



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE DEĞİŞKEN
ÜRETİM PARAMETRELERİ KULLANILARAK
ÜRETİLEN 316L PASLANMAZ ÇELİĞİN YAPISAL VE
TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ufuk GENÇOĞLU

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Fatih YILDIZ**

2021

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE DEĞİŞKEN ÜRETİM
PARAMETRELERİ KULLANILARAK ÜRETİLEN 316L PASLANMAZ
ÇELİĞİN YAPISAL VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ufuk GENÇOĞLU

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

24 / 09 / 2021

Ufuk GENÇOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE DEĞİŞKEN ÜRETİM PARAMETRELERİ KULLANILARAK ÜRETİLEN 316L PASLANMAZ ÇELİĞİN YAPISAL VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ufuk GENÇOĞLU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

Eklemeli üretim yöntemlerinden birisi olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi ile üretilen parçaların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri, üretimde kullanılan parametre ve stratejilerden büyük oranda etkilenmektedir. Dolayısı ile üretimde kullanılacak parametrelerin, malzemenin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisinin bilinmesi/kontrol edilmesi ve optimum üretim şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Bu tez çalışmasında, söz konusu üretim parametrelerinin 316L paslanmaz çeliğinin yapısal, mekanik özellikleri ve aşınma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. SLE yöntemi ile gerçekleştirilen üretim işlemlerinde çok sayıda üretim parametresi sürece dahil olduğu için, optimum üretim parametreleri belirlenirken sistematik olarak parametre azaltılması suretiyle malzeme ve zaman tasarrufu sağlanmaya çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, lazer enerji yoğunluğunu doğrudan etkileyen lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı ve yana kayma mesafesi parametreleri, 316L paslanmaz çeliğin mekanik ve tribolojik özellikleri performans kriteri esas alınarak, X-ışını kırınım ölçer (XRD), mikrosertlik cihazı, termal iletkenlik ölçüm cihazı, tribometre cihazı, optik mikroskop, 3B optik profilometre ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile optimize edilmiştir. Sonuç olarak, SLE yönteminde kullanılan üretim parametre/stratejilerinin 316L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri ve aşınma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

2021, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Seçici Lazer Ergitme, 316L Paslanmaz Çelik, Lazer Parametreleri, Mekanik Özellikler, Aşınma.

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF 316L STAINLESS STEEL MANUFACTURED USING VARIABLE PRODUCTION PARAMETERS BY SELECTIVE LASER MELTING METHOD

Ufuk GENÇOĞLU

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

Supervisor: Prof. Dr. Fatih YILDIZ

The structural, mechanical and tribological properties of the parts manufactured by the Selective Laser Melting (SLM) method, which is one of the additive manufacturing methods, are greatly affected by the parameters and strategies used in manufacturing. Therefore, it is extremely important to know/control the effect of the parameters to be used in manufacturing on the mechanical and tribological properties of the material and to determine the optimum production conditions. In this thesis, the effects of these production parameters on the structural, mechanical properties and wear performance of 316L stainless steel were investigated. Because many production parameters are involved in the SLM method, it was tried to save material and time by systematically reducing the manufacturing parameters. In experimental studies, the parameters of laser power, scanning speed, layer thickness and hatch distance, which directly affect the laser energy density, were investigated. The effects of these parameters on the mechanical and tribological properties of 316L steel were investigated with X-ray diffraction meter (XRD), microhardness device, thermal conductivity device, tribometer device, optical microscope, 3D optical profilometer and scanning electron microscope (SEM). As a result, it was determined that the manufacturing parameters/strategies used in the SLM method have a significant effect on the mechanical properties and wear performance of 316L stainless steel.

2021, 62 pages

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, 316L Stainless Steel, Laser Parameters, Mechanical Properties, Wear.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimin ve tezin oluşumundan tamamlanmasına kadar geçen süreçte bana her zaman destek olan Tez Danışmanım Prof. Dr. Fatih YILDIZ' a en içten duygularım ile teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım ve tezin tamamlanması sırasında yardım ve katkılarından ötürü Dr. Öğr. Üyesi İlyas HACISALİHOĞLU, Arş. Gör. Gürkan KAYA ve Mak. Yük. Müh. Tevfik Oğuzhan ERGÜDER' e içtenlikle teşekkür ederim.

Lisans ve Yüksek Lisans döneminde desteklerini esirgemeyen ve bana her zaman destek olan aileme teşekkür ederim.

Ufuk GENÇOĞLU
Eylül 2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Üretim	1
1.2. Geleneksel ve Yenilikçi İmalat Yöntemleri.....	2
1.3. Eklemeli İmalat	4
1.4. Lazer Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri	6
1.4.1. Toz yatak esaslı yöntemler.....	6
1.4.2. Akış bazlı yöntemler	11
1.4.3. Levha laminasyon	12
1.5. Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları	12
2. KAYNAK ÖZETLERİ	14
3. MATERYAL ve YÖNTEM	22
3.1. Materyal	22
3.2. SLE Yöntemi ile Test Numunelerinin Üretimi	22
3.3. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi	24
3.4. Mikro Yapısal İncelemeler.....	24
3.5. Aşınma Deneyleri.....	25
3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	26
3.7. 3B Yüzey Profilometre Analizleri	27
3.8. Mikrosertlik Ölçümleri.....	27
3.9. Çekme Testleri	28
3.10. Termal Analiz Ölçümleri	29
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	30
4.1 Toz Formundaki 316L Paslanmaz Çeliğe Ait Özellikler.....	30

4.2. SLE Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi	31
4.2.1 Tekli lazer izlerinin yüzey morfolojisi.....	31
4.2.2. Eriyik havuzu morfolojisi	34
4.2.3 SLE Yöntemi ile üretilen kontur yapılarının karakterizasyonu ve lazer tarama hızı optimizasyonu.....	36
4.2.4. SLE yöntemi ile üretim işlemleri için yana kayma parametresinin optimizasyonu.....	38
4.3 Tribolojik Özelliklerin Karakterizasyonu	47
4.3.1. Geleneksel ve SLE yöntemi üretilen numunelerin sürtünme katsayıları	48
4.3.2 Geleneksel ve SLE yöntemi üretilen numunelerin aşınma oranları ve mikrosertlik değerleri.....	50
4.3.3. Aşındırılmış yüzeylerin karakterizasyonu.....	52
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	56
5.1. Sonuçlar	56
5.2. Öneriler	58
KAYNAKLAR	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A°	Angström
λ	Dalga boyu
h	Yana kayma mesafesi
HV	Vickers sertlik değeri
m	Metre
μm	Mikron metre
N	Newton
P	Lazer gücü
Ra	Yüzey pürüzlülüğü
s	Saniye
t	Katman kalınlığı
V	Lazer tarama hızı
W	Watt

Kısaltmalar

3B	3 Boyutlu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAM	Bilgisayar Destekli İmalat
CNC	Bilgisayar Sayısal Kontrol
COF	Sürtünme Katsayısı
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
Eİ	Eklemeli İmalat
LMS	Lazer Mikrosinterleme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLE	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
STL	STereoLithography
XRD	X Işını Difraktometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Üretim şeması	1
Şekil 1.2. İmalat işlemlerinin sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.3. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen endüstriyel ürünler	5
Şekil 1.4. Eklemeli imalat sınıflandırılması.....	5
Şekil 1.5. Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemleri	6
Şekil 1.6. Toz yatak üretim döngüsü	7
Şekil 1.7. Seçici lazer sinterleme	8
Şekil 1.8. Doğrudan metal lazer sinterleme	9
Şekil 1.9. Lazer sinterleme.....	10
Şekil 3.1. Concept lazer MLab R SLE cihazı	23
Şekil 3.2. XRD cihazı	24
Şekil 3.3. Optik mikroskop cihazı	25
Şekil 3.4. Aşınma test cihazı.....	26
Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	26
Şekil 3.6. 3B Profilometre cihazı.....	27
Şekil 3.7. Mikrosertlik cihazı.....	28
Şekil 3.8. INSTRON 5982 statik test cihazı	28
Şekil 3.9. Termal iletkenlik cihazı	29
Şekil 3.10. Termal analiz cihazının şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.1. 316L paslanmaz çelik toz malzemeye ait SEM görüntüsü.....	30
Şekil 4.3. Farklı lazer gücü ve tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait eriyik havuzu görüntüleri	33
Şekil 4.4. Kontur yapılarının geometrisi ve üretim platformundaki görünümü	36
Şekil 4.5. Kontur yapılarına ait SEM görüntüleri, a-b) 100W-600 mm/s, c-d) 100W-800 mm/s, e-f) 100W-1000 mm/s	37
Şekil 4.6. Yana kayma miktarına ait şematik bir gösterim.....	38
Şekil 4.7. 100W-600 mm/s parametresi ile üretilen kontur yapısına ait optik mikroskop görüntüsü	39
Şekil 4.8. Çekme numunelerinin üretim platformundaki görünümü	39
Şekil 4.9. Farklı yana kayma miktarları ile üretilen numunelerin çekme eğrileri	40

Şekil 4.10. Farklı yana kayma miktarları ile üretilen numunelerin uzama değerlerindeki değişim	41
Şekil 4.11. Farklı yana kayma miktarları ile üretilen çekme numunelerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, a) %30 yana kayma, b) %40 yana kayma, c) %50 yana kayma, d) %60 yana kayma, e) %70 yana kayma, f) %80 yana kayma, g) %90 yana kayma.....	42
Şekil 4.12. a) %30, b) %70 yana kayma değerleri ile üretilen numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri	43
Şekil 4.13. Farklı yana kayma miktarları ve inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin mikroyapı SEM görüntüleri	44
Şekil 4.14. Farklı yana kayma miktarları ve inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin XRD grafiği.....	45
Şekil 4.15. Geleneksel yöntemle ve SLE yöntemi ile farklı yana kayma miktarları ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen numunelerin termal iletkenlik değerleri.....	46
Şekil 4.16. SLE yöntemi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen aşınma test numunelerinin şematik gösterimi	47
Şekil 4.17. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %60 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere ait sürtünme katsayısı grafiği	48
Şekil 4.18. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %70 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere ait sürtünme katsayısı grafiği	49
Şekil 4.19. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %80 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere ait sürtünme katsayısı grafiği	49
Şekil 4.21. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %60 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere aşınma izi SEM ve optik profilometre görüntüleri, a) Geleneksel, b) 0° inşa oryantasyonu, b) 45° inşa oryantasyonu, b) 90° inşa oryantasyonu.....	53
Şekil 4.22. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %70 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere aşınma izi SEM ve optik profilometre görüntüleri, a) Geleneksel, b) 0° inşa oryantasyonu, b) 45° inşa oryantasyonu, b) 90° inşa oryantasyonu.....	54

Şekil 4.23. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %80 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere aşınma izi SEM ve optik profilometre görüntüleri, a) Geleneksel, b) 0° inşa oryantasyonu, b) 45° inşa oryantasyonu, b) 90° inşa oryantasyonu.....55



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 316L paslanmaz çelik toz malzemenin kimyasal bileşimi	22
Çizelge 3.2. Aşınma parametreleri.....	25
Çizelge 4.1. Farklı lazer gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler.....	35
Çizelge 4.2. %60, 70 ve 80 yana kayma miktarları ile üretilen numunelere ait yoğunluk ve doluluk oranı değerleri	47
Çizelge 4.3. SLE yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak üretilen numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri	50

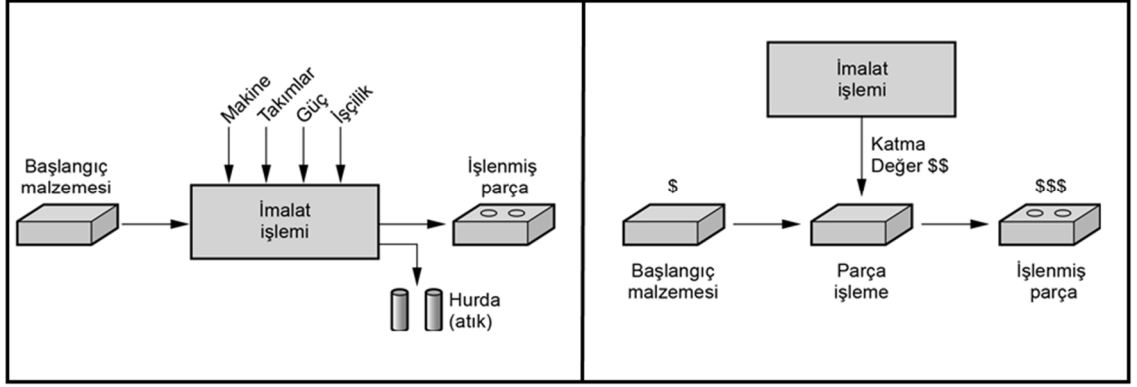


1. GİRİŞ

1. GİRİŞ

1.1. Üretim

Üretim (imalat), tüketicilerin bir ihtiyacını veya beklentisini karşılamak amacıyla doğada bulunan hammaddeleri veya bileşenleri istenilen özellik ve biçimdeki ürünlere dönüştüren bir süreç olarak tanımlanabilir (Groover, 2012) (Şekil 1.1.). Ayrıca üretim, işlediği malzemelere yeni bir değer katan bir süreçtir. Bu dönüşüm işlemi için farklı yöntemler ve makineler kullanılır.



Şekil 1.1. Üretim şeması

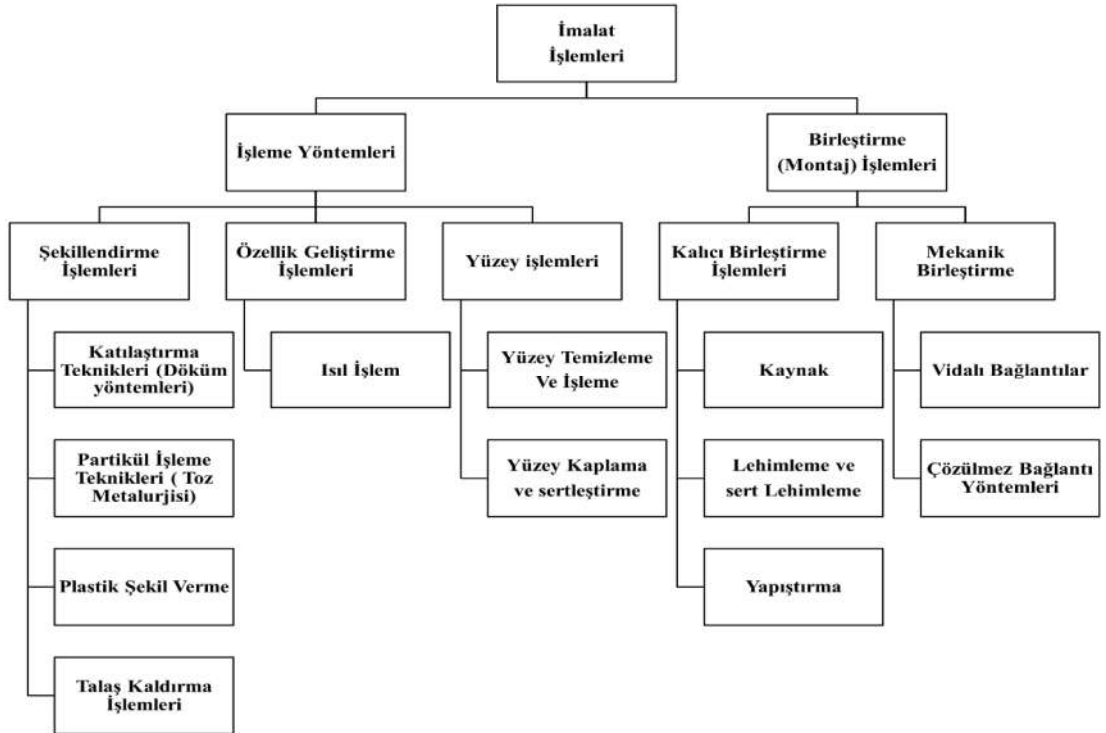
Üretim süreci, temel olarak, insanlar, bilgisayarlar, robotlar ve diğer ekipmanlar gibi çok sayıda otomasyon düzeyine sahip çeşitli makine, alet ve ekipmanla ilgilenen karmaşık bir faaliyettir. Teknoloji ilerledikçe, üretim süreçleri giderek daha da otomatik hale gelmekte olup, insan emeğine olan ihtiyaç azalırken özel makinelere olan ihtiyaç artmaktadır. Bir üretim yapılırken ürünün taşınması gereken bazı özellikler şunlardır.

- Yüksek verimlilik
- Kalite
- Esneklik (Değişen Şartlara Uyum)
- Çevre dostu
- Düşük maliyettir (Babalık & Çavdar, 2012).

1.2. Geleneksel ve Yenilikçi İmalat Yöntemleri

Bir imalat sürecinde, malzemenin katma değerini artırmak için iş parçasının şekli, fiziksel-kimyasal özellikleri veya görünüşünü değiştirmek için enerji kullanılır. Kullanılan enerji mekanik, ısı, elektrik ve kimyasal enerji olabilir. Bu işlem esnasında enerji makine veya cihazlar ile kontrollü bir şekilde uygulanır.

Üretim endüstrilerinde talaşlı imalat (frezeleme, tornalama, matkapla delme gibi) ve talaşsız imalat (plastik şekil verme yöntemleri, döküm, kaynak gibi) üretim yöntemleri geleneksel imalat yöntemleridir. Klasik üretim yöntemlerinin yanı sıra lazer kesim, plazma kesim, su jeti ile işleme, ultrasonik işleme ve elektroerozyon gibi alışılmamış imalat yöntemleri de son yıllarda yoğun olarak kullanılmaktadır (Dedeakayoğulları et al., 2020).



Şekil 1.2. İmalat işlemlerinin sınıflandırılması

İmalat endüstrisinde teknolojik gelişmeler yer almaya devam ederken, talaşlı imalat metalleri ve alaşımları şekillendirmek için kullanılan en önemli yöntem olmaya devam etmektedir. Diğer üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, talaşlı imalat, çok

1. GİRİŞ

yönlülüğü, yüksek doğruluğu ve yüzey bütünlüğünü ekonomik bir şekilde elde etme yeteneğine sahiptir. Farklı özelliklerdeki çoğu malzeme ve alaşımın talaşlı imalat ile işlenmesi mümkün olup, saat parçalarından uçak kanadı yedek parçalarına veya gemi pervanelerine kadar çoğu mühendislik ürünü talaşlı imalatla üretilebilir.

Diğer imalat teknikleri ile karşılaştırıldığında talaşlı imalat işlemlerinin aşağıdaki gibi birçok avantajı vardır:

- Döküm ve plastik şekil verme ile üretilen parçalara göre daha yüksek doğruluk ve kesinlikte geometriler üretilebilir.
- Yüksek yüzey kalitesi elde edilebilir.
- Üretimde parça şekillerinin ve özel geometrik formların çeşitliliği bulunmaktadır.
- Diğer üretim yöntemlerine kıyasla talaşlı imalat daha ekonomik bir yöntemdir.

Öte yandan, talaşlı imalatın aşağıdaki gibi dezavantajları vardır:

- Plastik şekil verme, döküm veya toz metalurjisi gibi alternatif yöntemlere göre daha uzun operasyon süreleri gerektirir.
- Talaşlı imalatta atık malzeme miktarı yüksektir.
- Yüksek nitelikli operatörler ve uzman personel gerektirir.
- Gelişmiş ölçüm araçları gerektirir.

Talaşsız geleneksel imalat yöntemleri olan döküm ve plastik şekil verme yöntemleri de üretim sürecinde birçok avantaj ve dezavantaja sahiptir. Örneğin döküm yönteminin sınırları oldukça geniş olup hem küçük parçaların hem de çok büyük parçaların üretimine imkan tanıyan alt teknikleri bulunmaktadır. Seri üretime uygun döküm yöntemleri geliştirilmesine rağmen az sayıda parça üretimi için genellikle ekonomik değildir. Özellikle kalıcı kalıp kullanılan yöntemlerde üretilecek geometri ile ilgili önemli sınırlamalar bulunmaktadır. Plastik şekil verme yöntemlerinde ise dayanım bakımından daha üstün özelliklere sahip ürünler imal edilebilmesine rağmen, genellikle hassas boyut toleranslarının ve iyi yüzey kalitelerinin sağlanması oldukça güçtür. Her iki üretim yönteminde de üretilen parçanın kullanım yerine bağlı olarak son işlem talaşlı imalat operasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.

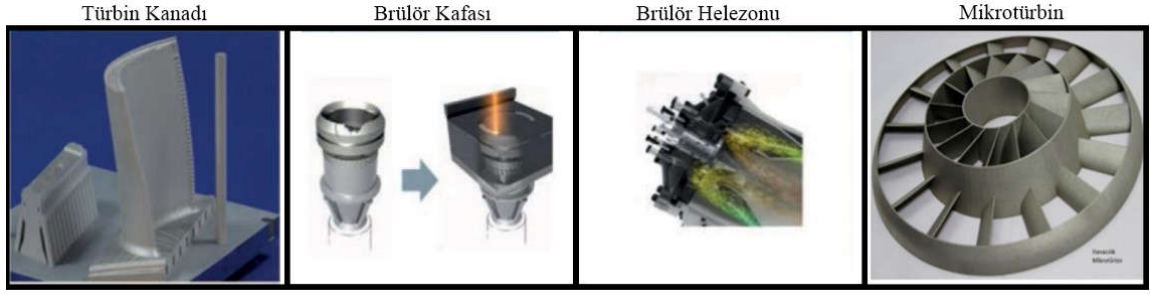
1.3. Eklemeli İmalat

Üç boyutlu (3B) baskı veya 3B fabrikasyon olarak da bilinen eklemeli imalat, malzeme katmanı üzerine yeni katmanlar ekleyerek nesnelere oluşturulmaya yönelik teknolojileri tanımlar. Bu teknikte yapılar, nihai ürünü oluşturmak üzere birleşen katmanların eklenmesiyle yapılır. 3B üretim yöntemi, metalik, polimer ve seramikler gibi birçok malzeme grubu için kullanılabilir. Teknoloji, ilk tekniğin polimer nesnelere basmak için uygulandığı 1980'lerdeki icadından bu yana hızla gelişmektedir. 3B baskı, genellikle her tür katmanlı imalatı belirtmek için kullanılan genel bir ifadedir. 3B baskı, bir baskı kafası, püskürtme ucu veya başka bir yazıcı teknolojisi kullanılarak malzemenin biriktirilmesi yoluyla nesnelere üretilmesi için bir yöntem olarak tanımlanır (Peleg, 2020).

Eklemeli imalat (Eİ) olarak adlandırılan bu teknolojinin temel prensibi, başlangıçta üç boyutlu Bilgisayar Destekli Tasarım (3B CAD) sistemi kullanılarak oluşturulan bir modelin, süreç planlamasına gerek kalmadan doğrudan üretilmesidir. Süreç, görüldüğü kadar basit olmasa da Eİ teknolojisi, doğrudan CAD verilerinden karmaşık 3B nesnelere üretme sürecini önemli ölçüde basitleştirir. Eİ'nin temel prensibi, parçaların katmanlara malzeme eklenerek üretilmesidir ve her katman, orijinal CAD verilerinden türetilen parçanın ince bir kesitidir. Açıkça fiziksel dünyada, her katmanın kendisine göre sonlu bir kalınlığa sahip olması gerekir ve bu nedenle ortaya çıkan kısım, orijinal verilerin bir yaklaşımı olmak durumundadır.

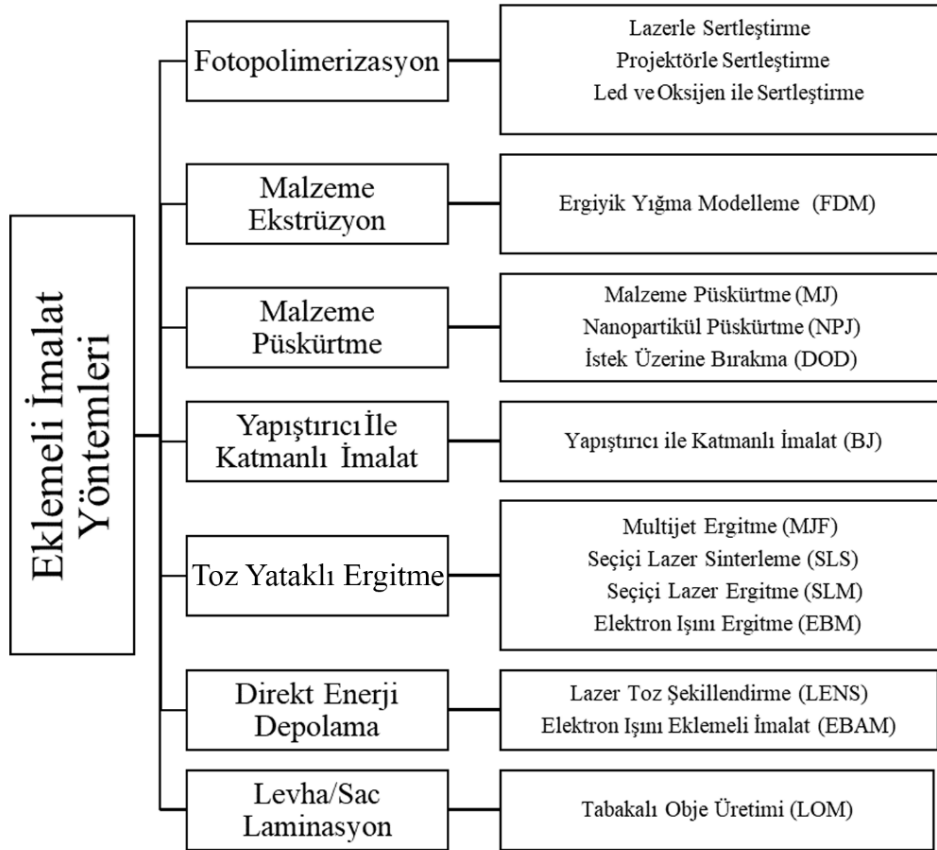
Her katman ne kadar ince olursa, son kısım orijinaline o kadar yakın olur. Bugüne kadar ticarileştirilmiş tüm Eİ makineleri, katman tabanlı bir yaklaşım kullanır ve farklılık göstermelerinin başlıca sebepleri, kullanılacak malzemeler, katmanların nasıl oluşturulduğu ve katmanların birbirine nasıl bağlandığıdır. Bu tür farklılıklar, nihai parçanın geometrik doğruluğu ve malzeme özellikleri gibi faktörleri belirlemektedir (Gibson et al., 2015). Atık malzeme miktarının yok denecek kadar az olması, talaşlı imalatı zor malzemelerin ve karmaşık geometriye sahip malzemelerin üretilmesine olanak sağlayan Eİ oldukça ilgi çekici bir teknoloji olmaktadır (Kaya, 2019). Şekil 1.3 ve 1.4'te eklemeli imalat ile üretilen endüstriyel ürünlere örnekler verilmiştir.

1. GİRİŞ



Şekil 1.3. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen endüstriyel ürünler (Navrotsky et al., 2015; Wroe, 2015)

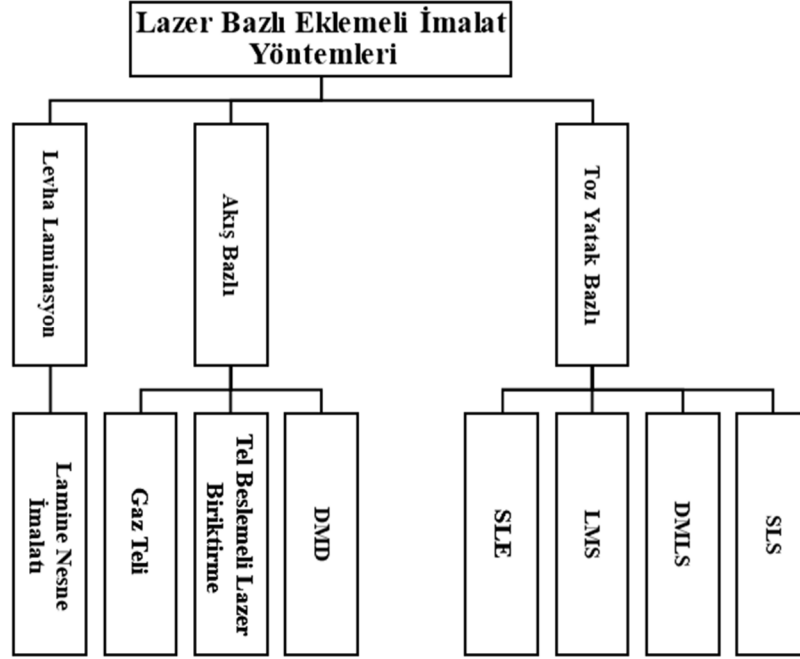
Oldukça farklı türde teknikleri olan eklemeli imalat kendi içerisinde sınıflandırılırken üretimde kullanılan araç ve gereçler, malzeme özellikleri gibi birçok farklı özellikler dikkate alınmaktadır. Wendel ve arkadaşlarına göre eklemeli imalatın sınıflandırılması Şekil 1.5'te gösterilmektedir (Wendel et al., 2008).



Şekil 1.4. Eklemeli imalat sınıflandırılması (Wendel et al., 2008)

1.4. Lazer Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri

Genellikle fizikçilerin çalışma alanı olan ve optimize edilmesi gereken bir araştırma cihazı olarak kabul edilen lazer, ilk kullanımıyla kıyaslandığında üretim alanında birçok ürünün geliştirilmesinde rol oynayan ve yeni pazarların oluşmasına yardımcı olan bir teknolojidir. Lazer teknolojisi imalatta çok çeşitli uygulamalarda kullanımı ile geleneksel üretim yöntemlerinin yerine geçerek, üretkenliği artırmak, ürün kalitesini iyileştirmek ve maliyetlerini azaltmak gibi birçok etkiye sahip olmuştur. Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemlerine ait bir sınıflandırma Şekil 1.6'da sunulmuştur. Bu bölümde lazerin gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan üretim tekniklerinden lazer esaslı eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması ve açıklamalarına yer verilmiştir.



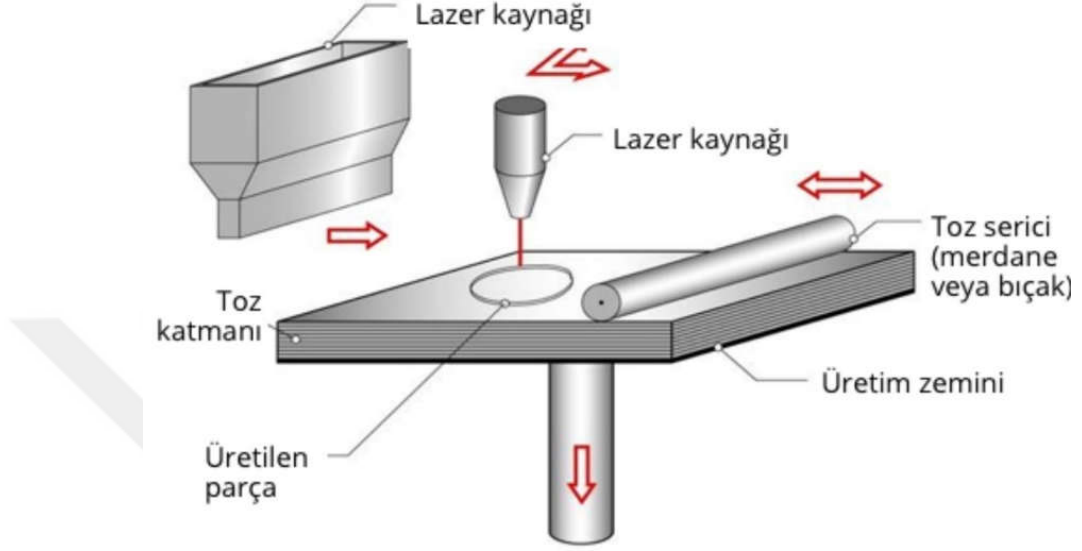
Şekil 1.5. Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemleri (Bian et al., 2017)

1.4.1. Toz yatak esaslı yöntemler

Toz yatağına dayalı teknikler normalde bir lazer, otomatik bir toz katmanlama aparatı (serici silgi veya rulo), proses kontrolü için bir bilgisayar sistemi ve bazı yardımcı mekanizmalardan (örneğin, soy gaz koruma sistemi ve toz- yatak ön ısıtma sistemi) oluşur (Şekil 1.7). Bu yöntemlerde, toz önce bir serici silgi ya da bir rulo kullanılarak alt tabaka üzerinde biriktirilir. Ardından, yüksek bir lazer gücü, biriken tozu seçici olarak

1. GİRİŞ

ergitir ve kaynaştırır. Ardından, üretim platformu bir katman kalınlığı kadar aşağıya, toz platformu da bir katman kalınlığı kadar yukarı hareket edecek ve serici silgi aracılığıyla toz serilip lazer ile ergitilir. Nihai ürün ortaya çıkana kadar bu işlemler devam eder. (Bian et al., 2017).



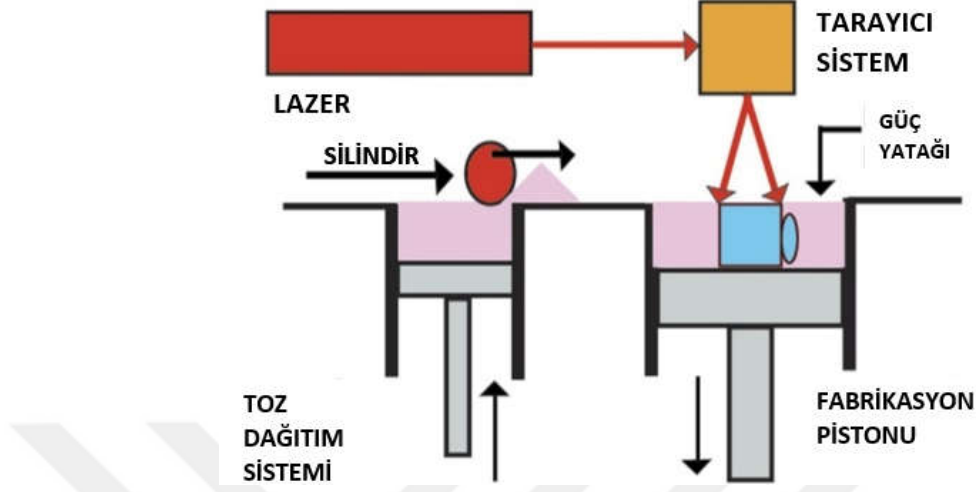
Şekil 1.6. Toz yatak üretim döngüsü (Wroe, 2015)

Seçici lazer sinterleme (SLS)

Seçici Lazer Sinterleme (SLS), katı parçayı oluşturmak için CAD geometrik modeline karşılık gelen alanlarda her seferinde bir katman olmak üzere tozları kaynaştırmak için hareketli bir lazer ışını kullanır. Tozlar, bağlanmayı kolaylaştırmak ve bitmiş ürünün bozulmasını azaltmak için erime noktalarının hemen altına kadar önceden ısıtılır. Ön ısıtma ayrıca lazerin güç gereksinimlerini azaltmaya da hizmet eder. Katmanlar halinde, tozlar kademeli olarak üç boyutlu parça geometrisini oluşturan katı bir kütleye bağlanır. Katman kalınlığı 0.075-0.50 mm aralığındadır. SLS işlemi genellikle, oksidasyona duyarlı olabilecek tozların (örneğin metaller) bozulmasını en aza indirmek için azot ile doldurulmuş bir bölümde gerçekleştirilir (Groover, 2012). Tozların erimiş bir havuz oluşturmak için yüksek güçlü bir lazer ışınının odağına bir gaz akışı içinde iletildiği LENS, DMD ve LMD'den farklı olarak SLS tekniğindeki ana fark, tozların besleme yatağından diğer tarafa yayılmasıdır. Bir rulo kullanarak parça yatağı eriyiğin katılaşmasından sonra, ince bir katı katman oluşur ve önceki sinterlenmiş

1. GİRİŞ

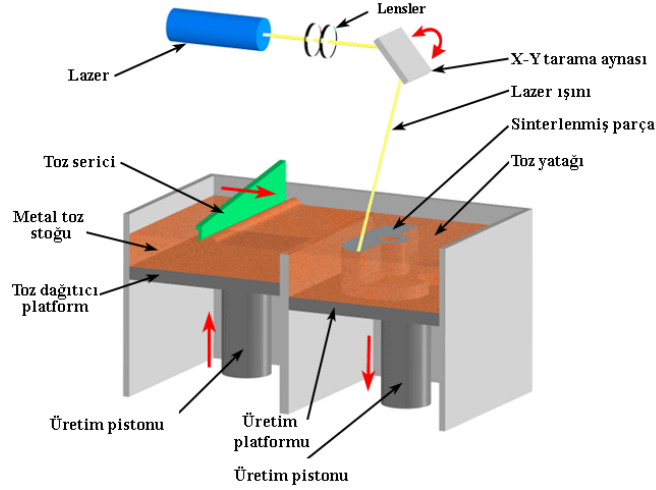
katmana kaynaştırılır. İşlem tekrarlanarak tamamına yakın yoğun bir yapı oluşturulabilir. SLS tekniğinin şeması Şekil 1.8’de gösterilmektedir (Subbiah, 2015).



Şekil 1.7. Seçici lazer sinterleme (Anonim, n.d.-b)

Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)

Yöntem, seçici lazer ertitme yöntemiyle oldukça benzerdir. Ancak moleküler düzeyde, toz yalnızca sinterlenir (ergitilmez). Bu durum, ertitme yönteminden daha az gözenekli olan parçaların üretimini sağlar. Farklı ertitme noktalarına sahip malzemeler içeren alaşımların kolayca birleştirilmesi en büyük avantajı olup, metal ve plastik malzemeler dahil birçok malzeme bu yöntemle birleştirilebilir. Örneğin naylon tozu+alüminyum tozu karışımı olan Alumid bu yöntemle birleştirilebilir. Sinterleme ve ertitme arasındaki diğer bir fark ise, metal tozunun ertitilmesi için kullanılan sıcaklıktır. SLE, metal tozunu tamamen ertitene kadar ısıtırken, DMLS metal tozunu ertitmez, bu nedenle daha az enerji harcar. Sinterleme, toz parçacıklarını yüzeyleri birbirine kaynatacak kadar ısıtır. Toz boyutu ve şekli, son parçanın çözünürlüğünü sınırlarken, daha küçük toz boyutu daha ayrıntılı parçalar üretilmesini sağlar. Bu teknolojideki çözünürlük sınırları, katman yüksekliği ve lazer noktasının boyutudur. Diğer 3B baskı süreçleri gibi, model birçok ince katmana bölünür ve daha sonra katman katman üretim gerçekleştirilir (Anonim, 2021a).

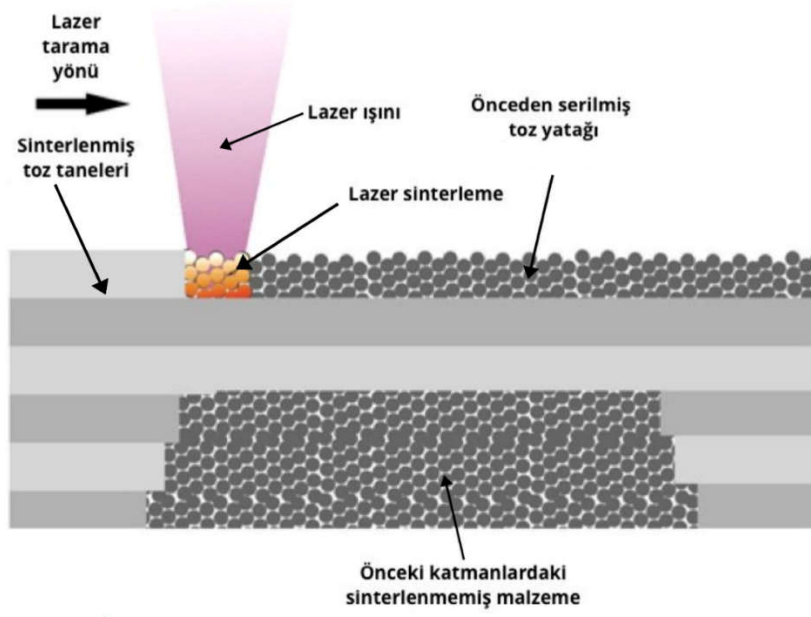


Şekil 1.8. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) (Anonim, 2008)

DMLS'nin en büyük avantajı, metal içinde iç kusurlardan ve artık gerilimlerden arındırılmış nesnelere üretmesidir. Bu yöntemin dezavantajı ise fabrikasyon parçaların en zayıf kompozit fazının mekanik özelliklerini sergilemesi ve ağır işler için gerekli olan işlevselliğin kaybolması ve parçaların tamamen yoğun olmamasıdır (Bian et al., 2017).

Lazer Mikrosinterleme (LMS)

Lazer mikrosinterleme, eklemeli üretim ve mikro işlemenin avantajlarını bir araya getirmektedir. Yüksek doğruluk, detay çözünürlüğü ve yüzey kalitesine sahip mikro metal parçalar bu şekilde üretilmektedir. LMS ile yüksek çözünürlüklü ($<30 \mu\text{m}$) ve minimum pürüzlülüğe ($R_a=1.5 \mu\text{m}$) sahip parçalar üretilebilir. Bu tekniğin bir başka avantajı, q-anahtarlı Nd:YAG-lazer darbesinin kullanılması nedeniyle nihai ürünlerdeki kalıntı gerilme seviyesinin oldukça düşük olmasıdır. Bu avantajlar, hareketli parçaların ve düzeneklerin tek bir adımda üretilebilmesini sağlar. Parçalar, yüksek doğruluk ve yüzey kalitesi, yüksek detay çözünürlüğü ve karmaşık şekillere sahip küçük metal parçalar talep eden herhangi bir endüstride kullanılmaktadır. Mevcut ana endüstriler medikal, yarı iletken malzeme üretimi, makine mühendisliği, havacılık, enerji, kuyumculuk ve saatçilik (Anonim, 2021b).



Şekil 1.9. Lazer sinterleme (Wroe, 2015)

Seçici lazer eritme (SLE)

Seçici lazer eritme (SLE), 1980'lerin sonlarında ortaya çıkan eklemeli üretim tekniklerinden biridir. SLE işlemi sırasında, bir lazer ışınının etkileşimi ile ardışık toz katmanlarının seçici olarak eritilmesiyle bir ürün oluşturulur. Işınlama sayesinde toz malzeme ısıtılır ve yeterli güç uygulanırsa eriyerek bir sıvı havuzu oluşturur. Daha sonra erimiş havuz hızla katlaşıp soğur ve katı bir ürün oluşturmaya başlar. Bir katmanın enine kesiti tarandıktan sonra, yapı platformu katman kalınlığına eşit miktarda alçaltılır ve yeni bir toz katmanı biriktirilir. Bu işlem ürün bitene kadar tekrarlanır (Anonim, n.d.-a). SLE, %100'e yakın yoğunluğa sahip karmaşık parçaların üretilmesini sağlayan ve son işlem ihtiyacını ortadan kaldıran toz yatak esaslı bir üretim yöntemidir.

SLE, günümüzde mevcut olan en önemli 3B baskı teknolojilerinden biridir ve hem hızlı prototipleme hem de seri üretim için kullanılmaktadır. Doğrudan metal lazer eritme (DMLM) olarak da adlandırılan SLE, bir tür metal katkılı üretim veya 3B baskıdır. Genellikle, SLE ve doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) terimleri birbirinin yerine kullanılır. Bununla birlikte, SLE ve SLS yöntemleri arasında iki büyük fark vardır. SLE, düşük erime noktalarına sahip elementlerin eklenmesine gerek kalmadan toz malzemeden üretim yapabilir. Tozun tamamen birleşmesini sağlamak üzere SLE işlemi

1. GİRİŞ

için daha yüksek güçte lazer kullanılması gereklidir. SLE ile ilgili sınırlamalardan biri, ergitme işlemi sırasında malzemede meydana gelen yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan artık gerilmelerdir. Bu artık gerilmeler parçanın bozulmasına neden olabilir. Ancak, malzemeyi önceden ısıtmak ve oda içindeki sıcaklığı sabit yüksek seviyede tutmak, artık gerilmeyi en aza indirmektedir (Bian et al., 2017).

SLE ile üretim yönteminde nihai ürüne ait mekanik, kimyasal, morfolojik ve tribolojik özellikleri birçok üretim parametresi etkilemektedir. Bu üretim parametreleri;

- Lazer gücü,
- Lazer tarama hızı,
- Katman kalınlığı,
- Tarama stratejisi,
- İnşa oryantasyonu,
- Demet çapı, vuruş modu şeklinde sıralanabilir (Kaya, 2019).

SLE yönteminde katmanlar arasında dayanım yüksek olmalı ve bütünlük sağlanmalıdır. Bu bütünlük, üretim parametreleri olarak bilinen lazer gücü (P), katman kalınlığı (t), lazer tarama hızı (V), yana kayma mesafesinin (h) değişimi ile kontrol edilen enerji yoğunluğu (E) ile sağlanmaktadır. Tüm bu parametreler malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir (Kaya, 2019; Thijs et al., 2010). Üretim parametreleri ve enerji yoğunluğu arasındaki ilişki aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$E = \frac{P}{V.h.t} \quad (1.1)$$

1.4.2. Akış bazlı yöntemler

Akış bazlı yöntemler, alt tabakaya malzemeyi (toz veya tel) önceden yaymak yerine doğrudan lazer odak bölgesine iletmek için bir nozul kullanır. Bu eklemeli imalat üretim teknikleri, nozullar vasıtasıyla tozu bir gaz dağıtım sistemine ileten bir toz besleyici kullanır. Daha sonra, yüksek enerjili lazer iş parçasına yakın bir mercekle tarafından odaklanarak nozulun ortasına yansıtılır. Lens ve toz püskürtme sisteminin z

1. GİRİŞ

yönünde hareket ettirilmesi hem lazer hem de toz odaklarının yüksekliğini kontrol eder. İş parçası ayrıca bir kontrolör tarafından fonksiyonel alanın altındaki XY düzleminde hareket ettirilerek üretim sağlanır (Bian et al., 2017).

1.4.3. Levha laminasyon

Bu teknikler ilk olarak 1991 yılında Helisys şirketi tarafından geliştirilmiştir. Levha laminasyonda yuvarlanan bir levhadan sonra katman katman bir parça katman oluşturmak için toplama ve çıkarma tekniklerini birleştiren hızlı bir prototipleme tekniğidir. Bir CO2 lazer, CAD ve STereoLithography (STL) dosyasındaki 3B modele dayalı olarak her katmanın şeklini keser. Katmanlar, basınç ve ısı uygulanarak ve bir termal yapıştırıcı katman kullanılarak birbirine bağlanır. Bu teknikle ilişkili bazı avantajlar şunlardır. CAD görüntüsünden bir günden daha kısa bir sürede tam ölçekli, karmaşık bir prototip oluşturulabilir. Büyük parçalar bozulma, büzülme ve deformasyon olmadan üretilebilir. Parçalar yüksek dayanıklılığa, düşük kırılabilirliğe sahiptir. Reaktif ve toksik olmayan malzemelerin işlenmesi sebebiyle elden çıkarılması kolaydır. Ayrıca daha düşük maliyetle üretim yapılmasını sağlar (Bian et al., 2017).

1.5. Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları

Eklemeli imalat, karmaşık şekiller, topoloji optimizasyonlu hafif parçalar, kalıp endüstrisi için araçlar, protezler ve tıbbi implantların üretilmesi gibi birçok farklı sektörde kullanılabilir. Eİ, sadece 3B CAD modelinin kullanılmasıyla metal parçaların ek alet kullanmadan hızlı bir şekilde üretilmesini sağlar. Yeni bir ürün geliştirilirken zamandan tasarruf edilir. Eİ kullanılarak prototiplerin veya küçük serilerin üretimi yapılabilir. Eklemeli imalat teknolojisi özellikle implant üretiminde büyük bir avantaja sahiptir. Standart ölçülerde implant üretimindeki olumsuzlukları gidererek kişiye özel implantların üretilebilmesi ciddi avantaj sağlamaktadır. Bu teknoloji kafes yapıları gibi karmaşık geometrilerin üretimi için elverişlidir. Ancak eklemeli imalatta kullanılan makineler, modern CNC makineleriyle karşılaştırılabilir fiyatlara sahip olup, malzeme fiyatı stok malzemeye kıyasla hala yüksektir. Eİ, özel ürün imalatında geniş olanaklar sağlarken, yakın gelecekte klasik üretim teknolojilerinin tamamen yerini alamayacaktır. Eİ ile parçalar sınırsız geometrilerde üretilebilir, ancak artık gerilme, porozite, yüzey

1. GİRİŞ

pürüzlülüğü, parça boyutu ve EI'ye uyumlu mevcut malzemelerin sınırlamalarının dikkate alınması gerekmektedir (Vranić et al., 2017).



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yüksek korozyon direncine sahip olması nedeniyle paslanmaz çelikler, birçok alanda yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. En yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelik türlerinden birisi 316L paslanmaz çeliktir. 316L paslanmaz çelik sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı eklemeli üretimde fonksiyonel ve karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Eklemeli üretim yöntemlerinden birisi olan Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi, karmaşık geometriye sahip ürünlerin imal edilebildiği yeni nesil bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemde esas, toz haldeki malzemenin lazer ile ergitilerek katmanlar şeklinde birbirine bağlanması ve nihai ürünün oluşturulmasıdır. Bu proseste, talaşlı imalattaki kesici takımları kullanmadan veya kalıp gibi aparatlar oluşturulmadan, üretilmesi hedeflenen ürünün 3B tasarımının yapılarak kullanılabilir ürüne dönüştürülmesi söz konusudur. SLE yöntemi ile üretilen parçaların yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri, üretimde kullanılan parametre ve stratejilerden büyük oranda etkilenmektedir. SLE yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çelik malzemenin karakterizasyonunu ele alan literatür çalışmaları bu bölümde ele alınmıştır.

Li ve arkadaşları tarafından, SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerin tribolojik performansı üzerinde üretim parametrelerinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, farklı lazer güçleri ve inşa yönleri boyunca prizmatik numuneler üretilmiştir. Aşınma testleri, ortam sıcaklığında 4Hz sabit frekansta iki farklı normal yük altında gerçekleştirilmiştir. Düşük lazer güçleri ile üretilen numunelerde, eriyik havuzu sınırlarında daha düşük sertlik oluştuğu, yoğunluk ve füzyon eksikliği gözlemlenmiştir. Ancak lazer gücünün ve inşa yönünün sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerindeki etkilerinin önemli olmadığı sonucuna varılmıştır. Daha yüksek temas basıncına sahip aşınma testlerinde aşınma oranının arttığı, sürtünme katsayısının önemli ölçüde etkilenmediği belirlenmiştir (Li et al., 2018a).

SLE yöntemi ile üretilen metal bileşenler, bazı durumlarda geleneksel yolla üretilen malzemelerden üstün mekanik özellikler sunabilmektedir. Uygun proses parametrelerinin seçimi (lazer gücü, tarama hızı, inşa yönü vb.) nihai özelliklerin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır. Liverani ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, SLE yöntemi ile farklı proses parametreleri kullanılarak üretilen AISI 316L

2. KAYNAK ÖZETLERİ

paslanmaz çelik numunelerin mikroyapısı, kusur oluşumu ve mekanik özellikleri incelenmiştir. İlk aşama olarak %98'den daha fazla yoğunluğu sağlayan proses parametreleri belirlenmiş, daha sonra bu sonuçlara dayalı olarak mikroyapısal ve mekanik karakterizasyon için numuneler üretilmiştir. Elde edilen mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde lazer gücü, yana kayma miktarı ve inşa yönü arasındaki ilişkiyi araştırmak amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, eklemeli imalat ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik malzemenin yüksek nihai çekme mukavemeti ve maksimum uzama miktarına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca lazer gücünün yoğunluk üzerinde güçlü etkiye sahip olduğu ve en yüksek yoğunluğun uygulanan en yüksek güç seviyesinde (150 W) elde edildiği görülmüştür. Yana kayma miktarı ile inşa yönünün test edilen aralık üzerinde yoğunluk için önemli etkilere neden olmadığı tespit edilmiştir (Liverani et al., 2017).

Sun ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada SLE yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin aşınma davranışı ve klorür içeren bir çözelti içinde korozyon özellikleri araştırılmıştır. Standart dökme 316L paslanmaz çeliğe kıyasla SLE ile üretilen 316L paslanmaz çeliğinin daha kötü aşınma direnci sergilediği belirlenmiştir. SLE ile üretilen paslanmaz çeliğin aşınma oranının yapıdaki gözeneklilik miktarına bağlı olduğu ve yüksek yoğunluk elde edilerek standart dökme 316L paslanmaz çeliğe benzer aşınma direnci elde etmenin mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Y. Sun et al., 2014).

Li ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada farklı inşa yönleri ve farklı test koşullarının SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerin tribolojik davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İnşa yönünün, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Daha yüksek aşınma test sıcaklıklarında, sürtünme katsayısı önemli ölçüde azalırken, aşınma oranı 200°C'de maksimuma ulaşmıştır. 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oksit katmanlarının yağlayıcı olarak çalışması ve malzeme kaybının azalması nedeniyle sürtünme katsayısının daha düşük oranda azaldığı sonucuna varılmıştır (Li et al., 2018b).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Huang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, farklı şekillendirme yüzeylerinin (XOY, XOZ, YOZ) ve farklı yüklerin (2-5-10 N) SLE ve haddelenme ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin oda sıcaklığı şartlarında aşınma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada mikroyapı ve aşınma performansı arasındaki ilişki incelenmiştir. SLE ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin aşınma performansının haddelenmiş numunelerin aşınma performansından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca aşınma testinde uygulanan normal yükün, sürtünme katsayısı üzerinde çok az etkiye sahip olduğu, yükün artmasıyla aşınma oranının da arttığı gözlemlenmiştir (Huang et al., 2020).

Bartolomeu ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, 316L paslanmaz çeliğin mikroyapısı, mekanik ve aşınma davranışı üzerindeki üç farklı üretim teknolojisinin (SLE, sıcak presleme ve geleneksel döküm) etkisi incelenmiştir. Pres ve geleneksel döküm ile karşılaştırıldığında, SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerin mekanik özelliklerinin ve tribolojik performanslarının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. SLE ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin yüksek aşınma ve mekanik performansı, esas olarak sahip olduğu ince taneli mikroyapıdan kaynaklandığı belirtilmiştir (Bartolomeu et al., 2017).

SLE yöntemi ile farklı inşa yönlerinde üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerin yoğunluğu, yüzey kalitesi, mikroyapısı ve mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, kırılma tokluğu değerleri performans kriteri esas alınarak proses parametreleri araştırılmıştır. Ayrıca üretim parametrelerinin numunelerin mekanik performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için sertlik ve çekme testleri yapılmıştır. Üretilen numunelerin yoğunluğunun %96 olduğu ve sertliğin geleneksel malzemeye kıyasla benzer olduğu tespit edilmiştir. En yüksek kırılma tokluğu değeri üretim platformuna yatay olan inşa yönünde $176 \text{ MPa.m}^{1/2}$, en düşük değer ise üretim platformuna dik olan inşa yönünde $145 \text{ MPa.m}^{1/2}$ olarak bulunmuştur. İnşa yönünün, parçaların mikroyapısı, mekanik özellikleri ve yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Gözenekli yapı oluşması, parçaların kenarlarında bulunan boşluklar ve çatlaklar nedeniyle, üretim platformuna dik olacak şekilde gerçekleştirilen üretim stratejisi, kırılma tokluğu açısından en düşük sonuçları vermiştir (Alsalla et al., 2018).

Cherry ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, lazer enerji yoğunluğunun 316L paslanmaz çelik üzerindeki etkisini araştırmak için SLE yöntemi ile nokta vuruşu yapılmıştır. Lazer nokta mesafesi ile maruz kalma süresi değiştirilmiş ve numunelerin gözenekliliği, yüzey kalitesi, mikroyapı, yoğunluk ve sertliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü nokta mesafesinden etkilenmiş ve artan nokta mesafesi ile yüzey pürüzlülüğü (Ra) 10 μm 'den 16 μm 'ye yükselmiştir. Lazer enerji yoğunluğu toplam gözenekliliği etkilemiş olup, minimum gözeneklilik miktarı 104.52 J/mm³ enerji yoğunluğunda görülmüştür. Malzeme gözenekliliğine bağlı olarak sertliğin 125 J/mm³ enerji yoğunluğunda maksimum 225 HV değerine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca artan gözeneklilik ile malzeme sertliğinin azaldığı gözlemlenmiştir (Cherry et al., 2015).

Zhu ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, hem SLE hem de geleneksel yöntemle üretilen 316L paslanmaz çeliğin, yağlanmış koşullar altında pin on disk kullanılarak sürtünme ve aşınma davranışları araştırılmıştır. SLE ile üretilmiş numunenin mikro yapısında geleneksel olarak üretilen numunenin aksine, gözenekler ve ince taneli bir yapı olduğu gözlemlenmiştir. SLE ile üretilen numunenin, pirinçle temas halindeyken geleneksel olarak üretilmiş numuneden daha düşük sürtünme ve aşınmaya sahip olduğu görülmüştür. Tüm numuneler sert bir malzeme ile temas ettiğinde, sürtünme ve aşınmadaki farklılıkların önemli düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelikteki gözenekler ve ince tanelerin, sürtünmeyi ve aşınmayı etkilediği sonucuna varılmıştır. SLE yönteminde proses parametre kontrolü ile malzeme yoğunluğunun artırılmasının gerekli olduğu ve gözenekli yapının büyük ölçüde azaltılabilmesi ile mikroyapıdaki ince taneler nedeniyle SLE yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik performansının geleneksel yöntemle üretilen numunelerden daha iyi olabileceği ifade edilmiştir (Zhu et al., 2016).

Alvi ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, SLE yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çeliğinin yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışı ve mikroyapının aşınma özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aşınma testi alümina bilye ile pin on disk kullanılarak oda sıcaklığından 600°C'ye kadar gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın, aşınma hızı üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve geleneksel 316L paslanmaz çelik ile karşılaştırılmıştır. Ortalama aşınma derinliğinin, tüm test sıcaklıklarında SLE ile üretilen

316L paslanmaz çeliğe kıyasla geleneksel 316L paslanmaz çelikte daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Alvi et al., 2020).

Saeidi ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, SLE yöntemi kullanılarak östenitik 316L paslanmaz çelik tozundan test numuneleri üretilmiştir. Lazer ile ergitilmiş paslanmaz çeliğin mikro yapısı, faz içeriği ve dokusu karakterize edilmiş ve geleneksel 316L paslanmaz çelik ile karşılaştırılmıştır. SLE ile üretilen numunelerin %98,6±0.1'lik bir yoğunluğa ulaştığı gözlemlenmiştir. Tek kristalli her bir büyük tanenin içinde ve tane boyutları 10-100 µm aralığında olan 0,5 µm boyutunda ince sütunlu bir alt tane yapısı gözlenmiştir. 316L paslanmaz çeliğin kimyasal bileşiminde bulunan molibdenin yüksek dislokasyon konsantrasyonları ile birlikte alt tane sınırlarında zenginleştiği bulunmuştur (K. Saeidi et al., 2015).

Chen ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, eklemeli olarak üretilmiş östenitik paslanmaz çeliğin mekanik mukavemeti üzerinde üretim sonrası ısıl işlemin etkisi araştırılmıştır. Mikroyapısal araştırmalar, üretilen malzemenin taneler, hücreler, dislokasyonlar ve nano boyutlu parçacıklardan oluşan çok ölçekli bir yapı sergilediği belirtilmiştir. 400°C'de tavlama, nano boyutlu silikat popülasyonunun çökeltmesine bağlantılı olarak akma mukavemetinde %10'luk bir artış elde edilmiştir. Tavlama koşulları dikkatli bir şekilde kontrol edilerek, eklemeli olarak üretilmiş östenitik paslanmaz çeliğin yapısının ve mekanik özelliklerinin, üretim sonrası ısıl işleme optimize edilebileceği sonucuna varılmıştır (Chen et al., 2019).

Shifeng ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, farklı inşa yönlerinde üretilen SLE parçalarının eriyik havuz sınırlarının mikroskobik kayma, makroskopik süneklik ve kırılma mekanizması üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. SLE parçalarının sahip olduğu belirgin anizotropi ve düşük süneklikten dolayı, eriyik havuz sınırlarının, makroskopik plastik davranış ve kırılma modundaki mikroskobik kayma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Shifeng et al., 2014).

Yusuf ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, SLE yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelere yüksek basınçlı burulma (*High Pressure Torsion-HPT*) işlemi uygulanarak malzemenin tribolojik davranışları incelenmiştir. HPT işlemi sonrası elde edilen ultra ince tane yapısı ile aşınma performansının arttığını gözlemlemişlerdir. Genel aşınma direncindeki iyileşme, artan burulma gerilmeleri ile nano ölçekli tane incilmesi nedeniyle elde edilen önemli ölçüdeki yüksek sertliğe bağlanmıştır. Mikroskopi analizi sonrası, aşınma mekanizmasının HPT işleminden önceki şiddetli abrezif aşınmanın HPT işlemi sonrası hafif aşındırıcı, adeziv ve tribo-oksitatif aşınmanın bir kombinasyonuna geçtiği sonucuna varılmıştır (Mohd Yusuf et al., 2021).

Kamran tarafından yapılan bir çalışmada, sabit lazer tarama parametreleri kullanılarak SLE yöntemi ile östenitik, dubleks ve martenzitik paslanmaz çelik parçalar üretilmiştir. SLE ile üretim sırasında mikroyapıdaki değişim ve mikroyapının mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Düzgün olmayan ve asimetric sıcaklık gradyanlarının ardından hızlı soğumanın, lazerle ergitilmiş çelik parçalarda yüksek seviyeli mikroyapı heterojenlikleri ortaya çıkardığı tespit edilmiştir. SLE ile üretim işlemleri sonrası sınırları Mo ile zenginleştirilmiş hücresel alt taneler oluşmuştur. Mo ile zenginleştirilmiş hücre sınırları, ısıl işlem sonrası numunelerin kimyasal ve mikro yapı stabilitesini etkilemiştir. Hücre sınırlarına homojen olarak dağılmış dislokasyonlar ve oksit formundaki nano inklüzyonlar, üstün çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve mikrosertliğe yol açan bir etki oluşturmuştur (Kamran Saeidi, 2016).

Liu ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, farklı proses parametreleri kullanılarak SLE yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin çekme davranışı ve mikrosertliği incelenmiştir. Nihai çekme mukavemeti, artan enerji girişi ile bir miktar azalırken, kopma uzaması için ters eğilim gözlemlenmiştir. Yüksek tarama hızıyla üretilen numunelerde, düşük açılı tane sınırlarına sahip ince tanelerin bulunduğu hücresel yapılar gözlenmiştir. Düşük tarama hızıyla (800 mm/sn) üretilen numunelerin daha yüksek süneklik gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuçlar, SLE yönteminin mikroyapıyı değiştirmek için bir fiziksel metalurji yöntemi olarak hareket edebileceğini ve böylece metalik malzemelerin mekanik performansını iyileştirebileceğini göstermiştir (Liu et al., 2020).

Tucho ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik malzemede proses parametrelerinin gözeneklilik seviyeleri, mikroyapı ve malzeme sertliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. SLE yöntemi ile üretilen parçalarda mekanik özellikleri tehdit eden en önemli kusurlardan birisinin porozite olduğu, bu nedenle uygulamalara göre istenen özellikleri elde edebilmek için malzemelerin yoğunlaştırılmasının optimize edilmesinin çok önemli olduğu vurgulanmıştır. İncelenen malzemeler 50-80 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında üretilmiş ve çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Enerji yoğunluğunun, gözeneklilik ve sertlik ile güçlü bir ilişkisi olduğu doğrulanmış ve gözenekliliği kontrol edebilecek ve malzemelerin yoğunluğunu iyileştirebilecek en etkili değişken olduğu tespit edilmiştir (Tucho et al., 2018).

Song ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, 316L paslanmaz çeliğin SLE yöntemi ile üretiminde beş farklı tarama stratejisi uygulanarak, mikroyapısal ve kristalografik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, tarama stratejilerinin SLE ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin mikroyapısı, tane büyümesi, tane boyutu ve dolayısıyla mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Tarama stratejisinin ardışık katmanlar arasında dönme açısı ile uygulanmasının, tanelerin sütunlu büyümesini engelleyerek ince eş eksenli taneler oluşturduğu ve bu durumun da numunelerin mukavemetinin ve sünekliğinin iyileşmesine yol açtığı tespit edilmiştir. Ayrıca, dikdörtgen desenli bir tarama stratejisi uygulanarak mikrosertlik değerlerinin iyileştirildiği saptanmıştır. Sonuç olarak SLE yöntemindeki tarama stratejisinin enerji girdisini etkileyen önemli bir faktör olarak hareket ettiği ve bu nedenle metallerin orta/mikro ölçekli yapısını ve mekanik davranışını etkilediği gösterilmiştir (Song et al., 2020).

Gerçekleştirilen literatür incelemesine göre 316L paslanmaz çelik malzemenin SLE yöntemi ile üretimini konu alan çalışmalarda genellikle mikroyapısal ve mekanik incelemeler üzerine yoğunlaşıldığı, tribolojik özelliklerin değerlendirildiği çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca SLE yöntemi ile gerçekleştirilen üretim işlemlerinde lazer gücü, tarama hızı, yana kayma mesafesi ve katman kalınlığı değerlerinin tek bir enerji yoğunluğu için sabit tutulduğu ve bu parametrelerin mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikler üzerindeki etkilerinin sistematik olarak

2. KAYNAK ÖZETLERİ

ortaya konmadığı görülmüştür. Özellikle SLE yöntemi ile üretimin gerçekleştirildiği çalışmalarda, inşa oryantasyonu ve yana kayma parametrelerinin 316L paslanmaz çeliğin aşınma performansına etkilerinin bir bütün olarak ele alınmadığı saptanmıştır. Dolayısı ile bu tez çalışmasında, temel SLE üretim parametrelerinin 316L paslanmaz çeliğin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar geleneksel yöntemle üretilen paslanmaz çeliğin özellikleri ile karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Paslanmaz çelikler sahip oldukları üstün korozyon direnci, yüzey kalitesi, yüksek sıcaklık mukavemeti ve aşınma direnci sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılırlar. Uygulama alanı çok geniş olan paslanmaz çelikler özellikle havacılık, otomobil, kimya, gıda işleme, denizcilik gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında SLE yöntemi ile üretim işlemlerinde östenitik paslanmaz çelik grubunda yer alan 316L paslanmaz çelik toz malzeme kullanılmış olup, kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ayrıca 316L paslanmaz çelik tozunun, toz boyutu ve dağılımları SEM görüntüleri alınmak suretiyle bir sonraki bölümde ele alınmıştır. Yapısal, mekanik ve tribolojik analizlerde karşılaştırma yapmak amacıyla geleneksel (dövme) yöntem ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. 316L paslanmaz çelik toz malzemenin kimyasal bileşimi

Element	Değerler (% Ağırlık)
Krom	16,5 - 18,5
Nikel	10,0 - 13,0
Molibden	2,0 - 2,5
Manganez	0 - 2,0
Silisyum	0 - 1,0
Fosfor	0 - 0,045
Karbon	0 - 0,030
Kükürt	0 - 0,030
Demir	Kalan

3.2. SLE Yöntemi ile Test Numunelerinin Üretimi

Yapısal, mekanik ve tribolojik incelemeler için kullanılan test numuneleri, Concept Lazer MLabR SLE cihazı ile farklı üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Şekil 3.1’de gösterilen SLE cihazı 100W Neodyum katkılı İtiryum Alüminyum Garnet

3. MATERYAL ve YÖNTEM

(Nd:YAG) lazer sistemi ile çalışmakta olup ve 80x80x90 mm ebatlarında inşa platformuna sahiptir. Tez çalışması sırasında yapılan üretimler, Azot (N_2) gazı atmosferinde sürekli lazer vuruş modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim gerçekleştirilirken oksijen miktarı %1'in altında tutulmuştur. Üretilen test numunelerinin STL dosya formatları AutoFab programı yardımıyla hazırlanmıştır. Lazer tarama hızı (200 mm/s'den başlayıp 2000 mm/s'ye kadar 200 artışla) ve gücü (20 W'den başlayıp 100 W'ye kadar 20 artışla) değiştirilerek farklı parametrelerde oluşturulan eriyik havuzunun incelenmesi için 25 μ m katman kalınlığında 316L paslanmaz çelik levha üzerine tekli lazer vuruşları yapılmıştır. Lazer vuruşu yapılan levha, lazer izlerine dik gelecek şekilde ortadan kesilmiş ve bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler sırası ile 240, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı su zımparaları kullanılarak zımparalanmış ve elmas süspansiyon ile parlatılmıştır. Kesit görüntüleri ZEIS Axio A1 optik mikroskobu ile alınarak, elde edilen eriyik havuzlarının derinlik (B) ve genişlikleri (A) incelenmiş ve $R=A/2B$ oranları hesaplanmıştır. Yana kayma miktarının mekanik özellikler üzerine etkisini incelemek için, belirlenen en iyi R oranına sahip parametreler seçilerek farklı yana kayma miktarlarında çekme numuneleri üretilmiştir. Üretilen çekme numuneleri ASTM E8 standardına göre boyutlandırılmıştır. Çekme testleri sonucunda mekanik özellikleri en iyi olan parametrelerden 10x10x5 mm boyutlarında prizmatik aşınma test numuneleri üretilmiştir.



Şekil 3.1. Concept lazer MLab R SLE cihazı

3.3. X Işını Kırınımı (XRD) Analizi

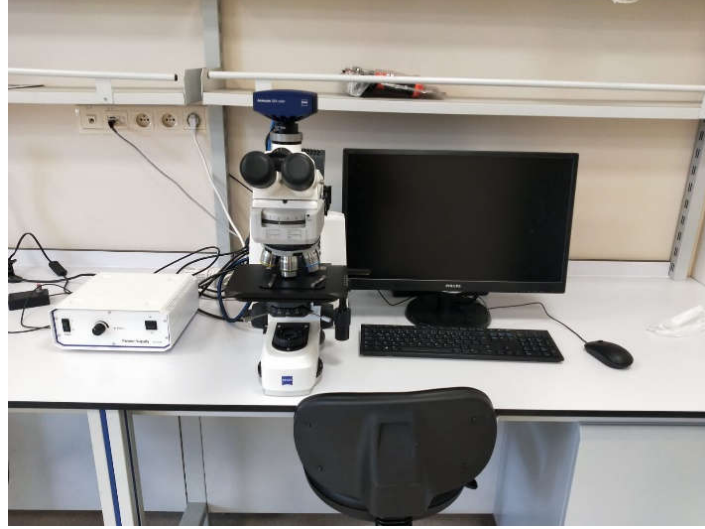
Şekil 3.2’de gösterilen GNR-Explorer marka XRD cihazı ile $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Cu-K α radyasyon kullanılarak geleneksel ve SLE yöntemi ile üretilmiş olan numuneler üzerindeki fazlar tespit edilmiştir. Ölçümler 20-80° aralığında simetrik tarama konfigürasyonu ile saniyede 0.05° adımlar ile gerçekleştirilmiş olup elde edilen pik kartları Match yazılımı ile analiz edilmiş ve literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.2. XRD cihazı

3.4. Mikro Yapısal İncelemeler

Şekil 3.3’te gösterilen Carl Zeiss Scope A1 marka optik mikroskop cihazı kullanılarak paslanmaz çelik levha üzerindeki tekli lazer izlerinin ve eriyik havuzunun yüzey morfolojileri incelenmiştir. Bunun için Glyceregia (10 ml HNO₃, 20-50 ml HCl, 30 ml gliserol) çözeltisi hazırlanarak dağlama işlemi yapılmıştır. Ayrıca SLE yöntemi ile üretilen kontur ve test numunelerinin dağlanmış yüzey görüntüleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Optik mikroskop yardımıyla numune yüzeylerinin farklı yerlerinden en az 5 görüntü alınmış ve ZEN yazılımı ile alınan görüntüler işlenmiştir.



Şekil 3.3. Optik mikroskop cihazı

3.5. Aşınma Deneyleri

Numunelerin aşınma deneyleri Şekil 3.4’te gösterilen Bruker – UMT markalı tribometre test cihazı ile yapılmıştır. Viewer programı kullanılarak test numunelerinin sürtünme katsayısı grafikleri elde edilmiştir. Aşınma deneylerine ait deney parametreleri Çizelge 3.2’de verilmiş olup, her bir parametre için 3 ölçüm alınmıştır.

Çizelge 3.2. Aşınma parametreleri

<i>Deney parametreleri</i>	<i>Değerler</i>
Test türü	İleri – Geri (Reciprocating)
Uygulanan yük (N)	3
Aşınma stroğu (mm)	4
Aşındırma hızı (mm/s)	8
Aşındırma süresi (s)	3600
Karşı bilye malzemesi	Al ₂ O ₃
Sıcaklık (°C)	Oda sıcaklığı (23±2)
Ortam	Kuru şartlar



Şekil 3.4. Aşınma test cihazı

3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

316L paslanmaz çelik toz malzemenin morfolojik analizleri, elde edilen aşınma izleri, kontur yapıların karakterizasyonu, çekme numunelerine ait kırılma yüzey görüntüleri ve prizmatik numunelere ait mikroyapı görüntülerinin belirlenmesi amacıyla Şekil 3.5'te gösterilen QUANTA – FEG 250 markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.7. 3B Yüzey Profilometre Analizleri

Aşınma deneyleri sonrası numunelerin aşınma hacimlerinin ve üretim sonrası yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.6’da gösterilen Bruker Contour GT markalı 3B profilometre cihazı kullanılmıştır. Vision64 yazılımı aracılığıyla her bir aşınma izinden ortalama 10 ölçüm alınarak belirlenen aşınma izi kesit alanı her bir iz uzunluğu ile çarpılarak aşınma hacimleri elde edilmiştir. Ayrıca test numunelerinin yüzeylerinin 5 farklı yerlerinden alınan görüntüler ile ortalama yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. 3B Profilometre cihazı

3.8. Mikrosertlik Ölçümleri

Numunelerin mikrosertlik değerleri Şekil 3.7’de gösterilen SHIMADZU HMV-G20 markalı mikro sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler, Vickers yöntemi ile 100 gr yük altında 10 saniye bekleme süresi ile numune yüzeylerinin farklı bölgelerinden en az 10 ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Mikrosertlik cihazı

3.9. Çekme Testleri

SLE yöntemi ile üretilen ve ASTM E8 standardına göre boyutlandırılmış silindirik çekme numunelerinin çekme testleri INSTRON 5982 marka statik test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). Tüm numuneler oda sıcaklığı şartlarında ve çekme hızı 1 mm/dk olacak şekilde test edilmiştir.



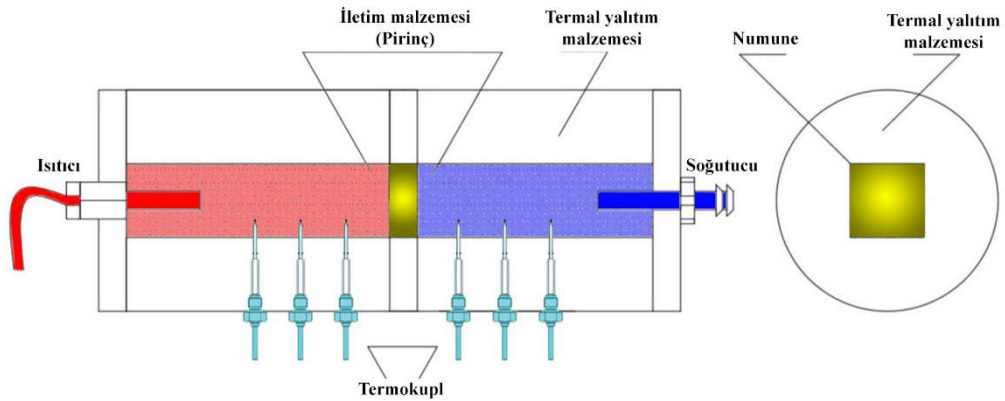
Şekil 3.8. INSTRON 5982 statik test cihazı

3.10. Termal Analiz Ölçümleri

Numunelerin ısı iletkenlik katsayıları Şekil 3.9’da verilen GUNT WL372 markalı termal analiz cihazı ile ölçülmüştür. Isıl iletkenlik ölçümleri için kullanılan termal analiz cihazının şematik görünümü Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Isıtıcı, soğutucu ve termokupl içeren bu cihaz, merkezinde bir iletim hattı bulunan yatay bir silindir şeklinde olup, ölçüm yapılırken test numunesi cihazın ortasına yerleştirilmiştir. Ayrıca, cihaz tamamen termal olarak yalıtılmıştır. Deneylerde güç, sıcaklık ve zaman ölçümleri termal analizörden alınmıştır. Numunelerin ısıl iletkenlik değerleri ısıl direnç yaklaşımı ile elde edilmiştir. Her bir numune için deney 90 dakika sürmüş ve 3 kez tekrarlanarak ortalama sonuçlar alınmıştır.



Şekil 3.9. Termal iletkenlik cihazı



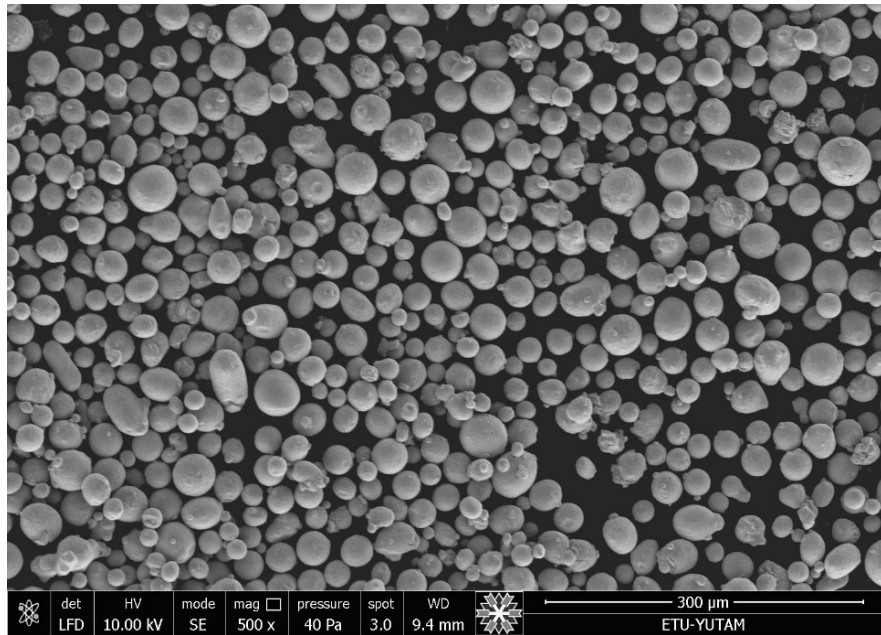
Şekil 3.10. Termal analiz cihazının şematik gösterimi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

316L paslanmaz çelik toz malzemeden Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi ile üretim gerçekleştirilmesi ve üstün mekanik-tribolojik özelliklerin elde edilebilmesi için SLE üretim parametrelerinin optimizasyonu kapsamında yapılan çalışmalara ait bulgular; kullanılan tozun karakterizasyonu, üretim parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelere göre mekanik ve tribolojik özelliklerin incelenmesi alt başlıkları halinde sunulmuştur. SLE yöntemi ile gerçekleştirilen üretim işlemlerinde çok sayıda üretim parametresi sürece dahil olduğu için, optimum üretim parametreleri belirlenirken sistematik olarak parametrelerin irdelenmesi suretiyle malzeme ve zaman tasarrufu sağlanmaya çalışılmıştır.

4.1 Toz Formundaki 316L Paslanmaz Çeliğe Ait Özellikler

Bu tez çalışmasında SLE yöntemi ile üretimde kullanılan 316L paslanmaz çelik toz malzemeye ait SEM görüntüsü Şekil 4.1’de verilmiştir. 316L paslanmaz çelik toz malzeme için toz boyutu 10-45 µm aralığı olarak belirlenmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde kullanılan tozun oldukça iyi küresellikte olduğu ve topaklanma davranışı sergilemediği görülmüştür.

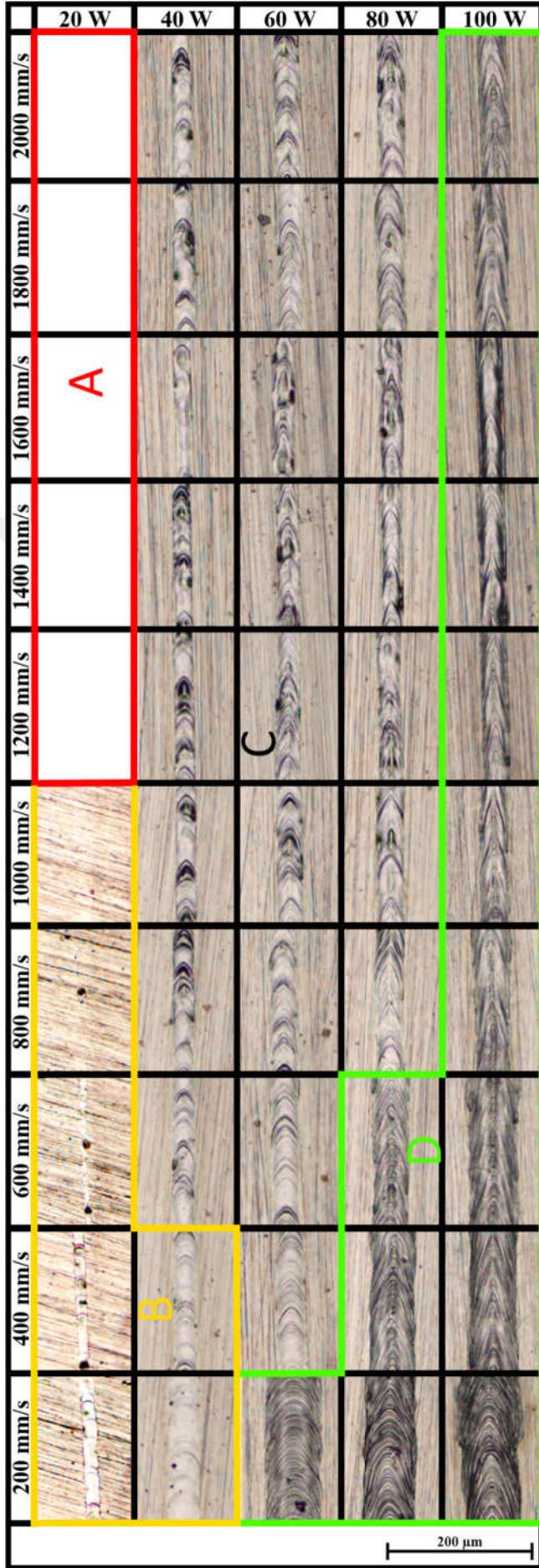


Şekil 4.1. 316L paslanmaz çelik toz malzemeye ait SEM görüntüsü

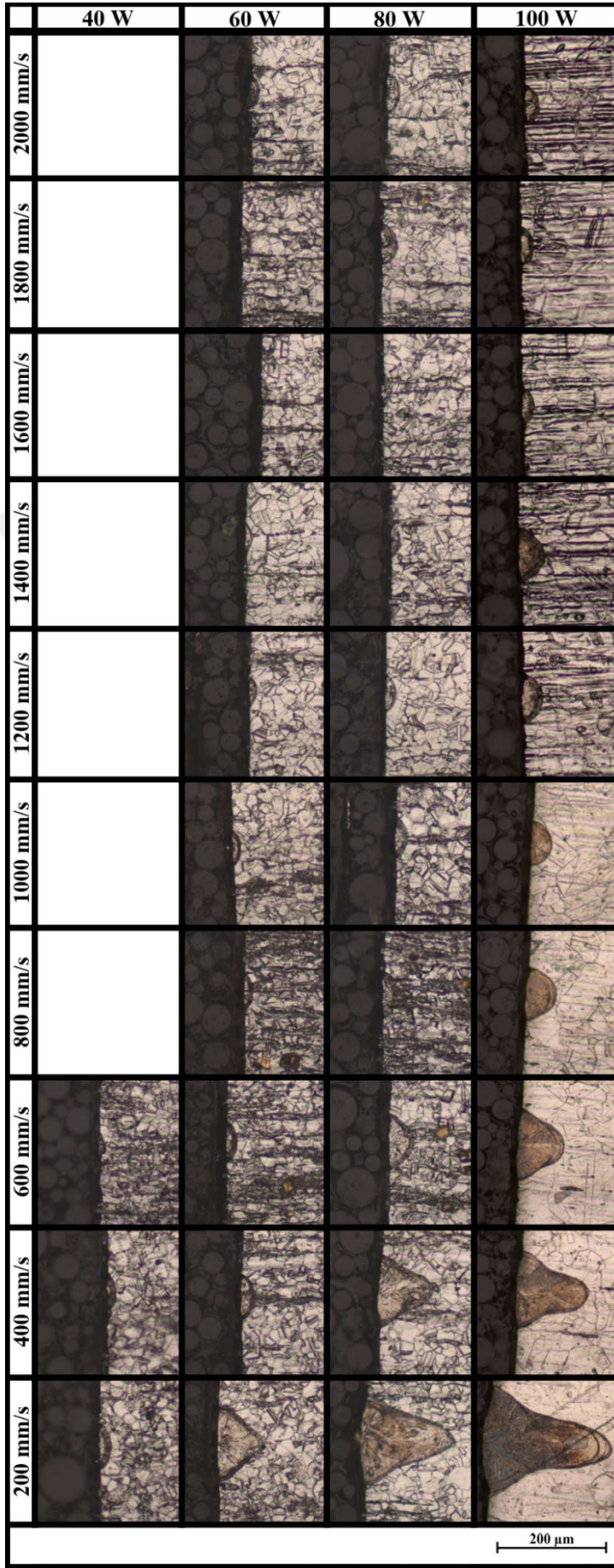
4.2. SLE Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi

4.2.1 Tekli lazer izlerinin yüzey morfolojisi

Üretimde kullanılan lazer gücü ve tarama hızının etkileşimi sonucu oluşan lazer izlerinin homojenliğinin incelenmesi amacıyla üretim sürecinde toz tabakası kalınlığı 25 µm değerinde sabit tutularak, tek katman kalınlığında 5 farklı lazer gücü ve 10 farklı tarama hızı ile 316L paslanmaz çelik plaka üzerinde tekli lazer vuruşları gerçekleştirilmiştir. Tekli lazer vuruşları sonucu elde edilen yüzeylere ait optik mikroskop morfoloji görüntüleri Şekil 4.2’de sunulmuştur. Hem lazer gücü hem de tarama hızı değerlerinin tekli lazer izlerinin oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızlarının sebep olduğu yetersiz ergime nedeniyle 20 W lazer gücü ve 1200-2000 mm/s tarama hızı aralığında gerçekleştirilen lazer vuruşları sonucunda 316L paslanmaz çelik levhada ergime vb. izler görülmemiştir (A bölgesi). Sarı hat ile gösterilen B bölgesinde yine yetersiz ergimenin bir sonucu olarak oluşan tekli lazer izleri oldukça düşük genişlik ve derinliğe sahiptir. C bölgesinde sürekli izler görülmekle birlikte eriyik bölgesinde kararsızlıkların olduğu ve sürekli ergime hattının oluşturulamadığı gözlenmiştir. Yüksek lazer güçlerinin olduğu D bölgesinde ise oluşan tekli lazer izlerinin sürekli ve daha kararlı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. Farklı lazer gücü ve tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait yüzey morfolojisi görüntüleri



Şekil 4.3. Farklı lazer gücü ve tarama hızlarında gerçekleştirilen tekli lazer vuruşlarına ait eriyik havuzu görüntüleri

4.2.2. Eriyik havuzu morfolojisi

316L paslanmaz çelik plaka üzerine yapılan tekli lazer vuruşları sonrası oluşan izlerden alınan kesit görüntüleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Söz konusu görüntüler yardımıyla SLE işlemi sonrası oluşan eriyik havuzunun genişliği ve derinliği incelenmiştir. Düşük lazer gücünün sebep olduğu yetersiz ergimenin bir sonucu olarak, 20 W lazer gücü ile gerçekleştirilen tekli lazer vuruşları sonrası tüm tarama hızı değerlerinde paslanmaz çelik plakada ergime elde edilememiş ve eriyik havuzuna ait büyüklükler tespit edilememiştir. 40 W lazer gücünde ise 600 mm/s tarama hızı ve altındaki değerlerde derinlik çok düşük olmak kaydıyla eriyik havuzu belirginlik kazanmıştır. Artan lazer gücü ve azalan tarama hızı değerlerine bağlı olarak artan enerji yoğunluğu sonucu eriyik havuzları daha belirgin olarak elde edilmiştir. Genel olarak, beklenildiği üzere lazer gücü artışı veya tarama hızı azalması sonucu, eriyik havuz genişliği ve derinliğinde bir artış eğilimi belirlenmiştir. Lazer gücündeki artış ve tarama hızındaki azalma ile toz yatağı tarafından emilen enerji artarak daha büyük bir eriyik havuzu genişliği ve derinliği elde edilmiştir. Eriyik havuzlarına ait optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, biri anahtar deliği diğeri ise elips formu olmak üzere iki farklı havuz formu dikkati çekmektedir. Farklı lazer gücü ve tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler ve eriyik havuz formunu temsil eden en/boy oranı (R) değerleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. $R \geq 1$ değerleri eriyik havuzunun elips şeklinde olduğu iletken modu (conductive mode) temsil ederken, $R < 1$ değerleri anahtar deliği modunu (keyhole mode) temsil etmektedir. Anahtar deliği formu genellikle lazer gücünün yüksek ve tarama hızı değerlerinin düşük olduğu üretim şartlarında oluşmaktadır. Eriyik havuz formunun anahtar deliği modundan iletken moda geçtiğinde eriyik havuz geometrisi V şeklinden elips şekline dönüşmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada anahtar deliği moduna sahip eriyik havuzlarında, üretimin ilerleyen aşamalarında eriyik havuzlarının bindirilmesi sonrası gözenekli yapıların ortaya çıktığı rapor edilmiştir (Hu et al., 2019). Eriyik havuz formunun incelendiği birçok çalışmada eriyik havuzu içerisinde daha dengeli ısıl dağılımın bir sonucu olarak gözeneksiz bir yapı oluşturması sebebiyle iletken moda sahip eriyik havuzlarının elde edildiği üretim parametreleri tercih edilmektedir (Wei et al., 2017). Çizelge 4.1'de verilen en-boy oranı (R) değerleri dikkate alındığında iletken moda sahip ve en-boy oranının 1'e yaklaştığı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

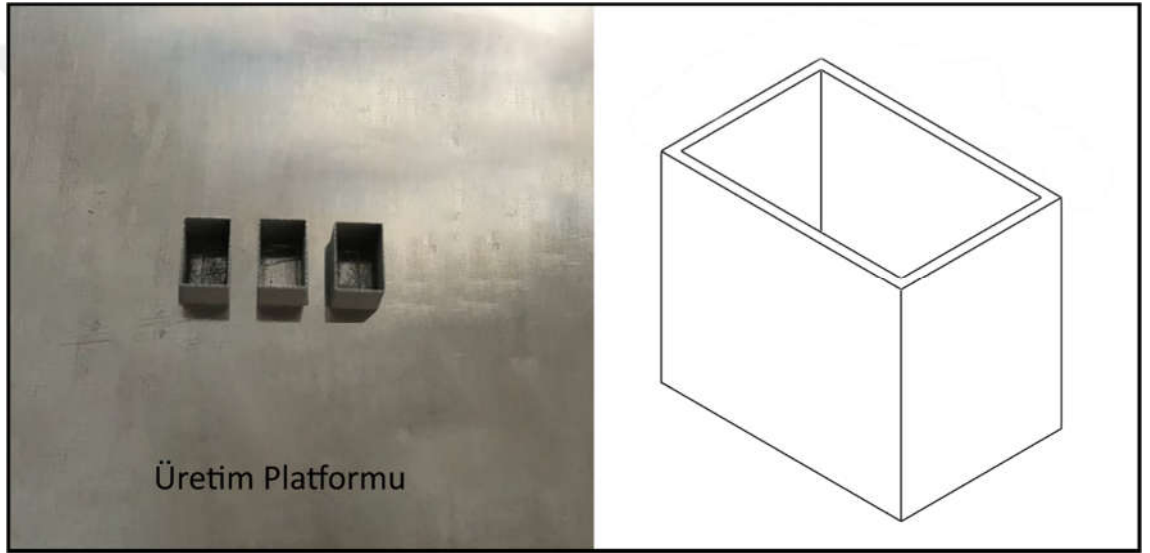
100 W lazer gücünde, 600, 800 ve 1000 mm/s tarama hızı parametrelerinin optimum eriyik havuzu formunu sağladıkları tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı lazer gücü ve farklı tarama hızları ile elde edilen eriyik havuzuna ait boyutsal özellikler

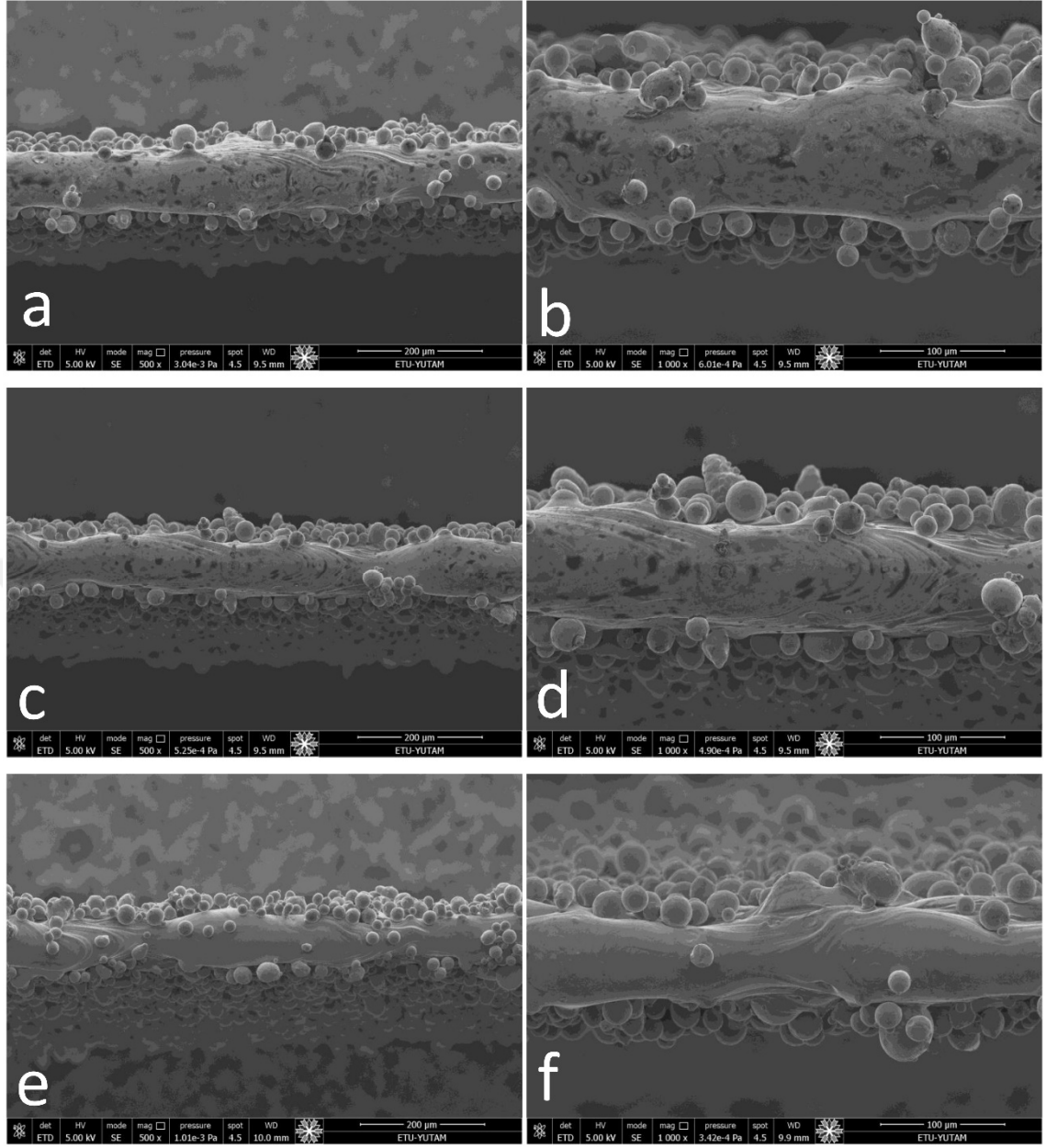
Lazer gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Genişlik-A (μm)	Derinlik-B (μm)	Oran-R ($R=A/2B$)
40	200	83.199	21.841	1.905
	400	66.106	15.815	2.090
	600	45.629	9.054	2.520
	800			
	1000			
	1200			
	1400			
	1600			
	1800			
	2000			
60	200	136.541	85.006	0.803
	400	81.616	24.248	1.683
	600	72.365	18.497	1.956
	800	66.986	15.507	2.160
	1000	63.969	13.771	2.323
	1200	51.959	14.147	1.836
	1400	53.613	12.811	2.092
	1600	44.924	11.534	1.947
	1800	62.913	17.856	1.762
	2000	59.846	14.798	2.022
80	200	155.200	154.700	0.502
	400	128.600	82.200	0.782
	600	100.900	39.200	1.287
	800	83.100	26.090	1.593
	1000	72.140	19.850	1.817
	1200	61.560	18.200	1.691
	1400	59.560	15.350	1.940
	1600	62.260	17.580	1.771
	1800	76.856	22.784	1.687
	2000	70.728	22.143	1.597
100	200	208.600	230.530	0.452
	400	139.600	126.270	0.553
	600	128.700	76.800	0.838
	800	97.800	52.400	0.933
	1000	79.700	36.700	1.086
	1200	87.400	33.600	1.301
	1400	97.600	42.000	1.162
	1600	64.600	19.100	1.691
	1800	69.200	22.200	1.559
	2000	66.200	23.300	1.421

4.2.3 SLE Yöntemi ile üretilen kontur yapılarının karakterizasyonu ve lazer tarama hızı optimizasyonu

Eriyik havuzu formu incelemeleri sonrası tespit edilen optimum lazer üretim parametreleri olan 100 W lazer gücü ve 600-800-1000 mm/s tarama hızı değerleri kullanılmak suretiyle kontur üretimleri gerçekleştirilerek Şekil 4.4'te verilen 4x5x6 mm boyutlarında geometriler üretilmiştir. Üretilen kontur yapılarının SEM görüntüleri Şekil 4.5'te verilmiş olup, görüntüler incelenerek optimum tarama hızı değeri tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.4. Kontur yapılarının geometrisi ve üretim platformundaki görünümü

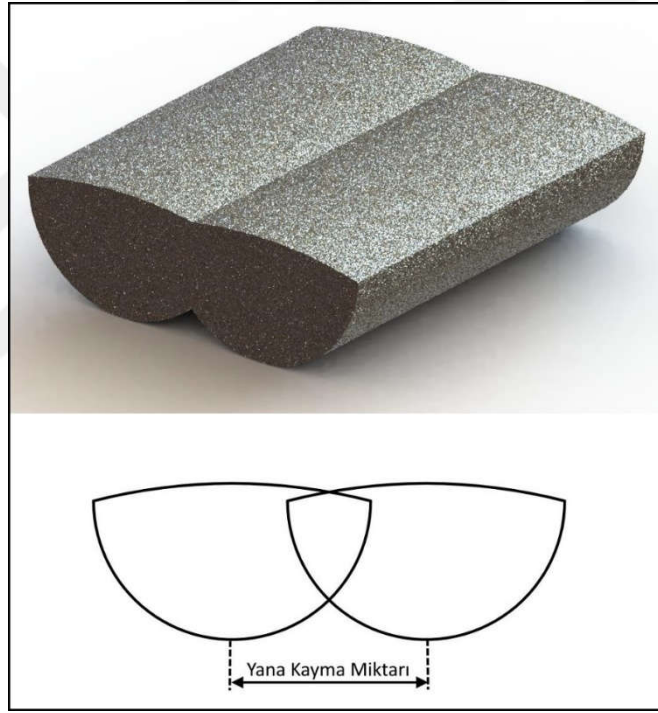


Şekil 4.5. Kontur yapılarına ait SEM görüntüleri, a-b) 100W-600 mm/s, c-d) 100W-800 mm/s, e-f) 100W-1000 mm/s

Kontur yapılarına ait SEM görüntüleri irdelendiğinde, 800 ve 1000 mm/s tarama hızında gerçekleştirilen üretimlerde kontur duvarlarının homojen olmadığı ve izin bazı bölgelerinde boğumlar oluştuğu görülmektedir. 600 mm/s tarama hızı ile gerçekleştirilen üretimlerde ise kontur duvarının oldukça homojen olduğu ve diğer iki tarama hızı ile elde edilen yapılardan farklı olarak boğumlu bir yapının oluşmadığı tespit edilmiştir. Yapılan bu incelemeler ışığında 25 µm sabit toz kalınlığı için üretim parametreleri 100 W güç ve 600 mm/s tarama hızı olarak belirlenmiştir.

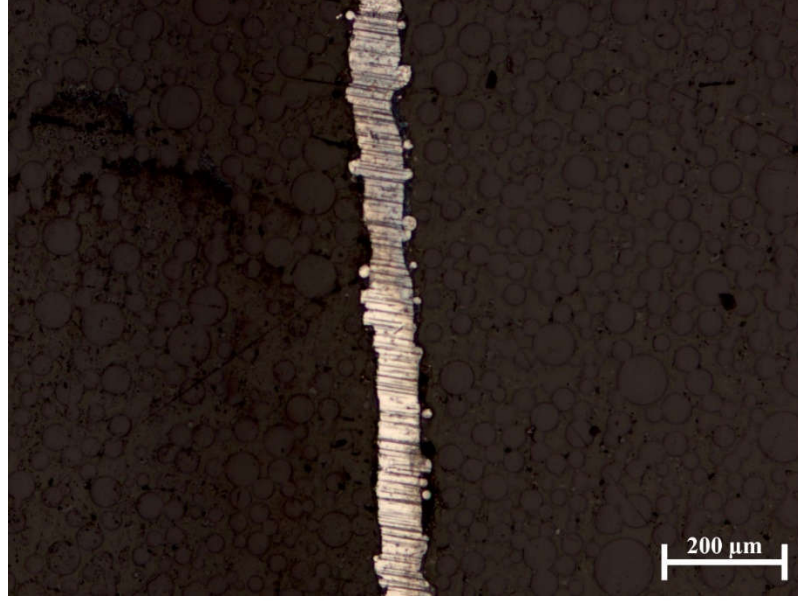
4.2.4. SLE yöntemi ile üretim işlemleri için yana kayma parametresinin optimizasyonu

Sistemik olarak parametre azaltılması yolu ile SLE üretim parametrelerinin optimize edilmeye çalışıldığı bu tez çalışmasında, lazer gücü ve tarama hızı değerleri belirlendikten sonra optimum yana kayma mesafesi değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Yana kayma mesafesi değerine ait şematik bir gösterim Şekil 4.6'da verilmiştir. Yana kayma miktarının kontrolü ile iki lazer tarama havuzu arasındaki bindirme miktarının kontrolü sağlanmaktadır. Yana kayma miktarı ergime havuzunun merkezleri arasındaki mesafe olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 4.6. Yana kayma miktarına ait şematik bir gösterim

SLE ile üretimde test edilecek yana kayma değerlerinin belirlenmesi için bir önceki aşamada belirlenen 100 W lazer gücü ve 600 mm/s tarama hızı ile üretilen kontur yapısı, bakalite alma işleminden sonra metalografik parlatma aşamalarından geçirilmiş ve duvar kalınlığı değeri optik mikroskop vasıtası ile tespit edilmiştir. Kontur yapısına ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.7'de verilmiştir. Kontur yapısı üzerinden alınan ölçüye göre duvar kalınlığı yaklaşık 100 μm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. 100W-600 mm/s parametresi ile üretilen kontur yapısına ait optik mikroskop görüntüsü

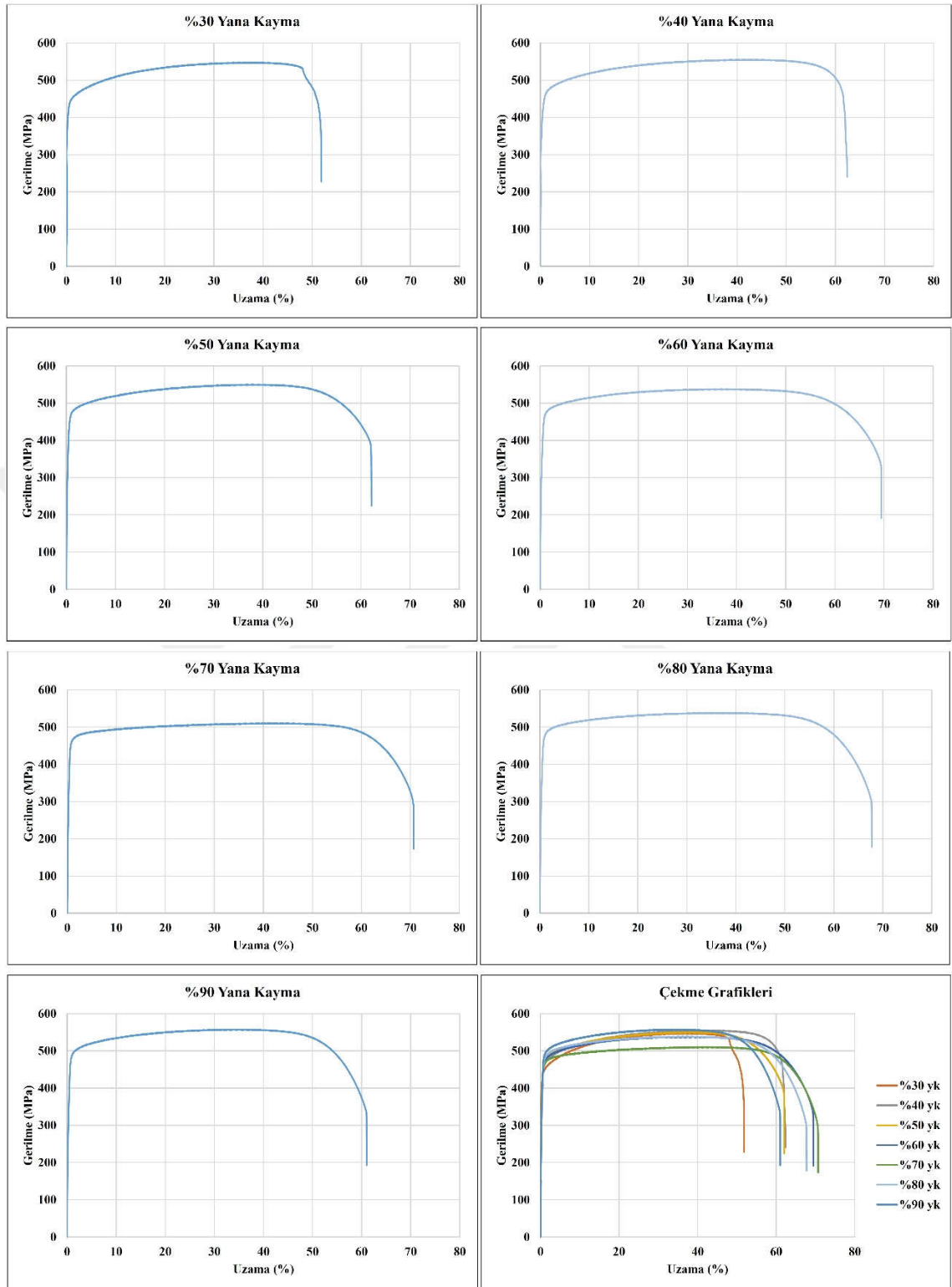
Farklı yana kayma değerleri ile üretilen numunelere ait mekanik zellikler

Belirlenen duvar kalınlığı değerine göre yana kayma miktarı %30-90 araladığında %10 artımla olmak üzere 30-90 μm aralığında irdelenmiŐ ve bu yana kayma değerleri kullanılarak üretim platformuna dik yerleşim olacak Şekilde ekme numuneleri üretilmiştir. Üretilen ekme numunelerine üretim platformu üzerindeki yerleŐimini gösteren görsel Şekil 4.8’de sunulmuştur. Her bir yana kayma değeri için üçer adet çekme numunesi üretilmiş ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Değişken yana kayma miktarları için elde edilen çekme eğrileri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.8. Çekme numunelerinin üretim platformundaki görünümü

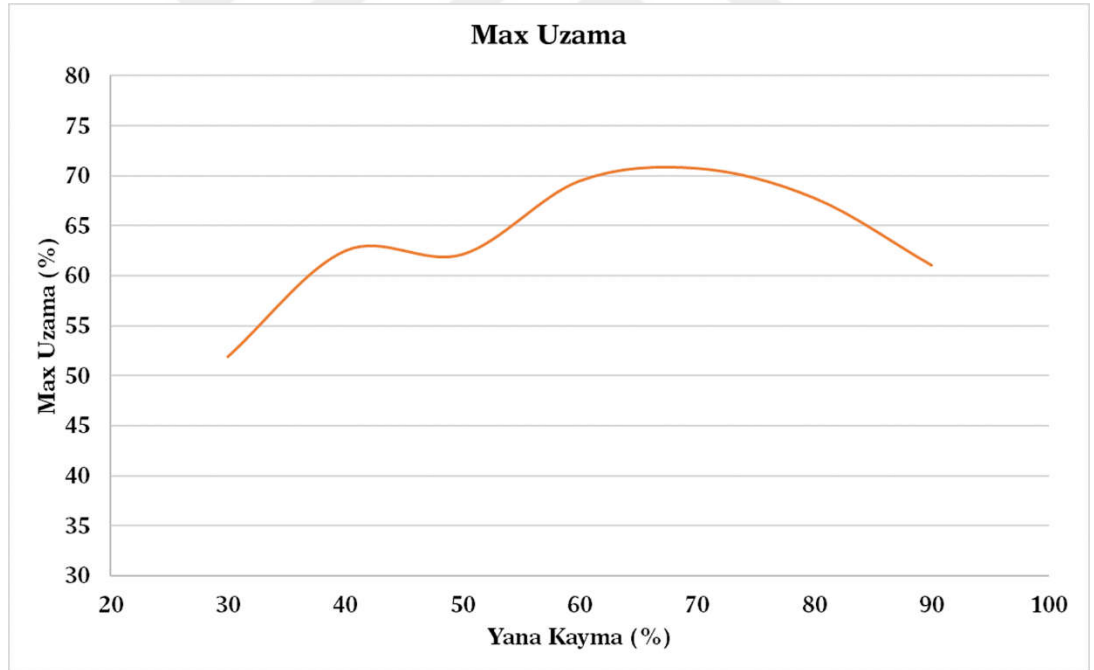
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.9. Farklı yana kayma miktarları ile üretilen numunelerin çekme eğrileri

Literatürde geleneksel yöntemle (dövme) üretilen 316L paslanmaz çeliğe ait mekanik özellikler incelendiğinde, çekme gerilmesi 500 MPa ve kırılma anındaki uzama değeri yaklaşık %65 olarak rapor edilmiştir (Hong et al., 2019). Eklemeli imalat

yöntemlerinden birisi olan SLE üretim sürecinde bilinen en temel eksiklik yetersiz birleşmeler ve aşırı soğuma sonucu ortaya çıkan yetersiz uzama değerleridir. Bu sebeple tez çalışmalarında mekanik özellikler açısından kırılma anındaki uzama değeri performans kriteri olarak alınmıştır. Farklı yana kayma değerleri için elde edilen çekme eğrileri incelendiğinde en düşük uzama değerleri % 30 ve 40 yana kayma değerleri ile üretilen numuneler için sırasıyla % 52 ve % 58 olarak elde edilmiştir. Farklı yana kayma değerleri için uzama değerlerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 4.10'da sunulmuştur. % 60-70 ve 80 yana kayma değerleri için en yüksek uzama değerleri elde edilmiş olup, % 80 yana kayma sonrası yetersiz birleşmelerin bir sonucu olarak uzama değerleri azalmaya başlamıştır. Çekme gerilmeleri açısından numuneler arasında belirgin bir fark olmayıp yaklaşık 500-550 MPa aralığında değerler elde edilmiştir. Farklı yana kayma miktarları için çekme eğrilerinin karşılaştırmalı olarak verildiği Şekil 4.9'da en yüksek uzama değerlerinin elde edildiği % 60, 70 ve 80 yana kayma değerleri bu aşamada optimum değer aralığı olarak belirlenmiştir.

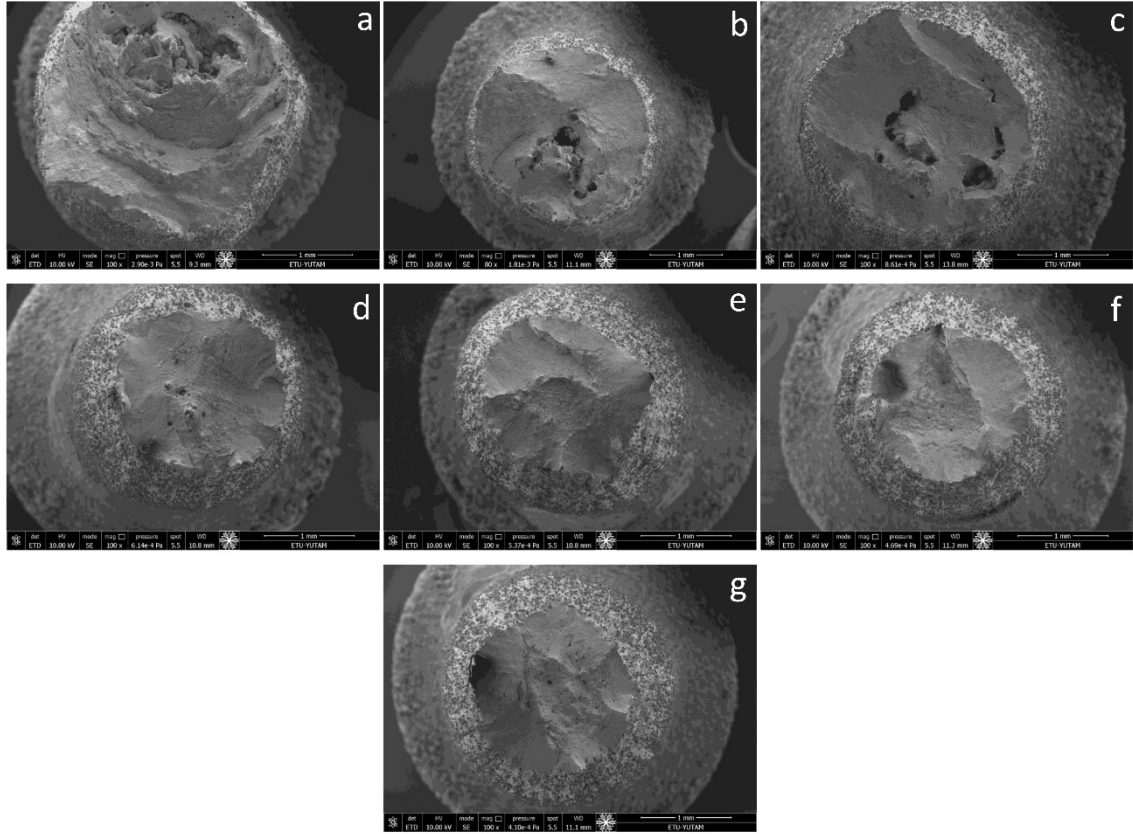


Şekil 4.10. Farklı yana kayma miktarları ile üretilen numunelerin uzama değerlerindeki değişim

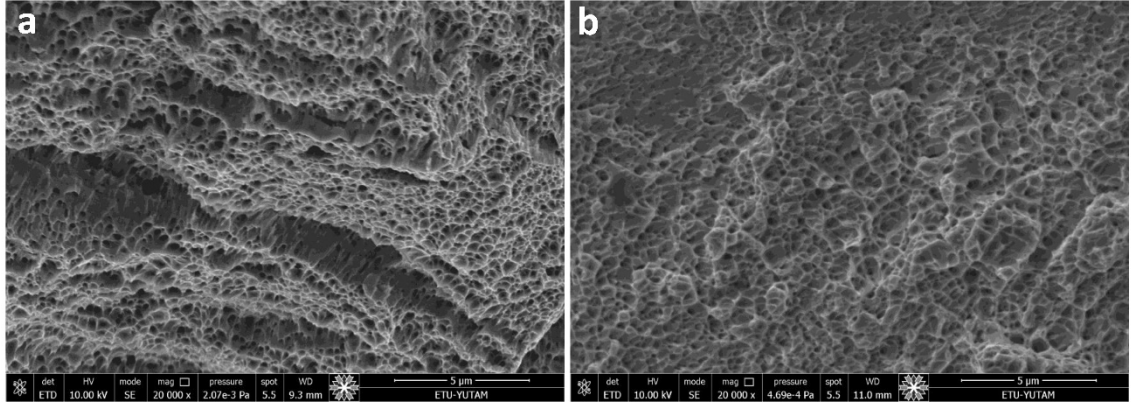
SLE yöntemi ile 100 W lazer gücü, 600 mm/s tarama hızı ve farklı yana kayma değerleri kullanılarak üretilen çekme numunelerinin test sonrası kırılma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Ayrıca en düşük ve en yüksek uzama değerlerinin elde edildiği %30 ve %70 yana kayma değerleri ile üretilen numunelerin kırılma

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

yüzeylerine ait SEM detay görüntüleri Şekil 4.12’de sunulmuştur. Şekil 4.11’de farklı yana kayma değerleri için alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, %30-50 yana kayma aralığında SLE ile üretimden kaynaklanan boşluklar dikkat çekmektedir. %60-80 yana kayma aralığında bu boşlukların önemli oranda azaldığı ve %90 yana kayma değeri için boşlukların tekrar oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 4.12’de verilen kırılma yüzeylerine ait detay SEM resimlerinde çukurcuklu bir yapı (dimples) görülmekte olup, söz konusu kırılma yüzey formu sünek kırılmanın önemli bir göstergesidir. Bu durum aynı zamanda malzemenin yüksek tokluk özelliği sergilediğini göstermektedir. Şekil 4.12’de kırılma yüzeylerinde görülen çukurcukların boyut ve formlarının farklı olduğu görülmektedir. Daha yüksek süneklığe sahip %70 yana kayma değeri ile üretilen numunede uniform ve derin çukurlar bulunurken (Şekil 4.12b), seçilen parametreler içerisinde en düşük süneklığe sahip %30 yana kayma değeri ile üretilen numunede farklı boyutlarda daha sık çukurlar görülmektedir (Şekil 4.12a) (Song et al., 2020).



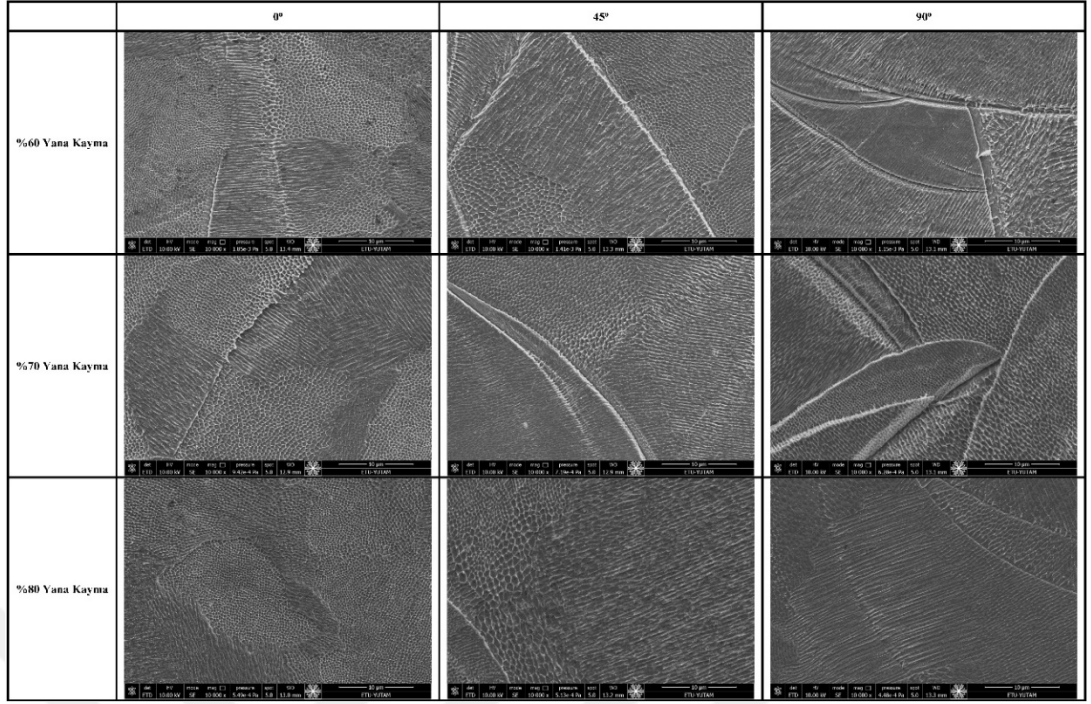
Şekil 4.11. Farklı yana kayma miktarları ile üretilen çekme numunelerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, a) %30 yana kayma, b) %40 yana kayma, c) %50 yana kayma, d) %60 yana kayma, e) %70 yana kayma, f) %80 yana kayma, g) %90 yana kayma



Şekil 4.12. a) %30, b) %70 yana kayma değerleri ile üretilen numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

Farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen numunelere ait mikroyapısal özellikler

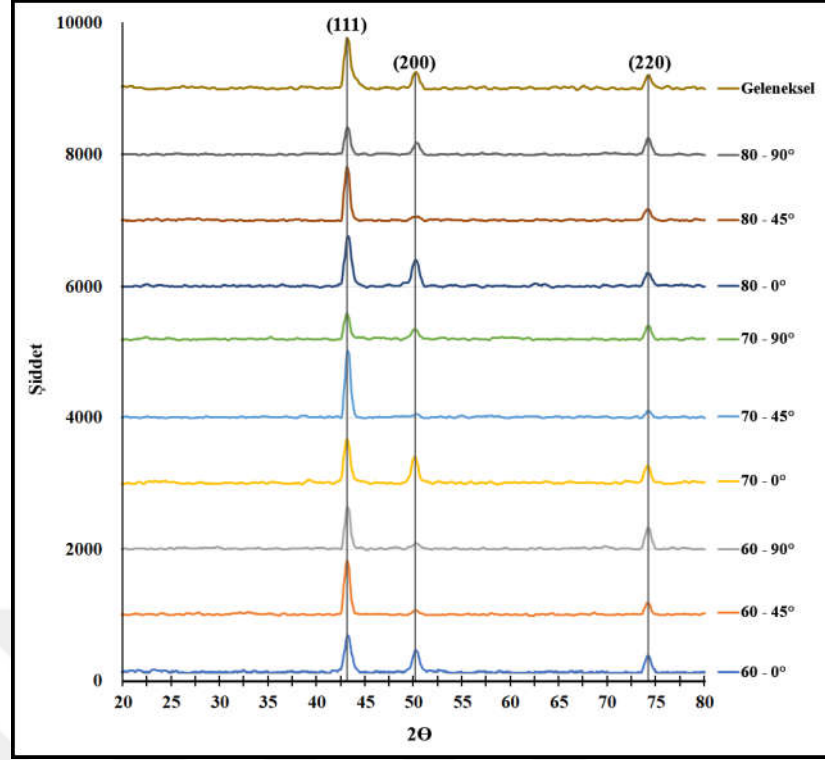
Mekanik incelemeler sonrası belirlenen optimum yana kayma değerleri (%60-70-80) için 3 farklı inşa oryantasyonu (0, 45 ve 90°) kullanılarak SLE yöntemi ile üretilen prizmatik deney numunelerinin yüzeylerinden alınan mikroyapı SEM görüntüleri Şekil 4.13'te verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde ince bir hücrese/dendritik yapı (cellular/dendritic structure) görülmektedir. Bu mikroyapı, döküm tekniği ile elde edilen yapılarda olduğu gibi SLE yönteminde karşılaşılan yüksek soğuma hızları nedeniyle hızlı katılaşmanın bir sonucu olarak oluşmaktadır (Yasa & Kruth, 2011). 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numunelerde hücrese mikroyapı ağırlıklı olmak üzere bazı tanelerin dendritik olarak büyüdüğü ve mikroyapının daha homojen olduğu görülmektedir. İnşa oryantasyonunun artışı ile (45°→90°) mikroyapıda tanelerin tercihli yönlendiği (epitaksiyel büyüme) ve mikroyapıda dendritik büyümenin yoğunlaştığı görülmektedir (Salman et al., 2019; Z. Sun et al., 2016; Wang et al., 2016). Hücrelerin merkezi östenit- γ fazından oluşur ve Ni, Mn, Cu gibi östenit stabilize edici elementler açısından zengin, hücre sınırları ise Mo, Cr ve Si gibi ferritik stabilizatörler açısından zengin olup SLE prosesindeki hızlı katılaşmanın bir sonucu olarak mikroyapıda segregasyon oluşmaktadır (Prashanth & Eckert, 2017).



Şekil 4.13. Farklı yana kayma miktarları ve inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin mikroyapı SEM görüntüleri

Farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen numunelere ait XRD sonuçları

Geleneksel ve SLE yöntemi ile farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen 316L paslanmaz çeliğe ait XRD sonuçları Şekil 4.14’te verilmiştir. Tüm numunelerde (110), (200) ve (220) düzlemleri için YMK yapıya sahip γ -Fe pikleri elde edilmiştir. SLM işlemi sırasında çok yüksek soğuma hızına rağmen, östenit oluşturuvcu Ni elementinin varlığından dolayı sadece östenit fazı elde edilmiştir (Wang et al., 2016). 0° inşa oryantasyonu kullanılarak farklı yana kayma mesafelerinde üretilen numunelere ait pikler incelendiğinde, her üç düzlem içinde geleneksel numuneye çok yakın şiddet değerlerinin tespit edildiği görülmektedir. 45° ve 90° inşa oryantasyonlarında üretilen numuneler için özellikle (200) düzleminde piklerin genişlediği ve şiddetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum kafes bozulmalarına neden olan kalıntı gerilmelerin varlığını göstermektedir (Z. Sun et al., 2016). XRD sonuçlarına göre yapılan genel değerlendirmede, kristal yapı üzerinde inşa oryantasyonunun, yana kayma mesafesi parametresinden daha büyük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.14. Farklı yana kayma miktarları ve inşa oryantasyonlarında üretilen numunelerin XRD grafiği

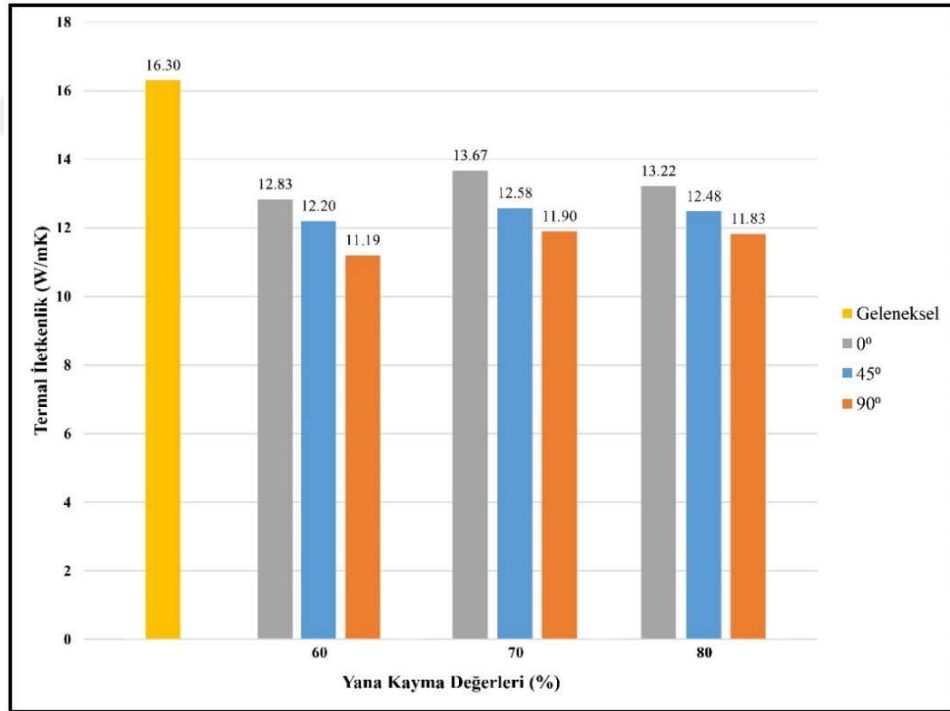
Farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen numunelere ait termal özellikler ve yoğunluk değerleri

Yapısal ve mekanik incelemeler sonrası belirlenen optimum yana kayma değerleri için 3 farklı inşa oryantasyonu (0, 45 ve 90°) kullanılarak üretilen numunelerdeki boşluk miktarları hakkında önemli bilgiler veren termal iletkenlik ölçüm sonuçları Şekil 4.15'te sunulmuştur. Karşılaştırma yapmak amacı ile geleneksel yöntemle üretilen 316L paslanmaz çeliğe ait termal iletkenlik sonucu da grafiğe eklenmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek ısıl iletkenlik değerinin geleneksel yöntemle (dövme) üretilen numune için elde edildiği görülmüştür. SLE yöntemi ile üretilen numunelerde %100 doluluk oranına erişilememesinin bir sonucu olarak termal iletkenlik değerleri azalmıştır. Yana kayma değerleri açısından yapılan değerlendirmede, %70 yana kayma değeri her üç inşa oryantasyonu için de daha yüksek termal iletkenlik değerlerini vermiştir. SLE yöntemi ile üretilen numunelerin termal iletkenlik değerleri, artan inşa oryantasyonu açısı değerleri ile azalmıştır. Üretim platformunda yatay olarak üretilen (0°) numunelerde, ilgili katmandaki üretim yüzey alanının diğer iki oryantasyona göre daha büyük olması ile yapıya daha fazla ısı girdisi sağlanmakta ve daha iyi katman bütünlüğü elde

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

edilmektedir. Sonuç olarak üst üste eklenen hacimsel bütünlüğü sağlanmış katmanlar ile doluluk oranı yüksek ve termal iletkenlik değerlerinin daha iyi olduğu numuneler elde edilmiştir.

En yüksek termal iletkenlik değerlerinin elde edildiği 0° inşa oryantasyonu için üç farklı yana kayma değerinde (%60-70 ve 80) üretilen numunelerin termal iletkenlik değerlerini doğrulamak ve numunelerin doluluk oranlarını daha hassas bir şekilde belirlemek için bu üç numune üzerinden Helyum piknometresi yarımıyla yoğunluk ölçümü alınarak en yüksek doluluk oranının elde edildiği yana kayma miktarı tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen yoğunluk değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretilen 316L paslanmaz çeliğin yoğunluğu 8.0 g/cm³ olup SLE ile üretim sonrası yoğunluk değerleri beklenildiği gibi bir miktar düşük olarak elde edilmiştir. %70 yana kayma miktarı ile üretilen numunenin yoğunluk değeri 7.8914 g/cm³ olup en yüksek doluluk oranının elde edildiği üretim parametresi olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Geleneksel yöntemle ve SLE yöntemi ile farklı yana kayma miktarları ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen numunelerin termal iletkenlik değerleri

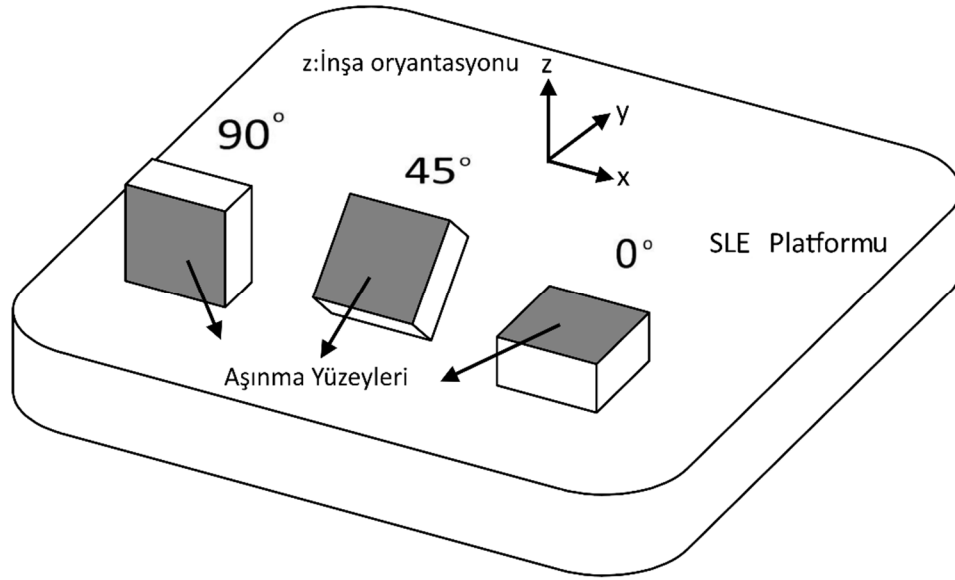
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.2. %60, 70 ve 80 yana kayma miktarları ile üretilen numunelere ait yoğunluk ve doluluk oranı değerleri

Yana Kayma Miktarı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Doluluk Oranı (%)
60	7.7617	97.02
70	7.8914	98.64
80	7.8768	98.46

4.3 Tribolojik Özelliklerin Karakterizasyonu

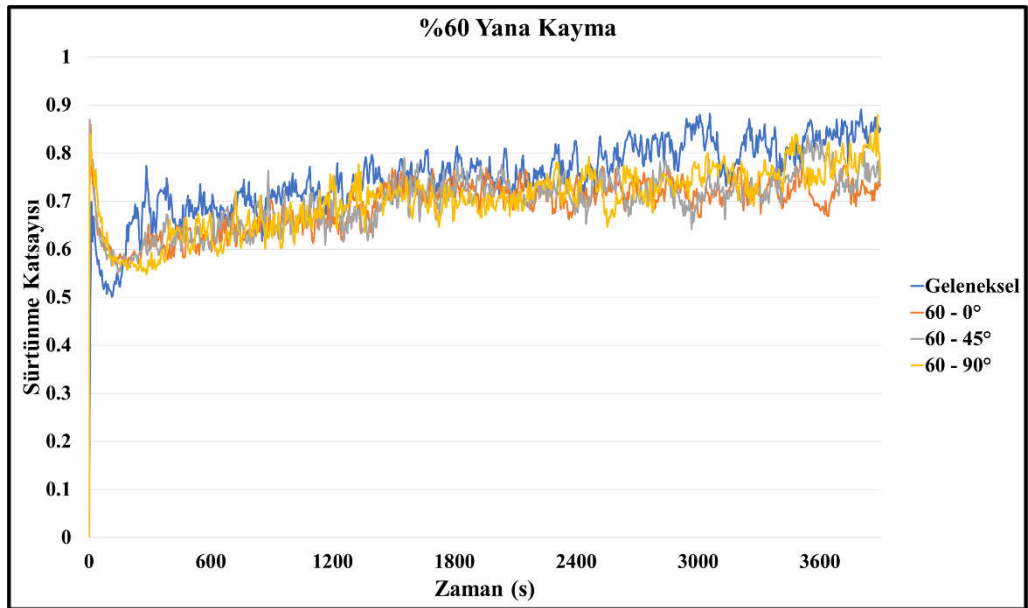
Aşınma testleri Şekil 4.16’da şematik olarak gösterilen SLE platformu üzerinde üç farklı inşa oryantasyonu kullanılarak üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir inşa oryantasyonu için %60-70 ve 80 yana kayma değerleri kullanılmış olup, üretilen numunelerin test yüzeyleri şekil üzerinde belirtilmiştir. Söz konusu test yüzeylerine aşınma testlerinin uygulanmasının haricinde mikrosertlik ölçümleri de alınmıştır.



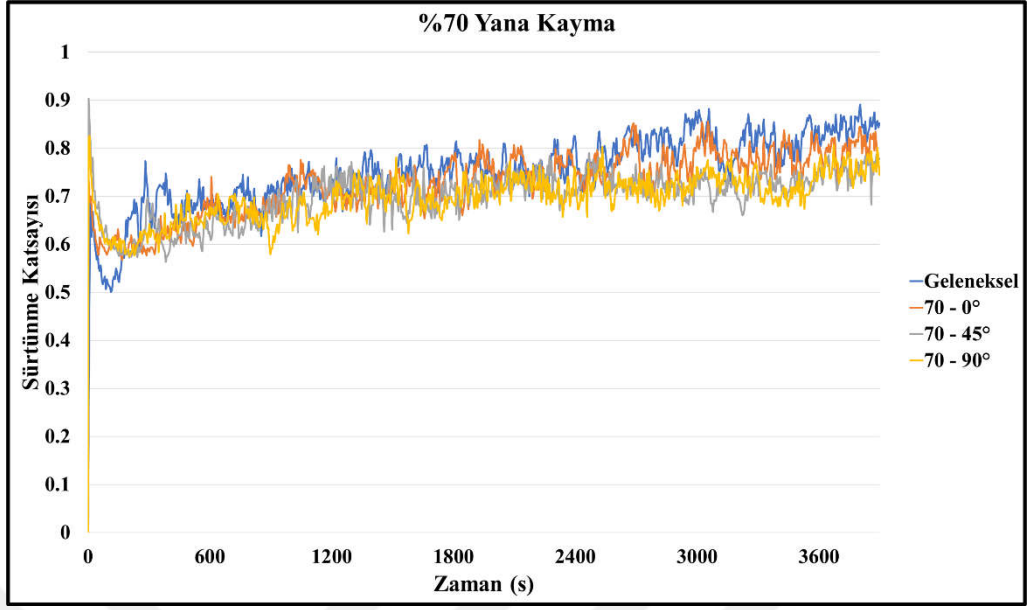
Şekil 4.16. SLE yöntemi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen aşınma test numunelerinin şematik gösterimi

4.3.1. Geleneksel ve SLE yöntemi üretilen numunelerin sürtünme katsayıları

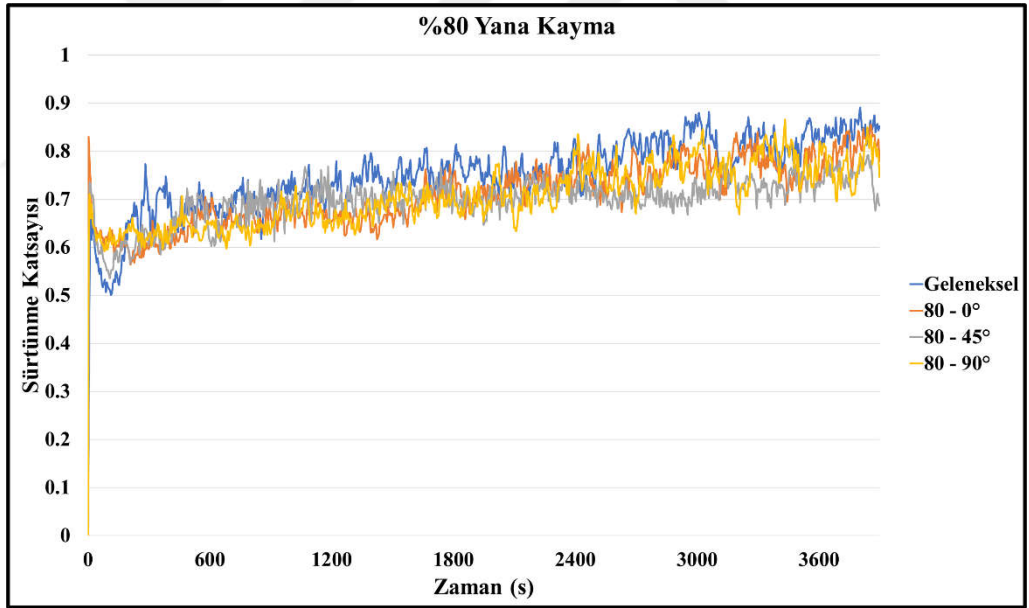
SLE yöntemi ile %60-70-80 yana kayma mesafeleri ve 0° - 45° - 90° inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen numuneler ile referans oluşturması amacıyla geleneksel 316L paslanmaz çeliğe ait sürtünme katsayısı sonuçları Şekil 4.17-19'da verilmiştir. Hem SLE numuneleri hem de geleneksel numune yüzeyleri, aşınma testi uygulanmadan önce metalografik yöntemler kullanılarak yüzey pürüzlülüğü değerleri $0.15 \mu\text{m}$ aralığında hazırlanmıştır. Tüm numuneler için sürtünme katsayısı (COF) değerleri aşınma testinin başlangıcında ilk temas ile yükselmiş ve karşıt aşındırıcı ile yüzeylerin birbirine alışması sonrası testin ilerleyen kısımlarında daha kararlı bir form almıştır. Tüm numuneler için sürtünme katsayısı eğri formları birbirine benzer olarak elde edilmiştir. Numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Geleneksel yöntemle üretilmiş 316L paslanmaz çeliğe ait ortalama sürtünme katsayısı yaklaşık olarak 0.75 olarak belirlenmiş olup elde edilen sonuç literatürde yer alan çalışmalarla uyumlu olarak elde edilmiştir (Yetim et al., 2008). SLE ile üretilen tüm numuneler için elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin geleneksel olarak üretilen numuneden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değerleri, %60-70 yana kayma değerleri ve 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numuneler için elde edilmiştir.



Şekil 4.17. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %60 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere ait sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 4.18. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %70 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere ait sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 4.19. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %80 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere ait sürtünme katsayısı grafiği

Çizelge 4.3. SLE yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak üretilen numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Numune	Ortalama Sürtünme Katsayısı
Geleneksel	0.7511
60 - 0°	0.5551
60 - 45°	0.6972
60 - 90°	0.5563
70 - 0°	0.5650
70 - 45°	0.5619
70 - 90°	0.6975
80 - 0°	0.7108
80 - 45°	0.6981
80 - 90°	0.7065

4.3.2 Geleneksel ve SLE yöntemi üretilen numunelerin aşınma oranları ve mikrosertlik değerleri

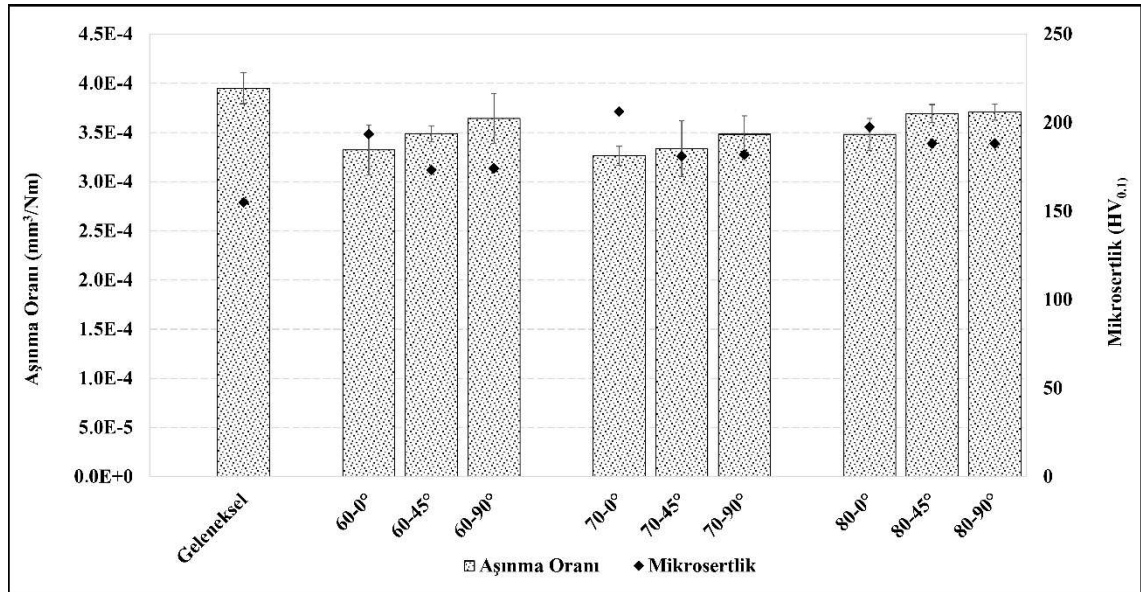
Geleneksel (dövme) ve SLE yöntemi ile farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen 316L paslanmaz çelik malzemenin mikrosertlik ve aşınma oranı değerlerini gösteren grafik Şekil 4.20'de sunulmuştur. Dövme yöntemi ile üretilen paslanmaz çeliğin sertlik değeri yaklaşık olarak 155 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. SLE yöntemi ile üretilen numunelerde hızlı soğumanın etkisi ile değişen mikroyapının bir sonucu olarak mikrosertlik değerleri artmıştır. Mikrosertlik değerlerindeki bu değişim özellikle her üç yana kayma değerinde 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numuneler için daha belirgin olarak elde edilmiştir. En yüksek yüzey sertliği %70 yana kayma mesafesi ve 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numune için 205 HV_{0.1} olarak ölçülmüş olup geleneksel numuneye oranla yaklaşık %20 oranında bir artış elde edilmiştir.

Şekil 4.20'de verilen aşınma oranı değerlerine göre, SLE ile üretilen numunelerde her üç yana kayma değeri içinde inşa oryantasyonundaki artışa bağlı olarak aşınma oranının arttığı görülmektedir. En düşük aşınma oranı, en yüksek mikrosertlik ve doluluk oranının elde edildiği %70 yana kayma mesafesi ve 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numune (70 - 0°) için elde edilmiştir. 70 - 0° numunesine ait aşınma oranı değeri, geleneksel yöntem ile üretilen numunenin aşınma oranından %17 oranında düşük olarak elde edilmiştir. Geleneksel numuneye oranla daha düşük aşınma oranlarının elde edildiği 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numunelerde, %60 ve 80 yana kayma mesafesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

değerlerinin %70'e kıyasla daha yüksek aşınma oranı değerleri sergilediği tespit edilmiştir.

Lazer izlerindeki bindirmenin daha yüksek olduğu %60 yana kayma değerinde, üretilen numuneye olan ısıl birikimin diğer değerlere oranla daha yüksek olması ve buna bağlı olarak yapıya aktarılan enerjinin mikro yapı üzerindeki olumsuz etki oluşturduğu açıkça görülmektedir. %80 yana kayma değerinde ise lazer izlerindeki bindirme mesafesinin artışı ile yapıdaki boşluk ve gözeneklilik miktarının artışı sonrası aşınma oranlarında artış olduğu tespit edilmiştir. Değişken inşa oryantasyonları kullanılarak yapılan SLE üretim işlemlerinde, artan inşa oryantasyonu açıları ile üretimdeki katman sayılarının artmakta ve buna bağlı olarak katılacak tabakaların soğuma koşulları değişmektedir. SLE ile üretim işlemlerinde 45° ve 90° inşa oryantasyonu açılarının kullanıldığı numunelerde 0°'ye oranla tabaka sayısının artması ile sertlik değerleri azalarak aşınma oranı değerleri artmıştır. Sonuç olarak %70 yana kayma değeri bir eşik değer olarak mikrosertlik ve aşınma oranı değerleri açısından optimum değer olarak saptanmıştır. Bu değer altındaki ve üzerindeki yana kayma değerlerinde (%60 ve %80), aşınma oranı açısından düşüş eğilimi başladığı için %50 ve %90 gibi daha alt ve üst yana kayma değerleri ile üretilen numuneler için aşınma testlerinin testler gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 4.20. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak farklı yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere ait mikrosertlik ve aşınma oranı grafiği

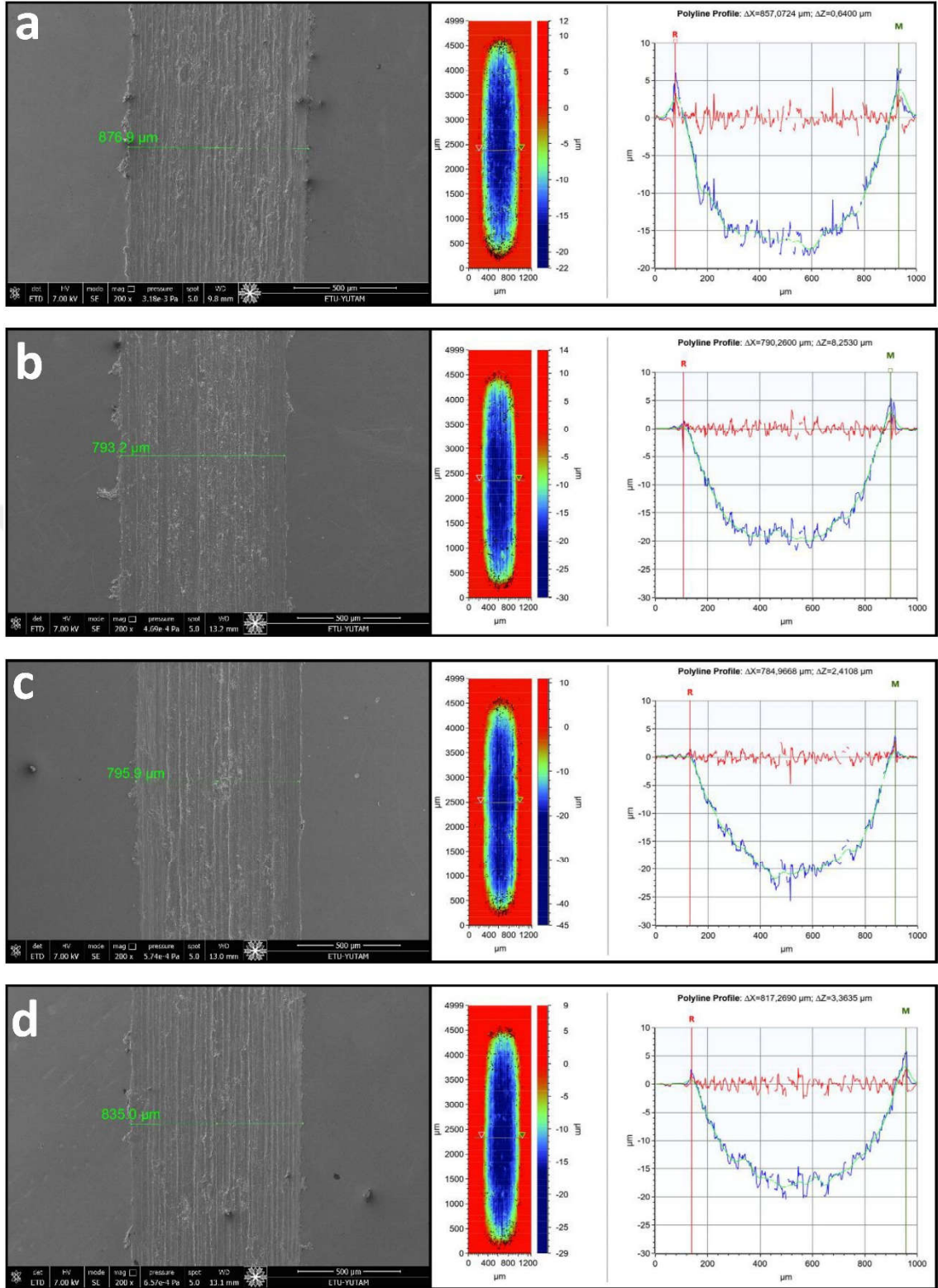
Geleneksel ve SLE yöntemi ile farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen 316L paslanmaz çelik malzemeye ait aşınma izi SEM resimleri ve 3B optik profilometre görüntüleri Şekil 4.21-23'te verilmiştir. Görüntüler her bir yana kayma değeri için farklı inşa oryantasyonlarında üretilen ve referans oluşturması amacıyla geleneksel numuneye ait görüntüler ile birleştirilerek sunulmuştur.

4.3.3. Aşındırılmış yüzeylerin karakterizasyonu

Aşındırılmış yüzeylere ait SEM görüntüleri incelendiğinde, hem geleneksel hem de SLE ile üretilen paslanmaz çelik malzeme için aşınma mekanizmasının adezif aşınma ile birlikte, abrazyif aşınma ve plastik deformasyon mekanizmalarının bir kombinasyonu şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Paslanmaz çelik malzeme ile karşıt aşındırıcı (Al_2O_3) malzemenin teması ile oluşan adezyon, aşınma testinin ilerleyen safhalarında aşınma debriyelerinin oluşumuna sebep olmaktadır. Aşınma çiftleri ve bu çiftler arasında oluşan aşınma ürünleri üçlü temas aşınmasına (three body wear) sebep olarak aşınma miktarının daha da artmasını ve abrazyif aşınma mekanizmasının sürece dahil olmasını sağlamaktadır. Tüm numunelerde bu etki sonrası oluşan abrazyif kanalların oluşumu açıkça görülmektedir. Ayrıca aşınma izi kenarlarında görülen yığılmalar, test esnasında meydana gelen plastik deformasyonu açıkça göstermektedir.

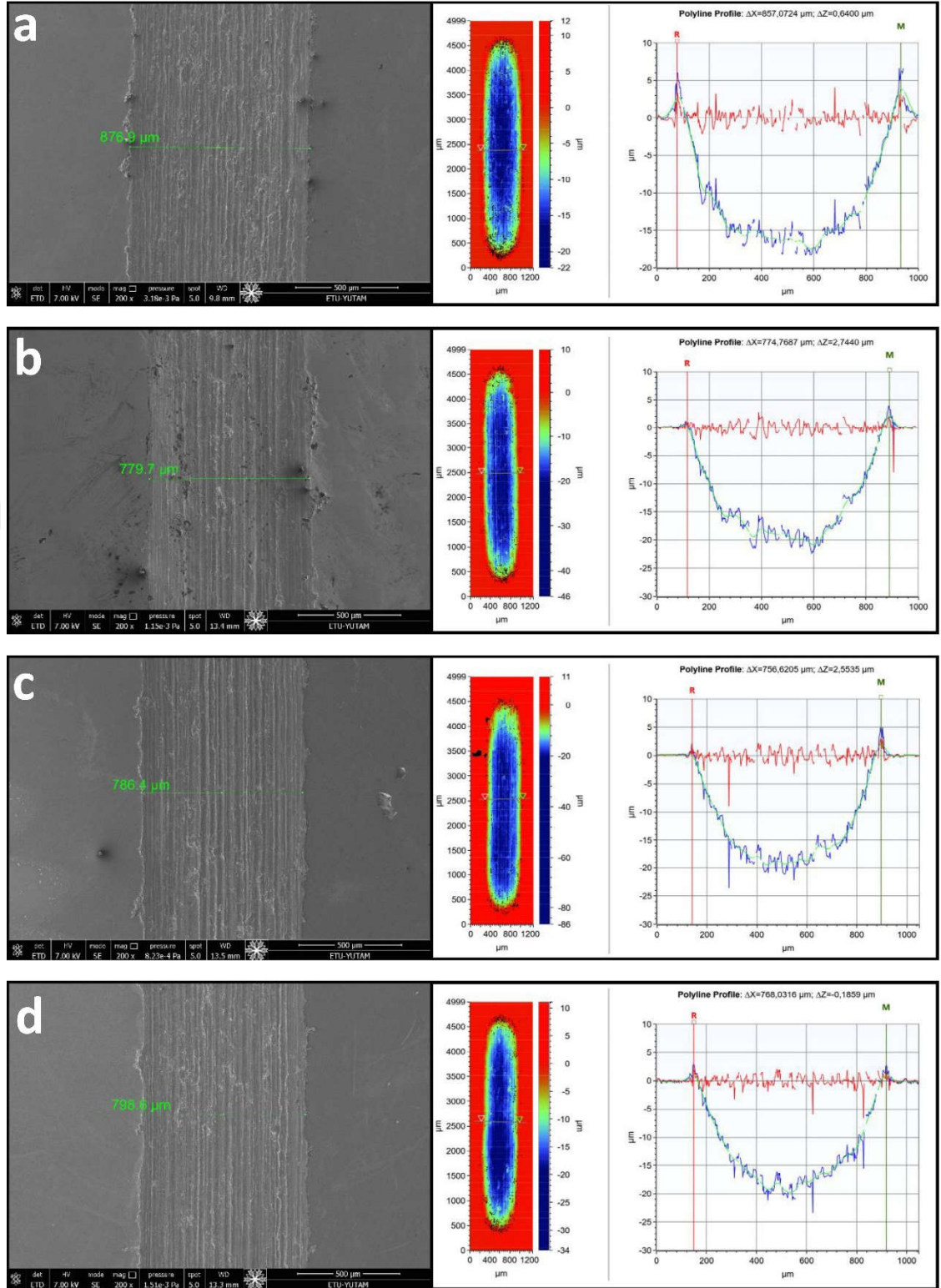
Şekil 4.21-23'te verilen aşınma iz genişlikleri açısından yapılan değerlendirmede, geleneksel 316L paslanmaz çeliğin aşınma iz genişliği SLE ile üretilen numunelerin aşınma iz genişliklerinden daha yüksek olarak elde edilmiştir. SLE ile üretilen tüm numunelerde inşa oryantasyonundaki artışa bağlı olarak aşınma iz genişlikleri artmıştır. En düşük aşınma iz genişliği, en yüksek yüzey sertliği ve en düşük aşınma oranı değerlerine sahip olan %70 yana kayma ve 0° 'lik inşa oryantasyonunda üretilen numune için elde edilmiştir. Tüm yana kayma değerleri ve Şekil 4.16'da sunulan aşınma testlerinin gerçekleştirildiği yüzeyler dikkate alındığında üretim tablasına yatay olarak üretimi gerçekleştirilen 0° inşa oryantasyonu aşınma direnci açısından en uygun oryantasyon olarak tespit edilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



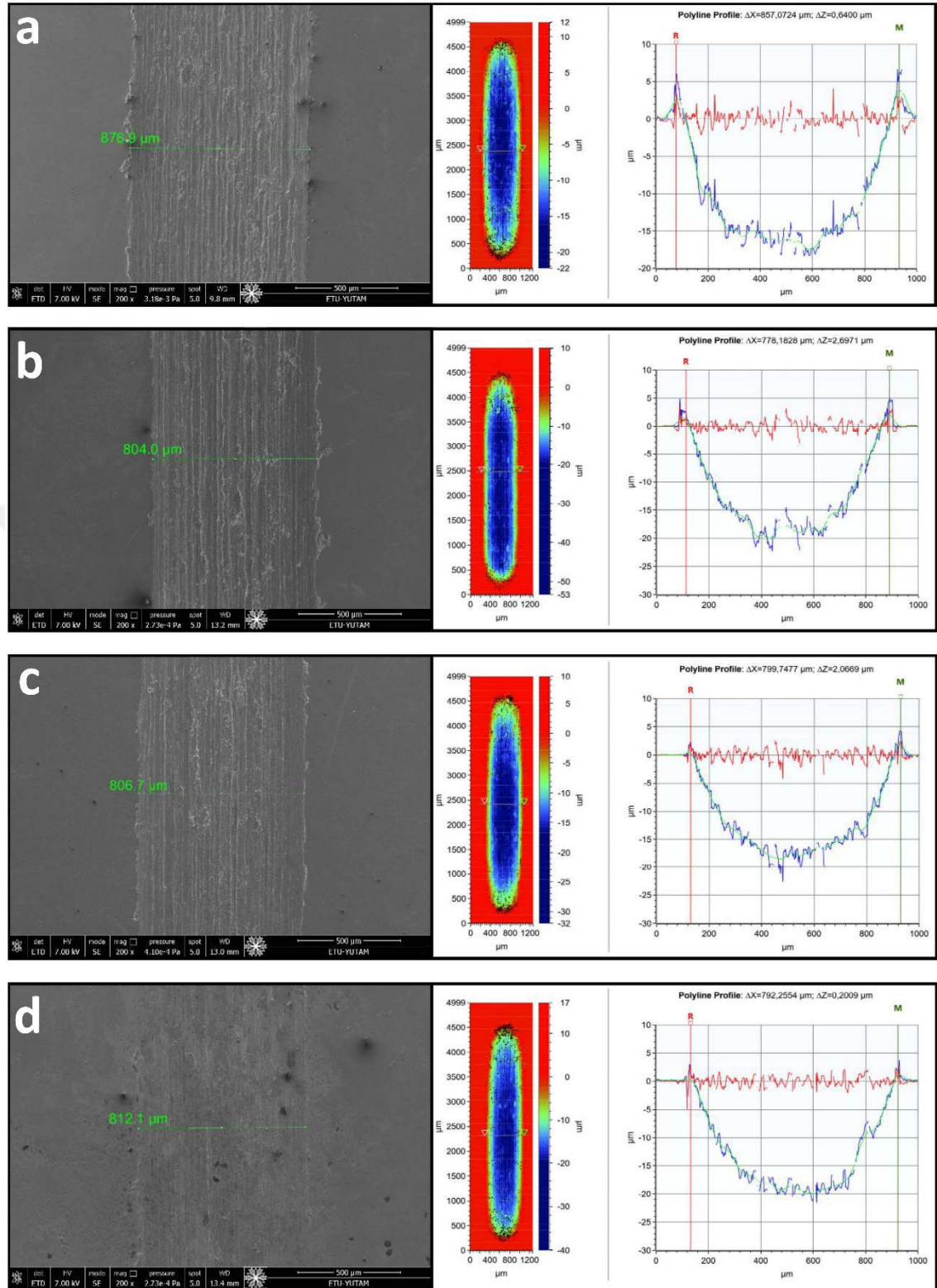
Şekil 4.21. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %60 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere aşınma izi SEM ve optik profilometre görüntüleri, a) Geleneksel, b) 0° inşa oryantasyonu, b) 45° inşa oryantasyonu, b) 90° inşa oryantasyonu

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.22. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %70 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere aşınma izi SEM ve optik profilometre görüntüleri, a) Geleneksel, b) 0° inşa oryantasyonu, b) 45° inşa oryantasyonu, b) 90° inşa oryantasyonu

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.23. Geleneksel ve SLE yöntemi kullanılarak %80 yana kayma mesafesi ile farklı inşa oryantasyonlarında üretilen numunelere aşınma izi SEM ve optik profilometre görüntüleri, a) Geleneksel, b) 0° inşa oryantasyonu, b) 45° inşa oryantasyonu, b) 90° inşa oryantasyonu

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, eklemeli üretim yöntemlerinden Seçici Lazer Ergitme yöntemi ve geleneksel bir yöntem olan dövme yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çelik malzemenin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. SLE yöntemi ile gerçekleştirilen üretim işlemlerinde çok sayıda üretim parametresi söz konusu olduğu için, optimum üretim parametreleri belirlenirken sistematik olarak parametre azaltılması suretiyle malzeme ve zaman tasarrufu sağlanmaya çalışılmıştır. Çalışma sonrası elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- SLE yöntemi ile üretimlerde kullanılacak optimum lazer üretim parametrelerinin belirlenmesi için 316L paslanmaz çelik levha üzerine yapılan tekli lazer vuruşları sonrası hem lazer izlerinin morfolojisi hem de eriyik havuzuna ait kesit incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonrası iletken moda sahip ve en-boy oranının (R) 1'e yaklaştığı 100 W lazer gücünde, 600, 800 ve 1000 mm/s tarama hızı parametrelerinin optimum eriyik havuzu formunu sağladıkları tespit edilmiştir.
- Eriyik havuzu formu incelemeleri sonrası tespit edilen optimum lazer üretim parametreleri olan 100 W lazer gücü ve 600-800-1000 mm/s tarama hızı değerleri kullanılmak suretiyle kontur vuruşları gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonrası 600 mm/s tarama hızı ile gerçekleştirilen üretimlerde ise kontur duvarının oldukça homojen olduğu ve diğer iki tarama hızında olduğu gibi boğumlu bir yapının oluşmadığı tespit edilmiştir. Yapılan bu incelemeler ışığında 25 µm sabit toz kalınlığı için güç 100 W ve tarama hızı 600 mm/s olarak belirlenmiştir.
- Kontur vuruşları sonrası belirlenen duvar kalınlığı değerine göre yana kayma miktarı %30-90 aralığında %10 artımla olmak üzere 30-90 µm aralığında seçilmiştir. Bu yana kayma değerleri kullanılarak üretim platformuna dik yerleşim olacak şekilde çekme numuneleri üretilerek çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmalarında mekanik özellikler açısından kırılma anındaki uzama değeri performans kriteri olarak alınmıştır. Testler sonrası en yüksek uzama değerlerinin

elde edildiği % 60, 70 ve 80 yana kayma değerleri optimum değer aralığı olarak belirlenmiştir.

- Mekanik incelemeler sonrası belirlenen optimum yana kayma değerleri (%60-70-80) için 3 farklı inşa oryantasyonu (0, 45 ve 90°) kullanılarak üretilen numuneler için mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş olup, mikroyapı görüntülerinde ince bir hücresel/dendritik yapı tespit edilmiştir. 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numunelerde hücresel mikroyapı ağırlıklı olmak üzere bazı tanelerin dendritik olarak büyüdüğü ve mikroyapının daha homojen olduğu görülmüştür. İnşa oryantasyonunun artışı ile (45°→90°) mikroyapıda tanelerin tercihli yönlendiği ve mikroyapıda dendritik büyümenin yoğunlaştığı tespit edilmiştir.
- Geleneksel ve SLE yöntemi ile farklı yana kayma değerleri ve inşa oryantasyonları kullanılarak üretilen 316L paslanmaz çeliğe ait XRD sonuçlarına göre tüm numunelerde YMK yapıya sahip γ -Fe pikleri elde edilmiştir. 45° ve 90° inşa oryantasyonlarında üretilen numuneler için piklerin genişlediği ve şiddetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum kafes bozulmalarına neden olan kalıntı gerilmelerin varlığını göstermektedir. Kristal yapı üzerinde inşa oryantasyonunun, yana kayma mesafesi parametresinden daha büyük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Yapısal ve mekanik incelemeler sonrası belirlenen optimum yana kayma değerleri için 3 farklı inşa oryantasyonu (0, 45 ve 90°) kullanılarak üretilen termal iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yana kayma değerleri açısından yapılan değerlendirmede, %70 yana kayma değeri her üç inşa oryantasyonu için de daha yüksek termal iletkenlik değerlerini vermiştir. Termal iletkenlik değeri sonuçlarını desteklemek için gerçekleştirilen yoğunluk ölçümleri sonrası, % 70 yana kayma miktarı ve 0° inşa oryantasyonunda üretilen numunenin yoğunluk değeri 7.8914 g/cm³ olup en yüksek doluluk oranının elde edildiği üretim parametresi olarak belirlenmiştir.
- Tribolojik incelemeler sonrası, SLE ile üretilen tüm numuneler için elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin geleneksel olarak üretilen numuneden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı değerleri, %60-70 yana kayma değerleri ve 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numuneler için elde edilmiştir.
- Aşınma oranı değerlerine göre, SLE ile üretilen numunelerde her üç yana kayma değeri içinde inşa oryantasyonundaki artışa bağlı olarak aşınma oranının arttığı

görülmüştür. En düşük aşınma oranı, en yüksek mikrosertlik ve doluluk oranının elde edildiği %70 yana kayma mesafesi ve 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numune (70 - 0°) için elde edilmiştir. 70 - 0° numunesine ait aşınma oranı değeri, geleneksel yöntem ile üretilen numunenin aşınma oranından % 17 oranında düşük olarak elde edilmiştir. Geleneksel numuneye oranla daha düşük aşınma oranlarının elde edildiği 0° inşa oryantasyonu ile üretilen numunelerde, %60 ve 80 yana kayma mesafesi değerlerinin %70'e kıyasla daha yüksek aşınma oranı değerleri sergilediği tespit edilmiştir.

5.2. Öneriler

SLE yöntemi ile üretilen parçaların tribolojik özellikleri, üretimde kullanılan parametre ve stratejilerden büyük oranda etkilenmektedir. Dolayısı ile üretimde kullanılacak parametrelerin, malzemenin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisinin bilinmesi/kontrol edilmesi ve optimum üretim şartlarının belirlenmesi son derece önemlidir. Bu tez çalışmasında, söz konusu üretim parametrelerinin 316L paslanmaz çeliğinin yapısal, mekanik özellikleri ve aşınma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Seçici Lazer Ergitme (SLE) yönteminde kullanılan üretim parametre/stratejilerinin paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri ve aşınma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma sonrası yapılacak diğer çalışmalar ile SLE yönteminde kullanılacak farklı üretim parametrelerinin paslanmaz çeliğin yorulma ve korozyon özellikleri üzerindeki etkileri incelenebilir. Ayrıca paslanmaz çelik toz malzeme içerisine seramik karakterde olan farklı takviye malzemeleri ilave edilerek elde edilecek nanokompozit sistemler için üretim parametrelerinin optimizasyonu ve yapısal-mekanik-tribolojik özelliklerin karakterizasyonu gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Alsalla, H. H., Smith, C., & Hao, L. (2018). Effect of build orientation on the surface quality, microstructure and mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel. *Rapid Prototyping Journal*, 24(1), 9–17. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2016-0068>
- Alvi, S., Saeidi, K., & Akhtar, F. (2020). High temperature tribology and wear of selective laser melted (SLM) 316L stainless steel. *Wear*, 448–449(January), 203228. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203228>
- Anonim. (n.d.-a). *Introduction of SLM process*. University of Birmingham. <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/irc/amp-lab/SLM.pdf>
- Anonim. (n.d.-b). *SLS*. 3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/#sls
- Anonim. (2008). *Direct Metal Laser Sintering*. Custompart.Net. <https://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- Anonim. (2021a). *What Is DMLS?* All3dp. <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- Anonim. (2021b). *What is Micro Laser Sintering?* 3D MicroPrint GmbH. <https://www.3dmicroprint.com/technology/what-is-micro-laser-sintering/>
- Babalık, F. C., & Çavdar, K. (2012). *Makine Mühendisliğine Giriş* (1st ed.). Dora Basım Yayın Ltd. Şti.
- Bartolomeu, F., Buciumeanu, M., Pinto, E., Alves, N., Carvalho, O., Silva, F. S., & Miranda, G. (2017). 316L stainless steel mechanical and tribological behavior—A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Additive Manufacturing*, 16, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.007>
- Bian, L., Shamsaei, N., & Usher, J. M. (2017). Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties. In *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties* (Vol. 148). <https://doi.org/10.1201/9781315151441>
- Chen, N., Ma, G., Zhu, W., Godfrey, A., Shen, Z., Wu, G., & Huang, X. (2019). Enhancement of an additive-manufactured austenitic stainless steel by post-manufacture heat-treatment. *Materials Science and Engineering A*, 759(January), 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.111>
- Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., & Sienz, J. (2015). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5–8), 869–

879. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2>

- Dedeakayoğulları, H., Kaçal, A., Dumlupınar, K., Lisansüstü, Ü., Enstitüsü, E., Teknolojiler, İ., Dalı, A., Kütahya, T., Simav, Ü., Fakültesi, T., & Bölümü, M. M. (2020). MATECA İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları MATECA Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi. *Derleme Makale / Review Article Manufacturing Technologies and Applications*, 1(1), 1–12.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition*, 3, 1–498. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Groover, M. P. (2012). Metal Forming and Sheet Metalworking. In *Fundamental of Modern Manufacturing Material, Processes, and System*.
- Hong, Y., Zhou, C., Zheng, Y., Zhang, L., Zheng, J., Chen, X., & An, B. (2019). Formation of strain-induced martensite in selective laser melting austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 740–741(September 2018), 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.121>
- Hu, Z., Nagarajan, B., Song, X., Huang, R., Zhai, W., & Wei, J. (2019). Formation of SS316L Single Tracks in Micro Selective Laser Melting: Surface, Geometry, and Defects. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9451406>
- Huang, Y., Yang, S., Gu, J., Xiong, Q., Duan, C., Meng, X., & Fang, Y. (2020). Microstructure and wear properties of selective laser melting 316L. *Materials Chemistry and Physics*, 254(January), 123487. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123487>
- Kaya, G. (2019). *Seçici Lazer Ergitme Yöntemi Kullanılarak Farklı Üretim Parametrelerinde Üretilen Ti6al4v Alaşımının Yapısal Ve Tribolojik Özelliklerinin Karakterizasyonu*. Erzurum Teknik Üniversitesi.
- Li, H., Ramezani, M., Li, M., Ma, C., & Wang, J. (2018a). Effect of process parameters on tribological performance of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting. *Manufacturing Letters*, 16, 36–39. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.04.003>
- Li, H., Ramezani, M., Li, M., Ma, C., & Wang, J. (2018b). Tribological performance of selective laser melted 316L stainless steel. *Tribology International*, 128(April), 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.07.021>
- Liu, J., Song, Y., Chen, C., Wang, X., Li, H., Zhou, C., Wang, J., Guo, K., & Sun, J. (2020). Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials and Design*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108355>
- Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., & Fortunato, A. (2017). Effect of selective laser

- melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249(November 2016), 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>
- Mohd Yusuf, S., Lim, D., Chen, Y., Yang, S., & Gao, N. (2021). Tribological behaviour of 316L stainless steel additively manufactured by laser powder bed fusion and processed via high-pressure torsion. *Journal of Materials Processing Technology*, 290(November 2020), 116985. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116985>
- Navrotsky, V., Graichen, A., & Brodin, H. (2015). Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing. *VGB PowerTech*, 12, 48–52.
- Peleg, J. (2020). Additive and Traditionally Manufactured Components A Comparative Analysis of Mechanical Properties. In *Additive and Traditionally Manufactured Components*. <https://doi.org/10.1016/c2019-0-04180-5>
- Prashanth, K. G., & Eckert, J. (2017). Formation of metastable cellular microstructures in selective laser melted alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 707, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.209>
- Saeidi, K., Gao, X., Zhong, Y., & Shen, Z. J. (2015). Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting. *Materials Science and Engineering A*, 625, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.12.018>
- Saeidi, Kamran. (2016). Stainless steels fabricated by laser melting: Scaled-down structural hierarchies and microstructural heterogeneities. In *PhD Thesis*. <http://files/4918/Saeidi - 2016 - Stainless steels fabricated by laser melting scale.pdf>
- Salman, O. O., Gammer, C., Eckert, J., Salih, M. Z., Abdulsalam, E. H., Prashanth, K. G., & Scudino, S. (2019). Selective laser melting of 316L stainless steel: Influence of TiB₂ addition on microstructure and mechanical properties. *Materials Today Communications*, 21(May). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100615>
- Shifeng, W., Shuai, L., Qingsong, W., Yan, C., Sheng, Z., & Yusheng, S. (2014). Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2660–2667. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.002>
- Song, Y., Sun, Q., Guo, K., Wang, X., Liu, J., & Sun, J. (2020). Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*, 793(April), 139879. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139879>
- Subbiah, S. (2015). Science of machining. In *HandBook of Manufacturing Engineering and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4_1
- Sun, Y., Moroz, A., & Alrbaey, K. (2014). Sliding wear characteristics and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(2), 518–526. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0784-8>

- Sun, Z., Tan, X., Tor, S. B., & Yeong, W. Y. (2016). Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rates. *Materials and Design*, *104*, 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.035>
- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, & Kruth, J. P. (2010). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, *58*(9), 3303–3312. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.02.004>
- Tucho, W. M., Lysne, V. H., Austbø, H., Sjolyst-Kverneland, A., & Hansen, V. (2018). Investigation of effects of process parameters on microstructure and hardness of SLM manufactured SS316L. *Journal of Alloys and Compounds*, *740*, 910–925. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.098>
- Vranić, A., Bogojević, N., Ćirić-Kostić, S., Croccolo, D., & Olmi, G. (2017). Advantages and drawbacks of additive manufacturing. *IMK-14 - Istrazivanje i Razvoj*, *23*(3), 57–62. <https://doi.org/10.5937/imk1702057v>
- Wang, D., Song, C., Yang, Y., & Bai, Y. (2016). Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. *Materials and Design*, *100*, 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.111>
- Wei, K., Wang, Z., & Zeng, X. (2017). Preliminary investigation on selective laser melting of Ti-5Al-2.5Sn α -Ti alloy: From single tracks to bulk 3D components. *Journal of Materials Processing Technology*, *244*, 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.032>
- Wendel, B., Rietzel, D., Kühnlein, F., Feulner, R., Hülder, G., & Schmachtenberg, E. (2008). Additive processing of polymers. *Macromolecular Materials and Engineering*, *293*(10), 799–809. <https://doi.org/10.1002/mame.200800121>
- Wroe, J. (2015). Introduction to Additive Manufacturing Technology: A Guide for Designers and Engineers. *European Powder Metallurgy Association*, 28–34. www.epma.com/am
- Yasa, E., & Kruth, J. P. (2011). Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting. *Procedia Engineering*, *19*, 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.130>
- Yetim, A. F., Yildiz, F., Alsaran, A., & Çelik, A. (2008). Surface modification of 316L stainless steel with plasma nitriding. *Kovove Materialy*, *46*(2), 105–116.
- Zhu, Y., Zou, J., Chen, X., & Yang, H. (2016). Tribology of selective laser melting processed parts: Stainless steel 316 L under lubricated conditions. *Wear*, *350–351*, 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.01.004>