

**Ti6Al4V ALAŞIMININ
EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİNDE
İŞLEM PARAMETRELERİ DEĞİŞİMİNİN TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Semih YAŞAR



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ti6Al4V ALAŞIMININ
EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİNDE İŞLEM
PARAMETRELERİ DEĞİŞİMİNİN TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Semih YAŞAR
0000-0001-6625-9179

Prof. Dr. Hakan AYDIN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
YÜZEY İŞLEM VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Semih YAŞAR tarafından hazırlanan “Ti6Al4V ALAŞIMININ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİNDE İŞLEM PARAMETRELERİ DEĞİŞİMİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüzey İşlem ve Teknolojileri Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hakan AYDIN

Başkan : Prof. Dr. Sertan Kemal AKAY
0000-0002-7597-1528
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı
İmza

Üye : Prof. Dr. Hakan AYDIN
0000-0001-7364-6281
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Oğuz TUNÇEL
0000-0002-6886-6367
Siirt Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
02/08/2023

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16/06/2023

Semih YAŞAR

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Hakan AYDIN
16/06/2023

Semih YAŞAR
16/06/2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ti6Al4V ALAŞIMININ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİNDE
İŞLEM PARAMETRELERİ DEĞİŞİMİNİN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Semih YAŞAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüzey İşlem ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hakan AYDIN

Tasarım özgürlüğü sayesinde klasik yöntemlerle üretilemeyen karmaşık geometrilere sahip ürünlerin kolaylıkla üretilebileceği, birkaç proses adımıyla birden fazla parçanın birleştirilmesiyle üretilebilen ürünlerin tek bir prosesle tek bir parça olarak üretilebileceği ürünlerin eklemeli imalat makineleri ile üretilmesi hem üretim süresinde hem de maliyette avantaj sağlamaktadır. 3 boyutlu olarak tasarlanan ürünler katman katman birleştirilerek çok hassas boyutsal doğruluğa sahip olurlar. Ayrıca hızlı üretim hızlı tedarik sağlaması, daha az âtıl madde oluşması, % 99 a kadar doluluk oranı sağlaması, daha homojen içyapı sağlaması ve takım ihtiyacını azaltma gibi avantajlar da sağlamaktadır. Bu yüzden de birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada eklemeli imalatta kullanılan metal tozlarından biri olan Ti6Al4V alaşım tozu kullanılmıştır. Titanyum alaşımı, mekanik özellikleri iyi ve maliyeti yüksek bir alaşımdır. Bu yüzden de eklemeli imalat tezgâh giriş parametreleri de oldukça önemlidir. Bu çalışmada eklemeli imalat tezgâh giriş parametrelerinden tarama hızı ve lazer gücünün titanyum alaşımı tozundan üretilen numunelere mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca üretilen numunelere ısıtma işlemi ve kumlama gibi ikincil işlemler uygulanarak mekanik ve tribolojik özelliklere etkileri incelenmiştir. Standartlara uygun olarak yüzey pürüzlülüğü ölçüm, mikrosertlik ölçüm, aşınma incelemeleri (sürtünme katsayısı COF değerinin bulunması ve aşınma direncinin bulunması) ve SEM görüntüleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sonuç olarak eklemeli imalatta kullanılan tezgâh giriş parametrelerinden tarama hızı ve lazer gücünün ve ayrıca ısıtma işlemi ve kumlama gibi ikincil işlemlerin titanyum alaşım numunelerde mekanik ve tribolojik özelliklere önemli bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ti6Al4V, eklemeli imalat, tarama hızı, lazer gücü, ikincil işlemler, tribolojik özellikler

2023, ix + 87 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THE EFFECT OF CHANGE OF PROCESS PARAMETERS ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES IN THE MANUFACTURING OF Ti6Al4V ALLOY BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

Semih YAŞAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Surface Treatment and Technologies

Supervisor: Prof. Dr. Hakan AYDIN

Thanks to the freedom of design, products with complex geometries that cannot be produced by conventional methods can be easily produced, and the products that can be produced by combining more than one part with a few process steps can be produced as a single piece with a single process and the production of products with additive manufacturing machines provides advantages in both production time and cost. Products designed in 3D have very precise dimensional accuracy by combining layer by layer. In addition, it provides advantages such as rapid production, rapid supply, less inert material, up to 99% occupancy rate, more homogeneous internal structure and reducing the need for tools. Therefore, it is widely used in many industries. In this study, Ti6Al4V alloy powder, which is one of the metal powders used in additive manufacturing, was used. Titanium alloy is an alloy with good mechanical properties and high cost. Therefore, additive manufacturing machine input parameters are also very important. In this study, the effects of scanning speed and laser power, which are additive manufacturing machine input parameters, on the mechanical and tribological properties of titanium alloy powder samples were experimentally investigated. In addition, secondary processes such as heat treatment and sandblasting were applied to the produced samples and their effects on mechanical and tribological properties were investigated. In accordance with the standards, surface roughness measurement, microhardness measurement, wear examinations (finding the coefficient of friction COF value and finding the wear resistance) and SEM images were examined in detail. As a result, it has been determined that scanning speed and laser power, which are the machine input parameters used in additive manufacturing, as well as secondary processes such as heat treatment and sandblasting have a significant effect on the mechanical and tribological properties of titanium alloy samples.

Key words: Ti6Al4V, additive manufacturing, scanning speed, laser power, secondary processes, tribological properties

2023, ix + 87 pages.

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum yüksek lisans boyunca bana yardım eden ve bana neyi nasıl yapacağımı tarif etmekten çekinmeyen kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Hakan AYDIN'a teőekkürlerimi sunarım.

Eklemeli imalat numuneleri üretiminde yardımcı olan çalışma arkadaşım Ahmet SEVER'e, toz ve numune testlerinde yardımcı olan çalışma arkadaşım Mertcan KIRAÇ'a, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan yöneticim Rasim YALÇIN'a teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Oktay ÇAVUŐOđLU'na, yüzey pürüzlülüğü testlerinde yardımcı olan Murat KÖROğLU'na, aşınma testlerinde yardımcı olan Öğretim Görevlisi Dr. Cantekin KAYKILARLI'ya teşekkür ederim.

Her şartta yanımda olduğu gibi yüksek lisansım boyunca da yanımda olan ve beni hep destekleyen sevgili eőim Merve KÖROğLU YAŞAR'a, çok yakında dünyaya yeni gelecek güzel kızıma, aileme, desteklerinden dolayı değerli çalışma arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.

Semih YAŞAR
16/06/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Titanyum.....	5
2.1.1. Titanyum ile ilgili genel bilgiler.....	5
2.1.2. Titanyum kullanım alanları.....	6
2.1.3. Ti6Al4V (Ti64) alaşımı.....	7
2.2. Eklemeli İmalat.....	8
2.2.1. Eklemeli imalat ile ilgili genel bilgiler.....	8
2.2.2. Eklemeli imalat avantaj ve dezavantajları.....	9
2.2.3. Eklemeli imalat kullanım alanları.....	10
2.2.4. Eklemeli imalat üretimi için işlem aşamaları.....	10
2.2.5. Eklemeli imalatta ikincil işlemler.....	12
2.2.6. Eklemeli imalat yöntemleri.....	14
2.2.7. Eklemeli imalat işlem parametreleri.....	19
2.2.8. Eklemeli imalata yönelik metal tozları.....	21
2.2.9. Eklemeli imalatta metal tozu imalat yöntemleri.....	23
2.3. Sürtünme ve Aşınma.....	25
2.3.1. Sürtünme ile ilgili genel bilgiler.....	25
2.3.2. Aşınma ile ilgili genel bilgiler.....	28
2.3.3. Adhezif aşınma.....	29
2.3.4. Abrasif aşınma.....	30
2.3.5. Yorulma aşınması.....	31
2.3.6. Korozif aşınması.....	31
2.3.7. Erozyon aşınması.....	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	35
3.1. Deney Tasarımı.....	35
3.2. Numunelerin Üretimi.....	36
3.3. Üretilen Numunelere Uygulanan İkincil İşlemler.....	45
3.3.1. Isıl işlem uygulaması.....	45
3.3.2. Kuşlama uygulaması.....	46
3.4. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları.....	47
3.4.1. Yüzey pürüzlülüğü testi.....	47
3.4.2. Mikrosertlik testi.....	48
3.4.3. Aşınma testi.....	50
3.4.4. SEM mikroyapı analizi.....	52
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	53
4.1. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Testi.....	53
4.2. Mikrosertlik Testi.....	56
4.3. Aşınma Testi.....	60
4.3.1. Sürtünme katsayısı değerlerinin tayini.....	60

4.3.2. Aşınma direncinin bulunması	63
4.4. SEM Analizi Sonuçları	68
5. SONUÇ.....	78
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
Be	Berilyum
C	Karbon
Co	Kobalt
Cu	Bakır
E	Enerji yoğunluğu
Fe	Demir
HV	Vickers sertlik değeri
h	Tarama aralığı
H	Hidrojen
M	Yükleme ağırlığı
Mg	Magnezyum
N	Azot
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
O	Oksijen
P	Lazer gücü
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
s	Aşınma yolu
t	Katman kalınlığı
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit
V	Lazer tarama hızı
W _a	Aşınma miktarı
W _r	Aşınma direnci
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
COF	Sürtünme Katsayısı
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
Eİ	Eklemeli İmalat
EİGA	Elektrod İndüksiyon Gaz Atomizasyonu
MEİ	Metal Eklemeli İmalat
LMS	Lazer Mikrosinterleme
PA	Plazma Atomizasyonu
PIGA	Plazma Ergitme İndüksiyon Gaz Atomizasyonu
SLE	Seçici Lazer Ergitme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
VIGA	Vakum İndüksiyon Gaz Atomizasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1.	Yıllara göre eklemeli imalat büyüklüğü (Anonim, 2022a)..... 2
Şekil 2.1.	Eİ yöntemi ile üretilmiş bir örnek (Anonim, 2023e) 8
Şekil 2.2.	Eİ ile üretilen parçalara kumlama uygulaması (Altuncu, 2020)..... 13
Şekil 2.3.	SLS şematik gösterimi (Turhan ve Özsoy, 2016)..... 15
Şekil 2.4.	DMLS şematik gösterimi (King ve diğerleri, 2015)..... 16
Şekil 2.5.	LMS şematik gösterimi (Wroe, 2015)..... 17
Şekil 2.6.	SLE yönteminde katman serme şeması (Hanzl ve diğerleri, 2015).... 18
Şekil 2.7.	SLE yönteminin şematik gösterimi (Khan ve diğerleri, 2014)..... 19
Şekil 2.8.	Toz üretim yöntemleri şematik gösterimi (Poovich ve Sufiiarov, 2016)..... 23
Şekil 2.9.	Gaz atomizasyon sistemi şematik gösterimi (Dawes ve diğerleri, 2015) 24
Şekil 2.10.	Sürtünme şematik gösterimi (Bhushan, 2013)..... 26
Şekil 2.11.	(a) Statik sürtünme (b) Dinamik sürtünme (Yıldırım, 2022)..... 26
Şekil 2.12.	Adhezif aşınma şematik gösterimi (Varol, 2016)..... 29
Şekil 2.13.	Abrazif aşınma şematik gösterimi (Kurgan, 2023)..... 30
Şekil 2.14.	Yorulma aşınması şematik gösterimi (Anonim, 2023h)..... 31
Şekil 2.15.	Korozif aşınması şematik gösterimi (Varol, 2016)..... 32
Şekil 2.16.	Erozyon aşınması şematik gösterimi (Varol, 2016)..... 33
Şekil 3.1.	Ti6Al4V tozuna ait SEM görüntüsü (Anonim, 2023f) 37
Şekil 3.2.	Görünür yoğunluk ölçüm görüntüsü..... 38
Şekil 3.3.	Sıkıştırılmış yoğunluk ölçüm görüntüsü..... 39
Şekil 3.4.	Toz akış hızı ölçüm görüntüsü..... 40
Şekil 3.5.	Test numunelerinin CAM yazılımında oluşturulan görüntüleri 40
Şekil 3.6.	Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi görüntüsü (Anonim, 2023a).... 41
Şekil 3.7.	Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi bileşenleri (Anonim, 2023a).... 41
Şekil 3.8.	Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi üretim kabini-1 (Anonim, 2023a) 42
Şekil 3.9.	Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi üretim kabini-2 (Anonim, 2023a) 42
Şekil 3.10.	Eİ ile üretilen Ti6Al4V numuneleri..... 44
Şekil 3.11.	Isıl işlem uygulama cihazı 45
Şekil 3.12.	Numunelere uygulanan ısıl işlem proses grafiği..... 46
Şekil 3.13.	Kumlama uygulama cihazı 47
Şekil 3.14.	Ortalama yüzey pürüzlülük Ra ölçüm cihazı..... 48
Şekil 3.15.	Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı 49
Şekil 3.16.	Aşınma ölçmek için kullanılan cihaz..... 50
Şekil 3.17.	Hassas terazi..... 51
Şekil 3.18.	SEM mikroyapı görüntüleme cihazı 52
Şekil 4.1.	Tarama hızı değişiminin Ra ölçüm sonuçlarına etkisi..... 54
Şekil 4.2.	Lazer gücü değişiminin Ra ölçüm sonuçlarına etkisi 55
Şekil 4.3.	Tarama hızı değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçlarına etkisi..... 57
Şekil 4.4.	Lazer gücü değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçlarına etkisi 59
Şekil 4.5.	Tarama hızı değişiminin COF ölçüm sonuçlarına etkisi 61

Şekil 4.6.	Lazer gücü değişiminin COF ölçüm sonuçlarına etkisi.....	62
Şekil 4.7.	Tarama hızı değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçlarına etkisi	65
Şekil 4.8.	Lazer gücü değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçlarına etkisi .	67
Şekil 4.9.	(a) Füzyon eksikliği gözenek görüntüsü (b) Gaz gözenek görüntüsü (Galarraga ve diğerleri, 2016).....	68
Şekil 4.10.	Isıl işlem görmüş+kumlanmış yüzeylerde tarama hızı değişiminin a)800 b)1000 c)1200 mm/s SEM görüntüleri (200x büyütme)	69
Şekil 4.11.	Isıl işlem görmüş+kumlanmış yüzeylerde lazer gücü değişiminin a)190 (190x büyütme) b)220 (210x büyütme) c)250 W (250x büyütme) SEM görüntüleri	70
Şekil 4.12.	Isıl işlem görmüş yüzeylerde tarama hızı değişiminin a)800 (200x büyütme) b)1000 (210x büyütme) c)1200 (200x büyütme) mm/s SEM görüntüleri	71
Şekil 4.13.	Isıl işlem görmüş yüzeylerde lazer gücü değişiminin a)190 (400x büyütme) b)220 (400x büyütme) c)250 (500x büyütme) W SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.14.	Isıl işlem görmemiş yüzeylerde tarama hızı değişiminin a)800 b)1000 c)1200 mm/s SEM görüntüleri (400x büyütme)....	73
Şekil 4.15.	Isıl işlem görmemiş yüzeylerde lazer gücü değişiminin a)190 b)220 c)250 W SEM görüntüleri (400x büyütme).....	74
Şekil 4.16.	a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıtılmış işlem görmemiş yüzeylerde 800 mm/s'deki SEM görüntüleri (200x büyütme)	75
Şekil 4.17.	a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıtılmış işlem görmemiş yüzeylerde 1000 mm/s'deki SEM görüntüleri (400x büyütme) ...	75
Şekil 4.18.	a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıtılmış işlem görmemiş yüzeylerde 1200 mm/s'deki SEM görüntüleri (210x büyütme) ...	76
Şekil 4.19.	a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıtılmış işlem görmemiş yüzeylerde 190 W'taki SEM görüntüleri (400x büyütme).....	76
Şekil 4.20.	a) Isıl işlem görmüş (300x büyütme) ve b) ısıtılmış işlem görmemiş (200x büyütme) yüzeylerde 220 W'taki SEM görüntüleri	77
Şekil 4.21.	a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıtılmış işlem görmemiş yüzeylerde 250 W'taki SEM görüntüleri (300x büyütme).....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Titanyuma ait bazı fiziksel özellikler (Anonim, 2023b).....	6
Çizelge 2.2.	Ti6Al4V alaşımı element yüzde değerleri (Anonim, 2023d)	7
Çizelge 2.3.	Titanyum alaşımı içeren bazı malzemelerin mekanik özellikleri (Zhou ve diğerleri, 2019)	8
Çizelge 3.1.	Eİ üretim parametre değerleri	36
Çizelge 3.2.	Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi (Anonim, 2023d)	36
Çizelge 3.3.	Toz analizi.....	37
Çizelge 3.4.	Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi teknik özellikleri (Anonim, 2023a)	43
Çizelge 4.1.	Tarama hızı değişiminin Ra ölçüm sonuçları	53
Çizelge 4.2.	Lazer gücü değişiminin Ra ölçüm sonuçları.....	55
Çizelge 4.3.	Tarama hızı değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçları	57
Çizelge 4.4.	Lazer gücü değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	58
Çizelge 4.5.	Tarama hızı değişiminin COF ölçüm sonuçları	60
Çizelge 4.6.	Lazer gücü değişiminin COF ölçüm sonuçları	62
Çizelge 4.7.	Tarama hızı değişiminin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık farkı ölçüm sonuçları	64
Çizelge 4.8.	Lazer gücü değişiminin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık farkı sonuçları	64
Çizelge 4.9.	Tarama hızı değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçları	65
Çizelge 4.10.	Lazer gücü değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçları.....	66

1. GİRİŞ

Diğer yollarla üretilmeyen karmaşık geometriye sahip parçalar ve birden fazla parçadan oluşan parçalar tek parça halinde tek seferde eklemeli imalat makineleri ile üretilir. Bu hem zaman hem maliyet avantajı sağlar. Bu şekilde sürekli üretim yapılarak optimizasyon sağlayabiliriz. Ama metal eklemeli imalat makinelerinin maliyeti daha pahalıdır (Dursun, 2019). Ayrıca bu makinede kullanılan malzemelerin (tozların) maliyetleri de pahalıdır. Bu yüzden bazen geleneksel yolla üretilen parçalar daha uygun maliyetli olabilir. Örnek vermek gerekirse metal eklemeli makinede üretilen çok adetli rondela veya geleneksel yolla üretilen büyük boyutlu parçalar dezavantajlı olabilir.

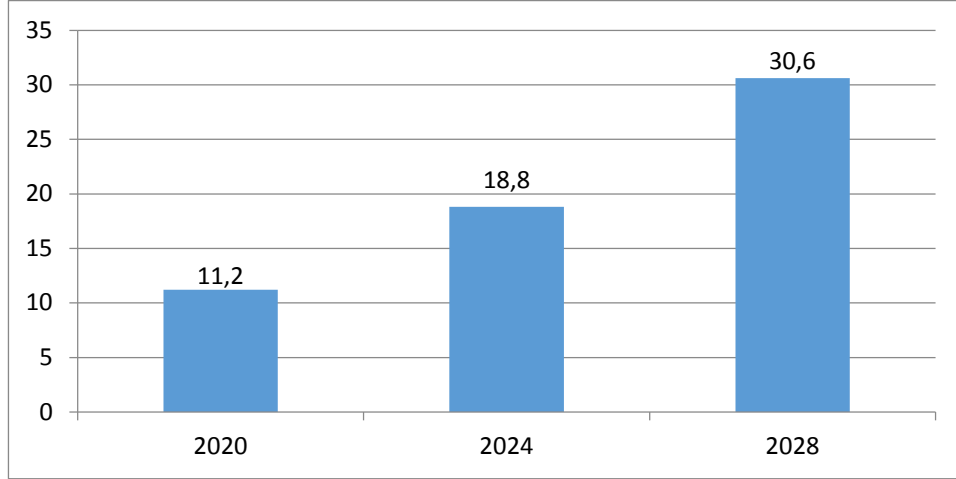
Ancak çok sayıda üretim beklentileri olduğunda, eklemeli imalat seri imalattan daha maliyetli olabilmektedir (Dutta ve Froes, 2017). Malzeme türünün az olması, gözeneklilik-boşluklu yapı ve üretim tamamlandıktan sonra ikincil işlem uygulamalarına ihtiyaç duyması eklemeli imalatın bazı dezavantajlarıdır (Dedeakayoğulları, 2020).

Eklemeli imalatın faydalarından diğerleri de tezgâh takım ihtiyacının azalması veya hiç kullanılmaması, daha az atık madde oluşması, diğer üretim yöntemlerine göre daha homojen, kontrollü ve dolu iç yapı ve hızlı üretim sonucu hızlı tedariktir (Gülcan ve diğerleri, 2017).

Metal eklemeli imalatta en büyük algılardan biri de geleneksel yolla üretilsin diye tasarlanan parçaların, metal eklemeli imalat parçası olarak üretilmesi anlamına gelmez. Eklemeli imalatta üretim için eklemeli imalat tasarım şartlarına uyulması şartıyla ancak eklemeli imalat ile üretim yöntemine geçilmelidir (Anonim, 2023a).

Eklemeli imalat üretim sistemleri, bugün piyasada var olan plastik veya polimer 3D yazıcı sistemlerinin çoğu gibi üret, monte et ve kullan özellikli değildir. Metal eklemeli imalat makineleri ölçü olarak kullanışlıdır. Tasarım, tecrübeli kullanıcılar ile imalata hazırlık, imalat ve makineyi kullanma, üretildikten sonra ikincil işlemler ile tezgâh bakım planı gerektirir (Anonim, 2023a).

Eklemeli imalat gün geçtikçe gelişen ve giderek büyüyen bir pazardır. Aşağıdaki grafikte de verildiği gibi 2020 yılında 11,2 milyar \$ büyüklüğü varken, 2024 yılında 18,8 milyar \$, 2028'e kadarda 30,6 milyar \$ kapasitelere çıkması beklenmektedir (Anonim, 2022a).



Şekil 1.1. Yıllara göre eklemeli imalat büyüklüğü (Anonim, 2022a)

Eklemeli imalat üretim aşamaları şöyledir; üretilecek parçanın tasarımı (CAD dosyası), CAD dosyasına desteklerin oluşturulması, dilimleme ve tarama strajesidir. Daha sonrası makine yani üretim aşamasıdır. Buradaki eklemeli imalat mantığı, CAD dosyasını, bir CAD programı kullanarak 20-100 µm arasında katmanlara ayırır ve üretilmesi için makineye gönderir (Khan, 2019). Sonraki aşama makineye CAD dosyasının yüklenmesi, makinenin ve tozların hazırlanmasıdır. Makine hazır olduktan sonra üretime başlanabilir. Metal tozu istenen hacim ve şekilde katman katman ergitilerek istenen parça üretilir. Üretim bittikten sonra üretilen parça üretim tablasından testere, kesici alet veya tel erezyon yöntemiyle ayrılır. Üretim sonrası ikincil işlemlerde uygulanabilir. Bu ikincil işlemler; oluşturulan desteklerin parçadan ayrılması, gerilim giderme işlemi, kumlama, parlatma, isteğe bağlı talaşlı imalat ve boyadır (Karabulut, 2020).

Toz yapısının ve büyüklüğünün yanı sıra ortamın atmosferi, optik ve lazer sistemlerin özellikleri de üretilen ürüne doğrudan etki etmektedir (Kayır ve Hasırcı, 2021).

Eklemeli imalat tanımlarının hemen hepsinde ortak ifade ‘layer by layer’ yani ‘katman katman’dır. Bu da eklemeli imalatın temel prensibidir (Kor, 2019). Katman elde etmek için eritilen malzemenin süreklilik oluşturması, tezgâh parametrelerinin uyumuna bağlıdır. Hatalı işlem parametreleri yüzeylerde düzensizlik, tozların birbirine kaynaşmaması, içyapıda boşluk, gözenek gibi istenmeyen kusurlar oluşturabilir (Yeşildağ ve Günay, 2019).

Seçici lazer ergitme eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. 3 boyutlu yazıcı teknolojisi olarak da bilinir. SLE’nin ham maddesi toz formundadır. SLE’de ince bir tabaka metal tozu lazer ile seçilmiş bölgede ergitilir. Parçalar üretim tablasında katman katman üretilir. Lazer türü olarak ise fiber lazer rezonatör kullanılmaktadır. İlk zamanlarda prototip üretimi için kullanılan bu üretim şekli zamanla üreticiye direkt olarak ürünün teslimatının yapıldığı bir ürün olmasının yanı sıra hızlı ve seri bir üretim tekniği olmayı başarmıştır. Ayrıca SLE ile üretilen numunelerin en büyük özelliği yüksek boyut toleransına sahip olmasıdır. SLE’nin ileri teknoloji sektöründe geniş ve yaygın bir kullanım alanı sahip olduğu söylenebilir. Birçok sektörde kullanılmasına rağmen bunlardan bazıları; tıpta, savunma sanayinde, havacılıkta, enerji ve otomotivde SLE üretim metodundan faydalanılır (Şener, 2023).

Eklemeli imalatla üretilen malzemeler için de tezgâh parametreleri çok önemlidir. Hem üretilen malzemenin mukavemetini artırır hem de maliyetini düşürür. Ayrıca tezgâh parametrelerini de gereksiz yere fazladan kullanmış olmayız. Bu parametrelerden bazıları; tarama hızı, tezgâh lazer gücü, katman kalınlığı ve toz besleme hızıdır.

Makine parametrelerini optimize etmek için küp şeklinde parçaların üretilmesi yaygındır, genellikle bu işlemlerde makine gücü sabitlenerek tarama hızı her bir küpte değiştirilir. Bu sayede, her bir küp farklı olarak farklı enerji yoğunluğu ile üretilmiş olur. Üretimden sonra, doğru enerji yoğunluğu ile makine parametreleri, parça iç yoğunluğu, parça alt-yüzey yoğunluğu ve parçanın pürüzlülüğünün belirlenmesiyle optimum parça üretilir (Anonim, 2022b).

Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme yönteminin parametrelerinden olan tarama hızı ve lazer gücünün Ti6Al4V toz

malzemesinden üretilmiş numunelerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin bulunması, vickers sertlik değerlerinin bulunması, aşınma incelemeleri (sürtünme katsayısı değerinin ve aşınma direnci değerlerinin bulunması) ve SEM görüntüleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çalışmanın kurumsal temeller ve kaynak araştırması bölümünde titanyum, titanyum ile ilgili genel bilgiler, titanyum kullanım alanları, Ti6Al4V (Ti64) alaşımı, eklemeli imalat ile ilgili genel bilgiler, eklemeli imalat avantaj ve dezavantajları, eklemeli imalat kullanım alanları, eklemeli imalat üretimi için işlem aşamaları, eklemeli imalatta ikincil işlemler, eklemeli imalat yöntemleri, eklemeli imalat işlem parametreleri, eklemeli imalata yönelik metal tozları ve eklemeli imalatta metal tozu imalat yöntemlerinden bahsedilmiştir. Seçici lazer ergitme üretim metodu tanıtılmış ve bu yöntemle Ti6Al4V tozu kullanılarak literatürde yapılan üretim çalışmaları ve bunların sonuçlarından bahsedilmiştir.

Materyal ve yöntem kısmında numunelerin üretim detaylarından, deney tasarımından, deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ve özelliklerinden, ölçüm detaylarından bahsedilmiştir.

Çalışmanın bulgular ve tartışma kısmında, numunelerin ölçüm sonuçları sayısal olarak ortaya koyulmuş, grafiklerde belirtilmiş ve belirlenen parametrelerin numunelerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın sonuç kısmında ise çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve çıktılar sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Titanyum

2.1.1. Titanyum ile ilgili genel bilgiler

Titanyum elementi 18. yüzyılın sonlarına doğru keşfedilmiş olup başlarda ticari anlamda kullanılmaya Amerika'da 1950'li yıllarda başlanmıştır (Greitemeier ve diğerleri, 2016). Dünyada demir, magnezyum ve alüminyumdan sonra en çok var olan elementtir. Dünya'daki metallerin neredeyse % 6'sını oluşturur. Ayrıca miktar olarak krom elementinin 20, nikelin 30 ve bakırın 60 katı hacindedir (Zhecheva ve diğerleri, 2005). Doğada saf olarak çok nadir bulunur. Titanyum hidrojen, oksijen ve nitrojen ile kolaylıkla tepkimeye girer ve metalik olarak çok zor bulunur. Titanyum genelde mineraller ile birleşik halde bulunur (Oyar, 2015)

Titanyumun % 98'i Titanyum dioksit yani TiO_2 bileşiği şeklindedir. Rutil cevheri madeni olarak madenlerden çıkartılarak işlenir. İşlemesi oldukça zordur. Nedeni ise cevher ve madenlerin çok geniş alana yayılmasıdır (Weissbach, 1993). Titanyumu elde etmek için argon ve helyum gazı kullanılarak magnezyum erime sıcaklığı kadar ısıtılır. Titan sıvı haldeyken magnezyum ile reaksiyona girer ve titanyum oluşur (Yaman, 2018)

Titanyum, ağırlık olarak hafiftir fakat mekanik özelliklere çok iyidir. Örnekleme gerekirse öz kütlesi çeliğin neredeyse yarısıdır fakat çeliğe göre özgül dayanımı daha yüksektir (Henriques ve diğerleri, 2010). Ayrıca titanyumun yorulma dayanımı da diğer metallere göre oldukça yüksektir (Anselme ve Bigerelle, 2000). Fakat ısı genleşme katsayısı diğer metallere göre daha düşüktür. Bu özelliği sayesinde çalışma koşulları daha yüksek sıcaklıkta olan yerlerde de tercih edilir (Ensarioğlu ve Çakır, 2005). Titanyumun mükemmel korozyon direncine sahip olmasının sebebi reaktif bir malzeme olmasından dolayı oksijen tepkimesi sonucu oksitlenme tabakasını çok hızlı oluşturmasıdır. Titanyuma ait bazı fiziksel özellikler aşağıda Çizelge 2.1.' de gösterilmiştir (Anonim, 2023b).

Çizelge 2.1. Titanyuma ait bazı fiziksel özellikler (Anonim, 2023b)

Yoğunluk	4,506 g·cm ⁻³
Erime Noktası	1668 °C
Kaynama Noktası	3287 °C
Erime	14,15 kJ·mol ⁻¹
Buharlaştırma Isısı	425 kJ·mol ⁻¹
Isıl İletkenlik	(300 K) 21.9 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Elektrik Direnci	(20 °C) 0,420 µΩ·m
Elastisite Modülü	116 GPa
Bulk Modülü	110 GPa

2.1.2. Titanyum kullanım alanları

Titanyum ve alaşımları, havacılık, uzay, otomotiv, biyomedikal, kağıt, boya ve plastik vb. sanayinde çokça kullanılmaktadır. Son yıllarda performans ve yakıt tasarrufu için hafif ve yoğun metal olduğu için otomotiv endüstrisinde kullanımı artmaya başlamıştır (Yaman, 2018). Denizaltı endüstrisinde tuza ve asite karşı dayanımından dolayı kullanılır. Titanyumun nikel ile birleşiminden oluşan nitinol alaşımının hafıza yeteneği bulunmaktadır. Nitinol alaşımı ile üretilmiş parçalar şekli bozularak tekrar ısıtılırsa ilk haline geri dönmektedir. Nitinol alaşımı, tıpta ve uzay sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır (Anonim, 2023c).

Titanyum beyazı ismiyle boya endüstrisinde kullanılmaktadır. Titanyum cevherinin % 91' i pigment endüstrisi için tüketilerek kullanılmaktadır. Bunların dışında titanyum kozmetik endüstrisi, renkli cam, yapay ipek, deri ve kumaş boyanması, beyaz mürekkep, seramik sıırı ve kâğıt endüstrisi gibi birçok alanda da kullanılmaktadır (Anonim, 2023c).

2.1.3. Ti6Al4V (Ti64) alaşımı

Ti6Al4V alaşımı endüstride Ti64 olarak ta anılmaktadır. Farklı birden fazla metal ile oluşturduğu alaşım ile mekanik özellikleri çok geliştirilmiştir. Ti6Al4V alaşımında adlandırılmasından da belli olduğu gibi alüminyum, demir ve vanadyum en önemli metallerdir. Ti6Al4V alaşımının element yüzde değerleri Çizelge 2.2.'de aşağıda verilmiştir (Anonim, 2023d).

Çizelge 2.2. Ti6Al4V alaşımı element yüzde değerleri (Anonim, 2023d)

Element	%
Ti	88,5-90,5
Al	5,5-6,5
V	3,5-4,5
Fe	0,25
O	0,13
C	0,08
N	0,05
H	0,0125

Ti6Al4V alaşımı, en çok kullanılan titanyum alaşımıdır. Bu alaşımın elde edilmesi için titanyum üretiminin yarısı kullanılmaktadır (Fujii, 1998). Buna ek olarak ısıl işlemler uygulanarak mevcut mukavemet değerlerini geliştirilebilir.

Aşağıdaki Çizelge 2.3.'te gösterilen Ti6Al4V, Saf Titanyum ve Ti13Nb13Zr gibi alaşımların karşılaştırılması yapıldığında, tüm testlerin ve mekanik özelliklerin en yüksek değerleri Ti6Al4V alaşımında olduğu tespit edilmiştir (Zhou ve diğerleri, 2019).

Çizelge 2.3. Titanyum alaşımı içeren bazı malzemelerin mekanik özellikleri (Zhou ve diğerleri, 2019)

Alaşım türü	En yüksek çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül (GPa)	Uzama ~(%)	Yorulma Dayanımı (MPa)
Saf Titanyum	990	792	100	6	323
Ti6Al4V	1334	1110	107	6	360
Ti13Nb13Zr	1020	794	67	5	272

2.2. Eklemeli İmalat

2.2.1. Eklemeli imalat ile ilgili genel bilgiler

Eklemeli imalat (Eİ), malzeme azaltılarak parça imalatı yapılan diğer imalat yöntemlerinin tam tersi olarak malzeme eklenmesiyle parça imalatına dayanarak uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. Eİ ilk başlarda sadece prototipleme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Hatta ilk başlarda Eİ sürecine hızlı prototipleme denilmiştir (Kayacan ve Yılmaz, 2019). Eİ örnek parçası Şekil 2.1.'de gösterilmiştir (Anonim, 2023e).



Şekil 2.1. Eİ yöntemi ile üretilmiş bir örnek (Anonim, 2023e)

Ayrıca Eİ geçmişten günümüze birçok isimle tanımlanmış ve anılmaya da devam etmektedir. Bu yöntemi kullananlar Eİ'yi, katmanlı imalat, hızlı prototipleme, 3 boyutlu baskı ve bağımsız form üretimi gibi terimlerle de ifade etmektedir. Eİ prosesi, ASTM F2792-10'a standardında, diğer üretim yöntemlerine göre parçaların tasarımdan başlayarak üretimi için katman katman üst üste gelecek şekilde birleştirilerek üretilmesidir (Anonim, 2023f).

2.2.2. Eklemeli imalat avantaj ve dezavantajları

Eİ'nin diğer geleneksel imalat yöntemlerine göre bazı avantajlar ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları;

- Diğer geleneksel yöntemlere göre takım ihtiyacı daha azdır.
- Malzeme katman katman ekleyerek üretimi yapıldığı için fire daha azdır.
- Yardımcı ekipman olmasa bile sadece Eİ tezgâhıyla nihai ürünler üretilebilir.
- Tasarımı yapılabilen karmaşık ve zorlu geometrilerin üretimini mümkün kılar.
- Diğer yöntemlere göre daha homojen iç yapılı parçalar üretilebilir.

Dezavantajlardan bazıları;

- Yüksek tezgâh maliyetleri bulunmaktadır.
- Üretilen parça boyutu tezgâh boyutlarıyla sınırlıdır.
- Eİ üretim yönteminden kaynaklı üretilen ürünler yüzeyleri pürüzlü olarak üretilmektedir.
- Tezgâh sarf malzemeleri ve bakım maliyetleri diğer imalat yöntemlerine göre daha yüksektir.
- Hammadde tedarikindeki zorluklar, tekeller ve maliyetlerinin yüksek olması.
- Eİ hammaddelerinin ve ürünlerinin standartlarının olmaması sonucu testlerinin bilinmemesi.
- Eİ sektöründe yetişmiş eleman eksikliği olması.
- Her alayım için istenilen özelliklere göre tezgâh parametrelerinin olmaması sonucu parametrelerin geliştirilemeyerek zaman ve maliyeti artırır.

2.2.3. Eklemeli imalat kullanım alanları

Eİ'nin kullanım alanları günden güne genişlemektedir. Eİ gıda, tekstil, uzay, tıp, medikal, havacılık, makine, otomotiv, dental, kuyumculuk, mimari ve kalıp yapımı gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Endüstriden spesifik örneklerle açıklanırsa Eİ kullanım alanların ne kadar geliştiği daha net anlaşılacaktır. Sektörün spor ayakkabı ve spor giyim lideri olan bir firma daha önce gerçekleştirilmemiş olan dijital ışık sentezinden yararlanarak orta taban geometrileri kullanarak 3 boyutlu yazıcı da atletik ayakkabı üreterek seri imalata başlamıştır (Anonim 2023g). Diğer örnekte ise ilaç sektöründen bir marka sakız üretmiştir. Bu sakız normalde çok fazla besin ve vitamin kullanan tüketicilere çok faydalı bir çözüm olmuştur. Bu sakız yüksek oranda besin ve vitamin içermektedir (Anonim, 2022c).

Seçici lazer ergitme (SLE) yöntemli metal eklemeli imalat (MEİ) yönteminde ise iki ana uygulama alanı vardır. Bunlar havacılık-uzay sanayi ve biyomedikal alanlarıdır. SLE yöntemi biyomedikal sanayisinde gözenekli implantların yapımında sıklıkla kullanılmaktadır (Yuan ve Wen, 2019). Eİ havacılık ve uzay sanayinde kullanım sebebi ise katı cisimlerde gözenekli yapıda yakın mukavemete sahip olan malzemelerle değiştirilerek malzemelerde ağırlık azalmasına neden olmaktadır (Bici ve diğerleri, 2018).

2.2.4. Eklemeli imalat üretimi için işlem aşamaları

Eİ üretimi için işlem aşamaları aşağıda belirtilen aşamalardan oluşmaktadır. Bunlar:

- 3D modelleme,
- Dosya türü ve kayıt,
- Dilimleme,
- Dosya transferi,
- 3D baskı,
- Son işlemdir.

3D Modelleme

Öncelikle Eİ üretimi için 3D tasarım modeli yapılmalıdır. Parça, CAD programları veya 3 boyutlu tarama cihazları ile oluşturulabilir. Tasarım esnasında genellikle 45° açı kuralı kullanılarak destekler oluşturulabilir. 45° kuralında bu açıya kadar model yapısal destek ihtiyacı duymaz. 45° den büyük eğimli modellerde destek yapılması gereklidir. Tasarım aşamasında 45° kuralının göz önüne alınması gereklidir. Bu da malzemedan ve zamandan tasarruf sağlamaktadır. 3D tarama sistemleri kullanırken modeli 3D tarama sistemine aktardıktan sonra modeli bütünüyle en ince ayrıntısına kadar incelemek gereklidir. Model hatalıysa gerekirse tekrar çizilmeli veya yüzeyler tanınmıyorsa, 3D tasarım modelini yeniden tasarım yapmadan farklı yazılım ve tasarım programları yardımıyla değiştirmek gerekebilir (Turhan ve Özsoy, 2016).

Dosya Türü ve Kayıt

CAD dosyası hazırlanan model Eİ yapılacak makineye aktarılmalıdır. CAD dosyasının Eİ makinesine iletimi için makinenin desteklediği en yaygın formatlardan biri olan STL formatına dönüştürülmesi gerekmektedir (Turhan ve Özsoy, 2016).

Dilimleme

İstenilen formatta aktarılan ürünün üretimi için parametreler ayarlandıktan sonra model kesim programında katman katman bölünecek ve üretim için G kodları üretilecektir. Ön izleme simülasyonu yapılarak, ürünün üretimi yapılmadan canlandırması yapılabilir. Böylece üretim öncesi hataların önüne geçilebilir (Sürmen, 2019).

Dosya Transferi

G kodları kablolu/kablosuz ağlarla veya bellek vasıtasıyla Eİ makinelerine aktarılabilir (Turhan ve Özsoy, 2016)

3D Baskı

Eİ üretimine başlamadan önce makinenin kalibrasyonları yapılmalıdır. G kodları gönderilen makineye, makine istenilen sıcaklığa ulaştığında makine üretime başlamalıdır. Üretim süresi, makineye ve ürüne göre değişmektedir (Sürmen, 2019).

Son İşlem

İmalatı bitince üretilen parça Eİ tezgâhından alınma işlemine geçilir. Bu tezgâh tablasından parçanın destek sistemleri temizlenir. Tercihe göre ikincil işlemlere geçilir ve böylece parça üretilmiş olur (Turhan ve Özsoy, 2016).

2.2.5. Eklemeli imalatta ikincil işlemler

Tek ve çok aşamalı olarak iki şekilde Eİ prosesi incelenebilir. Üretilmek istenen ürün tek bir süreçte elde ediliyorsa tek aşamalıdır. Eğer ürün elde edilmesinden sonra uygulanan ikincil işlem veya işlemler ile istenilen ürün elde ediliyorsa çok aşamalı Eİ prosesi olarak adlandırılır.

Eİ üretiminden sonra, final ürünü için ikincil işlemler tavsiye edilir ve uygulanır. İkincil işlemler, üretimden sonra parçaların mekanik, yüzey ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için uygulanan işlemlerdir. Yeni geliştirilen Eİ makinelerine ikincil işlemler adapte edilerek hibrit yeni nesil makineler de üretilmeye başlanmıştır. MEİ de tavsiye edilen ikincil işlemler aşağıdaki gibidir (Anonim, 2023e).

- Isıl işlem uygulaması,
- Kumlama,
- Destek temizleme,
- Talaşlı imalat,
- Parlatma,
- Yüzey işlemler vb.'dir.

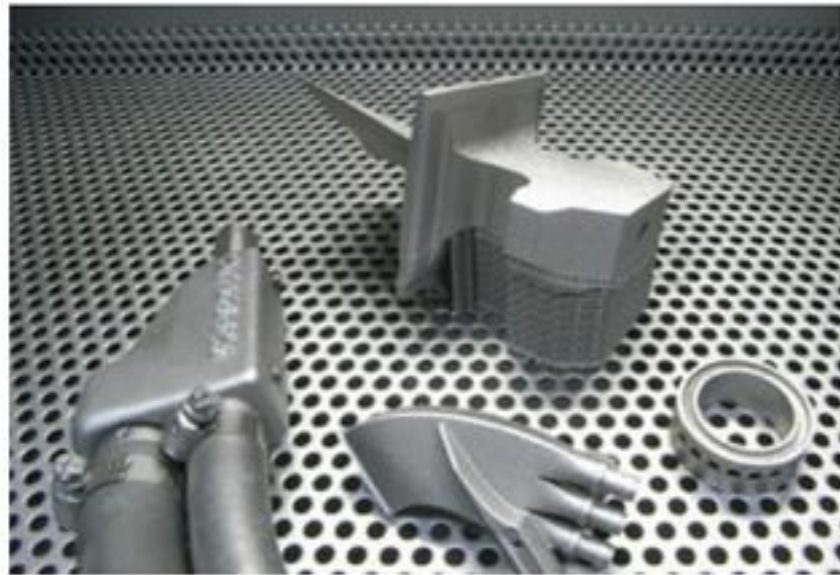
Bu çalışmada Eİ yöntemiyle üretilen parçalara ikincil işlemlerden ısıl işlem ve kumlama uygulandığı için aşağıda açıklanmıştır.

Isıl İşlem

Eİ yöntemiyle üretilen parçalar katman katman üretim yapılarak üretilir. Sertlik değerleri ilk katmandan itibaren düşer ve dış katmanlara doğru gidildikçe artmaktadır. Sebebi ise; ara katmanlardaki soğuma hızı çok daha düşük olduğu içindir. Ara katmanlarda ısı alışverişi sürekli dir. Eİ prosesinde alt ve üst katmanların mikrosertlikleri daha yüksektir (Yu ve diğerleri, 2011). Daha homojen mikrosertlik dağılımı ve yoğunluğunda arttırılması istenir. Bunun içinde Eİ ile üretimden sonra ısıl işlem uygulanabilmektedir.

Kumlama

Eİ yöntemlerinde yüzey dokusu, toz partikül boyut ve türüne, proses parametrelerine, yüzey dokusu ve katman kalınlığına göre değişmektedir. Üretilen parçanın yorulma ömrünü ve yüzey direncini özellikleri belirlemektedir. Yüzey süreksizlikleri ve hataları, kırılma tokluğunu ve yorulma dayanımını azaltmaktadır. Eİ yönteminde hassas yüzey kalitesi isteniyorsa, yüzey kalitesini iyileştirmek için genellikle kumlamaya gerek duyulmaktadır. Fakat iç yüzeylerin ve bazı küçük parçalarda kumlama ile zorluklarla da karşılaşılabilir. Şekil 2.2.'de Eİ ile üretilen parçaya kumlama işlemi ve kumlanmış parçalara ait örnekleri gösterilmektedir (Altuncu, 2020).



Şekil 2.2. Eİ ile üretilen parçalara kumlama uygulaması (Altuncu, 2020)

2.2.6. Eklemeli imalat yöntemleri

ASTM standardına göre Eİ yöntemleri temelde malzeme türüne, işleme kaynağına, malzeme formuna ve yapılan işlem türüne göre dört başlık altında incelenebilir. Eİ yöntemleri, malzeme türü olarak; metal, seramik, polimer, kompozit, işleme kaynağı olarak; lazer, ultraviyole ve elektron ışını, malzeme formu olarak; toz, tel ve reçine, yapılan işlem türü olarak; ergitmeli, sinterlemeli ve kürelemelidir (Yakout ve diğerleri, 2018)

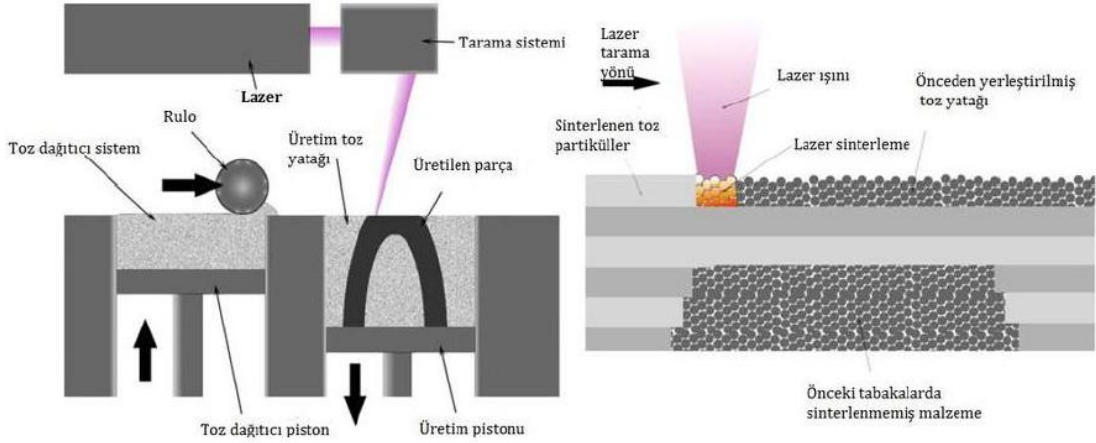
3 boyutlu tasarımı yapılan ürünün üretimi, Eİ tozları bir hazne vasıtasıyla üretim tablasına aktarılır ve istenilen yükseklikteki tek bir katman kalınlığında serilerek, ergitme aracı olarak lazer veya elektron ışın kaynağı kullanılarak toz yataklı sistemlerde tozlar eritilir. Bu işlem, istenilen ürün bitene kadar kat kat devam eder. Ürünün üretimi sırasında lazer ışını kullanan sistemde soygaz ortamında, elektron ışınli yöntemde ise üretim vakum ortamında metal malzemenin oksitlenmesini engellemek için gerçekleştirilir. Bu sistemlerde 20 ile 100 µm çapında metal tozları kullanılır. Metal tozu teknolojisinin gelişmesiyle birlikte toz yataklı Eİ yöntemlerinde malzeme çeşitliği de artmıştır. Bu üretim yöntemlerinde malzeme çeşidi olarak titanyum, nikel, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır, kobalt alaşımları, süper alaşımlar ve takım çelikleri kullanılmaktadır (Kaya, 2021).

Bu çalışmada Eİ yöntemlerinden toz yataklı, lazer ışınıyla ergitme yöntemi ile üretim ve test yapıldığından dolayı aşağıda sadece bu yöntemler açıklanmıştır.

Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminde lazer ışını kullanılır. Metal tozlarına hareketli lazer ışını yansıtılır ve tozlar sinterlenmiş olur. Sinterleme işlemi lazer ışının ısı enerjisinden dolayı olur. Bu yöntemde ürün yaklaşık % 95 yoğunluğa sahiptir (Rahmati, 2014). Metal tozları erime noktalarının hemen altına kadar bu sistemde önceden ısıtılır. Bunun nedeni tozların bağlanmasını-yapıştırılmasını kolaylaştırmak ve bitmiş ürünün bozulmasını azaltmaktır. Bu sistemde katman kalınlığı 0,075 ile 0,50 mm aralığındadır. SLS işlemi oksitlenme ihtimali olan metal tozlarında ürünün bozulmasını azaltmak için

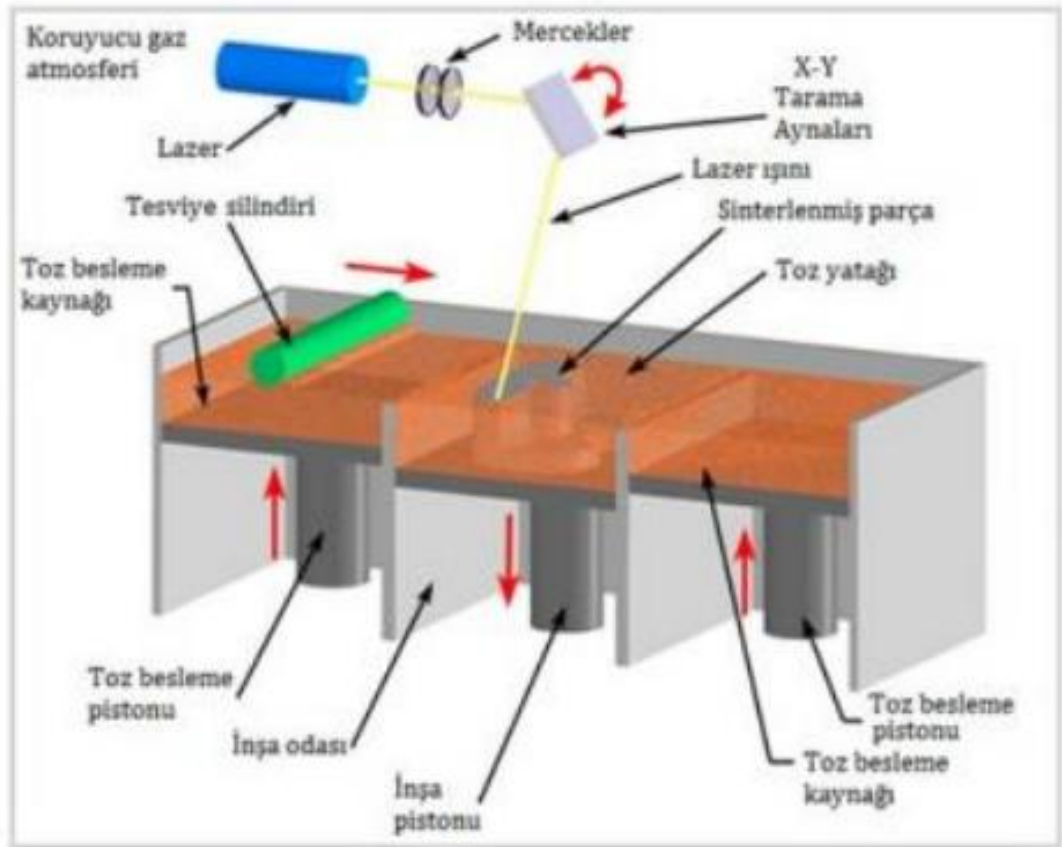
azot ile doldurulmuş bir ortamda gerçekleşir (Groover, 2012). SLS yöntemine ait şematik gösterim aşağıdaki Şekil 2.3.'de gösterilmektedir (Turhan ve Özsoy, 2016).



Şekil 2.3. SLS şematik gösterimi (Turhan ve Özsoy, 2016)

Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)

Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yönteminde tozlar moleküler düzeyde yalnızca sinterlenir ve ergitilmez. Böylece daha az gözenekli parçalar ergitme yöntemine göre üretilir. En önemli avantajı, alaşımlı malzemelerde farklı ergime noktalarına sahip malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlar. Ayrıca plastik ve metal malzemeler dahil birçok malzeme bu yöntemle birleştirilir. Örneğin, alüminyum tozu ve naylon tozu karışımı olan Alumid DMLS yöntemiyle birleştirilir. Ergitme ve sinterleme arasındaki başka bir diğer farkta, metal tozunun ergitilmesi için kullanılan sıcaklıktır. SLE, metal tozunu tamamen ergitene kadar ısıtır. Fakat DMLS yöntemi metal tozunu ergitmez. Böylece daha az enerjiyle üretim yapılmış olur. Sinterleme, toz parçacıklarının birbirine kaynatacak kadar ısıtır. Son parçanın çözünürlüğünü ise toz boyutu ve şekli sınırlar. Daha küçük toz boyutuna sahip malzemeler daha ayrıntılı parçaların üretilmesini sağlar. DMLS teknolojisinde çözünürlük sınırları, katman yüksekliği ve lazer noktasının boyutudur. Bu süreçte diğer Eİ baskı süreçleri gibi ürün birden fazla katmana bölünerek, katman katman üretim gerçekleştirilir. (Anonim, 2022d). DMLS yöntemine ait şema Şekil 2.4.'de yer almaktadır (King ve diğerleri, 2015).

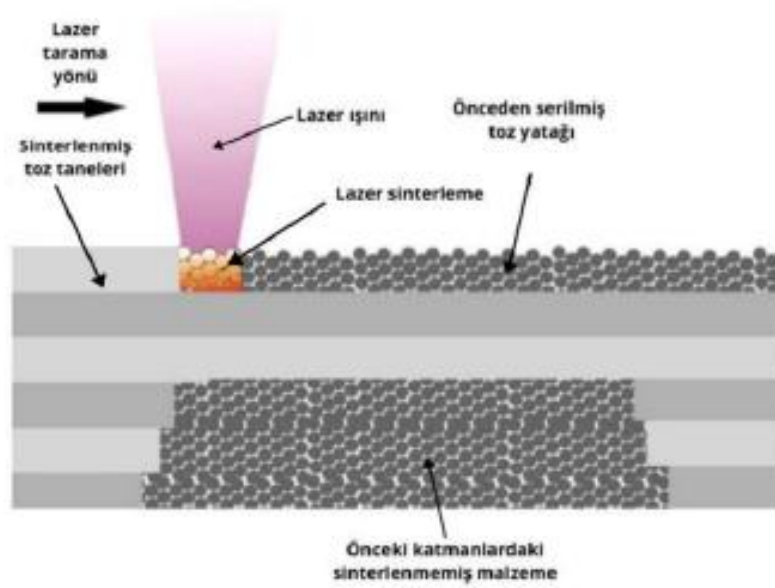


Şekil 2.4. DMLS şematik gösterimi (King ve diğerleri, 2015)

Lazer Mikrosinterleme (LMS)

Bu yöntem EI ve mikro işlemenin avantajlarını bir araya toplayarak yapılan üretim yöntemlerinden biridir. Yüksek yüzey kalitesi ($R_a=1,5 \mu\text{m}$), çözünürlük ($<30 \mu\text{m}$) ve sonuç olarak yüksek hassasiyete sahip mikro metal parçalar bu şekilde üretilebilmektedir. (Anonim, 2022e).

LMS yönteminin görüntüsü aşağıdaki Şekil 2.5.'de verilmiştir (Wroe, 2015).

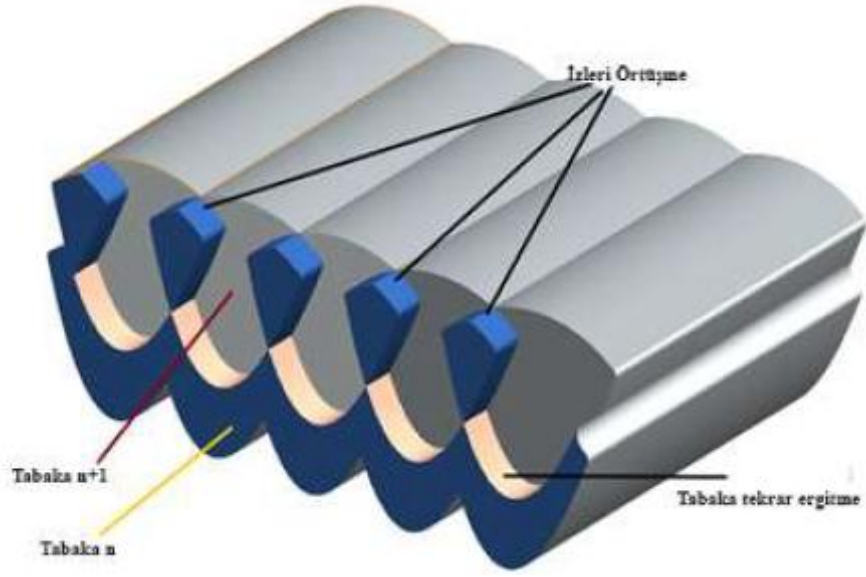


Şekil 2.5. LMS şematik gösterimi (Wroe, 2015)

Seçici Lazer Ergitme (SLE)

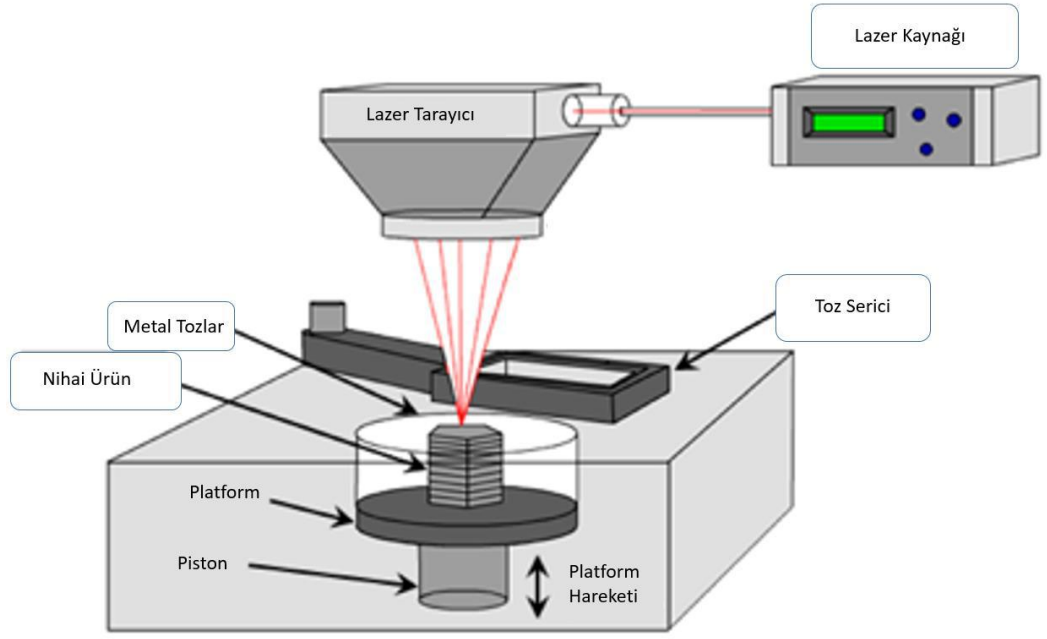
Seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi karmaşık parçaların imalatını sağlayan ve talaşlı imalattaki gibi son işleme gerek kalmadan zaman tasarrufu sağlayan toz yatak esaslı Eİ yöntemlerinden biridir. SLE işlemi sırasında, lazer ışınlarının etkileşimi ile ardışık bulunan toz katmanları seçici olarak ergitilir ve böylece bir ürün üretilir. Toz malzeme lazer ışınlama ile ısıtılır ve yeterli güç uygulandığında toz malzeme eriyerek sıvı bir havuz oluşturulur. Sonrasında havuz hızlı bir şekilde katılarak soğur ve katı halde bir ürün elde edilir. Bir katman oluşumu için enine ileri hareket ettikten sonra yani kesiti tarandıktan sonra, tezgâh platformu katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni katman taranır. Bu işlemler ürün tamamlana kadar tekrarlanarak devam eder. (Anonim, b.t.).

SLE yönteminde taramayla izler ve tabakalar oluşur. Burada yan yana oluşan izlerdeki örtüşme, önceki katmanların kısmen yeniden ergitilmesi ve tabakalar arasında daha yüksek yoğunlaştırma güçlü bir metalik bağlanma eldesi için gereklidir. Bu durum Şekil 2.6.'da gösterilmektedir (Hanzl ve diğerleri, 2015).



Şekil 2.6. SLE yönteminde katman serme şeması (Hanzl ve diğerleri, 2015)

SLE yöntemi, SLS yöntemiyle temelde benzer prensiplere dayanmaktadır. SLE yönteminde düşük ergime noktalı elementlerin eklenmesine gerek kalmadan toz malzemeden üretim yapılabilir. Ayrıca bu yöntemde tozun tamamen birleşebilmesi için yüksek güçte lazer kullanılması gerekmektedir. SLE yönteminin dezavantajlarından birisi de ergitme işlemi esnasında yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan artık gerilmelerdir. Malzemede oluşan bu artık gerilmeler parçanın bozulmasına neden olabilir. Çözüm olarak; malzemeyi önceden ısıtarak ve oda içindeki sıcaklığı sabit ve yüksek seviyede tutarak artık gerilme en aza düşürülebilir. (Bian ve diğerleri, 2017). SLE yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.7’de gösterilmiştir (Khan ve diğerleri, 2014).



Şekil 2.7. SLE yönteminin şematik gösterimi (Khan ve diğerleri, 2014)

2.2.7. Eklemeli imalat işlem parametreleri

Eİ işlem parametreleri, genellikle dört alt bölümde tanımlanmaktadır. Bunlar; lazere, sıcaklığa, taramaya ve toza bağlı parametrelerdir (Aboulkhair ve diğerleri, 2014).

- Lazer parametreleri; etki süresi ve sıklığı, lazer gücü ve odak çapıdır.
- Sıcaklık parametreleri; toz besleme ve yatak sıcaklığı ve sıcaklık dağılımıdır.
- Tarama parametreleri; tarama hızı, aralığı ve modelidir.
- Toz parametreleri; toz boyutu, tozun şekli ve dağılımı, toz yatak yoğunluğu, katman kalınlığı ve malzeme özellikleridir (Ergene, 2020).

Bu çalışmada tarama hızı ve lazer gücü işlem parametreleri incelendiği için bu parametreler aşağıda açıklanmıştır.

Tarama Hızının Etkisi

Taramayla ilgili parametrelerden biridir. Bir katmandaki tozların ergitilen bölümündeki miktarını tarama hızı belirler.

Tarama hızıyla ilgili çalışma yapan Wang ve diğerleri Eİ yöntemlerinden biri olan elektron ışını ile ergitme yöntemiyle Ti6Al4V numunelerin imalatını yapmışlardır. Toz çapları 30-50 µm çapındadır. 70 µm katman kalınlığında numune üretmişlerdir. Dört farklı tarama hızı kullanmışlardır; bunlar 214-376-529-689 mm/s'dir. Üretilen Ti6Al4V numunelerin Young modülü 111,7-119,0 GPa, sertlikleri 5,24-6,52 GPa bulmuşlardır. Tarama hızı arttıkça numunelerin young modülü ve ortalama sertliklerini etkileyerek arttırdığı görülmüştür. Sebep olarak ise tarama hızıyla daha ince mikro yapıların oluşması olduğunu belirtmişlerdir (Wang ve diğerleri, 2015).

Tarama hızına farklı bir sonuç, Kempen ve diğerleri tarafından belirtilmiştir. Çalışmalarında SLE yöntemiyle, tarama hızı 150 mm/s, lazer gücü 100 W, tarama aralığı 112 µm ve katman kalınlığı 30 µm kullanılmıştır. Tarama hızı arttıkça, malzemenin sertliğinin azaldığını belirtmişlerdir (Kempen ve diğerleri, 2011).

Buchbinder ve diğerlerinin tarama hızı, tarama aralığı, lazer gücü ve tarama hızı etkilerini incelemiştir. Tarama hızı artışıyla, malzeme yoğunluğunun azaldığı söylenmiştir. Bu çalışmada sertlik değerlerinin de işlem parametrelerinden etkilenmediği söylenmiştir (Buchbinder ve diğerleri, 2011).

Lazer Gücünün Etkisi

Buchbinder ve diğerleri yapmış olduğu çalışmada, SLE yönteminde toz ergitme ve birleştirmede gerekli olan enerji lazer gücü ile sağlanır. Lazer gücü arttıkça malzemelerin yoğunluğunun arttığını söylemişlerdir (Buchbinder ve diğerleri, 2011).

Casalino ve diğerleri, SLE yönteminde, tarama hızı ve lazer gücünün, sertlik, uzama, yüzey pürüzlülüğü ve maksimum çekme dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. 180-200-220 mm/s tarama hızı ve 57-86-100 W lazer gücü kullanıldığı çalışmada, enerji yoğunluğu arttıkça, parçanın yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Parçanın

yoğunluğunun artması yüzey pürüzlülüğünde ise azalışa, sertlik, maksimum çekme dayanımı ve uzamada artışa sebep olmuştur (Casalino ve diğerleri, 2015).

Eİ de işlem parametrelerinin optimize edilmesi esasına dayanan çalışmalarda genellikle aşağıda denklem kullanılır. 2.1 ile gösterilen denklem enerji yoğunluğu denklemidir. Lazer gücü (P), tarama hızı (V), yana kayma mesafesi (h) ve katman kalınlığı (t)'dir. Bu parametreler ile elde edilen enerji yoğunluğunun (E) parçalar üzerine etkileri incelenmektedir (Liu ve diğerleri, 2010).

$$E = \frac{P}{V.h.t} \quad (2.1)$$

2.2.8. Eklemeli imalata yönelik metal tozları

Metal tozu, Eİ proseslerinde çok önemlidir. Eİ de kullanılacak metal tozunun kalitesinin üretilecek parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olacaktır, ancak aşağıdakileri de etkileyebilir:

- Eİ makineleri arasında yeniden tekrarlanabilirlik,
- Yapımdan yapıma gözlenen tutarlılık,
- Yüzeylerdeki üretim kusurları,
- Hatasız bileşenler üretilmesi,

Metal tozlarının gelişmesiyle Eİ makinelerinde çok çeşitli malzeme ve alaşımları kullanılmaya başlanmıştır. MEİ yöntemlerinde alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, nikel alaşımları, kobalt alaşımları, bakır alaşımları, takım çelikleri, paslanmaz çelikler, altın ve gümüş alaşımları gibi alaşımların tozları hammadde olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 2016).

Eİ yöntemlerinde kullanılacak olan metal tozu hammaddeden beklenen özellikler aşağıda verilmiştir.

Kimyasal Bileşim

Eİ yönteminde kullanılacak olan metal toz hammaddenin bileşimi homojen olmalı ve empürite miktarı minimum olmalıdır. Örnek olarak Ti6Al4V alaşımı bilindiği gibi yüksek mukavemet ve sünekliğe sahiptir. Ti6Al4V parçasında yüksek oksijen içeriği sünekliği düşürmektedir (Dawes ve diğerleri, 2015).

Partikül Boyut Dağılımı

Eİ yöntemlerinde tabaka kalınlığı olarak 20-80 µm arasında imalat kullanıldığı için, tozların 10-100 µm toz çapında olması uygundur. SLS ve SLE sistemlerinde ise genellikle 15-45 µm partikül aralığında toz tercih edilmektedir (Dawes ve diğerleri, 2015).

Partikül Şekli

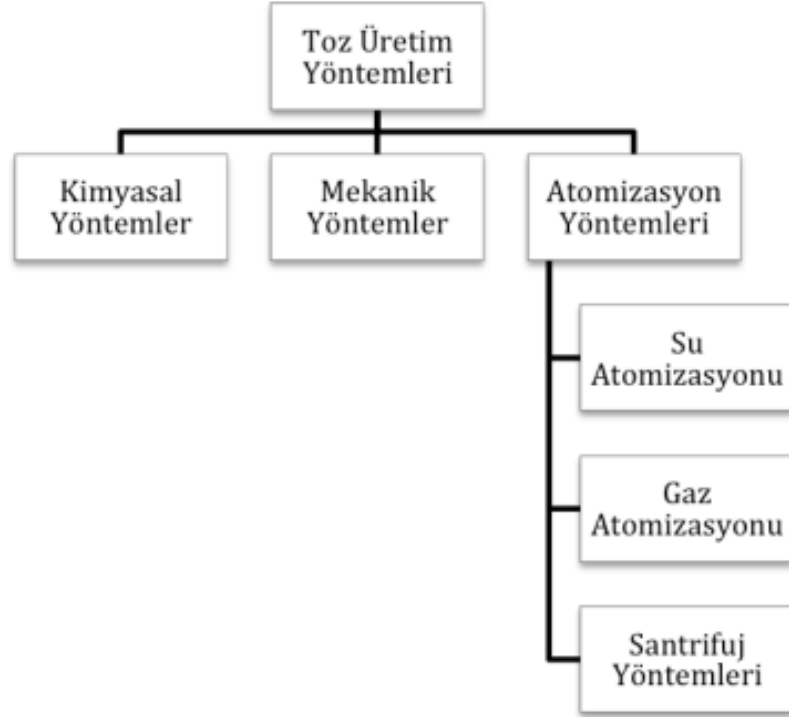
Tozun partikül şekli, tozun paketlenme faktörünü ve tozun akışkanlığını etkilemektedir. Düzensiz şekilli tozların akışkanlığı düşüktür ve makine içerisinde aktarımını zorlaştırır. Buda toz aktarım sistemlerinde tıkanmalara sebep olacaktır. Üretimi yapılacak toz katmanının, düz bir tabaka halinde serilmesi önemlidir. Düzensiz toz partikülleri pürüzsüz bir toz katmanının elde edilmesine engel olur. Düzgün bir katman ile yapılmayan imalat, numunenin boyutsal toleransının düşük olmasına ve yüzey pürüzlülüğünün de yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden olabildiğince küresel şekle sahip düzgün partiküller içeren metal tozları tercih edilmeli ve kullanılmalıdır (Neikov, 2019).

Paketleme ve Akışkanlık

Eİ teknolojilerinde belirli bir akışkanlık değerine sahip metal tozları kullanılır. Toz akışkanlığı ise nem miktarı, tozun küreselliği ve partikül boyut oranına bağlıdır. Akışkanlık 10 µm 'den daha ufak boyuta sahip partiküllerde düşüktür. Parçanın yüzey pürüzlülüğü ve parça yoğunluğunu, tozun paketleme özelliği ve akışkanlığı doğrudan etkiler. Yani Eİ teknolojilerinde tozlardan iyi akışkanlık özelliklerine sahip olmaları büyük ölçüde küresel şekle sahip olması beklenir (Dawes ve diğerleri, 2015).

2.2.9. Eklemeli imalatta metal tozu imalat yöntemleri

Eİ de metal tozu imalat yöntemleri şunlardır; kimyasal yöntemler, mekanik yöntemler, atomizasyon yöntemleridir (Neikov, 2019). Kimyasal yöntemler ve mekanik yöntemlerle toz üretim yöntemlerinde, istenilen boyut ve şekilde tozlar elde edilemediğinden Eİ yöntemlerinde kullanılmamaktadır (Dietrich ve diğerleri, 2016). Metal tozu imalat yöntemleri Şekil 2.8’ de şematik olarak gösterilmiştir (Poovich ve Sufiiarov, 2016).



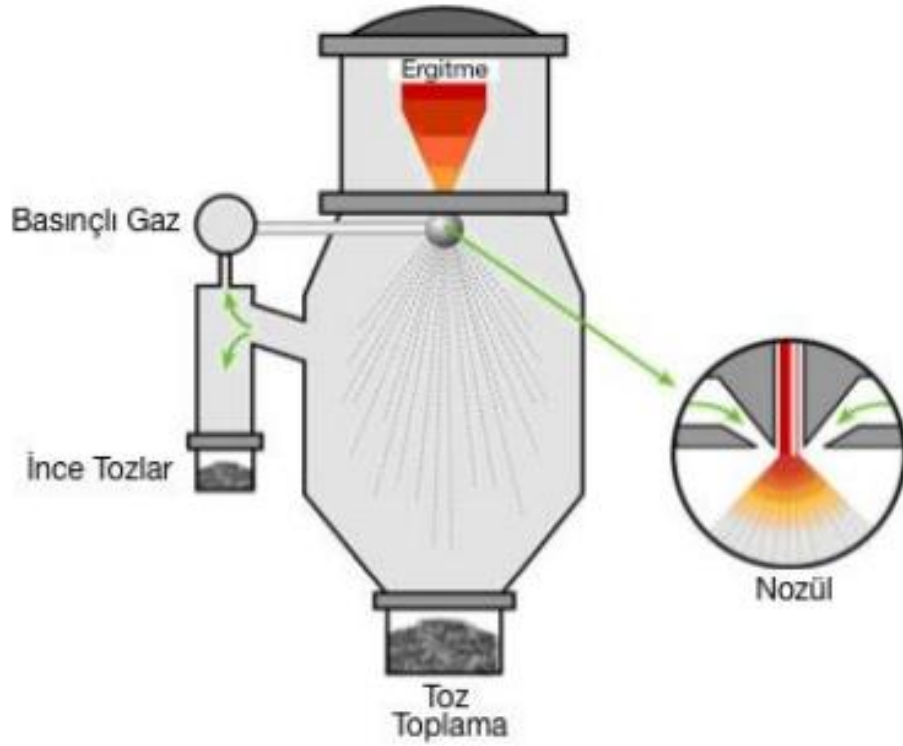
Şekil 2.8. Toz üretim yöntemleri şematik gösterimi (Poovich ve Sufiiarov, 2016)

Bu çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozu, toz üretim yöntemlerinden gaz atomizasyonu ile üretilmiş ve gaz atomizasyon çeşidi olan elektrod indüksiyon gaz atomizasyonu (EIGA) sistemi kullanılmıştır.

Gaz Atomizasyonu

Gaz atomizasyonu; nozul vasıtasıyla ısıtılarak sıvı hale getirilen metalin hava, helyum, azot ve argon gibi gazlarla çok yüksek basınç altında kalarak parçalanması ve sonra katı hale getirilmesiyle oluşan metal tozu üretim yöntemlerinden biridir. Bu sistemde birçok

alaşım tozları üretilmektedir. Al, Au, Ag, Be, Cu, Co, Ni, Ti ve Zn esaslı metal ve alaşımlarının tozları üretilmektedir (Poovich ve Sufiiarov, 2016). Ergitme, atomizasyon, filtrasyon ve toz toplama gaz atomizasyon kısımlarıdır. Şekil 2.9.' da gaz atomizasyon sistemi Şematik gösterilmiştir (Dawes ve diğerleri, 2015).



Şekil 2.9. Gaz atomizasyon sistemi Şematik gösterimi (Dawes ve diğerleri, 2015)

Ergitme bölümünde, eriyen metal, yüksek basıncı gaz nozuluna doğru akarak gelir, gaz nozulunda metal demeti sıvı damlacıklara ayrılır, bu damlacıklar havada katılaşarak toz haline gelir, kaba partikül boyutuna sahip tozlar atomizasyon ünitesinin altında bulunan toz toplama bölümünde toplanırlar. Daha ince partikül boyutuna sahip olan tozlarda basıncı gaz ile srklendiklerinden, siklon filtrelerin altındaki ince partikül toplama ünitesinde birikirler.

Elde edilmiş metal tozu içerisindeki potadan kaynaklı empüritelerin engellenmesi için potanın olmadığı gaz atomizasyon sistemleri veya su soğutmalı bakır potalar geliştirilmiştir. Bu sistemler vakum indüksiyon gaz atomizasyonu (VIGA), plazma

atomizasyonu (PA), plazma ergitme indüksiyon gaz atomizasyonu (PIGA) ve Elektrod indüksiyon gaz atomizasyonu (EIGA)'dır (Poovich ve Sufiiarov, 2016).

Elektrod İndüksiyon Gaz Atomizasyonu (EIGA)

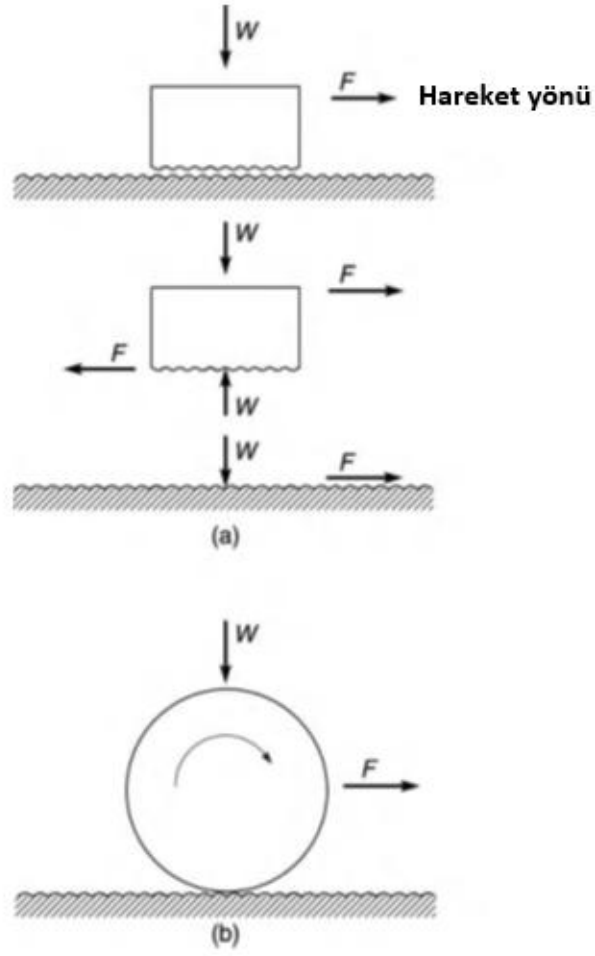
Gaz atomizasyonu esnasında bazı alaşımlarda oksitlenme riski bulunmaktadır. Bu alaşım tozlarında ergitme işlemi vakum altında yapılması gerekmektedir. Atomizasyon bölümünde soygaz kullanılan ve ergitmenin de elektrod indüksiyon aracılığı ile yapıldığı sistemlerde üretilmiştir. Bu sistemlere elektrod indüksiyon gaz atomizasyonu denilmektedir (EIGA). Oksitlenme riski fazla olan Al, Ti, Mg gibi alaşımların tozlarının üretilmesinde genelde bu üretim yöntemi kullanılmaktadır (Dawes, 2015; Poovich ve Sufiiarov, 2016; Neikov, 2019).

2.3. Sürtünme ve Aşınma

Triboloji, yunanca ‘tribos’ kelimesinden türemiştir. Hareket eden iki veya daha fazla yüzeyler arasında oluşan sürtünme, aşınma ve yağlama davranışlarını inceleyen bilim dalıdır (Sağbaş, 2013).

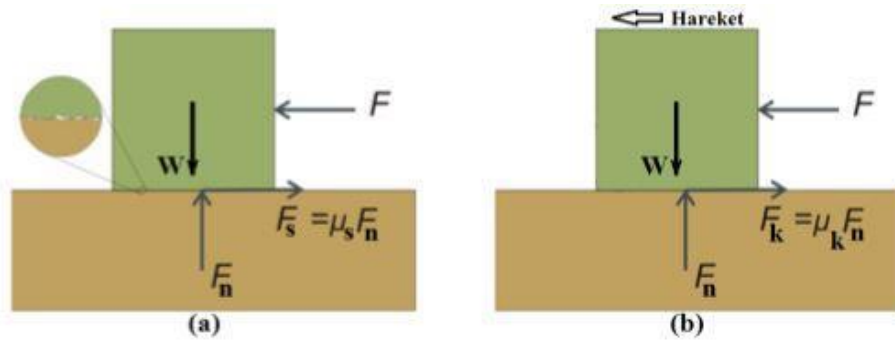
2.3.1. Sürtünme ile ilgili genel bilgiler

Sürtünme, kayma veya yuvarlanma sırasında hareket direncidir. Yüzeyler temas halinde olduğunda bir başkasının üzerinde teğet olarak hareket eder. Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi etki eden hareketin yönünün tam tersi yönde etki eden teğetsel kuvvete denir.



Şekil 2.10. Sürtünme şematik gösterimi (Bhushan, 2013)

(a) Serbest cisim diyagramı ile bir yüzey üzerinde kayan bir cismin şematik gösterimleri
 (b) Yatay bir yüzey üzerinde yuvarlanan bir cisim; W normal yük (kuvvet) ve F sürtünme kuvvetidir.



Şekil 2.11. (a) Statik sürtünme (b) Dinamik sürtünme (Yıldırım, 2022)

Şekil 2.11 a’da yatay düzlemde yer alan bir cisim ve bu cisme uygulanan (F) kuvveti gösterilmektedir. Cismin harekete geçebilmesi için cisme uygulanan kuvvetin (F) büyüklüğünün belli bir değerin üstünde olması gerekir. Uygulanan kuvvetin (F) büyüklüğü belli bir değerin altında olduğu durumda cismin hareketi mümkün değildir. Cismin hareketini önleyen ve uygulanan kuvvetin (F) zıt yönünde etki eden bu kuvvet, statik sürtünme kuvveti (F_s) olarak isimlendirilir.

Cisme uygulanmakta olan F kuvveti arttırıldığında, cismin hareketi başlayana kadar F_s de artar. Cisim hareket etme sınırına geldiğinde ise F_s en yüksek değere ulaşır.

F_s cisme uygulanan normal kuvvet (F_n) ile doğru orantılı olup, cisme uygulanmakta olan F kuvvetine zıt yönlüdür ve aşağıdaki denklem (2.2) ile ifade edilir. Burada yer alan μ_s statik sürtünme katsayısı olarak isimlendirilen birimsiz bir katsayı olup, yüzey özelliklerine bağlı olarak değer alır.

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \quad (2.2)$$

Denkleme göre F_s eşitsizliğin diğer tarafından küçük olduğu durumda cisim hareket etmemektedir. Eşitliğin iki tarafının eşit olduğu durum ise cismin hareket etmeye başladığı ve statik sürtünmenin en yüksek olduğu durumu ifade eder.

Şekil 2.11 b’de de görüldüğü üzere, cisme uygulanan F kuvveti, F_s büyüklüğünü geçtiğinde cisim hareket etmeye başlar. Cismin hareketli olduğu durumda karşılaştığı sürtünme kinetik sürtünme olarak isimlendirilir. Hareketli bir cisme etki etmekte olan kinetik sürtünme kuvveti (F_k), her zaman cismin hareket yönü ile zıt yönlü olup aşağıdaki denklem (2.3) ile ifade edilir.

$$F_k = \mu_k \cdot F_n \quad (2.3)$$

Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısı olarak isimlendirilen birimsiz bir katsayı olup, yüzey özelliklerine bağlı olarak değer alır. Ayrıca μ_k ile μ_s yüzeyin özelliklerine bağlı katsayılar olup $\mu_k < \mu_s$ ’dir.

Cisme F kuvveti uygulanmaya devam edildikçe cisim ivmeli bir şekilde hareketine devam eder. Cisme uygulanan F kuvveti ile F_k eşit olduğunda cisim sabit hızda hareketine devam eder. Cisme uygulanan sabit bir F kuvveti ile hareketin sürdürülebilmesi için sürtünme nedeniyle meydana gelen enerji kaybına eş değer bir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Sürtünme nedeniyle ortaya çıkan enerji ısı kaybı olarak sistemin dışına atılmaktadır. Sistemin çalışmaya devam edebilmesi ısı kaybının önüne geçebilmek için bir soğutma sistemi kullanılması gerekir (Stachowiak ve Batchelor, 1993).

Cisme uygulanan F kuvveti kaldırıldığında cisme etki eden tek kuvvet F_k kalacağından cisim belirli bir süre sonra hareketini sonlandırarak durur.

2.3.2. Aşınma ile ilgili genel bilgiler

Elemanlar birbiriyle temasta iken, yüzeyler arasında sürtünmeye bağlı olarak istenmeyen malzeme kaybına aşınma denir. Cisimlerin yüzeylerinde aşınmayı engellemek amacıyla oksit filmler ve sınır tabaka yağlayıcıları oluşur. Ancak yüklerin etkisiyle oksit filmler parçalanabilmektedir, parçalanmanın olduğu yerlerde aşınma görülür. Ayrıca sınır tabaka yağlayıcısının zayıf olduğu bölgelerde de aşınmalara rastlanır (Yıldırım, 2022).

Aşınmanın ortaya çıkmasındaki faktörler dört bölümde incelenmekte olup; Ana malzeme ile ilgili faktörler şunlardır; malzemenin sertliği, boyutu, cinsi, kristal yapısı, yüzey pürüzlülüğü, ısıl işlem durumu, deformasyon davranışı ve elastisite modülüdür. Karşı malzeme ile ilgili faktörler şunlardır; tanelerin dağılımı, büyüklükleri ve şekilleridir. Ortamın etkisi ile ilgili faktörler şunlardır; nem, atmosfer ve sıcaklıktır. Servis koşulları ile ilgili faktörler şunlardır; basınç, hız, kayma yolu ve cinsi, zamandır (Özbek, 2016).

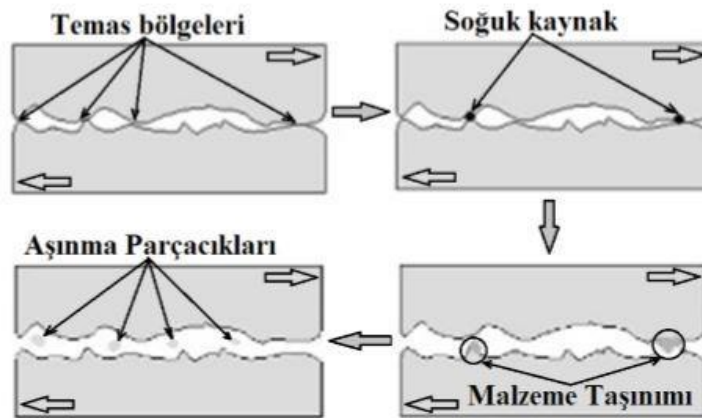
2.3.3. Adhezif aşınma

Bir diğer adı yapışma aşınması olan adhezif aşınma, aşınma türleri arasında en çok karşılaşılan aşınma türüdür.

Yüzeyleri birbirleri ile etkileşimde olan bir metal malzeme yüzeyinin, bir diğer metal malzeme yüzeyindeki bağıl hareketi esnasında, diğer bir ifadeyle kayma sürtünmesi yapmasıyla, birbirine yapışan ya da kaynayan pürüzlü yüzeylerin kırılması ve kırılan bu parçacıkların diğer metal malzeme yüzeyine yapışmasıyla ortaya çıkan aşınma türü adhezif aşınma olarak adlandırılır. Metal malzemelerin aynı sertlikte olduğu durumda aşınma her iki metal yüzeyinde de oluşur. Yüzeylerin birbiri üzerinde kayması sırasında oluşan gerilmeler, küçük yüklemelere maruz kalmış olsalar bile, akma gerilmesi sınır değerine ulaşabilir ve hatta bu sınırı aşabilir. Bu durumda metal yüzeylerin arasında yapışma kuvvetleri oluşur. Bu sebeple bir metal malzemenin yüzeyinden, diğer metal yüzeyine malzeme geçişi, parçacık kopması ve soğuk kaynama durumları meydana gelir. Adhezif aşınma çoğu kez hasarı hızlandırma etkisi göstermez.

Adhezif aşınma; aşınan malzemenin yüzey sertliği, yüzeye etki eden normal yük ve kayma yolu ile orantılıdır.

Adhezif aşınmayı azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir. Bu önlemlerden bazıları metal yüzeyler arasındaki yağlamanın iyi yapılmış olması, yükün azaltılması, malzeme çiftinin katı çözünürlüklerinin düşük olması, sertliğin artırılmasıdır (Varol, 2016).



Şekil 2.12. Adhezif aşınma şematik gösterimi (Varol, 2016)

2.3.4. Abrazif aşınma

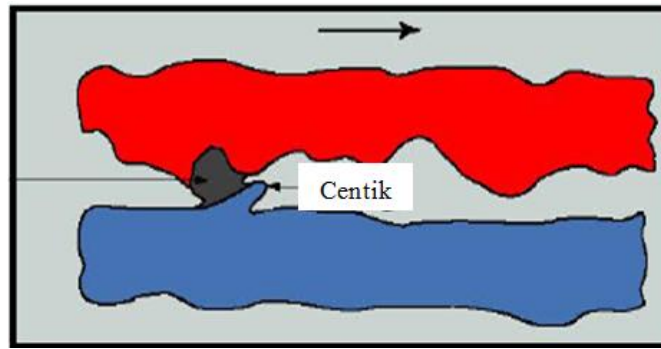
Çizilme veya yırtılma aşınması olarak da adlandırılan abrazif aşınma, keskin ve sert bir parçanın kendisinden daha az sert bir parçadan talaş kaldırması olarak tanımlanır.

Abrazif aşınma, katı yüzeylerde sert yüzey kabarıklıklarının ya da sert partiküllerin hareket etmesiyle meydana gelir.

Birbirleriyle temas halinde olan iki metal yüzeyden birinin diğerine göre daha pürüzlü ve sert olduğu sistemlerde, kayma sırasında oluşan abrazif aşınma önemli bir aşınma türüdür ve sistemde hızlı hasarlara sebep olur.

Motorda yanma ürünleri oluştuğunda, bu oluşan ürünlerin neden olduğu aşınma abrazif aşınmaya örnek olarak verilebilir. Dışarıdan sisteme giriş yapan toz partiküllerinin neden olduğu aşınma da abrazif aşınmaya verilebilecek örneklerdendir. Endüstriyel cihazlarda meydana gelen malzeme kayıplarının başlıca nedeni de abrazif aşınma olarak bilinmektedir.

Abrazif aşınmayı azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir. Bu önlemlerden biri malzeme yüzeyine tesir eden yükün azaltılmasıdır. Yüzeye etki eden yükün azaltılmasıyla, abrazif aşınma hızı düşürülmüş olur. Hızın düşürülmesiyle, parçacıkların yüzeye batması ve çapak kaldırmanın neden olduğu izlerin azaltılması sağlanır (Kurgan, 2023).



Şekil 2.13. Abrazif aşınma şematik gösterimi (Kurgan, 2023)

Şekil 2.13.'de yüzeyde boyuna çizgiler abrazif aşınmaya işaret eder.

2.3.5. Yorulma aşınması

İki yüzey arasında tekrarlı yükler sonucunda yüzeyde ve yüzey altında çatlakların oluşması ile meydana gelen aşınma yorulma aşınması olarak adlandırılır.

Çevrimsel temasın olduğu mekanizmalarda, dişli çark, rulmanlı yatak ve kam gibi parçalar birbirleriyle sürekli temas halindedir. Parçaların birbirleriyle temas ettiği alanlar küçük olduğundan, HERTZ basınçları oluşmaktadır. HERTZ basınçları yüzeyin altında kayma gerilmelerine neden olur, bu gerilmeler değişen büyüklüklerde oluşur ve parçada yorulmaya neden olur.

Tekrarlı ve değişken yüklemelerin sonucunda oluşan kayma gerilmelerinin maksimum olduğu yerlerde plastik deformasyon ve dislokasyona bağlı olarak çok küçük boşluklar ve mikro çatlaklar oluşur. Meydana gelen bu boşluklar ve çatlaklar zamanla büyürler ve yüzeye doğru ilerleyerek yüzeyde küçük çukurlara ve pul şeklinde parçacık kopmalarına neden olurlar. Bu olaya yorulma aşınması adı verilir (Anonim, 2023h)



Şekil 2.14. Yorulma aşınması şematik gösterimi (Anonim, 2023h)

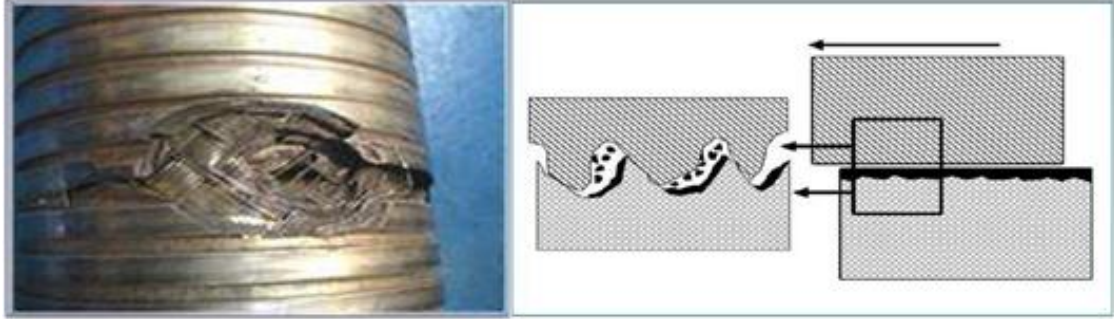
2.3.6. Korozif aşınması

Çalışma ortamında, temas yüzeylerinden en az birinin ortamla reaksiyon vererek korozyona uğraması sonucu korozyon tabakasının oluşması ve oluşan bu tabakanın bağıl hareketi diğer bir ifadeyle kayma aşınmasına maruz kalması nedeniyle yok olması ve bu olayın tekrarlanması sonucu ortaya çıkan aşınma, korozif veya kimyasal aşınma olarak isimlendirilir. Havada en baskın korozif oksijen olduğundan, havadaki kimyasal aşınma genellikle oksidatif aşınma olarak adlandırılır. Metallerin çevre ile girdiği reaksiyonlar sonucunda metalik özelliklerini kaybetmeleri korozyon olarak adlandırılır (Kurgan, 2023).

Metaller ve alaşımlar daha kararlı bir yapıya geçebilmek bileşik haline dönme eğilimindedirler. İçinde buldukları korozif ortamda bileşik haline gelebilmek için dışarıdan verilecek bir enerjiye ihtiyaç duymadan çeşitli reaksiyonlara katılırlar. Bu kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu metallerin ve alaşımların kimyasal yapılarında değişimler olur ve oluşan bu reaksiyon ürünlerinin ana metal/alaşımla bağlantıları zayıftır ve ana metal/alaşımdan kopması kolaylaşır.

Kaymanın olduğu durumda, oksitler gibi korozyonun kimyasal ürünleri korozyonu yavaşlatan yüzeyde film tabakası oluşturur. Ancak kayma hareketi bu filmi kaldırır. Filmin kalkmasıyla korozyon devam eder. Kimyasal aşınma bu nedenden dolayı hem mekanik aşınmanın hem de korozyonun birleşimidir (Anonim, 2023h).

Korozyon hızını azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir. Korozyonu arttıran parametrelerin başında yüksek sıcaklık, yüksek nem, oksijen ve yüksek korozif madde miktarı gelmektedir. Genel olarak metal yüzeyin yukarıda sayılan parametreler ile etkileşiminin azaltılması korozyonu azaltmada etkili olmaktadır (Varol, 2016).



Şekil 2.15. Korozif aşınması şematik gösterimi (Varol, 2016)

Şekil 2.15.'de temas halindeki yüzeylerin ortamla reaksiyona girdiği ve reaksiyon ürünlerinin yüzeyde bir tabaka oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca temas noktasında çatlak oluştuğu ve reaksiyon tabakasının abrazif etkilerden dolayı hasara uğradığı görülmektedir.

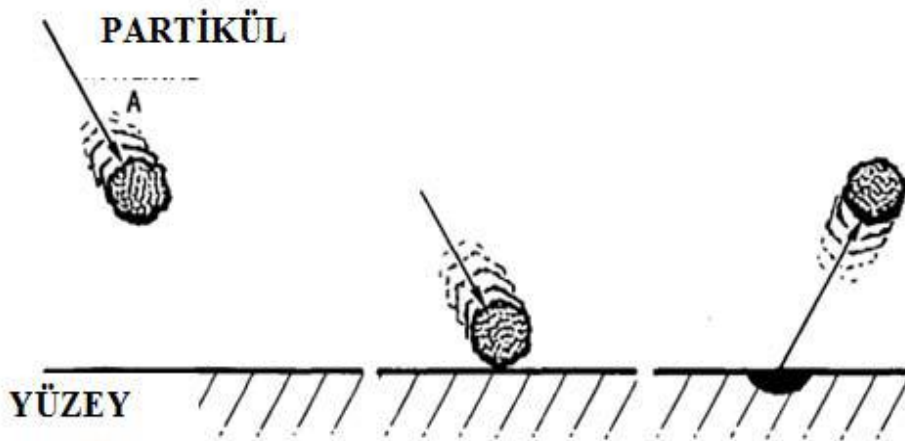
2.3.7. Erozyon aşınması

Bir sıvı veya gaz ortamında taşınan sert parçacıkların malzeme yüzeyine çarpması, yüzeyden yüksek hızlarda kayması ve yuvarlanmasıyla, yüzeyde deformasyon oluşturarak kırılmalara ve parça kopmalarıyla meydana gelen aşınma, erozyon aşınması olarak isimlendirilir. Katı parçacık çarpması, katı parçacıkların bir yüzey üzerine sürekli çarpması sonucunda oluşan bir erozyon şeklidir.

Akışkan hareketi sırasında herhangi bir kısımdaki basınç, buharlaşma basıncından daha düşük bir değere geldiğinde oluşan kabarcıkların, daha yüksek basınçlı kısma geldiğinde patlamasıyla, akışkan boşalan alanlara hareket etmeye başlar. Oluşan bu etki, yüzey üzerinde basınç darbeleri oluşturduğundan, malzemede aşınmaya sebep olur, bu aşınma kaviteasyon erozyonu olarak isimlendirilir.

Kabarcıkların patlamasıyla oluşan şok dalgaları, malzeme yüzeyine yakın kabarcıkları da etkileyerek, bu kabarcıklarında patlamasına sebep olarak yüzeyin aşınmasına sebep olmaktadır.

Erozyon, güçlü jet akışı ve şok dalgalarının birlikte bulunduğu, kabarcıkların patlaması sonucu malzeme yüzeyinde aşınma yaratan durum erozyon olarak nitelendirilmektedir (Usta, 2019)



Şekil 2.16. Erozyon aşınması şematik gösterimi (Varol, 2016)

Aşınma miktarı ölçümleri

Aşınma miktarı ölçümleri aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

- Numunelerin ağırlık kayıpları ile,
- Aşınma ürünlerinin ağırlıklarının ölçülmesi ile,
- Numunelerin boyutsal farkının ölçülmesi ile yapılır.

Bu tezde ağırlık kaybı yöntemiyle aşınma miktarı ölçümü yapılmıştır. Ağırlık kaybı yönteminde aşağıdaki denklem kullanılır. 2.4 ile gösterilen denklem aşınma miktarı denklemidir. Denklemde; Ağırlık kaybı (Δm), yükleme ağırlığı (M), aşınma yolu (s) ve yoğunluk (ρ) dur (Kurgan, 2023).

$$W_a = \frac{\Delta m}{M \cdot s \cdot \rho} \quad (2.4)$$

Aşınma direnci, aşınma miktarının tersidir. W_r ile gösterilir.

$$W_r = \frac{1}{W_a} = \frac{M \cdot s \cdot \rho}{\Delta m} \quad (2.5)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Eİ yöntemlerinden SLE yöntemiyle etkin parametreler olan tarama hızı ve lazer gücü parametrelerinin Ti6Al4V alaşımlı ürünün mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çalışma esnasında 2 farklı deney seti oluşturulmuştur. Her deney setinde ise 3 farklı parametre kullanılarak malzemeler üretilmiştir. Birinci deney setinde 3 farklı tarama hızı, ikinci deney setinde ise 3 farklı lazer gücü kullanılmış ve bir parametre değişirken diğeri sabit olacak şekilde numuneler üretilmiştir. Ayrıca malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla ısıtılma işlem ve kumlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda çıktı parametreleri olarak yüzey pürüzlülük ölçümleri (Ra), mikrosertlik testleri (Vickers), aşınma testleri (COF tayini ve aşınma direncinin bulunması) ve mikroyapı analizi (SEM) gerçekleştirilmiştir. Çalışma esnasında kullanılan malzeme, yöntem ve cihazlar aşağıda verilmiştir.

3.1. Deney Tasarımı

Eİ üretim parametre değerleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Birinci deney setinde lazer gücü 230 W olarak sabit tutularak 3 farklı tarama hızı kullanılmıştır. Bu tarama hızları 800 - 1000 - 1200 mm/s'dir. İkinci deney setinde tarama hızı 1000 mm/s'de sabit tutularak 3 farklı lazer gücü kullanılmıştır. Bu lazer güçleri 190 – 220 - 250 W' dir.

Bu çalışmada 2 farklı deney seti ve toplamda 6 farklı üretim uygulaması yapılmıştır. Her deney seti kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. İlk deney setinde tarama hızlarındaki değişimlerin malzemenin mekanik ve tribolojik üzerinde etkisi, ikinci deney setinde lazer gücü değişimlerin malzemenin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerinde etkisi olmuştur. A-B-C numaralı üretim uygulamaları 1.deney seti, D-E-F numaralı üretim uygulamaları 2. deney setini oluşturmaktadır.

Çizelge 3.1. Eİ üretim parametre değerleri

Numune Adı	V (mm/s) Hız	P (W) Güç	t (mm) Katman Kalınlığı	h (mm) Tarama Aralığı	Ø (mm) Spot Çapı	Deney Seti
A	800	230	0,03	0,1	0,085	1
B	1000	230				
C	1200	230				
D	1000	190				2
E	1000	220				
F	1000	250				

3.2. Numunelerin Üretimi

Yapılan bu tez çalışmasında SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının ölçüleri 10x10x30 mm'dir. Ermaksan Makine Sanayi ve Ticaret AŞ firmasında bulunan ve kendi ürettiği Enavision 250 modeli makinesi üretim tezgâhı olarak kullanılmıştır. Bu makine ile Eİ işlem parametrelerinden tarama hızı ve lazer gücü işlem parametreleri değiştirilerek numunelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir.

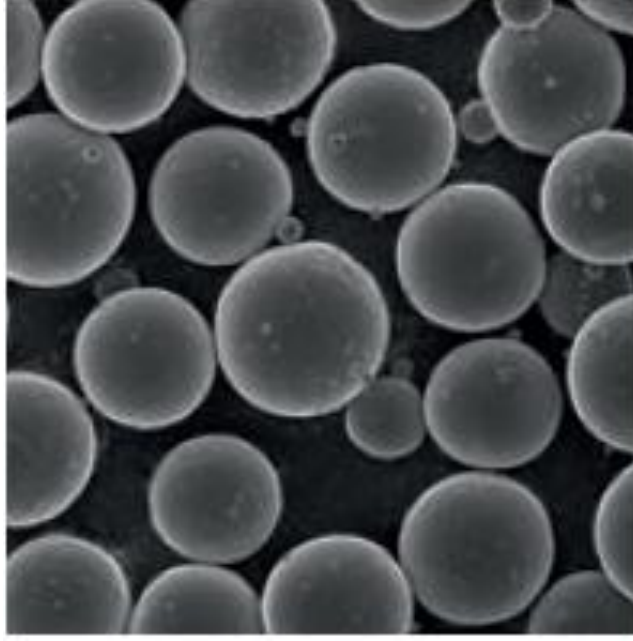
Bu çalışmada Eİ makinelerinde sıklıkla kullanılmasından dolayı titanyum alaşım (Ti6Al4V) tozu kullanılmıştır. Bu toz çalışmayı yürüttüğüm Ermaksan'ın yine kendi üretimi olan atomizer kule çeşidi olan EIGA sistemlerinde üretilmiştir.

Titanyum alaşım tozunun kimyasal bileşimi aşağıdaki Çizelge 3.2.'de verilmiştir (Anonim, 2023d).

Çizelge 3.2. Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi (Anonim, 2023d)

Element	Ti	Al	V	Fe	C	O	N	H
% bileşim	Geriye kalan	5,5-6,5	3,5-4,5	0-0,25	0-0,08	0-0,13	0-0,05	0-0,012

Ti6Al4V alaşım tozunun çalışmayı yürüttüğüm firmanın Opto-elektronik departmanı tarafından daha önce alınmış SEM görüntüsü Şekil 3.1.'de verilmiştir (Anonim, 2023f).



Şekil 3.1. Ti6Al4V tozuna ait SEM görüntüsü (Anonim, 2023f)

Aşağıda Çizelge 3.3.'de çalışmadaki Ti6Al4V tozunun Ermaksan firmasında yapılan toz partikül boyut dağılım analizi gösterilmiştir. Tozun partikül boyut dağılımı analizi incelenirse $D_v(50)$ değeri 34,6 μm olarak bulunmuştur.

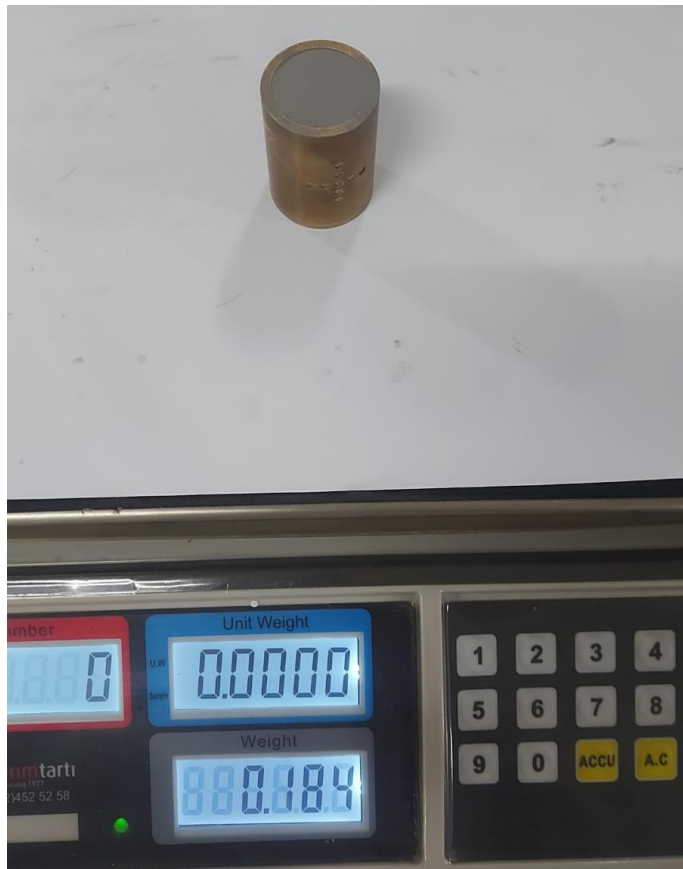
Çizelge 3.3. Toz analizi

Özellik	Sonuç	Birim
$D_v(10)$	22,4	μm
$D_v(50)$	34,6	μm
$D_v(90)$	53,6	μm

Ti6Al4V, en çok kullanılan titanyum alaşımlarından biridir. Yaptığım çalışmada uygulama yaptığım firma olan Ermaksan Grade 5 ve 23 olarak tozları da üretmektedir. Ti6Al4V tozu küresel şekilde olursa yoğunluğu yüksektir, oksijen içeriği düşüktür ve de tane boyutu daha kontrollüdür.

Titanyum alaşımı tozunun bazı diğer özellikleri de aşağıdaki gibidir. Bunlar; görünür yoğunluğu, sıkıştırılmış yoğunluğu ve akış hızı gibidir.

Görünür yoğunluk, toz kütesinin, tozun kapladığı hacme (serbest düşme sonrası) bölünmesi ile bulunur (Ünal, 2022). Bu çalışmada kullanılacak titanyum alaşım tozun görünür yoğunluğu $3,16 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Bu değer dış cismin ağırlığından toz ağırlığı çıkartılarak dış cismin i hacmine bölünerek bulunmuştur. Yani $184-105=79 \text{ g}$ $79/25=3,16 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Görünür yoğunluk ölçümü Şekil 3.2.'de aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Görünür yoğunluk ölçüm görüntüsü

Sıkıştırılmış yoğunluk, metal tozun, kapalı bir kalıpta tek yönlü olarak yoğunluk kazandırılabilme kapasitesidir (Ünal, 2022). Bu çalışmada kullanılacak titanyum alaşım tozunun sıkıştırılmış yoğunluğu $3,03 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç dakikada 250 ile 300 vuruş arasında sıkıştırma frekansı ve 3 mm 'lik düşme yüksekliği sağlayabilen

bir cihaz yardımıyla bulunmuştur. Bu sonuç $100/33=3,03 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Sıkıştırılmış yoğunluk ölçümü Şekil 3.3.'de aşağıda gösterilmiştir.



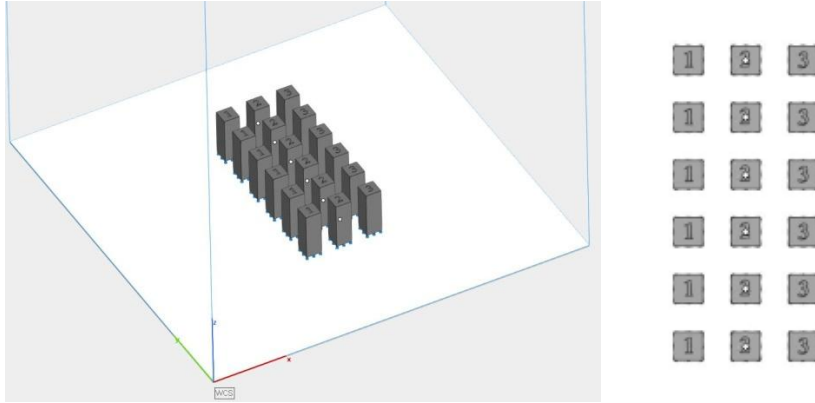
Şekil 3.3. Sıkıştırılmış yoğunluk ölçüm görüntüsü

Toz akış hızı, tozların akma yeteneklerini bulma yöntemidir. Sabit ağırlıkta (50g) alınan tozların yer çekimi etkisiyle bir Hall hunisi içerisinde geçme süresinin hesaplanma yöntemidir (Ünal, 2022). Bu çalışmada kullanılacak titanyum alaşım tozunun akış hızı 30s olarak bulunmuştur. Toz akış hızı ölçümü Şekil 3.4.'de aşağıda gösterilmiştir.



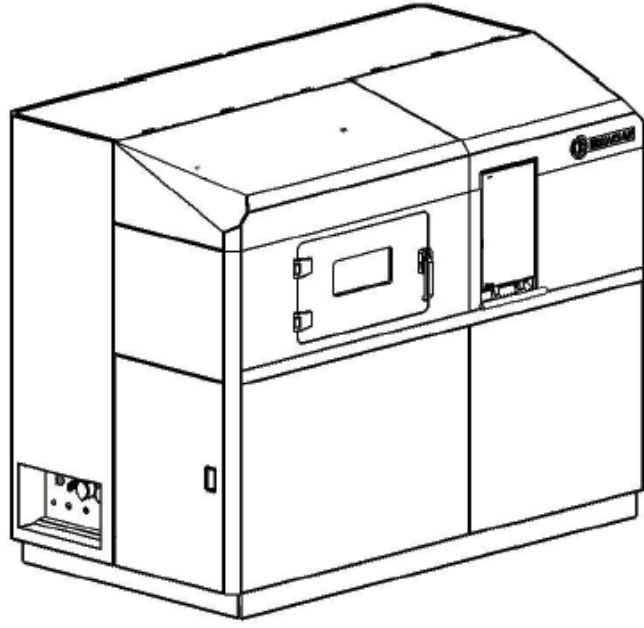
Şekil 3.4. Toz akış hızı ölçüm görüntüsü

Deney numunelerinin üretimi Ermaksan Makine firmasının ENAVISION 250 Eİ makinesinde gerçekleştirilmiştir. Eİ makinesi üretim kapasitesi 250x250x300mm şeklindedir. Test numuneleri STL formatında Materialise Magics (CAM) yazılımında oluşturulmuştur. Bunlara ait görüntüler Şekil 3.5.'te aşağıda gösterilmiştir.

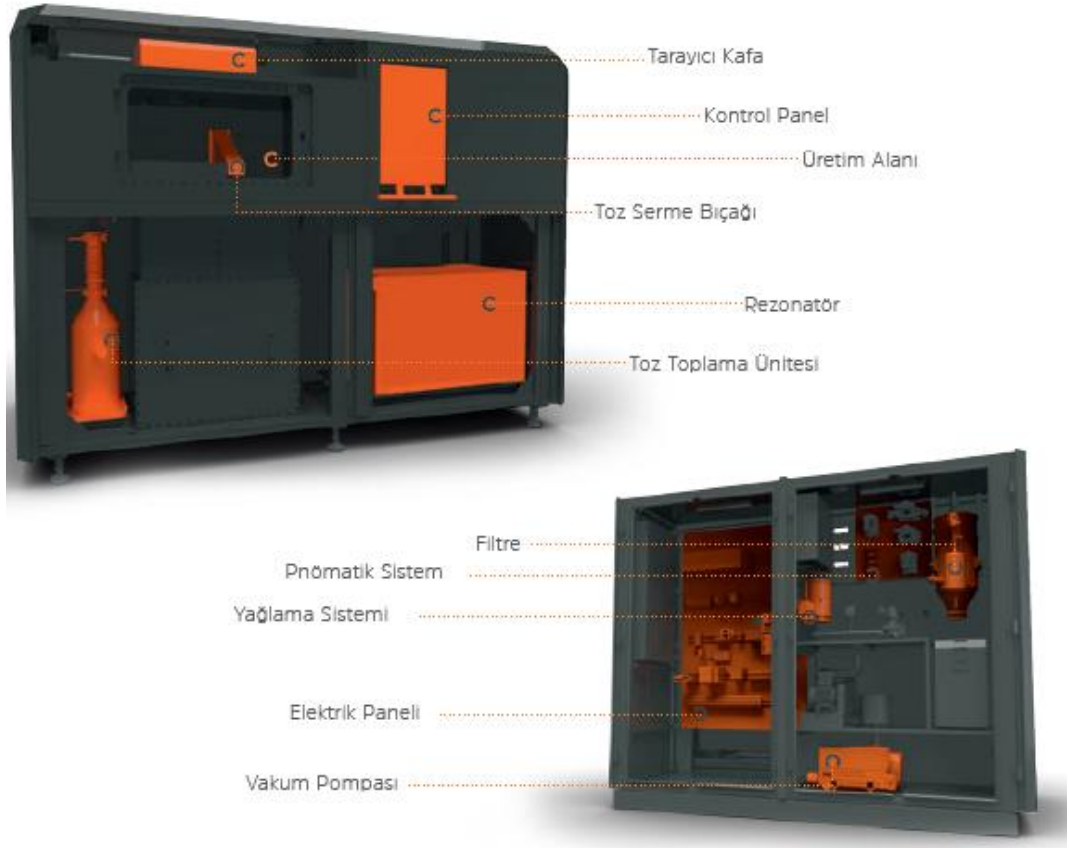


Şekil 3.5. Test numunelerinin CAM yazılımında oluşturulan görüntüleri

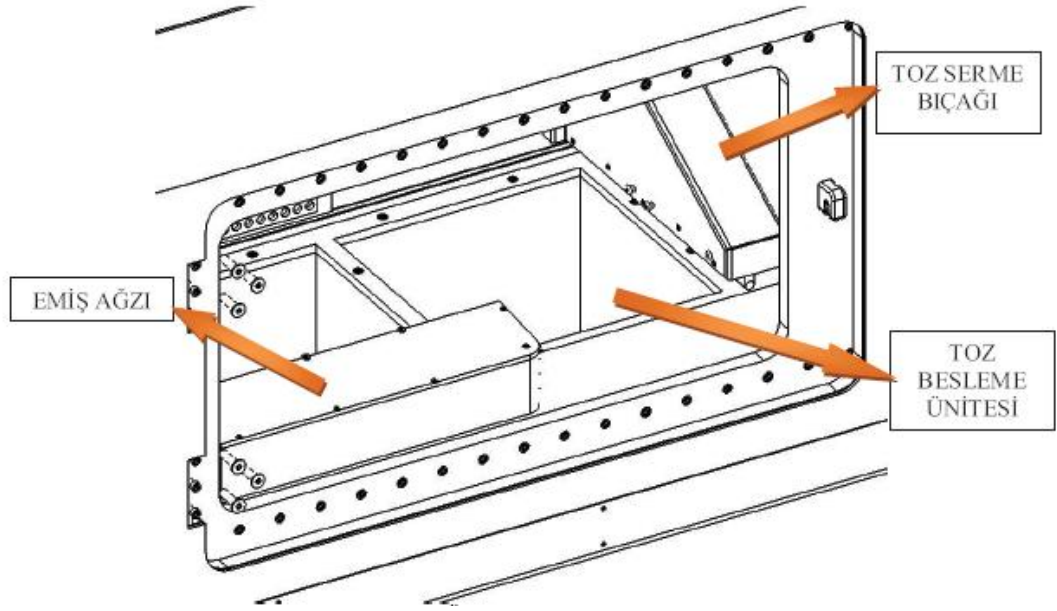
Bu SLE yöntemi için kullanılan makine Ermaksan marka ENAVISION 250 modeli makinedir. Bu makinenin görüntüleri aşağıdaki Şekil 3.6.-3.7.-3.8.-3.9.'da ve makinenin teknik detayları da Çizelge 3.4.'de aşağıda verilmiştir.



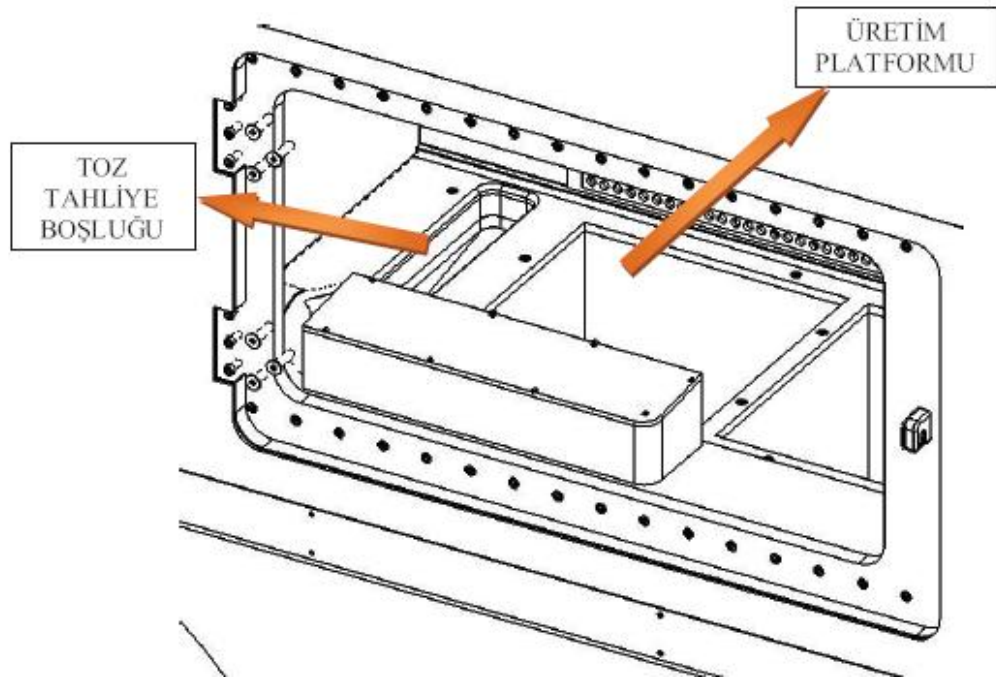
Şekil 3.6. Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi görüntüsü (Anonim, 2023a)



Şekil 3.7. Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi bileşenleri (Anonim, 2023a)



Şekil 3.8. Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi üretim kabini-1 (Anonim, 2023a)

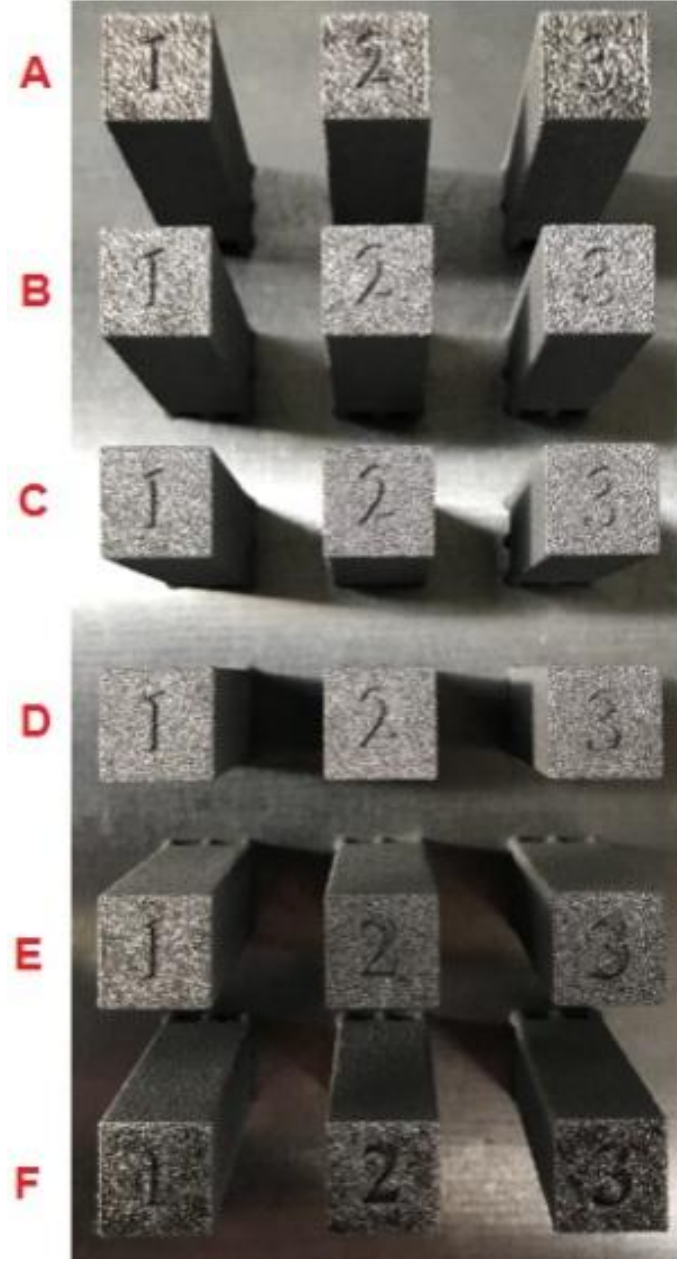


Şekil 3.9. Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi üretim kabini-2 (Anonim, 2023a)

Çizelge 3.4. Eİ için kullanılan ENAVISION 250 makinesi teknik özellikleri (Anonim, 2023a)

GENEL ÖZELLİKLER	ENAVISION 250
Üretim hacmi (mm ³)	250x250x300
Ayarlanabilir katman yüksekliği	20-100 µm
Lazer tipi ve gücü	Fiber 500W
Tarama hızı	0-11 m/s e kadar
Makine ölçüleri (mm)	2700x1440x2030
Elektrik voltajı	400 V, 3Phz, 50/60 Hz
Yardımcı/proses tipi	Argon/Azot
Yardımcı gaz tüketimi	<3,5 l/dk
Üretim Platformu Isıtma	200 °C 'e kadar
Yazılım	Materillise Magics
Üretim Yazılımı	Ermaksan Build Processor
Desteklenen Dosya Tipleri	STL, 3MF, AMF, DAE, FBX, VRML...

Bu Eİ makinesinde toz serme sistemi bir katman metal tozunu üretim tablasının üzerine serer ve bu katman üretilecek parçaya göre lazer ile ergitilir. Bir sonraki aşama da üretim tablası istenilen katman yüksekliğinde aşağı hareket eder ve sonraki katman kadar metal tozu ergitilerek katman oluşturulur. Toz serme ve ihtiyaç duyulan bölgede ergitme prosesi tekrar edilerek üretim platformunda katman katman parça üretilir. Bu çalışma için üretilen numunelerin üretim tablasındaki üretim sonrası görüntüsü de Şekil 3.10.'da aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.10. El ile üretilen Ti6Al4V numuneleri

1 nolu baskılı numunelerin alt tarafına denk gelen uzun yüzeyler ısıtılmış ve kumlanmış yüzeylerdir. 1 nolu baskılı numunelerin üst tarafına denk gelen uzun yüzeyler ısıtılmış yüzeylerdir. 2 nolu baskılı numunenin alt tarafına denk gelen uzun yüzeyler ısıtılmış yüzeylerdir. 3 nolu baskılı numuneler yedek olarak üretilmiştir.

3.3. Üretilen Numunelere Uygulanan İkincil İşlemler

Bu çalışmada bazı numunelere ikincil işlemlerden ısıtma işlemi ve kumlama işlemleri uygulanmıştır.

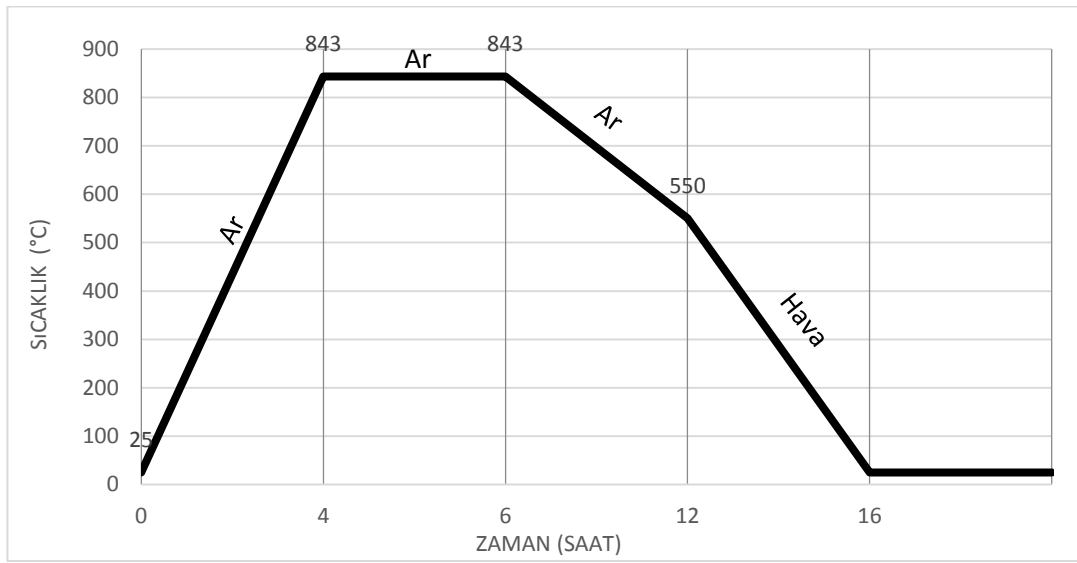
3.3.1. Isıl işlem uygulaması

Eİ yönteminde ısıtma işlemi uygulaması numunelerin iç gerilmelerinin azaltılması ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Bu çalışmada 6 farklı parametre ile üretilen A-B-C-D-E-F parametrelerinin 1 nolu baskılı numunelere ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan ısıtma işlemi cihazı Ermaksan Makine firması ENA departmanında bulunan Protherm marka PLF 130/80 modeli cihazdır. Isıtma işlemi cihazı Şekil 3.11.'de aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Isıtma işlemi uygulama cihazı

Eİ yöntemi ile üretilen 1 nolu baskılı numunelerin hepsine ısıl işlem fırınında sıcaklığı 4 saat boyunca 843 °C çıkartılarak, sıcaklığı 2 saat 843 °C’de sabit tutarak gerilim gidermek için ısıl işlem uygulanmıştır. 2 saat süresince sabit sıcaklıkta kalan numuneler 6 saatte 550 °C inene kadar fırın içerisinde fırın kapağı kapalı iken soğutulmuştur. Şu ana kadarki tüm işlemler Argon gazı ortamında gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında 550 °C inen ortam Argon gazı kapatılarak fırının kapağı açılmıştır ve hava ortamında numuneler soğumaya bırakılmıştır. Burada numunelerin mikrosertliğinin ve tanelerinin yapısı homojen olması sağlanmıştır. Isıl işlem uygulaması Şekil 3.12.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Numunelere uygulanan ısıl işlem proses grafiği

3.3.2. Kumlama uygulaması

Eİ yönteminde kumlama uygulaması numunelere mukavemet kazandırmak amacıyla uygulanmıştır. Ayrıca kumlama malzemenin kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı azaltmak için de uygulanmıştır. Bu çalışmada 6 farklı parametre ile üretilen A-B-C-D-E-F parametrelerinin 1 nolu baskılı numunelere ısıl işlem uygulandıktan sonra yine 1 nolu baskılı numunelere alt tarafına denk gelen uzun yüzeyler kumlanmış yüzeylerdir. Bu çalışmada kullanılan kumlama cihazı Ermaksan Makine firması ENA departmanında bulunan SK 1000 kumlama makinesi ile uygulanmıştır. Kumlama makinesi Şekil 3.13.’de aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kumlama uygulama cihazı

Kumlama makinesinin özellikleri ise 6 bar'da 1,2 m³/dk püskürtebilir. 800x800x1000 mm makinenin iç ölçüleridir. Jet pulse filtre temizleme sistemine sahiptir.

3.4. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları

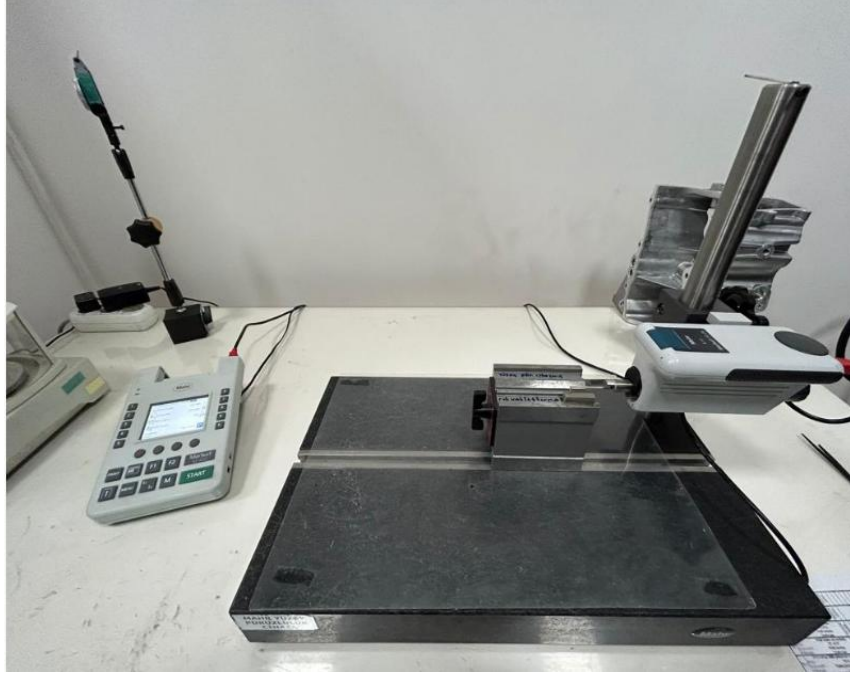
Bu çalışmada, deneylerin sonuçlarının değerlendirilebilmesi için çıktı parametreleri olarak yüzey pürüzlülük ölçümleri (Ra), mikrosertlik testleri (Vickers), aşınma testleri (COF tayini ve aşınma direncinin bulunması) ve mikroyapı analizi (SEM) gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerde değişken ve sabit parametrelerin üretilen malzeme üzerindeki etkisini inceleyebilmek için kullanılan ölçüm cihazları, cihazların özellikleri ve ölçüm detayları aşağıda verilmiştir.

3.4.1. Yüzey pürüzlülüğü testi

Yüzey pürüzlülüğü değerleri istenilen seviyelerde olursa malzemenin korozyona karşı dayanımı ve yorulma-kırılma dayanımı artar. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü dış görünüm olarak da güzel görünüm sağlamaktadır. Yani yüzey pürüzlülüğü bir ürünün kalitesidir.

Bu çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü yani Ra ölçümleri yapılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük ölçümleri, Kırpert firması AR-GE test laboratuvarında bulunan Mahr Marsurf M400 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülük Ra değeri ölçülürken, üretilen numunelerde baştan sona doğru 5,6 mm tarama uzunluğunda, 5

farklı noktada ölçümler yapılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük cihazı aşağıda Şekil 3.14.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Ortalama yüzey pürüzlülük Ra ölçüm cihazı

Cihazın özelliklerine bakacak olursak; cihazın ağırlığı yaklaşık 1 kg'dır. Ölçüm aralığı +/- 250 μm 'dir. Örnekleme uzunluğu 1-5'tir. Temas hızları 0,2-1,0 mm/s'dir. Ölçüm kuvveti 0,75 mN'dur. Bu cihaz ile 26 mm'ye kadar hareket uzunlukları ölçülebilir.

3.4.2. Mikrosertlik testi

Mikrosertlik testi, metallerde ve diğer numunelerde mekanik özelliklerinin bulunmasında güvenilirdir ve çok fazla kullanılmaktadır. Malzemelerin sertlik ölçücü yapılırken bir batma aletine karşı devamlı gösterilen direnç diye değerlendirilir. Sertlik değeri, genelde batma aletinin malzemenin yüzeyine belirli yük ve zaman ile uygulanması sonucu iz derinliği oluşur ve bu iz derinliğinin ölçülmesiyle bulunur (Baykal, 2012).

SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V numunelerin mikrosertlik ölçümünden önce Ermaksan Makine firmasında malzemeye zarar vermeden polisaj ile yüzeylere parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu parlatma işlemi yüzeylerin görünürlüğünü arttırmıştır.

Parlatılarak yüzeylerin görünümü düzeltilen numunelerin sertlik ölçümü Bursa Uludağ Üniversitesi yüzey işlem ve teknolojileri laboratuvarında bulunan Metkon Duroline M modeli cihazıyla yapılmıştır. Batma aleti olarak elmas uç ve 200 g yük, 10 s süresince 1 numunede 5 farklı noktadan uygulanmıştır. Sonuç olarak Vickers sertlik değerleri bulunmuştur. Vickers ölçüm cihazı Şekil 3.15.'de aşağıda gösterilmiştir.



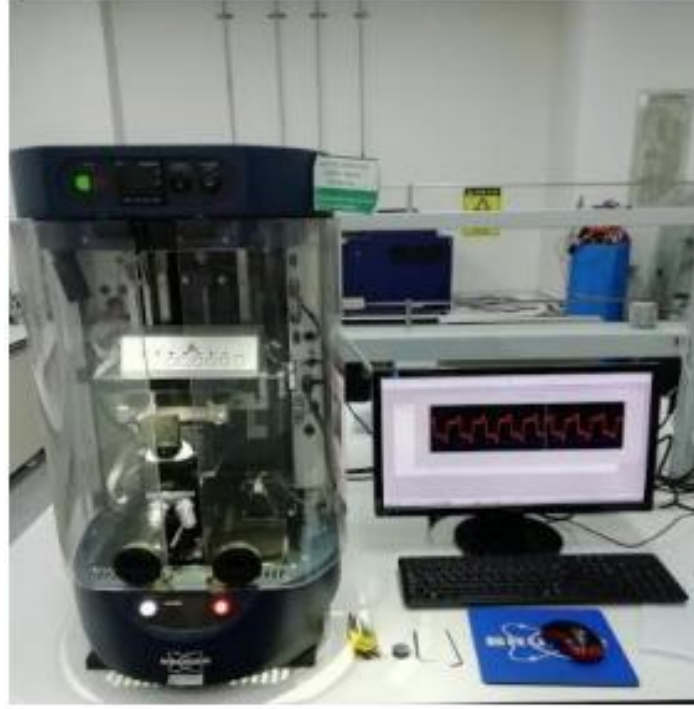
Şekil 3.15. Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

Cihazın bazı özellikleri şöyledir; Sertlik skalaları HV 0,01-0,025-0,05-0,1-0,2-0,3-0,5-1'dir. Test yükleri 10-1000 gf aralığındadır. Test yükü bekleme süresi 5-99 s aralığındadır ve 1 s adımlarla ayarlanabilir. İz ölçüm çözünürlüğü 0,02 μm 'dir. Cihazın ağırlığı 65 kg, ölçüleri 240x560x625 mm'dir.

3.4.3. Aşınma testi

Aşınma birbiriyle temas halinde bulunan malzemelerde, malzeme özellikleri ve malzeme dayanımı için çok önemlidir.

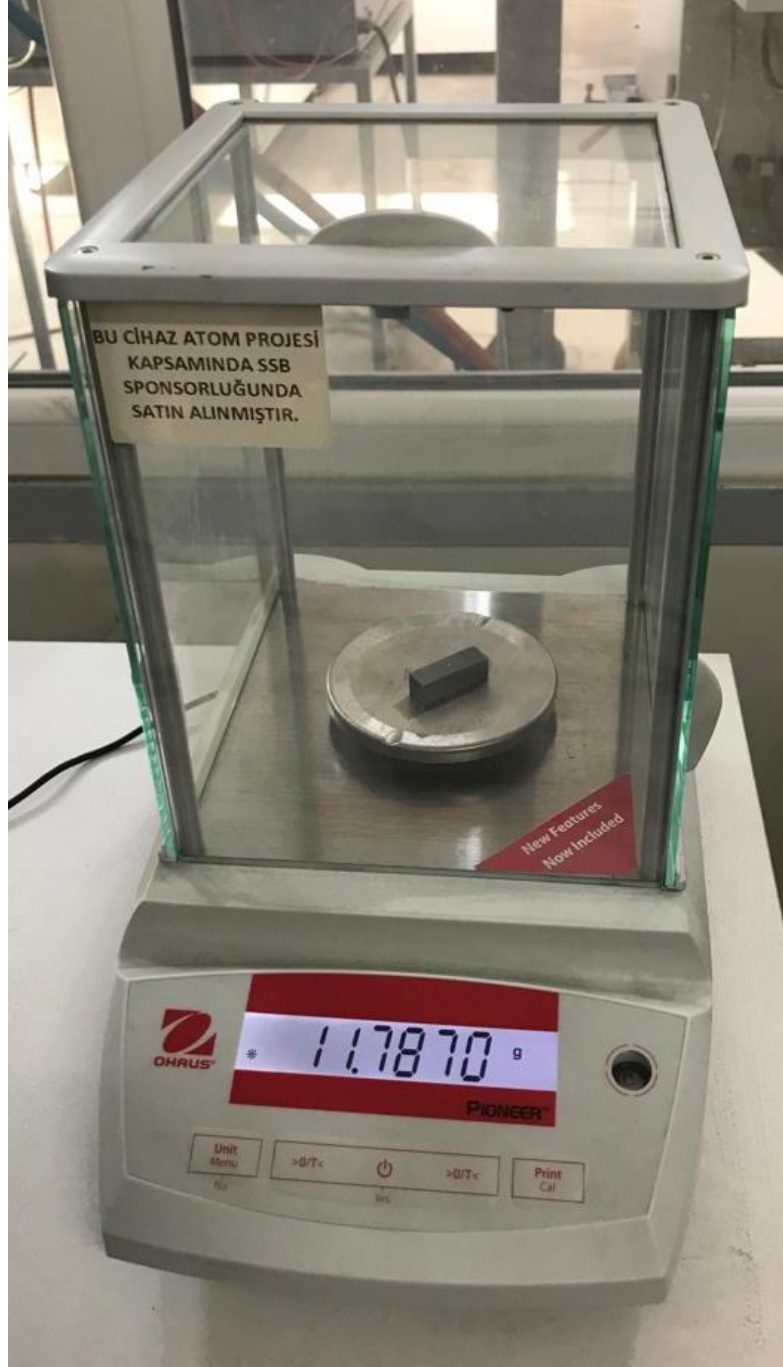
Aşınma ölçümü olarak sürtünme katsayısı tayini yapılmış, aşınma miktarı ve aşınma direnci hesaplanmıştır. Bu değerler Bursa Teknik Üniversitesi metalurji laboratuvarlarında bulunan Bruker UMT-2 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri olarak 3N yük, 5 mm/s hız ve 10 m yol tercih edilmiştir. Karşı eleman olarak çelik kullanılmıştır. 0,01-2000 s aralığında 0,01 s aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Aşınma ölçümleri cihazı Şekil 3.16.'de aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Aşınma ölçmek için kullanılan cihaz

Bu cihazın teknik özellikleri şöyledir; Malzemeye maksimum 4 N yük yüklenebilir. Cihaz maksimum 10 mm/s hızla aşınma gerçekleştirilebilmektedir. Numunelerin tablaya elle yerleştirilmesi ve numunelerin cihaza uygun olarak hazırlanması gerekmektedir. Bilgisayar kontrollü olan bu cihazda numuneye yaklaştırılan aşınma bilyesi ile aşınma ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Çıktılar otomatik olarak alınmaktadır.

Ayrıca aşınma miktarlarını ölçmek için her aşınma testinden önce ve sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip hassas terazi kullanılmıştır. Bu değerler PIONEER marka OHAUS-PA224C modeli cihaz ile ölçülmüştür. Kapasitesi 220 g'dır. Stabilasyon zamanı 3 saniyedir. Yaklaşık 4,6 kg ağırlığındadır. Kullanılan cihaz Şekil 3.17.'de aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Hassas terazi

3.4.4. SEM mikroyapı analizi

SLE yöntemiyle üretilen test numunelerinin SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler üzerinde mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Bu incelemeler Ermaksan Makine firması OPTO departmanı laboratuvarında bulunan FEI NOVA NANOSEM 450 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler aşağıda Şekil 3.18.' de gösterilen SEM mikroyapı görüntüleme cihazı ile incelenmişlerdir.



Şekil 3.18. SEM mikroyapı görüntüleme cihazı

Cihaz geniş örnek aralıkları sunar ve her araştırmaya hitap etmektedir. Motorize tutucu sayesinde büyük numunelerde bile analizler rahatlıkla yapılabilmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Eİ ile üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük ölçümleri (Ra), mikrosertlik testleri (Vickers), aşınma testleri (COF tayini ve aşınma direncinin bulunması) ve mikroyapı analizi (SEM) karşılaştırılması bu bölümde verilmiştir.

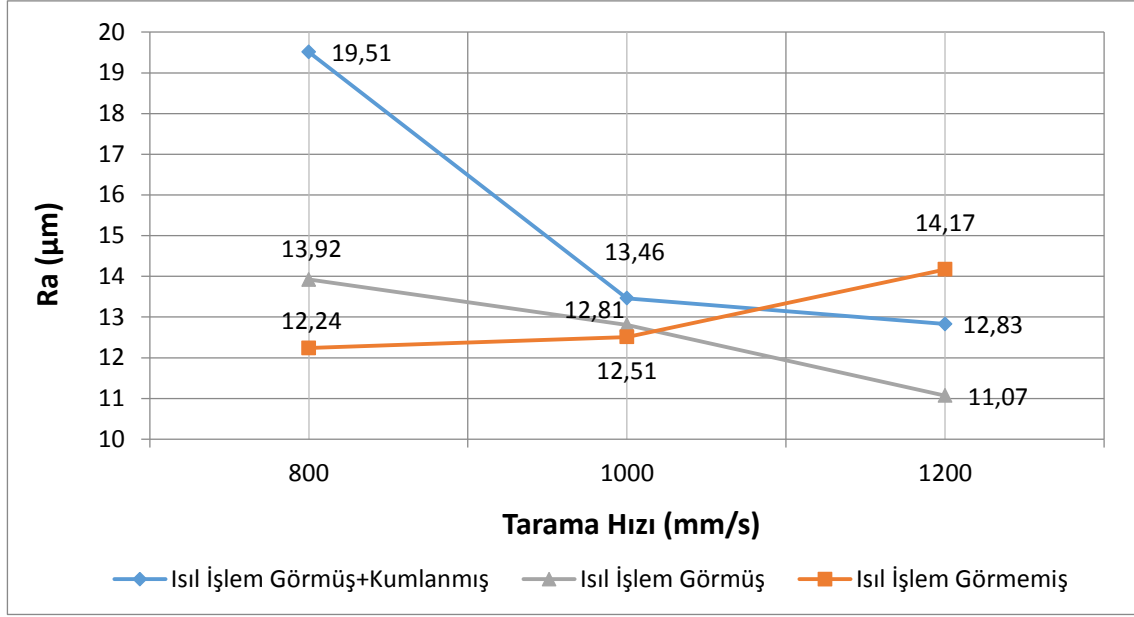
4.1. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Testi

Ortalama yüzey pürüzlülük Ra değeri belirlenirken üretilen numunelerin baştan sona doğru 5,6 mm tarama uzunluğunda ve 5 farklı noktada ölçümler yapılmış, daha sonrada bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. 1 nolu baskılı numunelerin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 1 nolu baskılı numunelerin üst tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtıl işlem görmüş yüzeylerde ve 2 nolu baskılı numunenin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtıl işlem görmemiş yüzeylerde Ra ölçümü yapılmıştır.

Numunelere uygulanan ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra ölçümü değerleri Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de ve bu sonuçlara ait grafiksel değerlendirmeler Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tarama hızı değişiminin Ra ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	Ra (µm)
800	230	A	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	19,51
1000		B			13,46
1200		C			12,83
800		A	1	Isıl İşlem Görmüş	13,92
1000		B			12,81
1200		C			11,07
800		A	2	Isıl İşlem Görmemiş	12,24
1000		B			12,51
1200		C			14,17



Şekil 4.1. Tarama hızı değişiminin Ra ölçüm sonuçlarına etkisi

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde Ra değeri ısıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 19,51 µm, 1000 mm/s tarama hızında 13,46 µm, 1200 mm/s tarama hızında 12,83 µm olarak ölçülmüştür.

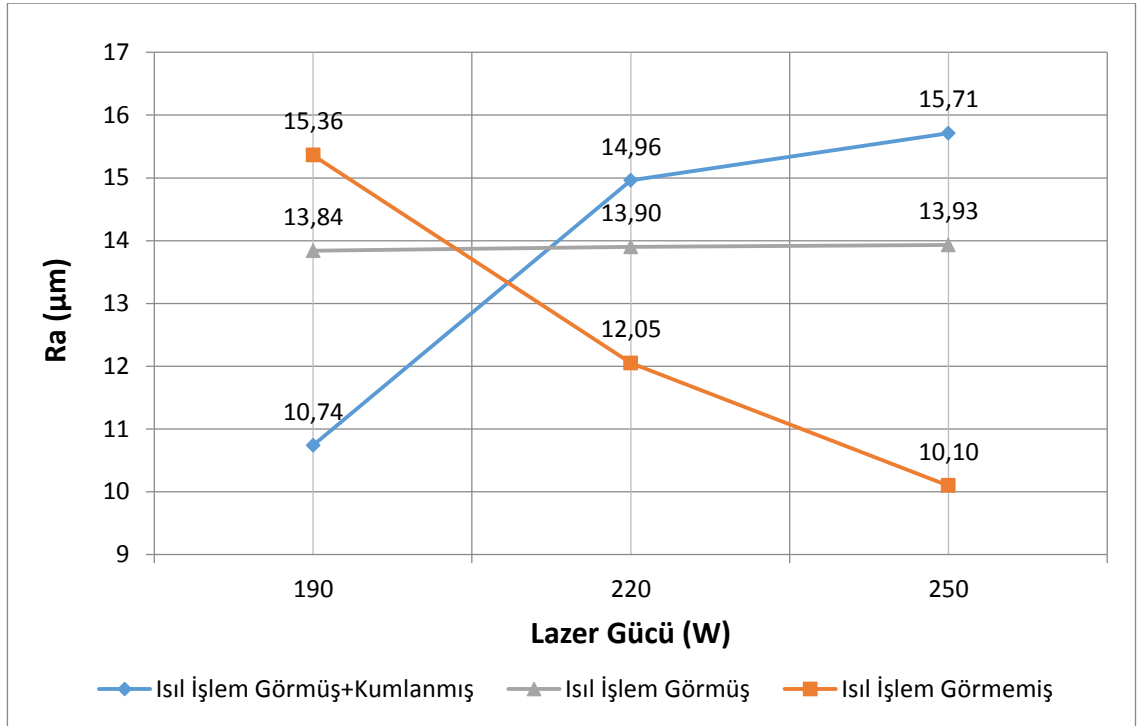
Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde Ra değeri ısıl işlem görmüş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 13,92 µm, 1000 mm/s tarama hızında 12,81 µm, 1200 mm/s tarama hızında 11,07 µm olarak ölçülmüştür.

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde Ra değeri ısıl işlem görmemiş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 12,24 µm, 1000 mm/s tarama hızında 12,51 µm, 1200 mm/s tarama hızında 14,17 µm olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak Ra değerinin lazer gücü sabit tutularak tarama hızı arttıkça arttığı görülmüştür. Bunun nedeni; tarama hızı artarken toz malzemenin ergimeye yeterli süresinin olmaması ve katılaşma hızının azalmasıdır. İkincil işlemlerden ısıl işlemler ve kumlamada ise Ra değerini daha da artırdığı görülmüş fakat tarama hızı arttıkça Ra değerini düşürdüğü görülmüştür.

Çizelge 4.2. Lazer gücü değişiminin Ra ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	Ra (µm)
1000	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	10,74
	220	E			14,96
	250	F			15,71
	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş	13,84
	220	E			13,90
	250	F			13,93
	190	D	2	Isıl İşlem Görmemiş	15,36
	220	E			12,05
	250	F			10,10



Şekil 4.2. Lazer gücü değişiminin Ra ölçüm sonuçlarına etkisi

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde Ra değeri ısıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 10,74 µm, 220 W lazer gücünde 14,96 µm, 250 W lazer gücünde 15,71 µm olarak ölçülmüştür.

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde Ra değeri ısıtılma işlem görmüş yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 13,84 µm, 220 W lazer gücünde 13,90 µm, 250 W lazer gücünde 13,93 µm olarak ölçülmüştür.

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde Ra değeri ısıtılma işlem görmemiş yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 15,36 µm, 220 W lazer gücünde 12,05 µm, 250 W lazer gücünde 10,10 µm olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak Ra değeri lazer gücü arttıkça azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni lazer gücünün sıcaklığı yükselterek, bir önceki katmanı etkileyerek ergimesini sağlaması ve eriyiğin daha homojen bir hal almasını sağladığı düşünülebilir. İkincil işlemlerden ısıtılma işlemler lazer gücü arttıkça Ra değerini etkilemediği ve fakat ısıtılma işlemler numunelerin Ra değerini düşürdüğü görülmüştür. Isıtılma işlem+kumlama da ise lazer gücü arttıkça Ra değeri arttığı görülmüştür.

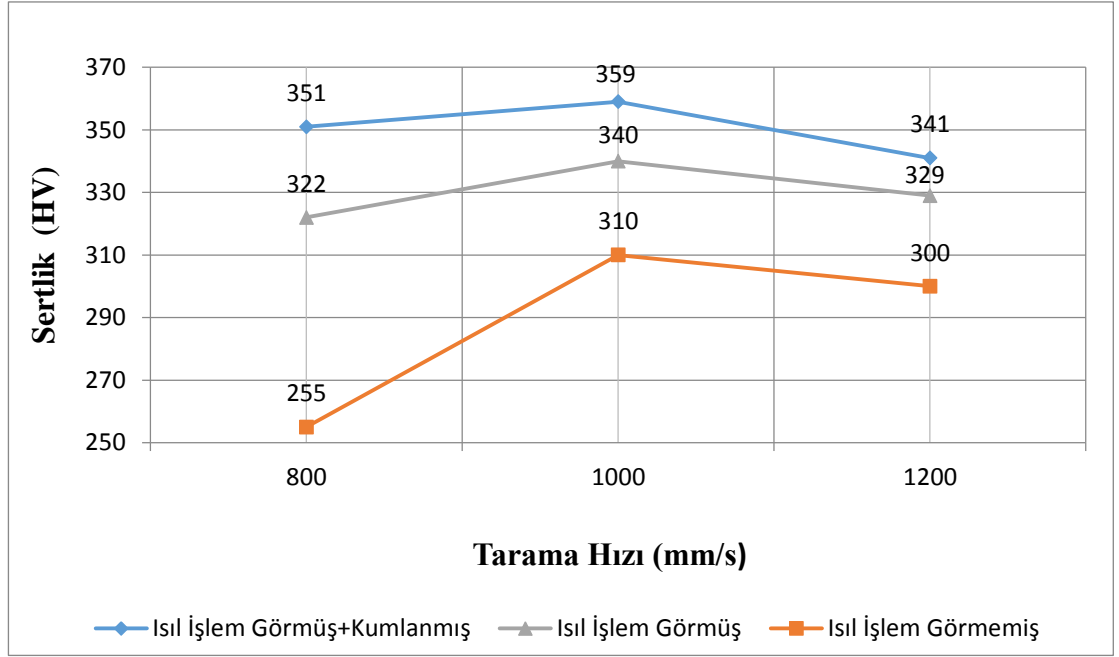
4.2. Mikrosertlik Testi

Bu çalışmada vickers sertlik ölçümü yapılmıştır. Vickers sertlik değeri belirlenirken üretilen numunelerin 1 numunede 5 farklı noktadan ölçüm yapılmıştır. Sonuç olarak 5 farklı noktanın ortalaması alınarak vickers sertlik değerleri bulunmuştur. 1 nolu baskılı numunelerin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılma işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 1 nolu baskılı numunelerin üst tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılma işlem görmüş yüzeylerde ve 2 nolu baskılı numunenin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılma işlem görmemiş yüzeylerde vickers sertlik ölçümü yapılmıştır.

Numunelere uygulanan mikrosertlik testi değerleri Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4.'de ve bu sonuçlara ait grafiksel değerlendirmeler Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Tarama hızı değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	ORTALAMA HV
800	230	A	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	351
1000		B			359
1200		C			341
800		A	1	Isıl İşlem Görmüş	322
1000		B			340
1200		C			329
800		A	2	Isıl İşlem Görmemiş	255
1000		B			310
1200		C			300



Şekil 4.3. Tarama hızı değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçlarına etkisi

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde HV değeri ısıtıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 351 HV, 1000 mm/s tarama hızında 359 HV, 1200 mm/s tarama hızında 341 HV olarak ölçülmüştür.

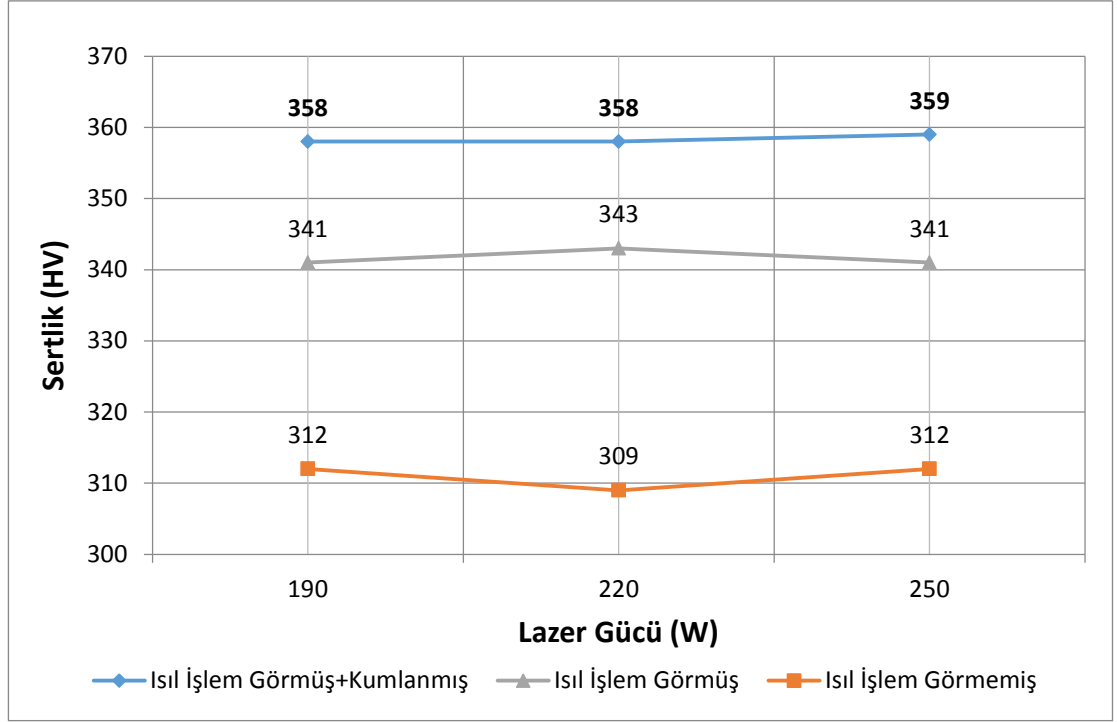
Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde HV değeri ısıtıl işlem görmüş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 322 HV, 1000 mm/s tarama hızında 340 HV, 1200 mm/s tarama hızında 329 HV olarak ölçülmüştür.

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde HV değeri ısıtıl işlem görmemiş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 255 HV, 1000 mm/s tarama hızında 310 HV, 1200 mm/s tarama hızında 300 HV olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak HV değerinin lazer gücü sabit tutularak 800-1000 mm/s aralığında tarama hızı arttıkça arttığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise tarama hızı arttıkça sertliğin azaldığı görülmüştür. İkincil işlemlerden ısıtıl işlemler ve kumlamada ise tarama hızı arttıkça 800-1000 mm/s aralığında sertlik değerini artırdığı ve yine 1000-1200 mm/s aralığında sertliğin azaldığı görülmüştür. Burada yorum yapmak gerekirse, numune üretilirken alt ve üst katmanların arasındaki katmanlarda soğuma hızı alt ve üst katmanlara göre çok daha yavaştır. Ara katman, alt ve üst katmanlarla ısınma ve soğuma ile sürekli ısı alışverişindedir. Bu sebeple alt ve üst katmanların soğuma hızı yüksek olduğu için mikrosertlik değerleri de daha yüksektir.

Çizelge 4.4. Lazer gücü değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	ORTALAMA HV
1000	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	358
	220	E			358
	250	F			359
	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş	341
	220	E			343
	250	F			341
	190	D	2	Isıl İşlem Görmemiş	312
	220	E			309
	250	F			312



Şekil 4.4. Lazer gücü değişiminin mikrosertlik ölçüm sonuçlarına etkisi

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde HV değeri ısıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 358 HV, 220 W lazer gücünde 358 HV, 250 W lazer gücünde 359 HV olarak ölçülmüştür.

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde HV değeri ısıl işlem görmüş yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 341 HV, 220 W lazer gücünde 343 HV, 250 W lazer gücünde 341 HV olarak ölçülmüştür.

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde HV değeri ısıl işlem görmemiş yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 312 HV, 220 W lazer gücünde 309 HV, 250 W lazer gücünde 312 HV olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak HV değeri lazer gücü arttıkça değişmediği görülmüştür. İkincil işlemlerden ısıl işlem ve kumlamada her ikisinde de ise lazer gücü arttıkça sertlik değerini etkilemediği görülmüştür. İkincil işlemlerin, ikincil işlem uygulanmamış numunelere göre sertlik değeri arttığı görülmüştür.

4.3. Aşınma Testi

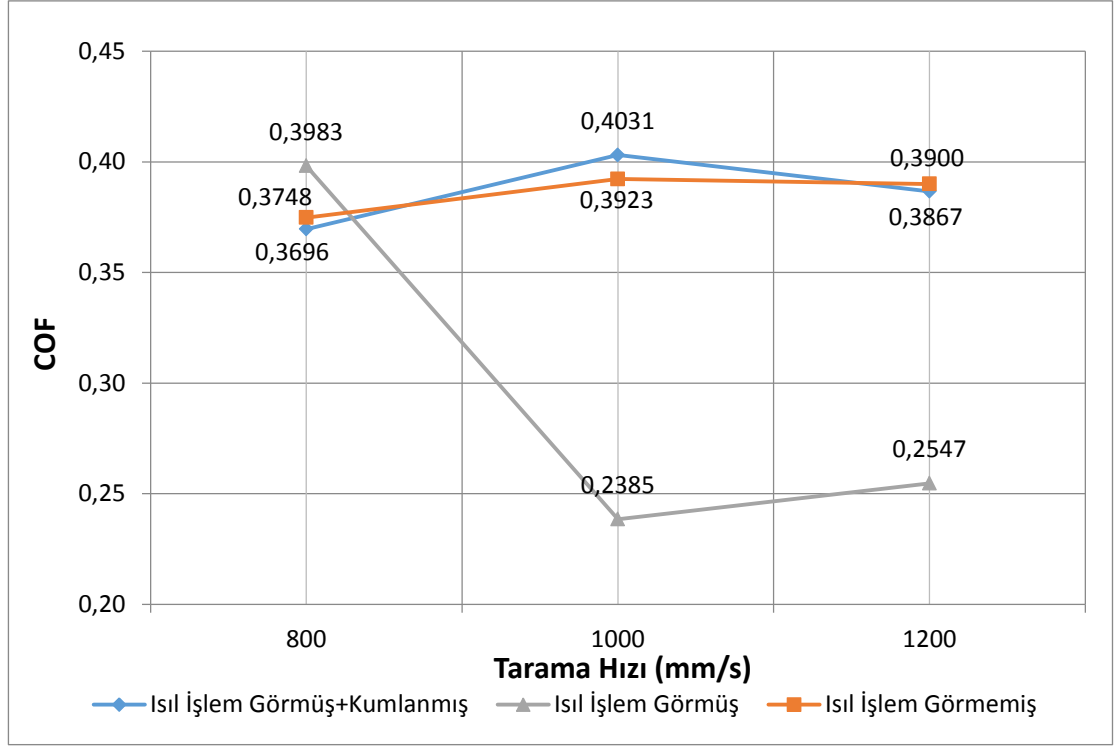
4.3.1. Sürtünme katsayısı değerlerinin tayini

Sürtünme katsayısı değeri COF belirlenirken üretilen numunelerin 1 nolu baskılı numunelerin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılmış ve kumlanmış yüzeylerde, 1 nolu baskılı numunelerin üst tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılmış yüzeylerde ve 2 nolu baskılı numunenin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılmamış yüzeylerde COF değeri ölçümü yapılmıştır. 0,01-2000 s aralığında ve 0,01 s aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Tüm değerlerin ortalaması alınarak COF değerleri belirlenmiştir.

Numunelerin COF ölçümü sonuçları Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6.'da ve bu sonuçların grafiksel değerlendirmeleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Tarama hızı değişiminin COF ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	COF
800	230	A	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	0,3696
1000		B			0,4031
1200		C			0,3867
800		A	1	Isıl İşlem Görmüş	0,3983
1000		B			0,2385
1200		C			0,2547
800		A	2	Isıl İşlem Görmemiş	0,3748
1000		B			0,3923
1200		C			0,3900



Şekil 4.5. Tarama hızı değişiminin COF ölçüm sonuçlarına etkisi

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde COF değeri ısıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 0,3696, 1000 mm/s tarama hızında 0,4031, 1200 mm/s tarama hızında 0,3867 olarak ölçülmüştür.

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde COF değeri ısıl işlem görmüş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 0,3983, 1000 mm/s tarama hızında 0,2385, 1200 mm/s tarama hızında 0,2547 olarak ölçülmüştür. Isıl işlem görmüş numunede COF'un keskin düşüşün nedeni yüzey pürüzlülüğünden kaynaklıdır ve aşınma testi esnasında numune yüzeyinden aşınan malzemenin aşındırıcı uç üzerine yapışıp ucun git-gel hareketi ile tekrar ayrılmasıyla COF değerinin farklı değerler çıkmasına neden olmuştur.

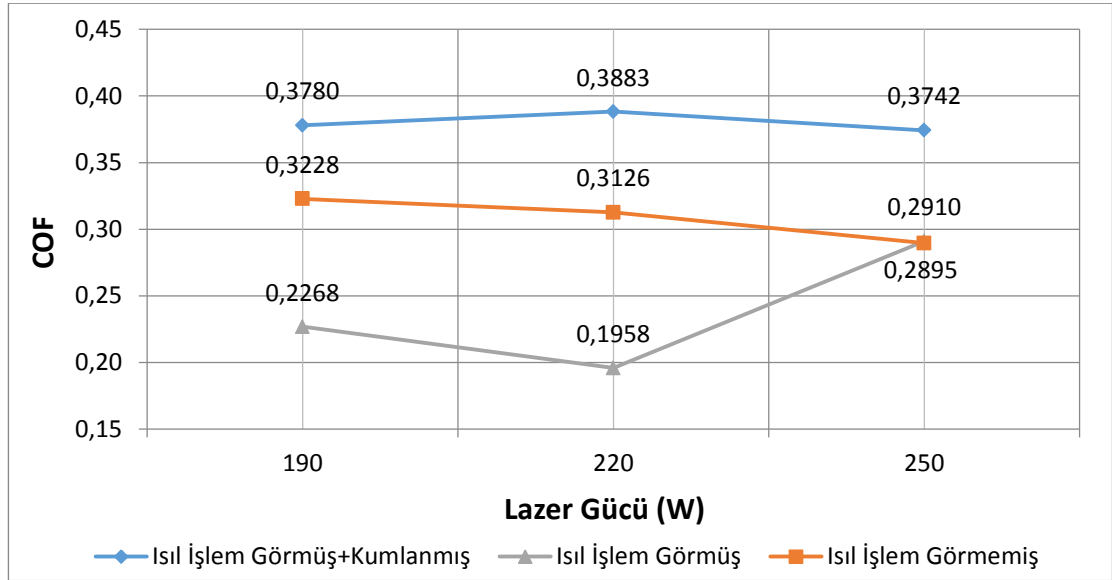
Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde COF değeri ısıl işlem görmemiş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında 0,3748, 1000 mm/s tarama hızında 0,3923, 1200 mm/s tarama hızında 0,3900 olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak; sürtünme katsayı değeri COF, 800-1000 mm/s aralığında tarama hızı arttıkça arttığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise tarama hızı arttıkça COF değerinin azaldığı

görülmüştür. İkincil işlemlerden ısıt işlemler de COF, 800-1000 mm/s aralığında azaldığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise arttığı görülmüştür. Aynı şekilde ısıt işlem+kumlama uygulamasında ise COF değeri 800-1000 mm/s aralığında tarama hızı artıkça arttığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise tarama hızı artıkça COF değerinin azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.6. Lazer gücü değişiminin COF ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	COF
1000	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	0,3780
	220	E			0,3883
	250	F			0,3742
	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş	0,2268
	220	E			0,1958
	250	F			0,2910
	190	D	2	Isıl İşlem Görmemiş	0,3228
	220	E			0,3126
	250	F			0,2895



Şekil 4.6. Lazer gücü değişiminin COF ölçüm sonuçlarına etkisi

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde COF değeri ısıtılmış ve kumlanmış yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 0,3780, 220 W lazer gücünde 0,3883, 250 W lazer gücünde 0,3742 olarak ölçülmüştür.

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde COF değeri ısıtılmış yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 0,2268, 220 W lazer gücünde 0,1958, 250 W lazer gücünde 0,2910 olarak ölçülmüştür.

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde COF değeri ısıtılmamış yüzeylerde, 190 W lazer gücünde 0,3228, 220 W lazer gücünde 0,3126, 250 W lazer gücünde 0,2895 olarak ölçülmüştür.

Sonuç olarak; sürtünme katsayı değeri COF, lazer gücü arttıkça azaldığı görülmüştür. İkincil işlemlerden ısıtılmış işlemler de ise COF, 190-220 W aralığında azaldığı, 220-250 W aralığında ise arttığı görülmüştür. Aynı şekilde ısıtılmış işlem+kumlama uygulaması da COF, 190-220 W aralığında arttığı, 220-250 W aralığında ise azaldığı görülmüştür.

4.3.2. Aşınma direncinin bulunması

Aşınma direnci değeri bulunurken, üretilen numunelerin 1 nolu baskılı numunelerin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılmış ve kumlanmış yüzeylerde, 1 nolu baskılı numunelerin üst tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılmış yüzeylerde ve 2 nolu baskılı numunenin alt tarafına denk gelen uzun tarafının ısıtılmamış yüzeylerde ağırlık azalması yöntemi kullanılarak aşınma direnci değerleri hesaplanarak bulunmuştur. Her aşınma testinden önce ve sonra 10^{-4} g hassasiyete sahip hassas terazi kullanılarak ağırlık farkları hesaplanmıştır. Bu ağırlık azalmaları Çizelge 4.7. ve Çizelge 4.8'de aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.7. Tarama hızı değişiminin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık farkı ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	FARK (g)
800	230	A	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	12,8642	12,6679	0,1963
1000		B			12,2320	12,0401	0,1919
1200		C			11,6584	11,4563	0,2021
800		A	1	Isıl İşlem Görmüş	12,7642	12,5502	0,2140
1000		B			12,1320	11,9293	0,2027
1200		C			11,5584	11,3489	0,2095
800		A	2	Isıl İşlem Görmemiş	12,7642	12,4940	0,2702
1000		B			12,1320	11,9097	0,2223
1200		C			11,5584	11,3287	0,2297

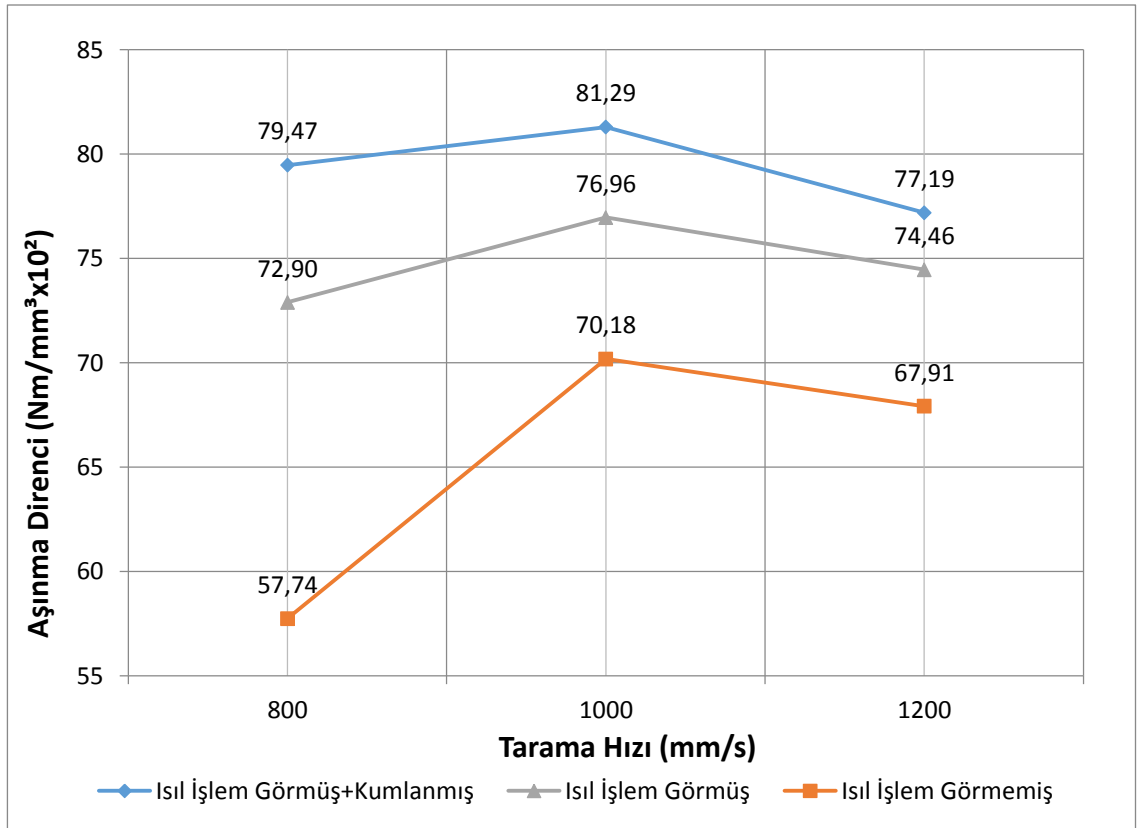
Çizelge 4.8. Lazer gücü değişiminin aşınma öncesi ve sonrası ağırlık farkı ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	İLK AĞIRLIK (g)	SON AĞIRLIK (g)	FARK (g)
1000	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	11,3578	11,1653	0,1925
	220	E			11,6675	11,4731	0,1944
	250	F			12,0919	11,9015	0,1904
	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş	11,2578	11,0558	0,2020
	220	E			11,5675	11,3684	0,1991
	250	F			11,9919	11,7885	0,2034
	190	D	2	Isıl İşlem Görmemiş	11,2578	11,0359	0,2219
	220	E			11,5675	11,3434	0,2241
	250	F			11,9919	11,7718	0,2201

Numunelerin aşınma direnci ölçümü sonuçları (2.4) ve (2.5) formülleri ile hesaplanarak Çizelge 4.9. ve Çizelge 4.10.'da ve bu sonuçların grafiksel değerlendirmeleri Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. Tarama hızı değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	AŞINMA DİRENCİ (Nm/mm ³ x10 ²)
800	230	A	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	79,47
1000		B			81,29
1200		C			77,19
800		A	1	Isıl İşlem Görmüş	72,90
1000		B			76,96
1200		C			74,46
800		A	2	Isıl İşlem Görmemiş	57,74
1000		B			70,18
1200		C			67,91



Şekil 4.7. Tarama hızı değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçlarına etkisi

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde aşınma direnci değeri, ısıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında $79,47 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 1000 mm/s tarama hızında $81,29 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 1200 mm/s tarama hızında $77,19 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ olarak hesaplanmıştır.

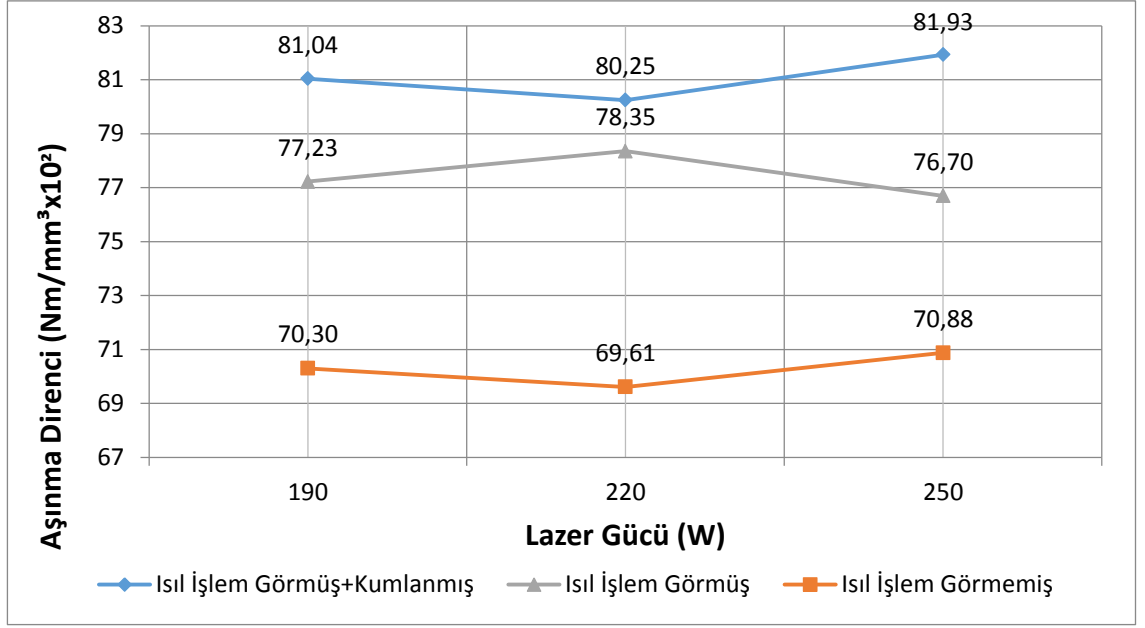
Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde aşınma direnci değeri, ısıl işlem görmüş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında $72,90 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 1000 mm/s tarama hızında $76,96 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 1200 mm/s tarama hızında $74,46 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ olarak hesaplanmıştır.

Lazer gücü sabit tutularak tarama hızı değişiminde aşınma direnci değeri, ısıl işlem görmemiş yüzeylerde, 800 mm/s tarama hızında $57,74 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 1000 mm/s tarama hızında $70,18 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 1200 mm/s tarama hızında $67,91 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak; aşınma direnci değeri, 800-1000 mm/s aralığında tarama hızı arttıkça arttığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise tarama hızı arttıkça değer azaldığı görülmüştür. İkincil işlemlerden ısıl işlemler ve kumlama her ikisinde ise 800-1000 mm/s aralığında arttığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.10. Lazer gücü değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçları

HIZ (mm/s)	GÜÇ (Watt)	NUMUNE ADI	NUMUNE NO	İŞLEM TÜRÜ	AŞINMA DİRENCİ ($\text{Nm/mm}^3 \times 10^2$)
1000	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş+Kumlanmış	81,04
	220	E			80,25
	250	F			81,93
	190	D	1	Isıl İşlem Görmüş	77,23
	220	E			78,35
	250	F			76,70
	190	D	2	Isıl İşlem Görmemiş	70,30
	220	E			69,61
	250	F			70,88



Şekil 4.8. Lazer gücü değişiminin aşınma direnci ölçüm sonuçlarına etkisi

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde aşınma direnci değeri ısıl işlem görmüş ve kumlanmış yüzeylerde, 190 W lazer gücünde $81,04 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 220 W lazer gücünde $80,25 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 250 W lazer gücünde $81,93 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ olarak hesaplanmıştır.

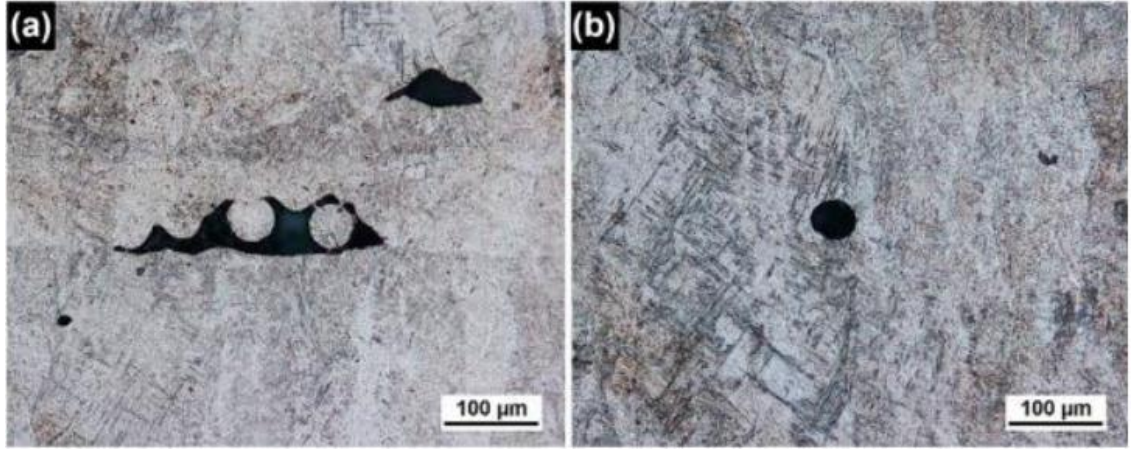
Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde aşınma direnci değeri ısıl işlem görmüş yüzeylerde, 190 W lazer gücünde $77,23 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 220 W lazer gücünde $78,35 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 250 W lazer gücünde $76,70 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ olarak hesaplanmıştır.

Tarama hızı sabit tutularak lazer gücü değişiminde aşınma direnci değeri ısıl işlem görmemiş yüzeylerde, 190 W lazer gücünde $70,30 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 220 W lazer gücünde $69,61 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$, 250 W lazer gücünde $70,88 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak; aşınma direnci değeri, lazer gücü artıkça çok fazla değişim görmemiştir. Bunun nedeni aşınma direncinin en önemli parametresi sertlikteki değerlerin benzerinin burada da olmasıdır. Aynı şekilde ısıl işlem+kumlama uygulamasında da aşınma direnci değeri çok fazla değişmemiştir. Fakat ikincil işlemler, ikincil işlem uygulanmayan numunelere göre aşınma direncini arttırmıştır.

4.4. SEM Analizi Sonuçları

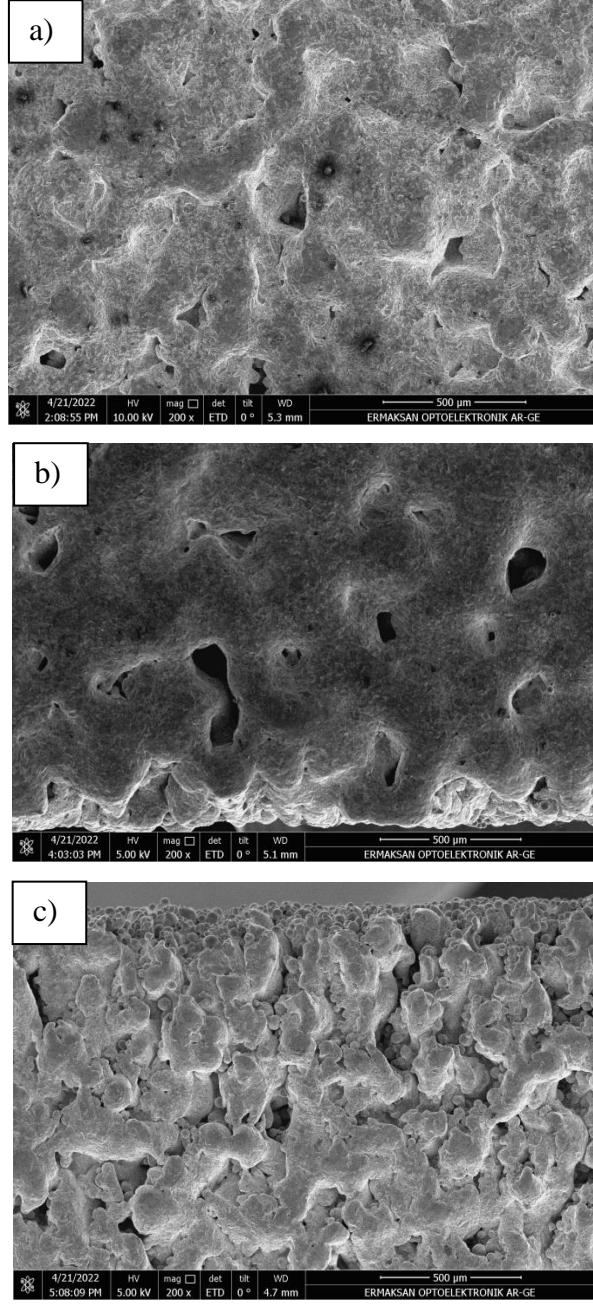
Eİ ile sürecinde malzemelerde iki çeşit gözenek oluşmaktadır. Bunlar gaz ve füzyon eksikliği gözenekleridir. Şekil 4.9.'da bu gözeneklerin şekli gösterilmiştir. Gaz gözenekleri genellikle malzeme içinde rastgele dağılır. Diğer gözenek türü füzyon eksikliği gözenekleri daha büyüktür ve şekil olarak düzensiz kama şeklindedir (Şekil 4.9.(a)). Bu gözenekler genelde iki bitişik tabakanın sınır bölgesinde dağılırlar. Bu gözenek türü yetersiz lazer enerjisiyle fazlaca miktarda tozu eritmeye çalışan ve yetersiz erime ile sonuçlanır. Genelde giriş enerji yoğunluğunu arttırmak bu oluşumu azaltır (Tammas ve diğerleri, 2015).



Şekil 4.9. (a) Füzyon eksikliği gözenek görüntüsü (b) Gaz gözenek görüntüsü (Galarraga ve diğerleri, 2016)

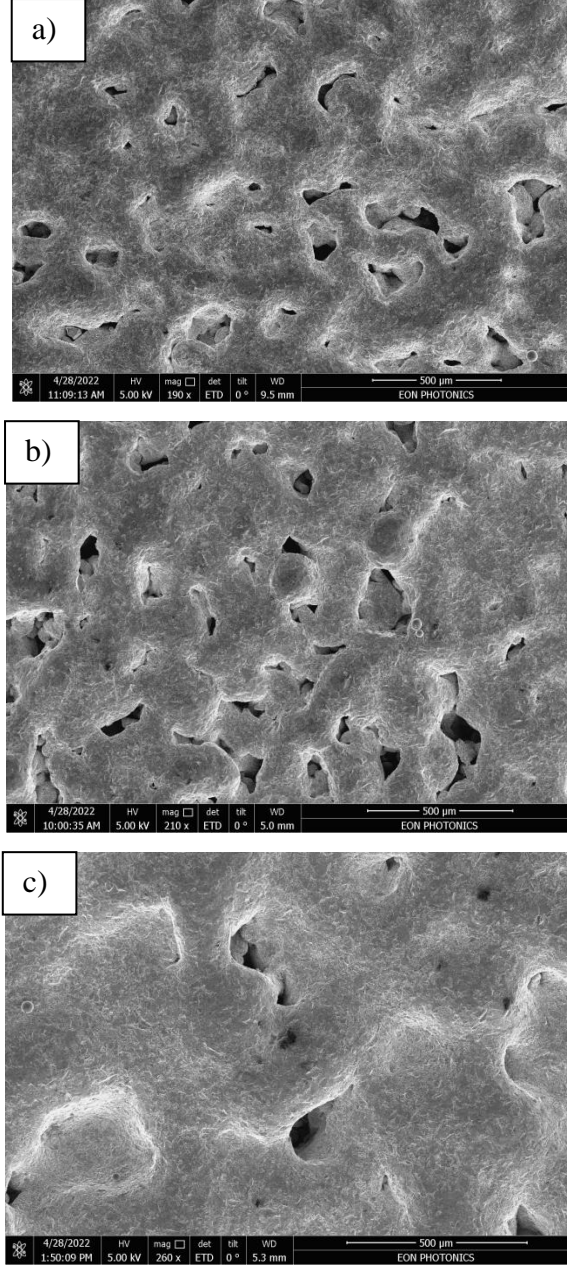
Diğer gözenek türü gaz gözenek küresel veya eliptik şekilli olup yaklaşık 1-100 µm çapındadır (Şekil 4.9(b)). Bu gözenekler, parçaların üretimi esnasında malzemenin sıvı erimiş halde iken ortamda bulunan gazın zamanla dışarı çıkamadığı ve soğuduktan sonra katı hale geçtiklerini gösterir. Genellikle lazer gücünü arttırmak ve tarama hızını yavaşlatmak oluşumu azaltabilir fakat tamamen yok edemeyebilir (Li ve diğerleri, 2015).

Bu tezde Eİ ile üretilen ve ardından ikincil işlem olarak ısıl işlem ve kumlama uygulanan bütün numunelere SEM analizi yapılmıştır.



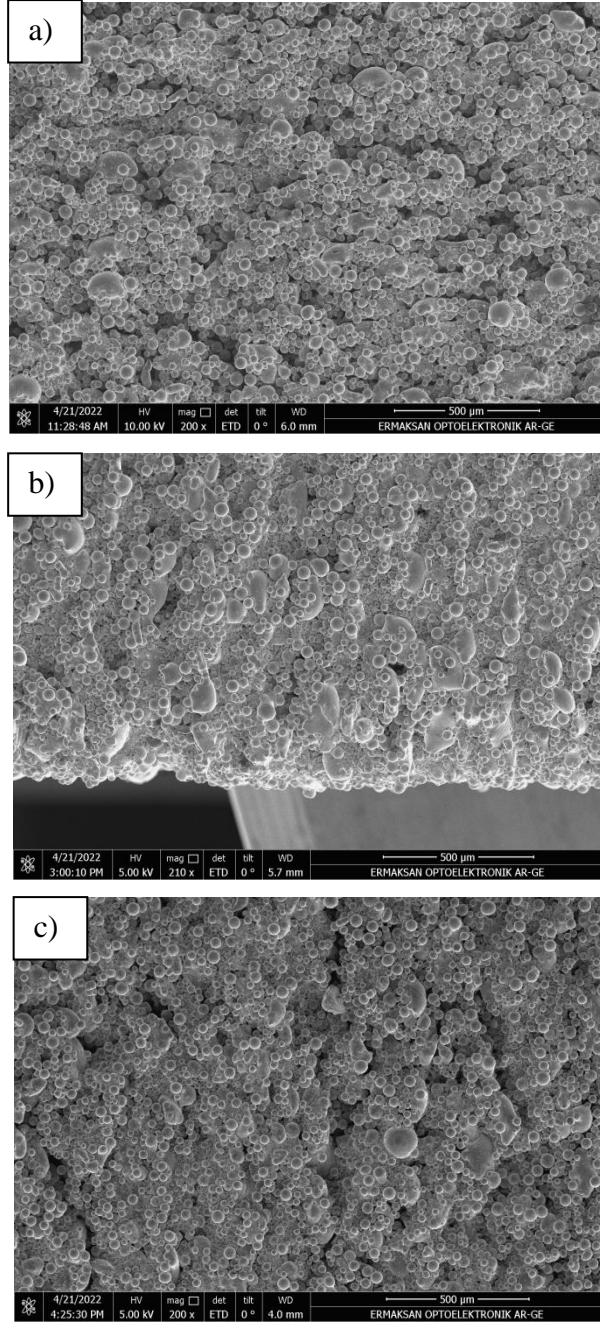
Şekil 4.10. Isıl işlem görmüş+kumlanmış yüzeylerde tarama hızı değişiminin a)800 b)1000 c)1200 mm/s SEM görüntüleri (200x büyütme)

Şekil 4.10.'da verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 230 W lazer gücünde, sırasıyla 800-1000-1200 mm/sn tarama hızında üretimi gerçekleşmiş ve ardından ısıl işlem+kumlama görmüş numunelere aittir. Yüzeylerde gaz ve füzyon gözeneklerinin olduğu gözlenmiştir. Kumlama işlemi ise tozların boşluklarını doldurarak tozların eriyip erimediğini göstermeyi engellemiştir.



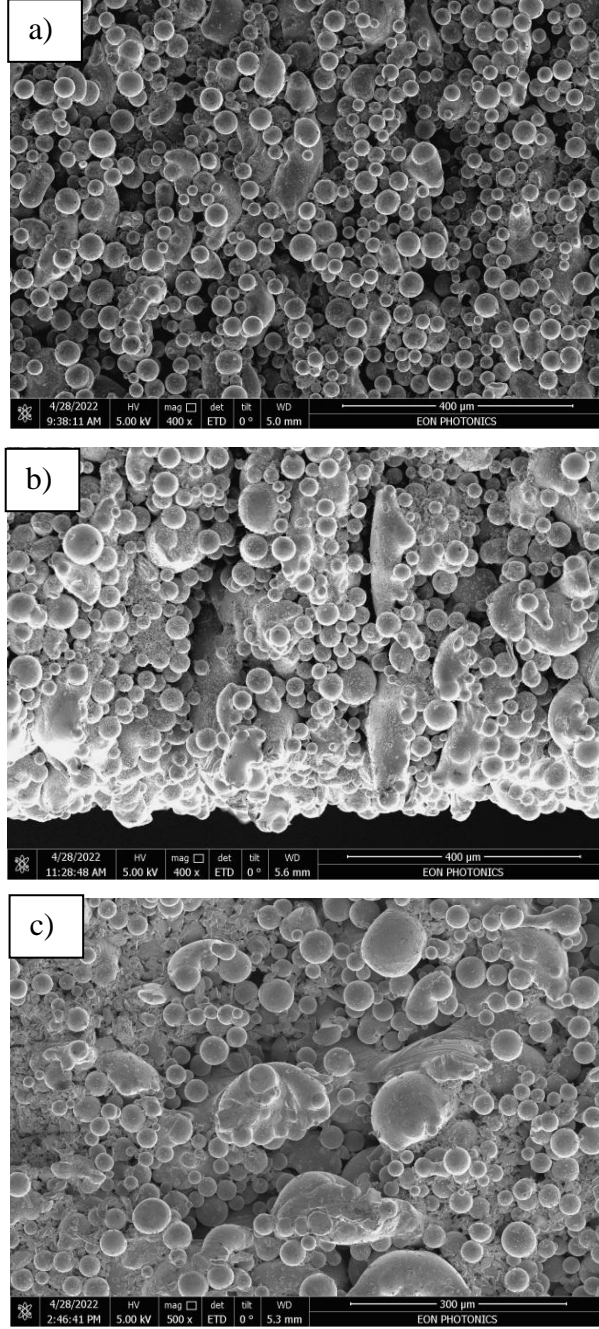
Şekil 4.11. Isıl işlem görmüş+kumlanmış yüzeylerde lazer gücü değişiminin a)190 (190x büyütme) b)220 (210x büyütme) c)250 W (250x büyütme) SEM görüntüleri

Şekil 4.11.'de verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 1000 mm/s tarama hızında, sırasıyla 190-220-250 W lazer gücünde üretimi gerçekleşmiş ve ardından ısıl işlem+kumlama görmüş numunelere aittir. Yüzeyde gaz ve füzyon gözeneklerinin olduğu, lazer gücü arttıkça bu gözeneklerin azaldığı, numunelerin eridiği ve birbirine kaydığı gözlenmiştir. Enerji yoğunluğunun lazer gücü arttıkça optimum değerlere yaklaştığı gözlenmiştir.



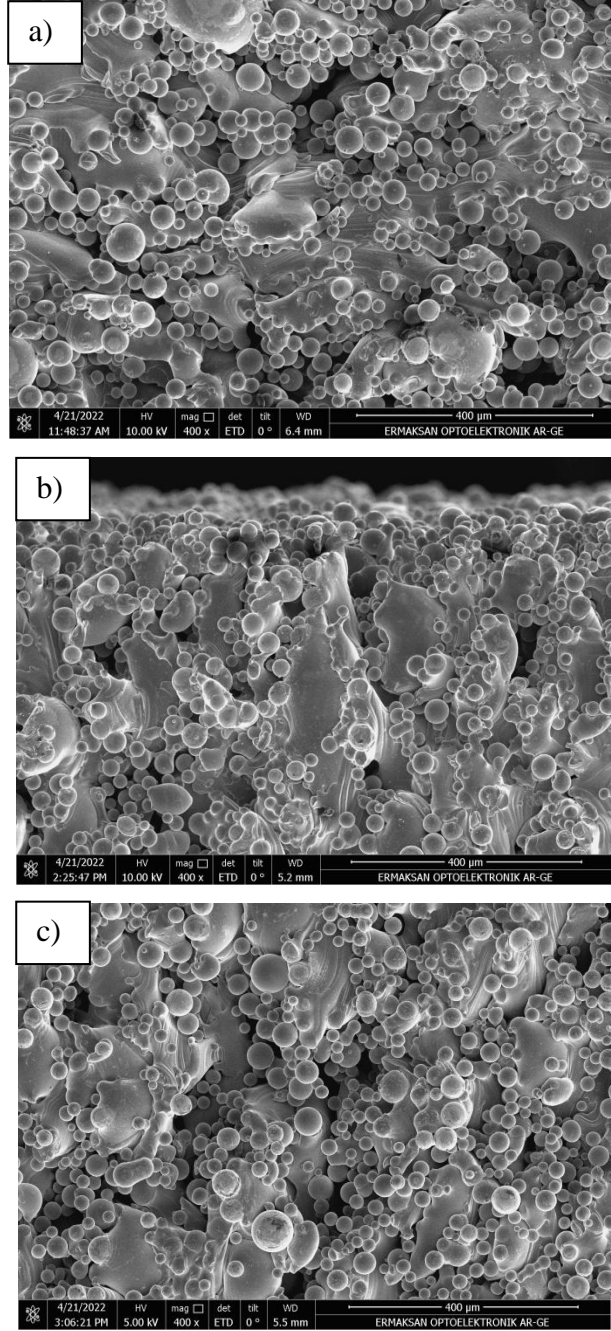
Şekil 4.12. Isıl işlem görmüş yüzeylerde tarama hızı değişiminin a)800 (200x büyütme) b)1000 (210x büyütme) c)1200 (200x büyütme) mm/s SEM görüntüleri

Şekil 4.12.'de verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 230 W lazer gücünde, sırasıyla 800-1000-1200 mm/s tarama hızında üretimi gerçekleşmiş ve ardından ısııl işlem görmüş numunelere aittir. Tarama hızı arttıkça, toz çaplarının aynı kaldığı yani erimediği gözlenmiştir. Ayrıca yüzeylerde gaz ve füzyon gözeneklerinin olduğu ve gaz-füzyon gözeneklerinin arttığı gözlenmiştir.



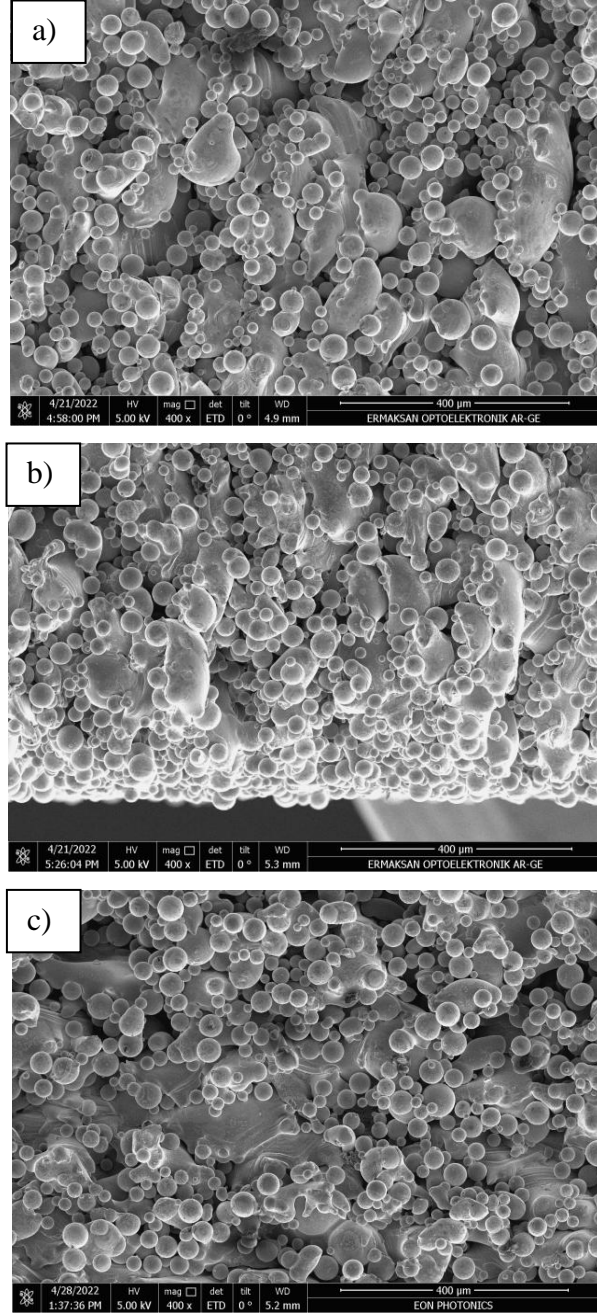
Şekil 4.13. Isıl işlem görmüş yüzeylerde lazer gücü değişiminin a)190 (400x büyütme) b)220 (400x büyütme) c)250 (500x büyütme) W SEM görüntüleri

Şekil 4.13.'te verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 1000 mm/s tarama hızında, sırasıyla 190-220-250 W lazer gücünde üretimi gerçekleşmiş ve ardından ısıl işlem görmüş numunelere aittir. Lazer gücü arttıkça, toz çaplarının farklı olduğu yani eridiği fakat hepsinde tamamen erimeydiği, yüzeyde gaz ve füzyon gözeneklerinin olduğu, bu gözeneklerinde azaldığı gözlenmiştir.



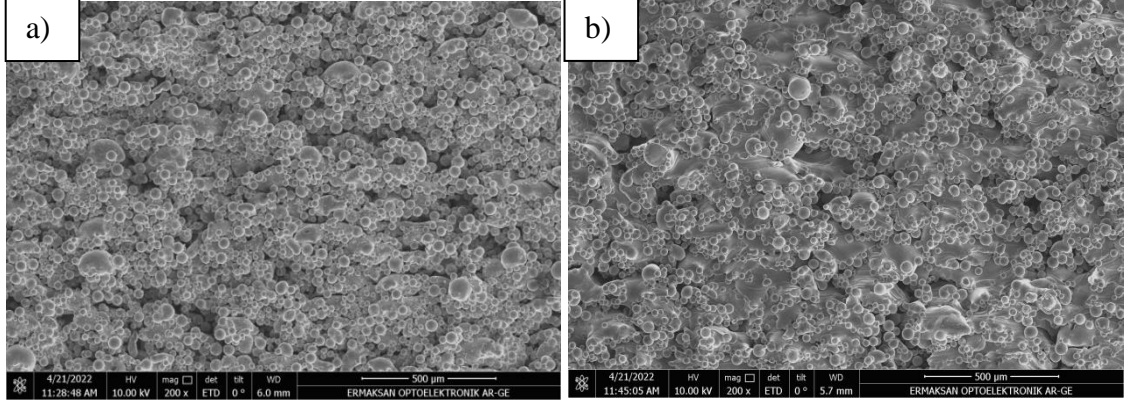
Şekil 4.14. Isıl işlem görmemiş yüzeylerde tarama hızı değişiminin a)800 b)1000 c)1200 mm/s SEM görüntüleri (400x büyütme)

Yukarıdaki Şekil 4.14.'teki görüntüler, Ti6Al4V numunelerinin lazer gücü olarak 230 W, sırasıyla 800-1000-1200 mm/s tarama hızında üretimi gerçekleşmiş ve ardından herhangi bir ikincil işlem görmemiş numunelere aittir. Tarama hızı arttıkça, tozların erimediği gözlenmiştir. Ayrıca yüzeylerde gaz ve füzyon gözeneklerinin olduğu ve gaz-füzyon gözeneklerinin arttığı gözlenmiştir.



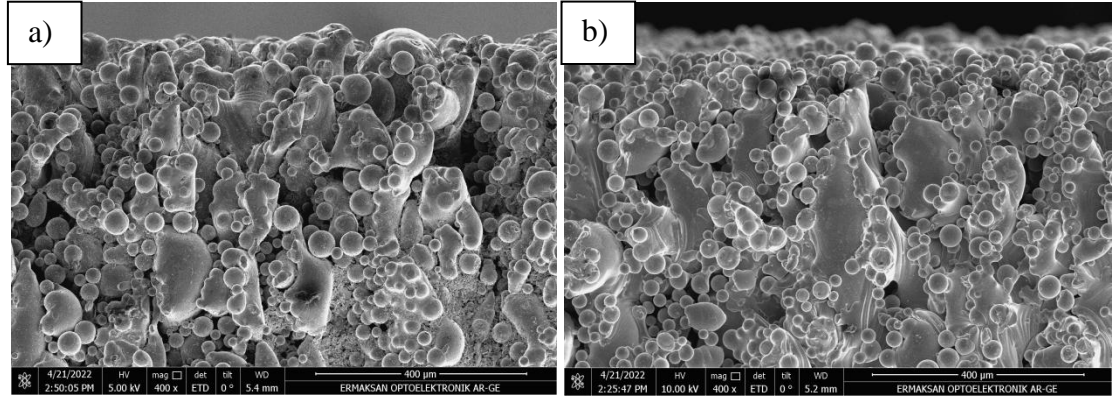
Şekil 4.15. Isıl işlem görmemiş yüzeylerde lazer gücü değişiminin a)190 b)220 c)250 W SEM görüntüleri (400x büyütme)

Şekil 4.15.'te verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 1000 mm/s tarama hızında, sırasıyla 190-220-250 W lazer gücünde üretimi gerçekleştirilmiş ve ardından herhangi bir işlem görmemiş numunelere aittir. Lazer gücü arttıkça, tozların eridiği fakat hepsinde tamamen erimeydiği, yüzeyde gaz ve füzyon gözeneklerinin olduğu, bu gözeneklerin azaldığı gözlenmiştir.



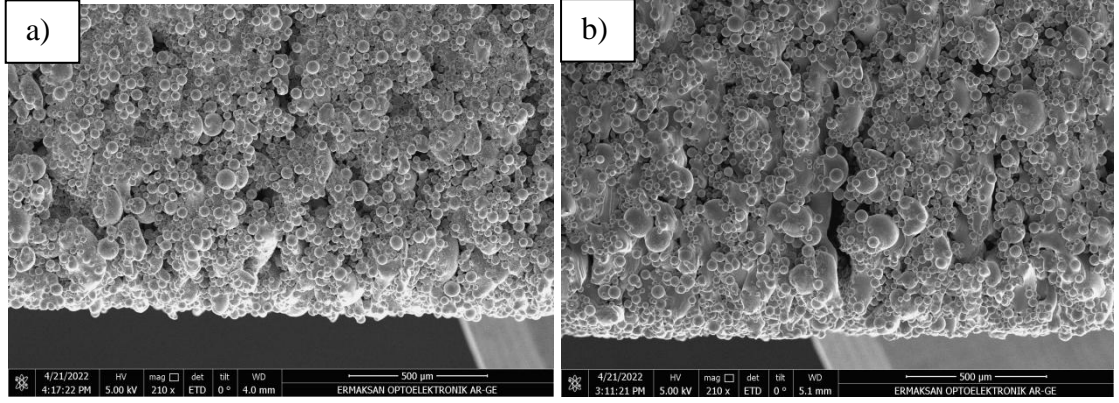
Şekil 4.16. a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıl işlem görmemiş yüzeylerde 800 mm/s'deki SEM görüntüleri (200x büyütme)

Şekil 4.16.'da verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 800 mm/s tarama hızında, 230 W lazer gücünde üretimi gerçekleştirilmiş sırasıyla ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş numunelere aittir. Isıl işlem sayesinde gözenek oranında azalma olduğu gözlenmiştir.



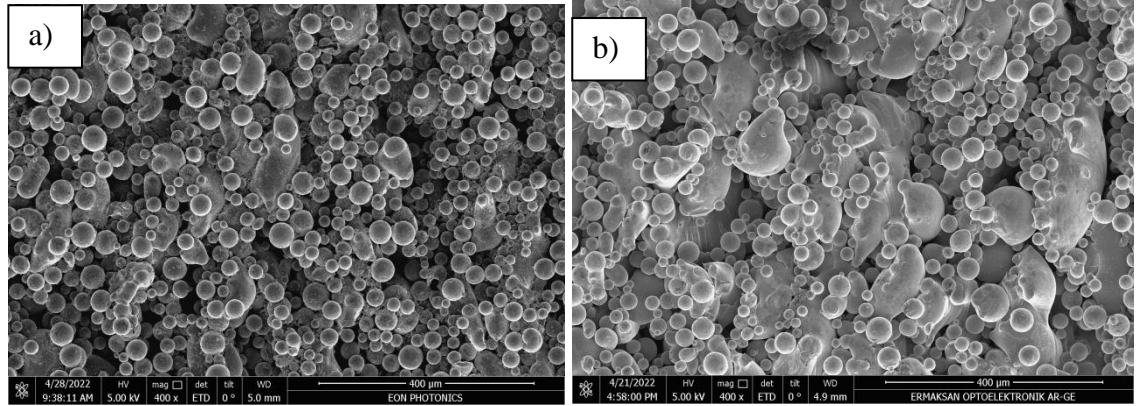
Şekil 4.17. a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıl işlem görmemiş yüzeylerde 1000 mm/s'deki SEM görüntüleri (400x büyütme)

Şekil 4.17.'de verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 1000 mm/s tarama hızında, 230 W lazer gücünde üretimi gerçekleştirilmiş sırasıyla ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş numunelere aittir. Isıl işlem sayesinde gözenek oranında azalma olduğu burada da görülmüştür.



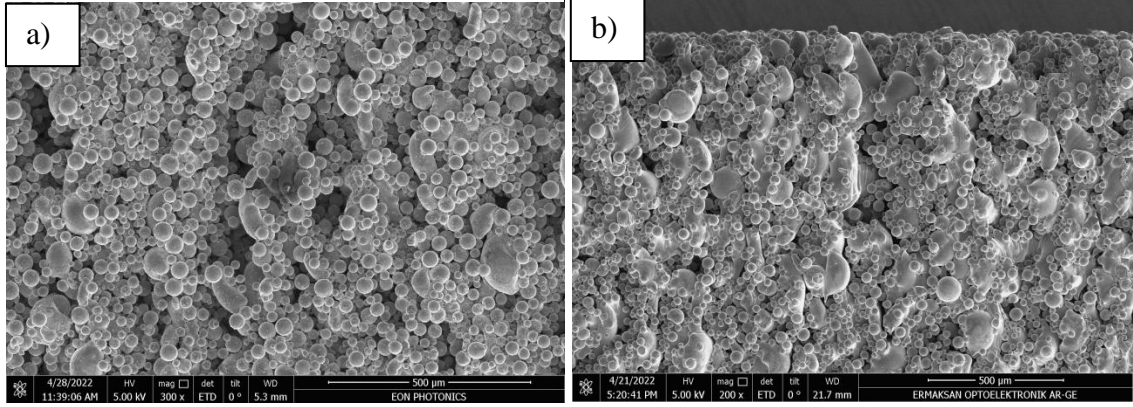
Şekil 4.18. a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıl işlem görmemiş yüzeylerde 1200 mm/s'deki SEM görüntüleri (210x büyütme)

Şekil 4.18.'de verilen görüntüler, Ti6Al4V numunenin üretimi 1200 mm/s tarama hızında, 230 W lazer gücünde üretimi gerçekleşmiş sırasıyla ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş numunelere aittir. Isıl işlem sayesinde gözenek oranında azalma olduğu burada da görülmüştür.



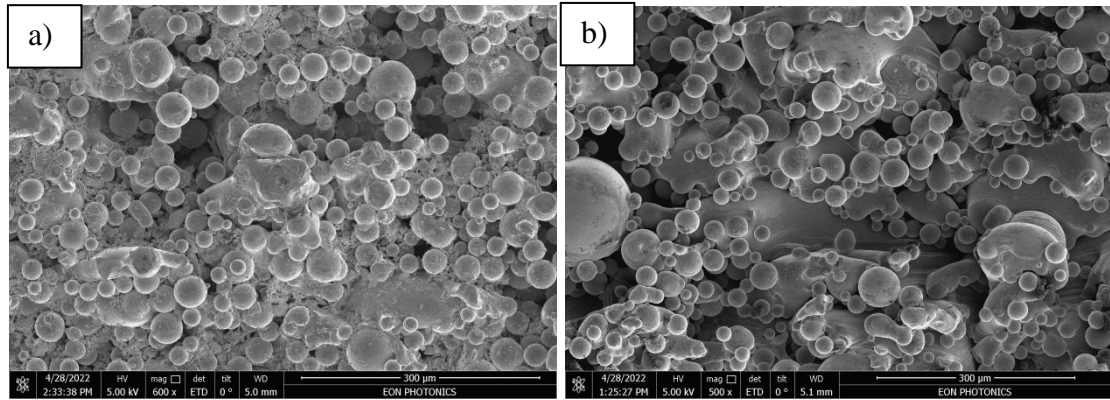
Şekil 4.19. a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıl işlem görmemiş yüzeylerde 190 W'taki SEM görüntüleri (400x büyütme)

Şekil 4.19.'da verilen görüntüler, Ti6Al4V numuneleri lazer gücü 190 W, tarama hızı olarak 1000 mm/s olarak üretimi gerçekleşmiş sırasıyla ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş numunelere aittir. Isıl işlem sayesinde gözenek oranında azalma olduğu burada da görülmüştür.



Şekil 4.20. a) Isıl işlem görmüş (300x büyütme) ve b) ısıl işlem görmemiş (200x büyütme) yüzeylerde 220 W'taki SEM görüntüleri

Şekil 4.20.'de verilen görüntüler, Ti6Al4V numuneleri lazer gücü 220 W, tarama hızı 1000 mm/s olarak üretimi gerçekleştirilmiş sırasıyla ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş numunelere aittir. Isıl işlem sayesinde gözenek oranında azalma olduğu burada da görülmüştür.



Şekil 4.21. a) Isıl işlem görmüş ve b) ısıl işlem görmemiş yüzeylerde 250 W'taki SEM görüntüleri (300x büyütme)

Şekil 4.21.'de verilen görüntüler, Ti6Al4V numunelerinin üretimi lazer gücü 250 W, tarama hızı 1000 mm/s'de üretimi gerçekleştirilmiş sırasıyla ısıl işlem görmüş ve ısıl işlem görmemiş numunelere aittir. Isıl işlem sayesinde gözenek oranında azalma olduğu burada da görülmüştür.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Eİ tezgâhında tarama hızı ve lazer gücü parametreleri değiştirilerek Ti6Al4V alaşımı deney numunelerinin mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü Ra değeri tarama hızı arttıkça arttığı görülmüştür. İkincil işlemler Ra değerini daha da artırmıştır. En yüksek Ra değeri 19,51 μm , tarama hızı 800 mm/s ve ısıtma işlemi görmüş+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük Ra değeri ise 11,07 μm , tarama hızı 1200 mm/s ve ısıtma işlemi görmüş numunede görülmüştür. Bunun nedeni tarama hızının artarken toz malzemenin ergimeye yeterli süresinin olmaması ve katılma hızının azalmasıdır.

Ra değeri lazer gücü arttıkça azaldığı görülmüştür. Isıtma işlemlerinin Ra değerini etkilemediği görülmüştür. Isıtma işlemi+kumlama da ise Ra değeri arttığı görülmüştür. En yüksek Ra değeri 15,71 μm , lazer gücü 250 W ve ısıtma işlemi görmüş+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük Ra değeri ise 10,10 μm , tarama hızı 1200 mm/s ve lazer gücü 250 W ve ısıtma işlemi yapılmamış numunede görülmüştür. Bunun nedeni gücün sıcaklığı yükselterek bir önceki katmanın etkileyerek ergimeyi sağlaması ve eriyiğin daha homojen bir hal almasını sağladığı düşünülebilir.

Sertlik değeri 800-1000 mm/s de arttığı, 1000-1200 mm/s de ise azaldığı görülmüştür. İkincil işlemler (ısıtma işlemleri, kumlama) sertliği artırmıştır. En yüksek sertlik değeri 359 HV, tarama hızı 1000 mm/s ve ısıtma işlemi yapılmamış+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük sertlik değeri ise 255 HV, tarama hızı 800 mm/s ve ısıtma işlemi uygulanmamış numunede görülmüştür. Bunun nedeni, numune üretilirken alt ve üst katmanların arasında soğuma hızı, alt ve üst katmana göre çok daha yavaştır. Ara katman, alt ve üst katmanlarla ısınma ve soğuma ile sürekli ısı alışverişindedir. Bu sebeple, üst ve alt katmanların soğuma hızı yüksek olduğu için mikrosertliği de daha yüksektir. Bu yüzden taneciklerin, iç mikrosertliğin ve iç gerilmelerin homojen bir şekilde olması için numunelere Eİ'den sonra ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Sertlik değerinin lazer gücü arttıkça değişmediği görülmüştür. İkincil işlemler (ısıtma işlemleri, kumlama) sertliği artırmıştır. En yüksek sertlik değeri 359 HV, lazer gücü 250 W parametrelerinde ve ısıtma işlemi yapılmamış+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük sertlik

değeri ise 309 HV, lazer gücü 220 W parametrelerinde ve ısıtma işlemi uygulanmamış numunede görülmüştür.

Sürtünme katsayısı COF değeri, 800-1000 mm/s de arttığı, 1000-1200 mm/s de ise azaldığı görülmüştür. İkincil işlemlerden ısıtma işlemler de COF, 800-1000 mm/s aralığında azaldığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise arttığı görülmüştür. Aynı şekilde ısıtma işlemi+kumlanma uygulamasında ise COF değeri 800-1000 mm/s aralığında tarama hızı arttıkça arttığı, 1000-1200 mm/s aralığında ise tarama hızı arttıkça COF değerinin azaldığı görülmüştür. En yüksek COF değeri 0,4031 tarama hızı 1000 mm/s ve ısıtma işlemli+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük COF değeri ise 0,2385 tarama hızı 1000 mm/s ve ısıtma işlemi görmüş numunede görülmüştür. Isıtma işlemi görmüş numunede COF un keskin düşüşün nedeni yüzey pürüzlülüğünden kaynaklıdır ve aşınma testi esnasında numune yüzeyinden aşınan malzemenin aşındırıcı uç üzerine yapışıp ucun git-gel hareketi sonucu tekrar ayrılmasıyla COF değerinin farklı değerler çıkmasına neden olmuştur.

Sürtünme katsayısı COF değeri, lazer gücü arttıkça azaldığı görülmüştür. Isıtma işlemler de COF, 190-220 W aralığında azaldığı, 220-250 W aralığında ise arttığı görülmüştür. Isıtma işlemler+kumlamada ise COF, 190-220 W aralığında arttığı, 220-250 W aralığında ise azaldığı görülmüştür. En yüksek COF değeri 0,3883 lazer gücü 220 W ve ısıtma işlemli+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük COF değeri ise 0,1958 lazer gücü 220 W ve ısıtma işlemi görmüş numunede görülmüştür.

Aşınma direnci değerinin tarama hızı arttıkça 800-1000 mm/s de arttığı, 1000-1200 mm/s de ise azaldığı görülmüştür. Isıtma işlemler ve kumlamada ise 800-1000 mm/s de arttığı, 1000-1200 mm/s de ise azaldığı görülmüştür. En yüksek aşınma direnci değeri $81,29 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ tarama hızı 1000 mm/s ve ısıtma işlemi+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük aşınma direnci değeri ise $57,74 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ tarama hızı 800 mm/s ve ısıtma işlemi görmemiş numunede görülmüştür.

Aşınma direnci değerinin lazer gücü arttıkça çok fazla değişmediği görülmüştür. Aynı şekilde ikincil işlemlerde de değişmediği görülmüştür. Bunun nedeni sertlik ile benzer değişim görülmüştür. En yüksek aşınma direnci değeri $81,93 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ lazer gücü

250 W ve ısıtıl işlem görmüş+kumlanmış numunede görülmüştür. En düşük aşınma direnci değeri ise $69,61 \text{ Nm/mm}^3 \times 10^2$ lazer gücü 220 W ve ısıtıl işlem görmemiş numunede görülmüştür.

SEM görüntülerinde tarama hızı arttıkça tozların erimediği, gaz ve füzyon gözeneklerinin arttığı görülmüştür. İkincil işlem olarak ısıtıl işlemler+kumlama da yüzeylerin iyileştiği, ısıtıl işlemlerde ise gözeneklerin azaldığı görülmüştür.

SEM görüntülerinde lazer gücü arttıkça tozların eridiği, gaz ve füzyon gözeneklerinin azaldığı görülmüştür. İkincil işlem olarak ısıtıl işlemler+kumlama da yüzeylerin iyileştiği, ısıtıl işlemlerde ise gözeneklerin azaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak istenilen mekanik ve tribolojik özellik için işlem parametrelerinden tarama hızı ve lazer gücü optimize edilerek üretim yapılabilir.

KAYNAKLAR

Aboulkhair, N.T., Everitt, N.M., Ashcroft, I. & Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 1-4, 77-86. Doi: 10.1016/j.addma.2014.08.001

Altuncu E. (2010). Katmanlı İmalat İle Üretilen Parçalara Uygulanan Yüzey İşlemler, Endüstriyel Boya, Toz Boya, Yüzey İşlem Kimyasalları, Boya Uygulama ve Kaplama Teknolojileri, https://sumar.subu.edu.tr/sites/sumar.subu.edu.tr/files/2020-11/Katmanlı%20C4%B1%20C4%B0malat%20C4%B0le%20C3%9Cretilen%20Par%20C3%A7a%20Y%20C4%B0_0.pdf-(Erişim tarihi: 15.05.2023).

Anselme, K. and Bigerelle M. (2005). Topography effects of pure titanium substrates on human osteoblast long-term adhesion. *Acta Biomaterialia*, 1(2), 211–222.

Anonim, (b.t.). Introduction of SLM process. University of Birmingham. <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/irc/amp-lab/SLM.pdf>

Anonim, (2022a). Eklemeli İmalat Global Pazarı. <https://www.statista.com/statistics/284863/additive-manufacturing-projected-global-market-size->(Erişim tarihi: 27.05.2022).

Anonim, (2022b). Eklemeli imalat için metal tozları. <http://eklemeliimalat.info.tr/3-eklemeli-imalat-icin-metal-tozlari/>- (Erişim tarihi: 25.06.2022).

Anonim, (2022c). Nourished.. <https://get-nourished.com/>-(Erişim tarihi: 27.05.2022).

Anonim, (2022d). What Is DMLS? All3dp. <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>- (Erişim tarihi: 27.05.2022).

Anonim, (2022e). What is Micro Laser Sintering? 3D MicroPrint GmbH. <https://www.3dmicroprint.com/technology/what-is-micro-laser-sintering/>-(Erişim tarihi: 27.05.2022).

Anonim, (2023a). ENA. https://www.ermaksanadditive.com/Upload/Katalog/EnaIcon_TR.pdf - (Erişim tarihi: 10.04.2023).

Anonim, (2023b). Wikipedi. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Titanyum-> (Erişim tarihi: 05.05.2023).

Anonim, (2023c). MTA. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/titanyum> - (Erişim tarihi: 05.05.2023).

Anonim, (2023d). Chemical Composition of Ti and Its Alloys. <https://standards.globalspec.com/std/10155807/ASTM%20F67-> (Erişim tarihi: 05.05.2023)

Anonim, (2023e).Ermaksan makine. <https://www.ermaksanadditive.com/tr-TR/3d-yazicilar/enavision-400->(Erişim tarihi: 09.05.2023).

Anonim, (2023f). Eklemeli imalat.<http://eklemeliimalat.info.tr/>-(Erişim tarihi: 09.05.2023).

Anonim, (2023g).Carbon 3D. [https://www.carbon3d.com/resources/case-study/adidas/-](https://www.carbon3d.com/resources/case-study/adidas/)(Erişim tarihi: 12.05.2023).

Anonim, (2023h). Aşınma nedir. <https://insapedia.com/asinma-nedir-asinma-cesitleri-ve-etki-eden-faktorler/#:~:text=Y%C3%BCzeye%20uygulanan%20y%C3%BCk%20s%C3%BCrekli%20ve,a%C5%9F%C4%B1nmalar%20yorulma%20a%C5%9F%C4%B1nmas%C4%B1%20olarak%20adland%C4%B1r%C4%B1l%C4%B1r->(Erişim tarihi: 07.06.2023).

Baykal M. ve Karaca İ. (2012). Zn İlavesinin BiPbSrCaCuO Süper İletkenlerinin Mikrosertlik Özellikleri Üzerine Etkileri, *NWSA-Physical Sciences Dergisi*, Cilt 7, Sayı 1.

Bian, L., Shamsaei, N. & Usher, J. M. (2017). Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts. *Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*. (Vol. 148). <https://doi.org/10.1201/9781315151441>

Bici, M., Brischetto, S., Campana, F., Ferro, C. G., Seclì, C., Varetto, S., Maggiore, P., & Mazza, A. (2018). Development of a multifunctional panel for aerospace use through SLM additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 67, 215-220.

Bhushan B. (2013). Introduction To Tribology, Second edition, The Ohio State University, 201-205

Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., Bültmann, J. (2011). “High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts”, *Physics Procedia*, 12, 271–278.

Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N., Ludovico, A. D. (2015). “Experimental investigation and statistical optimization of the selective laser melting process of a maraging steel”, *Optics & Laser Technology*, 65, 151-158.

Dawes, J., Bowerman, R., Trepleton, R. (2015). Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. *Johnson Matthey Technology Review*, 59(3), 243-256.

Dedeakayoğulları, H. (2020). Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, Cilt: 1, No: 1, 2020 (1-12)

Dietrich, S. Wunderer, M., Huissel, A., Zaeh, M. F., (2016). A New Approach For A Flexible Powder Production For Additive Manufacturing, *Procedia Manufacturing*, 6, 88-95.

Dursun, A.M. (2019). Değişken Gözenekli Hücresel Yapıların Metal Eklemeli İmalat İçin Tasarımı ve Üretilen Yapıların Tasarım İle Uyumluluğunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Dutta, B. & Froes, F.H. (2017). The Additive Manufacturing (AM) Of Titanium Alloys, *Metal Powder Report*. Volume 72, Issue 2, March–April 2017, Pages 96-106

Ensarioğlu, C. ve Çakır, M. C. (2005). Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü. *Mühendis ve Makina*, 46(546), 36 - 46.

Ergene, B. (2020). “Eklemeli İmalat ile Titanyum ve Polimer Esaslı Malzemelerden Üretilen Hücresel Yapıların Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması” Doktora Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Fujii, H. (1998). Strengthening of $\alpha + \beta$ titanium alloys by thermomechanical processing. *Materials Science and Engineering A*, 243(1–2), 103–108.

Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., and Nandwana, P. (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Additive Manufacturing*. 10, 47–57.

Greitemeier, D., Dalle Donne, C., Syassen, F., Eufinger, J., and Melz, T. (2016). Effect of surface roughness on fatigue performance of additive manufactured Ti–6Al–4V. *Materials Science and Technology*. 32(7), 629–634.

Groover, M. P. (2012). Metal Forming and Sheet Metalworking. In *Fundamental of Modern Manufacturing Material, Processes, and System*.

Gülcan, O., Konukseven, E.İ., Temel, S. (2017). Katmanlı İmalatla Üretilen Ti6Al4V Parçalarının Mekanik Özellikleri, *Makina Tasarım Ve İmalat Dergisi*, Cilt 15, Sayı 1.

Hanzl, P., Zetek, M., Bakša, T. & Kroupa, T. (2015). The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. *Procedia Engineering*. 100(January):1405–1413.

Henriques, V. A. R., Galvani, E. T., Petroni, S. L. G., Paula, M. S. M., and Lemos, T. G. (2010). Production of Ti-13Nb-13Zr alloy for surgical implants by powder metallurgy. *Journal of Materials Science*, 45(21), 5844–5850.

Karabulut, Y. (2020). Eklemeli İmalat Yöntemiyle Farklı Cidar Kalınlıklarında Üretilen Inconel 718 Alaşım Malzemesine Uygulanan İkincil İşlemlerin Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Kaya, M.Ş. (2021). Helikopter için eklemeli imalat ile Ti6Al4V dişli üretimi ve ardıl işlemlerin etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi. Ankara.

Kayacan, M. Y. ve Yılmaz, N. (2019). DMLS ile eklemeli imalatta dengesiz sıcaklık dağılımı ve parçaya etkilerinin araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 79–94.

Kayır, S. ve Hasırcı H. (2021). Katmanlı İmalat Yöntemi İle Malzeme Yüzey Kaplanabilirliğinin Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makine Dergisi*, Ocak 2021 Sayısı.

Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V. (2011). “Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel”, *Physics Procedia*, 12, 255-263.

Khan, H.M. (2019). Seçici lazer ergitme yöntemiyle metal alaşımlarında mikrokanal üretiminin deneysel ve sayısal incelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Khan, M., Sheikh, N. A., Jaffery, S. H. I., Ali, L., and Alam, K. (2014). Numerical simulation of meltpool instability in the selective laser melting (SLM) process. *Lasers in Engineering*, 28(5–6), 319–336.

King, A.T., Anderson, R.M., Ferencz, N.E., Hodge, C., Kamath, S.A., Khairallah, ve Rubenchik, A.M. (2015). “Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges,” *App. Phys. Rev.*, vol. 2, Dec 2015, Art. no. 041304.

Kor, Ö. (2019). Bağlayıcı Püskürtmeli Eklemeli İmalat İle İmal Edilen Parçaların Bronz Emdirilerek İçyapı Özelliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi. Isparta.

Kurgan N. (2023). MAK 453 Triboloji ders notları.
<https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/naci.kurgan/71129/07.%20S%C3%BCrt%C3%BCnme%20ve%20A%C5%9F%C4%B1nma%20%C3%96l%C3%A7%C3%BCm%20Y%C3%B6ntemleri.pdf>-(Erişim tarihi: 09.04.2023).

Li, P.H., Guo, W.G., Huang, W.D., Su, Y., Lin, X., Yuan, K. B. (2015). Thermomechanical response of 3D laser-deposited Ti–6Al–4V alloy over a wide range of strain rates and temperatures, *Mater. Sci. Eng. A* 647, 34–42.

Liu, A., Chua, C.K. & Leong, K.F. (2010). Properties of test coupons fabricated by selective laser melting. In *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ.

Neikov, O. D. (2019). Atomization and Granulation, O. Neikov içinde, *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, 125-185, Kiev, Ukraine, Elsevier.

Oyar, P. (2015). Titanyum ve Özellikleri. Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 11, 151-159.

Özbek, İ. (2016). Malzeme Seçimi ve Prensipieri. 57s.

Poovich A. & Sufiiarov V. (2016). Metal Powder Additive Manufacturing. *New Trends in 3D Printing*, 215-236, St. Petersburg, Russia.

Rahmati, S. (2014). Direct Rapid Tooling. *Comprehensive Materials Processing*, 10, 303-344.

Sağbaşı, B. (2013). Kalça Protezlerinde Sürtünmeye Bağlı Olarak Değişim Gösteren Fiziksel Büyüklüklerin Ve Geometrik Özelliklerin Ölçüm, Analiz Ve Metrolojik Değerlendirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. 2015s, İstanbul.

Stachowiak, G.W., Batchelor A.W. (1993). *Engineering Tribology* 24. Cilt Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi. 24. Cilt Tribology series, ISSN 0167-8922

Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3b baskı): teknolojiler ve uygulamalar. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 2

Şener, B. (2023). Seçici Lazer Ergitme İle Üretilen Katmanlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Tammas-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I., Prangnell, P.B. (2015). XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by selective electron beam melting, *Mater. Charact.* 102, 47-61.

Turhan, S., Özsoy, A. (2016). DMLS Yöntemiyle İmal Edilen Ti6Al4V Alaşım Özelliklerine İşlem Parametrelerinin Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 8(2), 15-27.

Usta, O. (2019). Hızlandırılmış Erozyon Testleriyle Malzemelerin Kavite Erozyonu Özelliklerinin İncelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*. Sayı 216, Aralık 2019.

Ünal, R. (2022). Metal tozları. <http://rahmiunal.net/dersler/toz/7powderproperty.pdf> (Erişim tarihi: 28.05.2022)

Wang, X. Gong, X., Chou, K., (2015). "Scanning speed effect on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam additive manufacturing", *Procedia Manufacturing*, 1 , 287-295.

Weissbach, W. (1993). Malzeme Bilgisi ve Muayenesi (Çev: S. Anık, S. Anık ve M. Vural). İstanbul: Birsen Kitabevi. (Eserin orijinali 1989'da yayımlandı), 248-251.

Wroe, J. (2015). Introduction to Additive Manufacturing Technology: A Guide for Designers and Engineers. *European Powder Metallurgy Association*, 28-34. www.epma.com/am

- Yakout, M., Elbestawi, M. A. and S. C. Veldhuis. (2018). A review of metal additive manufacturing Technologies. *Solid State Phenom*, 278, 1–14.
- Yaman, K. (2018). Ti6Al4V Alaşımı Yüzeyinde Hidrotermal Yöntemi İle Hidroksiapatit (Hap) Oluşturulması. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi. Elazığ.
- Yeşildağ, İ.ve Günay, M. (2019). Eklemeli İmalatın Metal Malzemelere Uygulanması Üzerine Bir Değerlendirme, 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Dıigital Industry, Nisan 2019.
- Yıldırım, A. (2022). Eklemeli İmalat Ve Geleneksel İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımı Parçaların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi. Denizli.
- Yılmaz, D. (2016). “Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları”, STM Sektör Değerlendirme Raporu, 1-31.
- Yuan, L., Ding, S. & Wen, C. (2019). Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioactive Materials*, 4(1), 56-70.
- Yu, J., Lin, X., Ma, L., Wang, J., Fu, X., Chen, J. (2011). “Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF)”, *Material Science and Engineering A*, 528, 1094-1104.
- Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S., and Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface & Coatings Technology*, 200(7), 2192-2207
- Zhou, L., Yuan, T., Tang, J., He, J., and Li, R. (2019). Mechanical and corrosion behavior of titanium alloys additively manufactured by selective laser melting – A comparison between nearly β titanium, α titanium and $\alpha + \beta$ titanium. *Optics and Laser Technology*, 119, 1–12.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Semih YAŞAR
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 20.09.1989
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Cumhuriyet Lisesi/BURSA 2007
Lisans : Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, 2012

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Ermaksan Makine San. ve Tic. AŞ.

İletişim (e-posta) : semihyasar16@gmail.com

Yayımları : Yaşar, S., Aydın, H. 2023. Ti6Al4V Alaşımının Eklemeli
İmalat Yöntemiyle Üretiminde Tarama Hızının Tribolojik Özelliklere Etkisi. 9th
International Congress on Engineering and Technology Management, 276-287