

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**TOZ YATAKLI LASER SİNERLEME İLE ÜRETİLMİŞ 316
KALİTE PASLANMAZ ÇELİKLERİN LASER KAYNAĞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan ASLAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

**ŞUBAT 2025
İSTANBUL**

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**TOZ YATAKLI LASER SİNERLEME İLE ÜRETİLMİŞ 316
KALİTE PASLANMAZ ÇELİKLERİN LASER KAYNAĞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan ASLAN
(221210005)
(0009-0004-5464-1708)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN

İstanbul 2025



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Jüri Tez Onay Formu

04/02/2025

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Bu çalışma 04/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

Doç. Dr. Polat TOPUZ

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Doç. Dr. Gökhan ÖZER

Üye (İmza)

İstanbul Fatih Sultan Mehmet

Üniversitesi

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum ‘Toz Yataklı Laser Sinterleme İle Üretilmiş 316 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Laser Kaynağı’ adlı tezin çalışmanın proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (04/02/2025)

Ramazan ASLAN

“Dünyada her şey için, medeniyet için, hayat için, başarı için en gerçek yol gösterici ilimdir, fendir. İlim ve fennin dışında yol gösterici aramak gaflettir, cahilliktir, doğru yoldan sapmaktır. Yalnız ilmin ve fennin yaşadığımız her dakikadaki safhalarının gelişimini anlamak ve ilerlemeleri zamanında takip etmek şarttır. Bin, iki bin, binlerce yıl önceki ilim ve fen lisanının koyduğu kuralları, şu kadar bin yıl sonra bugün aynen uygulamaya kalkışmak, elbette ilim ve fennin içinde bulunmak değildir.”

M. K. ATATÜRK



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması destekçim, hayat arkadaşım Aysun ASLAN'a ve biricik kızımız Ela Nisa ASLAN'a ithafen yazılmıştır.

Bu yüksek lisans tez çalışmamda tez danışmanlığımı büyük bir memnuniyetle kabul eden ve tezimi gerçekleştirmem konusunda beni yönlendiren, bilgilendiren, büyük emeği geçen kıymetli hocam Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Kaynaklı imalat ve testlerin gerçekleştirilmesinde destek olan Gedik Kaynak A.Ş.'ye, eklemeli imalat, SEM görüntüleme ve mekanik testler konusunda yardımlarını esirgemeyen Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi AluTeam Genel Müdürü Dr. Ebubekir Koç ve Doç. Dr. Gökhan Özer'e teşekkürü borç bilirim.

Şubat 2025

Ramazan ASLAN

Uluslararası Kaynak Mühendisi
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Konusu	1
2. EKLEMELİ İMALAT TEKNİĞİYLE METAL ÜRETİMİ	3
2.1. Eklemeli Üretimin Tarihçesi	5
2.2. Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Kategorilere Göre Ayrılması	6
2.2.1. Ergiyik biriktirme/yığıma modelleme tekniği (EBM).....	8
2.2.2 Boyutlu (3B) yazıcı	9
2.2.3. Tabakalı parça üretimi (TPÜ).....	10
2.2.4. Stereolitografi (SLA).....	10
2.2.5. Çoklu püskürtme (polyjet) modelleme (ÇPM).....	11
2.2.6. Direkt metal laser sinterleme (DMLS)	11
2.2.7. Seçici laser ergitme (SLE).....	12
2.2.8. Elektron ışın ergitme (EIE).....	13
2.2.9. Laser metal biriktirme (LMB)	14
2.3. Eklemeli İmalat Uygulama Alanları	15
2.3.1. Havacılık sanayi	15
2.3.2. Otomotiv sanayi.....	15
2.3.3. Sağlık endüstrisi	16
2.3.4. İşleme (tooling) endüstrisi	18
2.3.5. Nano-üretim.....	19
2.3.6. Enerji	19

2.3.7. Yapı sektörü.....	20
2.3.8. Sanat ve hobi uygulamaları	21
2.4. Eklemeli İmalatın Geleceği	21
3. PASLANMAZ ÇELİKLER	23
3.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler	25
3.1.1. Düşük karbonlu krom-nikelli martenzitik paslanmaz çelikler	26
3.1.2. Süper martenzitik paslanmaz çelikler	26
3.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler	27
3.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler	28
3.4. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler	29
3.5. Dupleks (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler.....	30
4. KAYNAĞIN TANIMI, ÇEŞİTLERİ VE TARİHÇESİ	32
4.1. Kaynağın Tanımı	32
4.2. Kaynağın Amacı.....	32
4.2.1. Birleştirme kaynağı	32
4.2.2. Dolgu kaynağı	32
4.3. Yapılış Şekline Göre Kaynak Türleri.....	33
4.3.1. Isı kullanarak yapılan kaynaklar	33
4.3.2. Basınç kullanarak yapılan kaynaklar	34
4.3.3. Basınç ve ısı kullanarak yapılan kaynaklar	34
4.3.4. Laser ışınıyla kaynak	35
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
5.1. Malzeme	40
5.2. Laser Sinterleme İle 316L Kalite Paslanmaz Çeliklerin Üretimi.....	40
5.3. Laser Işın Tekniğiyle Kaynak	41
5.4. Kaynakta Kullanılan İlave Telin Özellikleri	42
5.5. Kullanılan Laser Kaynak Makinası	42
5.6. Kaynak Test Parçasının Kaynak Öncesi Hazırlığı	43
5.7. Kaynaklı Parçaların Karakterizasyonu	44
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	45
6.1. Sertlik	45
6.2. Mikroyapı	47
6.3. EDS Analizi.....	51
7. ÖZET VE SONUÇLAR.....	57

KAYNAKÇA	60
ÖZGEÇMİŞ.....	66



KISALTMALAR

A	: Akım
Ar	: Argon
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CO₂	: Karbondioksit
CW	: Sürekli dalga, continuous wave
ÇPM	: Çoklu Püskürtme (Polyjet) Modelleme
DC	: Doğru Akım
DMLS	: Direkt Metal Laser Sinterleme
EIE	: Elektron Işın Ergitme
EN	: Avrupa Standardı
He	: Helyum
HV	: Vickers Sertlik
ISO	: Uluslararası Standart
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
LBM	: Laser Metal Biriktirme
MAG	: Metal Aktif Gaz
MIG	: Metal Inert Gaz
PEM	: Polimer Elektrolit Membran
SEM	: Scanning Electron Microscope
SEM-EDS	: X-Işını Spektroskopisi
SLE	: Seçici Laser Ergitme
TIG	: Tungsten Inert Gaz
TPÜ	: Tabakalı Parça Üretimi
TS	: Türk Standardı

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No.
Çizelge 2.1: ASTM F42 Standardına Göre Eklemeli Üretim Teknolojileri	6
Çizelge 3.1: Endüstride En Çok Kullanılan Martenzitik Kromlu Paslanmaz Çelikler ve Kimyasal Bileşimleri	25
Çizelge 5.1: DMLS Eklemeli İmalat Tekniğiyle Üretilmiş 316L Paslanmaz Çeliğin Kimyasal Bileşimi	40
Çizelge 5.2: Laser Sinterleme ile 316 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Üretim Parametresi	41
Çizelge 5.3: Plakaların Laser Kaynağında Seçilen Kaynak Parametreleri	42
Çizelge 5.4: 316 L Si Kaynak Telinin Kimyasal Bileşimi % Ağırlıkça	42
Çizelge 5.5: 316 L Si Telin Mekanik Değerleri	42
Çizelge 6.1: 2. Parçanın Vickers (HV) Cinsinden Sertlik Değerleri	45
Çizelge 6.2: 3 nolu Parçanın Vickers (HV) Cinsinden Sertlik Değerleri	46
Çizelge 6.3: 2 Numaralı Numune Ana Metalde Oluşan Fazların EDS Analizleri.....	52
Çizelge 6.4: 2 Numaralı Numune ITAB'da Oluşan Fazların EDS Analizleri	52
Çizelge 6.5: 2 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analizleri	53
Çizelge 6.6: 3 Numaralı Numune Ana Metalde Oluşan Fazların EDS Analizleri.....	54
Çizelge 6.7: 3 Numaralı Numune ITAB'da Oluşan Fazların EDS Analizleri	55
Çizelge 6.8: 3 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analizleri	56

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1: Talaşlı (a) ve Eklemeli (b) Üretim Teknikleri (Şematik)	4
Şekil 2.2: Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Basit Yapısı ve Alt Sınıfları	4
Şekil 2.3: EBM Yöntemi (Şematik).....	9
Şekil 2. 4: 3B Yazıcı (Şematik).....	9
Şekil 2.5: TPÜ Yöntemi (Şematik)	10
Şekil 2. 6: ÇPM Yöntemi (Şematik)	11
Şekil 2.7: DMLS-SLS Yöntemi (Şematik)	12
Şekil 2.8: SLE Yöntemi (Şematik).....	13
Şekil 2.9: EIE Yöntemi (Şematik)	13
Şekil 2.10: LMB Yöntemi (Şematik).....	14
Şekil 2.11: Otomobilde Eklemeli Üretim Uygulamaları.....	16
Şekil 2.12: Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Sağlık Sektöründeki Avantajları	18
Şekil 3.1: Krom ve Nikel Miktarlarına Göre Fe-Cr-Ni Denge Diyagramları	27
Şekil 4.1: Birleştirme Kaynağı	32
Şekil 4.2: Dolgu kaynağı.....	33
Şekil 4.3: Örtülü Elektrot Kaynak Yöntemi.....	34
Şekil 4.4: Sürtünme Kaynağı	34
Şekil 4.5: Elektrik Direnç Kaynağı	35
Şekil 4.6: Kaynak Yöntemlerinin Tarihçesi.....	35
Şekil 4.7: Laser Işınının Oluşum Şeması	37
Şekil 4.8: Üç Düzeyli Bir Laserin Enerji Şeması (Neodim Laseri)	37
Şekil 4.9: Dört Düzeyli Bir Laserin Enerji Şeması (Yakut Laseri).....	38
Şekil 4.10: Isı İletim Kaynağı İle Derin Kaynağın Karşılaştırılması	39
Şekil 5.1: Üretilmiş Plakaların Kaynak Pozisyonu	41
Şekil 5.2: GeKaLaser 3000 Laser Kaynak Makinesi	43
Şekil 5.3: Kaynak Öncesi Parçaların Puntalama İşlemi.....	43

Şekil 6.1: Kaynak Edilmiş Eklemeli İmalatlı 2.Parçanın Esas Metalden Kaynak Dikişine Kadar Sertlik Değişimi	45
Şekil 6.2: Kaynak Edilmiş Eklemeli İmalatlı 3 Nolu Parçanın Esas Metalden Kaynak Dikişine Kadar Sertlik Değişimi.	46
Şekil 6.3: 2 Nolu Parça ve 3 Nolu Parçanın Sertlik Dağılımlarının Karşılaştırılması	47
Şekil 6.4: 2 Nolu Parçanın Ana Metal SEM Mikro Yapısı.....	48
Şekil 6.5: 2 Nolu Parçanın Kaynak Dikişi-ITAB Geçiş Bölgesinin SEM Mikro Yapısı	48
Şekil 6.6: 2 Nolu Parçanın Kaynak Dikiş SEM Mikro Yapısı.....	49
Şekil 6.7: 3 Nolu Parçanın Ana Metal SEM Mikro Yapısı.....	49
Şekil 6.8: 3 Nolu Parçanın Kaynak Dikişi-ITAB Geçiş SEM Mikroyapısı.....	50
Şekil 6.9: 3 Nolu Parçanın Kaynak Dikişi SEM Mikroyapısı	50
Şekil 6.10: 2 Numaralı Numune Ana Metal Bölgesinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları.....	51
Şekil 6.11: 2 Numaralı Numune ITAB’da Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları ..	52
Şekil 6.12: 2 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları.....	53
Şekil 6.13: 3 Numaralı Numune Ana Metal Bölgesinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları.....	54
Şekil 6.14: 3 Numaralı Numune ITAB’da Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları ..	55
Şekil 6.15: 3 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları.....	56

TOZ YATAKLI LASER SİNERLEME İLE ÜRETİLMİŞ 316 KALİTE PASLANMAZ ÇELİKLERİN LASER KAYNAĞI

ÖZET

Gelişen teknoloji ve buna göre yeni nesil malzeme talepleri, kaynaklı parça imalatının yanında, eklemeli imalat ile parça üretim süreçlerine dönüşmeye başlamıştır. Pek çok sektörde, karmaşık şekilli, çok bileşenli ve döküm ve/veya kaynak ile imal edilemeyen parçaların daha kolay ve ucuz bir şekilde üretilmesine yol açan yeni üretim teknolojisi olarak günümüzde önemli yer alan eklemeli imalat yöntemleri, bu talepleri kolaylıkla karşılayabilmektedir. Klasik üretim süreçlerinin sınırlı noktalarda katmanlı üretim teknolojileri çözüm sunmaya başlamıştır. Nihai ürüne ulaşım süreçleri, bu yeni üretim yöntemleriyle tamamen değişime uğramıştır. Karmaşık şekilli parçaların üretimindeki zorluklar, katmanlı üretim yöntemi ile basit bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde gelişen teknolojiye paralel olarak, talep edilen malzeme türü, malzeme kombinasyonları, boyut ve üretim hızı gibi pek çok etki nedeniyle son yıllarda laser ile eklemeli imalatlı ürünlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu üretim yönteminin en büyük avantajı ön veya son işlem yapmadan ürünü nihai servis şartlarına uygun şekilde üretebilmektir. Ancak, farklı boyutlarda, farklı malzeme kombinasyonlarında ve farklı konstrüksiyonlarda bu üretim yönteminin sınırlandığı durumlar söz konusudur. Bu durum laser ile eklemeli imalatın kullanımı sınırlandırmaktadır.

Bu Yüksek Lisans Tez çalışmasında eklemeli imalat ile üretilen parçaların farklı boyutlarda veya farklı malzeme kombinasyonlarında üretilmesi durumunda, bu ürünlerin kaynak ile birleştirilmesi sonucunda malzeme bütünlüğüne nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Bu amaçla DMLS yöntemiyle üretilmiş levhalar laser ışını ve ilave tel kullanılarak kaynak edilmiş, esas metalden kaynak dikişine kadar karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmayla, eklemeli imalatlı parçaların kaynak edilmesiyle mikro yapıdaki ve mekanik özelliklerdeki değişimler ortaya konmuştur.

Bu yüksek lisans tezinde Laser Sinterleme tekniğiyle üretilmiş AISI 316L Paslanmaz çelik plakalar, oluşturulan bu plakalar ilave tel kullanılarak, laser ışınıyla kaynak edilmiştir.

Eklemeli imalat tekniğiyle üretilmiş ve laser ışınıyla kaynak edilmiş numunelerde mikro yapı görüntüleme, metal ışık mikroskopu ve Scanning Electron Microscope (SEM) ile gerçekleştirilmiş sertlik deneyleri Vicker's (HV) yöntemiyle belirlenmiştir. Kaynaklı parçalarda oluşan fazların analizleri, SEM-EDS yöntemi ile ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; eklemeli imalat ile üretilmiş plakaların servis de kullanımını sağlayacak en uygun laser kaynak parametreleri ortaya çıkartılmıştır.

Anahtar kelimeler: *Katmanlı üretim, Laser Kaynağı, Laser Sinterleme, 316L Paslanmaz Çelik*

LASER WELDING OF 316-GRADE STAINLESS STEELS PRODUCED BY POWDER BED LASER SINTERING

ABSTRACT

The advancement of technology and the demand for next-generation materials have led to a transformation in part production processes, shifting from traditional welded part manufacturing to additive manufacturing methods. Additive manufacturing, recognized as a groundbreaking production technology across various industries, has gained prominence due to its ability to efficiently and economically produce complex-shaped, multi-component parts that cannot be manufactured using conventional casting and welding techniques. While traditional production methods face limitations, additive manufacturing technologies have begun offering innovative solutions in specific areas. The processes leading to the final product have undergone a significant transformation with these modern manufacturing methods, allowing the production of complex-shaped parts to be achieved with remarkable simplicity.

In line with technological advancements, the increasing demand for specific material types, material combinations, dimensions, and production speed has significantly expanded the application of laser-based additive manufacturing products in recent years. The primary advantage of this production method is its ability to manufacture final products that meet service conditions without requiring additional pre- or post-processing. However, there are scenarios where this method encounters limitations, particularly in producing parts of varying dimensions, material combinations, or constructions, which restricts its broader applicability.

This master's thesis investigates how the material integrity of parts produced using additive manufacturing is affected when they are welded under varying dimensions and material combinations. For this purpose, plates fabricated using the Direct Metal Laser Sintering (DMLS) method were welded with a laser beam and filler wire, and characterization studies were conducted from the base metal to the weld seam. This research highlights the microstructural and mechanical property changes that occur when additive-manufactured parts are welded.

In this study, AISI 316L stainless steel plates fabricated through the Laser Sintering technique were welded using a laser beam and filler wire. Microstructural analysis of the samples produced via additive manufacturing and subsequently welded was performed using optical microscopy and Scanning Electron Microscopy (SEM). Hardness tests were conducted using the Vickers (HV) method. The phase analyses of the weld regions were carried out through SEM-EDS techniques. Based on the results, the optimal laser welding parameters that ensure the usability of plates produced by additive manufacturing in service conditions have been determined.

Keywords: *Layered manufacturing, Laser welding, Laser sintering, 316L stainless steel*

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Konusu

Eklemeli İmalat Tekniği, bilgisayar destekli olarak tasarlanmış bir parçanın katmanlar halinde üç boyutlu üretimidir. ASTM standartlarına göre bu üretim yöntemi 7 farklı kategoriye ayrılmıştır. Her kategori, kullanılan malzeme türüne (tel, toz, filament, kağıt, lamine, bağlayıcı vb.) bağlı olarak çeşitli teknik isimlerle anılmaktadır.

Metaller için eklemeli imalat teknikleri; toz yatağı ergitme, doğrudan enerji aktarımı, malzeme ekstrüzyonu, bağlayıcı püskürtme ve malzeme püskürtme gibi farklı gruplara ayrılır. Toz yatağı ergitme yöntemi için kullanılan DMLS (Direct Metal Laser Sintering - Direkt Metal Laser Sinterleme) ve doğrudan enerji aktarımı tekniğinde kullanılan LENS (Laser Engineering Net Shaping – Laserle Ağ Şekillendirme), lazer ile ergitme prensibine dayanmaktadır. LENS tekniğinde lazer ergitme prensibi kullanılırken, DMLS yönteminde ise lazer ışını ile toz yatağında katmanlı üretim gerçekleştirilir. Bu teknikte, üretim alanına serilen metal toz lazer ışını ile ertilir ve ardından bir katman daha toz eklenerek lazerle tekrar ergitme işlemi yapılır. Bu işlem, parçanın tamamı boyutsal olarak oluşana kadar tekrarlanır.

1. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, 316L malzemedan üretilen eklemeli imalat parçalarının kaynak edilebilirliğini araştırmaktır.

Günümüzde eklemeli imalat, yalnızca prototipleme süreçleriyle sınırlı kalmayıp, karmaşık geometrilere sahip, yüksek hassasiyetli ve düşük atıklı üretim olanakları sunmasıyla pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin düşük üretkenlik oranı ve yüksek maliyet gibi dezavantajları, üretim verimliliğini artıracak alternatif yaklaşımların araştırılmasını gerektirmektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, lazer toz yataklı eklemeli imalat tekniğiyle üretilen parçaların, lazer ışını kullanılarak farklı kaynak parametreleriyle birleştirilmesi sırasında oluşan dokunun mekanik davranışlarını anlamak ve bu

süreçte oluşan kusurların, malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Ayrıca, eklemeli imalat ile üretilen ve kaynak edilen parçaların karşılaştırmalı karakterizasyonu yapılarak, bu yöntemlerin endüstriyel uygulamalardaki potansiyel kullanımları üzerine çıkarımların elde edilmesi, çalışmanın amacı içindedir.

Tez, hem eklemeli imalatın sınırlamalarını aşmak hem de geleneksel üretim yöntemleriyle entegre edilmesini sağlamak adına, kaynak edilebilirliğin optimize edilmesi ve bu süreçteki iyileştirmelerin uygulanabilirliğini göstermek için önemli katkılar sunmayı amaçlamaktadır.

2. Hipotez

Metal eklemeli imalat süreçleri artık hızlı prototipleme uygulamalarıyla sınırlı olmayıp, pek çok parça, ekipman ve bitmiş ürünlerin imalatında birçok alanda artan kullanıma sahiptir. Parçaları neredeyse sıfır atıkla, yüksek hassasiyetle, karmaşık geometriyle ve isteğe bağlı üretimle tasarlama yeteneği, bu üretim yaklaşımının avantajları arasındadır. Bu tekniğin dezavantajlarından biri, parçaların katmanlı şekilde üretilmesinin maliyete olan etkisidir. Bu prosesin verimliliğini garanti altına almak için, sınırlı hacme sahip karmaşık bileşenlerin katmanlı imalata uyarlanmış bir tasarımla üretimine yönelmesi gerekmektedir. Bunun yolu ise, 3D baskı sürecini geleneksel üretim süreçleriyle birleştirmektir.

Ürünleri tasarlarken, yerel olarak karmaşık parçalar oluşturmak ve bunları geleneksel süreçlerle üretilen parçalarla birleştirmek için eklemeli üretimin kullanılması tercih edilebilir. Öte yandan, sınırlı metal eklemeli imalat baskı odası alanı nedeniyle, büyük parçaları birden fazla küçük parça halinde basmak ve daha sonra bunları birleştirmek gerekli olabilir.

Bu bağlamda; tez çalışmasında, laser toz yataklı eklemeli imalat tekniği ile üretilmiş olan 316L kalite paslanmaz çelik parçaların kaynak edilebilirliği önem taşımaktadır.

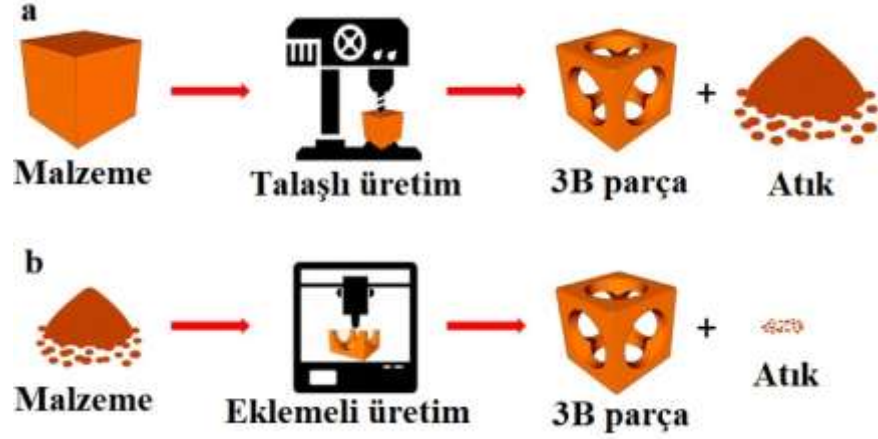
Çalışmada kaynak edilmemiş eklemeli imalat parçası ve farklı laser-işlem parametreleri ile kaynak edilmiş numuneler karşılaştırılarak karakterize edilmiş ve bu iki durumun karşılaştırılabilir ve kaynaklı parçaların kullanılabilir olacağı, ayrıca, kaynak sırasında oluşan kusurların, parçaların mekanik özelliklere ne yönde etki ettiği hakkında sonuçlar elde edilmiştir.

2. EKLEMELİ İMALAT TEKNİĞİYLE METAL ÜRETİMİ

Eklemeli üretim, yaygın olarak 3 boyutlu (3B) baskı olarak bilinir ve bir 3B CAD modelinin, malzemenin katman katman eklenmesiyle fiziksel bir ürüne dönüştürülmesi sürecidir. Son yıllarda önemli bir çıkış yakalayan ve gelecekte daha büyük bir etki yaratması beklenen bu teknoloji, otomotiv, havacılık, uzay, sağlık, inşaat ve enerji gibi birçok sektörde devrim niteliğinde bir rol oynamıştır. Dolayısıyla, günümüz için stratejik öneme sahip olan eklemeli üretim teknolojisini anlamak oldukça kritiktir.

Geleneksel talaşlı üretim tekniği (Şekil 2.1 a), katmanlı üretim tekniğinden farklıdır. (Şekil 2.1 b). Eklemeli üretim terimi, voksel (bir pikselin üç boyutlu karşılığı) adı verilen hacim elemanlarını bir araya getirerek otomatik olarak parça üreten tüm üretim teknolojilerini kapsayan geniş bir kavramdır. Bu yöntemle, sanal bir üç boyutlu CAD modeli, üçgensel yüzeyli bir modele (Stereolithography - STL; günümüzde 3B baskı uygulamaları için en yaygın format olmasına karşın, son yıllarda AMF veya 3MF gibi başka formatlar da kullanılmaya başlanmıştır) dönüştürülür (Gonzales ve Álvarez, 2018; 2019); (<https://www.endustri40.com>).

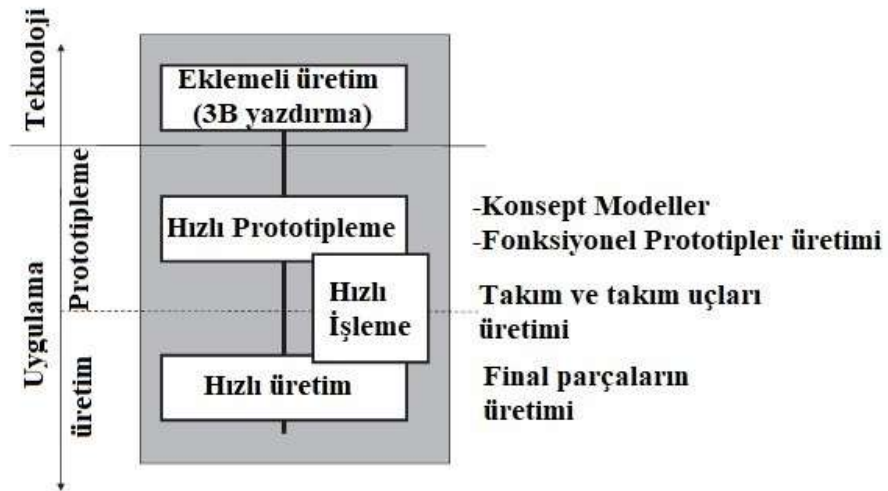
Ürünün modeli, yazılımla katmanlara ayrıldıktan sonra 3 boyutlu yazıcı ile tabandan başlanarak katman katman bir parçaya dönüştürülmektedir. Eklemeli üretim sayesinde, daha kolay bir tasarım ve daha pratik üretim mümkün olmaktadır. Ayrıca bu yöntem, tasarım değişikliği için hiçbir maliyet ya da süre gerektirmez (Badiru, 2017; Gibson vd., 2015; Mazur vd., 2017; Milewski, 2017; Srivatsan vd., 2015).



Şekil 2.1: Talaşlı (a) ve Eklemeli (b) Üretim Teknikleri (Şematik)

Kaynak: (<https://www.3dnatives.com>, 2019)

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi eklemeli üretim teknolojileri, temel olarak iki ana uygulama alanına ayrılmaktadır: "hızlı prototipleme" ve "hızlı üretim". Hızlı prototipleme, eklemeli üretim tekniklerinin prototip, model veya maket yapımında kullanılmasını ifade ederken, hızlı üretim ise nihai parçaların ve ürünlerin üretilmesini ifade eder. Ayrıca, takım, kesici uçlar, masterlar ve benzerlerinin üretimine ise "hızlı işleme" denmektedir. Buradaki "hızlı" ifadesi görecelidir; genellikle parçaların birkaç saat içinde üretilebildiğini belirtir, ancak kullanılan yöntem ve aynı anda üretilen parçaların boyut, sayı ve karmaşıklığına bağlı olarak bu süre değişiklik gösterebilir.



Şekil 2.2: Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Basit Yapısı ve Alt Sınıfları

Kaynak: (Gebhardt ve Hötter, 2016).

2.1. Eklemeli Üretimin Tarihçesi

Eklemeli üretim fikri, insanoğlunun üretim süreçlerini daha verimli ve yenilikçi hale getirme arzusunun bir sonucu olarak köklü bir geçmişe sahiptir. Ancak, bu konseptin ticari anlamda uygulanabilir bir teknolojiye dönüşmesi 1987 yılına, stereolitografi (SL) adı verilen plastik işleme yönteminin geliştirilmesine dayanmaktadır. SL, ticari olarak üretilen ilk eklemeli üretim sistemi olarak kabul edilmektedir. Bu gelişme, eklemeli üretim teknolojilerinin ticari boyutta yaygınlaşmasının başlangıcını oluşturmuştur. Özellikle 1990'lı yıllar, eklemeli üretim yöntemlerinin çeşitlenmesi ve daha erişilebilir hale gelmesi açısından oldukça kritik bir dönemdir. 1991 yılında Kaynaştırıcı Biriktirme Modeli, Katı Zemin Kürleme ve Katmanlı Malzeme Üretimi gibi yöntemler ticarileştirilmiştir. Bu yeniliklerin hemen ardından Seçici Lazer Sinterleme teknolojisi geliştirilmiş, böylece eklemeli üretim alanında önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. 1994'te Alman EOS firması, Direkt Metal Lazer Sinterleme teknolojisine dayanan M160 modelini tanıtmış, 1995 yılında ise M250 modelini piyasaya sürmüştür.

Son yirmi yıl içinde eklemeli üretim teknolojilerinde gözle görülür bir hızlanma yaşanmıştır. Mevcut sistemler sürekli olarak geliştirilirken, Direkt Metal Lazer Ergitme gibi ileri teknolojiler de ortaya çıkmıştır. 2002 yılı itibarıyla Doğrudan Metal Biriktirme sistemleri satışa sunulmuş ve ticari kullanım alanı bulmuştur. Özellikle 2016 yılının başlarında, eklemeli üretimle ilgili neredeyse her hafta yeni bir teknoloji, ürün, malzeme ya da uygulama tanıtılmıştır. Zamanla bu teknolojiler daha güvenilir, verimli ve çeşitli malzemelere uyumlu hale gelmiştir. Bu gelişmeler, üretim süreçlerinin hızlanmasına, maliyetlerin düşmesine ve kullanım alanlarının genişlemesine büyük katkı sağlamıştır (Yang vd., 2017; Gouge vd., 2017).

Eklemeli üretim teknolojilerinin sunduğu bazı benzersiz avantajlar şunlardır:

- Üretim süreçlerini ve maliyetleri düşürür,
- Ürün geliştirme süreçlerini hızlandırır,
- Özel geometriye sahip ürünlerin üretimine olanak tanır,
- Hızlı prototipleme imkânı sağlar,
- Karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi daha kolaydır,
- Tasarım sürecindeki zamanı kısaltır,
- Tasarım ve üretim arasında daha iyi bir uyum sağlar,

- Ürünlerin işlevsel olarak optimize edilmesine (örneğin soğutma kanalları) olanak verir,
- Üretim makinelerinin sayısını azaltır,
- Daha kısa teslimat süreleri ve düşük stok gereksinimi sunar,
- Tasarımda büyük bir serbestlik sağlar.
- Herhangi bir kalıp gereksinimi yoktur,
- Daha az malzeme kullanır, atıkları en aza indirir,
- Ulaşım ve taşımayı basitleştirir.

2.2. Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Kategorilere Göre Ayrılması

Eklemeli üretim teknolojileri, farklı üretim yöntemlerine sahip olduğundan tek bir ana kategori altında sınıflandırılmaz. ASTM F42 standardına göre, eklemeli üretim teknolojileri yedi alt grupta toplanmaktadır (Çizelge 2.1), Tofail vd., 2018).

Çizelge 2.1: ASTM F42 Standardına Göre Eklemeli Üretim Teknolojileri

ASTM Kategorisi	Yapıştırıcı Püskürtme
Çalışma Prensibi	Yapıştırıcı Püskürtme
Örnek Teknoloji	3B mürekkep püskürtme (inkjet) teknolojisi
Avantajları	Destek/altlık içermez, Tasarım özgürlüğü sağlar, Yüksek baskı hızı vardır, Nispeten düşük maliyetlidir.
Dezavantajları	Sınırlı mekanik özelliklere sahip kırılabilir parçalar üretilir, Son işlem gerektirebilir.
Yöntemle Üretilen Malzemeler	Polimerler, Seramikler, Kompozitler, Metaller, Hibrit malzemeler
İnşa Hacmi (mm x mm x mm)	X=<4000, Y=<2000, Z=<1000
ASTM Kategorisi	Direkt Enerji Biriktirme
Çalışma Prensibi	Odaklanmış ısı enerjisi biriktirme esnasında malzemeleri eritir.
Örnek Teknoloji	Lazer Biriktirme, Lazer Şekillendirme, Elektron Işını, Plazma Ark Ergitme.
Avantajları	Tane yapısının yüksek derecede kontrolü mümkündür, Yüksek kaliteli parçalar üretilir.
Dezavantajları	Yüzey kalitesi düşüktür, Metaller/metal tabanlı hibrit malzemelerle sınırlıdır.
Yöntemle Üretilen Malzemeler	Metaller, Hibrit malzemeler
İnşa Hacmi (mm x mm x mm)	X=600-3000, Y=500-3500, Z=350-5000

Çizelge 2.1: (Devamı) ASTM F42 Standardına Göre Eklemeli Üretim Teknolojileri

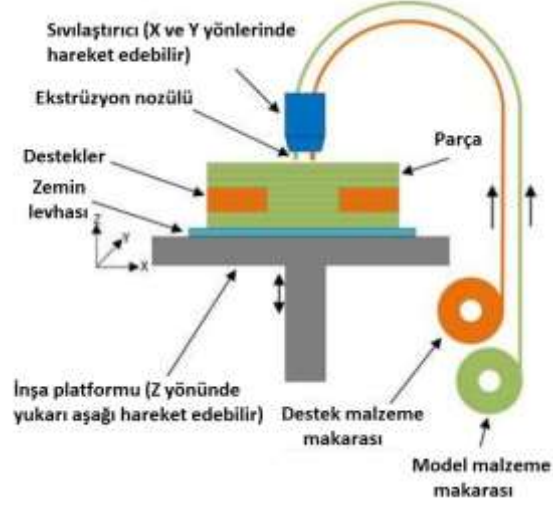
ASTM Kasitegori	Yapıştırıcı Püskürtme
ASTM Kategorisi	Malzeme Ekstrüzyonu
Çalışma Prensibi	Malzeme, seçici olarak bir nozül veya orifisten (ağız) dışarı itilir.
Örnek Teknoloji	Ergiyik Yığma Modelleme, Ergiyik Filament Fabrikasyonu, Ergiyik Katman Modelleme.
Avantajları	Yaygın kullanımlıdır, Ucuzdur, Tamamen işlevsel parçalar oluşturabilir.
Dezavantajları	Basamaklı yüzey oluşturur, Ayrıntılar için uygun değildir.
Yöntemle Üretilen Malzemeler	Polimerler, Kompozitler
İnşa Hacmi (mm x mm x mm)	X=<900, Y=<600, Z=<900
ASTM Kategorisi	Malzeme Püskürtme
Çalışma Prensibi	İnşa malzemesinin damlacıkları biriktirilir.
Örnek Teknoloji	3B inkjet teknolojisi, Direkt Mürekkep Yazdırma.
Avantajları	Yüksek damlacık biriktirme doğruluğu vardır, Düşük atık oluşturur, Çoklu malzeme parçaları üretilir, Çok renkli parçalar üretilir.
Dezavantajları	Destek malzemesi gereklidir, Fotopolimerler ve termoset reçineler gereklidir.
Yöntemle Üretilen Malzemeler	Polimerler, Seramikler, Kompozitler, Hibrit malzemeler, Biyolojik malzemeler
İnşa Hacmi (mm x mm x mm)	X=<300, Y=<200, Z=<200
ASTM Kategorisi	Toz Yataklı Birleştirme
Çalışma Prensibi	Isı enerjisi, toz yatağındaki inşa malzemesinin küçük bir bölgesini birleştirir.
Örnek Teknoloji	Elektron Işın Ergitme, Direkt Metal Lazer Sinterleme, Seçici Lazer Sinterleme/Ergitme.
Avantajları	Nispeten ucuz bir teknolojidir, Geniş malzeme seçenekleri mevcuttur.
Dezavantajları	Nispeten yavaştır, Yapısal bütünlük eksikliği vardır, Boyut sınırlamaları mevcuttur, Yüksek güç gereklidir.
Yöntemle Üretilen Malzemeler	Polimerler, Seramikler, Kompozitler, Metaller, Hibrit malzemeler
İnşa Hacmi (mm x mm x mm)	X=200-300, Y=200-300, Z=200-350
ASTM Kategorisi	Plaka Tabakalaştırma
Çalışma Prensibi	Malzemelerin sac/folyoları yapıştırılmıştır.
Örnek Teknoloji	Tabakalı Malzeme Üretimi, Ultrason Birleştirme/Ultrason Eklemeli Üretim.
Avantajları	Hızı yüksektir, Düşük maliyetlidir, Malzeme taşıma kolaylığı vardır.

Çizelge 2.1: (Devamı) ASTM F42 Standardına Göre Eklemeli Üretim Teknolojileri

ASTM Kategorisi	Plaka Tabakalaştırma
Dezavantajları	İşlem sonrası son işlemler gerekebilir, Sınırlı malzeme kullanılabilir.
Yöntemle Üretilen Malzemeler	Polimerler, Seramikler, Metaller, Hibrit malzemeler
İnşa Hacmi (mm x mm x mm)	X=150-250, Y=200, Z=100-150
ASTM Kategorisi	Havuz Fotopolimerizasyonu
Çalışma Prensibi	Bir havuzdaki sıvı polimer ışıkla sertleştirilir.
Örnek Teknoloji	SLA, Dijital Işık İşleme.
Avantajları	Büyük boyutlu parçalar üretilebilir, Mükemmel boyutsal hassasiyet sağlar, Mükemmel yüzey ve detaylar sağlar.
Dezavantajları	Sadece fotopolimerlerle sınırlıdır, İnşa işlemi yavaştır, Pahalı bir yöntemdir. Fotopolimerlerin düşük mekanik özellikleri vardır.
Yöntemle Üretilen Malzemeler	Polimerler, Seramikler
İnşa Hacmi (mm x mm x mm)	X<2100, Y<700, Z<800

2.2.1. Ergiyik biriktirme/yığıma modelleme tekniği (EBM)

Bu yöntem, günümüzde eklemeli üretim teknolojileri arasında en yaygın kullanılan ve en çok tercih edilenlerden biridir. Üretim sürecinde, bir nozul aracılığıyla plastik filament adı verilen tel şeklindeki malzeme püskürtülür ve bu malzeme, katmanlar halinde birikerek bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinden doğrudan fiziksel bir parça oluşturur. Bu teknolojinin en önemli avantajları arasında geniş bir malzeme seçeneği sunması, maliyetlerin düşük olması, seri üretime uygun yapısı, malzemelerin geri dönüştürülebilir özellik taşıması ve çevreye duyarlı bir çözüm sağlaması yer alır. Aynı zamanda, bu yöntemle karmaşık geometrilere sahip tasarımlar kolayca üretilebilir, bu da mühendislik ve tasarım süreçlerine büyük esneklik kazandırır (Gebisa ve Lemu, 2018; Çelik ve Özkan, 2017).

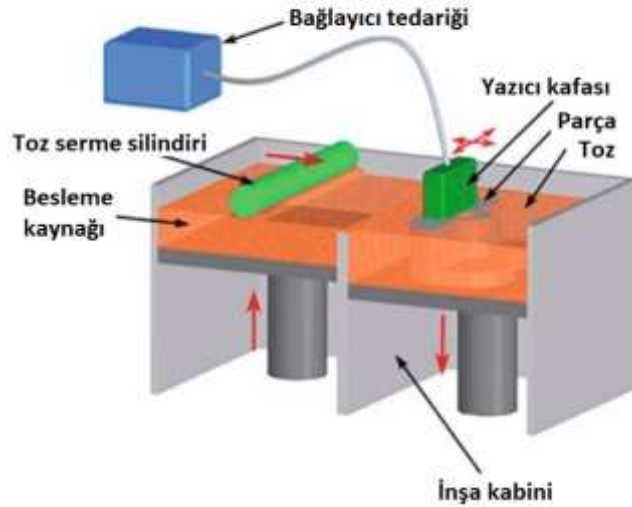


Şekil 2.3: EBM Yöntemi (Şematik)

Kaynak: (Gebisa ve Lemu, 2018).

2.2.2 Boyutlu (3B) yazıcı

Bu yöntemde, serbest halde bulunan toz malzeme üzerine özel bir bağlayıcı madde püskürtülerek tozların birbirine yapışması ve sağlam bir yapı oluşturması sağlanır. İşlem, parça tamamen oluşana kadar katmanlar halinde tekrarlanır. Bu teknoloji, çok renkli parçaların üretilmesine olanak tanıdığı için özellikle prototip yapımında tercih edilmektedir. Çoğunlukla kompozit tozlar kullanılsa da seramik tozların tercih edildiği durumlarda yaş sıkıştırma uygulanabilir ve ardından sinterleme gibi ısı işlemler gerçekleştirilebilir. Ayrıca, destek yapıları gerektirmemesi sayesinde üretim süreci daha pratik ve verimli hale gelir

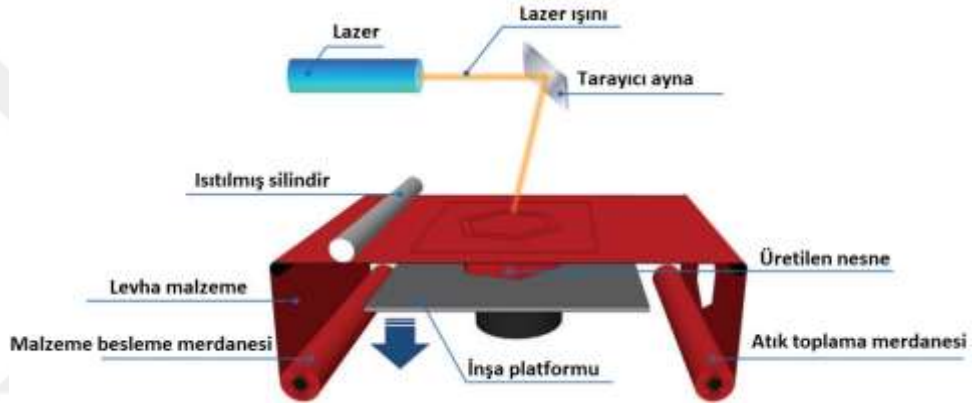


Şekil 2.4: 3B Yazıcı (Şematik)

Kaynak: (Anderl vd., 2017).

2.2.3. Tabakalı parça üretimi (TPÜ)

Bu yöntemde, lamine edilmiş malzemeler katmanlar halinde kesilip yapıştırılarak üç boyutlu parçalar üretilir. Besleme merdanesinden gelen malzeme, ısıtılmış bir silindir yardımıyla önceki katmanın yüzeyine yapıştırılır. Her katmanda, parçanın dış hatları lazerle dikkatlice kesilir ve fazla malzeme temizlenir. Ardından, yeni bir katman önceki katmanın üzerine eklenir. Bu süreçte kâğıt, metal veya plastik gibi farklı malzemeler kullanılabilir. Her katman, özel yapıştırıcılarla bir önceki katmana güçlü bir şekilde bağlanır. İşlem, istenen parça tamamen oluşana kadar tekrarlanır. Bu yöntemle büyük ve detaylı parçalar üretilebilir, ayrıca çevre dostu bir çözüm sunar (Ambrosi ve Pumera, 2016; Yalçın ve Ergene, 2017).



Şekil 2.5: TPÜ Yöntemi (Şematik)

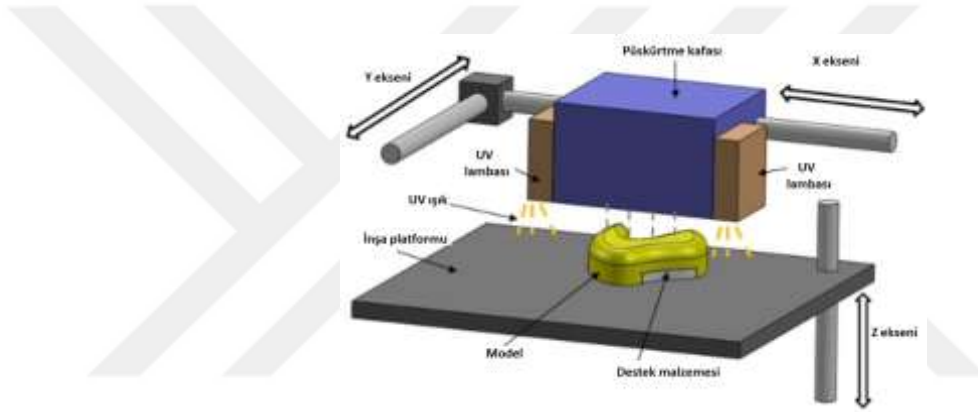
Kaynak: (Ambrosi ve Pumera, 2016).

2.2.4. Stereolitografi (SLA)

SLA yöntemi, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçinenin, ultraviyole (morötesi) lazer ışını yardımıyla belirli bölgelerde katılaştırılmasına dayanan bir teknolojidir. Reçine, her katman tamamlandıktan sonra yüzeye eşit bir şekilde yayılır ve lazerle sertleştirme işlemi katman katman ilerleyerek parçanın şekillendirilmesi sağlanır. Katmanların tamamlanmasının ardından, üretilen parça reçine havuzundan çıkarılır. Parçanın şeklini desteklemek amacıyla üretim sırasında oluşturulan destek yapıları, son aşamada mekanik yöntemlerle temizlenir. Bu teknikte yalnızca fotopolimer reçineler kullanılır. SLA, diğer yöntemlere göre daha hızlıdır, düşük maliyetlidir ve karmaşık detayları başarıyla üretebilir. Ancak, kullanılan cihazlar ve malzemeler daha yüksek maliyetlidir (<https://www.poligonmuhendislik.com>, 2019; Özsoy ve Duman 2017).

2.2.5. Çoklu püskürtme (polyjet) modelleme (ÇPM)

Bu yöntem, akrilik bazlı bir teknoloji olup, içinde birden fazla nozül bulunan baskı kafaları sayesinde, akrilik bazlı fotopolimer katmanlarını hızlı, verimli ve doğrusal bir şekilde biriktirir. Püskürtme sistemleri, eklemeli üretim teknolojileri arasında en yaygın tercih edilen 3B yazıcı türlerinden biridir. Bu cihazlar, düşük maliyetli kompakt modellerden, on binlerce dolarlık büyük ve profesyonel makinelere kadar geniş bir yelpazeye sahiptir. Çoklu püskürtme teknolojisi, yüksek hassasiyetle, ince detaylara ve düzgün yüzeylere sahip parçalar üretebilme yeteneği ile dikkat çeker. Farklı boyutlardaki ürünler ve çeşitli üretim hacimleri için kolaylıkla uyarlanabilir olması, bu yöntemin önemli bir avantajıdır (Çelik vd., 2013; Gay vd., 2015).



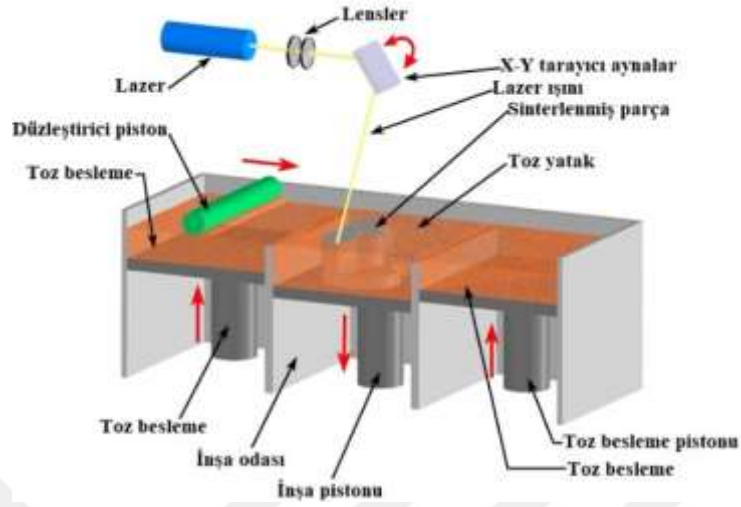
Şekil 2. 6: ÇPM Yöntemi (Şematik)

Kaynak: (Udroiu ve Braga, 2017).

2.2.6. Direkt metal laser sinterleme (DMLS)

Direkt Metal Laser Sinterleme (DMLS), ince tozların katman serilip sinterlenmesiyle gerçekleştirilen bir eklemeli üretim yöntemidir. Bu süreçte, toz, yüzeyi tamamen kaplamak ve pürüzsüz bir tabaka oluşturmak amacıyla bir düzleştirici silindir yardımıyla eşit şekilde dağıtılır. Daha sonra, odaklanmış bir lazer ışını bu toz tabakasına yönlendirilerek parçanın enine kesiti dikkatlice taranır. Her bir katman tamamlandıktan sonra, yatağa yeni bir toz katmanı eklenir ve bu işlem, parça tamamlanana kadar tekrarlanır. Tozların bağlanma mekanizmaları dört ana kategoriye ayrılır: katı hal sinterleme, kimyasal olarak tetiklenen bağlama, sıvı faz sinterleme ve kısmi ergime. DMLS teknolojisi, geniş bir malzeme çeşitliliği ile çalışabilir ve çok sayıda uygulama alanına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde hem

endüstriyel hem de prototip üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir (Yakout vd., 2018; Duman ve Kayacan, 2017; Kayacan ve Yılmaz, 2019; Bineli vd., 2011).

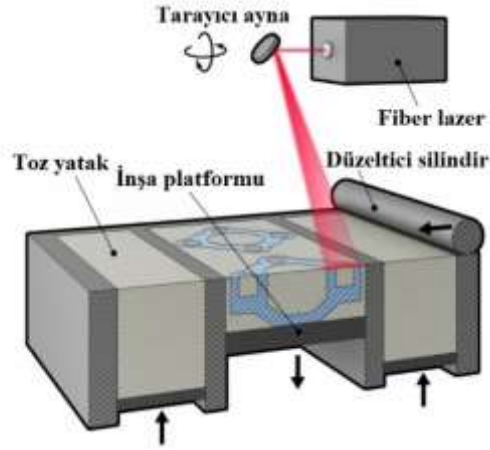


Şekil 2.7: DMLS-SLS Yöntemi (Şematik)

Kaynak: (Anderl vd., 2017).

2.2.7. Seçici laser ergitme (SLE)

Bu yöntem, SLS tekniğine benzeyen bir prensiple çalışır; ancak temel fark, tozların tamamen ergitilmesini içermesidir. Parça, işlem süresince katman katman inşa edilir ve genellikle kısa süre içinde karmaşık üç boyutlu yapılar oluşturulabilir. DMLS (Direct Metal Laser Sintering) olarak adlandırılan bu yöntem, kobalt-krom, paslanmaz çelik, titanyum ve inconel gibi metal tozları kullanılarak tamamen işlevsel parçalar üretilmesini sağlar. Üretim süreci hızlıdır ve parçalar genellikle 1-2 gün içinde teslim edilebilir. Bu teknik, makine bileşenleri, özel tıbbi cihazlar ve sanatsal ürünler gibi karmaşık ve detaylı yapılara sahip parçaların üretimi için idealdir. Sürekli yenilik gerektiren tasarımlar ve prototipler için son derece uygundur. Ancak, sabit tasarımlara sahip ve seri üretim gerektiren parçalar için maliyeti yüksek olabilir. Özellikle geometrik avantajlar sağlamayan basit tasarımlar bu durumdan olumsuz etkilenebilir. Ayrıca, makinelerin sınırlı boyut kapasitesi nedeniyle çok büyük ölçekli parçaların üretimi bu yöntemle mümkün değildir. Bu sınırlamalara rağmen, yöntemin sağladığı hız ve detay üretimindeki üstünlük, onu birçok endüstriyel uygulama için cazip bir seçenek haline getirmektedir (Poyraz ve Kuşhan, 2017; Louvis vd., 2011; Yap vd., 2015).

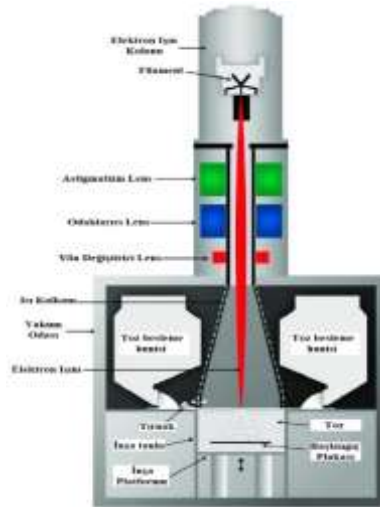


Şekil 2.8: SLE Yöntemi (Şematik)

Kaynak: (<https://www.manufacturingguide.com>, 2019)

2.2.8. Elektron ışın eritme (EIE)

Elektron Işını Erime (EIE) yöntemi, Seçici Laser Erime (SLE) ile benzer bir prensiple çalışır; ancak bu yöntemde laser yerine bir elektron tabancası kullanılarak önceden ısıtılmış tozlar eritilir. Elektron tabancasının kullanılması, yöntemin daha yüksek bir üretim hızına ulaşmasını sağlar ve bu da EIE'yi daha verimli hale getirir. Toz yatağı işlemi, özellikle karmaşık tasarımlar oluşturmak için metal üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Günümüzde EIE, metal imalatında öne çıkan bir teknoloji olmasına rağmen, kullanılan malzemenin elektriksel iletkenlik gereksinimi ve işlemin yalnızca vakum ortamında gerçekleştirilebilmesi, bu yöntemin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Yine de bu özellikler, yöntemi belirli alanlarda oldukça cazip kılmaktadır (Taminger ve Hafley, 2006; Murr, 2015; Murr vd., 2012).

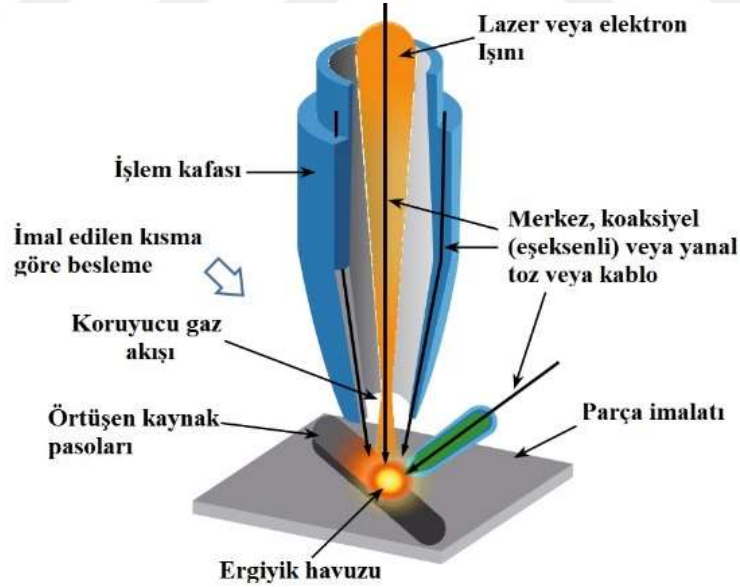


Şekil 2.9: EIE Yöntemi (Şematik)

Kaynak: (Çelik ve Özkan, 2017; <https://3dprint.com>, 2019)

2.2.9. Laser metal biriktirme (LMB)

LMB, laser ışığı kullanarak bir metal altlık yüzey üzerinde erimiş bir metal havuzu (ergiyik havuzu) oluşturan modern bir eklemeli üretim yöntemidir. Bu süreçte, kaplama tabakasının yüksekliği ve kaplama geçiş genişliği, elde edilen parçaların en önemli teknik özelliklerinden bazılarını oluşturur. Şekillendirilen yüzeyin pürüzsüz yapısı, LMB işleminin ayırt edici ve önemli bir avantajıdır. LMB ile üretilen parçalar, üstün mekanik performans göstermekte olup, yapılan SEM analizleri bu yöntemin oldukça yüksek süneklik sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, LMB ile şekillendirilen parçalar, tamamen homojen bir kimyasal bileşim dağılımına sahiptir ve bileşim ayrışması neredeyse hiç gözlemlenmez. Bu özellikler, geleneksel üretim süreçlerinde sıklıkla görülen homojenlik sorunlarını ortadan kaldırmaktadır. LMB'nin en yaygın kullanım alanları arasında kalıp araçları, valfler ve vidalar gibi metal bileşenler bulunmaktadır. Bununla birlikte, LMB teknolojisi, gazaltı ark kaynağı ve termal püskürtme gibi geleneksel üretim yöntemlerinin yerine geçmeye başlayan yenilikçi bir üretim yaklaşımı olarak da öne çıkmaktadır (<https://www.industrial-lasers.com>, 2019; <https://www.intechopen.com>, 2019; Gasser vd., 2010; Selcuk, 2011).



Şekil 2.10: LMB Yöntemi (Şematik)

Kaynak: (Anderl vd., 2017).

2.3. Eklemeli İmalat Uygulama Alanları

2.3.1. Havacılık sanayi

Havacılık sektörünün temel ihtiyaçları, hafif, küçük boyutlu, karmaşık geometrilere sahip ve yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların sürekli üretimidir. EBM, SLE ve EIE gibi eklemeli üretim teknikleri, düşük hacimli karmaşık bileşenler, uçak kanatları, yedek parçalar ve hafif yapılar üretiminde kullanılmaktadır. Alüminyum, titanyum ve nikel süper alaşımlar gibi malzemeler, eklemeli üretimle üretilmektedir. Lockheed Martin, NASA ve Airbus gibi şirketler, bu alanda büyük yatırımlar yapmaktadır. Eklemeli üretim, yeni tasarımlar ve malzemeler sunarken, boyutsal hassasiyet ve yüzey bitirme gibi zorluklarla karşılaşmaktadır.

Lockheed Martin, NASA, Boeing, Airbus ve GE gibi kuruluşlar, havacılık endüstrisinde eklemeli üretimi geliştirmek için iş birliği yapmaktadır. Artan talep ve kullanım yaygınlığı sayesinde eklemeli üretim teknolojilerindeki maliyetlerin önümüzdeki yıllarda düşeceği öngörülmektedir. Son yıllarda bu sektör 5,7 kat büyümüş ve havacılık endüstrisindeki eklemeli üretim uygulamalarının yaklaşık 1 milyar dolarlık bir pazara ulaşması beklenmektedir (Uriondo vd., 2015; Singamneni vd., 2019; Poyraz ve Kuşhan, 2018).

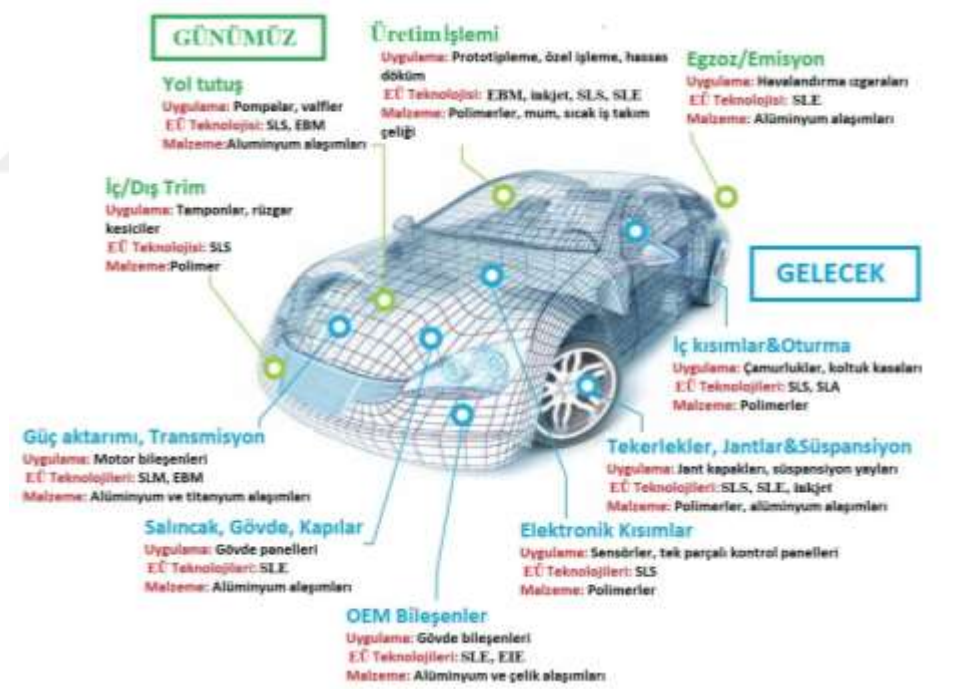
2.3.2. Otomotiv sanayi

Eklemeli üretim teknolojileri, otomotiv endüstrisinde tedarik zincirlerini, envanter sistemlerini ve parça tasarımını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu teknolojinin otomotiv sektöründe metal parçaların üretiminde kullanılmasının en büyük avantajlarından biri, karmaşık yapıda ve hafif parçaların üretilebilmesidir. Eklemeli üretimin, karmaşık geometrilere sahip parçaları kolayca üretme kabiliyeti sayesinde, otomotiv parçalarının ağırlığı önemli ölçüde azaltılabilir. Yapısal kompozit bileşenler, motor valfleri ve turbo şarj türbinleri, bu teknolojiyle üretilen parçalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, bu yöntem envanter ihtiyacını azaltır, taşıma ve malzeme temin maliyetlerini düşürürken, şirket içi ve talebe dayalı üretimi destekler. Ancak, eklemeli üretim süreçlerinin avantajlarına rağmen, üretilen otomotiv parçalarının belirli performans standartlarını karşılaması gereklidir.

Otomotiv sektöründe eklemeli üretim teknolojisinin başlıca zorlukları şunlardır:

- Parça performansını etkileyen ısıl gerilmeler,
- Yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyetin sağlanması ve
- Üretim hacimleri dikkate alındığında işlem hızının kritik olmasıdır.

Eklemeli üretimin otomotiv sektöründeki tek kullanım alanı prototipleme değildir. 2011 yılında Kor, Ecologic Urbee modelini tanıtmıştır ve bu aracın dikkat çeken yanı, gövde parçalarının tamamının eklemeli üretim (EBM) yöntemi ile yapılmış olmasıdır. Bu nedenle, otomotivde eklemeli üretim kullanımı, gelecekte araçların tasarımı ve işleyiş biçimini köklü bir şekilde değiştirme potansiyeline sahiptir. Şekil 12, eklemeli üretim teknolojilerinin otomotiv sektöründeki ve gelecekteki kullanım alanlarını net bir biçimde özetlemektedir (Attaran, 2017; (Leal vd., 2017; Giffi vd., 2014; Sarvankar ve Yewale, 2019).



Şekil 2.11: Otomobilde Eklemeli Üretim Uygulamaları

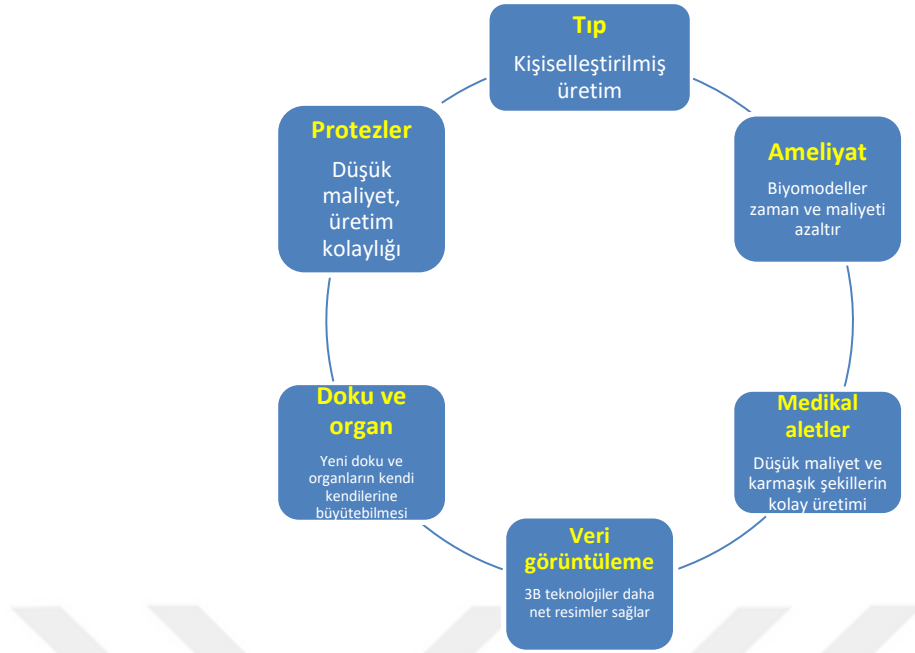
Kaynak: (Sarvankar ve Yewale, 2019).

2.3.3. Sağlık endüstrisi

Bu teknoloji sayesinde, implant üretim süresi geleneksel yöntemlere göre oldukça kısaltılabilir. Ayrıca, implantların hastanın bireysel anatomisine uygun olarak üretilmesi, daha iyi bir uyum sağlar ve seri üretilen implantlarda sıkça

karşılaşılan başarısızlık oranlarını düşürür. Diş hekimliği alanında, eklemeli üretim teknikleri, hassas diş kuronları, köprüler ve implantların üretiminde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Seçici Lazer Erime (SLE) yöntemi, karmaşık ve doğru parçalar üretme kapasitesiyle dental uygulamalar için idealdir. Diş kuronları ve köprüler genellikle hastanın diş yapısının taranması, dijital modelleme ve ardından SLE ile üretim süreçlerinden geçer. Bu yöntem, geleneksel döküm ve frezeleme tekniklerine güçlü bir alternatif oluşturarak rekabetçi bir seçenek sunmaktadır. Ayrıca, kişiye özel protezler için titanyum veya kobalt-krom gibi malzemelerden yapay dişler üretilmektedir. Tıbbi alanda metal eklemeli üretim teknolojileri, hızlı bir şekilde kişiye özel bileşenler üretme imkanıyla tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, cerrahi aletler ve biyomimetik özelliklere sahip yapılar üretmek için de oldukça uygundur.

Sağlık sektörü, günümüzde yenilikçi olarak görülen ancak gelecekte daha yaygın hale gelmesi beklenen eklemeli üretim uygulamaları için son derece uygun bir alandır. Örneğin, ABD'de bir şirket, bir kadının çenesini eklemeli üretim kullanılarak üretilmiş titanyum implantlarla yeniden yapılandırmıştır. 2013 yılında doktorlar, bir erkeğin kafasının %75'ini 3B baskı ile üretilmiş bir implantla değiştirmiştir. İngiltere'de, nadir bir kanser türü olan bir hastanın pelvik kemiğinin yarısı eklemeli üretim teknolojisiyle yeniden oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, on binlerce kalça protezi üretilmiş ve hastalara başarıyla implant edilmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretilen çene implantları, kalça, diz ve omuz protezleri gibi tıbbi cihazlar, genellikle yüksek maliyetli malzemeler gerektirir. Eklemeli üretim, bu tür ürünlerin üretim maliyetlerini azaltma ve süreçleri hızlandırma açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Sağlık hizmetlerinde eklemeli üretimle üretilen diğer ürünler arasında burunlar, cilt dokuları, protez kaplamaları, kozmetik kulaklar ve biyonik kulaklar bulunmaktadır. İşitme cihazı kovanlarının yaklaşık %95'i 3B yazıcılarla üretilmektedir ve her yıl yaklaşık 17 milyon diş hizalayıcısının kalıbı 3B baskı teknolojisiyle yapılmaktadır. Eklemeli üretim, sağlık sektöründe hızla büyüyen bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir. Medikal alandaki en büyük avantajlarından biri, düşük maliyetle özel ve karmaşık parçalar üretme imkânı sunmasıdır. Eklemeli üretimin sağlık sektöründeki üstünlükleri, Şekil 2.12'de detaylı şekilde gösterilmektedir (Hornick, 2017; Rodríguez-Salvador ve Garcia-Garcia, 2018; Gibson ve Srinath, 2015; Ramola vd., 2019).



Şekil 2.12: Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Sağlık Sektöründeki Avantajları

Kaynak: (Ramola vd., 2019).

2.3.4. İşleme (tooling) endüstrisi

Eklemeli üretim, işleme sanayisinde geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinin neden olduğu malzeme israfını ortadan kaldırarak, üretim süreçlerini daha verimli hale getirir. Bu teknoloji, üretim adımlarını azaltarak hem zaman tasarrufu hem de maliyet avantajı sağlar. Aynı zamanda, optimize edilmiş soğutma kanallarıyla donatılmış özel kalıplar üretme kapasitesi sunar. Bu özellik, üretilen parçaların performansını artırırken üretim döngüsünün hızlanmasına da olanak tanır. Eklemeli üretimle tasarlanan kalıplarda bulunan entegre soğutma kanalları, kalıbın termal stresini önemli ölçüde azaltır. Bunun sonucunda, kalıbın kullanım ömrü uzar ve üretim süreçleri daha sürdürülebilir hale gelir. Bu yöntem, tasarımcılara yalnızca maliyet ve zaman avantajı sunmakla kalmaz, aynı zamanda daha dayanıklı ve uzun ömürlü ürünler tasarlamalarını sağlar. Eklemeli üretimin sunduğu bu yenilikçi çözümler, işleme sanayisinde geleneksel yöntemlere kıyasla daha esnek ve çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır.

Eklemeli üretimle üretilen üretim takımları, hızlı teslim süreleri ve düşük maliyet avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, bu takımların en önemli katkılarından biri, nihai ürünün performansını iyileştirme potansiyelidir. Ancak, eklemeli üretimin daha geniş uygulama alanlarına yayılabilmesi için çözülmesi

gereken bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar arasında, daha geniş bir malzeme çeşitliliğinin sağlanması, büyük ölçekli üretim kapasitesinin artırılması, eklemeli üretim alanında uzman iş gücünün geliştirilmesi ve maliyet avantajlarının optimize edilmesi yer almaktadır (Gardan, 2017; <https://www2.deloitte.com>, 2019).

Eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak kum döküm kalıpları da üretilebilmektedir (Can ve Aslan 2018).

2.3.5. Nano-üretim

Günümüzde eklemeli üretim, nanoteknoloji ile birleştirilerek yeni nesil nano kompozit malzemelerden parçalar üretme olanağı sunmaktadır. Nano malzemelerin eklemeli üretim süreçlerinde kullanılması, üretilen parçaların malzeme özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmesiyle öne çıkmaktadır. Bu yenilik sayesinde, optik, termal, elektrokimyasal ve mekanik açıdan üstün özelliklere sahip parçalar üretilebilmektedir. Son yıllarda karbon nano tüpler, nano teller, metal nano partiküller ve nano grafen gibi çeşitli nano malzemeler eklemeli üretimde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Nano ölçekli eklemeli üretim, metal parçaların nano gözeneklerle üretilmesini mümkün kılarak gözenek ve boşluk oluşumunu tamamen ortadan kaldırmakta ya da en aza indirmektedir.

2.3.6. Enerji

Yenilenebilir enerji kaynakları, örneğin güneş ve rüzgar enerjisi, ile temiz enerji alternatifleri, örneğin hidrojen enerjisi, çevreye duyarlı çözümler sunarak fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma konusunda büyük bir potansiyel taşımaktadır. Yakıt hücreleri, "yeşil" enerji cihazları arasında yer alarak yüksek verimlilik, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük emisyon gibi önemli üstünlükler sağlamaktadır. Bu teknolojiler, taşınabilir enerji sistemlerinden otomotiv uygulamalarına ve dağıtılmış enerji ağlarına kadar birçok alanda kullanılabilir. Ancak, yüksek üretim maliyetleri ve düşük dayanıklılık gibi sorunlar, yakıt hücrelerinin yaygın bir şekilde benimsenmesini ve kullanımını sınırlamaktadır.

Eklemeli üretim teknolojisi, enerji sektöründe araştırma-geliştirme süreçlerinin maliyetlerini ve sürelerini azaltma, prototiplerin hızlı bir şekilde üretimi ve enerji verimliliğini artıracak yenilikçi tasarımların geliştirilmesi gibi birçok avantaj sunmaktadır. Örneğin, Polimer Elektrolit Membran (PEM) yakıt hücrelerinde

kritik bir bileşen olan grafit kompozit bipolar plakanın üretimi için Seçici Lazer Sinterleme (SLS) tabanlı bir üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bu tür yenilikler, enerji alanında verimliliği artırırken üretim süreçlerini daha hızlı ve ekonomik hale getirme potansiyeli taşımaktadır.

Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi, yeni bipolar plakaların üretiminde, geleneksel yöntemler olan enjeksiyon kalıplama ve sıkıştırma kalıplama gibi yüksek maliyetli metal kalıpların kullanıldığı süreçlere kıyasla hem maliyetleri hem de üretim sürelerini önemli ölçüde azaltabilir. Eklemeli üretim teknolojisi, aynı zamanda tasarım esnekliğini artırarak enerji verimliliğini ve güç yoğunluğunu yükseltebilecek yenilikçi tasarımların hayata geçirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu özellikler, enerji alanında daha ekonomik ve verimli çözümler sunulmasını desteklemektedir.

2.3.7. Yapı sektörü

Eklemeli üretim teknolojilerinin mimari uygulamalardaki payı, sektörün yalnızca %3'ünü oluşturmasına rağmen, 2014 yılından itibaren konut yapımında kullanılmaya başlanması, bu alanın hala gelişim aşamasında olduğunu göstermektedir. Son yıllarda, otomatik bina inşasında 3B baskı teknolojilerine olan ilgi önemli ölçüde artmıştır. İnşaat sektörü genellikle döküm, kalıplama ve ekstrüzyon gibi geleneksel yöntemlere dayanırken, 3B baskı teknolojisi, özellikle geometrik karmaşıklıklar ve boşluklu yapıların üretimi gibi sınırlayıcı alanlarda etkili bir alternatif sunmaktadır.

Otomatik bina yapımı için geliştirilen kontur işçiliği (Contour Crafting-CC) adı verilen teknoloji, malzemelerin doğrudan yerinde kullanılmasına olanak tanımakta ve düşük maliyetli konut inşası ile Ay ve Mars gibi gezegenlerdeki gelecekteki yapıların inşası için büyük bir potansiyel taşımaktadır. İlk 3B baskı ile üretilen konut, 2014 yılında Amsterdam'da EBM yöntemiyle yapılmıştır. Aynı yıl, Çinli bir firma olan WinSun, Şanghay'da 24 saatten kısa sürede çok sayıda konut binası inşa etmeyi başarmıştır. Bu projede, boyutları 150 m (L) x 10 m (W) x 6.6 m (H) olan özel bir 3B yazıcı kullanılmış, malzeme olarak çimento ve cam elyafı tercih edilmiştir.

Bununla birlikte, eklemeli üretimin inşaat sektöründeki uygulanabilirliği bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Malzeme israfı, hassas işlemler ve robotik ile inşaat

işlerini entegre edebilecek nitelikli iş gücü eksikliği, bu zorluklar arasında yer almaktadır. İnşaat sektörünün dünya kaynaklarının üçte birini tükettiği düşünüldüğünde, malzeme verimliliği ve çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik stratejiler kritik öneme sahiptir. Eklemeli üretim teknolojisinin tüm potansiyelinin değerlendirilmesiyle, bu teknolojinin büyük ölçekli projelerde kullanımının yaygınlaşacağı ve geleneksel yapı yöntemlerini dönüştüreceği öngörülmektedir.

2.3.8. Sanat ve hobi uygulamaları

Moda, mobilya ve aydınlatma gibi sektörlerde sanatçılara en karmaşık şekilleri yaratma fırsatı sunan etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde, SLS teknolojisiyle giysi, mobilya ve aksesuar üreten firmalar bulunmaktadır.

Bu teknolojiler artık sanayi dışındaki bireysel kullanıcılara da hitap etmeye başlamıştır. Bu dönüşüm, 2007 yılında fiyatı 500 dolara kadar düşen 3D yazıcıların piyasaya sürülmesiyle ivme kazanmıştır. Ancak, bu düşük maliyetli yazıcılar genellikle kendin yap (DIY) projeleri olarak sunulduğundan, kullanıcıların belirli teknik bilgi ve becerilere sahip olması gerekmektedir. Son yıllarda ise büyük şirketlerin bu alana yatırım yapmasıyla, 3D yazıcıların daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşması mümkün hale gelmiştir.

Kullanıcılar genellikle mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan CAD yazılımlarından yararlanabilmektedir. Bununla birlikte, hobi amaçlı kullanıcılar için daha basit ve kolay tasarım araçları da sunulmaktadır. Pek çok uygulama, 3D modelleme ve 3D yazıcı kullanarak kendi projelerini gerçekleştirme imkânı sağlamaktadır. Bu gelişmeler, eklemeli üretim teknolojilerinin bireysel kullanıcılar arasında hızla yayılmasına olanak tanımaktadır (Wong ve Hernandez, 2012).

2.4. Eklemeli İmalatın Geleceği

Malzeme ve teknoloji çeşitliliğinin artmasıyla, bu teknolojiyi tercih eden firma sayısının gelecekte daha da yükselmesi beklenmektedir. Eklemeli üretim, zamanla hayatımızda daha geniş bir yer tutabilir. Bu teknolojiye ilerlemeler ve makine ile malzeme maliyetlerindeki düşüş sayesinde, 3D yazıcıların evlerde yaygın olarak kullanılması mümkün hale gelebilir.

Gelecekte, eklemeli üretimin özellikle yedek parça üretiminde büyük bir etkiye sahip olması beklenmektedir. Kritik parçalar geleneksel yöntemlerle üretilirken, daha az önemli olanlar yerel düzeyde eklemeli üretimle üretilebilecektir. Geleneksel yedek parça üretiminde yaşanan depolama zorlukları ve tedarik süreçlerinin yavaşlığı, şirketler için ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Yerel olarak eklemeli üretim teknolojisiyle üretilen parçalar, bu sorunlara en uygun çözüm olarak değerlendirilmektedir. 2030 yılına kadar, endüstrinin eklemeli üretim kapasitesinin %50'den fazlasının kurum içinde kullanılacağı ve bu teknolojinin karbon ayak izlerini ciddi ölçüde azaltacağı öngörülmektedir. Ayrıca, 2030 itibarıyla eklemeli üretimle üretilen ürünlerin pazar payının %10'u aşması beklenmektedir. Uzun vadede, eklemeli üretimle üretilen insan organları, bağış organlara uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkabilir.

Eklemeli üretimin yaygınlaşabilmesi için üç temel alanda çalışılması gereklidir: maliyetlerin düşürülmesi, geleneksel yöntemlere göre sağladığı avantajların daha görünür hale getirilmesi ve bu avantajların ne derece etkili olduğunun analiz edilmesi. Eklemeli üretimin pratik bir alternatif olabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, bu alandaki ilerlemeler, akademik kurumlar ile ticari üreticiler arasındaki iletişim eksikliği nedeniyle yavaş gerçekleşmektedir. Bu nedenle, eklemeli üretim teknolojisinin gelişiminde üniversite-sanayi iş birliği hayati bir rol oynamaktadır.

3. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, özellikle korozyona karşı direnç gerektiren endüstriyel uygulamalarda yaygın şekilde tercih edilen çelik türlerinden biridir. Bu çeliklerin yüksek ve düşük sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilmesi, onları vazgeçilmez hale getiren önemli bir özelliktir. Paslanmaz çeliğin korozyon ve oksidasyona dayanıklılığını artıran başlıca alaşım elementi kromdur. Krom, çeliğin tane yapısını küçülterek ve kritik soğuma hızını azaltarak sertleşme etkisini artırır. Çeliğin paslanmaz özellik kazanabilmesi için en az %10,5 oranında krom içermesi gerekirken, genellikle bu oran %12 veya daha fazladır. Krom miktarının artması, yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon direncini de artırır.

Çelik gibi demir alaşımları atmosferle temas ettiğinde oksitlenir ve yüzeyinde pas tabakası oluşur. Ancak, çeliğin yüzeyindeki pas tabakası koruyucu bir özellik sağlamaz; oksidasyon ilerleyerek çeliğin iç kısımlarına nüfuz eder. Paslanmaz çeliklerde ise krom miktarının yüksek olması, yüzeyde sıkı ve ince bir krom oksit tabakası oluşturur ve bu tabaka çeliği korozyona karşı korur. Bu tabaka oluşmadığında çelik "aktif" olur ve korozyona duyarlı hale gelir, ancak tabaka oluştuğunda çelik "pasif" hale gelir ve korozyon direnci artar. Paslanmaz çeliğin kalıcı pasif tabakası, çevresel koşullara ve çeliğin yapısına bağlıdır; uygun koşullarda bu pasiflik uzun süre devam eder.

Paslanmaz çeliğin yüzeyindeki pasif tabaka kimyasal işlem gerektirmeden, oksijenle temas ederek kendiliğinden oluşur. Örneğin, çelik nitrik asit ve florik asit karışımında temizlenip hava ile temas ettiğinde hemen pasif film tabakası meydana gelir. %12'den fazla krom içeren paslanmaz çelikler, atmosferin zararlı etkilerine karşı koruma sağlarken, nitrik asit gibi oksitleyici asitlere karşı da dayanıklıdır. Ancak, hidroklorik asit ve sülfürik asit gibi bazı asitler krom oksit tabakasını bozarak çeliği savunmasız bırakabilir. Günümüzde, nikel ve molibden gibi elementler içeren ve bu tür asitlere de dayanıklı paslanmaz çelikler üretilmektedir.

Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde paslanmaz çelik talebi giderek artmaktadır. Kimya, petrokimya ve gıda endüstrilerinde kullanılan depolama tankları,

basıncılı kaplar, kazanlar ve paslanmaz boruların üretiminde çeşitli paslanmaz çelik türleri tercih edilmektedir. Paslanmaz çelikler haddelenerek levha, sac gibi yassı ürünler ya da döküm çelikler halinde üretilip pazara sunulmaktadır. Kaynak işlemleri için hemen hemen tüm yöntemler kullanılabilir; ancak uygun kaynak yönteminin seçimi, kullanım alanına ve malzeme özelliklerine bağlıdır.

1. Uygun kaynak cihazlarının seçilmesi, kurulumu ve kullanılabilir olması
2. Kaynak yapılacak malzemenin kalınlığı
3. Kaynak işleminin yapılacağı ortam koşulları
4. Kaynak pozisyonu
5. Malzemenin kimyasal bileşimi, dolayısıyla paslanmaz çelik türü
6. Yardımcı donanım ve ekipmanın temin edilebilirliği

Paslanmaz çeliklerin kaynak işlemlerinde, örtülü elektrot ve gazaltı kaynak yöntemlerinin tercih edilebileceği görülmektedir. Örtülü elektrot kullanılarak yapılan ark kaynağı, özellikle paslanmaz çeliklerin onarımı için ekonomik bir seçenek olarak öne çıkar. Ancak bu yöntemin, ince paslanmaz çelik saclarda kullanılamaması ve bazı durumlarda yavaş kalması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Buna karşılık, el ile veya otomatik olarak uygulanabilen TIG kaynak yöntemi, ince paslanmaz çelik saclarda üstün performans sergilemektedir. Paslanmaz saclar için uygun bir diğer yöntem ise MIG kaynak tekniğidir. Özellikle kaynak maliyetlerini azaltmak, yapım süresini hızlandırmak ve kaynak dikişinin kalitesini artırmak amacıyla yarı otomatik veya tam otomatik gazaltı kaynak yöntemleri arasında MIG kaynağı öne çıkan bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Paslanmaz çelikler, genel olarak örtülü elektrot, MIG, TIG ve plazma ark kaynak yöntemleri ile kolaylıkla kaynak edilebilmektedir. Ancak, yüksek miktarda kükürt ve selenyum içeren AISI 303, 416, 416Se, 430, 430F ve 430FSe gibi paslanmaz çelik türleri ile yüksek karbon içeren 440 tipi çeliklerin kaynak işlemleri zorluklar içermektedir. Bu tür çeliklerde, nikel ilavesi çeliğin sünekliğini ve tokluğunu artırarak asitlere karşı direnç sağlar. Nikelin yanı sıra, molibden ilavesi ise çeliğin klorür içeren ortamlarda pitting korozyonuna karşı dayanıklılığını artırır. Bu alaşım elementleri çeliğin mikro yapısında belirgin değişikliklere yol açarak paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasına katkıda bulunur. Paslanmaz çelikler özelliklerine ve bileşimlerine göre beş ana gruba ayrılır:

1. Martenzitik paslanmaz çelikler
2. Ferritik paslanmaz çelikler
3. Östenitik paslanmaz çelikler
4. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler
5. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler

3.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik kromlu paslanmaz çelikler, %11,5'in üzerinde krom içeren ve yüksek sıcaklıklarda östenit yapısına sahip olan, uygun bir soğutma işlemiyle iç yapısı oda sıcaklığında martenzitik hale gelen paslanmaz çelik türleridir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin kritik soğuma hızlarının oldukça düşük olması nedeniyle, örneğin yavaş soğuyan bir numunenin havada soğuması martenzit yapısının oluşmasına yol açar. Bu tip çeliklerin martenzit fazında sertleşmiş hali, korozyon direncini oldukça iyi seviyelere taşır. 815°C'ye kadar paslanmazlık özelliklerini korurlar, ancak uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında hafif bir korozyon başlangıcı görülebilir; bu nedenle endüstride sürekli olarak 700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanımları uygun değildir.

Çizelge 3.1: Endüstride En Çok Kullanılan Martenzitik Kromlu Paslanmaz Çelikler ve Kimyasal Bileşimleri

AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Diğer
403 (40300)	≤ 0,15	1,00	0,04	0,03	0,50	11,5-13,0	-	-	-
410 (S41000)	≤ 0,15	1,00	0,04	0,03	1,00	11,5-13,5	-	-	-
414 (S41400)	≤ 0,15	1,00	0,04	0,03	1,00	11,5-13,5	1,25-2,50	-	-
416 (S41600)	≤ 0,15	1,25	0,06	0,15 min	1,00	12,0-14,0	-	0,6	-
416Se (S41623)	≤ 0,15	1,25	0,06	0,06	1,00	12,0-14,0	-	-	0,15 Se
420 (S42000)	0,15 min	1,00	0,04	0,03	1,00	12,0-14,0	-	-	-
420F (S42020)	0,15 min	1,25	0,06	0,15 min	1,00	12,0-14,0	-	0,6	-
422 (S42200)	0,20-0,25	1,00	0,025	0,025	0,75	11,0-13,0	0,50-1,00	0,75-1,25	W
431 (S43100)	0,2	1,00	0,04	0,03	1,00	15,0-17,0	1,25-2,50	-	-
440A (S44002)	0,60-0,75	1,00	0,04	0,03	1,00	16,0-18,0	-	0,75	-
440B (S44003)	0,75-0,95	1,00	0,04	0,03	1,00	16,0-18,0	-	0,75	-
440C (S44004)	0,95-1,20	1,00	0,04	0,03	1,00	16,0-18,0	-	0,75	-

Martenzitik paslanmaz çelikler üçe ayrılmaktadır; düşük karbonlu krom-nikelli martenzitik paslanmaz çelikler, Süper martenzitik paslanmaz çelikler, Süper martenzitik paslanmaz çelikler.

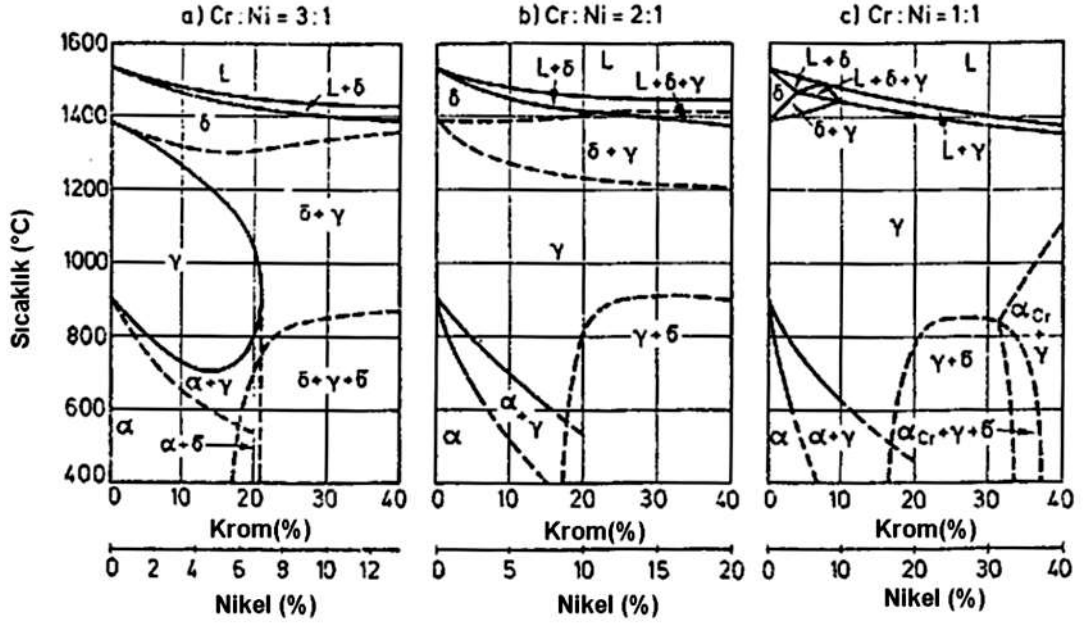
3.1.1. Düşük karbonlu krom-nikelli martenzitik paslanmaz çelikler

Düşük karbonlu krom-nikel içeren martenzitik paslanmaz çelikler, 1950'lerin sonlarında geliştirildi. Bu çeliklerin üretilmesindeki amaç, martenzitik paslanmaz çeliklerin kaynak yapılabirlik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra, ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak bölgelerinde görülen tane büyümesi nedeniyle tokluk azalması sorununa çözüm bulmaktır. Bu iyileştirmelerin ardındaki temel fikir, martenzitik yapının tokluk özelliklerini artırmak amacıyla karbon içeriğini %0,04 seviyesine indirmektir. Bunun yanında, soğuk çatlama riskini azaltmak ve %4-6 oranında nikel ekleyerek östenitik bölgeyi genişletip yapıyı delta ferritten mümkün olduğunca arındırmak hedeflendi.

3.1.2. Süper martenzitik paslanmaz çelikler

Fe-Cr-Ni denge diyagramında, nikel (Ni) ve kromun (Cr) birlikte oluşturduğu etkiler Şekil 3.1'de ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Bu diyagramda, Cr oranı 3:1 olarak belirlenmiş ve 12/4 ile 15/5 Cr-Ni alaşımlarının soğuma ve katılaşma süreçlerinde meydana gelen fazlar açıkça gösterilmiştir. Bu tür alaşımlar, katılaşma sürecine ilk olarak δ -ferrit tanecikleri olarak başlar. Yaklaşık 1300°C sıcaklık seviyesine ulaşıldığında, δ fazı yavaş yavaş γ fazına dönüşmeye başlar. Bu dönüşüm, alaşımın termodinamik denge koşullarına bağlı olarak ilerler ve sıcaklık yaklaşık 1200°C'ye düştüğünde tamamlanır.

Bu dönüşüm süreci, alaşımın iç yapısında önemli değişikliklere neden olur ve bu da malzemenin mekanik özelliklerini ve uygulama performansını doğrudan etkiler. Özellikle δ -ferrit ve γ fazlarının dönüşümü, malzemenin mukavemet, süneklik ve korozyon direnci gibi özelliklerinde belirleyici bir rol oynar. Diyagramda gösterilen bu faz değişimleri, Cr ve Ni oranlarının malzeme davranışı üzerindeki kritik etkilerini daha iyi anlamak açısından önemlidir. Ayrıca, bu bilgiler, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılacak alaşımların tasarımı ve üretim süreçleri için de yol gösterici niteliktedir.



Şekil 3.1: Krom ve Nikel Miktarlarına Göre Fe-Cr-Ni Denge Diyagramları

Süper martenzitik paslanmaz çelik alaşımı tasarımı, martenzit bölgesi içinde kalan fakat ferrit ve/veya östenit oluşumunun gerçekleşebildiği sınırdaki meydana gelen bir metalürjik dengeleme sürecidir.

3.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik krom içeren paslanmaz çelikler, endüstride yaygın olarak kullanılan çelik türlerinden biridir; çünkü bu çelikler, geliştirilen ilk paslanmaz çelik çeşitleri arasında yer almaktadır. Alaşım bileşiminde yer alan elementlerin, özellikle karbonun etkisiyle, genellikle % 16-30 arasında değişen krom içeriğine sahiptirler. Bu çelikler manyetik özellik gösterir hem sıcak hem de soğuk haddelenebilir. Ancak, tokluk, süneklik ve korozyona karşı direnç gibi mekanik özellikleri, normalleştirilmiş durumda maksimum seviyeye ulaşır. Talaşlı işleme kolaylıkları ve korozyon dirençleri, martenzitik kromlu paslanmaz çeliklere göre daha üstündür.

Ferritik kromlu paslanmaz çeliklerin bir diğer önemli özelliği, nikel gibi pahalı ve stratejik bir element içermemeleridir. Bu durum, onları krom-nikel alaşımli östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha ekonomik bir seçenek haline getirir ve bu avantaj, günümüz ekonomik koşullarında önemli bir tercih sebebidir. Ayrıca, ferritik kromlu paslanmaz çelikler, östenitik krom-nikel alaşımli çeliklere kıyasla şu ek avantajlara da sahiptir:

1. Klorürlü çözeltilerde gerilmeye bağlı korozyon çatlamasına karşı daha dayanıklıdırlar.
2. Daha yüksek akma mukavemeti sunarlar.
3. Soğuk şekillendirme sertleşmesi daha az şiddetlidir.
4. Manyetik özellik gösterirler.

3.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler

İkili demir-krom faz diyagramına göre, krom (Cr) oranı %13'ün üzerine çıktığında östenit (γ) faz alanı oluşmamaktadır ve tüm sıcaklık aralıklarında yapı tamamen ferritik kalmaktadır. Bunun yanı sıra, %12-13 Cr arasında dar bir $\alpha + \gamma$ bölgesi bulunmaktadır. Ferrit yapısı, çeliğin sıvı fazdan katı faza geçişi sırasında ortaya çıktığı için " δ -ferrit" olarak adlandırılmaktadır. Alaşıma karbon (C) eklenmesi, γ fazını ve özellikle $\alpha + \gamma$ bölgesini genişletme etkisine sahiptir. Örneğin, %18 Cr içeren bir çeliğe %0,4'e kadar karbon ilavesi, yapının tamamen ferritik kalmasını engelleyemez. Ancak, karbon oranının %0,08-0,22 aralığında olması durumunda, yapının kısmen dönüşüm gösterdiği ve $\alpha + \gamma$ içyapısının oluştuğu gözlemlenir. Eğer karbon oranı %0,4'ü aşarsa, çelik γ fazından hızlı soğutulduğunda oda sıcaklığında tamamen östenitik bir yapı korunabilir. Karbonun çelik içerisindeki bir diğer önemli etkisi de karbür oluşumuna katkıda bulunmasıdır.

Östenitik paslanmaz çelikler içinde en yaygın karbür türü, M₂₃C₆ karbürüdür. Bu karbür, çeliğin korozyon direnci üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Östenitik yapıyı genişletmek amacıyla düşük karbonlu ve %18 Cr içeren çeliklere nikel (Ni) eklenmesi, γ fazının oluşum bölgesini genişletir. Nikel oranı %8'e ulaştığında, γ fazının dengesi oda sıcaklığına kadar korunabilir. Bu durum, %18 Cr ve %8 Ni içeren en yaygın östenitik çelik türünün ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu özel bileşim, düşük nikel içeriğiyle oda sıcaklığında yüzey merkezli kübik (YMK) yapıyı dengede tutabilir. Ancak, krom oranında meydana gelen küçük bir artış, yapının östenitik fazda dengede kalabilmesi için daha fazla nikel ihtiyacını ortaya çıkarır. Örneğin, %25 Cr içeren ve yüksek korozyon direncine sahip bir çeliğin oda sıcaklığında östenitik yapı kazanabilmesi için %15 Ni içermesi gereklidir.

Östenitik demir alaşımlarının geliştirilmesi, özellikle son yıllarda metalürji alanında büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde "AISI 300 serisi" olarak adlandırılan

östenitik krom-nikel paslanmaz çelikler, bu çalışmaların sonucunda geliştirilmiştir. Bu çeliklerin bileşiminde %16-26 Cr, %10-24 Ni, %0,40'a kadar karbon ve özelliklerini iyileştirmek için eklenen molibden (Mo), titanyum (Ti), niyobyum (Nb), tantal (Ta) ve azot (N) gibi elementler bulunmaktadır. Son yıllarda geliştirilen tam veya süper östenitik paslanmaz çelik gruplarında, östenit fazını destekleyen elementlerin oranları daha da artırılmıştır.

Östenitik paslanmaz çeliklerde, soğuma sırasında östenit → ferrit dönüşümü gerçekleşmediği için bu çelikler su verme yöntemiyle sertleştirilemez. Anti-manyetik özelliklere sahip olan bu paslanmaz çelik türleri, "AISI 3XX serisi" altında sınıflandırılmaktadır. Geliştirilen bu çelikler, endüstriyel uygulamalarda yüksek korozyon direnci, dayanıklılık ve anti-manyetik özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir.

3.4. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, Fe-Cr-Ni bazlı bir çelik grubuna aittir ve içerisinde bakır, molibden, niyobyum, titanyum ve alüminyum gibi farklı alaşım elementlerini barındırır. Bu çelikler, özellikle alaşımdaki bu elementlerin bir ya da birkaçının etkisiyle çökelme sertleşmesi özelliği gösterir. Çökelme sertleşmesi prensibi, çeliğin önce çözeltiye alma tavı işlemiyle başlar, ardından hızlı bir soğutma süreci ve sonrasında yaşlandırma aşamalarıyla tamamlanır. Çözeltiye alma tavı sırasında, alaşım elementleri çelik matrisinde çözünerek homojen bir yapı oluşturur. Yaşlandırma aşamasında ise bu elementler, mikroskobik altı boyutlarda tanecikler halinde çöker. Bu süreç, matrisin sertlik ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırır.

Çökelme sertleşmesiyle elde edilen mekanik özellikler, çeliğin martenzitik paslanmaz çeliklerin yüksek mukavemetine yaklaşmasını, hatta bazı durumlarda bu seviyeyi aşmasını sağlar. Aynı zamanda, çelik AISI 304 (X5CrNi18.10) tipi östenitik paslanmaz çeliğin korozyon direncine benzer bir direnç kazanır. Bu özellikler, çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikleri hem mekanik dayanım hem de korozyon direnci açısından oldukça avantajlı hale getirir.

Bu tür çeliklerin üretim süreci hem işlenebilirlik hem de nihai özellikler açısından önemli avantajlar sunar. Çelik, normalize edilmiş haliyle kolayca işlenebilir ve şekillendirilebilir. İşlemler tamamlandıktan sonra, 480-600°C sıcaklık

aralığında bir ısıtım işlem uygulanarak mekanik özellikler daha da geliştirilir. Bu süreç, çeliğin mukavemet değerlerini yaklaşık 1700 MPa seviyesine kadar çıkarabilir. Böylece, martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik performansının ötesine geçilebilmektedir.

Bu çelikler, yüksek dayanım ve korozyon direnci gerektiren uygulamalar için tercih edilir. Örneğin, havacılık ve uzay sanayi, enerji sektörü, kimyasal işleme ekipmanları ve otomotiv endüstrisinde bu tür çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çeliklerin yüksek mukavemet sağlamasının yanı sıra, korozyona dayanıklı yapısı onları zorlu çevresel koşullarda dahi ideal bir çözüm haline getirmektedir.

Sonuç olarak, çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler, dayanıklılığı, işlenebilirliği ve korozyon direnci ile birçok sektörde hem güvenilir hem de etkili bir malzeme seçeneği sunmaktadır. Gelişmiş mekanik özellikleri ve optimize edilebilir üretim süreciyle bu çelikler, modern sanayinin önemli bir bileşeni olmaya devam etmektedir.

3.5. Dupleks (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler

Ferrit ve östenit fazlarının bir arada bulunduğu çift fazlı paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çelikler, östenit fazı içinde ferrit taneleri veya ferrit fazı içinde östenit taneleri barındırır. Sağladıkları en belirgin avantajlar arasında, östenitik çeliklerin iki katı akma mukavemeti ve çok daha iyi korozyon direnci yer almaktadır. Klor içeren sıvıların kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda, AISI 316L-EN X2CrNiMo17.13.3 gibi bilinen paslanmaz çelik türlerinden daha yüksek mukavemet ve geliştirilmiş korozyon direnci gereklidir. Çift fazlı çelikler, tane boyutunun 3-10 µm'ye kadar küçültülmesi durumunda, yaklaşık 950°C sıcaklıkta %500 oranında uzama göstererek süper plastik özellik kazanabilir.

Ferritik kromlu paslanmaz çelikler ile karşılaştırıldığında, östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler, klor içeren ortamlarda gerilmeli korozyon çatlaması (SCC) direnci açısından sınırlıdır. Ancak, östenitik çelikler kaynak yapılabirlik açısından daha üstündür. Öte yandan, ferritik kromlu paslanmaz çelikler gerilmeli korozyon çatlamasına karşı dayanıklıdır, ancak kaynak yapılabirlikleri, özellikle

yeni geliştirilen türlerinde dahi, istenilen seviyede değildir. Kaynak sırasında, ısının etkisi altındaki bölgelerde tane irileşmesi görülür ve bu durum, tokluğun azalmasına neden olur. Ayrıca, ferritik çeliklerin %0,1 veya daha fazla karbon içermesi, taneler arası kırılğan martenzit oluşumuna yol açarak kaynak bağlantılarında soğuk çatlak riskini artırır.

Bu olumsuzlukları gidermek ve her iki tür çeliğin olumlu özelliklerini birleştirmek amacıyla dubleks paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. Bu çelikler, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci ve yeterli kaynak yapılabirlik sunarak endüstriyel uygulamalar için ideal bir seçenek haline gelmiştir.



4. KAYNAĞIN TANIMI, ÇEŞİTLERİ VE TARİHÇESİ

4.1. Kaynağın Tanımı

Malzemelerin ısı, basınç veya her ikisinin etkisiyle birleştirilme işlemine kaynak denir.

Birbirleri ile aynı ya da ergime aralıkları birbirine yakın bir veya birden daha fazla parçayı ısı, basınç veya ısı ile basıncı bir arada kullanarak, gerektiğinde bir ilave bir tel katarak veya katmadan sökülemeyen ve sızdırmazlık sağlayan birleştirmeye kaynak denir (Anık, 1991).

Kaynak amaç olarak kendi içerisinde ikiye ayrılır;

4.2. Kaynağın Amacı

4.2.1. Birleştirme kaynağı

En az iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilerek tek parça haline gibi olmasını sağlayan işleme birleştirme kaynağı denir.



Şekil 4.1: Birleştirme Kaynağı

4.2.2. Dolgu kaynağı

Tek bir parça üzerine yapılan kaynak işlemine dolgu kaynağı denir. Dolgu kaynağı genelde imalat yapılırken veya ürünün çalışması sırasında ölçüsünü kaybetmiş, yıpranmış, aşınmış (çeşitli kalıplar, makine parçaları, motor gövdeleri v.b.) ürünlerin tekrar geri kazanılması amacıyla yapılır. Ayrıca bunun dışında

kullanılan malzemenin yüzeyine kendisinden farklı bir özellik (Yüzey sertliği, Korozyon etkisi v.b.) kazandırması amacıyla da yapılabilir.



Şekil 4.2: Dolgu kaynağı

4.3. Yapılış Şekline Göre Kaynak Türleri

4.3.1. Isı kullanarak yapılan kaynaklar

Kaynak işlemi, elektrik veya gaz gibi çeşitli ısı kaynaklarından sağlanan enerjinin, ısı enerjisine dönüştürülmesiyle metal parçaların eritilerek birleştirilmesi sürecidir. Bu işlem, farklı malzemeleri sağlam ve dayanıklı bir şekilde birleştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Parçaların bir araya getirilmesinde, genellikle bağlantının mukavemetini artırmak için dolgu malzemeleri de kullanılır.

Kaynak teknikleri arasında farklı yöntemler bulunmaktadır. Örneğin, Oksi-Gaz Kaynağı, oksijen ile asetilen gibi gazların karışımından elde edilen alev kullanılarak kaynak yapılmasını sağlar ve genellikle ince metal levhaların birleştirilmesinde tercih edilir. Elektrik Ark Kaynağı, elektrik enerjisini kullanarak bir ark oluşturur ve metali eriterek birleştirir; bu teknik genellikle ağır sanayi uygulamalarında kullanılır.

Diğer taraftan, MİG/MAG Gazaltı Kaynağı, inert veya aktif gazlar yardımıyla bir koruyucu atmosfer oluşturarak erimiş metalin oksidasyonunu önler. Bu yöntem, özellikle otomotiv ve imalat sektörlerinde yaygındır. TIG Kaynağı, tungsten elektrot kullanılarak hassas bir kaynak işlemi yapılmasını mümkün kılar ve ince metallerde yüksek kalite sağlar. Toz Altı Kaynağı, büyük ölçekli metal yapıların birleştirilmesinde yüksek verim sunar ve genellikle endüstriyel üretimlerde tercih edilir.

Genel olarak, farklı kaynak yöntemleri, çeşitli malzeme türleri ve uygulama gereksinimlerine uygun çözümler sunar. Her bir teknik, kendine özgü avantajları ve sınırlamalarıyla, belirli sektörlerin ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir yere sahiptir.

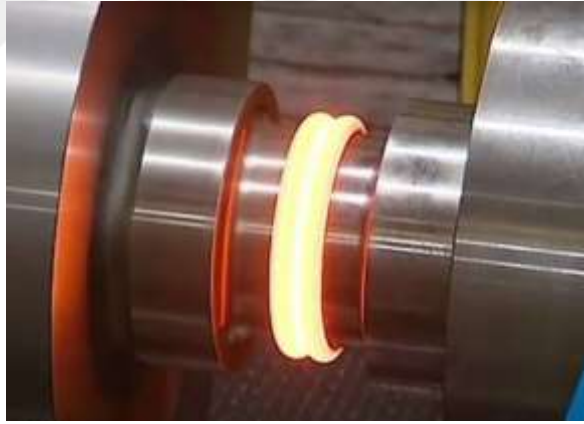


Şekil 4.3: Örtülü Elektrot Kaynak Yöntemi

Kaynak: (<http://northern-weldarc.com>)

4.3.2. Basınç kullanarak yapılan kaynaklar

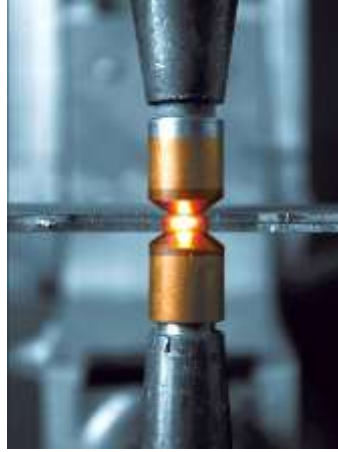
Herhangi bir enerji kaynağı kullanmadan (elektrik, gaz v.b) parçaları birbirlerine sürtünmesi ile ısı enerjisine oluşturulması ve parçaların eritilmesi ile yapılan kaynak işlemidir. Şekil 4.4'te Sürtünme Kaynağı örnek olarak gösterilebilir.



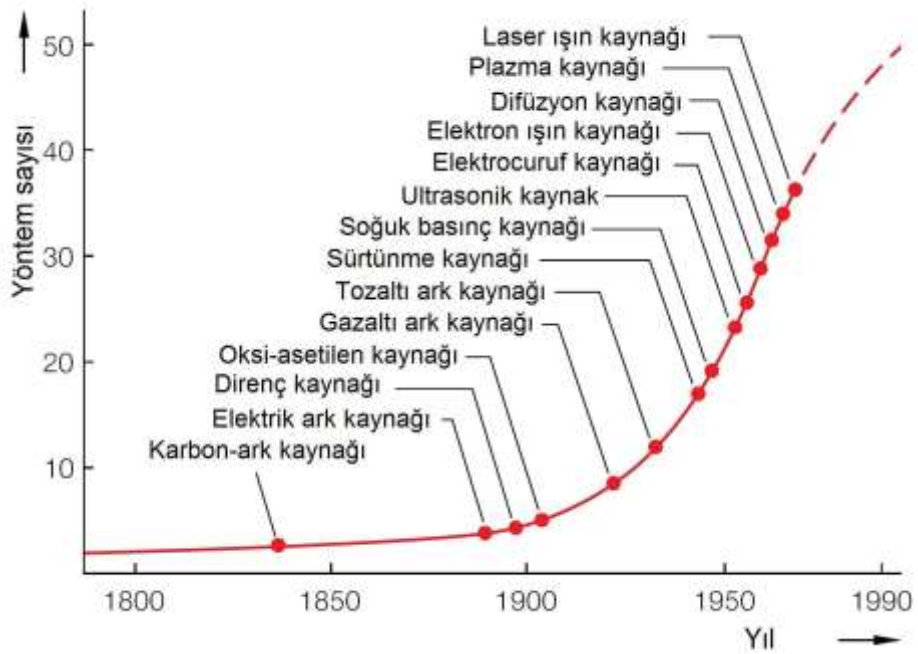
Şekil 4.4: Sürtünme Kaynağı

4.3.3. Basınç ve ısı kullanarak yapılan kaynaklar

Isı enerjisi ile basıncın beraber kullanıldığı kaynak yöntemidir. Aynı anda parça ısıtılarak erimesi sağlanır ve belirli bir sürede belli bir basınç altında kuvvet uygulanarak yapılan birleştirme işlemidir. Şekil. 4.5'te Elektrik Direnç Kaynağı örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 4.5: Elektrik Direnç Kaynağı



Şekil 4.6: Kaynak Yöntemlerinin Tarihçesi

Kaynak: (Dikicioğlu, t.y.)

4.3.4. Laser ışınıyla kaynak

Laser Işını

Bir lazer ışını oluşturulabilmesi için, termodinamik dengede olan bir sistemden aktif lazer ortamına enerji aktarımı gereklidir. Bu enerji aktarımı, tam ve kısmi yansıtıcı aynalar içeren bir rezonatör tarafından sağlanır. Rezonatör, aktif ortamda biriken enerjinin bir kısmını lazer etkisiyle yönlendirerek tek renkli ve oldukça uyumlu elektromanyetik bir ışın üretir. Bu süreci mümkün kılan cihaz, literatürde genellikle "ışın kaynağı" olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.7'de, lazer ışın

kaynağının genel bir şematik gösterimi sunulmaktadır. Lazer ışınının özellikleri, aktif lazer ortamı, enerji yükseltme yöntemleri ve rezonatörün fiziksel parametreleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu parametreler değişkenlik gösterebilir ve bir parametredeki değişim, diğer parametrelerin etkisi göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.

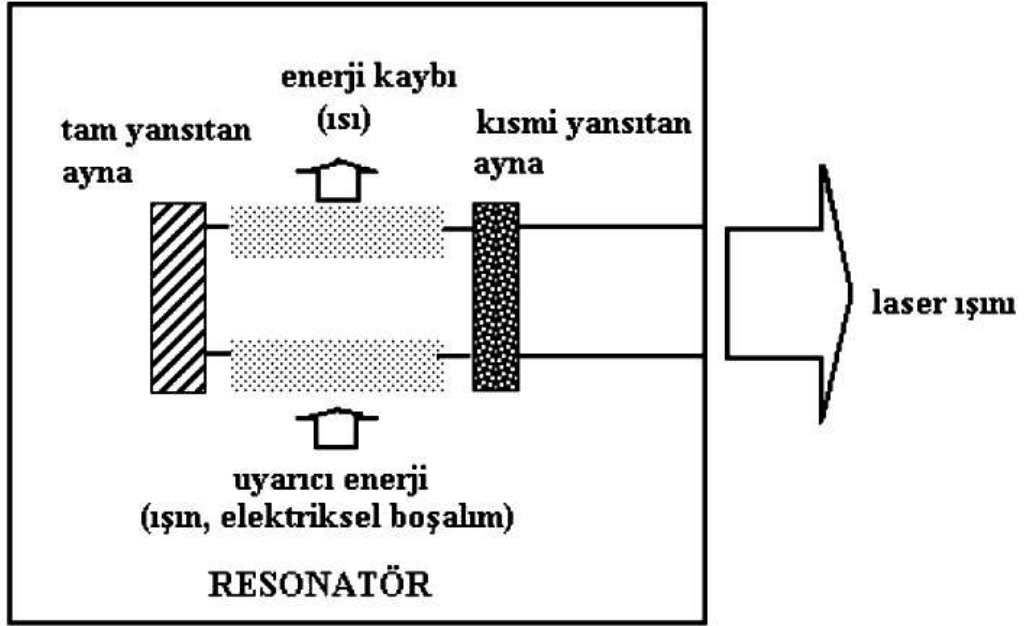
Uyarılmış yayınım süreci, bir atom ya da molekülün yüksek enerjili bir E_2 seviyesinden daha düşük enerjili bir E_1 seviyesine geçerken bir foton yayması ile gerçekleşir ve bu durum kendiliğinden yayınım olayına benzerlik gösterir. Süreçte yayılan ışınının frekansı, $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ bağıntısıyla tanımlanır. Burada h , Planck sabiti ($6,62619 \times 10^{-34}$ Js) olarak bilinir. Uyarılmış yayınım, bir fotonun E_2 seviyesinden E_1 seviyesine geçişi tetiklemeyle meydana gelir. Ancak termodinamik dengede, uyarılmış parçacıkların sayısı genellikle oldukça azdır ve genellikle ihmal edilir.

Sisteme giren $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ frekansındaki ışınının soğurulma olasılığı, uyarılmış yayınım olasılığından genellikle daha yüksektir. Bununla birlikte, uyarılmış yayınımın anlamlı bir seviyeye ulaşabilmesi için E_2 seviyesindeki parçacık sayısının (N_2), E_1 seviyesindekinden (N_1) fazla olması gerekmektedir. Bu durum, genellikle "pompalama" olarak bilinen dış enerji girişimi ile sağlanır.

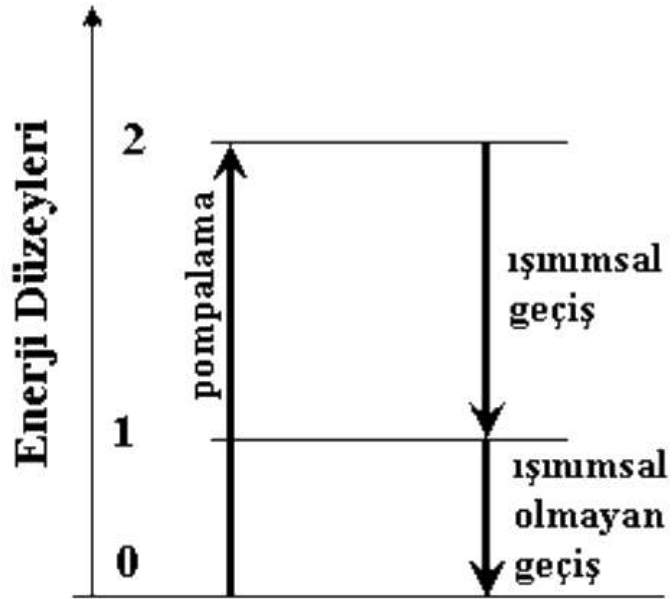
Uyarılmış yayınım sürecine katılan enerji seviyeleri, temel enerji seviyesi ile pompalama işlemiyle ulaşılan uyarılmış seviyeler olmak zorunda değildir. Genellikle, bu seviyeler ara enerji düzeyleridir. Örneğin, Şekil 4.8'de sunulan üç seviyeli lazer şeması, temel enerji seviyesi ile ikinci enerji seviyesi arasında gerçekleşen pompalama işlemi göstermektedir. Pompalama sırasında ikinci seviyede biriken enerji, ışınımsal olmayan bir geçişle birinci seviyeye aktarılır ve ardından enerji boşalması, birinci seviyeden sıfır seviyesine doğru, kendiliğinden veya uyarılmış yayınım ile gerçekleşir.

Şekil 4.9'da ise dört seviyeli lazerin enerji düzey şeması sunulmaktadır. Bu sistemde, ışınımsal enerji geçişi ikinci seviyeden birinci seviyeye doğru gerçekleşirken, üçüncü seviyeden ikinci seviyeye ve birinci seviyeden sıfır seviyesine ışınımsal olmayan geçişler meydana gelir. Bu düzen, lazer sisteminin enerji boşaltımını daha verimli bir şekilde gerçekleştirmesini sağlar.

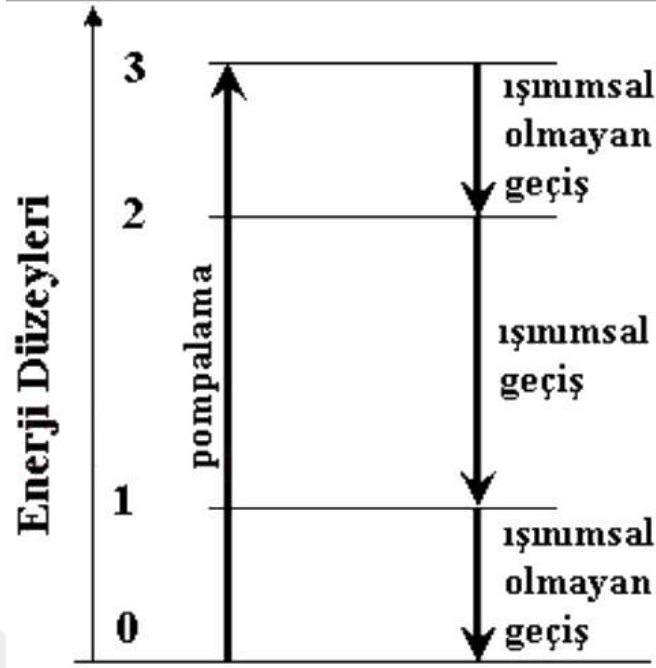
Bu yapı ve süreçler, lazer teknolojisinin işleyişini ve yüksek enerji verimliliği ile uyumlu elektromanyetik dalga üretimini mümkün kılar.



Şekil 4.7: Lazer Işının Oluşum Şeması



Şekil 4.8: Üç Düzeyli Bir Lazerin Enerji Şeması (Neodim Lazeri)



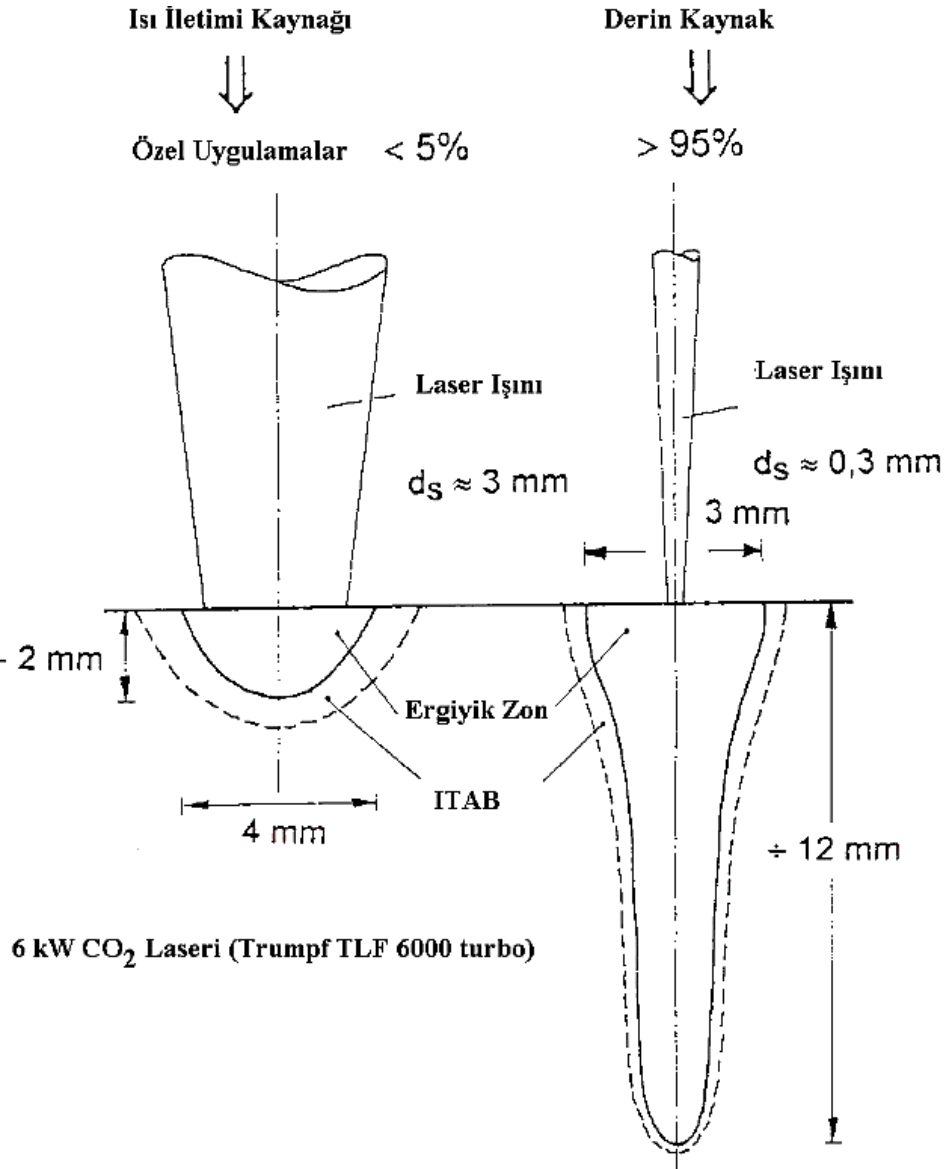
Şekil 4.9: Dört Düzeyli Bir Laserin Enerji Şeması (Yakut Laseri)

Lazer ışını ile kaynak, işlem türüne göre iki ana gruba ayrılmaktadır: ısı iletimi kaynağı ve derin penetrasyonlu kaynak. Bu iki kaynak türüne ilişkin şematik gösterim Şekil 4.10'da sunulmuş olup, elde edilen kaynak derinliği, dikiş geometrisi ve ısıdan etkilenen bölge (ITAB) boyutları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.10'da yer alan veriler, CO₂ lazer ışını kullanılarak elde edilmiştir. Düşük güç yoğunluğu ile gerçekleştirilen kaynak işlemleri, ısı iletimi kaynağı olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem sırasında, lazer ışını ve malzeme arasındaki etkileşim bölgesinden başlayarak, ısının malzeme içine doğru ısı iletim yoluyla yayılımı gerçekleşir. Bu yöntemle üretilen kaynakların etkin derinliği genellikle düşüktür.

Yüksek güç yoğunluğu altında ise daha derin kaynak dikişleri ve yarı dairesel bir erime bölgesi geometrisi elde edilir. Bu tür kaynak, "derin penetrasyonlu kaynak" olarak adlandırılır. Derin penetrasyonlu kaynak işlemi, yüksek güç yoğunluğu nedeniyle oluşan güçlü buharlaşma etkisine dayanmaktadır. Buharlaşma süreci sırasında, metal buharının basıncı, ergimiş metali yan duvarlardan yukarı taşıyarak lazer ışınının malzemenin daha derin bölgelerine nüfuz etmesine olanak sağlar. Bu süreç, "buhar kanalı" olarak bilinen yapının oluşumuna yol açar.

Darbeli (duraksamalı) lazer ışını ile gerçekleştirilen nokta kaynak işlemleri, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha basit bir süreçle yapılabilir. Darbeli lazer kullanılarak gerçekleştirilen dikiş kaynakları ise, ardışık olarak sıralanan ve

birbirleri üzerine binen nokta kaynaklarının bir araya gelmesiyle oluşur. Uygulamada lazer kaynak işleminin tercih edilmesi, teknik ve metalurjik gerekliliklerin yanı sıra üretim miktarına dayalı ekonomik gerekçelere de bağlıdır. Özellikle makine elemanlarının üretiminde sürekli dalga (continuous wave, cw) lazerler yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.10: Isı İletim Kaynağı İle Derin Kaynağın Karşılaştırılması

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme

316L kalite paslanmaz çelik tozların DMLS eklemeli imalat tekniğiyle üretilmiş ve elde edilen plakalar farklı laser parametreleri kullanılarak ilave tel ile birleştirilmiştir. Kaynak edilmiş numunelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri karakterize edilerek, en uygun kaynak parametreleri tespit edilmiştir.

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan DMLS tekniği kullanılarak Çizelge 5.1’ de kimyasal bileşimi verilen plakalar üretilmiştir.

Çizelge 5.1: DMLS Eklemeli İmalat Tekniğiyle Üretilmiş 316L Paslanmaz Çeliğin Kimyasal Bileşimi

Element	% Ağırlıkça
C	0.03 (maks)
Mn	2.0 (maks)
P	0.045 (maks)
S	0.030 (maks)
Si	1.00 (maks)
Cr	16.0-18.0
Ni	10.0-14.0
Mo	2.00-3.00
N	-
Fe	Kalan

5.2. Laser Sinterleme İle 316L Kalite Paslanmaz Çeliklerin Üretimi

316L kalite paslanmaz çelik tozların DMLS eklemeli imalat tekniğiyle üretilmesinde kullanılan laser gücü 285 watt olarak seçilmiştir. Kullanılan teknikte tarama hızı 960 mm/sn, tarama mesafesi 0,11 mm ve her katman arasındaki kalınlık 0,04 mm olacak şekilde belirlenmiştir. İşlemin tamamında kullanılan enerji yoğunluğu 67,47 J/mm³ şeklinde kullanılmıştır. Plakaların üretim parametreleri Çizelge 5.2’ de tekrar verilmiştir.

Çizelge 5.2: Laser Sinterleme ile 316 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Üretim Parametresi

Laser gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Tarama mesafesi (mm)	Katman kalınlığı (mm)	Enerji yoğunluğu (j/mm ³)
285	960	0,11	0,04	67,47

Eklemeli imalat ile üretilen plakalar laser ışın kaynak tekniğiyle telli birleştirmek amacıyla, her bir plakaya 30 °'lik açı verilerek üretilmiştir,



Şekil 5.1: Üretilmiş Plakaların Kaynak Pozisyonu

5.3. Laser Işın Tekniğiyle Kaynak

DMLS tekniğiyle üretilmiş parçalar farklı laser ışın parametreleriyle birleştirilmiştir. Laser kaynağında kullanılan laser türü, Nd:YAG makinesi olup, özellikleri Çizelge 5.3 ve görseli Şekil 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.3: Laser kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

Şekil 5.2: Eklemeli imalat tekniğiyle üretilmiş plakaların kaynağında kullanılan Nd:YAG makinesi

Kullanılan laser makinesi GeKa Laser 3000 tipinde, tel sürmeli ve koaksiyel torca sahip elle kaynak yapılabilir yeni nesil laser makinesidir. Koaksiyel kafa sayesinde laser ışını, tel sürme ve işlem gazı aynı kafadan kapalı bir sistemle kaynak ortamına iletilmektedir. Kullanılan Nd: YAG laser makinesinin 8 m uzunluğunda fiber optik kablosu olup, aynı zamanda osilasyon özelliğiyle kaynak banyosuna ve geometrisine etki etme özelliği mevcuttur.

DMLS tekniğiyle üretilmiş plakaların uygun laser kaynak parametrelerinin belirlenmesi için, farklı güç, hız ve gaz debileriyle ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre nüfuziyet derinlikleri, gözenek durumu, çatlak gibi kaynak kabiliyetini doğrudan etkileyen durum değerlendirmeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en uygun kaynak gücü tel besleme ve gaz debisi ile kaynak hızı optimizasyonu yapılmıştır. Çizelge 5.3'te seçilen kaynak parametreleri verilmiştir. Laser kaynağında kullanılan ilave telin özellikleri ayrıca Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.3: Plakaların Laser Kaynağında Seçilen Kaynak Parametreleri

Numune No	Laser Gücü (W)	Frekans (Hz)	Laser Işın Çapı (mm)	Laser Modu-PL (ms)
2	1500 W	3000	5	500
3	2400 W	3000	3	500

5.4. Kaynakta Kullanılan İlave Telin Özellikleri

Laser kaynağında ER 316L Si 1,6mm çapında kaynak teli kullanılmış olup, kimyasal bileşimi Çizelge 5.4' de mekanik özellikleri ise Çizelge 5.5' de verilmiştir.

Çizelge 5.4: 316 L Si Kaynak Telinin Kimyasal Bileşimi % Ağırlıkça

C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni
0.02	0.8	1.6	2.2	18.5	11.5

Çizelge 5.5: 316 L Si Telin Mekanik Değerleri

Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Çentik Dayanımı (ISO-V/+20°C)	Uzama (Lo=5d ₀) (%)
min. 400	550 - 700	min. 63 J	min. 30

5.5. Kullanılan Laser Kaynak Makinası

Tüm kaynak işlemleri GeKaLaser H3000 serisi manuel laser kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Laser güç çıkış değeri 3000 Watt'tır. Nd:YAG laser rezonatör üreticisine sahip, laser ışın taşınması fiber kablo ile yapılmaktadır. Şekil 5.2'de kullanılan kaynak makinesinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.2: GeKaLaser 3000 Laser Kaynak Makinesi

5.6. Kaynak Test Parçasının Kaynak Öncesi Hazırlığı

DMLS yöntemiyle üretilmiş 316L kalite paslanmaz çelik plakalara, 45° lik kenar açısı değerine sahip kaynak ağzı uygulaması yapılmıştır. Plakalar kök taraflarından puntalanarak ön sabitlemeleri (montajları) yapılmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: Kaynak Öncesi Parçaların Puntalama İşlemi

5.7. Kaynaklı Parçaların Karakterizasyonu

İlave tel kullanılarak seçilmiş olan uygun kaynak parametreleriyle birleştirilmiş plakaların mikro yapıları ışık mikroskobu ve elektron mikroskobu ile görüntülenmiş, sertlikleri HV-Vicker's yöntemiyle belirlenmiştir.

Mikro yapı görüntüleme de ayrıca oluşan fazların SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiş olup kaynak sonrası olası korozyona dayanım değerleri yorumlanmıştır. Mikro yapı görüntüleme de kaynak dikiş geometrisi ITAB genişliği ve esas metal-kaynak bölgesi mikro yapı dağılımları ortaya konulmuştur



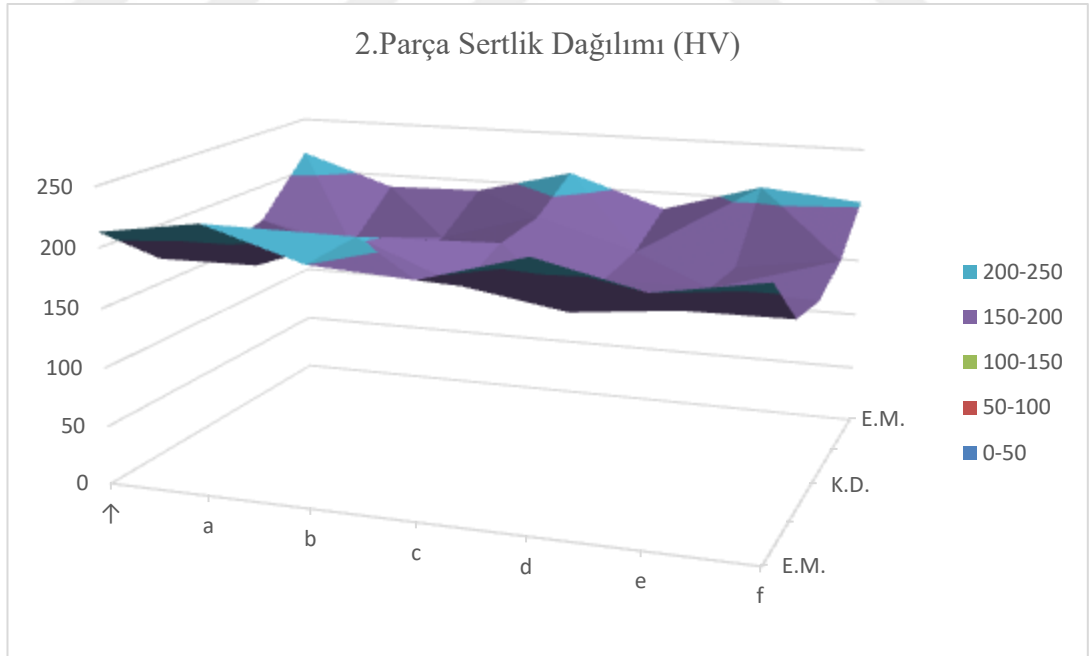
6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Sertlik

Sertlik deneyi esas metalden kaynak dikişine kadar taranarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1: 2. Parçanın Vikers (HV) Cinsinden Sertlik Değerleri

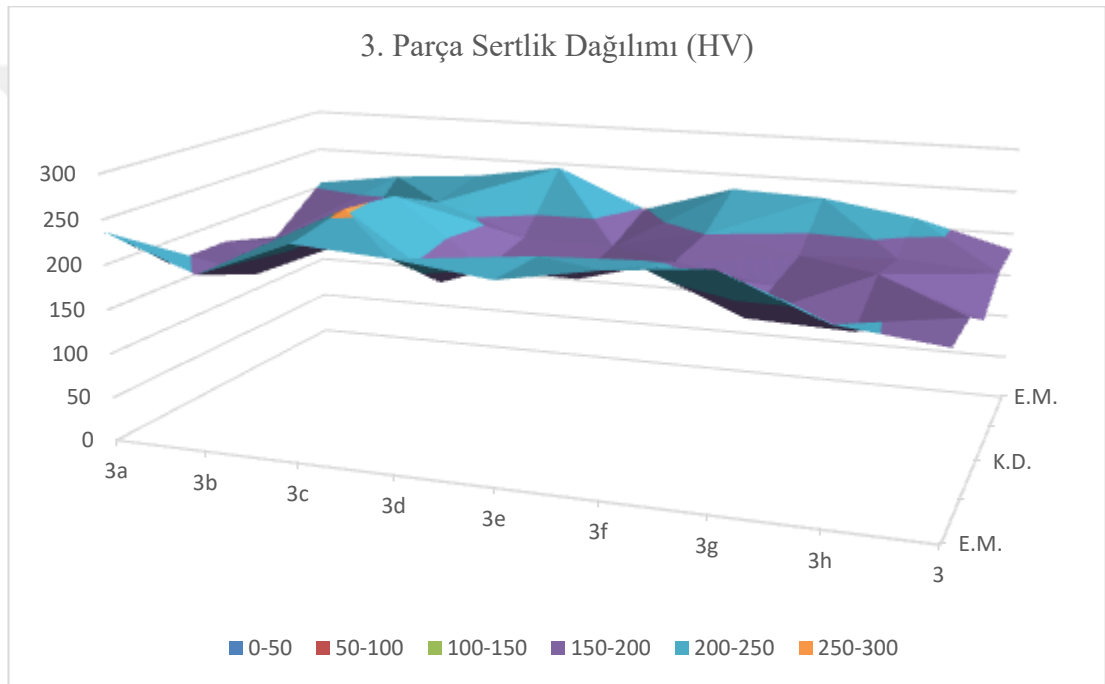
2.Parça	E.M.	ITAB	K.D.	ITAB	E.M.
↑	213	171	157	168	217
a	226	172	178	150	189
b	200	203	158	164	191
c	195	169	185	189	213
d	220	155	160	164	185
e	200	164	160	157	211
f	215	165	157	170	203



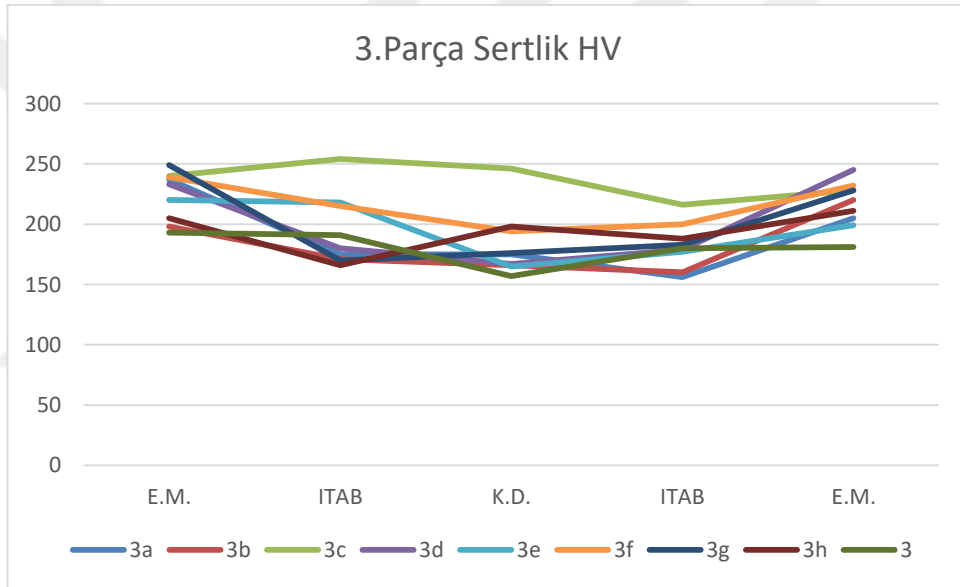
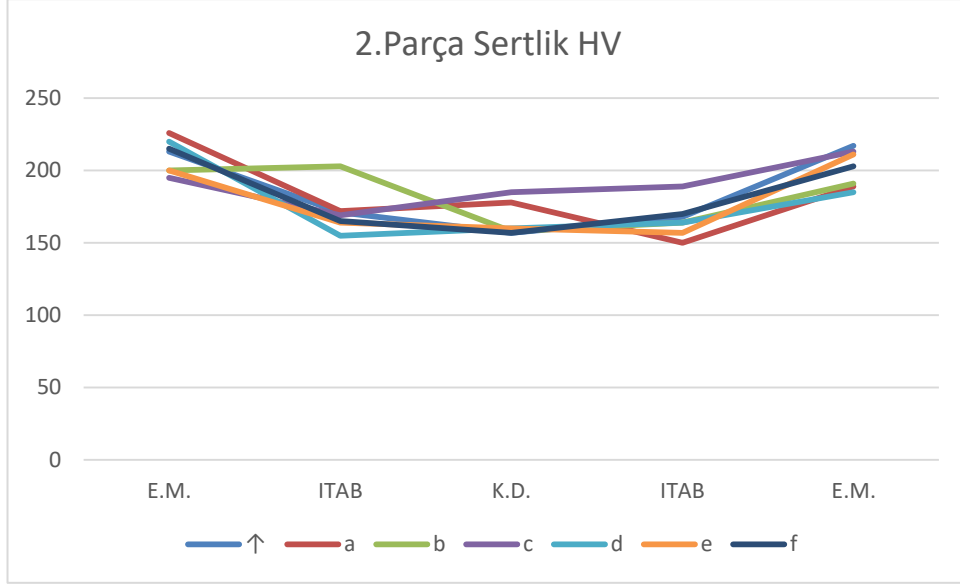
Şekil 6.1: Kaynak Edilmiş Eklemeli İmalathı 2.Parçanın Esas Metalden Kaynak Dikişine Kadar Sertlik Değişimi

Çizelge 6.2: 3 nolu Parçanın Vickers (HV) Cinsin Sertlik Değerleri

3.Parça	E.M.	ITAB	K.D.	ITAB	E.M.
3a	237	175	175	156	205
3b	198	171	166	160	220
3c	240	254	246	216	228
3d	233	180	167	179	245
3e	220	218	165	177	199
3f	239	215	194	200	232
3g	249	170	176	183	228
3h	205	166	198	188	211
3	193	191	157	180	181



Şekil 6.2: Kaynak Edilmiş Eklemeli İmalatlı 3 Nolu Parçanın Esas Metalden Kaynak Dikişine Kadar Sertlik Değişimi.

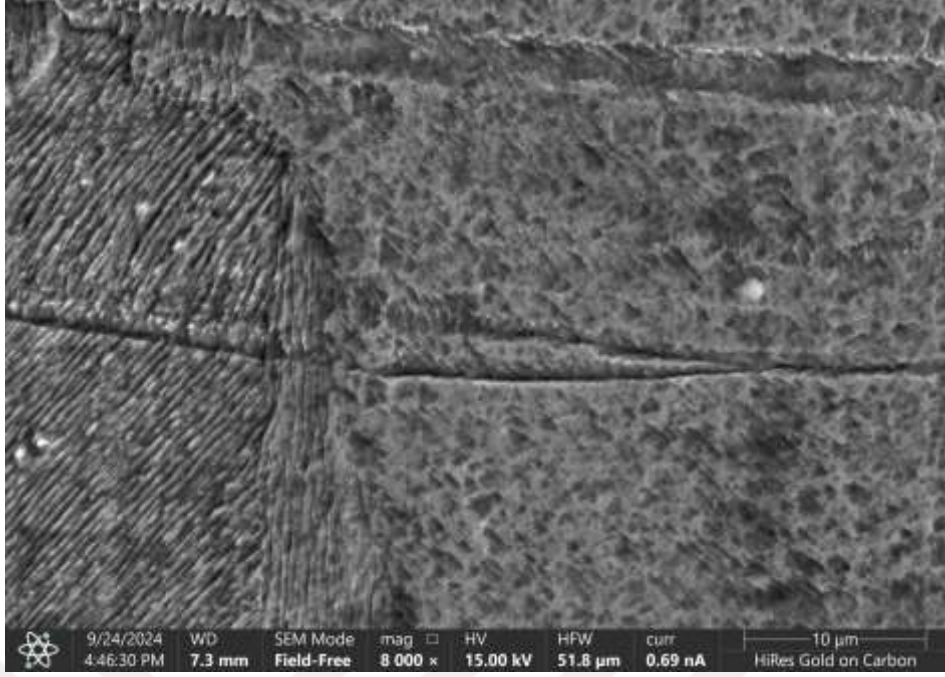


Şekil 6.3: 2 Nolu Parça ve 3 Nolu Parçanın Sertlik Dağılımlarının Karşılaştırılması

Sertlik deney sonuçlarına göre, genel olarak tüm kaynak parametreleri için esas metaldeki sertlik değerlerinin ITAB'a doğru düşme eğiliminde olduğu belirlenmiş ve minimum ortalama sertlik değerlerinin de kaynak dikişinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

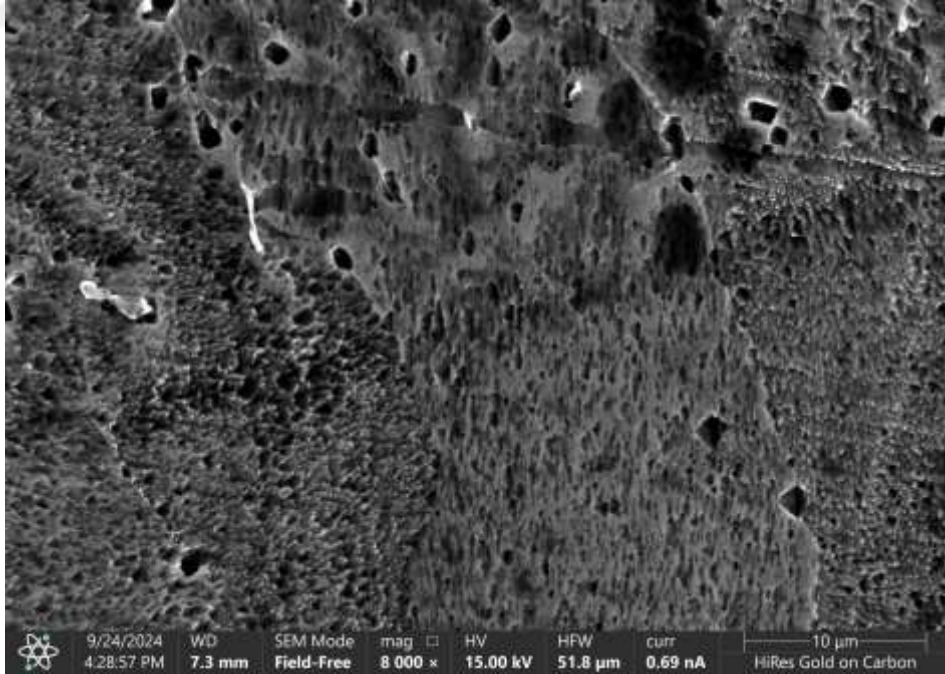
6.2. Mikroyapı

Kaynak edilmiş levhaların esas metal, ITAB ve kaynak dikişi SEM mikro yapıları Şekil 6.4 ile Şekil 6.9 aralığında verilmiştir.



Şekil 6.4: 2 Nolu Parçanın Ana Metal SEM Mikro Yapısı

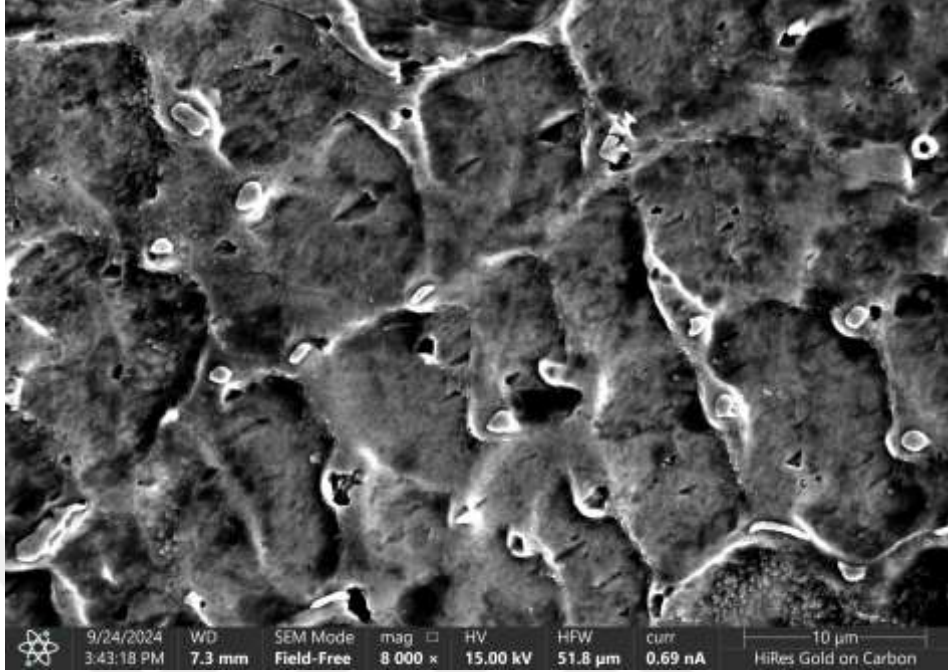
Şekil 6.4'te 2 nolu parçanın eklemeli imalat ile üretilmiş esas metal dokusunu vermektedir. Üretim tekniğine bağlı olarak, katmanlar arasında görülen koyu bölgeler östenit fazını, açık bölgeler ise oluşan kromkarbür fazını ifade etmektedir.



Şekil 6.5: 2 Nolu Parçanın Kaynak Dikişi-ITAB Geçiş Bölgesinin SEM Mikro Yapısı

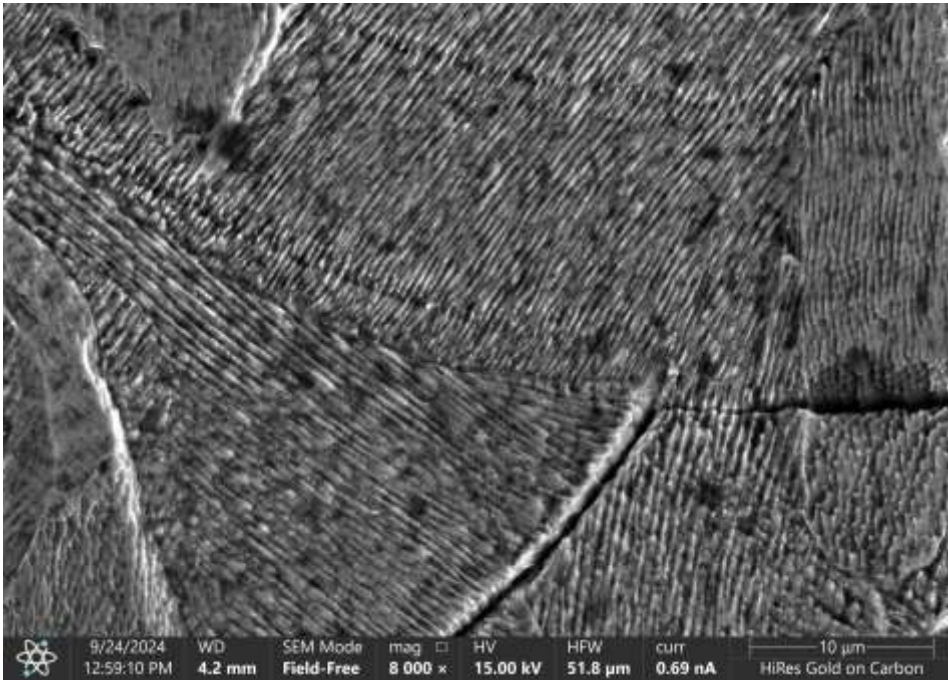
Şekil 6.5'te 2 nolu parçanın kaynak dikişi-ITAB geçişindeki mikro yapıyı vermektedir. Bu geçiş bölgesinde, esas metalde görülen katmanlı mikro yapı ısı

etkiyle bozulmuş ve ortadan kalkmıştır. ITAB’da bu ısıl girdi nedeniyle kısmen tane irileşmesi ve ayrıca karbür çökelmeleri gözlemlenmiştir.



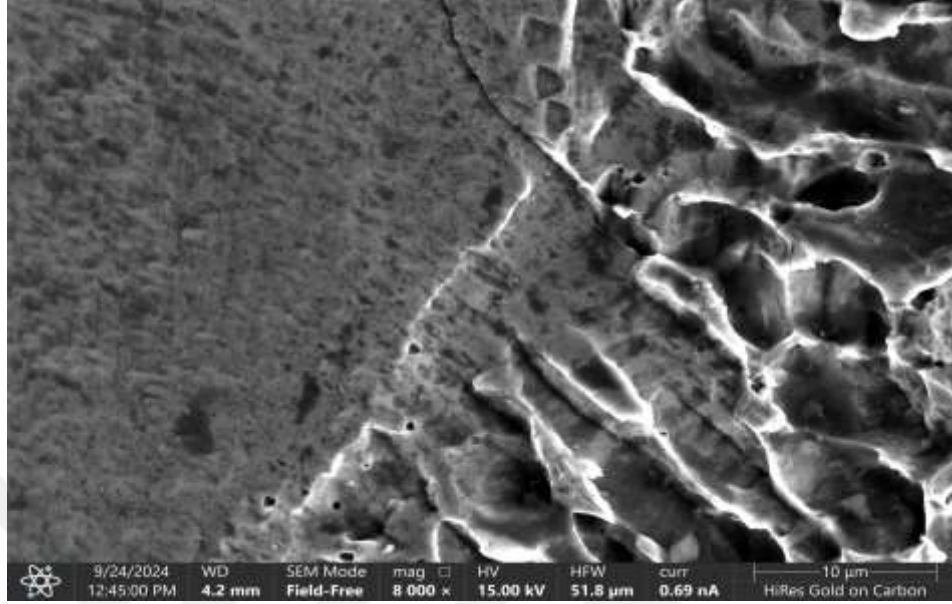
Şekil 6.6: 2 Nolu Parçanın Kaynak Dikiş SEM Mikro Yapısı

Şekil 6.6’da 2 nolu parçanın kaynak dikişini göstermektedir. Şekilde östenit tanelerinden oluşan matris yapı (koyu bölgeler) ve karbür ötektiğinden oluşan tane sınırları görülmektedir. Ayrıca sınır bölgelerde kromkarbürlerin çökelediği görülmektedir.



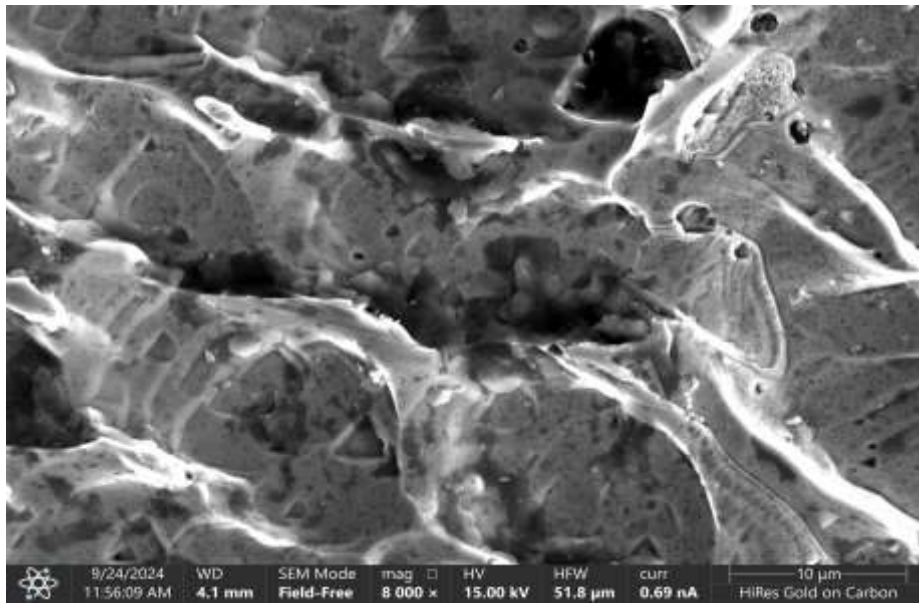
Şekil 6.7: 3 Nolu Parçanın Ana Metal SEM Mikro Yapısı

Şekil 6.7’de 3 nolu parçanın esas metal mikro yapısı verilmiştir. Şekilde eklemeli imalattan gelen tipik bir katmanlı dokuda, östenit taneleri ve kromkarbürlerle örülmüş homojen bir mikro yapı dağılımı görülmektedir.



Şekil 6.8: 3 Nolu Parçanın Kaynak Dikişi-ITAB Geçiş SEM Mikroyapısı

Şekil 6.8’de 3 nolu parçanın kaynak dikişi- ITAB geçişindeki mikroyapı görüntüsü verilmiştir. 3 nolu parçadaki kaynak parametrelerine göre ısıl girdi miktarının 2 nolu parçadakinden daha büyük olması, kaynak banyosunun genişliğini arttırmış ve banyonun katılma sürecini yavaşlatmıştır. Bunun sonucundan şekilxx dede görüldüğü gibi daha geniş bir geçiş bölgesi ve ayrıca ITAB’da eklemeli imalat yapısının daha belirgin bozulduğu tespit edilmiştir.

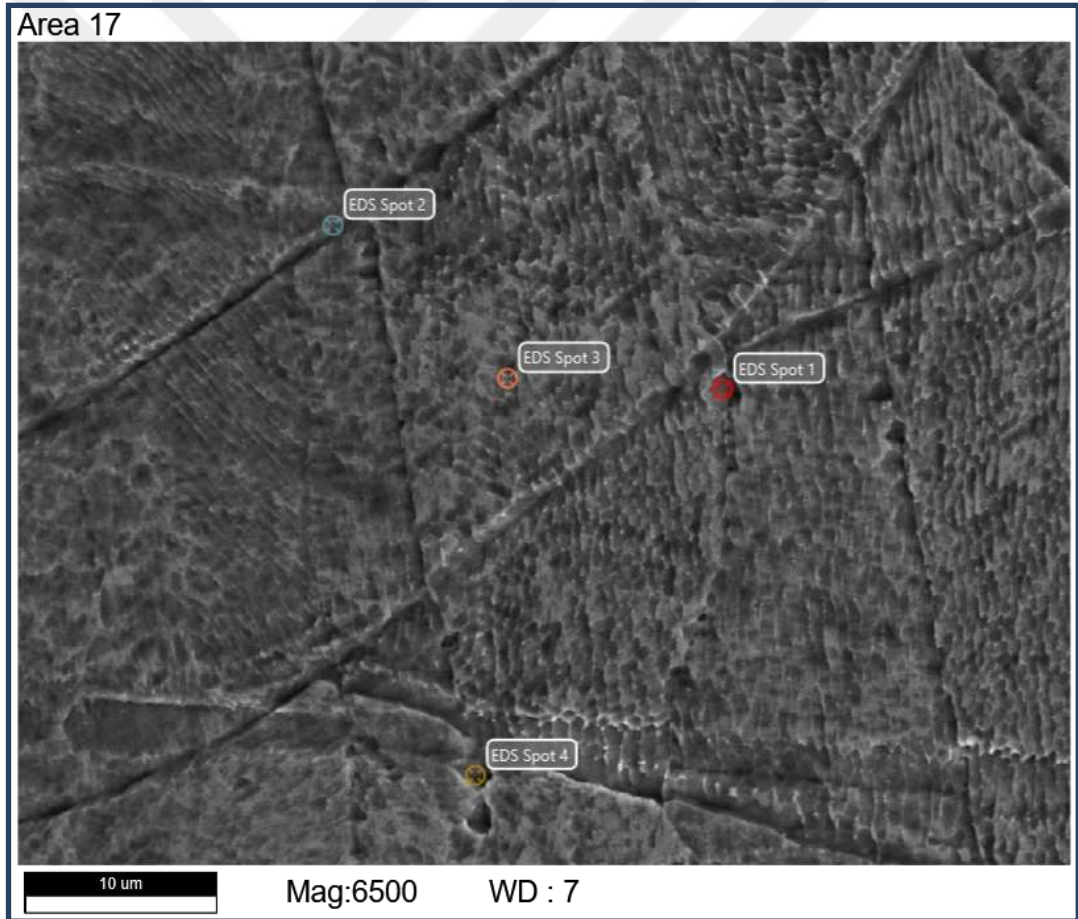


Şekil 6.9: 3 Nolu Parçanın Kaynak Dikişi SEM Mikroyapısı

Şekil 6.9’da 3 nolu parçanın kaynak dikişi mikroyapısı verilmiştir. Seçilmiş olan kaynak parametrelerine bağlı olarak ısı girdi miktarının fazla olması, katılma sürecine direkt etkidiğinden oluşan karbür ağının dağılımı da kendini belirgin bir şekilde göstermiştir. Sınır bölgelerde sürekli karbür ağının çökelmiş olması, 3 nolu parçadaki kaynak dikişinde sertliğin 2 numaralı parçanın kaynak dikişinin sertliğine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

6.3. EDS Analizi

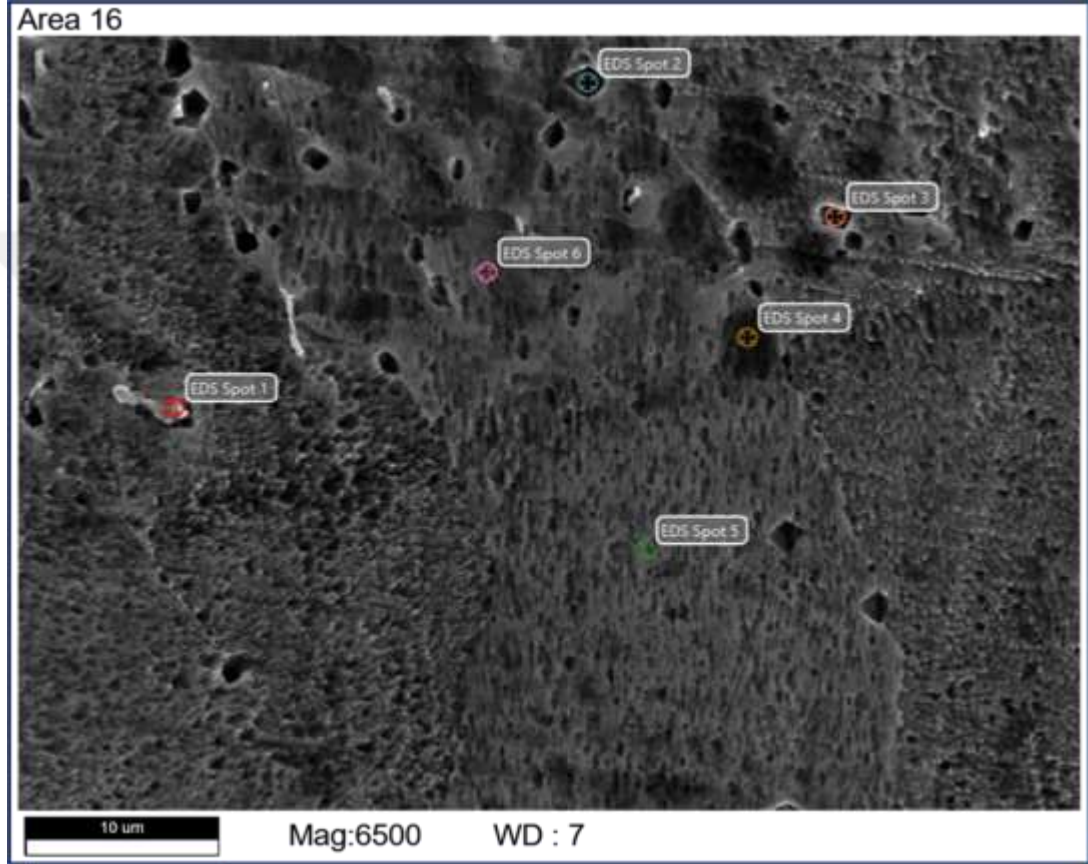
Kaynak edilmiş parçaların kaynak bölgesinde (kaynak dikişi+ITAB) oluşan karbürlerin faz analizleri SEM-EDS yöntemiyle tespit edilmiş olup Şekil 36, Şekil 37, Şekil 38, Şekil 39, Şekil 40 ve Şekil 41’de verilmiştir.



Şekil 6.10: 2 Numaralı Numune Ana Metal Bölgesinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları

Çizelge 6.3: 2 Numaralı Numune Ana Metalde Oluşan Fazların EDS Analizleri

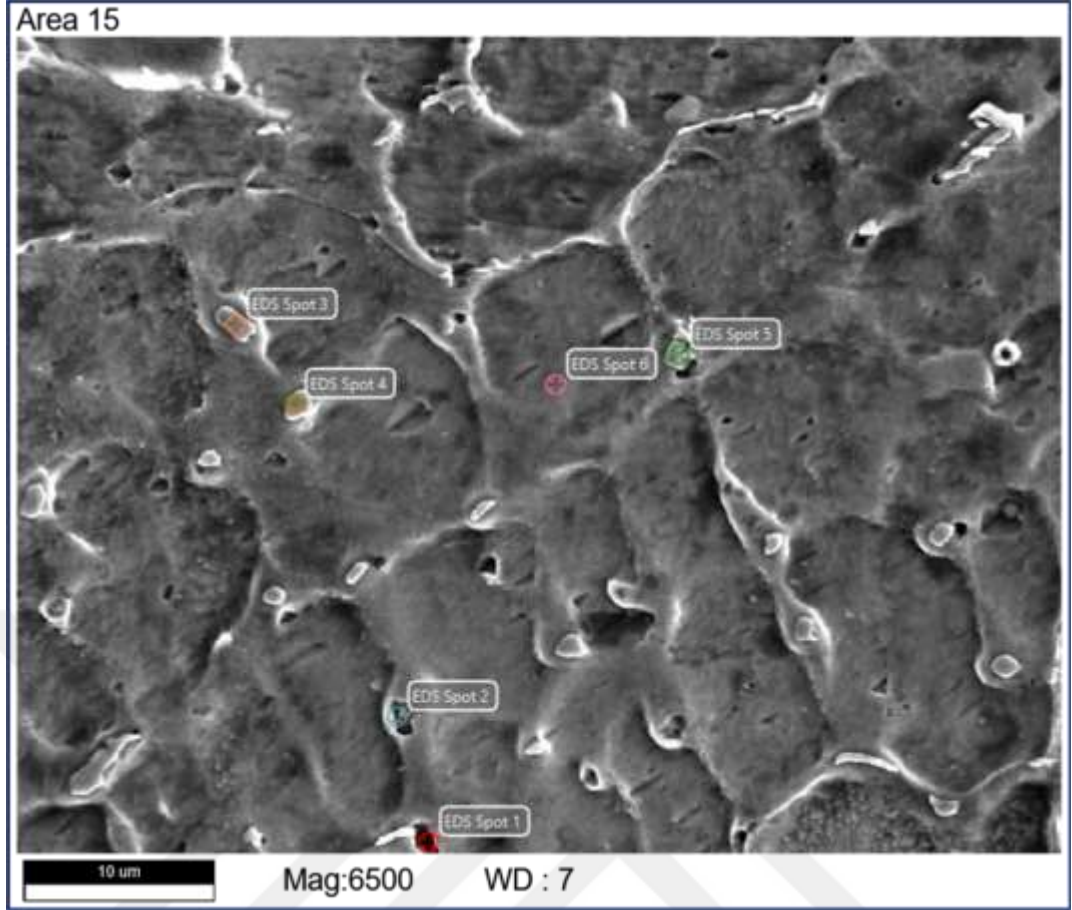
2 Numaralı Numune-Ana Metal				
Analiz Noktası	C	Cr	Ni	Fe
1	3,68	17,95	11,78	66,59
2	4,64	16,95	12,22	66,19
3	4,87	16,7	12,72	65,71
4	14,19	15,04	11,21	59,56



Şekil 6.11: 2 Numaralı Numune ITAB'da Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları

Çizelge 6.4: 2 Numaralı Numune ITAB'da Oluşan Fazların EDS Analizleri

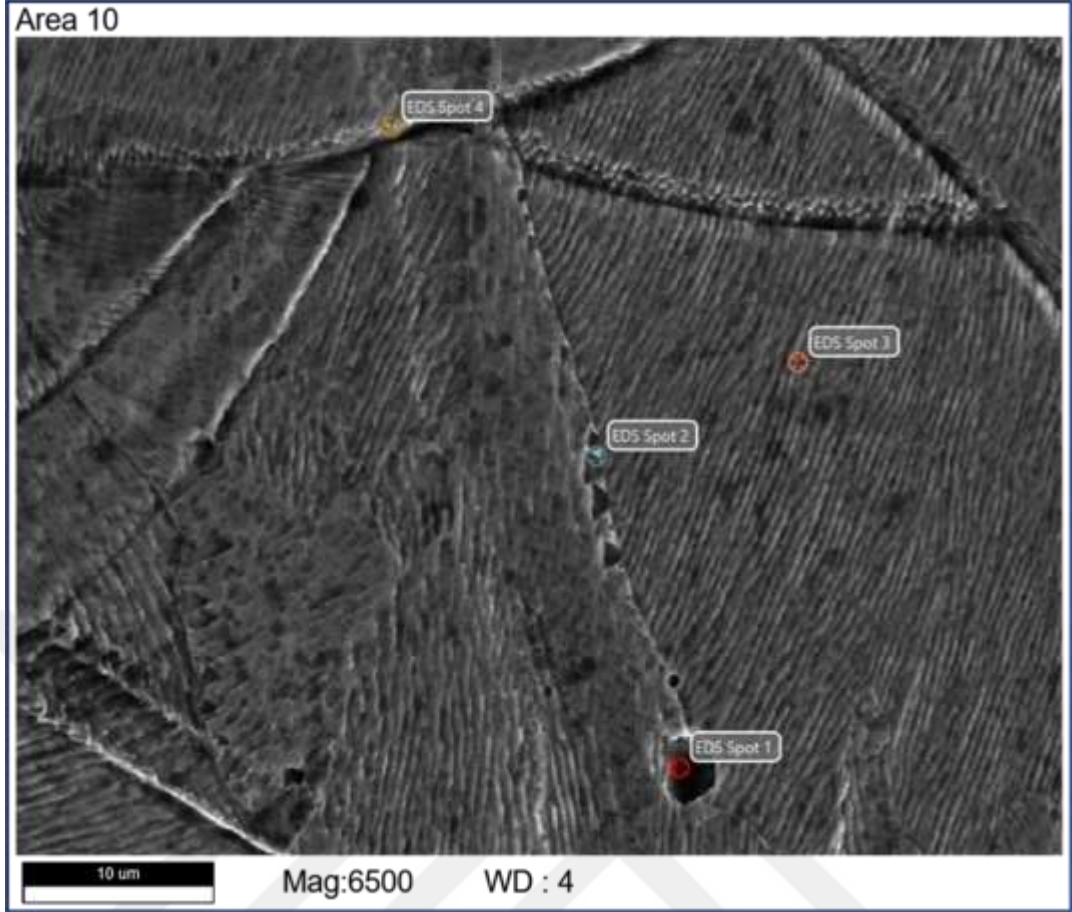
2 Numaralı Numune-ITAB				
Analiz Noktası	C	Cr	Ni	Fe
1	7,44	19,37	9,71	63,48
2	8,33	15,66	12,2	63,81
3	4,87	16,79	12,47	65,87
4	8,88	15,82	12,17	63,13
5	4,06	16,88	12,62	66,44
6	4,65	16,74	12,65	65,96



Şekil 6.12: 2 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları

Çizelge 6.5: 2 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analizleri

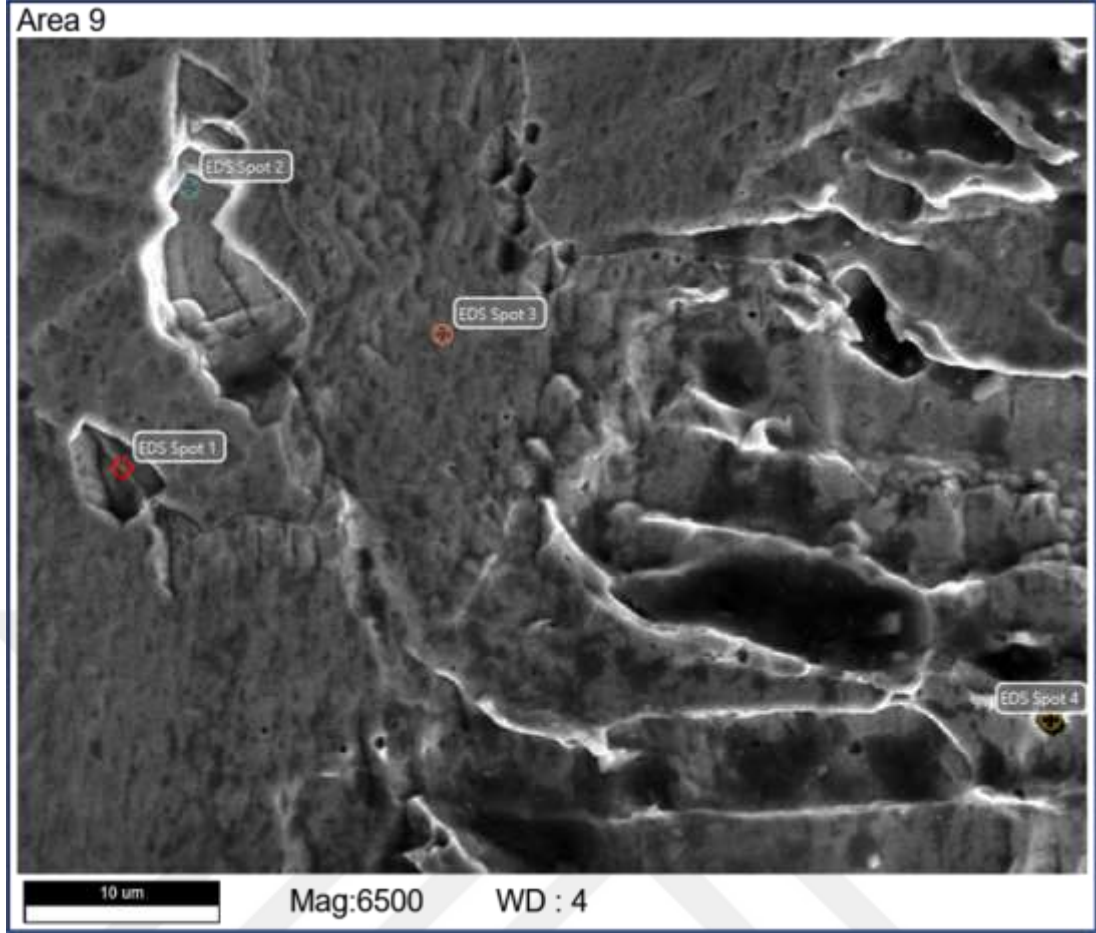
2 Numaralı Numune-K.D.				
Analiz Noktası	C	Cr	Ni	Fe
1	6,63	16,64	12,48	64,25
2	6,16	16,26	12,14	65,44
3	7,13	15,87	12,08	64,92
4	5,98	15,81	12,11	66,1
5	6,03	16,1	12,15	65,72
6	4,83	16,65	11,54	66,98



Şekil 6.13: 3 Numaralı Numune Ana Metal Bölgesinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları

Çizelge 6.6: 3 Numaralı Numune Ana Metalde Oluşan Fazların EDS Analizleri

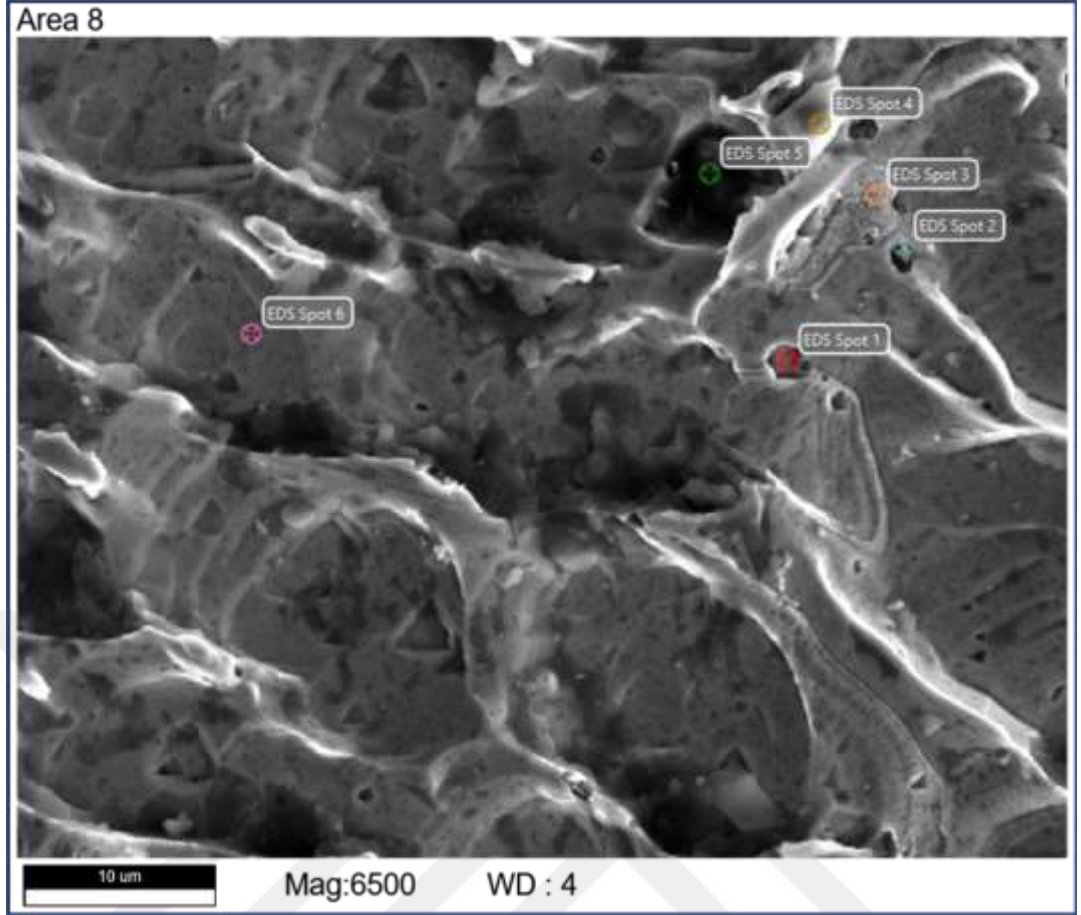
3 Numaralı Numune-Ana Metal				
Analiz Noktası	C	Cr	Ni	Fe
1	22,57	14,53	8,3	54,6
2	1,52	17,58	12,9	68
3	1,89	17,5	13,13	67,48
4	18,21	14,5	10,98	56,31



Şekil 6.14: 3 Numaralı Numune ITAB’da Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları

Çizelge 6.7: 3 Numaralı Numune ITAB’da Oluşan Fazların EDS Analizleri

3 Numaralı Numune-ITAB				
Analiz Noktası	C	Cr	Ni	Fe
1	2,46	17,93	11,79	67,82
2	2,91	24,94	5,71	66,44
3	2,32	17,47	13,15	67,06
4	0,25	20,83	9,41	69,51



Şekil 6.15: 3 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analiz Noktaları

Çizelge 6.8: 3 Numaralı Numune Kaynak Dikişinde Oluşan Fazların EDS Analizleri

3 Numaralı Numune-K.D.				
Analiz Noktası	C	Cr	Ni	Fe
1	2,07	18,87	13,75	65,31
2	13,92	8,24	3,68	74,16
3	9,83	16,11	12,54	61,52
4	13,88	3,18	4,04	78,9
5	42,26	8,04	9,37	40,33
6	3,42	16,45	11,83	68,3

EDS analiz sonuçlarına göre tane sınırlarında karbür çökeltilerinin gerçekleştiği tespit edilmiş olup, esas metal, ITAB ve kaynak dikişinde karbür türünün aynı olduğu ancak dağılımının kaynak parametresine göre farklı olduğu belirlenmiştir.

7. ÖZET VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında DMLS üretim yöntemiyle imal edilmiş 316L kalite östenitik paslanmaz çelik levhaların laser ışını ve ilave tel kullanılarak kaynak edilmiş, esas metalden kaynak dikişine kadar karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Tezin amacında parçaların farklı boyutlarda veya farklı malzeme kombinasyonlarında üretilmesi durumunda, bu ürünlerin kaynak ile birleştirilmesi sonucunda malzeme bütünlüğüne nasıl etki ettiğini ortaya koymak olmuştur.

Eklemeli imalat tekniğiyle üretilmiş ve laser ışınıyla kaynak edilmiş numunelerde mikro yapı görüntüleme, metal ışık mikroskobu ve Scanning Electron Microscope (SEM) ile gerçekleştirilmiş sertlik deneyleri Vicker's (HV) yöntemiyle belirlenmiştir. Kaynaklı parçalarda oluşan fazların analizleri, SEM-EDS yöntemi ile ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; eklemeli imalat ile üretilmiş plakaların servis de kullanımını sağlayacak en uygun laser kaynak parametreleri ortaya çıkartılmıştır.

316L kalite paslanmaz çelik levhalar ilave tel kullanılarak farklı laser ve işlem parametreleri seçimiyle birleştirilmiş ve karakterize edilmiştir.

Direkt Metal Laser Sinterleme (DMLS) tekniği ile üretilen malzemelerin herhangi bir ısıl işlem, talaşlı şekil verme, plastik şekil verme veya kaynak gibi son işlemler uygulanmadan doğrudan servis koşullarında kullanılabilmesi, bu yöntemin en büyük avantajı olarak öne çıkmaktadır. Ancak teknolojinin ilerlemesi ve buna bağlı olarak artan malzeme gereksinimleri, parça geometrisinin, boyutlarının ve farklı malzemelerle birlikte çalışma ihtiyaçlarının önemli ölçüde artması, DMLS tekniğinin sınırlılıklarını ve bu bağlamda en önemli dezavantajlarını ortaya çıkarmaktadır. Özellikle farklı malzeme kombinasyonları ve çeşitli boyutlardaki yapısal taleplerin karşılanmasında bu yöntem, mevcut ihtiyaçlara kısmen cevap verebilmektedir. Bu nedenle, DMLS ile üretilen parçaların kullanım alanlarının genişletilmesi adına, kaynak teknolojisi kullanılarak özelliklerin korunmasını hedefleyen araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, DMLS yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çelik plakaların farklı boyutlarda kullanılabilirliği hipotezi çerçevesinde, lazer ışını tekniği kullanılarak birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında ilave bir dolgu malzemesi kullanılmamış, yalnızca lazer ışını parametreleri, kaynak hızı ve koruyucu gaz gibi değişkenler optimize edilerek deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Çalışma kapsamında, farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen malzemelerin kaynak dikişi, ITAB (Isıdan Etkilenen Bölge) ve ana malzeme bölgeleri detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Bu karakterizasyonun temel amacı, DMLS yöntemiyle üretilmiş parçaların lazer kaynak tekniği ile ne derece değişime uğradığını tespit etmek, mikroyapısal dönüşümlerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini analiz etmektir. İncelemeler ışık mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleme teknikleriyle yapılmış; ayrıca EDS analizleri ve sertlik ölçümleri kullanılarak her bölgedeki mikroyapısal dönüşümler detaylandırılmıştır.

Elde edilen bulgular, uygunsuz kaynak parametrelerinin birleşme kalitesini nasıl etkilediğini göstermektedir:

1. Lazer gücünün artışı, kaynak banyosunda sıçrıntılara neden olmuş ve katılaşma sonrasında kaynak dikişi yüzeyinde kavite oluşumu gözlemlenmiştir.
2. Lazer ışın çapının geniş olması, kaynak dikişi geometrisini büyütmüş ve toplam giren ısı miktarına bağlı olarak karbür çökmesini artırmıştır.
3. Kaynak hızının yavaş olması, giren ısı miktarını artırarak ITAB'da çökelti boyutlarını büyütmüş ve bu bölgede sertlik değerlerinin düşmesine yol açmıştır.
4. Koruyucu Argon gaz debisinin yetersizliği (18 lt/dk altı), kaynak banyosunda yüksek oranda gözenek oluşumuna sebep olmuştur.

Çalışmanın temel amacı doğrultusunda, uygun kaynak parametreleri optimize edilerek, DMLS yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik malzemelerin özelliklerini minimum değişime uğratan birleşmeler sağlanmıştır. Bu bağlamda:

1. Lazer gücünün optimize edilmesiyle, sıçrantısız ve yeterli nüfuziyet derinliğinde birleşme elde edilmiştir.
2. Lazer ışın çapının daraltılması, daha hızlı ve derin birleşme imkânı sağlamış, aynı zamanda giren toplam ısı miktarını azaltarak sıçrantıyı önlemiştir.
3. Kaynak hızının artırılması ve ışın çapının optimize edilmesiyle, ITAB ve kaynak dikişindeki çökeltilerin dağılımı, ana malzeme ile benzerlik göstermiş; böylece mekanik özellikler ana malzemenin özellikleriyle uyumlu hale gelmiştir.
4. Yeterli gaz debisinin kullanılması, lazer plazmasının süpürülmesini sağlayarak etkili bir koruma atmosferi yaratmış ve birleşme kalitesini artırmıştır.

Sonuç olarak, farklı boyutlar, malzeme türleri ve kombinasyonların servis koşullarına uygun şekilde üretilebilmesi için kaynak teknolojisinin kullanımının kritik bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çeliklerin lazer ışını ile başarılı bir şekilde birleştirilebileceği gösterilmiş; bu sayede farklı boyut ve kombinasyonlarda eklemeli imalat ürünlerinin endüstriyel uygulamalar için kullanılabilirliğine katkı sağlanmıştır.

KAYNAKÇA

- Anderl, R., Schmid, H. J., Kage, M., & Karg, M. C. H. (2017).** Additive manufacturing. Acatech-National Academy of Science and Engineering, Germany.
- Ank, S. (1991).** Kaynak tekniği el kitabı. Yöntemler ve Donanımlar, 1, 40-50.
- Ambrosi, A. ve Pumera, M. (2016).** Elektrokimyasal uygulamalar için 3D baskı teknolojileri. Kimya topluluğu incelemeleri, 45(10), 2740-2755.
- Attaran, M. (2017).** The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business horizons, 60(5), 677-688.
- Badiru, A. B. (2017).** Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry. CRC Press.
- Berman, B. (2013).** 3D baskı: yeni sanayi devrimi. IEEE Mühendislik Yönetimi İncelemesi, 41(4), 72-80.
- Bineli, A. R. R., Peres, A. P. G., Jardini, A. L., & Maciel Filho, R. (2011, Nisan).** Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS): Mikroreaktörlerin tasarımı ve inşası için teknoloji. 6° Congress Obrasileiro De Engenharia De Fabrica ÇÃO'da (Cilt 11).
- Can, A., & Aslan, İ. (2018).** Katmanlı üretim ile elde üretilmiş kum döküm kalıpların incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(4), 1269-1282.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., & Duysak, A. (2013).** Hizli prototipleme teknolojileri ve uygulama alanlari. Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, (031), 53-70.
- Çelik, K., & Özkan, A. (2017).** Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 107-121.
- Despeisse, M., & Ford, S. (2015).** The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. In Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2015, Tokyo, Japan, September 7-9, 2015, Proceedings, Part II 0 (pp. 129-136). Springer International Publishing.
- Duman, B., & Kayacan, M. C. (2017).** Doğrudan metal lazer sinterleme/ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini. Teknik Bilimler Dergisi, 7(1), 12-28.

- Engstrom, D. S., Porter, B., Pacios, M., & Bhaskaran, H. (2014).** Eklemeli nano üretim–Bir inceleme. *Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 29(17), 1792-1816.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015).** The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-aided design*, 69, 65-89.
- Gardan, J. (2017).** Eklemeli üretim teknolojileri: son teknoloji ve trendler. *Eklemeli İmalat El Kitabı*, 149-168.
- Gasser, A., Backes, G., Kelbassa, I., Weisheit, A., & Wissenbach, K. (2010).** Laser additive manufacturing: Laser Metal Deposition (LMD) and Selective Laser Melting (SLM) in turbo-engine applications. *Laser Technik Journal*, 7(2), 58-63.
- Gay, P., Blanco, D., Pelayo, F., Noriega, A., & Fernández, P. (2015).** Düz PolyJet tarafından üretilen parçaların mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerin analizi. *Procedia Mühendislik*, 132, 70-77.
- Gebhardt, A., & Hötter, J. S. (2016).** Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2018).** Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment. *Materials*, 11(4), 500.
- Genç, S. (2018).** Sanayi 4.0 Yolunda Türkiye. *Sosyoekonomi*, 26(36), 235-243.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015).** Doğrudan dijital üretim. Eklemeli imalat teknolojileri: 3D baskı, hızlı prototipleme ve doğrudan dijital üretim, 375-397.
- Gibson, I. ve Srinath, A. (2015).** Tıbbi eklemeli üretimin basitleştirilmesi: Cerrahı tasarımcı yapmak. *Procedia Teknolojisi*, 20, 237-242.
- Giffi, C. A., Gangula, B., & Illinda, P. (2014).** 3D opportunity in the automotive industry. *Additive manufacturing hits the road*, 24.
- Gonzales, D. S., & Álvarez, A. G. (2018).** Additive Manufacturing Feasibility Study&Technology Demonstration. Spain, EDA AM State of the Art&Strategic Report.
- Gouge, M., & Michaleris, P. (Eds.). (2017).** Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing. Butterworth-Heinemann.
- Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012).** Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International materials reviews*, 57(3), 133-164.
- Guo, N. ve Leu, MC (2013).** Eklemeli üretim: teknoloji, uygulamalar ve araştırma ihtiyaçları. *Makine mühendisliğinin sınırları*, 8, 215-243.
- Hornick, J. (2017).** 3D printing in Healthcare. *Journal of 3D printing in medicine*, 1(1), 13-17.

- Ivanova, O., Williams, C., & Campbell, T. (2013).** Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid prototyping journal*, 19(5), 353-364.
- Jiang, R., Kler, R. ve Piller, F. T. (2017).** Eklemeli üretimin geleceğini tahmin etmek: 2030 için 3D baskının ekonomik ve toplumsal etkileri üzerine bir Delphi çalışması. *Teknolojik Tahmin ve Sosyal Değişim*, 117, 84-97.
- Kayacan, M. Y., & Yılmaz, N. (2019).** DMLS ile eklemeli imalatta dengesiz sıcaklık dağılımı ve parçaya etkilerinin araştırılması. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(1), 79-94.
- Klahn, C., Leutenecker, B., & Meboldt, M. (2015).** Design strategies for the process of additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 36, 230-235.
- Leal, R., Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., & Marto, C. (2017).** Additive manufacturing tooling for the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1671-1676.
- Louvis, E., Fox, P. ve Sutcliffe, C. J. (2011).** Alüminyum bileşenlerin seçici lazerle eritilmesi. *Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi*, 211(2), 275-284.
- Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Güneş, S., Shidid, D., & Brandt, M. (2017).** Seçici Lazer Eritme (SLM) ile üretilen Ti6Al4V ve AlSi12Mg kafes yapılarının mekanik özellikleri. *Lazer eklemeli imalatta* (s. 119-161). Woodhead Yayıncılık.
- Mellor, S., Hao, L. ve Zhang, D. (2014).** Eklemeli üretim: Uygulama için bir çerçeve. *Uluslararası üretim ekonomisi dergisi*, 149, 194-201.
- Milewski, J. O. (2017).** Eklemeli üretim için metali anlama. *Metallerin Eklemeli İmalatı: Temel Teknolojiden Roket Nozullarına, Tıbbi İmplantlara ve Özel Mücevherlere*, 49-83.
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., ... & Wicker, R. B. (2012).** Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.
- Murr, L. E. (2015).** Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 5, 40-53.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018).** Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- Niaki, M. K. ve Nonino, F. (2018).** Eklemeli imalatın yönetimi. Birmingham: Springer.
- Özsoy, K., & Duman, B. (2017).** Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.

- Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2017).** Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(2), 729-742.
- Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018).** Havacılık komponentlerinin bakım uygulamalarında katmanlı imalat teknolojilerinin kullanımı. Mühendis ve Makina, 59(691), 59-69.
- Prasad, A., & Kandasubramanian, B. (2019).** Fused deposition processing polycaprolactone of composites for biomedical applications. Polymer-Plastics Technology and Materials, 58(13), 1365-1398.
- Ramola, M., Yadav, V. ve Jain, R. (2019).** Sağlık hizmetlerinde eklemeli üretimin benimsenmesi üzerine: bir literatür taraması. Üretim Teknolojileri Yönetimi Dergisi, 30(1), 48-69.
- Rodríguez-Salvador, M. ve Garcia-Garcia, L. A. (2018).** Sağlık hizmetlerinde eklemeli üretim. *Форсаüm*, 12(1 (eng)), 47-55.
- Sarvankar, S. G. ve Yewale, S. N. (2019).** Otomobil endüstrisinde eklemeli üretim. *Int. J. Res. Havacılık. Makine Müh.*, 7(4), 1-10.
- Selcuk, C. (2011).** Laser metal deposition for powder metallurgy parts. Powder Metallurgy, 54(2), 94-99.
- Singamneni, S., Yifan, L. V., Hewitt, A., Tebeşir, R., Thomas, W. ve Jordison, D. (2019).** Uçak endüstrisi için eklemeli üretim: bir inceleme. J. Havacı. Aerosp. İng, 8(1), 351-371.
- Srivatsan, T. S., & Sudarshan, T. S. (Eds.). (2015).** Additive manufacturing: innovations, advances, and applications.
- Tamingir, K. M., & Hafley, R. A. (2006, May).** Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing. In NATO/RTO AVT-139 Specialists' Meeting on Cost Effective Manufacture via Net Shape Processing.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L. ve Charitidis, C. (2018).** Eklemeli üretim: bilimsel ve teknolojik zorluklar, pazar kabulü ve fırsatlar. Bugünkü malzemeler, 21(1), 22-37.
- Udroiu, R. ve Braga, I. C. (2017).** Hızlı takımlama için Polyjet teknolojisi uygulamaları. MATEC Konferanslar Ağı'nda (Cilt 112, s. 03011). EDP Bilimleri.
- Uriondo, A., Esperon-Miguez, M., & Perinpanayagam, S. (2015).** Havacılık ve uzay sektöründe eklemeli üretimin bugünü ve geleceği: Önemli hususların gözden geçirilmesi. Makine Mühendisleri Enstitüsü Bildirileri, Bölüm G: Havacılık ve Uzay Mühendisliği Dergisi, 229(11), 2132-2147.
- Yakout, M., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2018).** A review of metal additive manufacturing technologies. Solid State Phenomena, 278, 1-14.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012).** A review of additive manufacturing. ISRN Mechanical Engineering 2012: 1-10.

- Vaezi, M., Seitz, H., & Yang, S. (2013).** A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1721-1754.
- Yalçın, B., & Ergene, B. (2017).** Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., & Wiener, S. (2017).** Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production.
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015).** Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2(4).

İnternet Kaynakları

- Url_1**<<https://argevetasarim.com/dalga-enerjisi-nedir/tidal-energy-generator-in-the-ocean/>> alındığı tarih: 04.04.2021
- Url_2**<<https://muhendisgelisim.com/tozalti-ve-gazalti-kaynak-yontemlerinin-kullanimi/>>, alındığı tarih: 04.04.2021
- Url_3**<<https://www.enkocaeli.com/haber/3431688/turkiyenin-yeni-denizaltisi-kocaelide-suyla-bulusuyor#>>, alındığı tarih: 04.04.2021
- Url_4**<<https://denizcilikmyo.bandirma.edu.tr/tr/sualti/Sayfa/Goster/Program-Profili-13855>>, alındığı tarih: 08.04.2021
- Url_5**<<https://www.elektromania.net/default.asp?tid=22>> alındığı tarih: 18.04.21
- Url_6**<<https://www.dijitalx.com/2018/08/03/endustriyel-robot-kullanimi-artiyor-japonya-ihracatta-lider/>> alındığı tarih: 18.04.2021
- Url_7**<<https://uwaterloo.ca/robohub/people-profiles/lbr-iiwa-14-r820>>, alındığı tarih: 18.04.2021
- Url_8**<<http://www.izmakpar.com/kaynaklibirlestirme.php>>,alındığı tarih: 8.04.2021
- Url_9**<<http://www.izmitmetal.com/robotik-mig-mag-kaynagi-kursu-basladi/>> alındığı tarih: 23.04.21
- Url_10**<<https://www.metaluzmani.com/arkark-olusumu-isin-turleri/>> alındığı tarih: 25.04.2021
- Url_11**<<http://www.mesanark.com/elektrotlu-ark-kaynagi-hakkinda-teknik-bilgi.asp> et 25.04.2021> alındığı tarih: 25.04.2021
- Url_12**<<https://www.makinaegitimi.com/elektrik-ark-kaynaginın-tarihcesi/>> alındığı tarih: 04.05.21
- Url_13**<<https://muyendis.com/tozalti-kaynagi-nedir/>> alındığı tarih: 04.05.21
- Url_14**<<http://www.muhendisalemi.com/termit-kaynagi-nedir-nasil-yapilir/>> alındığı tarih: 05.05.21
- Url_15**<<https://insapedia.com/lazer-kaynagi-ozellikleri-avantaj-ve-dezavantajlari/>> alındığı tarih: 05.05.2021

Url_16<https://www.caddeas.com/ProductDetails.aspx?Geka_Power_M%C4%B1g_Gps_300_Ac/Dc_M%C4%B1g/Mag_Kaynak_Makinesi&ProductID=12466> alındığı tarih: 05.05.2021

Url_17<<http://www.mesanark.com/mig-mag-kayna-makinalari-hakkinda-teknik-bilgi.asp> > alındığı tarih: 05.05.2021

Url_18<<https://borsenboru.com/dogru-kaynak-yontemi>> alındığı tarih: 06.05.21

Url_19<<https://www.metaluzmani.com/tig-kaynagi-sematik-gosterim-ve-ozet-bilgi/>> alındığı tarih: 08.05.2021

Url_20<<https://www.kaynakekipmanlari.com/urun/geka-elcor-r-71-ozlu-kaynak-teli>> alındığı tarih: 9.05.21

Url_21><https://www.sezercoban.com/malzemelerde-centik-darbe-deneyi-raporu/>> alındığı tarih: 12.05.2021

Url_22> <https://www.vestedmetals.net/ss316/>> alındığı tarih: 01.11.2024



ÖZGEÇMİŞ

Ramazan ASLAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans : 2000-2006, Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği
- Yüksek Lisans : 2023-2025, İstanbul Gedik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisliği
- Eğitim : Uluslararası Kaynak Mühendisliği, GEV, 2017

MESLEKİ TECRÜBE:

Firma Pozisyon

- Gedik Eğitim Vakfı : Uluslararası Kaynak Mühendisliği Eğitim Müdürü
2018-2023
- Gedik Kaynak A.Ş. : Kurumsal Satış Müdürü 2023-Halen