüksek sürtünme katsayısı değeri keskin köşelere sahip olan geometrilerden elde edilmiştir.

- Plazma nitrüleme işlemi yapılmış numunelere ait en düşük aşınma oranı elips geometrik desenden, en yüksek aşınma oranı ise altıgen geometrik desenden elde edilmiştir.
- İşlemsiz numuneler ile plazma nitrüleme işlemi yapılmış numunelerin aşınma oranları karşılaştırıldığı zaman, plazma işlemi sonucunda yüzey sertliğinde artış meydana gelmiştir. Yüzey sertliğinin artması plastik deformasyona karşı direncin artması anlamına gelmektedir. Bu yüzden sertlik değeri arttıkça aşınma oranı azalmıştır.
- Yeni ve dağınık model karşılaştırıldığı zaman, geometrik desen şekli olarak her iki numune de aynıdır. Fakat örgü şekli yani numune üzerine geometrilerin yerleşme şekli farklıdır. Aşınma oranlarına bakıldığı zaman, kuru ortamda yeni geometrik desenin örgüsü daha iyi sonuç verirken sıvı ortamda dağınık model daha iyi sonuç vermiştir.

Bu çalışmada, yüzeyde oluşturulan geometrik desenlerin tribolojik etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada yapılamayan ancak daha sonra yapılması halinde ilgili çalışma alanına katkı yapabilecek çalışma önerileri aşağıda listelenmiştir.

- Yapılan çalışmada sadece geometrik desenin şekli ve alan yoğunluğuna ait parametreler üzerinde durulmuştur. Oysaki yüzey mühendisliğinin bir alanı olan yüzey desenleme çalışmalarında birçok parametre mevcuttur. Daha sonraki çalışmalarda çukur derinliği, geometrik desenler arası mesafe, farklı geometrik modeller oluşturularak devam edilebilir.
- Bu çalışmada 316 kullanıldı farklı malzemeler kullanılabilir.
- SBF'den farklı aşınma ortamlarında yapılabilir.
- Havacılık ve uzay uygulamaları için vakum ortamında yapılabilir.
- Bu çalışmada numuneler, pin-on-disk aşınma testi kullanılmıştır doğrusal aşınma testine de tabii tutulabilir.
- Teorik analizler vs.

KAYNAKLAR

- Abedi, H.R., Salehi, M., Yazdkhasti, M. and Hemmasian-E, A., 2010. Effect of high temperature post-oxidizing on tribological and corrosion behavior of plasma nitrided AISI 316 austenitic stainless steel. *Vacuum*, 85(3), 443-447.
- Akkurt, M., 2012. *Makine Elemanları*, Birsen Yayınevi, 757, İstanbul
- Anno, J.N., Walowit, J. A. and Allen, C. M., 1968. Micro asperity lubrication. *Journal of Lubrication Technology*, 90(2), 351-355.
- Anonim., 2018. Web Sitesi: <http://adn.dpu.edu.tr/pluginfile.php/10219/course/overviewfiles/MEI%20GENEL.pdf.forcedownloadforce=1> (10.04.2019)
- Anonymous, 2018. Additive Manufacturing: Selective Laser Melting. <http://additivemanufacturing.com/basics/>, (09.05.2019).
- Archard, J.F., 1980. Wear The Oryand Mechanisms, Part. *Wear Control Handbook*, Eds: M.B. Peterson and W.O. Winer. American Society of Mechanical Engineers, New York, s-s.
- Archard, J. F., 1980. Wear theory and mechanisms. *Wear control handbook*, 58.
- Baranowska, J. And Arnold, B., 2006. Corrosion resistance of nitrided layers on austenitic steel. *Surface and Coatings Technology*, 200(22-23), 6623-6628.
- Bayrak, Ö., 2007. Plazma ile Nitrülenmiş CoCrMo İmplant Malzemenin Yapısal ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bell T., 1991. *Metals and Metaterials* 7, sh. 478-485.
- Bhushan, B., 2000. *Modern Tribology Handbook*, Two Volume Set. CRC Press, 1760 p, Italy
- Bhushan, B., 2001. *Modern Tribology Handbook*. 1. Principles of Tribology. CRC Press 1728 p, Boca Raton.
- Bhushan, B., 2001. Nano-to microscale wear and mechanical characterization using scanning probe microscopy. *Wear*, 251(1-12), 1105-1123.
- Bhushan, B., 2000. *Modern tribology handbook*, two volume set. CRC press.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P. and Knight, W. A., 2001. *Product Design For Manufacture And Assembly*, Revised and Expanded. 2nded., CRC Press, 720 p, Boca Raton.
- Borgioli, F., Fossati, A., Galvanetto, E. and Bacci, T., 2005. Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature. *Surface and Coatings Technology*, 200(7), 2474-2480.
- Borgioli, F., Fossati, A., Galvanetto, E., Bacci, T. And Pradelli, G., 2006. Glow discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: Influence of treatment pressure. *Surface and Coatings Technology*, 200(18-19), 5505-5513.
- Boz, M., 2003. Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme-Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bowden, F. P., & Tabor, D., 1966. Friction, lubrication and wear: a survey of work during the last decade. *British Journal of Applied Physics*, 17(12), 1521.
- Brenner, G., Al-Zoubi, A., Mukinovic, M., Schwarze, H. and Swoboda, S., 2007. Numerical simulation of surface roughness effects in laminar lubrication using the lattice-Boltzmann method. *Journal of Tribology*, 129(3), 603-610.

- Brizmer, V., Kligerman, Y., and Etsion, I., 2003. A laser surface textured paralel thrust bearing. *Tribology Transactions*, 46(3), 397-403.
- Buckley, D. H., 2000. *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication* (Vol. 5). Elsevier Science Publishing Company, 630p, Amsterdam, The Netherlands.
- Budinski, K.G., 1988. *Surface Engineering for Wear Resistance. (Retro active Coverage)*. Prentice-Hall, Inc, 420 p, Engle wood Cliffs, New Jersey 07632, United States,
- Chiou, Y C., Kato, K. And Kayaba, T., 1985. Effect of normal stiffness in loading system on wear of carbon steel—part 1:severe-mild wear transition. *Journal of Tribology*, 107(4), 491-495.
- Cotell, C.M. and Sprague, J.A., 1994. Preface. *ASM Handbook Vol 5 – Surface Engineering* ASM International, USA, v.
- Cotell, C. M., Sprague, J. A. And Smidt Jr, F. A., 1994. *ASM Handbook Vol. 5: Surface Engineering. Surface Engineering of Aluminum and Aluminum Alloys*, 784-804.
- Czerwiec, T., Renevier, N., and Michel, H., 2000. Low-temperature plasma-assisted nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 131(1-3), 267-277.
- Çöl, M. N., 2013. Si₃N₄ ve CNT Nanopartiküllerin Yağ Katkısı Olarak AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- de Kraker, A., van Ostayen, R. A., Van Beek, A. And Rixen, D. J., 2007. A multi scale method modeling surface texture effects. *Journal of Tribology*, 129(2), 221-230.
- Demir, A., 2012. Farklı Çeliklerin Yorulma Aşınmasında Malzeme Sertliğinin Aşınma Üzerine Etkisi (Yüksek Lisans Tezi), Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Edenhofer, B., 1974. *Physical and Metallurgical Aspects of Ionitriding. Pt. 1. Heat Treatment Metals*, (1), 23-28.
- Ekinci, A.Ş., 2007. Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Etsion, I. And Burstein, L., 1996. A model for mechanical seals with regular micro surface structure. *Tribology Transactions*, 39(3), 677-683.
- Etsion, I., 1997. Increasing mechanical seal life with laser-textured seal faces. In *Proceedings of the 15th International Conf on Fluid Sealing*, BHR Group, Maastricht, The Netherlands.
- Farrow, M., 1986. Selecting wear resistance surfaces. *International Conference on Metallurgical coatings (ICMC 86)*, San Diego, USA.
- Fink, M., 1962. *Technische Mittlungen* 55(7), 325-331.
- Fossati, A., Borgioli, F., Galvanetto, E. And Bacci, T., 2006. Corrosion resistance properties of glow-discharge nitrided AISI 316L austenitic stainless steel in NaCl solutions. *Corrosion Science*, 48(6), 1513-1527.
- Frank K, D. Yogi G., Bela I. S., 2005. *The CRC Handbook of Mechanical Engineering*, CRC Press LLC (pdf form), 3.10, 129-137, 2005
- Fu, T., Wen, C. S., Lu, J., Zhou, Y. M., Ma, S. G., Dong, B. H. and Liu, B. G., 2012. Sol-gel derived TiO₂ coating on plasma nitrided 316L stainless steel. *Vacuum*, 86(9), 1402-1407.
- Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S. M., & Costa, H. L., 2017. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*, 372, 21-41.

- Gediktaş, M., 1968. Sürtünme Malzemelerinin Deneysel Tayini. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
- Gemalmayan, N., 1984. Sürtünme Malzemelerinin Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. (Doktora Tezi) Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- German, R. M., 2007. Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri. Çeviri Editörleri, Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu N., Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 60-80.
- Gontijo, L. C., Machado, R., Miola, E. J., Casteletti, L. C., Alcântara, N. G. And Nascente, P. A. P., 2006. Study of the S phase formed on plasma-nitrided AISI 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 431(1-2), 315-321.
- Halling, J., 1975. *Principles of Tribology*. Macmillan, 401 p, London.
- Hamilton, D. B., Walowit, J. A. And Allen, C. M., 1966. A theory of lubrication by micro irregularities. *Journal of Basic Engineering*, 88(1), 177-185.
- Hawkins, A. E., 1993. *The Shape of Powder-Particle Outlines*. Research Studies Press, 115 p, Taunton.
- Hochman, R. F., Solnick-Legg, H., and Legg, K. O., 1988. *Ion Implantation and Plasma Assisted Processes: Proceedings of the Conference on Ion Implantation and Plasma Assisted Processes for Industrial Applications*, Atlanta, Georgia.
- Hutchings, I. M., 1992. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Butter worth-Heinemann, 280 p, Great Britain, 78-84.
- Hutchings, I. and Shipway, P., 2017. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2nded., Butter worth-Heinemann, 412p, 45-78.
- http://www.kadimdostlar.com/Bilimsel_Gelismeler_Sosyal_ve_Fen_Bilimleri_f120/Triboloji_Nedir_Surtunme_Asinma_Ve_Yaglama_Kon_t57860.html
- Joshi, G. S., Putignano, C., Gaudioso, C., Stark, T., Kiedrowski, T., Ancona, A. and Carbone, G., 2018. Effects of the micro surface texturing in lubricated non-conformal point contacts. *Tribology International*, 127, 296-301.
- Karadeniz, S., 1990. *Plazma tekniği*. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Yayın, 137.
- Karakılınç U., Yalçın B. ve Ergene B., 2019. Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatla kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri. *Politeknik Dergisi*, doi: 10.2339/politeknik.423707
- Kligerman, Y. and Etsion, I., 2001. Analysis of the hydrodynamic effects in a surface textured circumferential gas seal. *Tribology Transactions*, 44(3), 472-478.
- Koç E., 2017. *Makina Elemanları Cilt 2*, 5. Basım, Nobel Kitapevi, 442 s, Ankara.
- Kovacı, H., 2016. *Plazma Nitrüleme, DLC Kaplama ve Dupleks Yüzey İşlemlerinin AISI 4140 Çeliklerinin Çeki ve Bası Aşırı Yükleri Altındaki Yorulma Çatlak İlerleme Davranışı Üzerindeki Etkileri*. (Doktora Tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kreith, F., Goswami, D. Y. And Sandor, I. B., 2005. *The CRC Handbook of Mechanical Engineering*, CRC Press LLC, 3.10, 129-137.
- Kurt, H., 2010. *Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Lang, O. R., 1982. Geschichtedes Gleitlagers: die Kenntnison der Vergan geheitund vom Zustand der Erde Gereicht dem Menschen geist zur Zierdeund Mahrung: Leonardo da Vinci Codice Atlantico. Daimler Benz.
- Lestari, W. D., Jamari, J., & Bayuseno, A. P., 2017. The von Mises stress distribution on the surface of UHMWPE with texture-shaped variation in the presence of normal load and dry sliding contact. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1831, No. 1, p. 020055). AIP Publishing.
- Li, C. X. And Bell, T., 2004. Sliding wear properties of active screen plasma nitrided 316 austenitic stainless steel. *Wear*, 256(11-12), 1144-1152.
- Li, G. J., Peng, Q., Li, C., Wang, Y., Gao, J., Chen, S. Y., Wang, J. And Shen, B. L., 2008. Effect of DC plasma nitriding temperature on micro structure and dry-sliding wear properties of 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 202(12), 2749-2754.
- Li, X. Y., Buhagiar, J. And Dong, H., 2010. Characterisation of dual S phase layer on plasma carbonitrided biomedical austenitic stainless steels. *Surface Engineering*, 26(1-2), 67-73.
- Matuschka A.G. 1980. Boronizing, Carl Hanser Verlag München Wien, ISBN 3-446-13176-0, p.51
- Menezes, P. L., Nosonovsky, M., Ingole, S. P., Kailas, S. V. and Lovell, M. R., 2013. *Tribology for Scientists and Engineers* (248 p), Springer, New York.
- Moore D. F., 1975. *Principles and Applications of Tribology*, Pergamon Press, 1st ed., 400 p, Oxford.
- Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y., Zhu, D. And Wang, Q. J., 2008. Micro-textures in concentrated conformal-contact lubrication: Effects of texture bottom shape and surface relative motion. *Tribology Letters*, 29, 241–252.
- Olçay, P. Ö., 2014. *Triboloji ve Yağ Biliminin Günlük Hayatımızdaki Yeri ve Önemi*. (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tekirdağ.
- Özdemir, U. ve Erten, M.,2003. Plazma (İyon) Nitrüleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Journal of Aeronautic and Space Technologies*, 1(2), 41-48.
- Pettersson, U. and Jacobson, S., 2003. Influence of surface texture on boundary lubricated sliding contacts. *Tribology International*, 36(11), 857-864.
- Quinn, T.F.J., 1992. Oxidation wear in: *Friction, lubrication and wear technology*, ASM handbook, 18, 280-289
- Raeymaekers, B., Etsion, I. and Talke, F. E., 2007. A model for magnetic tape/guide friction reduction by laser surface texturing. *Tribology Letters*, 28(1), 9.
- Rauscher, H., Perucca, M. and Buyle, G., 2010. *Plasma Technology For Hyper functional Surfaces: Food, Biomedical And Textile Applications*. Wiley-VCH, Verlag GmbH&Co. KGaA, 428 p, Weinheim.
- Ronen, A., Etsion, I. And Kligerman, Y., 2001. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components. *Tribology Transactions*, 44(3), 359-366.
- Sandal, R., 2009. *Al-Al₂O₃ Kompozit Malzeme Üretimi ve Difüzyon Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sarıkaya, Ö., 2007. *Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri*. 320 p, Sakarya

- Shen, C. And Khonsari, M. M., 2013. Effect of dimple's internal structure on hydrodynamic lubrication. *Tribology Letters*, 52(3), 415–430.
- Shen, C. And Khonsari, M. M., 2015. Numerical optimization of texture shape for parallel surfaces under unidirectional and bidirectional sliding. *Tribology International*, 82, 1–11.
- Simchi, A., 2004. The role of particle size on the laser sintering of iron powder. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35(5), 937-948.
- Singh, V., Marchev, K., Cooper, C. V. And Meletis, E. I., 2002. Intensified plasma-assisted nitriding of AISI 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 160(2-3), 249-258.
- Soydan, Y. ve Ulukan L., 2013. Temel Triboloji: Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi. *Tagem Kopisan*, 357 s, Sakarya.
- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A.W., 2005. *Engineering Tribology*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, 832 p, USA.
- Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., 2014. *Engineering Tribology*, 4th ed., Butterworth Heinemann, 884 p, USA.
- Stacia, M. H., Fragieli, A., Machado, J., Brühl, S. P., Feugeas J., & Gomez, B. J. (1999). Tribological properties of pulsed ion nitrided AISI 4140 steel. *Surface engineering*, 15(4), 313-316.
- Stolarski, T. A., 1999. *Tribology in Machine Design*, 1st ed., Butterworth-Heinemann 298 p, USA.
- Strafford, K. N., 1994. *Surface engineering: processes and applications*. CRC Press, 349 p.
- Suh, M. S., Chae, Y. H., Kim, S. S., Hinoki, T. and Kohyama, A., 2010. Effect of geometrical parameters in micro-grooved cross hatch pattern under lubricated sliding friction. *Tribology International*, 43(8), 1508-1517.
- Sun, Q., Hu, T., Fan, H., Zhang, Y. and Hu, L., 2015. Dry sliding wear behavior of TC11 alloy at 500° C: influence of laser surface texturing. *Tribology International*, 92, 136-145.
- Sun, Y. and Bell, T., 1998. Sliding wear characteristics of low temperature plasma nitrided 316 austenitic stainless steel. *Wear*, 218(1), 34-42.
- Sutton, A. T., Kriewall, C. S., Leu, M. C. And Newkirk, J. W., 2016. Powders for additive manufacturing processes: characterization technique and effects on part properties. In *Proc. Solid Freeform Fabrication 27th Annu. Int. Solid Free form Fabrication Symp. Addit. Manuf. Conf.* 1004-1030.
- Şen, O., 2005. *TiO₂ Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Tabor, D., 1964. *The Friction and Lubrication of Solids*. Clarendon Press.
- Takadom, J., 2013. *Materials and surface engineering in tribology*. Wiley-VCH, Verlag GmbH&Co. KGaA, 240 p, Weinheim.
- Totten, G. E. And Liang, H., 2004. *Surface Modification and Mechanisms: Friction, Stress, and Reaction Engineering*. CRC Press, 800 p, ...
- Totten, G. E. And Howes, M. A., 1997. *Distortion of Heat Treated Components, Part 5, Steel Heat Treatment Handbook*, Ed: George E. Totten, Maurice A.H. Howes Marcel Dekker, Inc, New York, 251-292

- TPU Corporate Portal (Tomsk Polytechnic University), "Wear", <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/t/TARASOVSYU/eng/tribology/Tab/Lecture%208%20Wear.pdf> (Erisim tarihi: 11 Haziran 2017)
- Turaliođlu, K., 2018. Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Kendinden Yağlayıcı Yüzeylerin Tribolojik Davranışların Belirlenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Uddin, M. S. and Liu, Y. W., 2016. Design and optimization of a new geometric texture shape for the enhancement of hydrodynamic lubrication performance of parallel slider surfaces. *Bio surface and Biotribology*, 2(2), 59-69.
- Uzuner, H., 2001. Polimerlerin sürtünme ve aşınma davranışları. (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Wang, X., Kato, K., Adachi, K. and Aizawa, K., 2001. The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed. *Tribology International*, 34(10), 703-711.
- Wang, X., Kato, K., Adachi, K. and Aizawa, K., 2003. Load carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water. *Tribology International*, 36(3), 189-197.
- Wu, W., Li, X., Chen, J. and Dong, H., 2009. Design and characterisation of an advanced duplex system based on carbon S-phase case and GiC coatings for 316LVM austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 203(9), 1273-1280.
- Yalçın, B., Karakılınç, U., Ergene, B., 2019. Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri. *Politeknik Dergisi*, (), 0-0. DOI: 10.2339/politeknik.423707.
- Yalçınkaya, F., 2018. Toz Metalurji Metodu İle Üretilen Alüminyum Matrisli Ve Alümina Takviyeli Kompozit Malzemenin Abrasiv Aşınma Davranışının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yang, Y., Zhu, Y., Khonsari, M. M. and Yang, H., 2019. Wear anisotropy of selective laser melted 316L stainless steel. *Wear*, 428, 376-386.
- Yazıcı, M., Kovacı, H., Yetim, A. F., & Çelik, A., 2018. Structural, mechanical and tribological properties of Ti and TiN coatings on 316L stainless steel. *Ceramics International*, 44(12), 14195-14201.
- Yetim, A. F., Yıldız, F., Alsarın, A., & Celik, A., 2008. Surface modification of 316L stainless steel with plasma nitriding. *Kovove Materialy*, 46(2), 105.
- Yetim, A. F., 2009. Biyomalzeme Olarak Kullanılan AISI316L Paslanmaz Çelik Ve Ti6Al4V Alaşımının Plazma İle Nitrürasyon Davranışı, Ti-DLC İnce Film Kaplama İle Karşılaştırılması. (Doktora tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yetim, A. F., Yıldız, F., Alsarın, A., & Celik, A., 2008. Surface modification of 316L stainless steel with plasma nitriding. *Kovove Materialy*, 46(2), 105.
- Yıldız, F., Yetim, A. F., Alsarın, A., Celik, A., & Kaymaz, I., 2011. Fretting fatigue properties of plasma nitrided AISI 316 L stainless steel: experiments and finite element analysis. *Tribology International*, 44(12), 1979-1986.
- Yıldız, T., Gür, A.K., 2006. Aşınma sistemleri. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 86-91.

- Yılmaz, İ. Ö., ve Toktaş, G., 2013. Otomotiv sac şekillendirme kalıplarında kullanılan malzemelerin tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 54(647), 47-52.
- Yu, H., Deng, H., Huang, W. and Wang, X., 2011. The effect of dimple shapes on friction of paralel surfaces. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 225(8), 693-703.
- Yu, H., Wang, X. and Zhou, F., 2010. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces. *Tribology Letters*, 37(2), 123-130.
- Yurtkuran, E., 2011. T/M ile Üretilmiş Alüminyum Esaslı Malzemelerin Alaşım Elementleri ve Takviye Elemanı İçermelerine Bağlı Tel Erezyonda İşlenebilirliklerinin Araştırılması, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Zum Gahr, K.H., 1987. *Micro structure and Wear of Materials*, Tribology Series, Vol. 10, Elsevier Science Publishing Company, 559p, Amsterdam.

ÖZGEÇMİŞ

25 Şubat 1994 yılında Tercan’da doğdu. İlköğrenimini Ömer Nasuhi Bilmen İlkokulunda, orta öğrenimini Gazi Ahmet Muhtar Paşa okulunda ve lise öğrenimini Erzurum Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2017 yılında mezun oldu. 2014 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2018 yılında mezun oldu. 2017 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2019 yılı Mart ayı itibariyle Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.