



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLM) YÖNTEMİ KULLANILARAK ELDE
EDİLEN KENDİNDEN YAĞLAYICI YÜZEYLERİN TRİBOLOJİK
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Kerem TURALIOĞLU

**Y.Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof. Dr. A. Fatih YETİM
2018
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Y.LİSANS TEZİ**

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLM) YÖNTEMİ KULLANILARAK ELDE
EDİLEN KENDİNDEN YAĞLAYICI YÜZEYLERİN TRİBOLOJİK
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Kerem TURALIOĞLU

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Fatih YETİM

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Erzurum

2018

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLM) YÖNTEMİ KULLANILARAK ELDE EDİLEN
KENDİNDEN YAĞLAYICI YÜZEYLERİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ
BELİRLENMESİ

Prof. Dr. A. Fatih YETİM danışmanlığında, Kerem TURALIOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 29/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği / Oy çokluğu ile (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Fatih YETİM	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. İrfan KAYMAZ	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

15 /06/ 2018

Kerem TURALIOĞLU

ÖZET

Y.Lisans Tezi

SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLM) YÖNTEMİ KULLANILARAK ELDE EDİLEN KENDİNDEN YAĞLAYICI YÜZEYLERİN TRIBOLOJİK DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Kerem TURALIOĞLU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. A. Fatih YETİM

Makine endüstrisinde, ortaya konulan ürünlerin uzun ömürlü olması beklenmektedir. Makine ve ekipmanların ömrünü kısaltan en önemli nedenlerden birisi de aşınma hasarıdır. Aşınma hasarının önüne geçilmesi için, yapılan tasarımın iyi olmasının yanında temas yüzeyleri arasında da bir de yağlayıcının uygulanması kaçınılmazdır. Aşınma oranını azaltmak için kullanılan bir yöntem de kendinden yağlayıcı yüzeylerin kullanımıdır. Günümüzde kendinden yağlayıcı olarak katı yağlayıcı filmlerin kullanımının yanı sıra, üretimi sonrası sıvı yağlayıcı emdirilme suretiyle toz metalurjisi ile üretilen sinterlenmiş yüzeyler de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle son zamanlarda eklemeli üretim yöntemleriyle de sinterlenmiş yataklar elde edilmeye başlanmıştır. Bu yöntemin toz metalurjisine göre avantajı, geometri sınırının olmayışıdır.

Bu çalışmada bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve analiz programlarında kendinden yağlayıcı özellikte üç farklı geometri tasarlanarak bu geometrilerin bilgisayar ortamında yağ akış modellemesi yapılmıştır. Akış modellemesinden alınan veriler ışığında, kendi yüzeyini en iyi yağlayan tasarım seçici lazer ergitme (SLM) metodu ile üretilmiştir. Üretimde 316L paslanmaz çelik tozları kullanılmıştır. Daha sonra üretilen numuneler iki gruba ayrılmıştır. İlk gruba ait numuneler, sıvı yağlayıcıda bekletilmiş ve bu numunelere yağ emdirilmiştir. Diğer bir gruba herhangi bir işlem yapılmamıştır. Aşınma testleri 5 ve 10 Newton(N) yükte, 100 ve 200 devir/dakika hızda yapılmıştır. Aşınma testlerinin ardından numunelerin aşınma hacimleri, 3D profilometre cihazıyla hesaplanmıştır. Son olarak numunelerin iç yapısı ve aşınma izlerine elektron mikroskopuyla (SEM) bakılmıştır.

Çalışma sonucunda, yağa emdirilmiş numunelerde yağın numune yüzeyine çıktığı ve yağ emdirilmemiş numunelerle kıyaslandığında aşınma oranının düşürüldüğü görülmüştür. Dolayısıyla yapılan tasarımın kendi kendini yağlayıcı özellikte olduğu akış modellemesinde saptandığı gibi tribolojik testlerde de görülmüştür.

2018, 77 Sayfa

Anahtar kelimeler: Kendinden yağlayıcı, Eklemeli üretim yöntemi, Seçici lazer ergitme yöntemi, Aşınma, Sürtünme

ABSTRACT

MS. Thesis

DETERMINATION OF TRIBOLOGY BEHAVIOR OF SELF-LUBRICANT SURFACES BY USING SELECTIVE LASER MELTING (SLM) METHOD

Kerem TURALIOĞLU

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of **Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM

In the machinery industry, it is expected that the products used will be long serviceable. Wear damage is one of the most important factors that reduce the life span of machinery and equipment. In addition to good design, it is inevitable to apply a lubricant between the contact surfaces to prevent wear damage. One of the methods used to reduce the wear rate is the use of self-lubricating surfaces. Today, besides the use of solid lubricant films as self-lubricant, sintered surfaces produced by powder metallurgy by impregnation with liquid lubricant after production are also widely used. With the development of technology, sintered bearings have started to be produced by additive manufacturing methods in recent years. The advantage of this method over powder metallurgy is that it allows to obtain complex geometric products due to the lack of geometry limit.

In this study, three different geometries were designed in computer aided design (CAD) and analysis programs and lubricant flow modeling was done in computer environment. In the data light from the flow model, the best lubrication design of its surface is produced by the selective laser melting (SLM) method. 316L stainless steel powders are used in production. As a result of the data obtained from the flow model, the best design which lubricates its own surface was produced by the selective laser melting (SLM) method. 316L stainless steel powders are used in the production. And then the produced samples were divided into two groups. The samples of the first group were kept in the liquid lubricant and the samples were impregnated with oil. Any treatment was not applied to the other group. Wear tests were performed at 5-10 Newton (N) loads and 100-200 (RPM) velocities. After the wear tests, the wear volumes of the samples were calculated by 3D profilometer. Finally, the internal structure of the samples and the areas of wear were examined by Scanning electron microscopy (SEM).

As a result of this study, it is seen that, the oil has been reached the samples surface and when compared with untreated samples, the wear rate is reduced. Hence, it has been seen in tribological tests as well as in the flow model that the design is self-lubricating.

2018, 77 pages

Key words: Self-lubricant, Additive manufactured method, Selective laser melting method, Wear, Friction

TEŞEKKÜR

Tez alıŐmamn tamamlanmasına, sonsuz desteği, ilgisi, sabrı, ve abalarıyla katkıda bulunan, bizleri lisans hayatımızdan beri öğrencisi olmaktan ziyade bir kardeŐi olarak gören, hayatımda örnek almaya çalıŐtıęım nadir insanlardan olan çok değerli tez danıŐmanım Prof. Dr. Ali Fatih YETİM'e en kalbi duygularımla teŐekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Teorik çalıŐmalarımda bana yardımcı olan Erzurum Teknik Üniversitesi(ETÜ) Makine Mühendisliği bölümünden Dr. Öğr. Üyesi Eyüphan MANAY'a, deneysel çalıŐmalarımda yardımcı olan ETÜ Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nden değerli ağabeyim Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya, ETÜ Makine Mühendisliği bölümünden ArŐ. Gör. Hilmi TEKĐİR'e, ETÜ Makine Mühendisliği ABD yüksek lisans öğrencisi Merve TAFTALI'ya, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi'nden değerli ağabeyim ArŐ. Gör. Yusuf Burak BOZKURT'a, imla kurallarının düzenlenmesinde yardımlarını esirgemeyen çok değerli dostlarım; Yunus ERZİNCANLI, Ahmet Serdar KOPAR ve Taha KALAYCI'ya, ayrıca emeği geçen tüm hoca ve arkadaşlarıma sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Beni yetiŐtiren annem Nurcan ÇELİK, teyzem Emine ÇELİK ve ağabeyim Görkem TURALIOğLU'na sonsuz maddi ve manevi destekleri için teşekkür ederim. Tez yazım sürecinde benden desteğini esirgemeyen çok değerli ablam bilgisayar mühendisi Esra Gizem ÖREK TURALIOğLU'na Őükranlarımı sunarım. Henüz aramıza yeni dahil olmuş minik yeğenim Naz Gökçe TURALIOğLU'na hayatıma katmış olduğu değerler için ayrıca teşekkür ederim.

Kerem TURALIOğLU
Haziran 2018

İÇİNDEKİLER

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
2.1 Makine Elemanları	7
2.1.1 Makine elemanlarının sınıflandırılması	7
2.1.1.1 Yataklar	7
2.1.1.1.1 Rulmanlı yataklar	8
2.1.1.1.2 Kaymalı yataklar	8
2.1.1.1.2.a Hidrodinamik kaymalı yataklar	9
2.1.1.1.2.b Hidrostatik kaymalı yataklar	10
2.2 Yatak Malzemeleri	11
2.2.1 Metalik Yatak Malzemeleri.....	11
2.2.1.a Beyaz Metal:.....	11
2.2.1.b Bakır Alaşımları	13
2.2.1.c Kalay Bronzu.....	13
2.2.1.d Sinterlenmiş Malzemeler	14
2.2.1.e Kadmiyum Alaşımları:	14
2.2.1.f Gümüş Alaşımları:	14
2.2.1.g Alüminyum Alaşımları:	15
2.2.1.h Lamel Grafitli Dökme Demir.....	15
2.2.2 Metalik Olmayan Yatak Malzemeleri	15
2.2.2.a Plastik Malzemeler	15
2.2.2.b Diğer malzemeler:	16
2.3 YAĞLAYICI MADDELER	17
2.3.1 Katı Yağlayıcılar	17
2.3.2 Sıvı Yağlayıcılar.....	20

2.3.2.a Organik yağlar	20
2.3.2.b Mineral yağlar	21
2.3.2.c Sentetik Yağlar	21
2.3.3 Gres Yağlayıcılar	22
2.3.4 Gaz yağlayıcılar	23
2.4 Toz Metalurjisi	23
2.4.1 Toz üretim yöntemleri	24
2.4.1.a Mekanik yöntem	25
2.4.1.b Atomizasyon Yöntemi	26
2.4.1.c Elektrolitik yöntem	27
2.4.1.d Kimyasal yöntem	28
2.4.2 Toz metalurjisinin üretim basamakları	29
2.4.2.1 Tozların hazırlanması ve harmanlanması	29
2.4.2.2 Soğuk presleme	30
2.4.2.3 Sinterleme	30
2.5 Eklemeli Üretim Yöntemleri	33
2.5.1 Eklemeli üretim yöntemlerinin çeşitleri	34
2.5.1.a Stereolitografi (SLA)	35
2.5.1.b Eriyik yığılma ve modelleme (FDM)	35
2.5.1.c Üç boyutlu yazıcı (3DP)	35
2.5.1.d Seçici lazer eritme (SLM)	36
2.5.2 Üretim sonucu oluşturulan parçaların mekanik özelliklerini etkileyen bazı parametreler	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM	41
3.1 Materyal	41
3.2 SolidWorks CAD programı ile farklı geometrilerin oluşturulması	42
3.3 ANSYS FLUENT akış analiz programı ile numunelerin test esnasında akış analizinin incelenmesi	46
3.4 SLM methodu ile numunelerin üretimi	47
3.5 Aşınma Deneyleri	48
3.6 3D Yüzey profilometre analizleri	50
3.7 SEM cihazı ile aşınma izleri ve mikro yapıların incelenmesi	50
3.8 Mikrosertlik ölçümleri	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	53
4.1 Oluşturulan geometrilere FLUENT akış modellemesinin yapılması ve sonuçların incelenmesi	53
4.2 Üretilen numunelerin sertlik değerleri, yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapısı	55
4.3 Tribolojik test sonuçları	57

4.3.1 Sürtünme Analizleri	57
4.3.2 Aşınma oranları grafiği	64
4.3.3 Aşınma izlerinin 3D profilometre görüntüsü	66
4.3.4 SEM görüntüleri.....	68
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	77



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

°	Derece
g	Gram
HV	Vickers sertlik değeri
mm	Milimetre
N	Newton
RPM	Bir Dakikada Atılan Devir Sayısı
s	Saniye
W	Watt

Kısaltmalar

2B	İki Boyut
3B	Üç Boyut
3DP	Üç Boyutlu Yazıcı
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
FDM	Eriyik Yığıma ve Modelleme
ETÜ	Erzurum Teknik Üniversitesi
ISO	International Standards Organization
NLGI	National-Lubricant Grease Institute
SAE	Society of Automobile Engineers
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLA	Steryolitografi
SLM	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
SILAR	İyonik Katman Adsorpsiyon ve Reaksiyonu
YÜTAM	Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Katı yağlayıcılar ve kaplamaların tarihsel gelişimi	3
Şekil 2.1 Kaymalı yatakta oluşan yağ film şekilleri	9
Şekil 2.2 Hidrostatik yatağın şematik görünümü.....	10
Şekil 2.3 Bilyeli öğütme yönteminin şematik görünüşü.....	26
Şekil 2.4 Düşey gaz atomizasyonu yönteminin şematik görüntüsü.....	27
Şekil 2.5 Elektroliz hücresinin şematik yapısı.....	29
Şekil 2.6 Tek eksenli presleme işleminin şematik görüntüsü	31
Şekil 2.7 İki toz zerreciğinin sinterleme modeli	33
Şekil 2.8 Sıvı fazlı sinterleme modeli şematik göüntüsü.....	34
Şekil 2.9 Eklemeli üretimin basamakları	36
Şekil 2.10 SLM/SLS cihazının yapısal şematik görüntüsü.....	38
Şekil 2.11 SLM yönteminin şematik başlangıç görünümü.....	39
Şekil 2.12 SLM yönteminin şematik bitiş görünümü	40
Şekil 2.13 SLM lazer tarama şekilleri	42
Şekil 3.1 (1) no'lu tasarımın SolidWorks'de izometrik görüntüsü.....	45
Şekil 3.2 (1) no'lu tasarımın SolidWorks'de kafes biçiminde izometrik görüntüsü	45
Şekil 3.3 (1) no'lu tasarımın SolidWorks'de kesit görüntüsü.....	46
Şekil 3.4 (2) no'lu tasarımın SolidWorks'de izometrik görüntüsü.....	46
Şekil 3.5 (2) no'lu tasarımın SolidWorks'de kafes biçiminde izometrik görüntüsü	47
Şekil 3.6 (3) no'lu tasarımın SolidWorks'de izometrik görüntüsü.....	47
Şekil 3.7 (3) no'lu tasarımın SolidWorks'de kafes biçiminde izometrik görüntüsü	48
Şekil 3.8 Numunelerin üretildiği SLM cihazının görüntüsü.....	50
Şekil 3.9 Aşınma testlerinin yapıldığı cihazın göüntüsü	51
Şekil 3.10 3D yüzey profilo metre analizlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü	52
Şekil 3.11 SEM analizlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü	53
Şekil 4.1 (1) no'lu poroz tasarımın FLUENT akış modellemesi.....	56
Şekil 4.2 (2) no'lu dört kanallı tasarımın FLUENT akış modellemesi.....	57
Şekil 4.3 (3) no'lu ortada tek kanallı tasarımın FLUENT akış modellemesi	57
Şekil 4.4 (3) no'lu tek kanallı tasarımın SLM'de üretimi sonrası görünüüsü	58
Şekil 4.5 (3) no'lu kanallı bir numuneye ait SEM görüntüsü	59
Şekil 4.6 SLM ile üretilmiş bir numunenin SEM iç yapı görüntüsü	60

Şekil 4.7 1,2 ve3 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği	61
Şekil 4.8 4,5 ve 6 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	62
Şekil 4.9 7ve 8 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	63
Şekil 4.10 9 ve 10 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	64
Şekil 4.11 Aşındırıcı bilye ve temas yüzeyi arasındaki şematik görüntü	64
Şekil 4.12 11 ve 12 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı-zaman grafiği.....	65
Şekil 4.13 Aşınma testinden çıkan 7 no'lu analize ait numune görüntüsü	66
Şekil 4.14 Aşınma oranları grafiği.....	67
Şekil 4.15 2 ve 3 no'lu analizlere ait yüzey profili	68
Şekil 4.16 7 ve 8 no'lu analizlere ait yüzey profili	69
Şekil 4.17 11 ve 12 no'lu analizlere ait yüzey profili	70
Şekil 4.18 2 ve 3 no'lu analizlere ait SEM görüntüleri.....	71
Şekil 4.19 7 ve 8 no'lu analizlere ait SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.20 11 ve 12 no'lu analizlere ait SEM görüntüleri	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Katı yağlayıcıların sıvı ve gres yağlayıcılara göre avantajları.....	18
Çizelge 2.2 NLGI'ya göre gres yağlayıcıların sınıflandırılması.....	23
Çizelge 3.1 316L paslanmaz çelik tozlarının kimyasal bileşimi	43
Çizelge 3.2 316L paslanmaz çelik tozlarının SLM ile üretimi sonrası malzeme özl	43
Çizelge 3.3 SAE 5W-30 yağın özellikleri	44
Çizelge 3.4 SLM ile üretim parametreleri	44
Çizelge 3.5 Aşınma deney şartları	49
Çizelge 3.6 Numunelerin numaralandırılma tablosu	54
Çizelge 4.1 Numunelerin sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri	58

1. GİRİŞ

Sürtünme, aşınma ve yağlama ile ilgili bir bilim dalı olan triboloji 19. ve 20. yy'deki sanayi devrimi ile ortaya çıktığı bilinmektedir. Fakat yağlamanın, M.Ö. 2000'li yıllarda kilden yapılan çömlüklerin üretiminde kullanılan sistemin ana milinde ziftin yağlayıcı olarak kullanıldığı göz önüne alındığında çok daha eskiye dayandığı görülmektedir. Ayrıca yapılan araştırmalarda yağlamanın ilk çağlarda Mısır uygarlığında da piramitleri inşa etmek için kullanılan büyük kaya parçalarının kolay taşınması adına taşın alt kısımlarına kalsiyum sülfat sürerek yapıldığı ortaya çıkmıştır. Buna ek olarak Mısır'da yapılan arkeolojik kazılarda bulunan taşların üzerine çizilmiş resimlerde büyük inşa kayalarının altına su dökülerek sürüklendiği görülmüştür.(Davson 1998)

Bir araştırma konusu olarak ise triboloji, ilk kez birbirinden bağımsız olmak üzere Fransız mühendis Amontons(1699) ve Fransız fizikçi Coulomb(1781) tarafından değerlendirilmiş ve bugün bildiğimiz;

$$F_s = \mu * F_N$$

(F_s :Sürtünme kuvveti, μ =Sürtünme katsayısı, F_N =Sürtünen yüzeyler arasındaki normal kuvvet)

kuralını ortaya atmışlardır. Daha sonra Newton, Navier, Poiseuille, Hagen, Stokes ve Reynold sıvı sürtünme üzerine çalışmalar yaparak bugünkü bildiğimiz bilgilerin temelini ortaya çıkarmışlardır. Yukarıdaki denklemden çıkan bu kurallar şöyle sıralanabilir:

- Sürtünme kuvveti, yüzeyler arasındaki normal kuvvetle doğru orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti temas alanından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti izafi kayma hızından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti temasta bulunan cisimlerin malzeme ve yüzey özelliklerine bağlıdır.

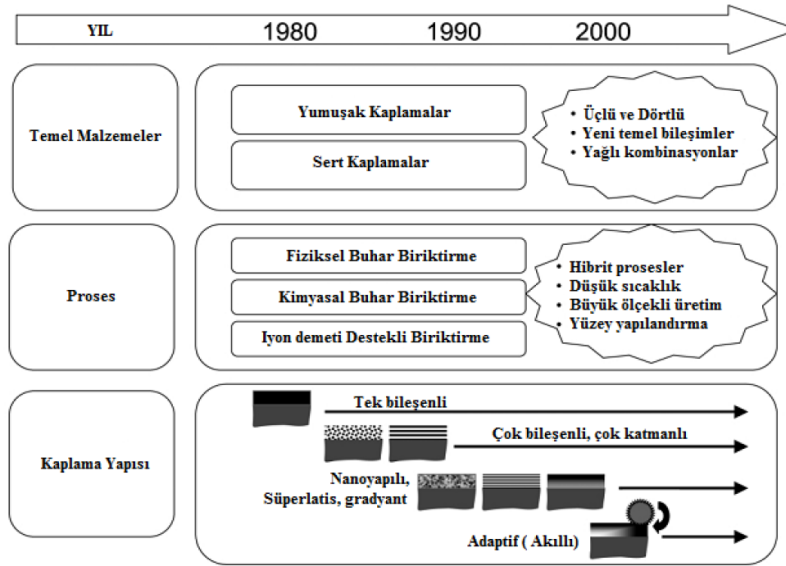
Günümüzde, değişen ve gelişen teknolojilerle birlikte makine ve imalat sektöründe çok farklı alanlar ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu alanlar, farklı makine ve cihazların kullanımını da beraberinde getirmektedir. Tüm sektörlerde olduğu gibi imalat sektöründe de enerji verimliliğinin yüksek, makine ve teçhizatların üretim maliyetlerinin düşük, ömürlerinin fazla ve dayanımının yüksek olması beklenmektedir. Fazla enerji kullanımının önüne geçmek için makineye ters iş yapan tüm kuvvetleri azaltmak gerekmektedir. Bu kuvvetlerin başında sürtünme kuvvetleri gelmektedir. Söz konusu

sürtünme kuvvetlerinin sonucunda makine ve teçhizatlarda aşınma hasarı kaçınılmazdır. Aşınma, makine elemanlarının ömrünü ciddi oranlarda azaltmaktadır. Dünya çapında yapılan araştırmalara göre makine elemanlarının yaklaşık %70'inin aşınma hasarına bağlı olarak görevini yerine getiremediği bilinmektedir (Tevrüz 2015). Bu sonuçlar doğrultusunda bilim adamları, makine elemanlarını birbirleriyle temas eden noktalardan yağlayarak daha verimli hale getirmişlerdir.

1859 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk petrol kuyusunun açılması ile petrol çağı açılmış, bu doğrultuda petrol esaslı yağlayıcıların kullanımı gündeme gelmiş ve o tarihten beri hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. 1930'lu yılların başında petrol esaslı yağlayıcılara katkı maddeleri konularak oksitleme eğiliminin düşürülmesi, fazla yük taşıma kabiliyetinin artırılması, kimyasal kararlılığının iyileştirilmesi gibi bazı özellikler kazandırılmıştır. 1930'lu yılların sonunda petrol esaslı sıvı yağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık aralığında çalışan uçak ve uzay sanayisinde kullanım eğilimi artmıştır. Bu durumda ham petrol esaslı yağlayıcılar istenilen performansı sergileyememiş ve daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı sentetik yağlayıcı maddelerin kullanımı denenmiştir. Fakat sentetik yağlayıcıların bile yüksek sıcaklıklarda bazı özelliklerini kaybettiği görülmüştür. Yüksek sıcaklık dayanımı çok daha iyi olan aynı zamanda da uzay araçlarının kullanımı için yer çekimi ivmesi olmadan bile yağlama yapabilen katı yağlayıcılara yönelim olmuştur (Sunil et al 2016).

Günümüzde katı yağlayıcı olarak kullanılan grafit ve molibden disülfürün kayganlık hissi ve görünümü yüzyıllardır bilinmesine rağmen modern anlamda katı yağlayıcı teriminin ortaya atılması ancak günümüzden yirmi yıl öncesine dayanmaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi yüksek veya düşük çalışma sıcaklığında sıvı yağlayıcının viskozitesinin değişmesi ve buna bağlı olarak yüzeye tutunma kabiliyetinin düşmesi, vakum ortamında kolaylıkla buharlaşması, yüzeye tutunmada zorlanması, nemli ve asidik ortamlarda kolay bozulmaya uğraması ve bu ortamların beraber bulunduğu daha ekstrem durumlarda (uzay ve uçak endüstrisi) yağlamanın gerektiği şekilde yapılamaması araştırmacıları katı yağlayıcıların kullanımına sevk etmiştir. Katı yağlayıcılar birçok şekilde, yüzeye uygulanabilir. Bunlardan en basit ve ilkel olanı toz haline getirilmiş malzemenin temas yüzeyine serpilmesidir. Örneğin; eski dönemlerde tren raylarına katı yağlayıcı olan grafit tozu dökülerek sürtünmenin en aza indirilmesi sağlanmıştır. Fakat bu yöntem sürekli malzeme ihtiyacı doğurduğundan yeni bir yöntem denenmiştir. Bu

yöntemde, katı yağlayıcı maddeler bir aerosol ile karıştırılarak yağlanacak yüzeye sıvanmış ve daha iyi sonuçlar alınmıştır. Daha sonraki dönemlerde yeni katı yağlayıcı malzemeler bulunmuş ve bu malzemeler temas bölgesine uygulamak yerine direkt olarak yatak malzemesi olarak üretilmişlerdir. Teknolojinin daha ileri taşınması ile kaplama teknikleri ortaya çıkmış ve farklı bir taban malzemeye çeşitli kaplama yöntemleri uygulanarak sadece temas bölgesine katı yağlayıcı film tabakası oluşturulmuştur. Şekil 1.1’de katı yağlayıcıların ve kaplamaların tarihsel gelişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere aynı yıllarda birden çok malzeme ve metot kullanılmıştır. Bu durum katı yağlayıcıların çok farklı kombinasyonlarının olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 1.1 Katı yağlayıcılar ve kaplamaların tarihsel gelişimi (Donnet and Erdemir 2004)

Katı yağlayıcılar her ne kadar pratik kullanıma sahip olsalar bile sıvı yağlayıcılar kadar uzun ömürlü değildir. Yağlayıcıyı yenileme işlemi sıvı yağlayıcılara göre daha zordur (Donnet and Erdemir, 2001, 2004). Bu sebepten, bazı durumlarda sıvı yağlayıcılar tercih edilmektedir. Fakat sıvı yağlayıcıların yenileme prosesi katı yağlayıcılar kadar olmasa bile ciddi zaman kaybına neden olmaktadır. Zaman kaybı, seri imalat yapan fabrikalar için çok ciddi maddi kayıpları beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu yağlama işlemini kendi kendine yapacak sistemlere ihtiyaç duyulmuştur.

Kendi kendini yağlayacak sistemlerin en yaygın kullanılanı sinterlenmiş yataklama elemanlarıdır. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bu poroz yataklar, sıvı yağ

dolu kaplara bırakılarak gözeneklerine yağ emdirilmektedir. Emdirilen yağ, yataklama elemanının kullanıldığı yerdeki sıcaklık ve fiziksel hareketlerin yardımıyla gözeneklerden sızarak temas bölgesine geçmektedir. Sıcaklık, yatak malzemesinin genişip gözeneklerin küçülmesini sağlayan en önemli etkidir. Küçülen gözenekler, sıvı yağlayıcı maddenin ana gövdeden temas bölgesine tahliye edilmesini kolaylaştırır. Böylece dışarıdan bir pompaya veya yağ haznesine ihtiyaç duyulmaz.

Toz metalurjisi, poroz bir yapı içerdiğinden kendinden yağlayıcı yataklar için oldukça uygun bir yöntemdir. Toz metalurjisi; tozların oluşturulması ve harmanlanması, uygun kalıpların üretimi, presleme ve ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda sinterleme işlemlerinden oluşan bir üretim yöntemidir. Üretim prosesi birçok adımda gerçekleştiğinden nispeten daha zor bir üretim yöntemidir. Ayrıca yapıdaki gözenek oranı; toz boyutu, presleme ve sinterleme adımlarının hepsiyle doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla istenilen gözenek oranını oluşturmak için birçok parametrenin değiştirilmesi gereklidir. Sonuç olarak bu endüstri, yerini daha yeni ve çok daha pratik olan katmanlı üretim veya diğer bir adıyla eklemeli üretim metoduna bırakmaktadır.

Eklemeli üretim yöntemleri sıradan üretim yöntemlerinden çok farklıdır. Aslında bu yöntem malzemelerin bir yüzey üzerine katmanlar halinde eklenerek inşa edilmesi esasına dayanır. Bu yöntem ile neredeyse hiç artık malzeme oluşturmadan üretim yapılmaktadır ve malzeme olarak ise oldukça geniş bir açığı kapsamaktadır. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programında tasarlanan katı geometriler, bu üretim yöntemi sayesinde tek adımda üretilmektedir. Ayrıca bu cihazların bazı parametreleri değiştirilerek malzemelerin dayanım sınırları da genişletilebilmektedir.

Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) de eklemeli üretim yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde toz metalurjisinde kullanılan tozlar lazer ışını yardımıyla ergitilerek istenilen katı geometriler oluşturulur. Oluşturulan geometriler istenilen ölçülerle karşılaştırıldığında sapma olmadığı bilinmektedir. Dolayısıyla toz metalurjisi ile üretilen sinterlenmiş yataklar bu yöntemle tam istenilen gözenek boyutlarıyla birlikte tek bir adımda üretilebilir. Kullanılan SLM cihazının üretim tablası boyutuna göre tek seferde birden çok üretim yapılabilir. Bu yönleriyle bahsi geçen üretim metodu, toz metalurjisini gölgede bırakmaktadır.

Araştırma konusu olan SLM yöntemiyle kendinden yağlayıcı yüzeyler üretimi hakkında literatürde daha önce yapılan bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Fakat kendinden yağlayıcı ve katı yağlayıcı filmler, SLM ile üretilen bazı malzemeler ve bu malzemelerin tribolojik davranışlarıyla ilgili birçok çalışma bulunmuştur.

İmece ve arkadaşları 2017 yılında yaptığı çalışmada AISI1008 çeliğinden imal edilmiş 10 mm çapında ve 20 mm boyutundaki numunelerin bir kısmına molibden disülfid (MoS_2) türü katı yağlayıcı, sıvama metodu ile uygulamıştır. Diğer bir kısmına ise kaplama yapılmadan aşınma testleri yapmış ve molibden disülfid uygulanan numunelerin %42 daha az aşındığını tespit etmiştir (İmece 2017).

Kovacı ve arkadaşları 2018 yılında yaptığı bir çalışmada AISI 4140 çeliği üzerine iyonik katman adsorpsiyon ve reaksiyonu (SILAR) yöntemiyle CuO ve CuS filmleri oluşturarak tribolojik özelliklerine bakmıştır. Aşınma testleri hem kuru hem yağlı ortamda yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda CuO ve CuS filmleriyle oluşturulan numuneler hem kuru hem de yağlı aşınma şartlarında, işlemsiz numunelere nazaran daha düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı ortaya koymuştur (Kovacı vd. 2018).

Yetim 2010 yılında yaptığı bir çalışmada, saf titanyum numunelere anodizasyon yöntemiyle poroz bir titanyum oksit filmi oluşturmuş ve bu filmlerin tribolojik özelliklerini işlemsiz numunelerle karşılaştırmıştır. Araştırma sonucunda anodizasyon yapılan numunelerin hem sürtünme katsayıları hem de aşınma oranları bariz şekilde düşmüştür (Yetim 2010).

Torres ve çalışma arkadaşları 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada paslanmaz çelik numuneler üzerine lazer kaplama yöntemiyle gümüş ve MoS_2 ilaveli nikel bazlı kaplama yapmıştır. Hazırlanan numunelerin 150°C, 300°C, 400°C ve 600°C'deki sıcaklıklarda tribolojik davranışlarını incelemiştir. Tüm sıcaklıklarda kaplamalı numunelerin aşınma oranları ve sürtünme katsayıları, işlemsiz paslanmaz çelik numunelere göre düşmüştür (Torres et al. 2018).

Gao ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada AISI 440C çeliği üzerine rf-sputtering yöntemiyle $MoS_2-Sb_2O_3$ kompozit bir katı yağlayıcı film oluşturarak

numunelerin uzay şartlarındaki oksitlenme eğilimini incelemiştir. Numuneler “uzay deney düzeneklerine” yerleştirilerek Shenzhou-7 uzay gemisi ile uzaya gönderilmiştir. Araştırma sonucunda numuneler, taramalı elektron mikroskopunda incelenmiş ve kayda değer bir oksit filminin oluşmadığı saptanmıştır (Gao et al. 2018).

Lei 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle poroz yapılı grafin-nikel kompoziti üretmiş ve bu malzemeye polialfaolefin yağı emdirmiştir. Daha sonra Lei ve arkadaşları, bu numuneleri tribolojik incelemelere tabi tuttuğunda yağ emdirilmiş numunelerin, emdirilmemiş olanlara göre sürtünme katsayısı ve aşınma oranının çok daha düşük olduğunu gözlemlemiştir (Lei 2018).

Zhu ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları bir çalışmada geleneksel yöntemle üretilen 316L paslanmaz çeliği, SLM ile üretilen 316L paslanmaz çelikte, yağlı ortamda tribolojik özelliklerini ve makro sertlikleri karşılaştırmıştır. Deney öncesinde numunelerin bir kısmının yüzeyi parlatılmış diğer bir kısmın ise parlatılmamıştır. Çalışmada karşıt yüzey olarak 38CrMoAl ve pirinç, yağlayıcı olarak ise L-HM46 hidrolik yağ seçilmiştir. Yağ yüzeye damlatarak uygulanmıştır. Aşınma testleri 10 RPM(dakikada atılan devir) hızda ve 30 dakikada yapılmıştır. Test sonrası SLM ile üretilen numunelerin geleneksel yöntemle üretilenlere göre sürtünme katsayısında çok az bir miktarda düşme olduğu görülmüştür. Yüzeyleri parlatılmış numunelerinin sürtünme katsayıları, parlatılmamış olanlara göre daha yüksek çıkmıştır. Sertlikler karşılaştırıldığı zaman hem geleneksel yöntemle üretilen numunelerin hem de SLM ile üretilen numunelerin sertlik değerleri 220-230 HV aralığında çıktığı görülmüştür (Zhu et al. 2016).

Hua Li ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada SLM cihazında farklı inşa yönünde ve 100W, 150W, 200W ve 300W gücünde lazer güçleri kullanarak 316L paslanmaz çelik üretmişlerdir. Araştırma sonucunda yüzeylerin tribolojik özellikleri birbirleriyle kıyaslanmıştır. Aşınma testleri yapılırken karşıt yüzey olarak yine paslanmaz çelik top kullanılmıştır. Kuru şartlarda yapılan testlerde sürtünme katsayılarına bakılmış hem lazer gücünün hem de inşa yönünün sürtünme katsayısına kayda değer bir etkisinin olmadığını görülmüştür. Fakat artan lazer gücünün, yapıda oluşan gözenekleri azalttığı tespit edilmiştir (Li et al. 2018).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Makine Elemanları

Makine elemanları tanım olarak bir işlevi yerine getiren makineleri (elektrik makineleri, içten yanmalı motorlar, pompalar, kompresörler vb) ve tesisatları oluşturan parçaların her birine verilen addır. Söz konusu parçalardan her biri, bir görevi yerine getiren ve kendilerine özgü hesaplama ve şekillendirme ilkelerine sahip olan elemanlardır.

Makine elemanları basit (Örneğin: cıvata, pim, kama) veya birden çok parçadan oluşan karmaşık sistemlerden (Örneğin: kavrama, kaymalı yataklar) oluşabilir (Akkurt 2012).

Makine elemanları fiziksel özelliklerine ve sistemdeki görevlerine göre 5 ana başlık altında sınıflandırılabilirler.

2.1.1 Makine elemanlarının sınıflandırılması

- Çözülemeyen bağlama elemanları: Lehim, kaynak, yapıştırma, perçin
- Çözülebilir bağlama elemanları: Cıvata, pim, perno, sıkı geçme, konik geçme bağlantıları
- Elastik bağlama elemanları: Yaylar
- Mekanizmalar: Kayış kasnak mekanizmaları, dişli çark mekanizmaları, zincir ve sürtünmeli çark mekanizmaları
- Destek elemanları: Aks, mil, yataklar (Babalık 2012)

2.1.1.1 Yataklar

Yataklar dönel veya lineer hareket yapan makine parçalarının, sürekli aynı eksen veya aynı doğrultuda kalmalarını sağlayan makine parçalarıdır. Üzerine etkiyen kuvvetleri sürtünmeyi azaltarak gövdeye iletmeleri temel görevleridir. Ana iskeletin yapısına göre yataklar;

- 1- Rulmanlı yataklar
- 2- Kaymalı yataklar

olmak üzere ikiye ayrılırlar.

2.1.1.1.1 Rulmanlı yataklar

Rulmanlı yataklar iki bileziğin arasına yerleştirilen yuvarlanma elemanları sayesinde yataklama görevini yerine getirir. Bu tür yataklarda hem dönme hem de kayma hareketi olduğundan sürtünme kuvveti çok düşük seviyelerdedir.

Bilezikler arasına yerleştirilen yuvarlanma elemanlarının geometrik şekline göre;

1- Bilyalı rulmanlar

2- Silindirik rulmanlar

3- Fıçılı rulmanlar

4- Konik rulmanlar

5- İğne rulmanlar

olmak üzere beş çeşit rulmanlı yatak vardır.

2.1.1.1.2 Kaymalı yataklar

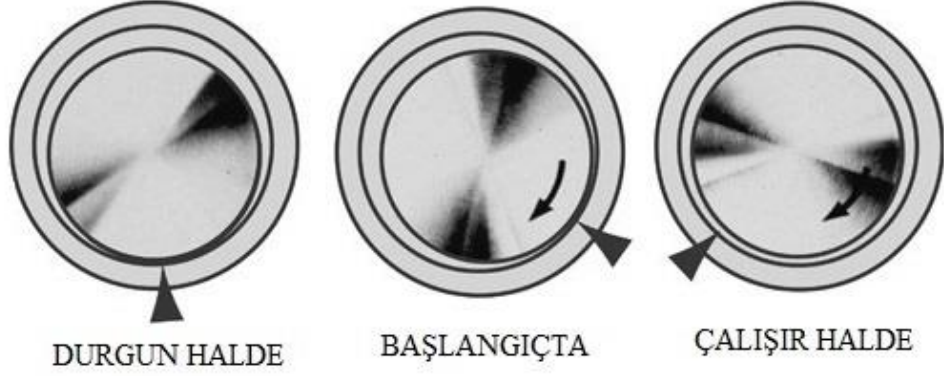
Kaymalı yataklar; muylu ile yatak arasında bir yağ filmi oluşturarak, parçaların birbirine direkt temas etmemesi ve dolayısıyla sürtünmenin azaltılması esasına dayanır.

Avantajları:

- Titreşim ve darbeyi engelleyebilir.
- Gresle yağlandığı takdirde toz ve partiküllere karşı dirençlidir.
- Tasarımı ve üretimi basittir, kolayca monte ve demonte edilebilir.
- Eğer yağlama iyi yapılırsa yüksek hızlarda çalışabilir ve aşınma neredeyse yoktur.

Dezavantajları:

- Yağlama iyi yapılmazsa, özellikle yüksek hızlarda çok çabuk aşınma meydana gelir.
- Karmaşık sistemlerde yağlama yapılması için pahalı düzenekler gerekebilir.
- Yağ tüketimi fazladır.
- İlk çalışmada yağ filmi oluşuncaya kadar titreşim ve darbe meydana gelebilmektedir.



Şekil 2.1 Kaymalı yatakta oluşan yağ film şekilleri (Anonymous 2017)

Kaymalı yataklar yağlayıcının fazına göre sıvı yağlamalı, gres yağlamalı veya katı yağlamalı olarak veya muylu ile yatak arasındaki yağ filminin oluşma şekline göre hidrostatik kaymalı yataklar ve hidrodinamik kaymalı yataklar olarak sınıflandırılabilir.

2.1.1.1.2.a Hidrodinamik kaymalı yataklar

Yağ film tabakasının, milin ve yatağın birbirine göre izafi hareketi sonucu meydana gelen basınç ile oluşması sayesinde yapılan yağlama tekniğidir. Hidrodinamik yağlama teorisi ilk olarak Beauchamp Tower tarafından 1880'li yıllarda yapılan deneysel çalışmalarla ortaya atılmıştır. Daha sonra Reynolds, yaptığı teorik çalışmalar ile Tower'ın hipotezini desteklemiştir.

Hidrodinamik yağlamada, ilk başta dönmeyen mil yatağa oturmuş pozisyonda bulunur. Sistem çalıştırıldığında mil viskoz yağı harekete geçirir. Bu hareketin sonucunda milin eksenden kaçık olduğu bölgeler (yatağa oturmuş kısım) oluşan basıncın etkisiyle yağlanır ve mil eksene oturur. İlk çalışma esnasında, hızın ve buna bağlı olarak yağ basıncının düşük olması sebebiyle kuru sürtünmeler meydana gelebilir. Fakat hız ve basınç arttıkça kuru sürtünme yerini sıvı sürtünmeye bırakır.

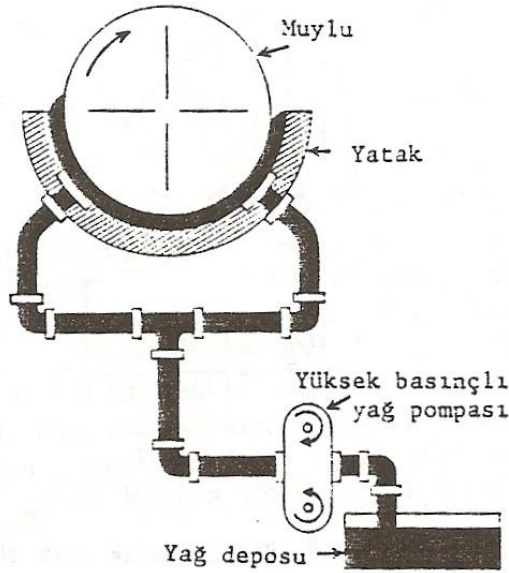
Reynolds ve Tower'ın yaptığı söz konusu çalışmalar sonucunda hidrodinamik sıvı sürtünmesi oluşması için;

1. Yüzeyleler arası yeterli bir hız farkı olmalı
2. Yağ tabakasının kalınlığının hareket yönünde değişken olmalı
3. Yüzeyleler arasında yeterli miktarda yağ bulunmalı

gibi koşulların sağlanmış olması gerekir.

2.1.1.1.2.b Hidrostatik kaymalı yataklar

Yağ filmini oluşturmak için, yağın dışarıdan bir pompa tarafından muylu ve yatak arasına enjekte edilmesi esasına dayanır. Dolayısıyla muylu dönmese bile pompa çalıştığı takdirde sıvı film sürekli bulunur. Sıvı filmin sürekli bulunması, ilk çalışmada dahi kuru sürtünmeye karşı aşınma oluşumunu engellemektedir. Ancak bu sistemlerde pompa ve soğutma gerektiğinden hidrodinamik yataklara nispeten daha maliyetlidir.



Şekil 2.2 Hidrostatik yatağın şematik görüntüsü (Akkurt 2012)

Hidrostatik kaymalı yataklarda, yatak kısmına cepler açılarak, yağın bu cepler vasıtasıyla muylu- yatak arasına gönderilmesi sağlanır. Pompa basıncı sayesinde sistem durgun haldeyken (muylu dönmüyorken), muylu ve yatak tamamen eş eksenli olmaz (pompa gücü yeterli seviyede değil ise) ve sistemde homojen değil, heterojen yağ filmi

bulunur. Sistem çalıştırıldığında ise muylu ve yatak eş eksenli olur ve yağ filmi homojenleşir (Babalık 2013).

2.2 Yatak Malzemeleri

Yatak malzemeleri oldukça zor çalışma ortamlarında bozulmadan işlevini yerine getirmek durumundadır. Sürekli olarak sürtünme, sıcaklık değişimi, yük taşıma gibi şartlarda kaldıkları için yatak malzemelerinden beklenen bazı özellikler vardır. Bunlar;

- Kayma kabiliyetlerinin yüksek olması
- Yağlayıcı tarafından kolayca ıslatılabilmesi (Islanma kabiliyeti)
- Mil malzemesi ile kolay alıştıırılabilme
- Üzerine gelecek kuvvetlerden dolayı yüksek basma mukavemeti
- Yağda bulunan yabancı partikülleri bünyesinde tutması için yumuşak ve düşük elastisite modüle sahip olması (Gömme kabiliyeti)
- Aşınma direncinin yüksek olması (Yağın yetersiz kaldığı durumlarda en azından bir süreliğine mevcut şartlara dayanması)
- Isıl genleşme katsayısının düşük olması (Belirlenen toleransların dışına çıkıp, sarma meydana getirmemesi)
- Yeteri kadar statik ve dinamik mukavemet
- Yüksek ısınma ve korozyon dayanımı

şeklinde sıralanabilir (Tevrüz 2015).

Yatak malzemeleri, metalik yatak malzemeleri ve metal dışı yatak malzemeleri olmak üzere iki ayrı grupta incelenir.

2.2.1 Metalik Yatak Malzemeleri

2.2.1.a Beyaz Metal:

Beyaz metal esasen kalay (Sn) alaşımı olup üç gruba ayrılır. Bunlardan ilki kalay miktarı yüksek olan, (%80 veya daha fazla kalay (Sn)) ikincisi kurşun miktarı yüksek olan, (%80 kurşun(Pb), %1-%12 kalay (Sn)) ve üçüncüsü ise kurşun (Pb) ve kalayın (Sn) neredeyse eşit miktarda bulunduğu yataklardır. Bu alaşımlardan piyasada en çok

kullanılanı Babbitt isimli olan beyaz metal yataklardır. Babbitt'lerin yapısında %89.5 kalay(Sn), %8.8 antimon(Sb) ve %1.7 bakır(Cu) bulunur (Akkurt 2012).

En çok tercih edilen yatak malzemesi olan kalay esaslı yataklar, yumuşak yapıları sayesinde gömme yeteneği çok iyidir. Bu yüzden mil-göbek bağlantılarında çokça tercih edilmektedir. Ayrıca düşük sürtünme katsayısına sahiptir ve korozyon direnci yüksek seviyelerdedir. Bunlara karşılık sertlikleri, basınç ve yorulma mukavemetleri çok düşüktür. Ek olarak; bu özellikler artan sıcaklıkla beraber iyice düşüş gösterdiği için sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde (Örneğin; Hadde fırınları, içten yanmalı motorlar) kullanılmamaktadır (Akkurt 2012).

Kurşun elementinin fazla olduğu beyaz metal malzemelerin başlıca eksikliği ise yağın oksidasyonu sonucu ortaya çıkan kimyasal yapıların, kurşun elementiyle tepkimeye girmesi ve yatakların içinde sert bir tortu meydana getirerek, abrezif aşınma oluşturmalarıdır. Fakat buna karşın kalay ile karşılaştırıldığında çok daha ucuz olduğu bilinmektedir.

Bileşiminde %15 antimon (Sb), %1 kalay (Sn) ve %1 arsenik bulunan kurşun esaslı beyaz metaller otomobil motorlarında, içerisinde %95-%99 arası kurşun, geri kalan %5-%1 lik kalay veya başka elementler içeren kurşun esaslı beyaz metaller demiryolu taşıtlarında sıkça kullanılmaktadır. DIN standartlarına göre bazı beyaz metaller şu şekilde simgelenmektedir;

- Lg Sn 80 (%80Sn, %12Sb, %6Cu%2Pb)
- Lg Sn 80F (%80Sn, %11Sb, %9Cu)
- Lg Pb Sn 5 (%5Sn, %15.5Sb, %1Cu, %78.5Pb)
- Lg Pb Sn 10 (%10Sn, %15.5Sb, %1Cu, %73.5Pb) (Akkurt 2012)

Beyaz metaller, çelik veya bronz alaşımından yapılmış bir burca kalınlığı 0.3-1mm olacak şekilde ince tabakalar şeklinde uygulanır. Bu tabakalar döküm, presleme veya elektro kaplama yöntemleriyle meydana getirilir. Eski bir yöntem olan dökümde, kırılma kuyruğu denilen yöntem kullanılmaktadır. Presleme ile meydana getirilen

yataklarda kaplama kalınlığı fazla olduğundan (1mm civarlarında), özellikle dinamik zorlanmalara karşı oldukça yüksek dayanım gösterir ve yatağın ömrü uzun olmaktadır.

Ayrıca çelikten imal edilmiş burç üzerinde sırasıyla; kalınlığı beyaz tabakadan daha büyük kurşun-bronz tabaka (0,3-1,5mm), onun da üzerinde çok ince bir nikel alaşım tabaka (0,001-0,0015mm) ve nikelin de üzerinde ince bir beyaz metal tabaka (0,02-0,025mm) bulunan üç tabakalı yataklar (bileşik yatak) çatlak ihtimalinin azaltılması amacıyla kullanılır. Bu kullanım bazı uygulamalarda çok iyi sonuçlar ortaya koymaktadır.

2.2.1.b Bakır Alaşımları

Bakır ana malzemeli yatak malzemelerinin büyük bir kısmını sert bir bakır katmanı oluşturur. Bu tür yataklarda beyaz metalli yatakların aksine yumuşak kristaller sert ana fazın içine dağılmış durumda bulunurlar. Bakır alaşımları bronz ve pirinç olmak üzere iki gruba ayrılır. Her iki malzeme de döküm veya dövme ile üretilebilir. Yataklarda kullanılan bronz alaşımları ise kalay ve kurşun bronzu olmak üzere kendi içinde ayrılır.

2.2.1.c Kalay Bronzu

Döküm kalay bronzunda kalay miktarı %10-%14 civarındadır. Döküm kalay bronzlarının bazıları şu şekilde simgelenmektedir;

- G-Sn Bz 14 (%86Cu,%14Sn)
- G2-Sn Bz 12 (%88Cu, %12Sn)

Dövme Bronz grubunun bazıları ise;

- CuSn8 (%91Cu, %8.5Sn, %4'e kadar Pb)
- MSnBz4Pb (%92 Cu, %3Sn, %4Zn, %1'e kadar Pb)

şeklinde simgelenir.

Genellikle yüksek kuvvetler ve düşük hızlar için kalay bronzu uygundur. Ancak çentik etkisinin önüne geçmek için muylunun sertleştirilmiş ve iyice taşlanmış olması

gerekir. Daha yumuşak olan kurşun bronz grubunun bazılarının gösterimi ise şoyledir ve bunlar dökülebilen alaşımlardır;

- GPbBz25 (%75Cu,%25Pb)
- G-SnPbBz20 (%75Cu,%5Sn,%20Pb)

2.2.1.d Sinterlenmiş Malzemeler

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bu malzemeler, mikron boyutundaki tozların kalıp içerisinde preslenmesi ve fırınlanması esasına dayanarak üretilir. Bu üretim yöntemiyle üretilmiş malzemelerin tipik özelliği gözenekli bir i yapıya sahip olmasıdır. Bu gözenekler yağ emdirilerek kendinden yağlayıcı yatak elde edilmiş olur. Bileşiminde %90 bakır, %10 kalay ve bazı uygulamalarda %1-%3 grafit bulunan sinter bronz en iyi sonucu veren malzemedir (Yazıcıoğlu ve Yazıcıoğlu 2016). Bunun yerine bazı alanlarda sinter demir de kullanılabilir. Fakat bronzun sürtünme özellikleri demire nazaran daha iyi olduğu için bronz, çok daha iyi sonuçlar vermektedir. Toz metalurjisi ile ilgili kapsamlı bilgi ve üretim yönteminin işlem adımları ilerleyen sayfalarda verilmiştir.

2.2.1.e Kadmiyum Alaşımları:

Yapısında; %98 kadmiyum, %2 nikel veya %98 kadmiyum, %1 gümüş, %1 bakır bulunabilir. Sürtünme katsayısının düşük olması nedeniyle aşınma direnci yüksektir. Ayrıca yorulma direnci ve yük taşıma kabiliyeti fazla olduğundan kullanım alanı fazladır. Fakat üretim maliyeti yüksek olduğundan bazı yarış otomobillerinde ve uçak endüstrisinde kullanılır.

2.2.1.f Gümüş Alaşımları:

Yatakların yüksek dinamik yüklere maruz kaldığı ve diğer yatak malzemelerinin yetersiz kaldığı yerlerde kullanılmaktadır. Bu yataklarda genellikle elik bir malzeme üzerine, galvanik yöntemle, çok ince bir gümüş tabakası oluşturulur. Oluşturulan gümüş tabakasının üzerine ise 0,025-0,125 mm kalınlığında kurşun tabakası ve korozyona karşı direnç için indiyum tabakası yerleştirilir. Gümüş alaşımları kadmiyum alaşımları gibi pahalı malzemelerdir. Genellikle uçak ve uzay sanayisinde kullanılmaktadır.

2.2.1.g Alüminyum Alaşımları:

Yapılarında yaklaşık %90 alüminyum, %6-7 kalay, % 1.5-2.5 silikon ve çok az miktarda bakır içeren malzemelerdir. Korozyona ve aşınmaya olan direnci üst seviyelerdedir. Ayrıca meydana gelen sürtünme sonucunda ısıyı çabucak atarak oluşacak hasarı minimuma indirir. Fakat ısı genleşme katsayısı yüksek olduğundan kullanım alanı oldukça sınırlıdır.

2.2.1.h Lamel Grafitli Dökme Demir

Katılma sırasında grafit oluşumu lamel şeklinde olduğundan yağlayıcı özelliği bulunmaktadır. Kırılgan yapısı sebebiyle düşük hız ve basınçta çalışan yataklarda kullanılması uygundur. Bu yönüyle kullanım alanı kısıtlıdır. Eğer muylularda kullanılacaksa muylunun sertleştirilmesi gerekir. Lamel grafitli malzemelerin yüzeylerinin oksijen ilgisi sebebiyle bu bölgelerde hacim artışı meydana gelebilir. Bu da yatak malzemesi olarak kullanımını bir miktar kısıtlayabilmektedir.

2.2.2 Metalik Olmayan Yatak Malzemeleri

2.2.2.a Plastik Malzemeler

Plastik yatak malzemesi olarak en çok naylon ve teflonlar kullanılır.

Teflonun (politetrafluoetilen) kuru sürtünme katsayısı oldukça düşük olması, 200°C'a kadar dayanımı, su veya çeşitli kimyasallara karşı kararlı tutumu bu malzemeyi geniş bir alanda kullanılan yatak malzemesi yapmıştır. Rijitliğini, aşınma direncini ve statik mukavemetini artırmak amacıyla yapısına cam elyaf, grafit, molibden di sülfid ve bronz takviye edilebilir. Buna karşın bu dolgu malzemeleri yapının sürtünme katsayılarını yükseltmektedir. Örneğin; dolgu malzemesiz teflonun sürtünme katsayısı $\mu=0,016-0,04$ civarındayken dolgu malzemesi bulunan teflonun sürtünme katsayısı $\mu=0,1$ dolaylarına çıkabilmektedir. Bu değerler teflonun ergime noktasına kadar sabit değerlerde kalırken, ergimenin başlamasıyla iki katına kadar çıkmaktadır.

Naylon (poliamid) teflona göre çok daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Ayrıca naylonun sıvı emme kabiliyeti teflona göre yüksektir. Dolayısıyla yağlamanın

etkisiyle hacmi artar ve boyut toleranslarını aşabilir. Naylonun ergime noktası 50-60°C civarında olduğundan teflon kadar yüksek sıcaklıklarda çalışamaz. Kuru sürtünme katsayısı $\mu=0,15-0,33$ civarındadır.

Teflon ile naylon arasında tercih yapılırken çalışma sıcaklığına bakmak doğru olacaktır. Eğer oda sıcaklığı veya bu sıcaklığa yakın bir değerde çalışılacaksa naylon tercih edilmelidir. Çünkü kuru sürtünmede naylonun sürtünme katsayısı daha düşüktür ve rijitliği teflona göre yüksektir. Teflon ise naylona göre kimyasal bakımdan daha kararlıdır. Kimyasal ortamlarda ve zorlu çalışma şartlarında teflon daha doğru bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bütün plastik esaslı malzemelerin ısı iletkenliği kötü olduğu için üzerindeki ısıyı dışarıya atmakta zorlanır. Bununla beraber ısı genleşme katsayıları da büyüktür.

2.2.2.b Diğer malzemeler:

Plastik malzemelerin dışında su içinde çalışan yataklar için lastik, grafit ve sert odun kullanılmaktadır.

Lastik yataklarda ana malzeme paslanmaz metalik malzeme olup üst tabaka olarak sentetik lastik kullanılmaktadır. Lastiğin tabaka kalınlığı 7-20 mm arasında olabilir. Lastik yataklama elemanlarında yağlama işlemi genelde su ile yapılır. Çünkü lastik suya karşı dirençli olmasına rağmen, benzin ve sentetik yağlara karşı kimyasal formunu koruyamamaktadır. Bu yataklar sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde tercih edilmemektedir. Yüksek sıcaklık yatak ömrünü ciddi oranlarda kısaltmaktadır. Lastik yataklarda sürtünme katsayısı oldukça düşüktür ve yüzeydeki düzensizlikler, lastiğin düşük rijitliği sayesinde tolere edilebilir.

Kaymalı yataklara bazı uygulamalarda kaplama da yapılabilmektedir. Molibden disülfidin (MoS_2) düşük sürtünme özellikleri bu uygulamalarda yerini almıştır. MoS_2 uygun bir bağlayıcı reçine ile karıştırılarak genellikle termoset bir plastik üzerine ince bir tabaka halinde sürülür ve kuruması beklenir. Böylece kaplamalı bir yatak üretilmiş olur. Bu yatak nispeten yumuşak, pirinç veya beyaz metalden imal edilmiş miller ile iyi bir kombinasyon oluşturmaktadır (Yazıcıoğlu ve Yazıcıoğlu 2016).

2.3 YAĞLAYICI MADDELER

Yağlama işleminin asıl amacı yataklarda sürtünmeyi ve buna bağlı olarak oluşan aşınmayı kısmen veya tamamen önlemektir. Yağlama yapılmasının diğer amaçları ise sıcaklığı düşürmek ve makine elemanını korozyona karşı dayanımını artırmak olarak sıralanabilir. Yağlama ile makine elemanlarının çok daha verimli şekilde çalışması hedeflenmektedir.

Yağlama işleminin daha etkili olması için;

- 1- Temas yüzeylerinin kalitesinin iyi olması
- 2- Temas yüzeylerinin geometrisinin birbiriyle uygun olması
- 3- Çevresel şartların uygun olması

gerekir.

Yağlayıcı maddeler fiziksel hallerine göre katı, sıvı, gres ve gaz yağlayıcılar olarak 4 gruba ayrılır.

2.3.1 Katı Yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar temas yüzeyleri arasında düşük kayma mukavemetli katı bir film oluştururlar. Katı yağlayıcılar ile yağlama, yatak yüzeylerinde ki tribolojik temas gibi zor koşullar altında bile yüzeyleri etkin bir şekilde birbirinden ayırabilir(Kılıçay 2012).

Katı yağlayıcılar genellikle sıvı veya gres yağlayıcıların işlevinin bozulduğu sıcaklık farklarının fazla olduğu yerlerde (havacılık ve uçak sanayisinde) ve yüksek sıcaklıklarda çalışan makine elemanlarında yaygınca kullanılır. Katı yağlayıcılarda ana amaç sürtünen yüzeyler arasında sürekli yumuşak veya sert film tabakası oluşturmaktır. Bu film tabakaları mekanik, kimyasal, elektrokimyasal ve fiziksel proseslerde kullanılırlar (Mang and Dresel, 2007). Katı yağlayıcıların sıvı ve gres yağlayıcılara göre avantajları Çizelge 2.1’de verilmiştir

Çizelge 2.1 Katı yağlayıcıların sıvı ve gres yağlayıcılara göre avantajları (Donnet et al. 2001)

Çevre şartları ve/veya durum	Katı yağlayıcılar	Sıvı yağlayıcı ve gresler
Vakum	Bazı katılar yüksek vakumda çok iyi yağlayıcılar ve buhar basınçları düşük seviyededir.	Piyasada kullanılan çoğu sıvı yağlayıcı maddeler kolay buharlaşır.
Basınç	Yüksek basınç dirençleri fazladır.	İlave maddeler olmadan yüksek basınç dirençleri azdır.
Sıcaklık	Düşük ve yüksek sıcaklıktan çoğunlukla etkilenmez.	Düşük sıcaklıklarda katılaşma eğilimi, yüksek sıcaklıklarda bozunma ve viskozite değişimi gösterirler.
Elektriksel iletkenlik	Bazıları mükemmel elektriksel iletkenidir.	Çoğunlukla yalıtıkandırlar.
Radyasyon	Nükleer radyasyondan etkilenme eğilimi çok düşüktür.	Çoğu zaman kimyasal yapısı bozunmaya uğrar.
Aşınma	Düşük hızlarda aşınma durumlarında çok iyi aşınma performansı ve devamlılık sağlar. Kullanım ömürlerini yağ film kalınlığı ve aşınma oranı belirler.	Düşük hızlarda aşınma durumlarında performansı iyidir. Fakat sınır film yağlamada katkı maddeleri gerekebilir.
Sürtünme	Geniş bir sıcaklık bandında düşük sürtünme katsayısına sahiptir.	Sıcaklığın düşük veya yüksek olması durumunda viskozitesi, ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısı değişkenlik gösterir.
Termal iletkenlik ve ısı yayma kapasitesi	Metalik katı yağlayıcı filmlerinde yüksek bir termal iletkenlik sağlarken, inorganik filmlerde genellikle düşük termal iletkenlik sağlar.	Genellikle iyi termal iletkenlik gösterirler.

Depolama	Çok uzun süre boyunca depolanabilir. Fakat metalik filmler nem ve oksijene karşı hassastır.	Depolama sırasında sızıntılar veya buharlaşmalar meydana gelebilir. Ayrıca uzun süre depolanması kimyasal yapısının bozulmasına neden olabilir.
Hijyen	Emisyon olmadığından dolayı çevreye herhangi bir zararları yoktur.	Yatak malzemeleri ile tepkimeye girerek emisyon oluşturabilirler veya sızıntı durumunda çevreyi kirletebilirler. Ayrıca yangın tehlikeleri vardır.
Tribolojik yüzeye uygunluk	Zor yağlanan yüzeyler için oldukça uygundur.(Örneğin; Alüminyum, titanyum, paslanmaz çelik ve seramikler)	Demir dışı ve seramik yüzeyler için kullanımı uygun değildir.
Suya karşı direnci ve çevreyle kimyasal etkileşimi	Suya, kimyasal çözücülere, yakıtlara, asit ve bazlara karşı nispeten hassas değildir.	Asidik ve sulu ortamlarda kimyasal bozulma görülebilir.

Çizelge 2.1'den görüldüğü üzere katı yağlayıcılar yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklıkta, vakum ve yüksek basınç altında oldukça kararlıdır. Radyasyondan etkilenmezler. Ayrıca yağlayıcı dağıtım sistemi (pompa) gibi sistemlere gerek duymadığından kullanımı daha pratiktir.

Katı yağlayıcılar doğrudan yatak malzemesi olarak kullanılabilirdiği gibi sıvı veya gres yağlara katkı maddesi olarak katılarak da kullanılabilir. Grafit ve molibden disülfid (MoS_2) pratikte en çok kullanılan katı yağlayıcılardır. Grafit alçak devirler ve yüksek sıcaklıklarda iyi bir performans sergiler (Tevrüz 2015).

Teflon, poliamid, poliasetal ve floretilen-propilen gibi malzemeler de düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Bu malzemeler doğrudan yatak malzemesi olarak kullanılabilirdiği gibi grafit veya MoS₂ ile beraber de kullanılabilir. Grafitin çalışma sıcaklığı -18°C....+45°C arasındadır. Molibden disülfidin ise grafitte nazaran daha geniş çalışma sıcaklığı vardır (-180°C....+400°C). Sürtünme katsayıları ise grafitin $\mu=0.1-0.2$ arasında iken, molibden disülfidin $\mu=0.04-0.09$ arasındadır. Grafit ancak hava ve suyun bulunduğu ortamlarda yağlayıcı özelliğe sahiptir. Vakum ortamlarında ise tam tersine aşınma elemanıdır (Tevrüz 2015). Bazı uygulamalarda bu iki malzeme de döküm işleminde yapıya katılarak katı yağlayıcı özelliği kazandırılabilir.

2.3.2 Sıvı Yağlayıcılar

Sıvı ile yağlama işleminde sürtünen yüzeyler arasına viskoz bir akışkan enjekte edilerek kuru sürtünmenin önüne geçilmektedir. Bazı afaki durumlar haricinde (yüksek sıcaklık, vakum ortamı vb) çoğu uygulamada sıvı yağlama, beklentilere iyi bir cevap vermektedir. Her ne kadar yapılan işlemin adı yağlama olsa bile bazı uygulamalarda yağ yerine su da kullanılabilir. Yağlayıcı olarak suyun kullanımını kısıtlayan en büyük etken yatak malzemesinin metalik olmasıdır. Eğer malzeme metalik ise su korozyona sebep olabilir. Korozyon, yataklama elemanlarının ömrünü kısaltır.

Sıvı yağlayıcılar ile yağlanan temas yüzeyleri birbirinden tamamen ayrıldığı için sıvının viskozitesi oldukça önem taşır (Tevrüz 2015). Sıvı yağlayıcılar organik, madensel ve sentetik yağlar olmak üzere üç grupta incelenir.

2.3.2.a Organik yağlar

Organik yağlar bitkiler ve hayvanlardan elde edilen yağlardır. Bu tür yağlar çabuk çözülerek bozulmaya uğrayacağından makine endüstrisinde pek fazla karşımıza çıkmaz. Ayrıca maliyetinin fazla olması organik yağların kullanımını kısıtlar. Bunlara karşın organik yağların ıslatma kabiliyeti yüksek olduğundan madensel yağlara katkı olarak kullanılabilir.

2.3.2.b Mineral yağlar

Ham petrolün çeşitli sıcaklıklarda damıtılmasıyla üretilen yağlardır. Pratikte en çok kullanılan sıvı yağlayıcılar ham petrol esaslı yağlardır (Tevrüz 2015). Mineral yağların ucuz üretim prosesleri, yatak malzemeleri ile tepkime vermemeleri ve kararlı oluşu, ısıyı kolaylıkla dışarı itmesi ve kolay depolanması pratikte bunları vazgeçilmez yapar.

Mineral yağlar, dişli kutuları, kaymalı yataklar, türbinler, kompresörler, hidrolik sistemler ve buhar makineleri gibi birçok farklı yerde kullanılabilir. Fakat kullanılacak yerdeki sıcaklık ve korozif ortama göre katkı oranları değişmektedir.

Mineral yağlar kinematik viskozitesine göre ISO (International Standards Organisation) 3448 ve DIN 51 519 tarafından sınıflandırılmıştır. Viskoziteler 40°C deki mm²/s cinsinden ölçülmüş ve buna göre sınıflandırılmıştır (Tevrüz 2015).

Mineral yağlar, taşıt motor ve mekanizma yağları olarak ise SAE (Society of Automotive Engineers Inc.) tarafından sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma yapılırken yağ viskoziteleri baz alınmıştır. DIN 51 511 ve DIN 51 512 de bu sınıflandırmayı kabul etmektedir. (Akkurt 2012) Yağ cinsinin adlandırılması yapılırken belirtilen rakamlar 100°C deki mm²/s cinsinden kinematik viskoziteye karşılık gelmektedir. Rakamlar 0-50 arasında ise motorlara uygun, 70-250 arasında ise taşıt mekanizmalarına uygundur (dişli kutuları vb.). Bazı yağlara katkı maddeleri ilave edilerek sıcaklık farklarında viskoz özelliklerinin kaybolmasının önüne geçilmiştir. Örneğin; SAE 75W-90 isimli yağ, hem SAE 75 yağının hem de SAE 90 yağının özelliklerini gösterir.

2.3.2.c Sentetik Yağlar

Bu tür yağlar genellikle kimyasal maddelerden elde edilen ve özel bir amaca hizmet eden yağlardır. Sentetik yağlar kendi başlarına doğrudan yağlayıcı olarak kullanılabilirler gibi, madensel yağlara katkı maddesi olarak da kullanılabilirler.

Mineral yağlara nazaran daha uygun viskozite davranışları, daha uzun ömür, daha zor alevlenme yeteneği gibi bazı avantajları vardır. Tüm bunlara karşın bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar; her malzeme ile uyumlu çalışmaması (korozif

etkiler sebebiyle), sudan çabuk etkilenme, köpürme tehlikesi, zehirleyici olması ve yüksek maliyetli oluşudur.

2.3.3 Gres Yağlayıcılar

Gres yağlar, sıvı yağlayıcıların içerisine eklenen katı yağlardan oluşmaktadırlar. Gresler, farklı sıcaklıklarda farklı fiziksel hallerde bulunurlar. Örneğin; düşük sıcaklıklarda katı bir davranış sergilerken, artan sıcaklığın etkisiyle sıvı davranış sergilerler. Sıvı yağlayıcıların içerisine konulan katı maddeler genellikle alüminyum, kalsiyum, baryum, lityum, sodyum gibi sabun bazlı malzemeler olduğu gibi, bentonit, mika veya başka organik esaslı sabun olmayan maddeler de olabilir.

Gres yağları kullanıldığı yere göre;

- Rulman gresleri
- Genel kullanım amaçlı gresler
- Düşük sıcaklık gresleri
- Açık kaymalı yatak gresleri
- Sızdırmazlık gresleri
- Korozyon gresler

olarak sınıflandırılır. Gres yağlar genellikle açıkta çalışan ve kompleks olmayan sistemlerde kullanılır. Gres yağlayıcılar ile yağlanan sistemlerde hız ve yük orta seviyelerdedir (Akkurt 2012).

Ayrıca NLGI (National-Lubricating Grease Institute) gres yağları penetrasyonlarına göre sınıflandırmıştır. Penetrasyon işlemi, 0.1mm çapındaki sivri uçlu konik bir cismin 25°C deki gres yağlara bırakılması sonucu batma derinliğine göre yağ özelliğini ölçme işlemidir. Bu sınıflandırma Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 NLGI'ya göre gres yağlayıcıların sınıflandırılması

NLGI grade	Batma derinliği(mm)	Uygulama alanları
000	44,5 - 47,5	Merkezi yağlama sistemleri ve vites kutuları
00	40,0 - 43,0 (Akışkan gresler)	
0	35,5 – 38,5	
1	31,0 – 34,0	Kaymalı yataklar, rulmanlı yataklar, kompresörler ve su pompaları
2	26,5 – 29,5 (Yumuşak gresler)	
3	22,0-25,0	
4	17,5-20,5	
5	13,0 16,0 (Sert gresler)	Sızdırmazlık gresleri ve blok gresleri
6	8,5- 11,5	

2.3.4 Gaz yağlayıcılar

Düşük yük ve yüksek hızda çalışan makine elemanlarında çalışma koşullarında kararlı olmak şartıyla herhangi bir gaz veya buhar da yağlayıcı madde olarak kullanılabilir. Gaz yağlayıcıların artan sıcaklıkla viskoziteleri de artış göstermektedir. Dolayısıyla viskozitesi düşmeksizin teoride -250°C ile +2000°C arasında kullanmak mümkün iken pratikte durum böyle değildir. Ancak 800°C gibi yüksek sıcaklıklarda kimyasal yapılarında herhangi bir değişim olmaksızın kullanılabilirler. Sıvı yağlayıcıların bu sıcaklıklara dayanamaması, gaz yağlayıcıları yüksek sıcaklıklarda bir adım ileri taşımaktadır.

Gaz yağlayıcılar ultra santrifüjlerde, yüksek hızlı taşlama tezgah millerinde, jiroskoplarda, elektrik motorlarında, roketlerde ve nükleer reaktörlerde sıkça kullanılmaktadır.

2.4 Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi, mikro boyuttaki toz metallerin veya seramiklerin istenilen şekle gelmesi için uygun bir kalıp içinde presleme işlemiyle sıkıştırıldığı ve tozların birbirleriyle temas noktalarından bağlanması için ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklık değerinde ısıtılması işlemlerinden oluşan bir üretim yöntemidir.

Toz metalurjisi yüz yılı aşkın süredir bilinen bir yöntemdir. Ancak geçtiğimiz son 25-30 yılda yüksek kalitede parça üretimi için kullanılmaktadır (Dee vd 2004). Toz metalurjisi ucuz maliyeti ve üretim sonucu çok yakın tolerans değerleri sayesinde avantajlı bir üretim yöntemidir (Arifin et al. 2004). Toz metalurjisi bu avantajlara ek olarak karmaşık geometriler için de oldukça uygun bir imalat çeşididir. Otomotiv, bilgisayar ve ev gereçleri gibi farklı sektörlerde tercih edilen toz metalurjisi, son zamanlarda tıbbi implant ve gereçlerin üretiminde de kullanılmaktadır.

Bu yöntemle üretilen parçalarda gözenekli yapı kaçınılmazdır. Üretilen parçalar barındırdığı gözenek oranına göre gruplandırılır. Üretilen parçalarda gözenek oranı %10-30 arasında ise bu parçalar gözenekli grupta, %1-3 arasında ise kompakt grupta değerlendirilir (Dabrowski et al. 2000).

Toz metalurjisinin karakteristiği olan poroz yapı, bazı alanlarda istenmeyen bir durumken bazı uygulamalarda mükemmel bir avantaj sağlar. Avantaj sağladığı alanlardan bir tanesi kendinden yağlayıcı yüzeylerdir. Örneğin; üretim sonucu çıkan yataklama elemanları sıvı bir yağın içerisine bırakıldığı zaman hacimlerinin yaklaşık %30una kadar yağ emebilirler (Akkurt 2012). Daha sonra çalışma şartlarındaki sıcaklığın etkisiyle yatak genişler ve söz konusu gözenekler küçülerek yağı dışarı atar. Ortaya çıkan yağ temas yüzeyinde kuru sürtünme değil sıvı sürtünmesi oluşturur. Sistem durdurulup, sıcaklık düştüğünde ise yağlayıcı yüzey tekrar başlangıç boyutuna döner ve yağ gözeneklere hapsolür.

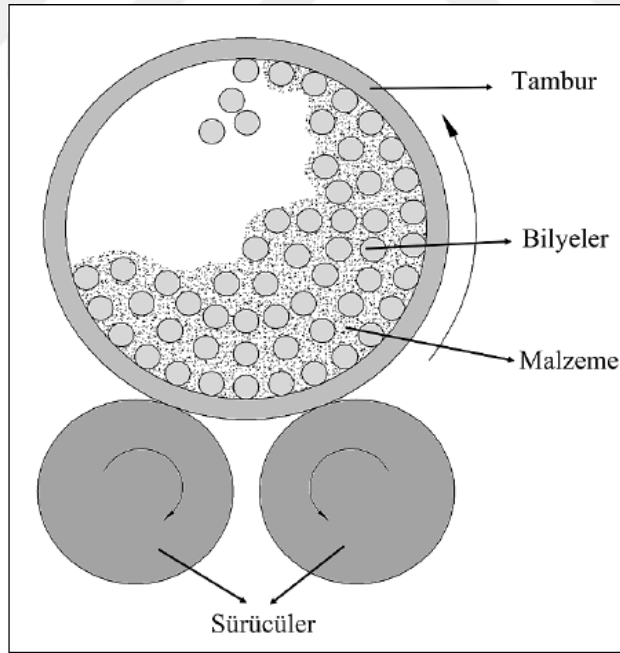
2.4.1 Toz üretim yöntemleri

Toz, tanım olarak ana malzemeden ayrılmış ve büyüklüğü birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar değişiklik gösteren parçacıklardır. Söz konusu tozların üretimi için yaygın olarak kullanılan dört farklı yöntem vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

1. Mekanik yöntem
2. Atomizasyon yöntemi
3. Elektrolitik yöntem
4. Kimyasal yöntem

2.4.1.a Mekanik yöntem

Mekanik yöntemde birkaç farklı metot uygulanabilir. Bunların ilki darbe ile toz üretimidir. Darbe ile üretimde ana malzemeye bir çekiç veya benzeri cismin şiddetle vurulmasıyla malzeme küçük parçalara ayrılır. Bir diğer mekanik yöntem ise aşındırarak öğütmedir. Bu uygulama zımpara işlemine benzemektedir. Aşındırıcılar birbiri üzerinde sürtülerek toz üretilir. Mekanik yöntemlerden bir başkası ise basma ile toz üretimidir. Bu yöntemde kırılgen malzemeler basma yüküne maruz bırakılarak ufalanması sağlanır. Ortaya çıkan parçacıklar elekten geçirilerek kullanılabilir. Silindirik bilye değirmeni ile öğütme de mekanik toz üretiminin bir başka şeklidir. Bu yöntemde sert yapıdaki bilyeler ve toz haline getirilecek malzemeler silindirik değirmene konularak öğütülür. Fakat bu yöntem sünek malzemelerde, kırılgen olmamaları sebebiyle, kullanılamaz. Çünkü sünek malzemeler kırılgen yapıda değildir. Dolayısıyla bilyeler ana malzemeyi kırmakta oldukça zorlanır (German 2016). Şekil 2.3'te bu yöntemin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.3 Bilyeli öğütme yönteminin şematik görünüşü (German 2016)

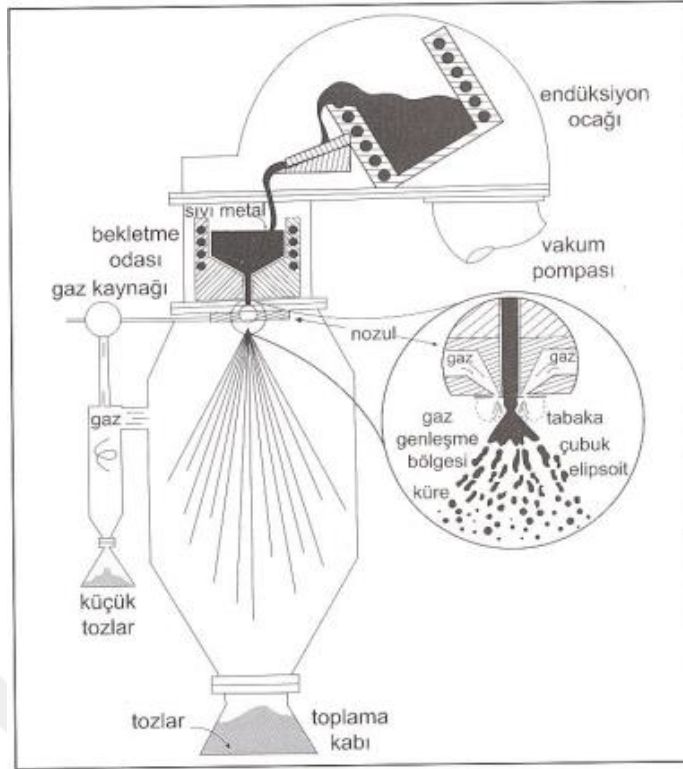
Mekanik yöntem ile toz üretimi oldukça zor ve maliyetlidir. Ayrıca tozlar üretim sırasındaki sıcaklık değişimleri ve plastik şekil verme gibi etmenlerden etkileneceğinden, iç yapılarında artık gerilmeler meydana gelebilmektedir. Bunun önüne geçilmesi için

gerilim giderme tavlama yapılmalıdır. Aksi takdirde bu tozlardan üretilen ürünlerin mekanik özellikleri değişkenlik gösterebilir.

2.4.1.b Atomizasyon Yöntemi

Atomizasyon yöntemi, ergimiş metalin yüksek basınçla bir nozuldaki geçerken üzerine su veya gaz jeti gibi soğutucu bir akışkanın püskürtülerek sprey damlası şeklinde aniden katılaştırılmasıyla toz elde edilmesi işlemidir. Soğutucu akışkan olarak; hava, su, azot gazı (N₂) veya gazyağı kullanılabilir (Onur vd 1996). Yöntem, günümüzde çok önemli bir yere sahiptir. 400kg/dakika gibi yüksek kapasitede üretim için vazgeçilmez bir toz üretim mekanizmasıdır ayrıca oldukça ucuz oluşu da avantajları arasındadır (Vicente et al. 2016).

Atomizasyon yönteminde işlem, vakum ortamında yapılarak tozların oksitlenmesinin önüne geçilmektedir. Fakat yüksek ergime dereceli metallerin bu yöntemle tozlarının elde edilmesinde vakum ortamı yeterli olmaz ve tozda oksitlenme meydana gelebilir. Bu durumda üretim sonrası oksit tabakanın toz yüzeyinden uzaklaştırılması için başka prosesler uygulanır. Şekil 2.4'te yüksek ergime dereceli metaller için uygun olan düşey gaz Atomizasyon ünitesi gösterilmiştir. Buna göre endüksiyon ocağı ile eritilen metal, gaz besleme sistemine gelir ve oradaki nozuldaki çıkar. Nozulun yanında bulunan soğutucu gaz tabancaları ortama sürekli gaz enjekte eder. Böylece sprey formda nozuldaki çıkan ergiyik metal soğumanın etkisiyle katılarak toplama kabında birikir. Şekilde görüldüğü gibi proses tamamen vakum ortamında yapılmaktadır.



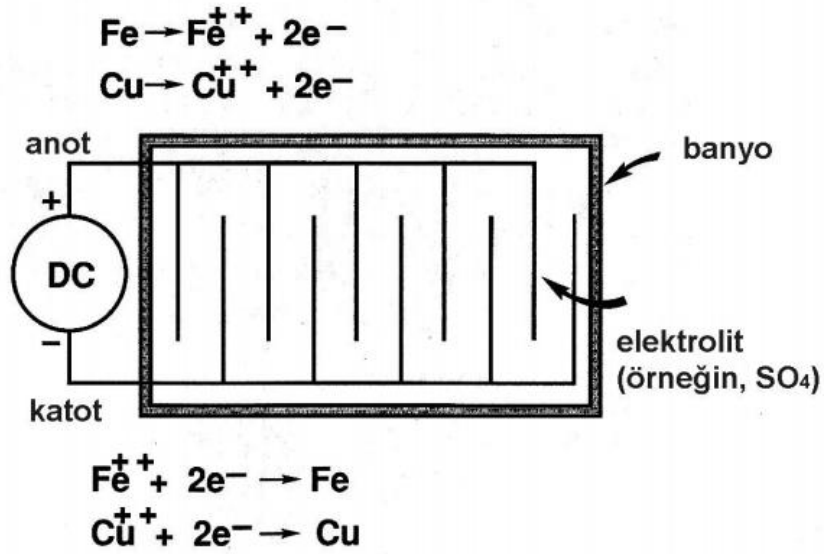
Şekil 2.4 Düşey gaz atomizasyonu yönteminin şematik görüntüsü (German 2016)

2.4.1.c Elektrolitik yöntem

Elektrolitik yöntemde tozu elde edilecek metal olarak; paladyum, krom, bakır ve demir kullanılmaktadır. Yöntemde elektroliz hücresine anot olacak şekilde bağlanarak sisteme voltaj uygulanır. Uygulanan voltajın etkisiyle anot parçalanarak katot üzerine birikir. Biriken tabaka mekanik olarak kazınarak farklı boyutlarda tozlar elde edilir. Bunun için tozlar istenilen mesh boyutuna göre elekten geçirilerek homojenleştirilmesi sağlanır. Katot üzerine biriken gözenekli yapının kazınmasında mekanik bir işlem uygulandığı için artık gerilmelere karşı gerilim giderme tavlaması yapılabilir.

Elektroliz hücresinde banyo şartları, katoda birikecek yapının özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin; düşük iyon derişimi, hücre kimyasalları ve koloidal katkıları katoda biriken yapının daha gözenekli olmasını sağlar. Buna karşın, yüksek viskoziteli elektrolit ve işlem sırasında banyonun az karıştırılması, gevşek bir yapı oluşturur (German 2016).

Elektrolitik yöntemin en büyük avantajı yüksek saflıkta metal toz üretimidir. Eğer alaşımli toz üretilmek istenirse bu yöntem uygun olmayabilir. Katoda biriktirme işleminden sonra yapılan mekanik kazıma işleminden dolayı tozların içerisinde yabancı madde girişi (farklı toz ve kir gibi) olmaktadır. Bu madde girişleri yöntemi kısıtlayan en önemli unsurdur. Bu kirleri temizlemek için ayrı prosesler uygulanacağı için bu üretim yöntemi maliyet açısından verimli değildir (German 2016). Şekil 2.5'te elektroliz hücresinin şematik yapısı verilmiştir.



Şekil 2.5 Elektroliz hücresinin şematik yapısı (German 2016)

2.4.1.d Kimyasal yöntem

Kimyasal yöntem, tozu elde edilecek metalin oksit formunun çeşitli reaksiyonlarla oksijenin uzaklaştırılması esasına dayanır. Kullanılan metaller genellikle demir, nikel, kobalt ve molibden vb.'dir. Kimyasal yöntem ile toz üretiminde önce toz üretilen metalin oksit formu öğütülerek toz haline getirilir. Daha sonra oksijeni uzaklaştırmak için indirgeyici bir ortamda, oksit malzeme ısıtılarak indirgeme yapılır. İndirgeyici olarak karbon veya hidrojen kullanılır.

1900 yılında İsviçre'de yapılan bir çalışmada Fe_3O_4 (magnetit) kok ve kireç ortamında indirgenmiş geriye sadece süngerimsi bir demir tabakası oluşmuştur. Tekrar öğütme işlemiyle toz demir elde edilmiştir (German 2016).

2.4.2 Toz metalurjisinin üretim basamakları

Toz metalurjisi ile üretim temelde üç aşamada gerçekleştirilir. Fakat bazı uygulamalarda sinterleme işleminden sonra gerek görüldüğü takdirde ek işlemler yapılabilir. Bu üç aşama şöyledir;

1. Tozların hazırlanması ve harmanlanması
2. Soğuk presleme
3. Sinterleme
 - Tam yoğunluk veya şekillendirme(Gerek duyulursa)
 - Yağ emdirme veya infiltrasyon(Gerek duyulursa)

2.4.2.1 Tozların hazırlanması ve harmanlanması

Tozların hazırlanması ve karıştırılması homojen bir toz kullanımı için yapılır. Harmanlama işlemi, üretilecek malzemenin çalışma ortamına göre seçilen tozların yapıya katılması işlemidir. Zaten toz metalurjisini diğer üretim yöntemlerinden ayıran en önemli unsur, alaşımlandırılması zor olan veya mümkün olmayan malzemelerin üretilebilmesidir (Groover 2015).

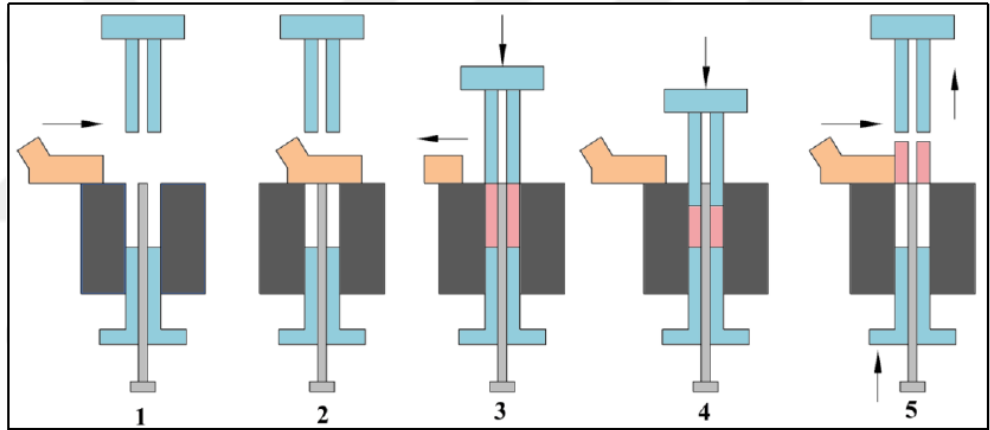
Tozlar hazırlanırken sinterleme işleminde tutunmanın tam sağlanması için bağlayıcı maddeler, presleme işleminde kalıp ile toz arasındaki sürtünmenin azaltılması için de yağlayıcı maddeler yapıya katılır (Kipouros vd 2006). Yağlayıcı maddeler genellikle %0.5- %1,5 oranında katılır. Piyasada en çok kullanılan yağlayıcılar metalik sterat ve parafindir. Fakat alüminyum ve çinko oksitleri de özellikle toz hazırlama safhasında topaklanmayı önlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak ise basit mum benzeri polimer malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin ucuz oluşu ve düşük ergime sıcaklığı önemli bir avantajdır.

Kullanılacak tozun yanı sıra alaşım metal tozları, yağlayıcı ve bağlayıcılar bir haznenin içerisine konularak titreşimle veya fiziksel karıştırıcılar ile karıştırılarak işlem sonlandırılır. Burada dikkat edilmesi gereken şey karıştırma ölçüsünün iyi ayarlanmasıdır. Titreşimin frekansı çok yüksek olursa tozlar arasında segregasyon meydana gelebilir. (Groover 2015)

2.4.2.2 Soğuk presleme

Presleme işlemi istenilen parça şeklindeki kalıba tozların doldurularak yüksek basınçta sıkıştırılmasıdır. Sıkıştırılma işlemindeki amaç malzemenin yoğunluğunu ve dayanım kabiliyetini artırarak istenilen gözenek miktarını ayarlamaktır (Sarıtaş 1994) Presleme işlemi mekanik, pnömatik veya hidrolik sistemlerde yapılır (Zhang vd 2010).

Presleme işleminde çok farklı parametreler mevcuttur. Bunlar kalıp malzemesinin sertlik miktarı, presleme sırasındaki kalıp sıcaklığı, tozlar dışında sadece kalıp cidarlarının yağlanması (bazı durumlarda her ikisi de yağlanabilir), uygulanan basıncın miktarı ve basınçta beklemedir. Bu parametreler teknolojinin gelişimi ile gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 2.6’te tek eksenli preslemenin şematik görüntüsü verilmiştir.



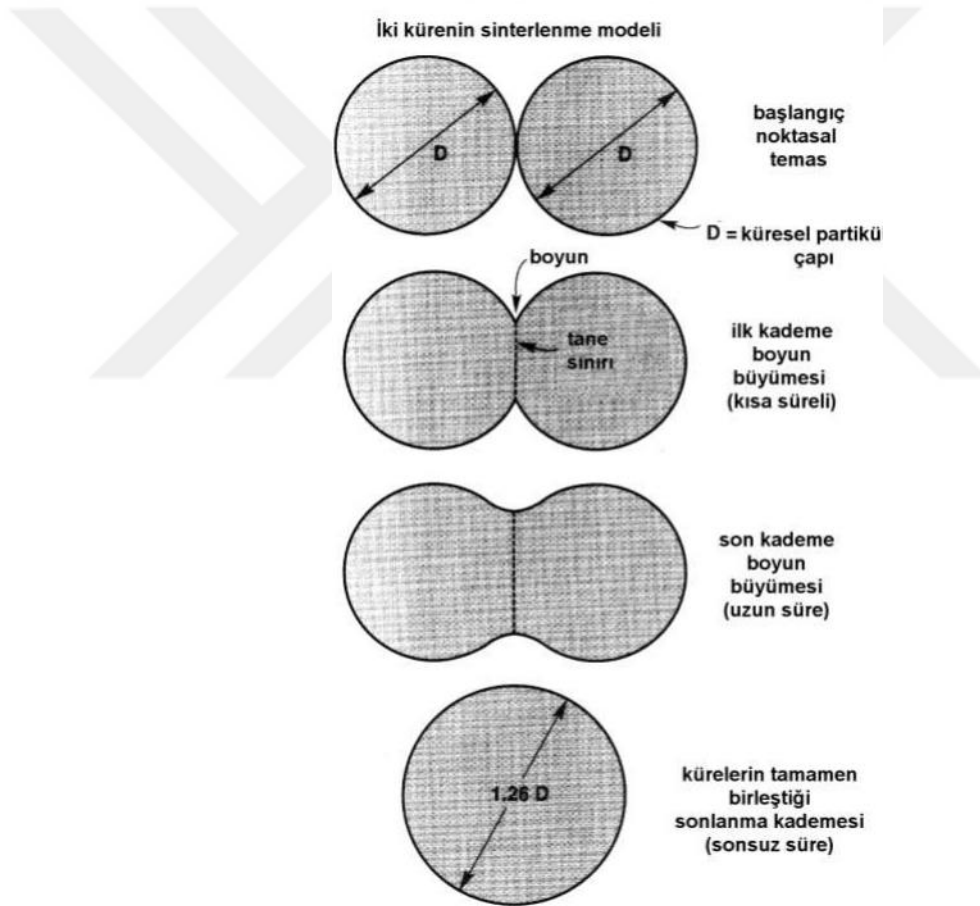
Şekil 2.6 Tek eksenli presleme işleminin şematik görüntüsü (Sarıtaş 1994)

Presleme sonrası elde edilen ürün; “yeşil kompakt” diye adlandırılır. Yeşil kompaktın dayanımı tozlara göre yüksek, sinterleme sonrasında elde edilen ürüne göre düşüktür. Yeşil ürün taşınabilirlik açısından yeterli dayanıma sahiptir (Groover 2015).

2.4.2.3 Sinterleme

Sinterleme işlemi preslemeden çıkan yeşil ürünün ergime derecesinden daha düşük sıcaklıklarda ısıtma işlemidir. Bu ısınma işlemiyle beraber tozların yüzey alanı küçülür ve birbirlerine temas eden alanları artır. Böylelikle dayanımda artış olur.

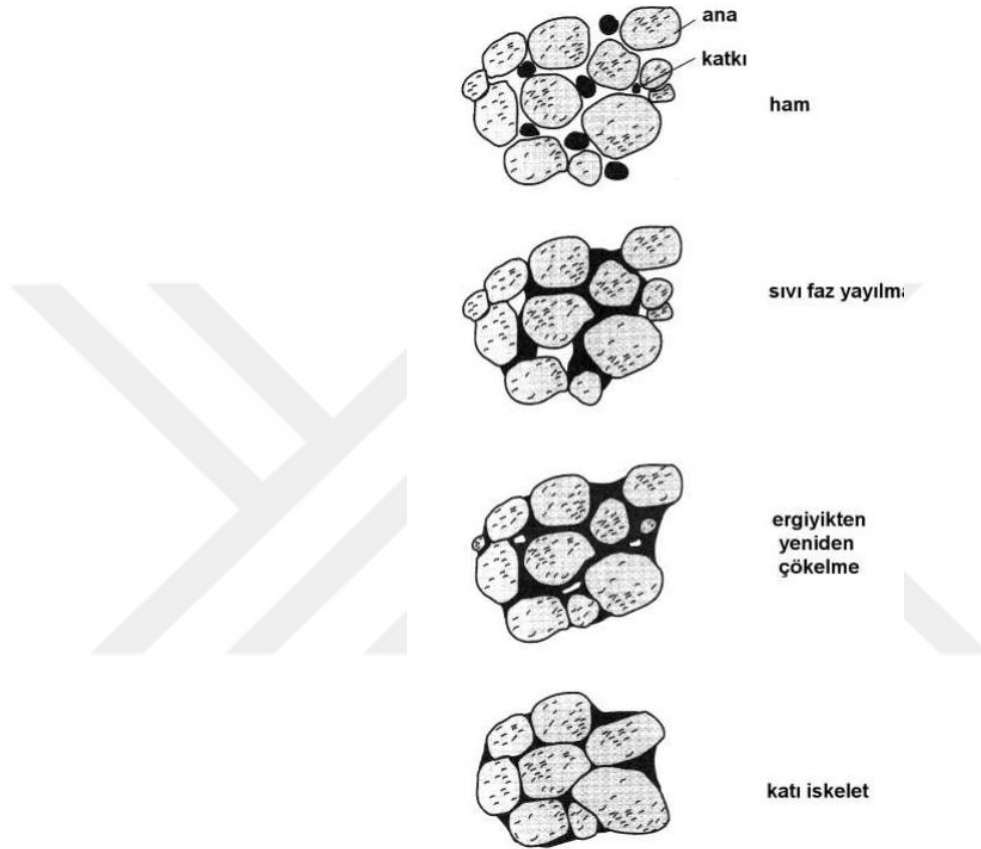
Sinterleme işlemi iki farklı şekilde oluşabilir. Bunlardan birincisi katı-hal sinterlemedir. Katı-hal sinterlemede itici güç yüzey enerjisinin azaltılmasıyla taneler arası bağ kurulmasıdır. Bu bağ, difüzyonun etkisiyle oluşur. Bilindiği üzere difüzyon mekanizması iki parametreye bağlı olarak gelişir, bunlar sıcaklık ve zamandır. Sinterleme işleminde sıcaklık zaten belirli bir seviyededir. Eğer süre olarak da difüzyon için yeterli zaman tanınırsa birbirleriyle temas noktalarından bağlanan ve çapları 1 birim olan tozlar, teorik olarak geçen zamanla birlikte tamamen birleşerek çapı 1,26 birim olan yeni küresel bir toz oluştururlar. Şekil 2.7’de bu olayın şematik görüntüsü verilmiştir (German 2016).



Şekil 2.7 İki toz zerreciğinin sinterlenme modeli (German 2016)

Sinterleme işleminin bir diğer mekanizması, sıvı fazlı sinterlemedir. Bu mekanizmada ise tozların farklı ergime derecesine sahip en az iki farklı tozdan oluşması gerekmektedir. Ayrıca tozlar birbiri içerisinde tam olarak çözünmemelidir.

Sıvı fazlı sinterlemede sıcaklık, düşük ergime dereceli tozun sıcaklığında yapılır. Böylece o malzemenin tozları eriyerek bağlayıcı madde görevi görür. Bu yaklaşım hem sinterlemenin hem de kompozit malzeme teorisinin yansımasıdır Şekil 2.8’de bu mekanizma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Sıvı fazlı sinterleme modeli şematik görüntüsü (German 2016)

Toz metalurjisi ile üretilen malzemeler istenilen boyuta çok yakın boyutlarda üretilebilirler. Bazı durumlarda vida veya kanal açmak için nadir de olsa talaşlı imalat yöntemleri de piyasada kullanılmaktadır. Ayrıca parçanın istenilen yoğunluğa ve gözenek miktarına kavuşması için ek bir presleme işlemi daha yapılabilir. Bu durumda malzemenin mukavemetinde bir miktar artış görülmektedir (Groover 2015).

Toz metalurjisi ile üretilen parçalar gözenekli yapılar ihtiva ettiği için kendinden yağlayıcı yüzeyler için mükemmel sonuçlar verebilir. Bunun için sinterleme sonrasında bir yağ emdirme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem yağlayıcı yüzey parçalarını akışkan bir yağ içerisinde bırakılarak porlara yağ sızdırılması ile yapılır. Sızdırılan yağ çalışma

şartları ile birlikte yüzeye çıkararak kendinden yağlayıcı yüzeyler elde edilir. Ayrıca bu gözeneklere katı yağlayıcı maddeler veya başka katılar da doldurulabilir. Bunun için porlara doldurulacak katı madde, toz metalurjisi ile üretilmiş ana malzemedan daha düşük ergime sıcaklığına sahip olmalıdır. İnfiltrasyon adı verilen bu işlem katı yağlayıcının eritilerek porların doldurulması esasına dayanır. İnfiltrasyon sonucu malzemenin mukavemeti ve tokluğu önemli ölçüde artar (Groover 2015).

2.5 Eklemeli Üretim Yöntemleri

Eklemeli üretim, teknolojinin gelişmesiyle birlikte endüstride de kullanımı yaygınlaşan bir üretim yöntemidir. Bu tekniğin yeni bir imalat yöntemi olduğu sanılır. Fakat ilk 3D yazıcılar 1980'li yıllarda keşfedilmiştir (Vicente et al. 2016). O tarihte, keşfedilen bu cihazlar pek verimli olmadığı için yaygın olarak kullanılmaya ancak 2000'li yıllarda başlanmıştır. O dönemlerde bu yöntem genellikle yeni çıkan ürünlerin prototipinin üretiminde kullanılmaktaydı. Günden güne daha da geliştirilen bu üretim yöntemi şu an seri üretimde oldukça popüler duruma gelmiştir.

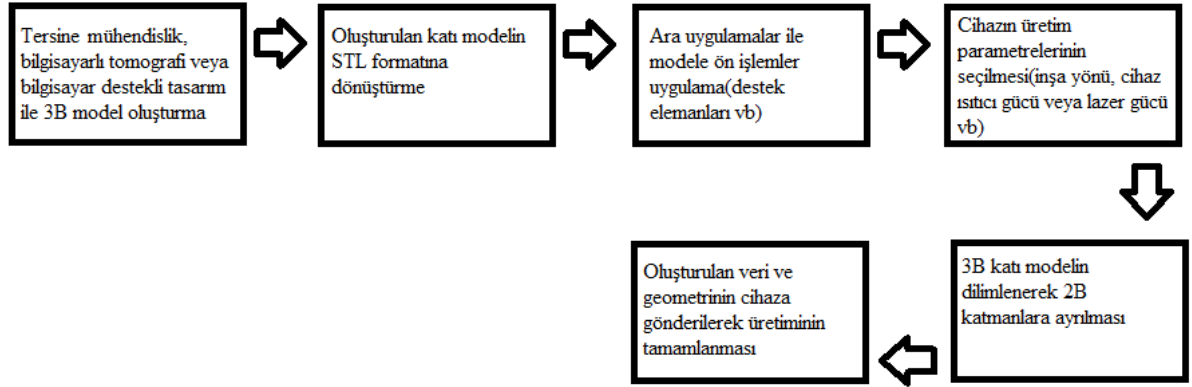
Eklemeli üretim, aslına bakılınca üç boyutlu (3B) geometrik veriler kullanılarak, üretim levhası denilen bir yüzeye malzemelerin katman katman eklenerek üretimin tamamlanması prosesidir. Bu üretim yönteminde parça geometrisi bilgisayar destekli tasarım programları ile çizilebildiği gibi, var olan bir parçanın tersine mühendislik (TM) yöntemiyle de elde edilebilir. Malzeme olarak plastik, kompozit veya metal v.b malzemeler günümüzde aktif olarak kullanılmaktadır (Anonymus 2018) .

Eklemeli üretimin klasik yöntemlere göre bazı avantajları vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

- Karmaşık geometrilerin üretiminin kolaylığı
- Kullanılan materyallerin istenildiği gibi alışlandırılabilmesi
- Tek seferde birden çok parçanın aynı anda üretilebilmesi
- Eğer üretim parametreleri iyi seçilirse ek bir işleme gerek duyulmaması (yüzey parlatma, yeniden boyutlandırma veya ısıtma işlemi)
- İnce cidarlı veya mikro kanallı yapıların oluşturulma kolaylığı

Üretimi planlanan katı modeller çoğunlukla doğrudan imalat cihazına gönderilememektedir. Bir ön işlem olarak 3B katı model, eklemeli üretim standart

arabirimi olan STL uzantılı dosyaya dönüştürülmektedir. Bu STL dosyası üretim yapılacak makinenin önerdiği ara uygulamalar vasıtasıyla hata kontrolü, gereken yerlere destek elemanları koyma, inşa yönünü belirleme ve bazı cihaz parametrelerini seçme gibi bir takım ayarlamalar yapılır. Daha sonra bu ara uygulama, katı modeli eşit parçalara dilimleyerek iki boyutlu (2B) katmanlara ayırır. Üretimi yapacak cihaz bu 2B katmanların verilerini kullanarak üretim işlemini gerçekleştirir.



Şekil 2.9 Eklemeli üretimin basamakları

Bir katı model STL dosya formatına dönüştürüldüğü zaman bilgisayar, katı modelin yüzeyini genellikle üçgen elemanlara ayırır. Bu üçgen elemanın sınırları x, y ve z koordinatlı vektörlerle tanımlanır. Bu vektörler koordinatların yerlerini daha basitçe ifade ettiğinden STL dosyalarının veri transferi ve işlenmesi oldukça kolay olmaktadır (Özüğür 2006).

2.5.1 Eklemeli üretim yöntemlerinin çeşitleri

- Stereolitografi (SLA)
- Eriyik yağma ve modelleme (FDM)
- Üç boyutlu yazıcı (3DP)
- Seçici lazer eritme (SLM)

2.5.1.a Stereolitografi (SLA)

Bu üretim yönteminde sıvı halde bulunan ışığa duyarlı fotopolimerik reçine, noktasal ultraviyole ışın kaynağı vasıtasıyla belirli bölgelerde katılaştırılır. Bu bölgelerin sınırları 2B katmanın sınırlarıdır. Üretim cihazı bilgisayarla kontrol edildiğinden hata payı düşüktür. Bir katmanın ışıkla taranması sonrası parçanın bulunduğu inşa tabakası katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni bir kat reçine parçanın üzerine sıvanır. Bu işlem art arda yapılarak parçanın üretimi tamamlanır. Eğer destek elemanı konulmuşsa bu elemanlar mekanik yöntemlerle ana gövdeden ayrılarak parça kullanıma hazır duruma gelir.

2.5.1.b Eriyik yığma ve modelleme (FDM)

Kısaltmasını eriyik yığma ve modellemenin İngilizcesinin (Fused deposition modeling) baş harflerinden alan bu yöntem 1988’de ortaya çıkmıştır. Yöntemde üretim hammaddesi olarak makaraya sarılı şekilde bulunan termoplastik malzemeler (ABS, polikarbonat, PLA vb.) kullanılır. Bilgisayar kontrol ünitesi bulunan bu cihazlar bir dizi tahrik elemanlarını kontrol ederek üretim yaparlar. Üretim sırasında makaraya bağlı olan bir tahrik ünitesi gerektiği kadar malzemeyi makaradan ayırır. Ayrılan malzeme ısıtıcı nozulun besleyicisine gelerek burada eritilir. Ekstrüzyon kafasındaki ince uçlu kanallardan geçen eriyik plastik ince bir tabaka halinde üretim yüzeyine sıvanarak katmanlar oluşturulur. Sıvama işlemi yapılır yapılmaz eriyik malzeme katılır. Birinci katmanın ardından inşa tabakası, katman boyutu kadar aşağı inerek yeni adıma geçilmiş olur. Makine her bir adımda bu işlemi yenileyerek üretimi sonlandırır.

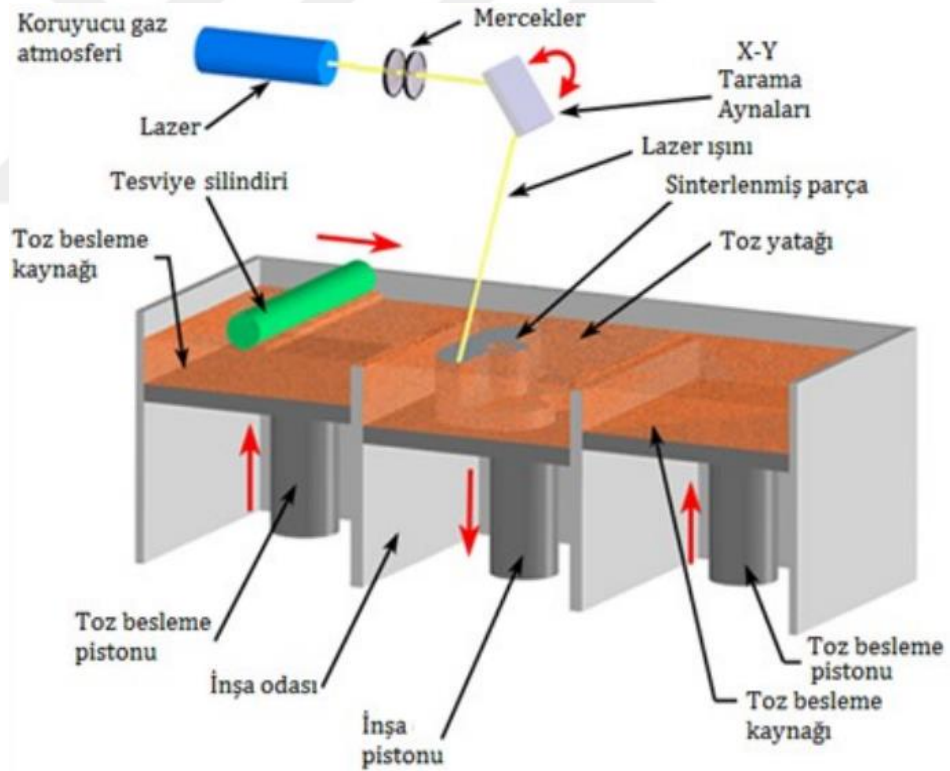
2.5.1.c Üç boyutlu yazıcı (3DP)

İlk olarak ABD’de Massachusetts Teknoloji Enstitüsü’nde geliştirilen bu yöntemde malzemelerin toz hali kullanılmaktadır. Bu yöntem mürekkep püskürtmeli yazıcıların çalışma prensibine çok benzemektedir. Üretim yapılırken toz sericiler inşa yüzeyine ince bir toz filmi sererler. Daha sonra ana gövdede bulunan çok ağızlı nozullar 2B katman verilerinden gelen sınırlara göre üretim yüzeyine yapıştırıcı püskürtür. Böylelikle tozların birbiriyle tutunması sağlanır. Püskürtme işleminin ardından bilgisayar

kontrollü inşa tablası toz katman kalınlığı kadar aşağı inererek aynı işlemler devam ettirilir ve üretim tamamlanır.

2.5.1.d Seçici lazer ergitme (SLM)

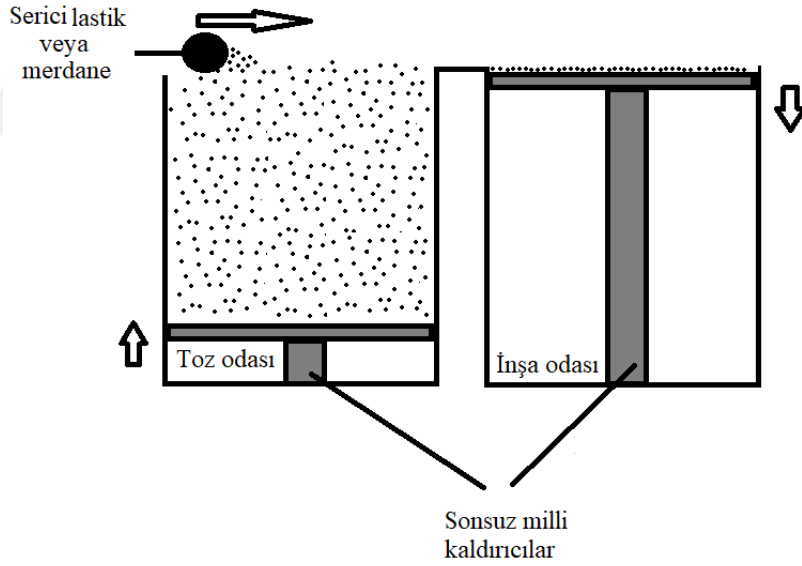
Keşfi 1980'li yıllara dayanan seçici lazer ergitme ile üretim yöntemi mekanizma olarak SLA yöntemine benzemektedir. Fakat bu yöntemde malzeme olarak reçine yerine seçilen malzemeye göre boyutları farklılık gösteren metal tozlar kullanılmaktadır. Bu metal tozların birbirine bağlanması için yüksek yoğunluktaki lazer ışını kullanılmaktadır. Bu lazer ışınının gücü azaltıldığında açığa çıkan sıcaklık tozların erime noktalarının altında kalır. Böylece tozlar ergimez fakat sinterlenir. Bu da bir başka üretim yöntemi olan seçici lazer sinterleme yöntemidir (SLS). Şekil 2.9'da SLM/SLS cihazının yapısal şematik görüntüsü verilmiştir.



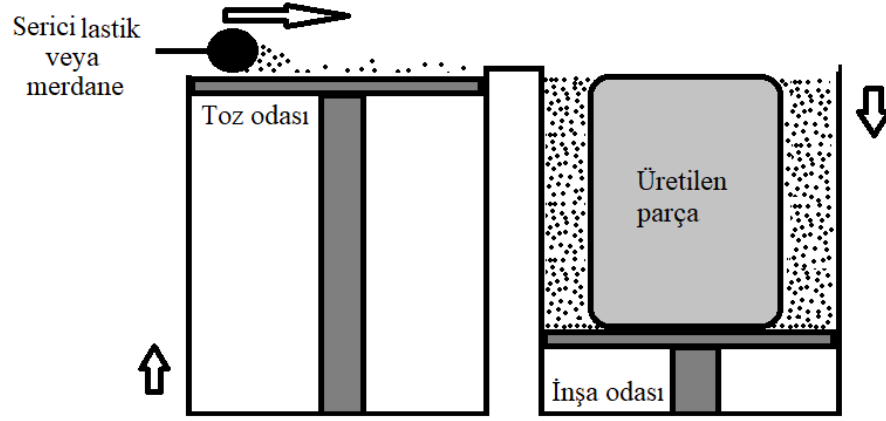
Şekil 2.10 SLM/ SLS cihazının yapısal şematik görüntüsü (Anonim 2018)

Üretim cihazlarında toz odası ve inşa odası adı verilen iki farklı bölme vardır. Üretim başlangıcında toz odası en alta alınarak hazneye yeterli miktarda toz konular ve

inşa odası en üst seviyeye getirilir. Daha sonra inşa odası sonsuz milli kaldırıcılarla toz katman kalınlığı kadar aşağı çekilir. Toz odası ise gereken ölçüde yukarı alınır. Serici lastik, önüne biriken tozu inşa odasına süpürerek orada homojen bir katman oluşturur ve geri döner. Bu işlemin ardından oluşturulan katı modelin iki boyutlu dilimlere ayrılmasından elde edilen veriler doğrultusunda yüksek voltajlı bir lazer kaynağı inşa odasının yüzeyini tarar ve eriterek tozların birbirine tutunmasını sağlar. Böylece bir adım gerçekleştirilmiş olur. Bu adım sürekli tekrarlanarak toz odasında bulunan tozlardan, inşa odasında üç boyutlu katı geometri oluşturulur. İşlem sonucunda toz odasının kaldırıcısı üst seviyelere çıkarken, inşa odasının kaldırıcısı alt seviyelere iner. Bu işlemler hem lazerin sapmaması hem de oksidasyonun olmaması adına vakum ortamında yapılmaktadır. Gaz seçimi üretilecek malzemeye bağlı olup, genellikle argon veya azot tercih edilmektedir. Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de SLM/SLM metodunun başlangıç ve bitiş görüntüsü şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.11 SLM yönteminin şematik başlangıç görüntüsü



Şekil 2.12 SLM yönteminin şematik bitiş görüntüsü

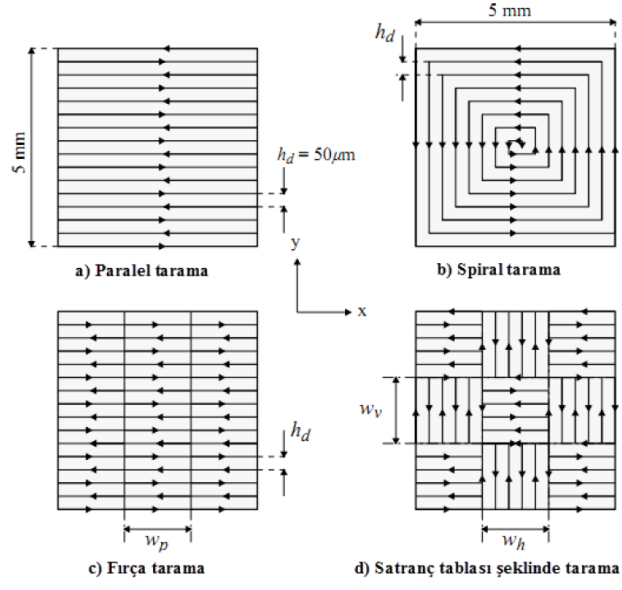
SLM ile üretilen parçalara inşa açısına göre, tozların çökmemesi için, destek elemanı konulmaktadır. Eğer parçanın üretim tablasıyla yaptığı açı 45° den az ise destek elemanı kaçınılmazdır. Aksi halde toz o bölgelerde istenilen katmanda durmayıp çökmekte ve üretim hataları olmaktadır. Destek elemanları üretim sonrası mekanik olarak üretilen parçadan ayrılabilir. Destek elemanlarının yoğunluğu -üretim sonrası parçadan ayırma işlemi zaman aldığından- seri üretim yapılan endüstrilerde istenmeyen bir durumdur. Dolayısıyla optimum bir üretim açısı seçilmelidir.

SLM ile üretim yönteminin diğer üretim yöntemlerine nazaran yavaş olması endüstride kullanımını kısıtlayan en önemli faktörlerden birisidir. Bu bağlamda teknolojinin gelişmesiyle beraber bu üretim yöntemi de gün geçtikçe gelişmektedir. Cihazların üretim hızının yavaş olmasının altında yatan en önemli etkenler, her cihazın çoklu tarama yapamaması ve çoğunda sericinin çift hareket yapmasıdır (Toz odasından tozu biriktirerek inşa odasına gelmesi ve boş dönmesi). Bunların önüne geçmek için bazı seri üretime yönelik cihazlarda inşa odasının her iki tarafında da toz odası bulunmaktadır. Böylelikle toz serici hem toz sererken hem de dönerken inşa odasına toz serebilmektedir. Ayrıca bahsi geçen cihazlarda birden çok lazer kaynağı bulunabilmektedir. Böylece aynı anda çoklu tarama yapılarak işleminin süresi önemli ölçüde azaltılıp üretim hızı artırılabilir.

2.5.2 Üretim sonucu oluşturulan parçaların mekanik özelliklerini etkileyen bazı parametreler

Üretim başlangıcında seçilen bazı ayarlar; üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü ve mukavemetini, üretim süresini ve enerji kullanımını önemli oranda etkilemektedir. SLM yönteminde katman kalınlığının toz boyutundan fazla olması gerekmektedir. Eğer toz boyutu katman kalınlığından fazla olursa sericiler görevini yapamaz ve homojen bir toz filmi oluşmaz. Toz tane boyutu küçük olursa gözenekli bir yapı kaçınılmaz olur. Büyük tane boyutu ise yüksek yoğunlukta malzeme üretimi için oldukça uygundur. Optimum bir yoğunluk isteniyorsa farklı boyutlardaki tozlar harmanlanarak kullanılmalıdır. Tanelerin şekli de yüzey kalitesi açısından önemli bir faktördür. Eğer tozlar yuvarlak geometride ise tozun akıcılığı daha iyi olur ve yüzey kalitesi artırılır. Seçilen lazer gücü enerji sarfiyatını önemli ölçüde etkilemektedir. Lazer gücü yeterli seviyede değilse tozlar arası tutunma tam olarak sağlanamaz. Bu durum SLS yönteminde tercih edilen bir parametredir. Bazı uygulamalarda lazer gücünü arttırmak yerine odak alanını küçültme de yapılabilmektedir. Ayrıca lazer ışınını ergitme bölgesine sürekli göndermek yerine puls şeklinde gönderilmesi de açığa çıkan sıcaklığı arttırarak verimi yükseltir. Katı modelin kalitesini etkileyecek bir başka parametre ise lazer ışınının tarama şeklidir. Katı geometri boydan boya uzun çizgiler halinde paralel olarak taranırsa üretim sonrası artık gerilmeler çok olur ve haliyle üretimden sonra gerilim giderme tavlama yapılması gerekebilir. Bu olayın önüne geçmek için spiral tarama şeklini seçmek daha doğru olacaktır. Buna ek olarak tarama çizgileri arası mesafeler artarsa yapı daha poroz ve gözenekli olur. Lazerin bir saniyede taradığı uzunluk, tarama hızı adını almaktadır. Tarama hızı yüksek olursa tozlar tam eriyemeyeceğinden tozlar arası tutunma sağlanamaz ve yapıda gözenekler oluşur. Tüm bu etmenler göz önüne alındığında neredeyse tüm mühendislik prosesleri gibi SLM ile üretimde de bir optimizasyon yapılması önerilmektedir.

Şekil 2.13'te SLM ile üretimde lazerin tarama şekillerinden bazıları şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.13 SLM lazer tarama şekilleri (Kıran 2011)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Kendinden yağlayıcı yüzeyler elde etmek için yapılan bu çalışmada 316L paslanmaz çelik tozlarından seçici lazer ergitme metodu ile üretilen 20mmx20mmx5mm boyutlarında kare tabanlı numuneler kullanılmıştır. Sürtünmeyi azaltıcı yağ olarak ise Mobil 1 ESP Formula marka ve modeli, SAE 5W-30 sınıfı motor yağı kullanılarak deneyler tamamlanmıştır. Söz konusu toz materyalin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de, mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.3’te yine üretici kataloğundan alınan bilgiler doğrultusunda toz boyutuyla ilgili bilgiler verilmiştir. Bu çizelgeye göre toz tane büyüklükleri yaklaşık olarak 10-45µm arasındadır. Kullanılan 5W-30 yağın özellikleri ise Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.1 316L paslanmaz çelik tozlarının kimyasal bileşimi (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 tozlarının SLM ile üretimi sonrası malzemenin özellikleri (Üretici firma kataloğuna göre)

Malzeme özellikleri	Değerler
Akma dayanımı	470 N/mm ²
Çekme dayanımı	570 N/mm ²
Elastisite modülü	200000 N/mm ²
Sertlik	20 HRC

Çizelge 3.3 316L paslanmaz çelik tozlarının tane büyüklüklerine göre içerik yüzdesi (Üretici firma kataloğuna göre)

Tane Büyüklüğü (µm)	İçerikte bulunma yüzdesi (%)
< 75	100
< 63	99,08
< 45	98,12
< 32	79,91
< 20	32,87

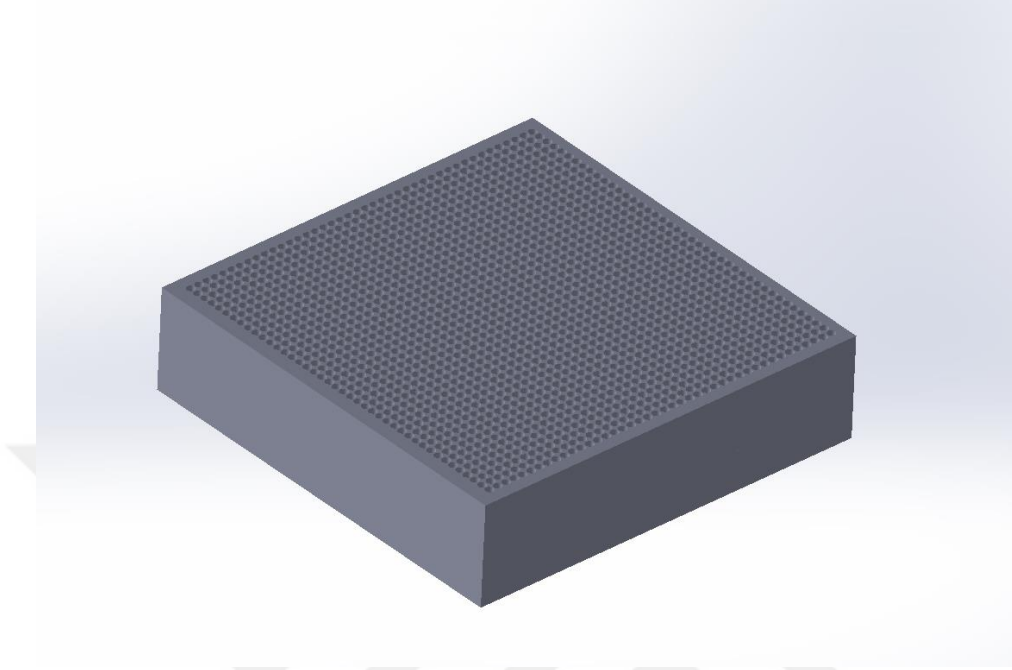
Çizelge 3.4 SAE 5W-30 yağın özellikleri (Mobil 1 internet sitesi)

Mobil 1 ESP Formula (<i>ASTM D874, ASTM D4683, ASTM D97, ASTM D92, ASTM D445, ASTM D4052</i>)	
SAE Sınıfı	5W-30
Viskozite (40°C'de), cSt	72.8
Viskozite (100°C'de), cSt	12.1
Yoğunluk (15.6°C'de), g/ml	0.850
Parlama noktası, °C	254
Akma noktası, °C	-45

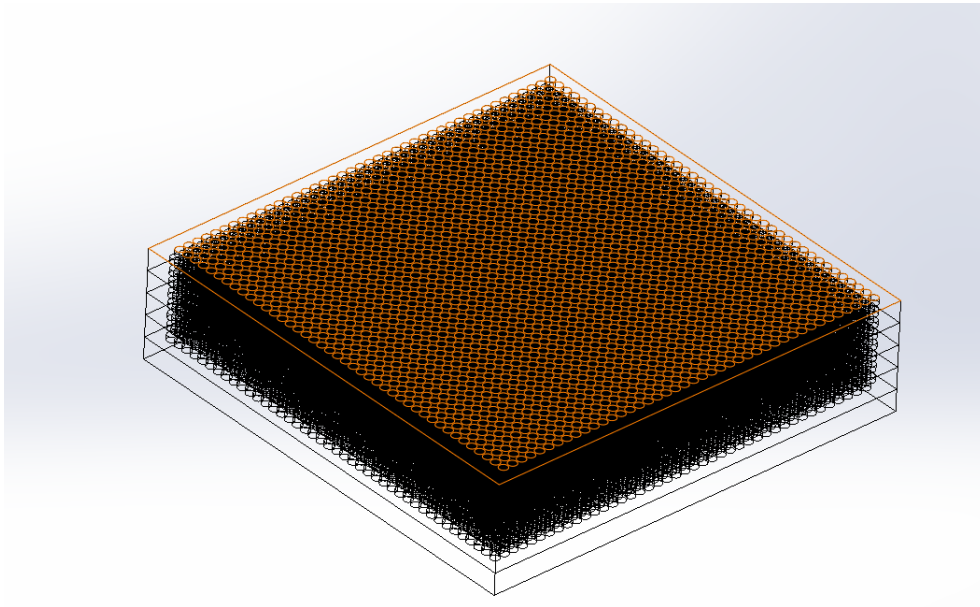
3.2 SolidWorks CAD programı ile farklı geometrilerin oluşturulması

Yapılan çalışmada SolidWorks programının 2016 sürümünde üç farklı geometri tasarlanmıştır. Bu geometrilerden birincisinin tasarımında tüm yüzeyde ve yüzeyden tabana kadar olan kısımda poroz bir yapı elde edilmesi amaçlanmıştır. İkinci tasarımda ise numunenin dört köşesine konik şekilli kanallar konulmuştur. Konik şekilli kanallar konulurken her bir kanalın daha fazla yağ emmesi amaçlanmıştır. Üçüncü ve son tasarımda ise numunenin orta kısmına iç içe farklı iki yağ haznesi konulmuştur. Böylece merkezkaç etkisinden her iki hazne sayesinde maksimum yarar sağlanması ve bu haznelerden yüzeye doğru 400 µm çapında yağ kanalları açılarak yağın yüzeye ulaşması

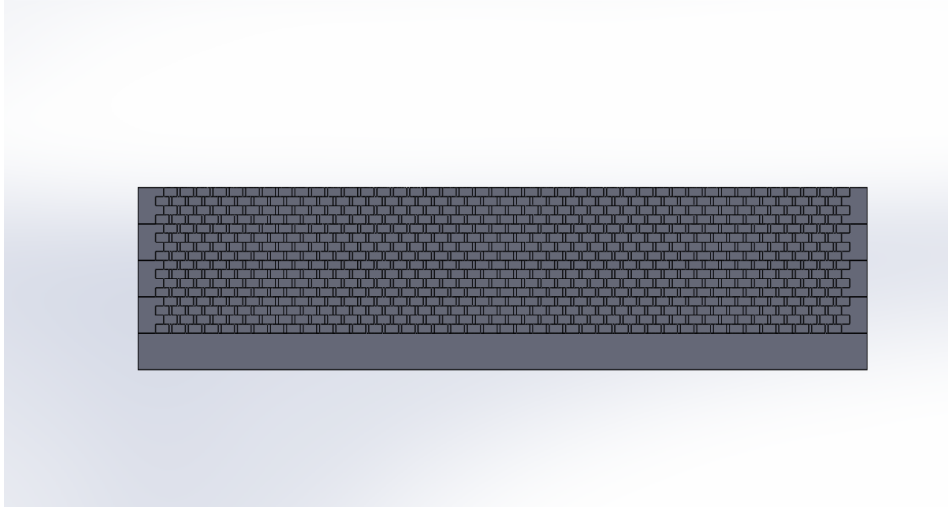
amaçlanmıştır. Bahsi geçen bu üç geometrinin de tasarım resimleri ve numaralandırılması aşağıda verilmiştir.



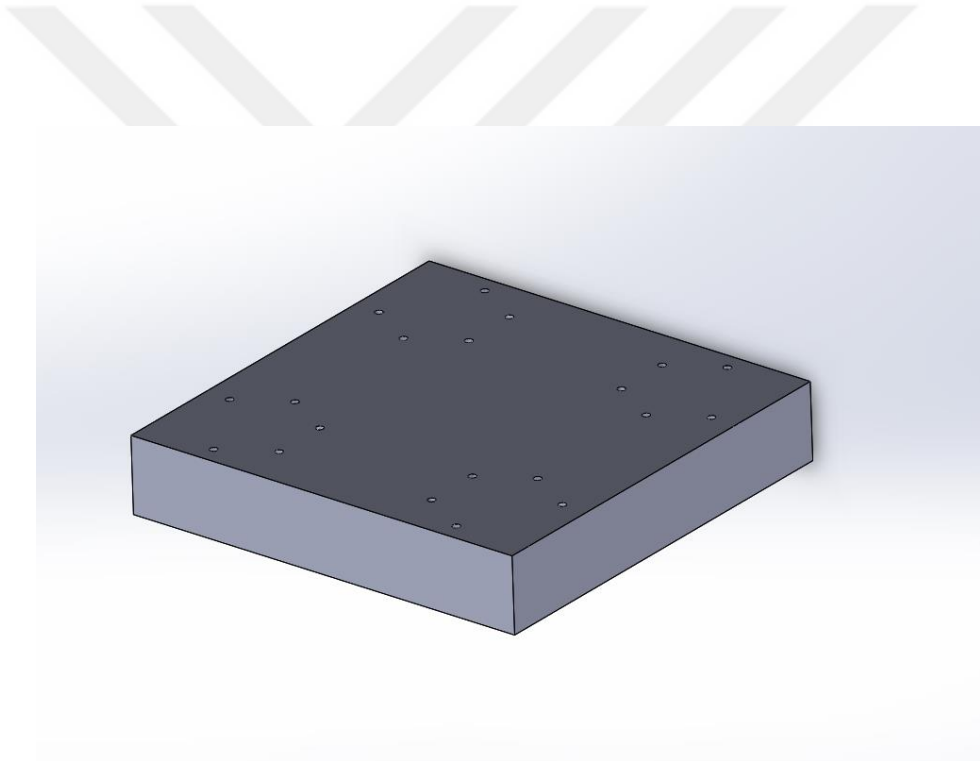
Şekil 3.1 1 No'lu tasarımın SolidWorks'de izometrik görüntüsü



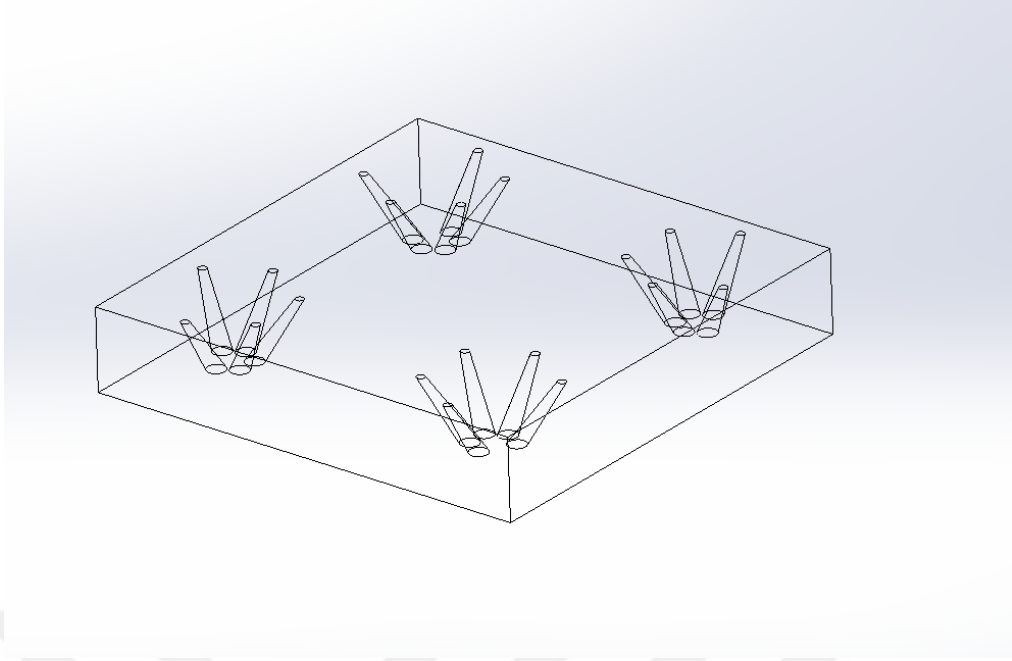
Şekil 3.2 1 No'lu tasarımın SolidWorks'de kafes biçiminde izometrik görüntüsü



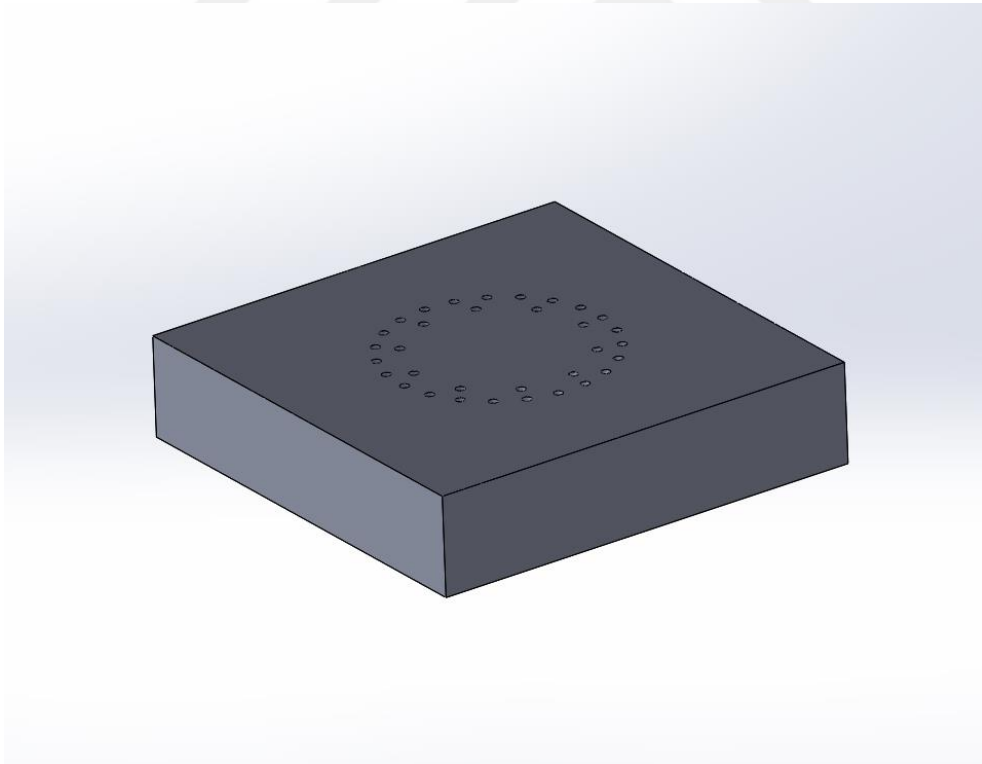
Şekil 3.3 1 No'lu tasarımın SolidWorks'de kesit görüntüsü



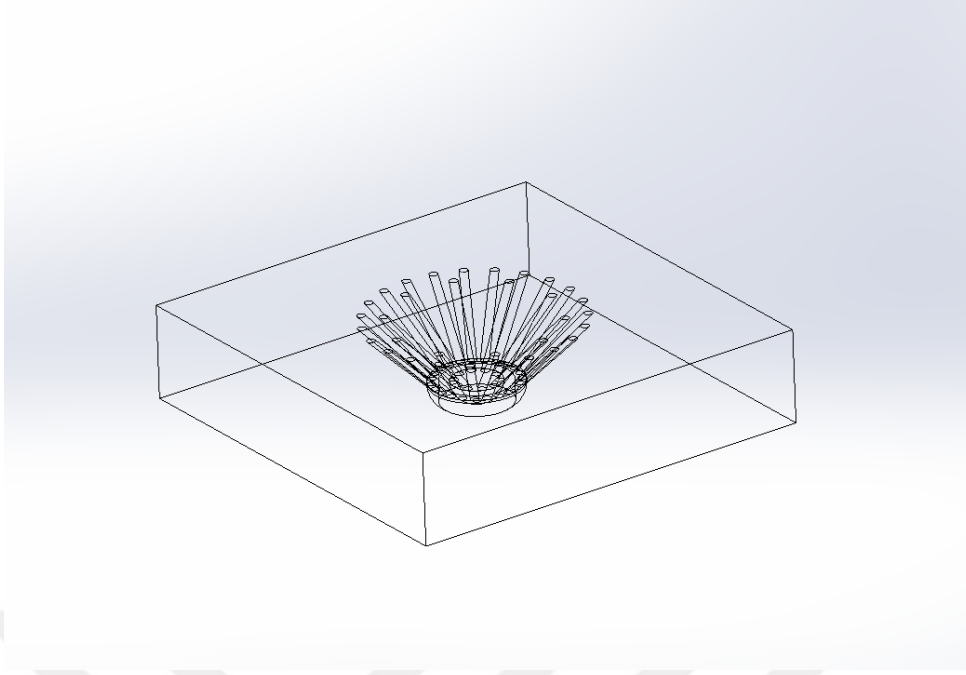
Şekil 3.4 2 No'lu tasarımın SolidWorks'de izometrik görüntüsü



Şekil 3.5 2 No'lu tasarımın SolidWorks'de kafes biçiminde izometrik görüntüsü



Şekil 3.6 3 No'lu tasarımın SolidWorks'de izometrik görüntüsü



Şekil 3.7 3 No'lu tasarımın SolidWorks'de kafes biçiminde izometrik görüntüsü

3.3 ANSYS FLUENT akış analiz programı ile numunelerin test esnasında akış analizinin incelenmesi

Piyasada oldukça yaygın kullanılan akış modelleme tekniği ile tasarımlar, üretime dönüştürülmeden test edilmekte ve bu programdan alınan veriler doğrultusunda daha da iyileştirilmektedir. Akış modelleme tekniğinin günümüz endüstrisinde (uçak üreticileri, türbin üreticileri) kullanılmasının yanı sıra bazı spor dallarında da (Formula 1 takımları) bu teknik kullanılarak hem mali yönden hem de zaman yönünden tasarruf edilmektedir. ANSYS FLUENT programı bilindiği üzere bir akış modelleme yazılımıdır. Bu çalışmada daha önce katı modellemesi yapılan geometrilerin üretimi yapılmadan önce ön fikir olması açısından akış modellemesi yapılmıştır.

SolidWorks'de tasarlanan üç farklı geometrinin hangisinin yüzeyi daha iyi yağlayacağını saptamak için FLUENT akış analiz programı kullanılmıştır. Analiz programına yer çekim ivmesi 9.87m/s^2 olarak girilmiştir. Yağ özellikleri Mobil 1 firması internet sitesinden alınan bilgilere göre programa girilmiştir. Analiz yapılırken tüm numuneler, merkezleri tam orta noktaları olacak şekilde, 10 rad/s (yaklaşık 100 RPM) hızda kendi eksenleri etrafında sanal olarak döndürülmüştür. Daha sonra her bir geometrinin kanallarının yüzeye çıkış noktalarından yağın yüzeye çıkış hızları belirlenmiştir.

3.4 SLM methodu ile numunelerin üretimi

FLUENT programından alınan veriler ışığında; bu üç geometriden kendi kendini yağlama açısından en uygun olan geometrinin, *.STL dosyası AutoFab yazılımı kullanılarak numunelerin tablayla temas eden kısımlarına üretim destek elemanları konulmuştur ve bazı üretim parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra Erzurum Teknik Üniversitesi (ETÜ) Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (YÜTAM) bünyesindeki Consept Lazer MCusing R+ markalı SLM cihazı ile 7 adet tasarlanan geometride 5 adet de aynı ebatlarda yağ kanalı olmayan düz numuneler üretilmiştir. Üretim yaparken koruyucu gaz olarak azot gazı kullanılmıştır. Üretimden çıkan numunelerin tümünden üretim destek elemanları mekanik yöntemlerle gövdeden uzaklaştırılmıştır ayrıca iki tanesinin yüzeyi sırasıyla 60, 120, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalarla ıslak olarak zımparalanarak yüzey kalitesi artırılmıştır. Üretim parametreleri ve cihazın fotoğrafı aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 SLM ile üretim parametreleri

Parametreler	Değerler
Lazer gücü (W)	120
Numunelerin üretim sırasında yatayla yaptığı açı (°)	60
Toz katman kalınlığı (µm)	25



Şekil 3.8 Numunelerin üretildiği SLM cihazı görüntüsü

3.5 Aşınma Deneyleri

Birbirleriyle temas halinde bulunan iki veya daha fazla malzemenin yüzeyindeki tabakaların kopup yüzeyden ayrılması olayına aşınma denilmektedir. Bu durumda her iki temas yüzeyi de başlangıçtaki formunu kaybeder. Aşınma olayı; adezif, abrazif, yorulma, koroziif, fretting, katı partikül, akışkan veya kavitasyon sonucu oluşan erezyon şeklinde meydana gelir (Yazıcı 2013).

Tribolojik özelliklerinin incelenmesi için SLM ile üretilen numunelerin bir kısmı 5W-30 sıvı yağlayıcı bulunan bir kaptaki yaklaşık iki gün bekletilmek suretiyle yağ emdirilmiştir. Diğer bir kısım ise kuru bir şekilde aşınma testine tâbi tutulmuştur. Testler ETÜ YÜTAM'daki Bruker UMT markalı aşınma cihazında yapılmıştır. Deneylerin tümünde 5 mm çapındaki paslanmaz çelik bilyeler kullanılmıştır. Yapılan deneyde

sürtünme katsayısına karşılık zaman grafiğini cihazın kendisi otomatik olarak vermiştir. Yüzeylerde meydana gelen aşınma oranı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma oranı (mm}^2\text{ / Nm)} = \frac{\text{Aşınılan hacim (mm}^3\text{)}}{\text{Uygulanan yük(N) * Aşınma mesafesi(mm)}} \quad (3.1)$$

Aşınma deneylerinin şartları Çizelge 3.5'te, aşınma cihaz fotoğrafı Şekil 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Aşınma deneyi şartları

Deney şartları	Değerler
Uygulanan yükler (N)	5 ve 10
Aşınma izi çapı(mm)	12
Sıcaklık (°C)	22 ±2
Nem (%)	50 ±5
Aşınma hızı (RPM)	100 ve 200
Aşındırma süresi (s)	1122 ve 2244
Aşındırma mesafesi(m)	141



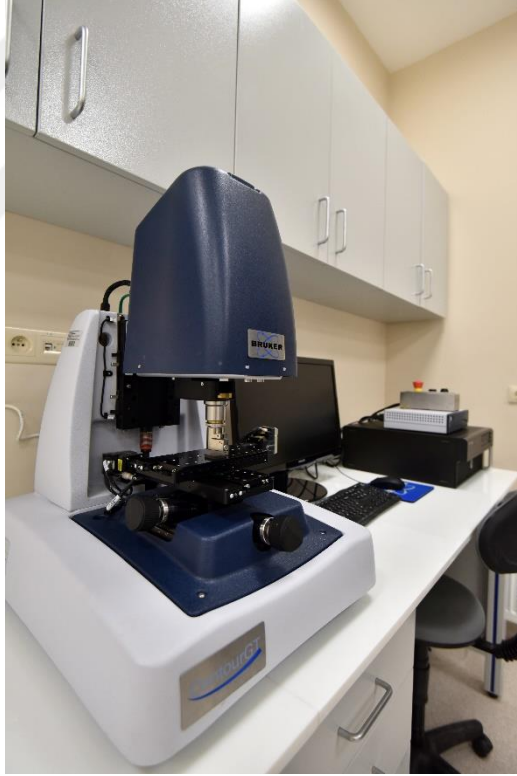
Şekil 3.9 Aşınma testlerinin yapıldığı cihaz görüntüsü

3.6 3D Yüzey profilometre analizleri

Aşınma deneyleri sonrası aşınma hacmini hesaplamak için ETÜ YÜTAM bünyesindeki Bruker Contour GT markalı 3D profilometre cihazı kullanılmıştır. Aşınma hacmi hesaplanırken aşınma izinin homojen olduğu varsayılarak numunenin üzerindeki aşınma izinin herhangi bir yerinden izin kesit alanı bulunmuştur. Bulunan kesit alanı aşınma izinin çevresi ile çarpılarak aşınma hacmi elde edilmiştir.

$$\text{Aşınma hacmi(mm}^3\text{)} = \text{Kesitin aşınma alanı(mm}^2\text{)} \times \text{Aşınma izinin çevresi(mm)}$$

Deneyin yapıldığı Bruker markalı 3D profilometre cihazının fotoğrafı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.10 3D yüzey profilo metre analizlerinin yapıldığı cihazın görüntüsü

3.7 SEM cihazı ile aşınma izleri ve mikro yapıların incelenmesi

Aşınma testleri sonrası numunelerin yüzeyden görünüşleri, aşınma izleri ve metalurjik mikro yapılarının incelenmesi için yine ETÜ YÜTAM'a ait FEI-QUANTA FEG 250 marka ve modellenmiş SEM (Taramalı elektron mikroskobu) cihazı kullanılmıştır.

Metalurjik incelemelerin yapılması için zımparalanmış numunelerin bir tanesine 1 μ m'lik alümina pastası ile mekanik olarak parlatma yapılmıştır. Parlatılan numuneye daha sonra dağlama işlemi yapılmıştır. Bu işlem için hacmen %73 hidroklorik asit (HCl), %24 nitrik asit (HNO₃) ve %3 sülfürik asit (H₂SO₄) kullanılarak bir çözelti hazırlanmış ve numuneye uygulanmıştır. İşlemin başarılı olup olmadığı Nikon marka optik mikroskop ile kontrol edilmiştir. Numunelerin görüntülerinin alındığı SEM cihazı Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11 SEM analizlerinin yapıldığı cihaz

3.8 Mikrosertlik ölçümleri

SLM ile üretilen numunelerin mikrosertlik değerine bakmak için ETÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi yüzey işlemleri laboratuvarında bulunan SHIMADZU markalı mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Deney için zımparalanarak alümina pasta ile parlatılan numuneler kullanılmıştır.

Deneyde; 10 gram ve 25 gram yük altında, 15 saniye bekleme süresinde, numunenin köşelerinden uzak kalmak kaydıyla ölçümler alınmıştır. İşlem on kez tekrarlanarak sonuçlar kaydedilmiştir.

Numuneler, uygulanacak işlemlere göre numaralandırılarak ilerleyen bölümlerde oluşacak karmaşıklığın önüne geçilmek istenmiştir. Numunelerin numaralandırılma tablosu Çizelge 3.6'te verilmiştir.

Çizelge 3.6 Numunelerin numaralandırılma tablosu

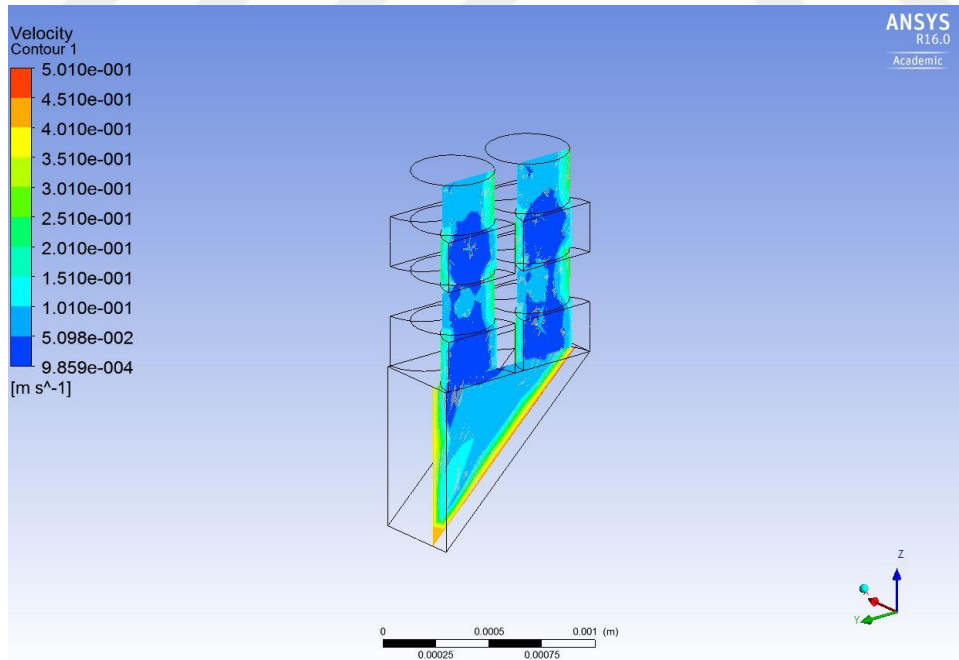
NUMUNE NO	GEOMETRİSİ	AŞINDIRMA HIZI (RPM)	AŞINMA SIRASINDA UYGULANAN YÜK(N)	AŞINDIRMA ORTAMI <i>Not: Yağlı olanlara yağ emdirme işlemi yapılmıştır.</i>
1	Kanallı	100	5	Kuru
2	Kanallı	100	5	Yağlı
3	Kanalsız (Normal)	100	5	Kuru
4	Kanallı	200	5	Kuru
5	Kanallı	200	5	Yağlı
6	Kanalsız (Normal)	200	5	Kuru
7	Kanallı	100	10	Yağlı
8	Kanalsız (Normal)	100	10	Kuru
9	Kanallı	200	10	Yağlı
10	Kanalsız (Normal)	200	10	Kuru
11	Kanallı/Yüzey zımparalanmış	100	5	Yağlı
12	Kanalsız (Normal)/ Yüzey zımparalanmış	100	5	Kuru

4.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

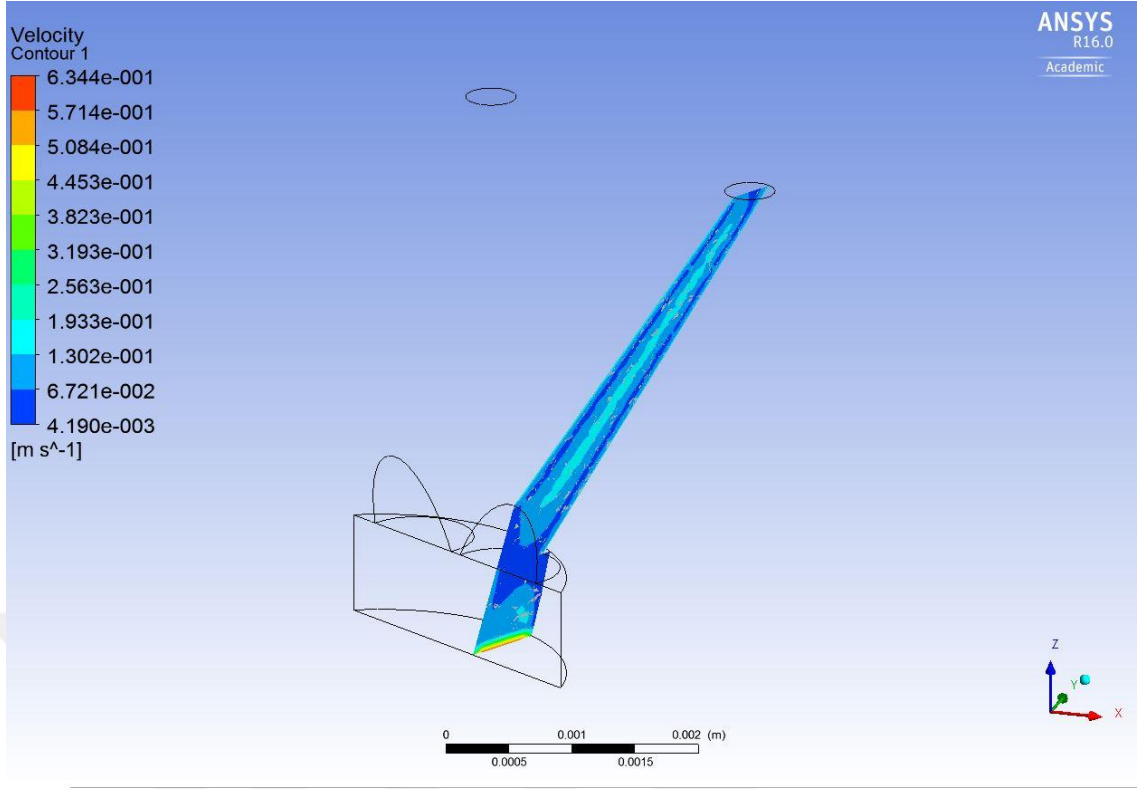
Bu çalışmada numunelere FLUENT akış analiz programı ile sanal ortamda sıvı yağ emdirilerek, çalışma şartlarında yağın davranışı incelenmiş ve bu doğrultuda seçici lazer ergitme (SLM) metodu ile en uygun bulunan tasarımın üretimi yapılmıştır. Üretilen numunelerin bir kısmına yağ emdirilerek diğer bir kısmına kuru ortamda bazı tribolojik testler uygulanmıştır.

4.1 Oluşturulan geometrilere FLUENT akış modellemesinin yapılması ve sonuçların incelenmesi

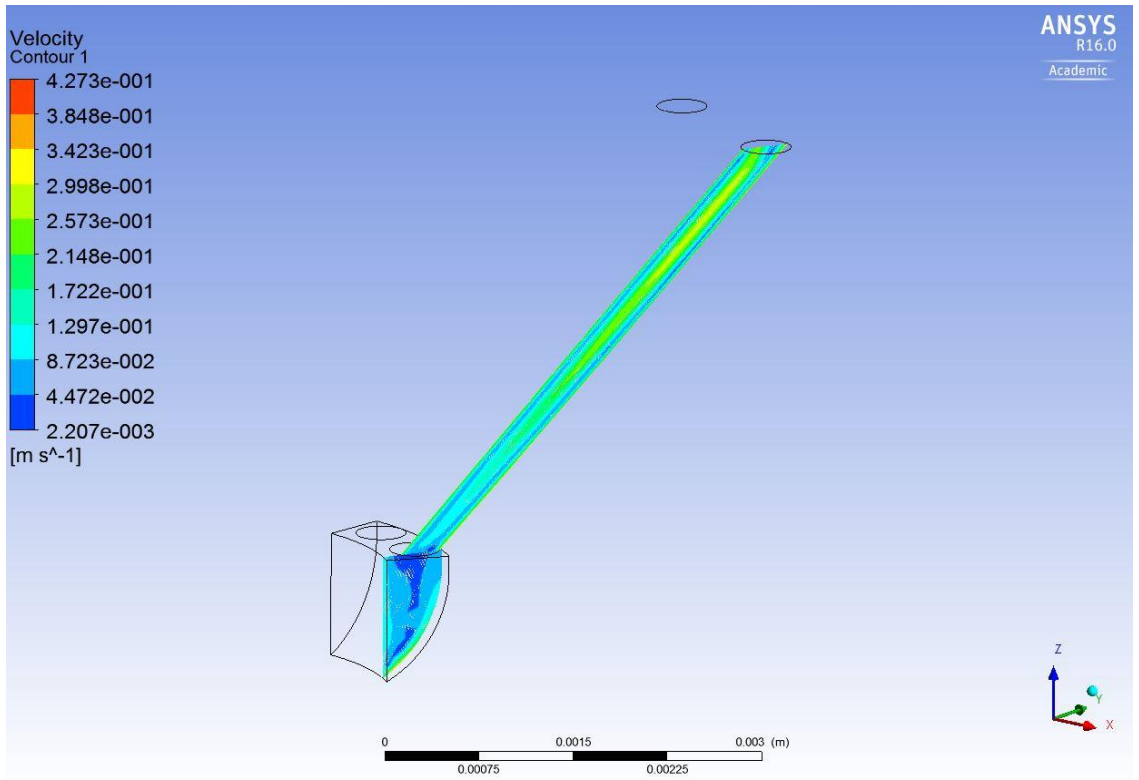
SolidWorks'de tasarlanan numunelerin FLUENT akış modelleme analizi yapılırken yağın yüzeye kütleli anlamda en fazla çıktığı geometri, üretim için seçilmiştir. Bu amaçla FLUENT'den kanal çıkışındaki yağ hızlarına bakılmıştır. Modellemeler yapılırken hareket; kendi eksenini etrafında dönme olduğu için, tüm geometrilerde katı modelin tüm kanallarının değil, sadece bir kanal seçilerek bu kanal boyunca analiz yapılmıştır. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te tasarımların FLUENT analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.1 1 no'lu poroz yapılı tasarımın FLUENT akış modellemesi

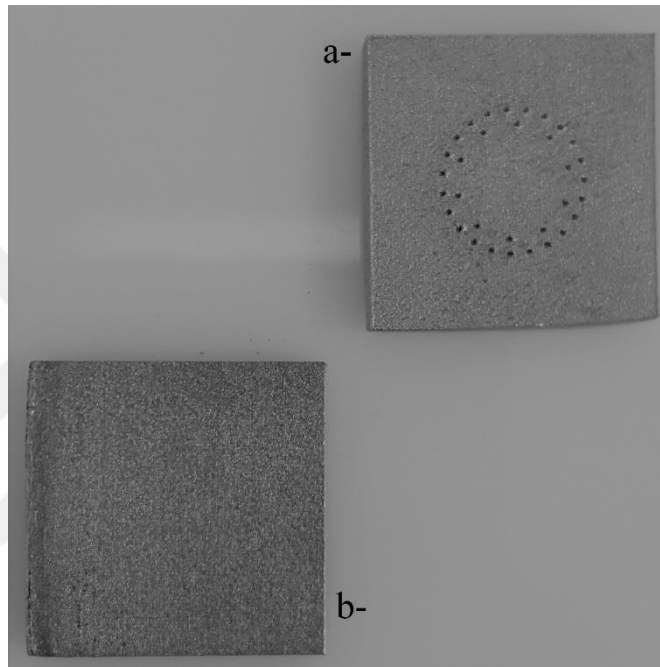


Şekil 4.2 2 no'lu dört kanallı tasarımın FLUENT akış modellemesi



Şekil 4.3 3 no'lu ortada tek kanallı tasarımın FLUENT akış modellemesi

Bu sonuçlar ışığında 1 no'lu poroz tasarımda kanal çıkışlarında hız yaklaşık 0,07m/s olarak görülürken, (Şekil 4.1) 2 no'lu dört kanallı tasarımda bu değer yaklaşık 0,06 m/s (Şekil 4.2) ve son tasarım olan 3 No'lu tek kanallı tasarımda 0,19 m/s olarak görülmüştür (Şekil 4.3). Böylece üretilecek olan modelin 3 no'lu model olmasına karar kılınmıştır. Üretilen 3 no'lu tek kanallı tasarımın SLM ile üretim sonrası fotoğrafı Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 3 no'lu tek kanallı tasarımın SLM'de üretim sonrası görüntüsü (a- kanallı numune b- kanalsız/normal numune)

4.2 Üretilen numunelerin sertlik değerleri, yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapısı

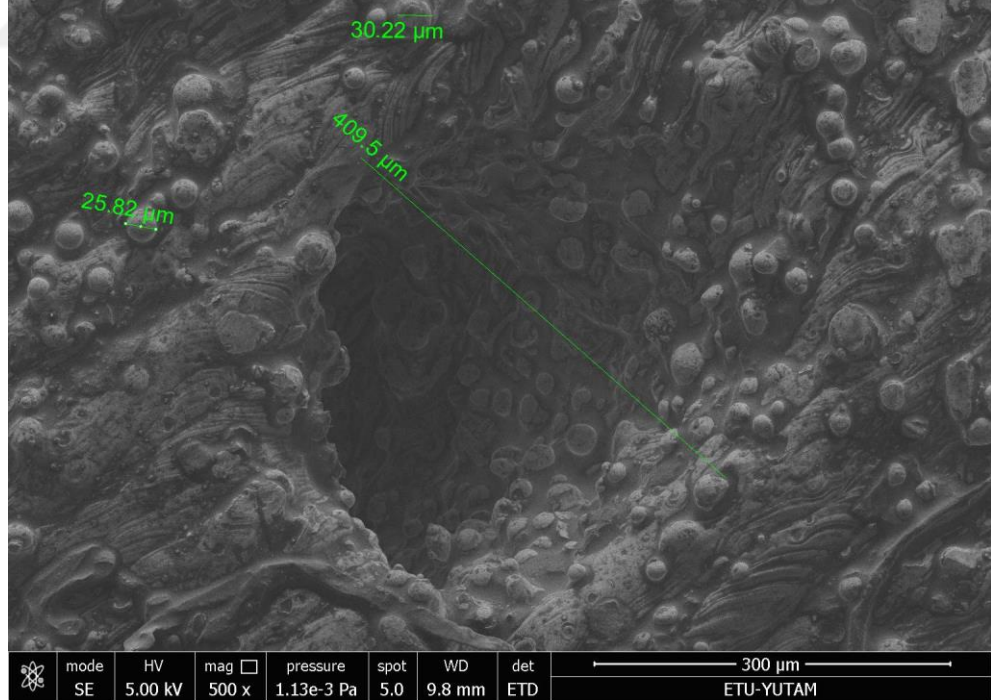
Çizelge 4.1'de üretilen numune yüzeylerinin sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 Numunelerin sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri

Sertlik değeri (HV _{0,01})	280-300
Yüzey pürüzlülüğü (µm)	4,50 (SLM'den çıktığı haliyle)
	0,11 (SLM'den sonra yüzeyi 1200'lük zımparayla parlatılmış)

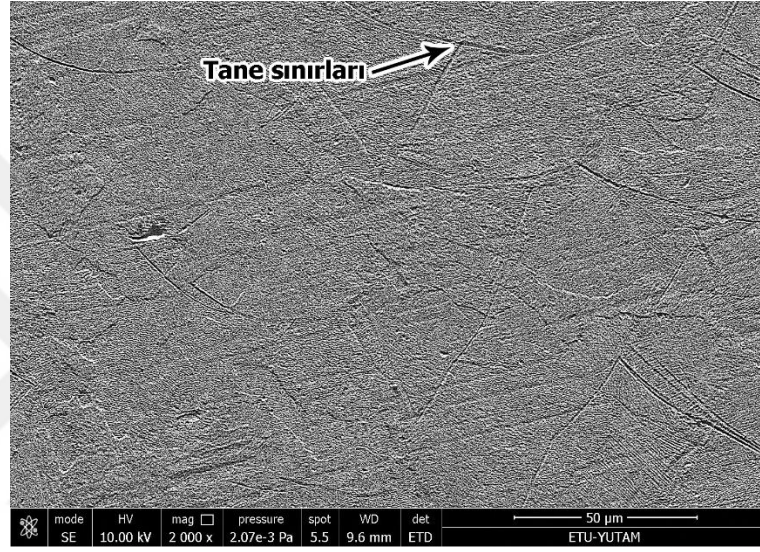
Sertlik ölçüm testlerinde SLM ile üretilmiş 316L paslanmaz çeliğin sertlik değerleri 280-300 HV_{0,01} olarak ölçülmüştür. Bu değerler geleneksel yöntemle üretilmiş 316L paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında sonuçların çok yakın çıktığı görülmektedir (Yetim 2009).

Şekil 4.5'te üretilen numunelerin deliklerinden birisinin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüye göre tasarımda verilen ölçüler %99 oranında tutturulmuştur. Burada oluşabilecek farkın ölçüm hatalarından da kaynaklanabileceği unutulmamalıdır. Ayrıca görüntüde, yüzeyde bulunan tozların boyutları da verilmiştir.



Şekil 4.5 3 no'lu kanallı bir numuneye ait SEM görüntüsü

Üretim sonrası uygun şekilde dağlanarak yüzey morfolojisi incelenen numunelerin SEM görüntüsü Şekil 4.6’da verilmiştir. SEM görüntüsünde göze çarpan ilk şey ostenit yapının tane sınırlarıdır. Bu taneler yaklaşık 50-60 µm arası boyutlardadır. Ayrıca şekle dikkatle bakıldığında yaklaşık 20 µm boyutunda kayma bantları da göze çarpmaktadır. Numunenin yüzeyinde bulunan çukur yapıların ise gözenek olduğu düşünülmektedir. Bu gözeneklerin sinterlenmiş yüzeylerde verimli bir yağlamaya etkisi olduğu da göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4.6 SLM ile üretilmiş bir numunenin SEM iç yapı görüntüsü

4.3 Tribolojik test sonuçları

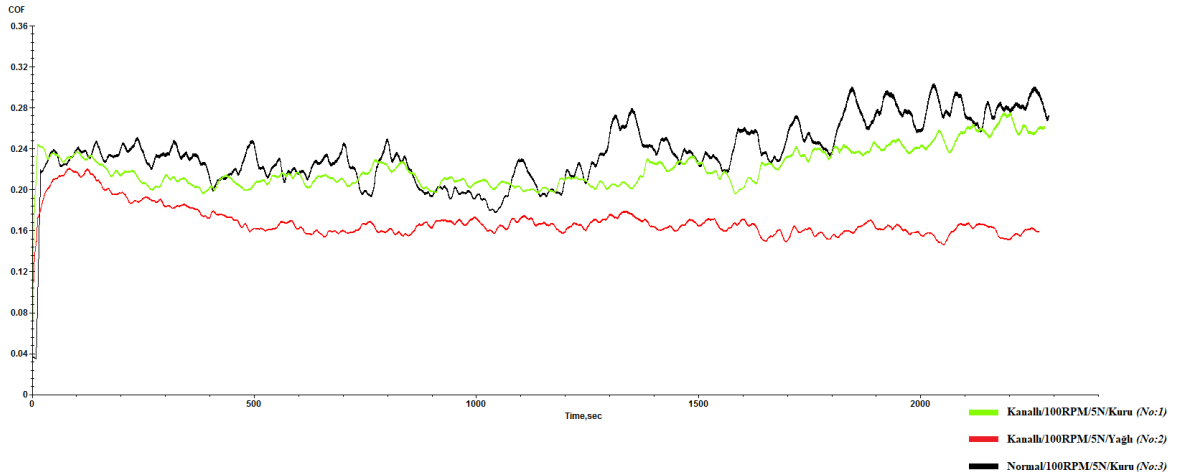
Tribolojik test sonuçları ve görüntüleri (Sürtünme katsayısı-zaman grafiği, aşınma oranı grafiği, 3D profilometre grafiği, SEM görüntüleri) aşağıda verilmiştir.

4.3.1 Sürtünme Analizleri

Tribolojik analiz için yapılan aşınma testi sonucu cihazdan alınan sürtünme katsayısı/zaman grafikleri aşağıda verilmiştir. Numune sayısı fazla olması ile birlikte yağlı ve kuru şartların kıyaslanmasının kolaylaştırılması için eğriler tek bir grafikte gösterilmek yerine beş farklı grafikte gösterilmiştir.

Şekil 4.7’de iki adet kanallı numuneye ve bir adet normal numuneye 100 RPM dönme hızında, 5 N yük uygulanarak yapılan aşınma testinin, sürtünme katsayısına

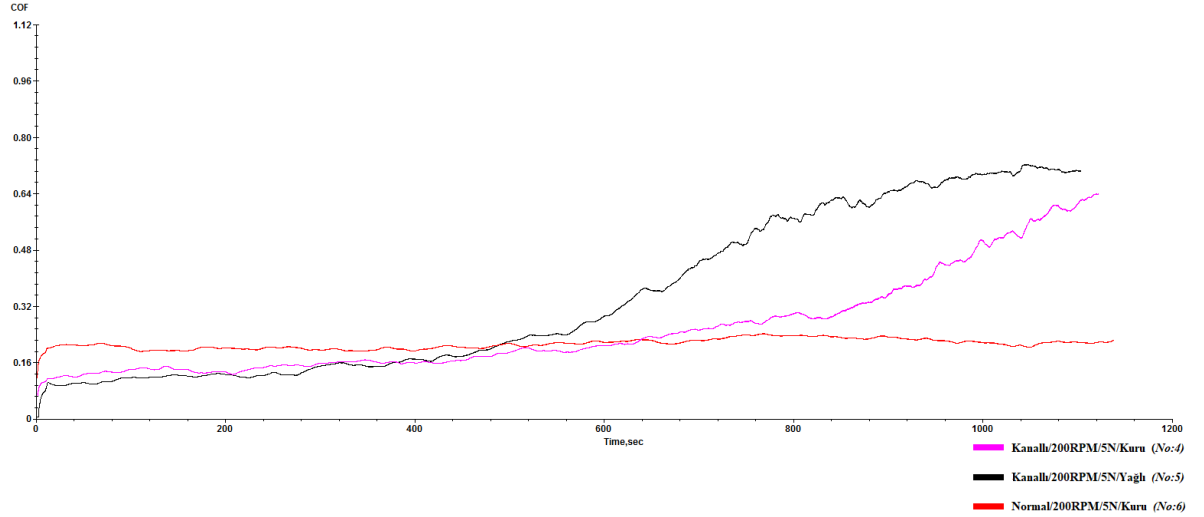
karşılık zaman grafiği verilmiştir. Kanallı numunelerin birine test öncesi yağ emdirilmiş diğerine ise yağ emdirilmemiştir. Normal numunenin ise kuru ortamda aşınma testi yapılmıştır. Kanallı numuneye yağ emdirilmeden test yapılmasının sebebi; numunede kanallardan dolayı test sırasında yüzeyde bir çökmenin olup olmadığının araştırılmasıdır. Tüm deney şartlarındaki sürtünme katsayılarında ilk 20-30 saniyede ciddi bir artış görülüp daha sonra sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Bu artışın sebebi olarak sürtünme başlangıcında, aşındırıcı bilye ile temas yüzeyi arasındaki pürüzlerin ilk olarak temas ettiği ve bu temas noktalarının yüzey alanlarının çok düşük olduğundan yüksek basınçlara sebep olduğu düşünülmektedir. Bu olaya Hertzian teması denilmektedir (Yetim 2009). Sürtünmenin devam etmesi ile bu pürüzler azaldığından sürtünme katsayısı da azalarak kararlı bir hale gelmiştir. Yüzey pürüzlülüğü sürtünme ve aşınma açısından önemli bir parametredir. Çoğu uygulamada yüzey pürüzlülüğü arttıkça sürtünme katsayısı da artmaktadır (Efeoğlu 1993). Yağ emdirilmemiş kanallı geometri (1 no'lu analiz), normal geometri (3 no'lu analiz) ile benzer sürtünme davranışı sergilemiştir. Her iki numunenin de sürtünme katsayısı $\mu=0,24$ dolaylarında olduğu görülmektedir. Bu durumda kanallı numunelerde herhangi bir çökmenin olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca yağ emdirilmiş kanallı numunenin sürtünme katsayısının, kuru ortamda yapılan testlere göre daha düşük olduğu aşikardır. Dolayısıyla emdirilen yağın yüzeye kolaylıkla ulaştığı düşünülmektedir. Yağlı ortamda yapılan testte, sürtünme katsayısının $\mu=0,16$ civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7 1,2 ve 3 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafiği

Şekil 4.8'de iki adet kanallı numuneye ve bir adet normal numuneye 200 RPM dönme hızında, 5N yük uygulanarak yapılan aşınma testinin sürtünme katsayısına

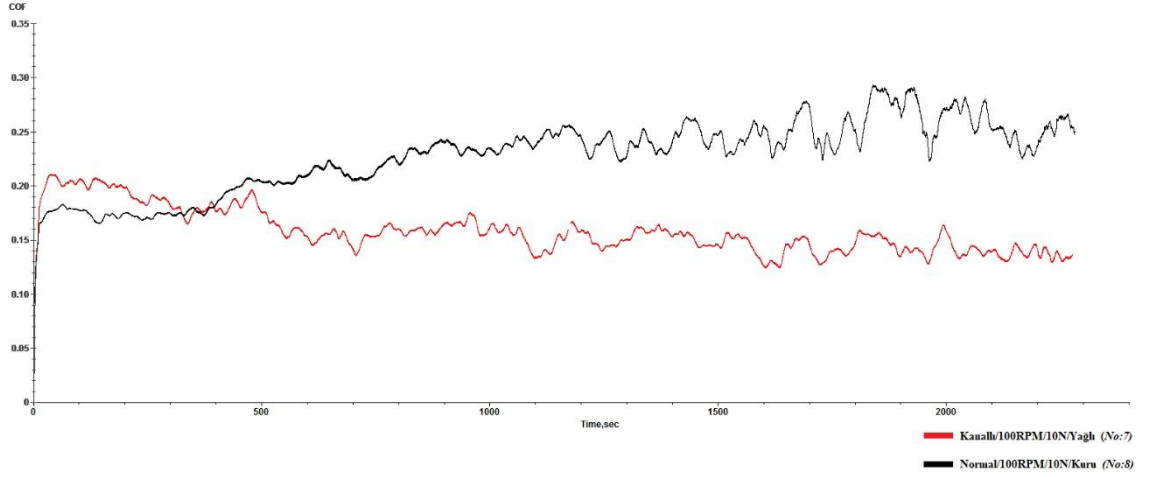
karşılık, zaman grafiği verilmiştir. Kanallı numunelerin bir tanesine yağ emdirilirken diğerine yağ emdirilmeden test yapılmıştır. Genel olarak aşınma hızının artmasıyla sürtünme katsayısının düştüğü bilinmektedir (Wakuda et al 2003). Bu durum yüzeyler arası temas bölgesindeki pürüzlerin, artan hızın etkisiyle birbiri üzerinden kaymasıyla açıklanabilir. Sürtünme katsayıları Şekil 4.7 ile kıyaslandığında artan aşınma hızıyla üç testte de sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür. Kuru şartlar için sürtünme katsayıları $\mu=0,15$ civarındayken, yağ emdirilmiş numunede bu değer yaklaşık $\mu=0,08$ civarında seyretmiştir. Hertzian temasının bu analizde de başlangıçtan 30 saniye boyunca devam ettiği görülmüştür. Kanallı ve normal numunelere kuru şartlarda yapılan testlerde (4 ve 6 no'lu analiz) sürtünme katsayısının benzer çıktığı ve kanallı numunelerde yine çökme davranışının olmadığı düşünülmektedir. Kanallı numuneye yapılan kuru aşınmada (4 no'lu analiz) yaklaşık 900. saniyede sürtünme katsayısında bir artış görülmektedir. Bunun aşınma sırasında geçen süreye ve yüke bağlı olarak numune yüzeyinden kopan bir parçanın sebep olduğu düşünülmektedir. Kopan bu parça, yüzeyde pürüz meydana getireceğinden, 900. saniyeye kadar oldukça kararlı ve az dalgalanma ile gelen sürtünme kuvvetinin 900. saniyeden sonra dalgalı bir hareket sergilediği bu düşüncüyü desteklemektedir. Yağ emdirilmiş kanallı tasarımın sürtünme grafiğine bakıldığında ise yaklaşık 600. saniyede sürtünme katsayısı belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Bu artışın sebebi artan devir sayısı ile yüzeye çıkan yağ kütesinin merkez kaç etkisiyle hızlı bir şekilde savrulmasıyla yaklaşık 600. saniyeden sonra numunenin yüzeyinden dışarı tahliye olması ve bunun sonucunda yüzeyde yağ filminin kalmaması olarak düşünülmektedir. 600. saniyeden sonra grafik kuru sürtünmeye benzer bir eğilim göstermiştir. Bu sonuçlar tasarlanan geometrinin düşük hızlarda daha iyi yağlayıcı etki gösterdiğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.8 4, 5 ve 6 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafiği

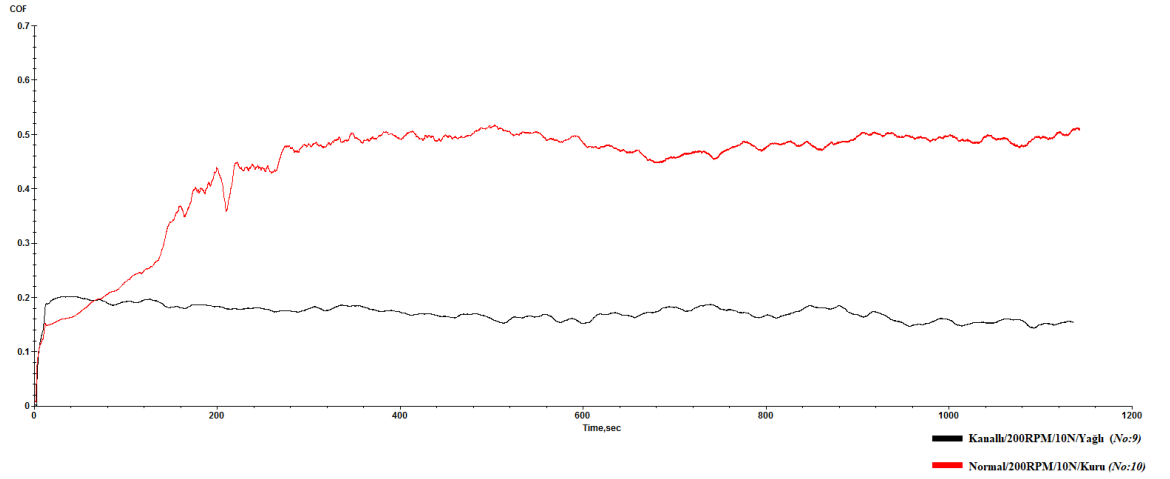
Önceki analizlerin (1,2,3,4,5 ve 6 no'lu) verdiği sonuçlara bakıldığında yağ emdirilmemiş kanallı numunelerin aşınma davranışları ile normal numunelerin kuru ortam şartlarındaki aşınma davranışının benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu doğrultuda geriye kalan testlerde yağ emdirilmemiş kanallı numunelere aşınma testi yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Şekil 4.9'da bir adet yağ emdirilmiş kanallı numuneye ve bir adet normal numuneye kuru şartlarda aşınma testi yapılmıştır. Testler 100 RPM aşınma hızında ve 10N yükte yapılmıştır. Grafikte kuru şartlarda yapılan (8 no'lu analiz) aşınma testlerinin sürtünme kuvvetinin yaklaşık 300. Saniyeye kadar yağlı şartlarda (7 no'lu analiz) yapılan testlerin sürtünme kuvvetine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin yüzeyin pürüzlü olması ve meydana gelecek yağ filminin ince oluşu olarak düşünülmektedir. Yağ filminin ince olduğu durumlarda yağın seviyesi yüzeyin pürüzlerinin tepe noktalarına ulaşamaz. Bu durumda aşındırıcı bilye ile yüzey pürüzlerinin tepe noktaları arasında hala kuru bir sürtünme bulunur. Hertzian temasının ardından aşınma iz bölgesinin pürüz seviyesi azalır ve yüzeydeki mikro tepecikler yağ seviyesine kadar düşer. Böylece yağ filmi homojenleşir. Grafiğe genel olarak bakıldığında yağ emdirilmiş 7 no'lu numunenin sürtünme katsayısı $\mu=0,14$ civarındayken kuru şartlarda testi gerçekleştirilen 8 no'lu numunenin sürtünme katsayısı $\mu=0,24$ civarındadır. Bu durum kendinden yağlamanın olumlu etkisiyle açıklanabilir.

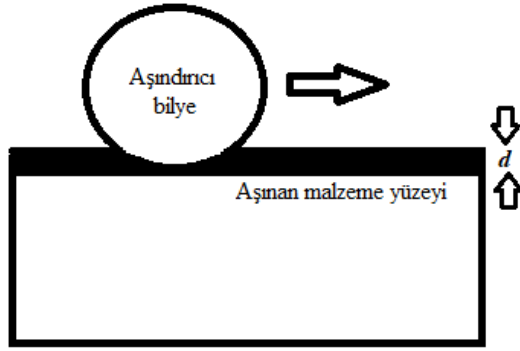


Şekil 4.9 7 ve 8 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafiği

Şekil 4.10'da bir adet yağ emdirilmiş kanallı numuneye ve bir adet normal numuneye kuru şartlarda aşınma testi uygulanmıştır. Testler 200 RPM aşınma hızında ve 10N yükte yapılmıştır. Her iki deney için de Hertzian temas bölgesi görülmektedir. Fakat 10 no'lu numunede yüzeyler arası sürtünme kuvveti yaklaşık 200. saniyeden sonra sabitlenmiş ve kararlı bir davranışa geçmiştir. Grafiklerde yağ emdirilmiş 9 no'lu numunenin sürtünme katsayısı $\mu=0,18$ civarında seyrederken bu değer kuru ortamda yapılan 10 no'lu deneyde $\mu=0,45$ dolaylarına kadar çıkmıştır. Bu artışın sebebinin artan yük olduğu düşünülmektedir. Aşınma testlerinde yükün fazla olması, aşındırıcı bilye veya ucun numune yüzeyine d mesafesi kadar batmasını sağlar. Batan aşındırıcı uç, düşük yüklerde olduğu gibi sadece yüzey pürüzlülüklerini değil aynı zamanda taban malzemeyi de plastik olarak süpürmeye çalışır. Süpürülen bu parçalar aşınma yüzeyine adezyon etkisiyle sıvanır. Dolayısıyla sürtünme katsayısı artış gösterir. Bu olayın makro boyuttaki şematik görüntüsü Şekil 4.11'de verilmiştir.



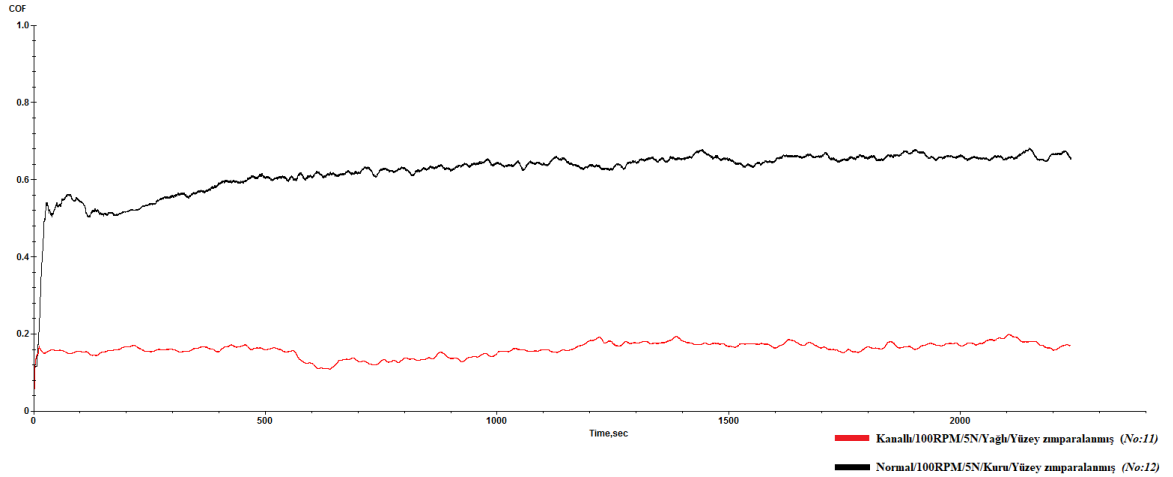
Şekil 4.10 9 ve 10 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafiği



Şekil 4.11 Aşındırıcı bilye ve temas yüzeyi arasındaki şematik görüntü

Şekil 4.12'de iki adet kanallı numuneye ve bir adet normal numuneye 100 RPM dönme hızında, 5N yük uygulanarak yapılan aşınma testinin, sürtünme katsayısına karşılık zaman grafiği verilmiştir. Bu analizin, 1 ve 3 no'lu analizlerden farkı numune yüzeylerinin ıslak olarak zımparalanmış olmasıdır. Yağ emdirilmiş ve kuru olan numuneler arasındaki sürtünme kuvveti farkının en fazla olduğu analizin bu analiz olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum; yağın, kanallardan çıkması sonrası yüzeyde pürüzün az olması sebebiyle kolaylıkla yüzeyde yağ filmi oluşturması olarak düşünülmektedir. Siyah çizgiyle gösterilen 11 no'lu analiz, Şekil 4.7'deki kırmızı çizgiyle verilen 2 no'lu analizle aynı şartlarda yapılmış fakat yüzeyi zımparalanmamış 2 no'lu analiz ile kıyaslandığında sürtünme katsayısının, zımparalanmış 11 no'lu analizde daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. SLM ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğünün fazla olması dolayısıyla bu numunelere yapılan aşınma testlerinde bilye ile yüzey arasında kayma

hareketi meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla 2 no'lu analizde buna benzer bir durumun oluştuğu ve bunun sonucunda sürtünme katsayısının düşük olduğu düşünülmektedir. Yüzeyi pürüzsüz numunelerin aşınma testlerinde ise bilye, aşınma yüzeyinde bir plastik deformasyona yol açarak adezyon oluşturabilir. 11 no'lu analizde de bu olayın meydana gelerek sürtünme katsayısını arttırdığı savunulabilir. Ayrıca 11 no'lu analizde sürtünme katsayısı test başlangıcında yüksek iken aşınma devam ettikçe kararlı hale geçmiştir. Bu olaya run in period denilmektedir. Geçen süreyle beraber yüzey pürüzlülüğü azaldığından sürtünme katsayısı düşme eğilimindedir (Yetim 2009, Yazıcı 2013). Bu kavram yeni otomobillerde yakıt sarfiyatını artıran rodaj süresine benzetilebilir. Kullanım ile beraber piston ve yanma odası duvarı arasındaki temas yüzeylerinde üretim kaynaklı pürüzlülükler geçtikçe sürtünme katsayısı düşer. Dolayısıyla otomobilin yakıt sarfiyatı zamanla azalarak sabit duruma gelir.



Şekil 4.12 11 ve 12 no'lu numunelere ait sürtünme katsayısı/zaman grafiği

Şekil 4.3'te, 7 no'lu analizde kullanılan yağ emdirilmiş numunenin aşınma testi sonrası görüntüsü verilmiştir. Aşınma sırasında merkezkaç etkisiyle savrulan yağ, aşınma ürünü denilen debriler ile karışarak yüzeyde koyu renkli dalgaların oluşmasına sebep olmuştur. Bu durum kendinden yağlayıcı yüzey tasarımının, yüzeyini yağlayarak görevini yaptığını yorumlanmıştır.



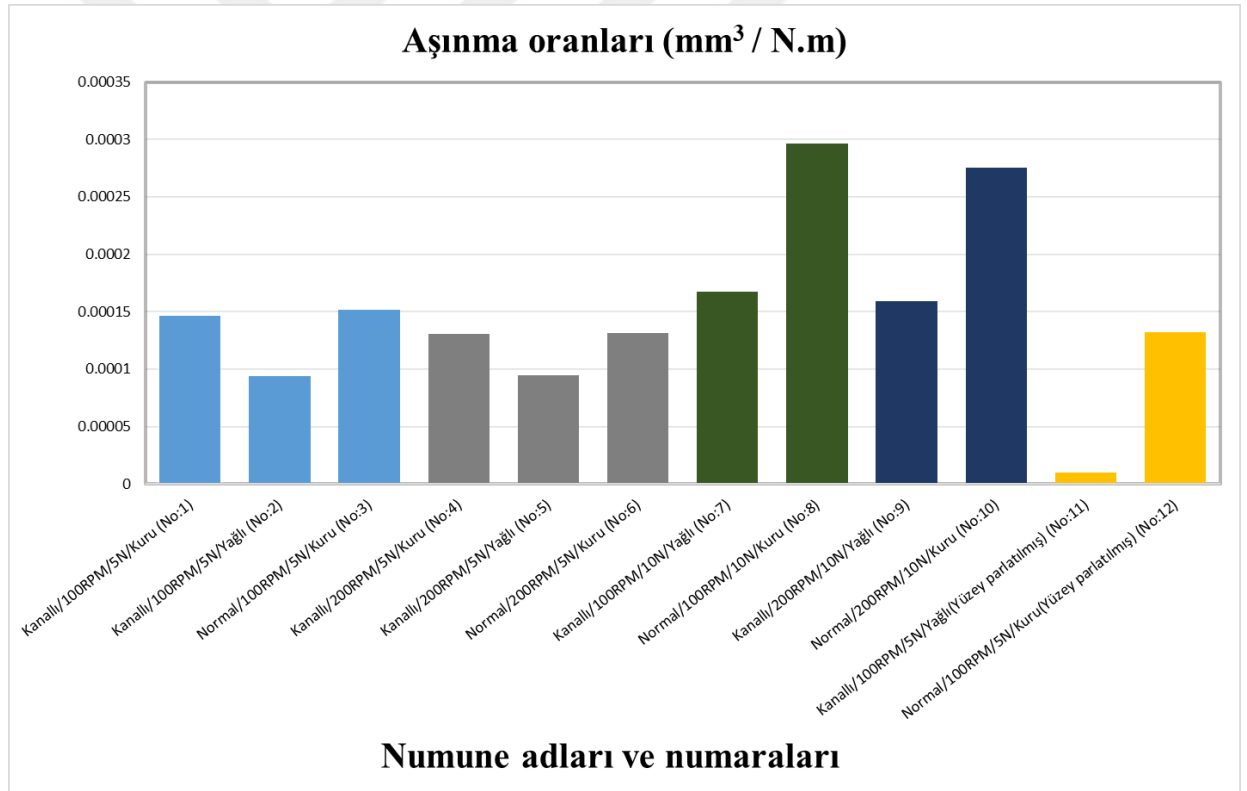
Şekil 4.13 Aşınma testinden çıkan 7 no'lu analize ait numune görüntüsü

4.3.2 Aşınma oranları grafiği

3. Bölümde, (3.1) ile verilen formüle göre hesaplanan aşınma oranları, Şekil 4.14'te verilmiştir. Alt tarafta numune analizlerinin adları ve numaraları verilmiştir. Birbirleriyle karşılaştırılan aynı şartlardaki analizler aynı renklerde verilmiştir. Buna göre 1, 2 ve 3 no'lu analizler birbirleriyle karşılaştırıldığında, yağ emdirilmiş olan 2 no'lu numunenin aşınma oranının, kuru şartlarda yapılan 1 ve 3 no'lu kanallı ve normal numunelere göre % 35 daha az olduğu görülmektedir. Kuru şartlarda yapılan 1 ve 3 no'lu numuneler kıyaslandığında ise aşınma oranlarının neredeyse aynı çıktığı görülmüştür. Bu durum; kanallı numunelerde, kanalın aşınma oranına hiçbir negatif yönde etkisinin olmadığına yorumlanmaktadır. Grafikteki 4, 5 ve 6 no'lu numunelerde de bunlara benzer yorumlar yapılabilir. Yağ emdirilmiş 5 no'lu numunedeki aşınma 4 ve 6 no'lu numunelerdekine göre yaklaşık %20 daha azdır. Bu oranın ilk seriye göre (1,2, ve 3 no'lu analiz serisi) daha az olmasının nedeni aşınma hız devrinin fazla olması sonucu yağın yüzeyden dışarıya tahliye olması ve yağ filminin bozulması olarak yorumlanmaktadır. Bu seri (4,5 ve 6 no'lu / 200RPM aşınma hızında yapılmış) 1, 2 ve 3 no'lu 100 RPM hızda aşınma testi yapılmış serisiyle karşılaştırıldığında genel olarak aşınma oranının az bir miktarda düştüğü görülmektedir. Bu durum artan aşınma hızıyla, aşınma oranının düşmesi olarak yorumlanmaktadır (Wakuda et al 2003).

Şekil 4.14'e göre; 5N yükte yapılmış 1,2,3,4,5 ve 6 no'lu seriler 10N yükte yapılan 7,8,9 ve 10 no'lu serilerle aynı davranışı sergilemişlerdir. Fakat genel olarak bakıldığında beklendiği üzere, 10N yükte yapılan deneylerde aşınma oranları daha fazladır.

Şekil 4.14'te yüzeyi zımparalanmış 11 ve 12 no'lu numunelerde yağlamanın etkisi oldukça bariz görünmektedir. Bunun yüzeyin zımparalanmasıyla ortaya konulduğu yorumlanmaktadır. Yüzeyin pürüzsüz oluşuyla yağ filminin daha rahat bir şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Dolayısıyla 11 ve 12 no'lu analizlerde kuru numunede oluşan aşınma oranı, yağ emdirilmiş numunenin aşınma oranına göre neredeyse on iki kat daha düşüktür.

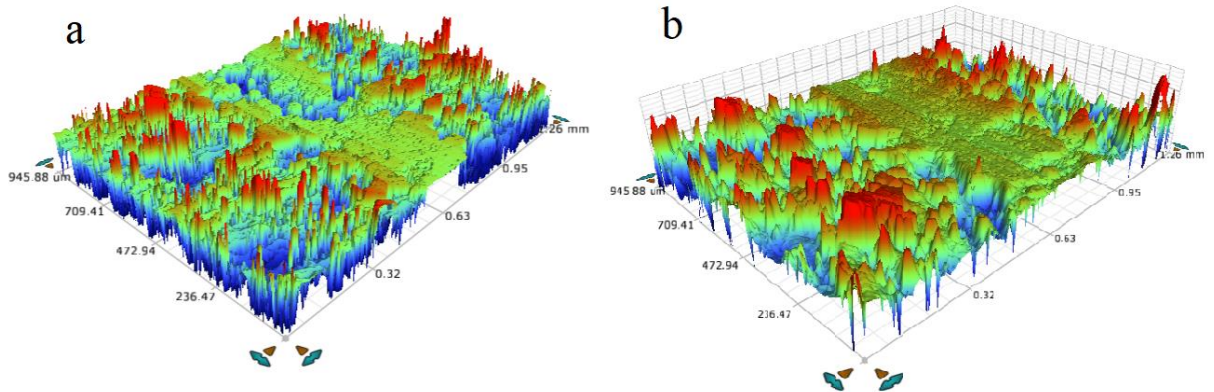


Şekil 4.14 Aşınma oranları grafiği

4.3.3 Aşınma izlerinin 3D profilometre görüntüsü

Aşınma testi sonrası aşınma izlerinin görüntüleri aşağıda verilmiştir. Şekil 3.14, bu analizden alınan aşınma kesit alanı sayesinde hazırlanmıştır. Görüntüler verilirken karşılaştırmanın kolay olması açısından birbirleriyle kendi arasında kıyaslanan numunelerin görüntüleri birlikte verilmiştir. (2-3 no'lu, 7-8 no'lu ve 11-12 no'lu analizler)

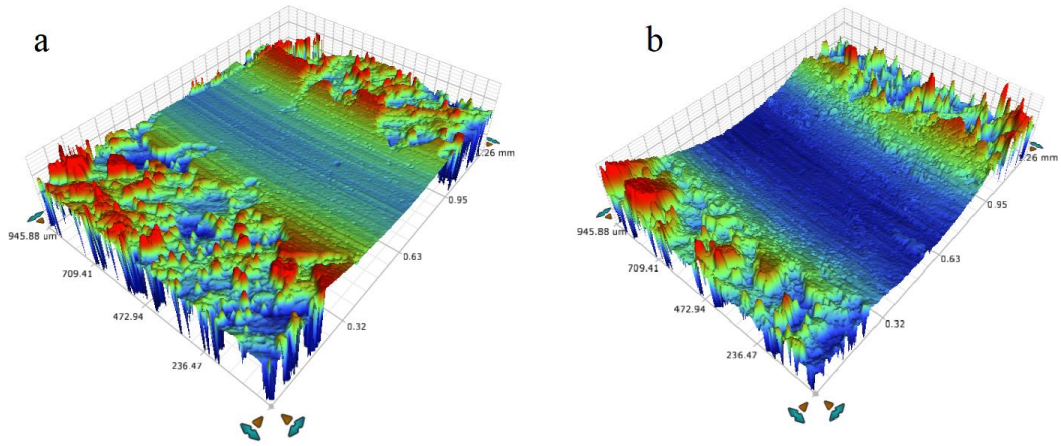
Şekil 4.15'te 2 ve 3 no'lu analizlere ait numunelerin aşınma profili gösterilmiştir. "a" ile gösterilen numune 2 numaralı yağ emdirilmiş numuneye, "b" ile gösterilen numune ise kuru şartlarda aşınması yapılmış 3 no'lu numuneye aittir. Her iki analizde 5N yük ve 100RPM hızda yapılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere yağlı numunenin aşınma iz derinliği, kuru şartlarda yapılan numuneye göre daha azdır. Fakat yükün 5N olması aradaki farkın belirgin olmasını engellemektedir. "a" ile gösterilen numunenin aşınma profilinde hala yüzey pürüzlülüğünün varlığı dikkat çekmektedir. Fakat kuru numunenin aşınma profilinde pürüz oldukça azdır.



Şekil 4.15 2 ve 3 no'lu analizlere ait yüzey profili (a-Yağ emdirilmiş 2 no'lu analiz, b- kuru 3 no'lu analiz)

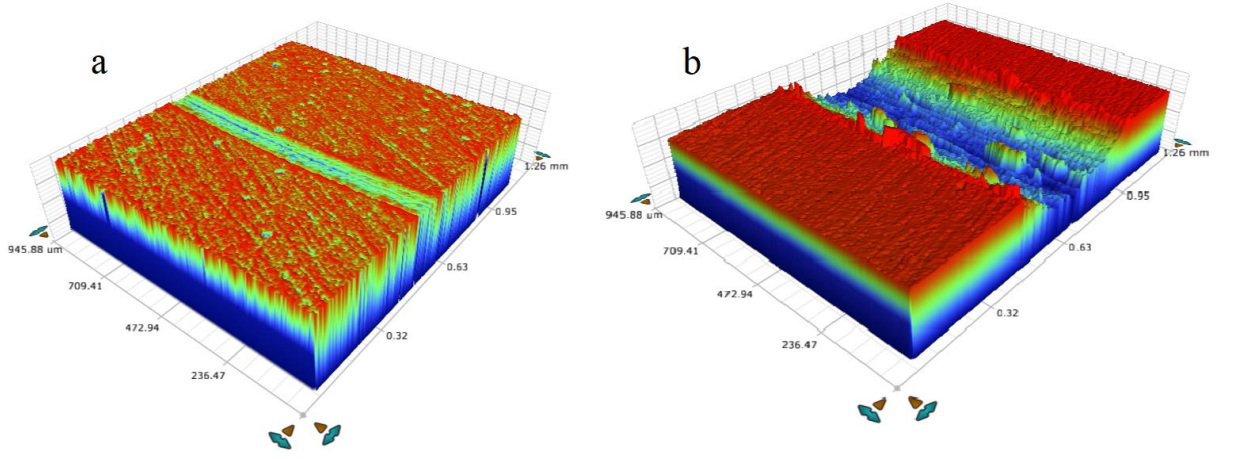
Şekil 4.16'da 7 ve 8 no'lu numunelere yapılan (10N yük ve 100 RPM hızda) aşınma izlerinin profili gösterilmiştir. "a" ile gösterilen numune yüzey görüntüsü yağ emdirilmiş numuneye aitken, "b" ile gösterilen numune yüzey görüntüsü kuru şartlarda

yapılan normal numuneye ait görüntüdür. “a” ile gösterilen aşınma profilinde mikro abrezif aşınma izleri oldukça açık olarak görülmektedir. Burada yükün önceki analize göre (2 ve 3 no’lu analiz, Şekil 4.15) fazla olduğu göz önüne alındığında oluşan iz derinliği her iki numune için de bariz olarak gözükmemektedir.



Şekil 4.16 7 ve 8 no’lu analizlere ait yüzey profili (a-Yağ emdirilmiş 7 no’lu analiz, b- kuru 8 no’lu analiz)

Şekil 4.17’de 11 ve 12 no’lu deneylere ait numune aşınma profilleri görülmektedir. “a” ile gösterilen numuneye yağ emdirilerek, “b” ile gösterilen numuneye yağ emdirilmeden kuru şartlarda aşınma testi yapılmıştır. Buradaki deneyler Şekil 4.15’te yüzey görüntüsü verilen analizlerle aynı şartlarda yapılmış (5N, 100RPM) fakat yüzeyleri zımparalanmıştır. Böylece aşınma iz hacimlerinin genel olarak azaldığı görülmüştür. Yağ emdirilmiş ve kuru şartlarda yapılmış numuneler arasındaki aşınma hacim farkının en bariz görüldüğü yüzeylerin bu analize ait olduğu açıkça görülmektedir.

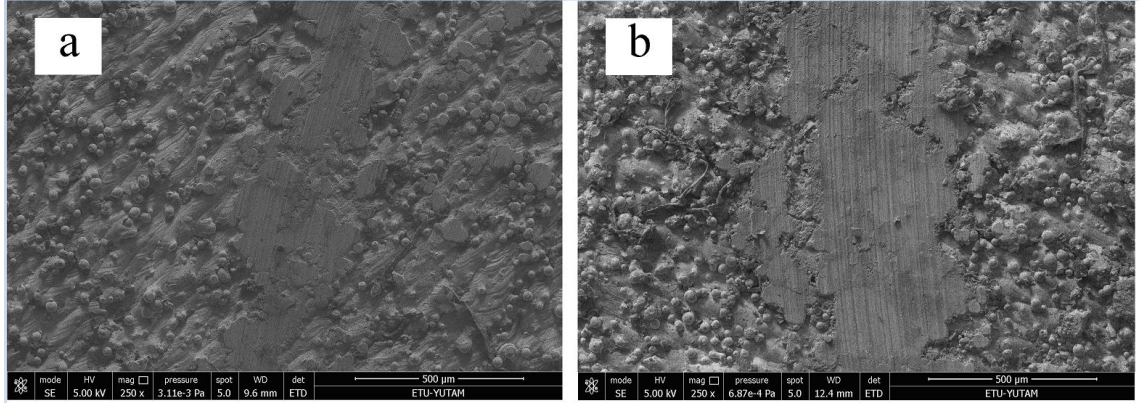


Şekil 4.17 11 ve 12 no'lu analizlere ait yüzey profili (a-Yağ emdirilmiş 11 no'lu analiz, b- kuru 12 no'lu analiz)

4.3.4 SEM görüntüleri

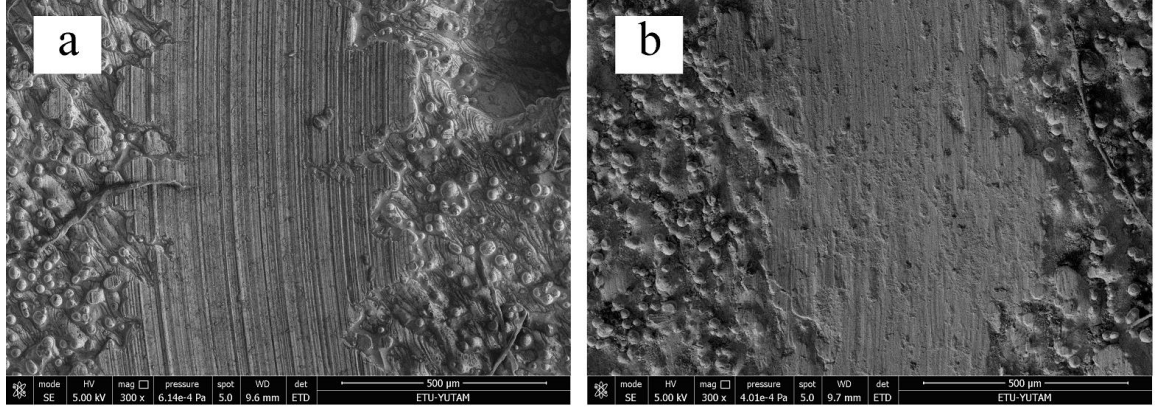
Numunelere ait taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri aşınma görüntülerinin verildiği gibi yine karşılaştırmalı olarak (2-3 no'lu, 7,8 no'lu ve 11-12 no'lu) verilmiştir.

Şekil 4.18 'de 2 ve 3 no'lu analizlerin sem görüntüleri verilmiştir. "a" ile gösterilen SEM görüntüsü yağlı şartlarda yapıldığı için aşınma izinin "b" ile gösterilen ve kuru şartlarda yapılan numunenin aşınma izine oranla dar olduğu görülmektedir. Hem kuru hem yağ emdirilmiş numunelerde aşınma davranışı şiddetli adezif aşınma ile birlikte abrazyon ve az da olsa plastik deformasyon mekanizmasının bileşimi olarak yorumlanmaktadır. Aşınma izi üzerinde bulunan plaka şeklindeki yassılaştırmış aşınma ürünleri adezif aşınmanın bir göstergesidir (Smith 1984). Bunlara ek olarak, her iki analizde de mikro abrazif aşınmanın tipik belirtisi olan çizgi şeklinde çukurlar gözükmemektedir. Bu iki durum; hem abrazif aşınma hem de adezif aşınmanın varlığı olarak düşünülmektedir.



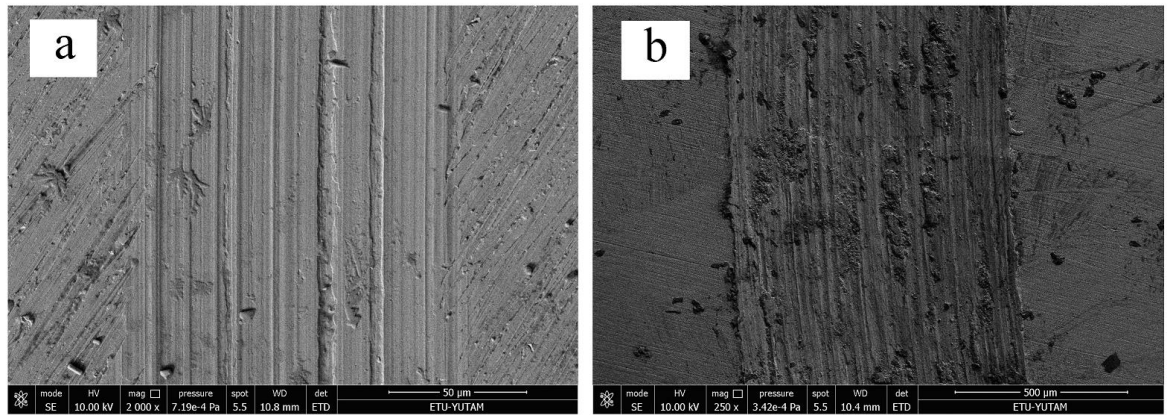
Şekil 4.18 2 ve 3 no'lu analizlere ait SEM görüntüleri(a-)Yağ emdirilmiş 2 no'lu analiz, b-) kuru 3 no'lu analiz)

Şekil 4.19'da 7 ve 8 no'lu analizlere ait numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. “a” ile gösterilen yağ emdirilmiş numuneye ait görüntüde çizgisel yüzey çukurları abrezif aşınma mekanizmasının varlığını göstermektedir. Yüzeylerin fazla pürüzlü oluşu, numuneye yağ emdirilmesine rağmen kopan büyük parçaların yağ filmine hapsolmesiyle aşınma sırasında abrezif aşınmanın fazla bir şekilde görülmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak malzemenin plastik deformasyon sonucu iz kenarlarına biriktirildiği görülmektedir. “b” ile gösterilen görüntüde ise kuvvetli plastik deformasyon sonucu; malzemenin, adezyona sebep olarak yüzeye sıvanmasıyla sonuçlandığı düşünülmektedir. Aşınma sırasında bilye ile numune arasında oluşan aşınma ürünlerinin varlığı, aşınma mekanizmasının ikili temas aşınmasından (two-body) üçlü temas aşınmasına (three-body) dönüştürür (Li and Bell 2004). Ayrıca yüzeye sıvanmayan malzemelerin iz kenarlarına biriktiği açıkça görülmektedir. Her iki analizde de iz genişliği hemen hemen aynı olmasına rağmen kuru şartlarda yapılan analizin (b) iz derinliği fazladır.



Şekil 4.19 7 ve 8 no'lu analizlere ait SEM görüntüleri (a-)Yağ emdirilmiş 7 no'lu analiz, b-) kuru 8 no'lu analiz)

Şekil 4.20'de ise 11 ve 12 no'lu numunelere ait SEM görüntüleri verilmiştir. "a" ile gösterilen numuneye yağ emdirilmiştir (11 no'lu analiz). "b" ile görüntüsü verilen numuneye ise kuru şartlarda aşınma testi yapılmıştır (12 no'lu analiz). Yağ emdirilen numunede iz genişliği yaklaşık 150µm iken, kuru şartlarda aşındırılan numunenin iz genişliği 800µm civarındadır. "a" ile gösterilen SEM görüntüsünde abrezif aşınma mekanizması barizce görülmektedir. "b" ile gösterilen SEM görüntüsünde ise yüzeyde bulunan plaka şeklindeki aşınma ürünlerinin varlığı, kuvvetli adezif aşınmanın göstergesi olarak düşünülmektedir. Bunun yanında yüzeydeki çizgisel izlerin bir miktar adezif aşınmanın varlığını da gösterdiği düşünülmektedir. İz kenarlarına dikkatli bakıldığında plastik deformasyon sonucu malzemenin kenarlara süpürüldüğü açıkça görülmektedir. Bu biriken malzemenin ana malzeme olabileceği gibi, yine paslanmaz çelik olan aşındırıcı bilyeden malzeme transferi yoluyla olabileceği de göz ardı edilmemelidir.



Şekil 4.20 11 ve 12 no'lu analizlere ait SEM görüntüleri (a-)Yağ emdirilmiş 11 no'lu analiz, b-) kuru 12 no'lu analiz)

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Birçok mühendislik uygulamasında kullanılan kendinden yağlayıcı yüzeylerin üretim şekillerinden bir tanesi de eklemeli üretim yöntemleriyle üretimdir. Bu yöntem günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da tasarlanan üç farklı geometrinin kendi kendini yağlama özelliği FLUENT akış modelleme programıyla yapılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında uygun bulunan tasarım SLM ile üretilmiştir. Malzeme olarak 316L paslanmaz çelik tozları kullanılmıştır. Üretilen numunelere tribolojik testler uygulanarak sonuçlar kaydedilmiştir. Buna göre elde edilen bazı sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Yapılan FLUENT analizleri sonrası en iyi tasarımın 3 no'lu ortada tek kanallı tasarım olduğu belirlenmiştir.
- Tasarımda oluşturulan kanalların, aşınma davranışını etkilemediği ortaya konulmuştur.
- Yağ emdirilmiş numunelerde aşınma iz derinliğinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- SLM ile üretilen paslanmaz çeliğin ve geleneksel yöntemlerle üretilen paslanmaz çeliğin aynı sertlik derecesinde olduğu görülmüştür.
- Yağ filminin çok az miktarda bile bulunması sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azalttığı gözlemlenmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğünün aşınma sonuçlarını ciddi manada etkilediği ve pürüzsüz yüzeylerde yağlayıcı filmin daha kolay oluştuğu görülmüştür.
- Yağ filminin çok az miktarda bile bulunması sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azalttığı görülmüştür.
- Yağ emdirilmiş numunelerde aşınma iz derinliğinin daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir.
- Paslanmaz çelik gibi nispeten yumuşak malzemelerde temel aşınma mekanizmasının adeziv aşınma olduğu ve bazı durumlarda abrezif aşınmanın da olabileceği gözlemlenmiştir.
- Aşınma hızının, sürtünme katsayısını etkilediği görülmüştür.

Bu çalışmada aşınma testleri dönel aşınma cihazında yapılarak, kendinden yağlama için merkezkaç etkisinden yararlanılmıştır. Buna ek olarak lineer hareketle de kendinden yağlamanın gerçekleşeceği tasarımlar ortaya konulmalıdır. Ayrıca çalışmada, yüzeyi parlatılan numunelere yalnızca 5N yükte ve 100RPM dönme hızında testler uygulanmıştır. Bu deney şartları çeşitlendirilerek daha fazla aşınma testi uygulanmalıdır. Çalışmada kullanılan sıvı yağlayıcıdan daha yoğun ve daha viskoz yağlar için de çalışma tekrarlanmalıdır. Ayrıca delik çapları ve deliklerin konfigürasyonu değiştirilerek analizler yeniden yapılmalıdır. Gözeneklerden yağ çıkışına sıcaklığın da etkisi olduğundan aşınma testleri yüksek sıcaklıklar için tekrar yapılmalıdır.



KAYNAKLAR

Akkurt, M, 2012. Makine Elemanları, Birsen Yayınevi, 757, İstanbul

Anonymous, 2018. Web Sitesi: <http://additivemanufacturing.com/basics> , Erişim Tarihi: 15.05.2018.

Anonymous, 2017 Web Sitesi: <https://www.mahle-aftermarket.com/na/en/support/installation-tips/bearings-failure-prevention.jsp> , Erişim Tarihi: 10.03.2018

Arifin, A., Sulong, A. B., Muhamad, N., Syarif, J., and Ramli, M. I. 2004. Material processing of hydroxyapatite and titanium alloy (HA/Ti) composite as implant materials using powder metallurgy: a review, *Materials & Design*. (55) 165-175

Babalık, F. C. 2012. Makine Mühendisliğine Giriş, Dora Yayınevi, 243, Bursa

Babalık, F. C. 2013. Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Dora Yayınevi, 243, Bursa

Dabrowski, J. R. and Oksiuta, Z. 2000. Poros implantation material from vitalium alloy Powder. *Material Engineering*, 4 (200) 174-178

Dee, K. C., Puleo, D. A., and Bizios, R. 2004. An introduction to tissue-biomaterial interactions, *Cell Mol. Biol.* (8) 419-425

Donnet, C. and Erdemir, A. 2004. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings, *Surface and Coatings Technology* 180 –181, 76–84

Donnet, C. ve Erdemir, A. 2001. Solid Lubricants and Self-Lubricating Films, *Modern Tribology Handbook*, ABD

Dowson, D., *History of Tribology*, 1998. 2nd ed., PEP, 32-57, London

- Efeoglu, I., Arnell, R.D., Tinston, S., Teer D.G. 1993. The mechanical and tribological properties of TiN coatings formed in a four magnetron closed-field sputtering system, *Surface and Coating Techonolgy*, 57, 61-69
- Gao, X. 2018. Response of MoS₂-Sb₂O₃ film to low-earth-orbit space environment. *Materials Letters*. (227), 161-164
- German, R. M. 2016. Powder metallurgy & Particulate Materials. *Türk Toz Metalurjisi Derneği*, 574, Ankara
- İmece, Y. 2017. MOS₂ ve grafit kaplamaların farklı ortam şartlarında tribolojik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. (Kabul edilmiş makale Sayı:2018)
- Kılıçay, K. 2012. AISI 1020 Çeliğinin Frezelenmesinde Katı Yağlayıcı Kullanımının Araştırılması. Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 94, Eskişehir
- Kıran, K. 2011. Seçici lazer ergitme ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçaların ince tormalama işlemleri. Yüksek lisans tezi, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen bililimleri enstitüsü, 130, Isparta
- Kipouros, G. J., Caley, W. F., and Bishop, D. P. 2006. On the advantages of using powder metallurgy in new light metal alloy design, *Metallurgical and Materials Transactions A*, (12) 3429-3436
- Kovacı, H., Akaltun, Y., Yetim, A.F., Uzun, Y., Çelik, A., 2018. Investigation of the usage possibility of CuO and CuS thin films produced by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) as solid lubricant. *Surface & Coatings Technology* 344, 522–527
- Lei, Y. Tribological properties and lubrication mechanism of in situ graphene-nickel matrix composite impregnated with lubrication oil. *Materials Research Express*. (5), 056512

Li, H. 2018. Effect of process parameters on tribological performance of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting. *Manufacturing Letters*. (16), 36-39

Mang, T. Dresel, W. 2007. *Lubricants and Lubrication*, Wiley-VCH, 1100, Germany

Niemann, G. 1978. *Machine elements design and calculation in mechanical engineering*. Springer-Verlag, 356, New York

Onur, A. ve Arslan, F. Yağ atomizasyonu yöntemiyle alüminyum alaşımı ve kalay tozu üretimi , 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Ankara, 193-206 (16-17 Eylül 1996).

Özüğür, B. 2006. Hızlı prototipleme teknikleri ile kompleks yapıdaki parçaların üretilebilirliklerinin araştırılması. Yüksek lisans tezi, Gazi üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Makine eğitimi ABD, 117, Ankara

Sarıtaş S. 1994. Toz metalürjisi, *Makina Mühendisleri El Kitabı*, Cilt 1, (2.Baskı), MMO Yayınları, Ankara, 64-83

Smith, A.F., 1984. The friction and sliding wear of Unlubricated 316 stainless steel at room temperature in air, *Wear*, 96, (3) 301-318

Sunil, T. 2016. A critical review on solid lubricants. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, (193-199).

Tevrüz,T. 2015. *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*, Çağlayan Kitapevi, 340, İstanbul.

Torres, H. 2018. Tribological behaviour of MoS₂-based self-lubricating laser cladding for use in high temperature applications. *Tribology International*. (126), 153-165

Vicente, M. 2016. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing, 3D Printing and Additive Manufacturing. 183-192

Wakuda, M. 2003. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. *Wear*, 356-363

Yazıcı, M. 2013. S-Fazının kristolografik yapısı, elektrik, manyetik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Nanobilim ve nanomühendislik ABD, 60, Erzurum

Yazıcıoğlu, Y. ve Yazıcıoğlu B. 2016. Makine Elemanları, Nobel Yayınevi,470, Ankara

Yetim, A. F. 2009. Biyomalzeme olarak kullanılan AISI1316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımının plazma ile nitrürasyon davranışı, Ti-DLC ince film kaplama ile karşılaştırılması. Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Makine mühendisliği ABD, 153, Erzurum

Yetim, A. F. 2010. Investigation of wear behavior of titanium oxide films, produced by anodic oxidation, on commercially pure titanium in vacuum conditions. *Surface and Coatings Technology*. 1757-1763

Zhang, X., C., Liu, Y., Wang, B. ve Zhang, Z., M. 2010. Effects of Defects on the In-Plane Dynamic Crushing of Metal Honeycombs, *Int. J. Mech. Sci.*, (52) 1290-1298.

Zhu, Y. 2016. Tribology of selective laser melting processed parts: Stainless steel 316 L under lubricated conditions. *Wear*. 46-55

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Kerem TURALIOĞLU
Uyruğu : TC
Doğum Tarihi ve Yeri : 25.07.1993
Medeni Hali : Bekar
Telefon : +90 (536) 356 55 88
e-mail : kerem.turalioglu93@erzurum.edu.tr

Eğitim

Derece	Üniversite, Bölüm	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği ABD	(Halen)
Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2016
Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği	(Halen)
Lise	Yıldızkent İMKB Anadolu Lisesi	2011

Uluslararası Kongre Sunum

Ni-KATKILI Al 2 O 3 FİLM KAPLAMALI CP-Ti'UN KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ (ICADET, Bayburt, 2017)

(Merve Taftalı, **Kerem Turalioğlu**, Tuba Yetim , Mustafa Yazıcı , Onur Çomaklı, Halim Kovacı, A. Fatih Yetim, Ayhan Çelik)