

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



**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN 316L PASLANMAZ
ÇELİĞİN LASER IŞINI YÖNTEMİ İLE KAYNAĞI VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra ENSARİ KARAASLAN

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**



**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN 316L PASLANMAZ
ÇELİĞİN LASER İŞİNİ YÖNTEMİ İLE KAYNAĞI VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Esra ENSARİ KARAASLAN
(221210008)
(0009-0005-0875-6456)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Polat TOPUZ

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

Doç. Dr. Polat TOPUZ

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ozan ÇOBAN

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Prof. Dr. Alptekin KISASÖZ

Üye (İmza)

Yıldız Teknik Üniversitesi



Eşim'e...

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Eklemeli İmalat Yöntemi İle Üretilen 316L Paslanmaz Çeliğin Laser İşını Yöntemi İle Kaynağı ve Karakterizasyonu’ başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım. (04/02/2025)

Esra ENSARİ KARAASLAN

ÖNSÖZ

Bu Yüksek Lisans tez çalışmasında laser sinterleme tekniği ile 316L kalite paslanmaz çelik tozlarından farklı kalınlıklarda plakalar üretilmiştir. Üretilmiş olan bu numuneler laser ışını tekniği kullanılarak kaynak edilmiştir. Tez kapsamında seçilen laser ışını yönteminde, hem laser parametreleri değiştirilerek kaynak kabiliyeti araştırılmış hem de numunelerin ilave telsiz biçimde gerçekleştirilen birleştirmelerde, kaynak özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada bir yandan eklemeli imalat ile elde edilen ürünlerin laser ışını ile kaynak kabiliyeti ortaya konurken, diğer yandan kaynak sonrası malzeme karakteri ve özellikleri belirlenmiştir.

Tez çalışmam süresince bilgilerini ve deneyimlerini benimle paylaşan, tezin tasarımından sonuçların yorumlanmasına kadar bana destek olan Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Polat TOPUZ'a teşekkür ederim. Ayrıca bu tez çalışmasında özellikle deneysel verilerin eldesinde büyük destek sağlayan Eş Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Gökhan ÖZER'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında eklemeli imalat ve kaynak edilmiş numunelerin karakterizasyon çalışmalarında büyük destek sağlayan Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi AluTeam merkezine ve çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Numunelerin laser ışını ile birleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Gedik Kaynak A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden hiçbir şeyi esirgemeyen Anneme ve Babama candan teşekkür ederim.

Şubat 2025

Esra ENSARİ KARAASLAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
2. EKLEMELİ İMALAT TEKNİĞİ İLE METAL ÜRETİMİ.....	3
2.1 Eklemeli İmalat Üretim Süreci ve Parametreleri	5
2.2 Eklemeli İmalat Teknolojisi Alt Disiplinleri	6
2.3 Eklemeli İmalat Teknoloji Bileşenleri	6
2.4 Eklemeli İmalatın Endüstriyel Boyuttaki Önemi.....	7
3. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	10
3.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler	14
3.2 Martenzitik Paslanmaz Çelikler	16
3.3 Ferritik Paslanmaz Çelikler	17
3.4 Dupleks Paslanmaz Çelikler	17
3.5 Çökelti İle Sertleşebilir Paslanmaz Çelikler.....	19
4. LASER IŞIN TEKNİĞİ VE LASER IŞINI İLE KAYNAK	21
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	30
5.1 Kullanılan Malzeme	30
5.2 DMLS Tekniği İle Plakaların Üretimi	31
5.3 Laser Işın Tekniği İle Kaynak	32
5.4 Kaynaklı Parçaların Karakterizasyonu	33
6. DENEYSEL SONUÇLAR	34
6.1 Sertlik.....	34

6.2 Mikroyapı.....	35
6.3 EDS Analizi.....	40
7. SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR.....	54



KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
DLMS	: Direkt Laser Metal Sinterleme
EDS	: Enerji Dağıtıcı Spektroskopi
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
LENS	: Laser Net Şekillendirme (Laser Engineering Net Shaping)
SEM	: Scanning Electron Microscope
3D	: 3 Boyut

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No.
Çizelge 2.1: Metaller İçin Kullanılan Eklemeli İmalat Teknolojileri	4
Çizelge 3.1: Ferritik Martensitik ve Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Alaşım	
Çeliklere Göre Karşılaştırmalı Olarak Özellikleri.....	15
Çizelge 3.2: Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal Analizi (% ağı.)	17
Çizelge 3.3: Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri	18
Çizelge 3.4: Süper Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal Bileşimi (% ağı.).....	18
Çizelge 3.5: Süper Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik-Teknolojik Özellikleri .	18
Çizelge 5.1: DMLS Tekniği İle Üretilmiş Plakaların Kimyasal Bileşimi	30
Çizelge 5.2: DLMS Tekniği ile 316L Paslanmaz Çelik Plakaların Üretim	
Parametreleri	31
Çizelge 5.3: Plakaların Laser Kaynağında Seçilen Kaynak Parametreleri	33
Çizelge 6.1: DLMS Yöntemi ile Üretilmiş 316L Plakanın Esas Metal İçin EDS	
Analiz Sonuçları	41
Çizelge 6.2: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in Kaynak Dikişi EDS Analiz	
Sonuçları	42
Çizelge 6.3: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in ITAB'daki EDS Analiz	
Sonuçları	43
Çizelge 6.4: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin Kaynak Dikişi EDS Analiz	
Sonuçları	44
Çizelge 6.5: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin ITAB EDS Analiz	
Sonuçları	45
Çizelge 6.6: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün Kaynak Dikişi EDS Analiz	
Sonuçları	46
Çizelge 6.7: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün ITAB EDS Analiz	
Sonuçları	47
Çizelge 6.8: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün Kaynak Dikişi EDS Analiz	
Sonuçları	48

Çizelge 6.9: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün ITAB EDS Analiz

Sonuçları49



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1: Talaşlı (a) ve Eklemeli (b) Üretim Teknikleri (Şematik).....	4
Şekil 2.2: Eklemeli İmalat İçin Kılçık Diyagramı	6
Şekil 3.1: Fe-C Faz Diyagramında Alaşım Elementlerinin İlavesi ile S ve E Noktalarının Ötelenmesi	12
Şekil 3.2: Yüksek Alaşımli Çeliklerde, Çeliğin Kafes Yapısına, Alaşım Elementlerinin Etkileri; (a) Ferrit Kararlaştırıcı Alaşım Elementleri, (b) Östenit Kararlaştırıcı Alaşım Elementleri.....	12
Şekil 3.3: Demir-Nikel Sisteminde γ Sahasının Genişlemesini Gösterimi	14
Şekil 4.1: Laser ile İşlemin Karakteristik Özellikleri ve Kullanımda Oluşan Kriterler	22
Şekil 4.2: Laser Işını ile Malzeme Arasındaki Etkileşim Prosesleri.....	23
Şekil 4.3: Normal Açılı ile Oda Sıcaklığında Parlak Yüzeylere Düşen Işının Dalga Boyuna Bağlı Olarak Soğurulma Miktarı.	25
Şekil 4.4: Güç Yoğunluğunun ve Dalga Boyunun Fonksiyonu Olarak Metalsel Malzemelere Etki Eden Enerji.....	25
Şekil 4.5: Laser Işını – Malzeme Etkileşimi.....	26
Şekil 4.6: Parametre Değişimine Göre Birkaç Yöntemin Niteliği ve Durum Değişimi	27
Şekil 4.7: Bir Laser Cihazın Çalışma Prensipleri ve Bileşenleri.....	27
Şekil 5.1: DMLS Tekniği ile Üretilmiş Plakaların Şematik Görüntüsü	30
Şekil 5.2: Üretilmiş Plakaların Kaynak Pozisyonu	31
Şekil 5.3: Eklemeli İmalat Tekniği ile Üretilmiş Plakaların Kaynağında Kullanılan Nd: Yağ Makinesi	32
Şekil 6.1: Kaynak Edilmiş Eklemeli İmalatlı Parçaların Esas Metalden Kaynak Dikişine Kadar Sertlik Değişimi; Seri1 Numune 1, Seri2 Numune 2, Seri3 Numune 3, Seri4 Numune 4	34
Şekil 6.2: Ön Çalışmalardan Elde Edilen Kaynak Dikiş Geometrilere; a: Numune 1, b: Numune 2, c: Numune 3, d: Numune 4.....	36

Şekil 6.3: DLMS Yöntemi İle Üretilmiş Plakaların Laser Işını Kaynağı Sonrasında Elde Edilen Kaynak Dikişlerinin SEM Mikroyapısı; a: Numune 1, b: Numune 2, c: Numune 3, d: Numune 4.....	37
Şekil 6.4: DLMS Yöntemi ile Üretilmiş Plakaların Laser Işın Kaynağı Sonrasında Kaynak Dikiş-ITAB Geçiş SEM Mikroyapıları.....	40
Şekil 6.5: DLMS Yöntemi ile Üretilmiş 316L Plakanın Esas Metal İçin EDS Analiz Noktaları	41
Şekil 6.6: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 4mm, gaz Debisi: 135 Bar.....	42
Şekil 6.7: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in ITAB'daki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 4mm, Gaz Debisi: 135 Bar.....	43
Şekil 6.8: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 130 Bar.....	44
Şekil 6.9: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin ITAB'daki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 130 Bar.....	45
Şekil 6.10: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 2 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 120 Bar.....	46
Şekil 6.11: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün ITAB EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 2 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 120 Bar	47
Şekil 6.12: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 4 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 125 Bar.....	48
Şekil 6.13: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün ITAB EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 4 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 125 Bar	49

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN 316L PASLANMAZ ÇELİĞİN LASER IŞINI YÖNTEMİ İLE KAYNAĞI VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Eklemeli İmalat Tekniği, tasarlanmış olan parçanın bilgisayar desteği ile katmanlı olarak 3 boyutlu şekilde üretilmesidir. ASTM standartlarında bu tekniğe ait üretim yöntemleri 7 farklı kategoriye ayrılmıştır. Her kategorinin kendi içinde kullandığı malzeme türüne (tel, toz, filament, kağıt, lamine, bağlayıcı vb.) göre farklı teknik isimleri bulunmaktadır.

Metaller için eklemeli imalat tekniğinin sınıflandırılmasında; teknoloji grubu olarak toz yatak ergitme, doğrudan enerji aktarımı, malzeme ekstrüzyonu, bağlayıcı püskürtme ve malzeme jet şeklinde farklı teknikler kullanılmaktadır.

Toz yatak ergitmede kullanılan kinetik DLMS (Direct Laser Metal Sintering - Direkt Laser Metal Sinterleme) ve Doğrudan enerji aktarımı ile yapılan üretimde de kullanılan kinetik laser ile ergitme yöntemi LENS (Laser Engineering Net Shaping – Laser Net Şekillendirme) tekniğine dayanmaktadır. LENS yönteminde, şeklinde olup yöntemde laser ergitme prensibi kullanılmaktadır. Bu nedenle DLMS yönteminde proses laser ışınıyla toz yatakta katmanlı üretim tekniğine dayanmaktadır. Bu üretim tekniğinde üretim alanına serilen metal toz laser ışını ile ergitilir ve ardından üzerine yeni bir katman toz serilerek tekrar laser ışını ile ergitme gerçekleştirilir. Bu işlemler parçanın tümü boyutsal olarak tamamlanana dek tekrarlanır.

Anahtar kelimeler: *Laser Sinterleme, Laserle Katmanlı Üretim, Paslanmaz Çelik, Laser Kaynağı*

WELDING AND CHARACTERIZATION OF 316L STAINLESS STEEL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING WITH LASER BEAM METHOD

ABSTRACT

Additive Manufacturing Technique is the production of the designed part in 3D layer by layer with computer support. In ASTM standards, the production methods of this technique are divided into 7 different categories. Each category has different technical names depending on the type of material used (wire, powder, filament, paper, laminate, binder, etc.).

In the classification of additive manufacturing techniques for metals; As a technology group, different techniques such as powder bed melting, direct energy transfer, material extrusion, binder spraying and material jet are used.

The kinetic DLMS (Direck Laser Metal Sintering) method used in powder bed melting and the kinetic laser melting method used in production with direct energy transfer are based on the LENS (Laser Engineering Net Shaping) technique. In the LENS method, laser melting principle is used in the method. Therefore, in the DLMS method, the process is based on the layered manufacturing technique in the powder bed with laser beam. In this production technique, the metal powder laid on the production area is melted with a laser beam, and then a new layer of powder is laid on top and melted again with the laser beam. These processes are repeated until the entire part is dimensionally complete.

In Figure 1, the classification of additive manufacturing technology for metals is given and all the methods used for this technology are seen.

Keywords: *Laser Sintering, Laser Additive Manufacturing, Stainless Steel, Laser Welding*

1. GİRİŞ

Metal eklemeli imalat süreçleri artık sadece 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, parçalar katman katman yapıldığından üretildiğinden düşük üretkenlik oranıdır, bu da üretim maliyetini de artırır. Bu dezavantajları göz önünde bulundurarak ve bu prosesin karlılığını garanti altına almak için, sınırlı hacme sahip karmaşık bileşenlerin katmanlı imalata uyarlanmış bir tasarımla üretimine yönelmesi gerekmektedir. Bu dezavantajları aşmanın bir çözümü, 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 çalışma konusu olan, laser toz yataklı eklemeli imalat tekniği ile üretilmiş olan 316L kalite paslanmaz çelik parçaların kaynak edilebilirliği önem taşımaktadır. Kaynak edilebilirliğin araştırılabilmesi için; Toz Yataklı Laser Birleştirme tekniği ile üretilen parçalara farklı kaynak parametrelerinde laser kaynağı uygulanmış ve malzemenin mekanik davranışları üzerine etkileri incelenmiştir.

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 (Kong vd., 2019).

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, 316L malzemeden üretilen EKLEMELİ İMALAT parçalarının kaynak edilebilirliğini araştırmaktır. Bu amaçla laser toz yatak sinterleme tekniği ile üretilmiş levhaların laser ışını kullanılarak farklı kaynak parametreleri ile birleştirilmesi tasarlanmış ve kaynak sonuçları karakterize edilmiştir. Bu amaca yönelik elde edilen sonuçlara göre sadece eklemeli imalat ile prototip boyutlarda üretilen malzemeler yerine, aynı zamanda daha farklı boyutlarda bu teknikle üretilmiş parçaların kaynaklı birleştirilmeleri ile farklı sektörlerde farklı taleplere cevap sunacağı göz önünde tutulmuştur. Böylece düşük düzeyde kalan prototip üretim süreci daha farklı boyutlarla üretilebilecek ve kullanılabilecek düzeye taşınarak bir yandan maliyet düşürülmesi diğer yandan da verimliliğin artırılması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda laser toz yataklı eklemeli imalat tekniği ile üretilen 316L kalite paslanmaz çeliklerin, laser ışını ile kaynak sonrası elde edilen sonuçlarıyla kaynak edilmeden önceki sonuçları mikroyapısal ve mekanik özellikler bakımından karakterize edilmiştir. Elde edilen karakterizasyon sonuçlarına bağlı olarak eklemeli imalat şeklinde kullanılan ve eklemeli imalat sonrası kaynak edilerek kullanılan parçaların endüstriyel uygulamalardaki potansiyel kullanılabilirlikleri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Eklemeli imalatla sınırlı düzeyde kalan ürün yelpazesinin, kaynak edilebilirlikle daha geniş uygulama örneklerine taşınması tezin amacını oluşturmaktadır.

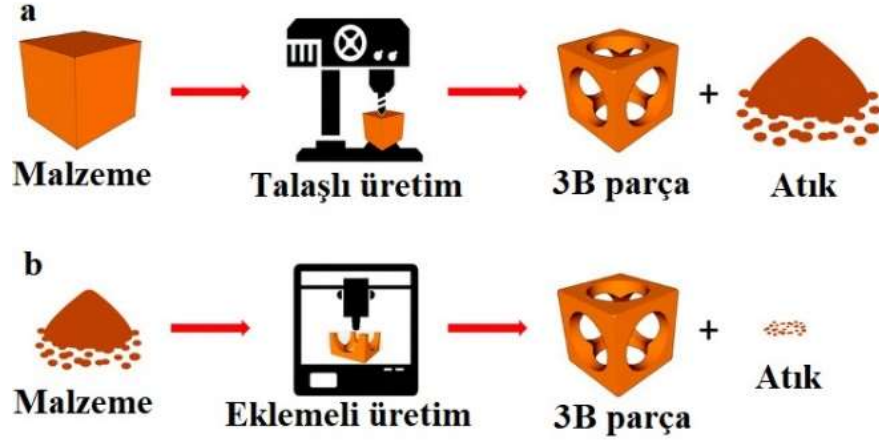
2. EKLEMELİ İMALAT TEKİNİĞİ İLE METAL ÜRETİMİ

Günümüzde eklemeli imalat teknolojisi pek çok sektörde pratik ve yenilikçi yönü ile malzemelerin üretiminde kullanılan geleneksel üretim teknolojilerinin önüne geçmeye başlamıştır.

Geleneksel olarak metal üretiminde endüstriyel parçaların sıvı durumdan farklı kalıplama teknikleri ile katılaştırılması esasına dayanan döküm tekniğı, aynı tür veya farklı türdeki ve boyuttaki metallerin kaynak tekniğı ile birleştirilmesi, nihai ürünün elde edilmesinde kullanılan plastik şekil verme tekniğı ile elde edilen parçalar ve yine son ürün eldesinde kullanılan talaşlı imalat tekniğı kendi içinde her biri teknolojik ve malzeme yönünden sorun içermektedir (Badiru, ve Valencia 2019). Bu sorunların öngörülmesi sorunun devam etmesi halinde gerçekleştirilen AR-GE çalışmaları proste koşullara bağılı olarak ortaya çıkan ürün hataları pek çok mühendislik çalışmasını, yeniden üretim süreçlerini veya iyileştirme işlemlerini zorunlu kılmaktadır. Buna karşı eklemeli imalat tekniğı ile parçaların üretiminde en başında gerçekleştirilen tasarım, veri transferi, makine-yazılım koordinasyonlarının belirlenmesi, ikincil işlemler ve son kullanıcıya transfer noktasına kadar işlemin tümüyle birbirine bağılı ve tüm girdi ve çıktıların önceden belirlenmesi sayesinde, geleneksel yöntemlerde görülen malzeme kusuru en aza indirgenmektedir (Gibson vd., 2015; Sırvatsan ve Sudarsan, 2016).

Gelişen teknolojinin ve buna bağılı olarak sürekli talep edilen yeni ürünlerin verimli ve kaliteli bir şekilde daha düşük maliyetler ile üretilmesi de geleneksel yöntemlere göre eklemeli imalat ile çok daha etkin bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda pek çok metal ve alaşımının çok farklı boyutlarındaki üretiminin eklemeli imalat ile gerçekleştirilmesi her geçen gün daha çok yaygınlaşmaktadır.

Eklemeli imalat ile elde edilmiş nihai ürünler ayrıca gerek görüldüğünde geleneksel ve/veya modern kaynak yöntemleri ile uygun parametreler ile kusursuz bir şekilde birleştirilmekte ve böylece eklemeli imalat ile elde edilen ürünlerin daha geniş yelpazede kullanılması mümkün olmaktadır (Brandt, 2017; Milewski, 2017).



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

Kaynak: (Özer, 2020)

Çizelge 2.1: Metaller İçin Kullanılan Eklemeli İmalat Teknolojileri

Eklemeli İmalat Üretim Teknolojileri	Çalışma Prensibi	Örnek Teknoloji	Yöntemle Üretilen Malzemeler
Yapıştırıcı Püskürtme	Parçacıklar birbirine yapıştırılarak katman katman inşa edilir.	3B mürekkep püskürtme (inkjet) teknolojisi	Metaller Polimerler Seramikler Kompozitler Hibrit Malzemeler
Direkt Enerji Biriktirme	Odaklanmış ısı enerjisi biriktirme esnasında malzemeleri eritir.	Laser Biriktirme Laser Şekillendirme Elektron Işını Plazma Ark Ergitme	Metaller Hibrit Malzemeler
Toz Yataklı Birleştirme	Isı enerjisi, toz yatağında inşa malzemesinin küçük bir bölgesini birleştirir.	Elektron Işını Ergitme Direkt Metal Laser Sinterleme Seçici Laser Sinterleme/Ergitme	Metaller Hibrit Malzemeler Polimerler Seramikler Kompozitler
Plaka Tabakalaştırma	Malzemelerin sac/folyoları yapıştırılmıştır	Tabakalı Malzeme Üretimi Ultrason Birleştirme / Ultrason Eklemeli Üretim	Metaller Polimerler Seramikler Hibrit Malzemeler

Kaynak: (Tofail vd., 2018)

2.1 Eklemeli İmalat Üretim Süreci ve Parametreleri

Tasarım (CAD Veri); Eklemeli imalatın diğer yöntemlere göre en üstün olan özelliği farklı endüstriyel parçaların tasarımında geniş bir yelpazede tasarım yapabilme kabiliyetidir. Bu sayede pek çok sektörde yenilikçi yaklaşımlar pratik tasarım avantajı ile yeni parça üretimine çözüm sunmaktadır (Espalin vd., 2014).

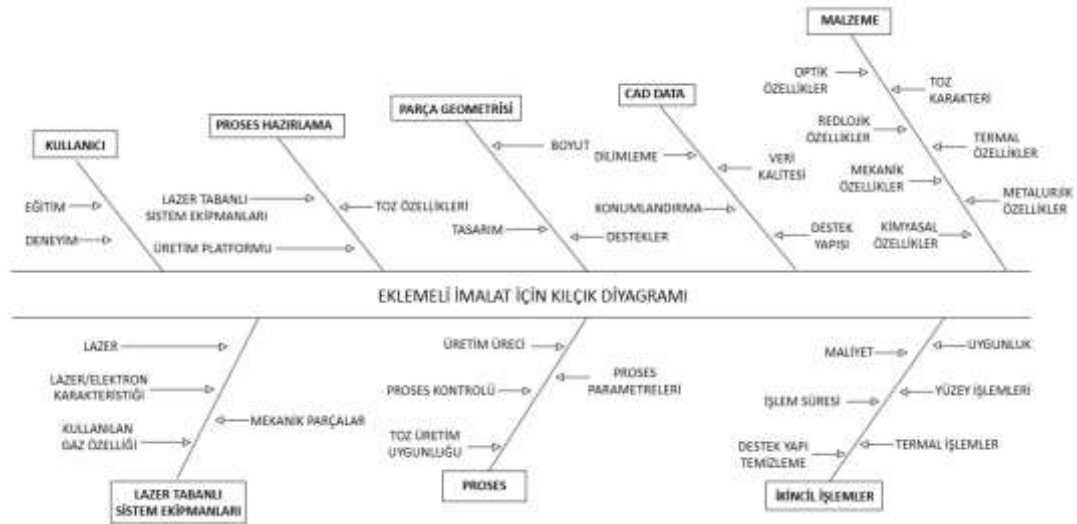
Veri Transferi (CAD/STL/G-Code); Gerçekleştirilen tasarımların kullanılan cihaza uygun şekilde CAD/STL/G-Code gibi uygun uzantısında verisi oluşturulur ve bu veriler işlenerek üretim öncesi parçanın üretilebilirliği, maliyeti, üretim süresi gibi etkenlerin öngörüsü yapılır (Espalin vd., 2014).

Altyapı (Makine, Yazılım, Üretim Parametreleri Lisansları); Eklemeli imalat ile sorunsuz bir üretimin başlanıp sona erdirilmesi için gerekli olan altyapının eksiksiz bir şekilde hazırlanması gerekmektedir (Espalin vd., 2014).

İkincil İşlemler; Eklemeli imalat ile üretilen bazı parçaların serviste kullanılmasına bağlı olarak bazen üretim sonrası ikincil işlemlere gereksinim duyulabilir. Bu ikincil işlemler genellikle talaşlı imalat ve ısıl işlemler olup, böyle bir proses için altyapı çalışmalarının uygunluğu ortaya konmalıdır (Ahn vd., 2011).

Son Kullanıcı; Geleneksel yöntemlere göre eklemeli imalat tekniği ile üretilmiş olan parçaların son kullanıcıya sevki çok daha hızlı ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Canzi vd., 2018).

Yukarda açıklanmış olan imalat üretim süreci ve parametrelerinin sorunsuz, verimli ve istenilen kalitede gerçekleştirilebilmesi için takip edilmesi gereken etkenler Şekil 3.2’de bir kılçık diyagramı ile özetlenmiştir.



Şekil 2.2: Eklemeli İmalat İçin Kılıçk Diyagramı

Kaynak: T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, İstanbul Kalkınma Ajansı (2023)

2.2 Eklemeli İmalat Teknolojisi Alt Disiplinleri

Eklemeli imalat teknolojisinde ürünün tasarımından son kullanıcıya geçen süreçte pek çok aşama proses dahilinde olduğundan, bu teknolojiye doğal olarak pek çok alt disiplin görev almaktadır. Bu disiplinler içerisinde; Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kimya Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Endüstri Mühendisliği, Matematik ve Robotik yazılım uzmanları ve veri bilimini analiz edecek uzmanlar görev almaktadır. Tüm bu uzmanlık alanlarının birbirleri ile bağlantılı bir şekilde çalışması, ürünün nihai bir şekilde kusursuz elde edilmesi için zorunludur (Gu vd., 2012; Uriondo vd., 2015).

2.3 Eklemeli İmalat Teknoloji Bileşenleri

Donanım; Eklemeli imalat sistemlerindeki donanım ekipmanları en büyük paya sahiptir. Mekanik ve yapısal parçaların kolay temini ve uygulanabilirliği bu payı artırmaktadır. Sektörün doygunluğunun en yüksek olduğu teknoloji bileşeninin bu olduğu düşünülmektedir (Zhang, 2019).

Yazılım; Günümüzde yazılımlar ve simülasyon programları gerçeğe çok yaklaşmasına rağmen gelişmeye çok açık bir bileşen olarak görülmektedir. Topolojik çalışmalar ve hesaplamalı yazılım programları eklemeli imalat için ileride önemli bir yere sahip olacağı düşünülmektedir (Rafi vd., 2013).

Malzeme: Eklemeli imalat proseslerinde malzeme tedariki ve çeşitlendirilmesi çok popüler bir alandır. Malzeme bilimi, eklemeli imalat için vazgeçilemez ve potansiyeli çok yüksek bir bileşen olarak görülmektedir.

İkincil İşlemler; Endüstride kullanılan eklemeli imalat ürünleri halen son kullanıcıya hazır halde elde edilememekte ve ikincil işlemlere ihtiyaç duymaktadır. Bu işlem gereksiniminin ortadan kaldırılması pek mümkün görülmediğinde sektörün bu ihtiyacına cevap verebilmek önemli bir iş alanı olarak değerlendirilmektedir (Rafi vd., 2013).

Araştırma Kalite Kontrol; Her teknoloji öncelikle akademik düzeyde geliştirilmektedir. Bu durum eklemeli imalat için de geçerlidir. Bilgiyi üretmek veya taklit etmek teknoloji besleyen alt bileşenler olarak değerlendirilmektedir.

2.4 Eklemeli İmalatın Endüstriyel Boyuttaki Önemi

Eklemeli imalat ile ürünün eldesi, tasarımın doğrudan imal edilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca kompleks yapılarda kolay bir şekilde tasarım yapıp bu tasarımın parça şeklinde imal edilebilmesi, geleneksel yöntemle üretimi mümkün olmayan endüstriyel ürünler elde edilebilmektedir. Hafifliğin ön planda olduğu uygulamalarda içi boş parçaların kolaylıkla üretilmesi de eklemeli imalatın endüstriyel boyuttaki önemini artırmaktadır. Geleneksel yöntemlerle ürün eldesinde ortaya çıkan malzeme kayıpları ve atıklar, eklemeli imalat üretim tekniği ile azaltılmaktadır. Bu üstün yönleri sayesinde eklemeli imalat teknolojisinde AR-GE süreçleri kısaltılarak son kullanıcıya kadar ürünün pazara giriş hızı artırılmaktadır. Elde edilen ürünlerin çok düşük toleranslarla elde edilmesi boyutsal hassasiyeti iyileştirmektedir. Herhangi bir sektörde gelen talepler çok kısa süre içerisinde ürüne dönüştürülebilmekte ve tedarik zinciri geleneksel yöntemlere göre kısalmaktadır (Jiang, 2017).

Eklemeli imalat talaşlı imalat yöntemleriyle kıyaslandığında, atık malzeme miktarını minimum seviyeye indirerek malzeme verimliliğini artırmaktadır.

Eklemeli imalat, geleneksel üretim tekniklerinde kullanılan aparat, kesici takım, kalıp gibi yardımcı aletlere ihtiyaç duyulmadığı için ek ekipman gereksinimi büyük ölçüde azalmaktadır.

Bu teknolojide kullanılan cihazlar ilave herhangi bir üretim sürecine gerek kalmadan, ürünü tek seferde üretebilmektedir. Üç boyutlu yazıcılar ile tasarımdan son ürün arasındaki kademeler çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmekte ve bu sayede iş gücü ve üretim süresi azalmaktadır. Bu durum toplam verimliliği büyük oranda artırmaktadır (Berman, 2012).

Geometrik kısıtlamalar, karmaşık konstrüksiyonların kolayca üretilmesi nedeni ile ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle geleneksel teknikler ile üretilmesi mümkün olmayan pek çok ürün eklemeli imalat ile üretilmektedir (Berman, 2012).

Geleneksel yöntemlerle çok parçalı üretilmesi gereken ürünler elde edilebilirken, aynı zamanda farklı parçaların yine modern kaynak yöntemiyle birleştirilmesini eklemeli imalat ile elde edilen ürünler mümkün kılmaktadır. Eğer çok parçalı ürünler tek seferde eklemeli imalat ile üretilirse aynı zamanda kaynak ve kullanılan bağlantı ekipmanlarından da tasarruf edilerek hem zamandan, hem de iş gücünden hem de toplam ağırlıktan tasarruf edilmektedir. Özellikle böylesi kazanımlar savunma sanayi, havacılık ve otomotiv sektörleri için büyük önem arz etmektedir.

Eklemeli imalat ile üretilen parçaların büyük bir oranı savunma sanayi, havacılık, otomotiv ve sağlık sektörü olarak görülmektedir. Kullanılan malzeme türlerinin çeşitliliği ve teknolojinin getirdiği karmaşık parça üretimine yönelik taleplerin artışı, eklemeli imalat ile üretimin önemini her geçen gün daha da arttırmaktadır (Khaln, 2015).

Eklemeli üretim sanayi şu anda bir dönüm noktasındadır. Giderek daha fazla sayıda endüstriyel birimler bu teknolojiyi kullanmaya başlamıştır. 2020 yılına gelindiğinde büyük Amerikan şirketlerinin yaklaşık %42'sinin eklemeli üretim teknolojisi kullanacağı öngörülmektedir. Eklemeli üretim için malzeme ve teknoloji yelpazesi genişlemeye devam ettikçe bunu daha fazla şirketin takip etmesi beklenmektedir. Eklemeli üretim gelecekte hayatımızda daha çok rol oynaması öngörülmektedir. Bu teknolojinin gelişimi ile birlikte malzeme ve makine fiyatlarındaki azalmalar 3B yazıcıları evimizin bir parçası haline getirebilir. Eklemeli üretimin gelecekte en büyük katkısı yedek parçalar için yapacağı öngörülmektedir (Gao, 2015). Çok kritik parçalar geleneksel üretim yöntemleriyle üretilirken daha az

kompleks parçalar firmalarda yerel olarak eklemeli üretim yöntemleriyle üretilir. Şu anda geleneksel yöntemlere üretilen yedek parçaların depolanma sorunu ve yavaş tedariği firmalar için büyük problem oluşturmaktadır.

Bununla birlikte eklemeli üretim teknolojisinin yaygınlaşması için üç ana alanda çaba gösterilmelidir, bunlar; maliyetlerin azaltılması, aynı parçanın geleneksel yöntemle üretimi üzerindeki eklemeli üretim teknolojisine karşılaştırmalı faydaları ve bu faydaların meydana gelme oranıdır. Eklemeli üretimin kendisini geleneksel üretimden farklılaştırdığını iddia ettiği avantajların daha pratik bir alternatif haline gelmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Fakat bu gelişmelere yönelik yeni araştırmalar, akademik ve endüstriyel ortamlar arasındaki (özellikle araştırma laboratuvarlarının ve ticari üreticilerinin arasında) geleneksel boşluklar nedeniyle yavaştır. Dolayısıyla eklemeli üretim konusunda üniversite-sanayi iş birliğinin son derece önemli olduğu bir gerçektir (Uriondo vd., 2015; Engstorm vd., 2014).

3. PASLANMAZ ÇELİKLER

Düşük alaşımlı çelikler, prensip olarak alaşımsız çeliklerin özellikleri ile benzer özellikler taşımaktadırlar. Alaşımsız çeliklere göre farkı ise, katılan alaşım elementinin türü ve miktarına bağlı olarak, çelikte istenen özellikler artırılır veya istenmeyen özellikler azaltılır. Alaşım elementlerinin ilavesi ile çelikte sağlanan en önemli üstünlük ise, alaşımsız çeliğe göre daha düşük soğutma hızlarında, çok daha iyi sertleşebilir olmasıdır. Ayrıca, sertleşme sonrası uygulanan menevişleme sonucunda elde edilen ıslah edilebilirlik de de alaşımsız çeliğe göre daha yüksektir. Bu üstün özelliklerin sonucunda, malzemede kesit boyunca sertleşebilirlik artmakta, daha düşük soğutma hızlarında sertleştirme yapıldığından, parçanın çarpılma riski azalmakta, buna bağlı olarak iç gerilimlerin azalması ile sertleşme çatlağına karşı eğilim düşmekte ve ayrıca yüksek çekme dayanımının yanında, yüksek tokluk özellikleri sağlanmakta, artan sertlik ve çekme dayanımına göre elastiklik modülü yükselmekte ve buna bağlı olarak da malzemenin yorulma dayanımı ve sıcağa dayanımı artmaktadır (Metals Handbook, Metallography, 1973).

Yüksek alaşımlı çeliklerde ise kimyasal korozyona karşı dayanım, yüksek sıcaklıklarda yanmaya karşı dayanım, mıknatıslanmama (manyetik özelliğinin giderilmesi), özel elektrik veya düşük sıcaklıklarda manyetik özellikleri gibi daha özel üstünlükler elde edilmektedir.

Alaşımlı çeliklerde de, demir-karbon alaşım sisteminde ortaya çıkan, ferrit, östenit, karbür, perlit, beynit, martenzit ve ledeburit fazları oluşmaktadır. Alaşımlı çeliklerdeki farklılık, alaşım elementlerinin sadece küçük bir kısmı, karışık kristaller ve Fe_3C demir karbürü içinde katı ergiyik olarak çözünmesidir. Bunun yanında belirli bazı alaşım elementleri yapıdaki karbon ile özel karbürler oluşturmaktadır (De Ferri Metallographie II, 1966).

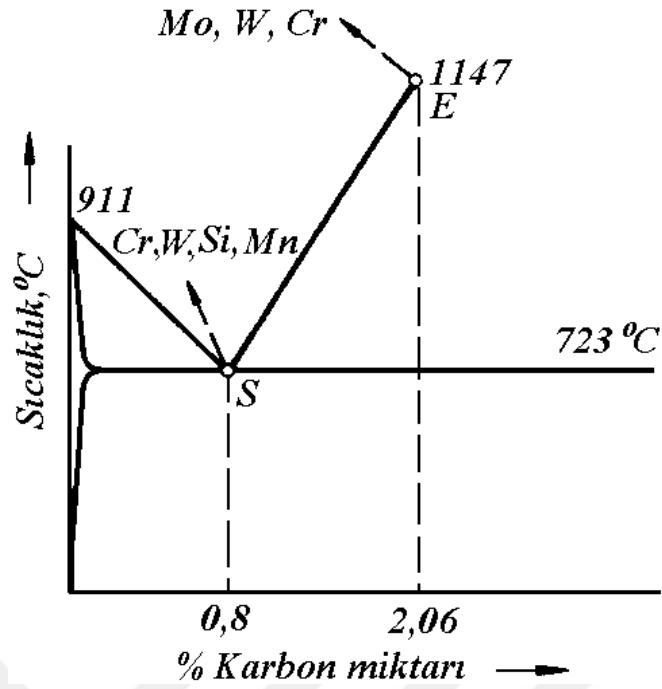
Alaşım elementlerinin, Fe-C alaşım sistemindeki bir başka etkisi ise karbonun demir içinde çözünebilirliğinin değişmesi ve yarı kararlı olan denge çizgileri ile noktalarının ötelenmesidir (Şekil 3.1).

Bütün alaşım elementleri belli bir oranda hem α - ve γ -demirinde ve hem de δ -demirinde çözünmektedirler. Buna bağlı olarak alaşım elementleri, arı demirin α/γ ve γ/δ dönüşüm sıcaklıklarına etki etmektedirler. Bu etkinin şekli, iki alaşım grubuna bağlı olarak değişmektedir. Bu alaşım gruplarından biri Cr- grubu alaşım elementleri ve diğeri de Ni-grubu alaşım elementleridir (Karaaslan, 2018).

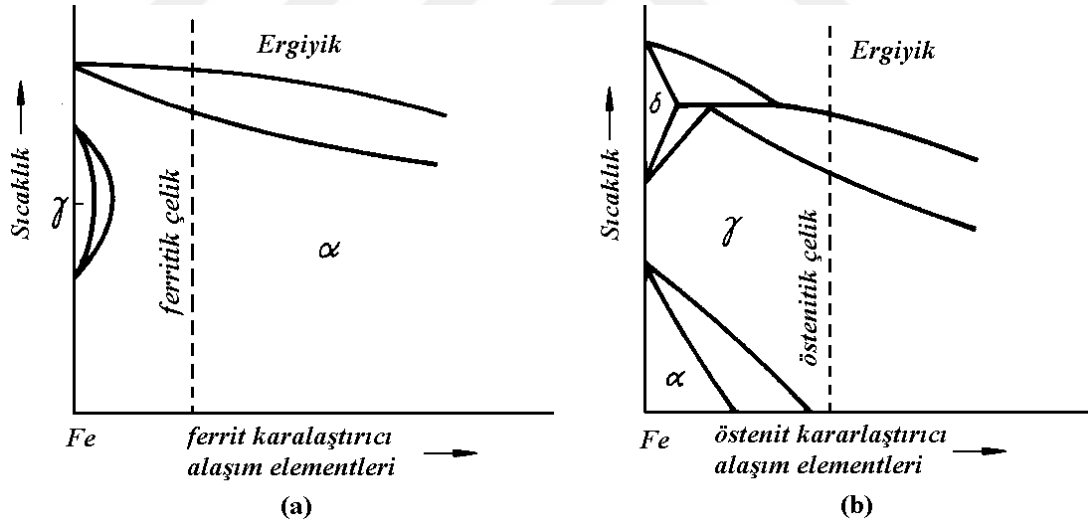
Krom, wolfram, molibden, titan, alüminyum, vanadyum ve silisyum gibi alaşım elementleri, demirin α/γ dönüşüm noktasını daha yüksek sıcaklıklara ve γ/δ dönüşüm noktasını ise daha düşük sıcaklıklara ötelemektedirler. Böylesi bir ötelenme sonucunda östenitin alanı daralırken, ferrit sahası genişlemektedir. Her bir alaşım elementinin karakteristik derişim sınırına bağlı olarak A3 ve A4 noktaları birbirlerine yaklaşmakta ve α -fazı, δ -fazına doğru ötelenmektedir. Bu durumda östenit sahası giderek daraldığı için, yüksek derişimli alaşımlar, düşük sıcaklıklardan ergime sıcaklığına kadar sadece ferrit dokusunda olmaktadır (şekil 4.2). Çelikteki bu alaşım grubu, ferritik çelikler olarak adlandırılırlar.

Alaşım elementinin derişim sınırı, çelikteki karbon içeriğine bağlıdır. Örneğin demir-krom ikili sisteminde %15 Cr içeriğinden itibaren yapı ferritiktir. Yaklaşık %0,25-0,40 aralığında karbon içeriği, ferritik yapı için gerekli olan %15 Cr miktarını, %24-29 Cr derişimi sınırı aralığına taşır. Böylece %0,25 C içeren bir Fe-Cr sisteminde, ancak %24 Cr içeriğinden itibaren yapı ferritik olur. Başka bir anlatımla; Cr için yeni derişim sınırı %24'tür.

Ferritik çeliklerde doku tamamen ferritik olduğundan, α/γ dönüşümü gerçekteşmez. Buna bağlı olarak çelikte sertleştirme, normalleştirme veya menevişleme gibi ısııl işlemler yapılamaz. Bu tür çeliklerde örnek olarak verilen ısııl işlemler yapılmadığından, bazı özelliklerin değiştirilmesi de ancak farklı yöntemler ile gerçekteştirilebilir. Örneğin normalleştirme ile sağlanan daha ince taneli yapı, normalleştirme tavı yapılamayan ferritik çeliklerde, soğuk şekillendirme ve arkasından yeniden kristalleşme tavı uygulanarak elde edilebilir. Böylesi bir işlem uygulanmayan ferritik çelikler ise genellikle kaba taneli bir yapıda olurlar (Karaaslan, 2018).



Şekil 3.1: Fe-C Faz Diyagramında Alaşım Elementlerinin İlavesi ile S ve E Noktalarının Ötelenmesi



Şekil 3.2: Yüksek Alaşımlı Çeliklerde, Çeliğin Kafes Yapısına, Alaşım Elementlerinin Etkileri; (a) Ferrit Kararlaştırıcı Alaşım Elementleri, (b) Östenit Kararlaştırıcı Alaşım Elementleri

Nikel ve mangan gibi alaşım elementleri, karbon ve azot gibi demirin α/γ dönüşüm sıcaklığını daha düşük sıcaklıklara ve γ/δ dönüşüm noktasını ise daha yüksek sıcaklıklara taşırlar (Şekil 3.2b). Böylece östenit sahası genişleyerek, α - ve δ -demirinin sahaları daralır. Her bir alaşım elementinin karakteristik derişim sınırına

bağlı olarak, A3 noktası oda sıcaklığına kadar düşer ve çelik, oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar östenitik fazda olur.

Nikel grubu alaşım elementlerinin ilavesi ile elde edilen östenitik çeliklerde de ferritik çeliklerdeki gibi, α/γ dönüşümü gerçekleşmemektedir. Bu nedenle bu çelikler için de normalleştirme, sertleştirme ve menevişleme gibi ısı işlemleri yapılamamaktadır. Ferritik çeliklerdeki gibi, tane küçültme işlemi sadece plastik şekillendirme ve arkasından yeniden kristalleşme tavinin uygulanması ile mümkündür. Östenitik çeliklerin yeniden kristalleşme tavinin, ferritik çeliklerinkinden daha yüksek olması nedeni ile bu çeliklerde, yeniden kristalleşme tavi sırasında tane büyümesi riski daha düşüktür (Maiman, 1960).

Çelik hem 1. grup alaşım elementleri ve hem de 2. grup alaşım elementleri ile alaşımlandırılırsa, kendi grubunun özellikleri yerine, diğer grubun etkisini artırabilmektedir. Örneğin; %0,1 C ve %8 Ni içeren bir çelik ferritik-perlitiktir. %0,5 C, %18 Cr ve %9 Ni içeren bir çeliğin dokusu ise östenittir.

Bu çelikte %18 Cr olmasına rağmen ve Cr ferritik sahayı genişleten 1. grup alaşım elementi olmasına karşın, burada nikelin östenit kararlaştırıcı özelliğini artırıp, çeliğin dokusunun östenit olmasına yol açmaktadır.

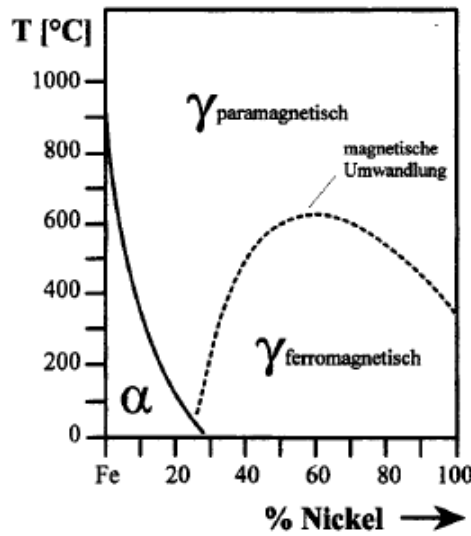
Paslanmaz çelikler yapılarına göre temel olarak 5 sınıfa ayrılır; östenitik paslanmaz, ferritik paslanmaz, martensitik paslanmaz, dubleks paslanmaz ve çökeltmeyle sertleşebilen paslanmaz çeliklerdir. Bu beş farklı paslanmaz çelik, içerdiği elementler ve oluşturduğu fazlara göre farklı özellikler göstermektedir. Örneğin; östenitik paslanmaz çelik manyetik değilken ferritik paslanmaz çelik mıknatıslanabilir. Dubleks paslanmaz çelikte farklı iki fazın üstün özellikleri birlikte çeliğe etki eder. Östenitik, ferritik ve dubleks paslanmaz çelikte dönüşüm sertleşmesi görülmezken, martensitik paslanmaz çelik dönüşüm sertleşmesi ile elde edilir. Çökeltme ile sertleştirilen paslanmaz çeliklerde ise ana faz içinde sert çökelti fazları oluşturularak çeliğin dayanım değerleri yükseltilir.

Paslanmaz çelikler yüksek alaşımlı çelikler olarak yüksek veya çok düşük servis sıcaklıklarında, aynı zamanda korozyona dayanım gerektiren kullanım yerlerinde özelliklerini yitirmeden kullanılabilir. Alaşım elementlerinin artışıyla çeliğin ısıya dayanımı, düşük sıcaklıklarda kullanma özelliği, kimyasal ortamlardaki dayanım gibi özellikler artmaktadır. Buna bağlı olarak bu çeliklerin

içerdiği alaşım elementlerinin türü ve miktarına bağlı olarak kaynağa yatkınlığı, sertleşme özellikleri ve şekil alma özellikleri yüksek derecede etkilenmektedir (Karaaslan, 2018).

3.1 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Mangan, nikel, kobalt, bakır ve azot gibi alaşım elementleri demirin α/γ - dönüşüm noktasını daha düşük değerlere ve γ/d - dönüşüm noktasını yüksek sıcaklıklara taşır.



Şekil 3.3: Demir-Nikel Sisteminde γ Sahasının Genişlemesini Gösterimi

Kaynak: Bargel vd., 1988).

Bu durum örnek olarak %30 nikel veya %14 mangan içeren bir derişim ele alındığında A3 noktası oda sıcaklığına kadar düşer. Böylece çelik oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar sürekli östenit faz olarak kalır. Bu nedenle böylesi östenitik fazda olan çelikler α/γ dönüşümüne sahip olmadığı için normalizasyon veya dönüşüm ile sertleştirme işlemine tabi tutulamaz. Bu çeliklerin sertleştirilmesi sadece plastik şekil vermek ve sonrasında yeniden kristalleştirme ile tane küçültme işlemi sayesinde gerçekleştirilir. Yeniden kristalleştirme işleminde östenitik paslanmaz çeliklerin tane büyümesi riski ferritik paslanmaz çeliklerden çok daha düşüktür; çünkü östenitik paslanmaz çeliklerin yeniden kristalleşme sıcaklığı ferritik paslanmaz çeliklerden çok daha yüksektir. Bu çeliklerde şekillenme miktarının artışıyla düşük olan akma dayanımı değeri önemli derecede artmaktadır (Maurer, 1933).

Çizelge 3.1: Ferritik Martensitik ve Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Alaşimsız Çeliklere Göre Karşılaştırmalı Olarak Özellikleri

Karakteristik Özellikler	Alaşimsız Çelik	Ferritik Paslanmaz Çelik	Martensitik Paslanmaz Çelik	Östenitik Paslanmaz Çelik
Isı İletkenliği (J/cmsK)	0,50	0,25	0,25	≥0,15
Elektrik İletkenliği (m/Ω mm ²)	9,3	2,1	1,7	1,3
Termal Genleşme (K ⁻¹)	12x10 ⁻⁶	11x10 ⁻⁶	11x10 ⁻⁶	16x10 ⁻⁶
Akma Dayanımı (N/mm ²)	≥ 235	≥270	≥500	≥200
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	≥360	≥450	≥700	≥500
Uzama (%)	≥25	≥20	≥16	≥50
Darbe Tokluğu (20 ⁰ C) (J)	≥50	-	≥30	≥100

Kaynak: (Anik ve Dorn, 1995)

Krom ferrit yapıcı ve nikel östenit yapıcı element olmasına rağmen, östenitik paslanmaz çeliklerde olduğu gibi ikisi birden belli bir oranda örneğin %18-19 krom ve %8-12 nikel içeriği ile çelikte bulunduğu krom nikelin etkisini artırmakta ve yapı tümüyle östenitik yapıya dönüşmektedir.

Kaynaklı bağlantılarda kaynak dikişinin %100 östenit ile çekirdeklenerek östenit kristalleri şeklinde katılaşmasında sıcak çatlama riski bulunduğu için, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında delta ferriti ile katılaşma başlangıcının etkileyecek krom nikel oranına sahip olan çelik seçimi veya delta ferriti oluşturacak, ferrit kararlaştırıcı titanyum ilavesi ile kaynak yapmak gerekir. Böyle bir kaynak dikiş dokusunda yaklaşık %10-15 delta ferriti olup doku tamamen östenitik yapı ve özelliğindedir.

En yaygın kullanılan paslanmaz çelik sınıfı östenitik paslanmaz çeliktir. Çelik içerdiği elementlerin türü ve oranına göre katılaşma sıcaklığından oda sıcaklığına kadar tüm sıcaklıklarda östenit fazı içerir. Tüm sıcaklıklarda östenit faz içerdiği için bu çelik allotropik özellik göstermez ve bu nedenle ısı işlemler ile dönüşüm sertleştirilmesi uygulanamaz. Yapıda özellikle kromun ve nikelin oranı östenitleştirici etki yaptığı için şekillenme özellikleri, kaynak kabiliyeti ve korozyona dayanım

değerleri oldukça iyidir. Kalitelerine göre östenitik çeliklerde krom ve nikelin yanında mangan, molibden, azot elementleri de bulunmaktadır (Scwaab, 1983).

Östenitik paslanmaz çelik kaliteleri 300 serisi olarak standardize edilmiştir.

300 serisi östenitik paslanmaz çelik kalitelerinden en yaygın kullanılan birkaç kalite 304, 304L, 316, 316L ve 303 kalitelerdir. Bu kalitelerde 304L ve 316L kalite paslanmaz çelik sonunda yer alan "L" harfi, İngilizce "Low" yani "Low Carbon" kısaltmasıdır ve bu simge, malzemelerin düşük karbonlu olduğu anlamına gelmektedir. Düşük karbonlu östenitik paslanmaz çelikler, daha az kırılğan yapıya sahip olmanın yanı sıra, kaynak yapılabilirliği çok daha kolay olan malzemelerdir (Baeumel, 1975).

3.2 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, mekanik dayanımın ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilen bir paslanmaz çelik grubudur. Yüksek karbon içeriği (minimum %0,10 C) sayesinde dönüşümle sertleştirilebilir. Bu sınıfın temel kalitesi olarak 410 kalite çelik kabul edilirken, karbon oranı daha yüksek bir varyantı olan 420 (420A, 1.4021) kalite, en yaygın kullanılan martenzitik paslanmaz çelik türüdür. 420 kalite çelik, ısıt işlemlerle yüksek mekanik dayanım ve iyi işlenebilirlik özellikleri kazanarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, bu malzemelerin ıslahlı yapısı, benzerlerinden daha üstün mekanik dayanım sunmasını sağlar.

Martenzitik paslanmaz çelikler manyetik özellik taşır ve mıknatıs tarafından çekilir. Mekanik dayanım açısından östenitik paslanmaz çeliklerden belirgin şekilde daha üstündür ve daha sert bir yapıya sahiptir. Ancak korozyon dayanımı söz konusu olduğunda, östenitik çeliklere kıyasla daha düşük bir seviyede kalır.

Bu sınıfta, 410 kalite temel kalite olarak kabul edilirken, kükürt içeriği artırılarak işlenebilirliği geliştirilen versiyonu 416 kalite olarak adlandırılır. Daha yüksek korozyon direnci sağlamak amacıyla krom içeriği artırılmış 431 kalite çelik de bu grupta yer alır. 420 kalite çelik ise en yüksek karbon oranına sahip olup, bu özelliğiyle sertlik ve dayanım açısından diğer türlere göre üstünlük sağlar (Castner, 1992).

3.3 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Demirin α/γ dönüşüm sıcaklığını artıran ve γ/δ dönüşüm sıcaklığını düşüren silisyum, krom, volfram, molibden, titanyum, vanadyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri, östenit bölgesini daraltıp ferrit bölgesini genişletir. Bu elementler yüksek oranlarda çelikte bulunduğu anda, yapı düşük sıcaklıklardan ergime sıcaklığına kadar ferritik kalır. Bu nedenle ferritik paslanmaz çeliklerde normalizasyon ve dönüşümle sertleştirme işlemleri uygulanmaz (Rapatz, 1951).

Ferritik paslanmaz çelikler, düşük karbon oranına ve minimum %10,5 krom içeriğine sahiptir. Nikel içermemesi veya çok az içermesi sayesinde uygun maliyetli bir seçenektir. Manyetik özellik taşıyan bu çelik sınıfında en yaygın kalite, 430 (1.4016) olarak bilinir. Orta düzeyde korozyon dayanımı gösteren 430 kalite, çubuk, boru, sac/plaka gibi formlarda üretilip dekorasyon, mimari yapılar ve mutfak gereçlerinde kullanılır.

430F (1.4105) kalite ise daha fazla kükürt içeriği sayesinde üstün işlenebilirlik sunar. Bu özellik, otomotiv ve seri üretim parçalarında tercih edilmesini sağlar. Bununla birlikte, kükürt içeriği korozyon dayanımını düşürür. Ferritik paslanmaz sınıfının önemli diğer türlerinden biri olan 446 (1.4762) kalite, yüksek krom ve alüminyum içeriğiyle dikkat çeker. Bu özellikleri sayesinde, 446 kalite ferritik çelik yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır.

Ferritik paslanmaz çelikler, krom oranlarına ve alaşım içeriğine göre geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir ve maliyet avantajıyla öne çıkar (Schmidt ve Jarleborg, t.y).

3.4 Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çeliklerin dokusu ferrit ve östenitten oluşmaktadır. Bu doku üçlü malzeme sisteminden oluşur; Fe-Cr-Ni. En yaygın şekilde kullanılan dupleks paslanmaz çeliklerin malzeme numarası 1.4462, SAF2205 olup, kimyasal bileşimi Çizelge 4.2’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal Analizi (% ağı.)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	N
0,02	0,4	1,8	22,3	3,2	5,6	0,16

Kaynak: (Rapatz, 1951)

Çizelge 3.3: Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)	Çentik Darbe Dayanımı (J)
min. 480	min. 680	min. 25	min. 75

Kaynak: (Rapatz, 1951)

Genel olarak bu çeliklerin ferrit-östenit oranı 50/50 şeklinde tanımlanır. Yüksek korozyon dayanımı, iyi mekanik ve teknolojik özellikleri sayesinde değişen kritik sıcaklık aralıklarında özelliklerini koruyarak dayanım göstermektedir. Bu çeliklerin özellikle 475 dereceden başlayan ve 600-950 °C arasında oluşan kompleks karbürler nedeni ile ortaya çıkan gevreklik özelliğine dikkat etmek gerekir. Özellikle bu sıcaklıklar aralığında işleme tabi tutuluyorsa, çelik çok hızlı soğutulur, korozyon dayanımını ve malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek metal karbürlerin ve intermetalik fazların oluşumu önlenmelidir.

Dupleks paslanmaz çelikler östenitik paslanmaz çelikler ile karşılaştırıldığında çok daha iyi çekme dayanımına, akma dayanımına, korozyon dayanımına ve özellikle gerilimli korozyon dayanımına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde bu çelikler deniz suyuna maruz kalan yerlerde, petrol ve doğal gaz hatlarında ve ayrıca kimya endüstrisinde yaygın şekilde kullanılır (Heuser, 1992).

Dupleks paslanmaz çeliklerin bir türü olan süper dupleks çelikler yüksek krom (yaklaşık %25), molibden (%2-4) ve azot (%0,25) içermektedir. Bunlar ayrıca bazı kalitelerinde bakır ve/veya volfram ile alaşımlandırılır.

Çizelge 3.4: Süper Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal Bileşimi (% ağı)

Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
25,5	6,5	3,5	0,25	0,7	0,7

Kaynak: (Anik ve Dorn, 1995)

Çizelge 3.5: Süper Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Mekanik-Teknolojik Özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Darbe Enerjisi (J)
min. 550	min. 750	min. 25	200-270	min. 250 (-20°C)

Kaynak: (Anik ve Dorn, 1995)

Dubleks paslanmaz çelikler, iki farklı faz içerir: bunlar delta ferrit ve östenit fazıdır. Östenit fazı çeliğin korozyon direncini sağlarken, ferrit fazı mekanik dayanımı artırır. Teorik olarak bu fazların yapıda eşit (%50-%50) oranlarda bulunması beklenirken, endüstride farklı faz oranlarına sahip dubleks paslanmaz çelik çeşitleri üretilmektedir. Bu sınıftaki tüm çelikler manyetik özellik taşır. Dubleks paslanmazlar, östenitik çeliklere göre genellikle daha iyi korozyon direncine ve çok daha üstün mekanik dayanım özelliklerine sahiptir. Bu çelikler %20-30 arasında krom, %5'e kadar molibden, %9'a kadar nikel ve %0,5'e kadar azot içerir.

Dubleks paslanmaz çelikler kendi içinde üç alt gruba ayrılır: "lean dubleks", "standart dubleks" ve "süper dubleks". Lean dubleks grubunda, en yaygın kalite olarak 1.4362 öne çıkar. Bu kalite, 316L paslanmaz çeliğe kıyasla daha iyi mekanik dayanım, daha düşük maliyet ve benzer korozyon direnci sunar. 1.4362 kalite çelik genellikle yapı sektörü, köprüler ve yüksek dayanım gerektiren diğer alanlarda tercih edilir (Szkarska, 1971).

Standart dubleks çelikler, lean dubleks çeliklere göre daha iyi korozyon dayanımına sahiptir ve nikel ile molibden oranı daha yüksektir. Bu grubun en bilinen kalitesi 1.4462 (Saf 2205) çeliktir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Süper dubleks paslanmaz çelikler ise daha yüksek krom, nikel ve molibden içeriği sayesinde üstün korozyon direncine sahiptir. En yaygın süper dubleks kaliteleri 1.4410 (Saf 2507), 1.4501 ve 1.4507'dir.

Dubleks paslanmaz çeliklerin alt grupları, "pitting resistance equivalence number" (PREN) adı verilen bir değere göre sınıflandırılır. PREN hesaplama formülü şöyledir: $PREN = \%Cr + 3.3 \%Mo + 16 \%N$. Lean dubleksler için PREN değeri 22-27, standart dubleksler için 27-38, süper dubleksler için ise 38-45 arasında değişir (Kıyasöz ve Karaaslan, 2012).

3.5 Çökelti İle Sertleşebilir Paslanmaz Çelikler

Çökeltme ile sertleşebilen paslanmaz çelikler son yıllarda giderek kullanımı artan bir paslanmaz çelik sınıfıdır. Bu sınıf paslanmaz çelikler, literatürde bazı kaynaklarda martensitik paslanmaz sınıfı altında da kabul edilmektedir. Çökeltmeyle sertleşebilen bir paslanmaz çelik sınıfı malzemelerin ısı işleme, martensitik

paslanmazlara göre daha farklıdır ve doğru ısıtım işlem prosesi uygulanmazsa malzemelere ısıtım işlem yapılamayabilir ve çeliğin sertliği arttırılamayabilir.

Bu sınıf malzemeler İngilizce "Precipitation Hardening" yani PH çeliği olarak da adlandırılmaktadır. Bu sınıf çelikler, östenitik paslanmaz çelikler ile benzer korozyon dayanım özelliklerine sahiptir. Ayrıca çökelmeyle sertleştirildikten sonra bu çelikler, oldukça yüksek mekanik dayanımlara sahip hale gelir. PH sınıfı çelikler, martensitik sınıf paslanmazlardan bile daha yüksek mekanik dayanıma sahip çeliklerdir. 630 kalite paslanmaz çelikler, 304 kalite östenitik paslanmaz çelik ile oldukça benzer bir korozyon dayanım özelliğine sahiptir. Ayrıca 1000 MPA ve üzeri akma dayanımıyla mekanik olarak 304 kaliteden 3 kattan fazla bir mekanik dayanıma sahiptir. 420, 431, 1.4418 gibi kalitelere oranla da daha kuvvetli olan 630 kalite çelikler, bu özellikleri sayesinde en yaygın tercih edilen çökelme sertleşmesi sınıfı paslanmaz kalitelerinden birisidir (Brauns ve Schwenk, 1961)

630 (1.4542) çökelmeyle sertleşen paslanmaz kalitesi, 17-4 PH veya PH 17-4 olarak da sıklıkla gösterilmektedir. 17 malzemenin içeriğindeki krom oranını (Cr) yüzde olarak göstermekte, 4 malzemenin içindeki nikel oranını yüzde olarak göstermektedir.

15-5 PH kalite malzeme, genellikle havacılıkta kullanılan daha özel bir çökelme sertleşmesi malzemesidir. Bu malzemelerin üretimi için öncelikle 17-4 PH malzeme üretilmekte, ardından üretilen kütük ESR veya VAR fırınında çok daha yavaş ve uzun sürede eritilip tekrar dökülmektedir. Bu ikinci döküm işlemi sırasında malzeme iç yapısı çok daha homojen bir hale gelmektedir, malzeme mikro yapısı her noktada çok daha homojen olarak davranmaktadır. 15-5 PH malzemeler daha kritik olan havacılık uygulamalarında veya yüksek basınç olan ortamlarda sıklıkla tercih edilen bir çökelmeyle sertleşebilen paslanmaz çelik kalitesidir.

Bir diğer yaygın kullanılan çökelmeyle sertleşen paslanmaz kalitesi ise PH 13-8 Mo dur. PH 13-8 Mo, isminden de anlaşılacağı üzere yaklaşık %13 krom, yaklaşık %8 nikel elementi içermektedir ve Mo simgesinden de anlaşılacağı üzere molibden ilaveli bir çökelme sertleşmesi sınıfı paslanmaz kalitedir. Bu kalite malzemeler genellikle uçak iniş takım parçalarında, havacılık araçlarında, özel dişli parçalarında kullanılmaktadır (Class, 1965).

4. LASER IŞIN TEKNİĞİ VE LASER IŞINI İLE KAYNAK

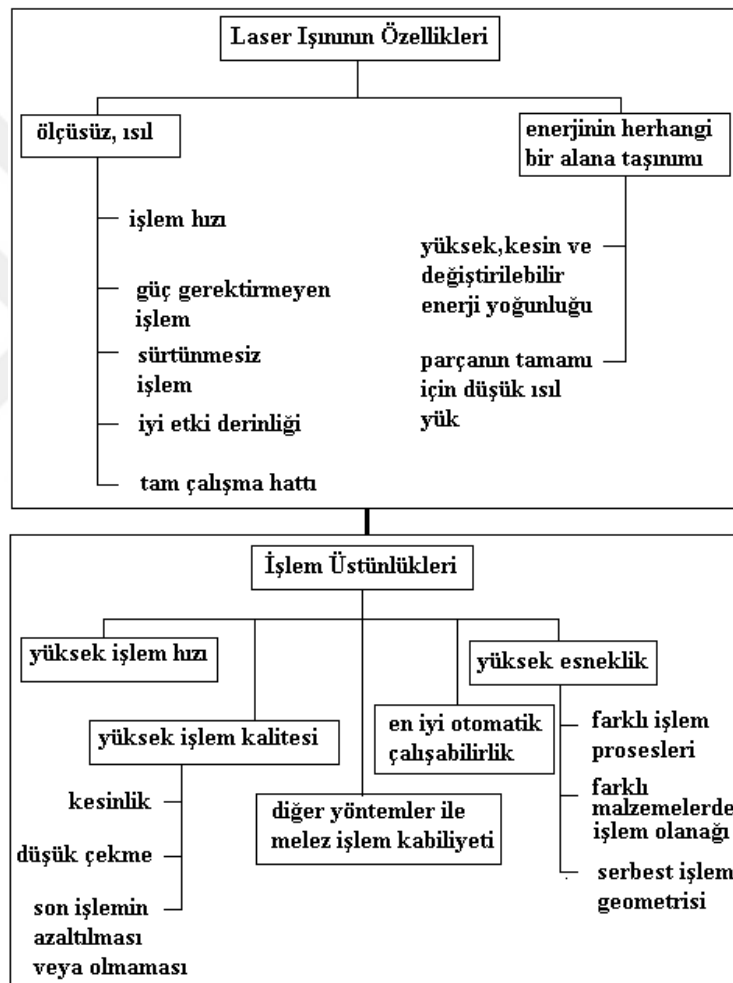
Laserin endüstriyel önemi her şeyden önce onun sıra dışı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Kesme, malzeme (talaş) kaldırma, delme, kaynak, sertleştirme, alaşımlama, kaplama ve ergitme gibi laser ışını ile gerçekleştirilen işlem tekniklerinde geleneksel yöntemlere göre çok büyük üstünlükler sağlanmaktadır. Ayrıca söz konusu işlemlerin çok geniş bir malzeme yelpazesinde gerçekleştirilebilir olması da, laserin endüstrideki önemini daha da artırmaktadır (Karaaslan, 2023).

Laser ışını, ayna gibi optik elemanlar veya katı hal laserlerindeki gibi fiber-optik kablolar ile ışın kaynağından çalışma ortamına çok kolay bir şekilde taşınabilmektedir. Gerçekleştirilecek işlem tekniği için mercekler veya ayna sistemleri yardımı ile sadece gerekli olan enerji yoğunluğu, işlem yapılacak ortama aktarılmaktadır; örneğin malzemelerin sertleştirilmesinde gerekli olan güç yoğunluğu yaklaşık olarak 10^3 W/cm^2 değerindeyken, kesme için gerekli olan değer daha büyük ve 10^6 W/cm^2 'dir. Laser ışını, sayısal değerlerin yönlendirilmesi, malzeme üzerindeki odaklamanın görece değişimi ve bu bölgedeki çalışma bandının kalıcılığının gerçekleşmesi için olanak sağlamaktadır (Pitscheneder vd., 1995).

Çok küçük çaplı bir odaklama etkisinde çevreyi etkilemeden ve enerjide çok fazla bir güç kaybı olmadan çalışma ortamına laser ışının aktarılması ile yüksek bir işlem hızı ve yüksek çalışma kalitesine ulaşılmaktadır. Kesme veya sertleştirme işlemi sonrasında yapılacak ilave işlemlerin indirgenmesi veya bu işlemlere hiç gerek duyulmaması, laserin geleneksel yöntemlere göre olan üstünlüklerine örnek olarak verilebilir.

Laserin böylesine üstün özelliklere sahip olmasına karşın yatırım maliyetinin yüksek olması, malzemelerin laser ile işlenmesine bir sınır getirmektedir. Bu nedenle geleneksel yöntemler ile laserin kullanımı karşılaştırıldığında, tüm işlem bittikten sonra toplam maliyet açısından da laserin kullanılabilir olması için daha ucuz olması gerekmektedir. Bu durum aynı zamanda maliyet azaltma ve/veya kaliteyi artırma şeklinde de düşünülebilmektedir. Başka bir görüntü ise, planlanan veya gerekli olan malzeme işlemi, geleneksel yöntemler ile mümkün değilse laserin gündeme

gelmesidir. Bu nedenle yeni üretim olanakları, çok hassas bir üretim, geleneksel olmayan malzeme kombinasyonları gibi öngörülen veya zorunlu olan değişikliklere yönelme, laser ile malzeme işleminde ekonomikliği ve yüksek kaliteyi ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca geleneksel yöntemlere göre laser ışını ile işlemde yüksek otomasyon sistemi ile çalışma, buna bağlı olarak planlanan kesin boyutsal değerlere ulaşabilme; yani çok dar toleranslarda işlem yapma kabiliyeti, serbest işlem geometrisi olanağı ve diğer yöntemler ile melez çalışma imkanı gibi üstün olan pek çok özellik, laser ile işlem tekniğini her geçen gün daha da öne çıkartmaktadır. Laserin kullanımının önemi Şekil 4.1’de tekrar özetlenmiştir (Kogelnik ve Li, 1966)



Şekil 4.1: Laser ile İşlemin Karakteristik Özellikleri ve Kullanımda Oluşan Kriterler

Kaynak: (Karaaslan, 2023)

Malzemelerin işlenmesinde kullanılan laser “ısı cihaz” olarak ifade edilebilmektedir; çünkü laser ile yapılan çalışmalarda malzemeler, laserin ısı enerjisinden etkilendirilmektedirler. Bu durum tüm işlem yöntemleri için bugün önemli laser türleri olan katı hal ve CO₂ laserleri için de geçerlidir. Sadece

başlangıçta birkaç kullanımda etkili olmuş olan excimer laser, fotokimyasal etkiler ile açıklanmaktadır (Duley, 1976).

Laser ışını ile malzemelerin işlenmesinde yüksek işlem hızı, yüksek esneklik, yüksek işlem kalitesi, tam otomasyon ve diğer yöntemler ile melez işlem kabiliyeti gibi ortaya çıkan üstünlükler, laseri her geçen gün daha da tercih edilen bir yöntem haline getirmektedir. Bu üstün özelliklerinin yanında, laserin kullanımı özellikle aşağıdaki durumlar için büyük avantajlar sağlamaktadır:

Parçanın üretim şeması tamamen değişecekse,

Maliyet düşecekse,

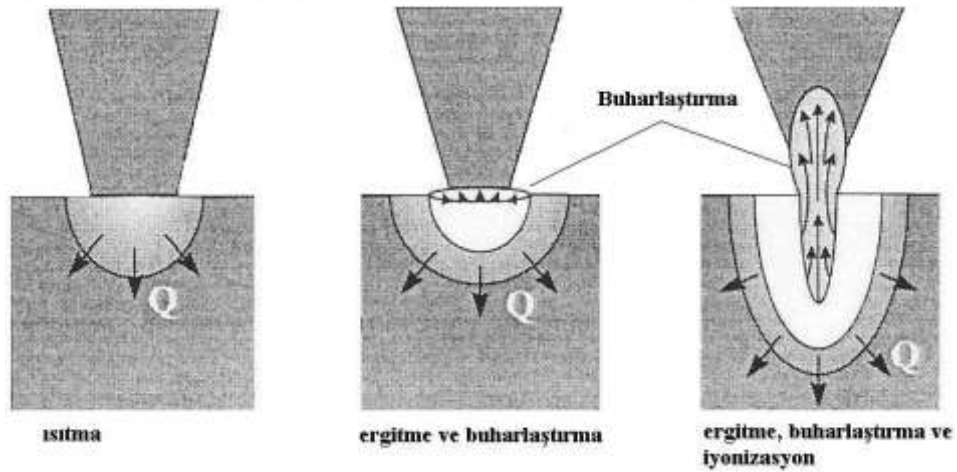
Kalitede artma sağlanacaksa,

Diğer yöntemler ile üretim mümkün değilse,

Kuvvet değişmeden veya düşük ısı etki ile çalışma gerekecekse,

Küçük parçalarda büyük şekillendirme olacaksa

Yüksek derecede otomasyon gerekli ise (Hügel, 1992)



Şekil 4.2: Laser Işını ile Malzeme Arasındaki Etkileşim Prosesleri

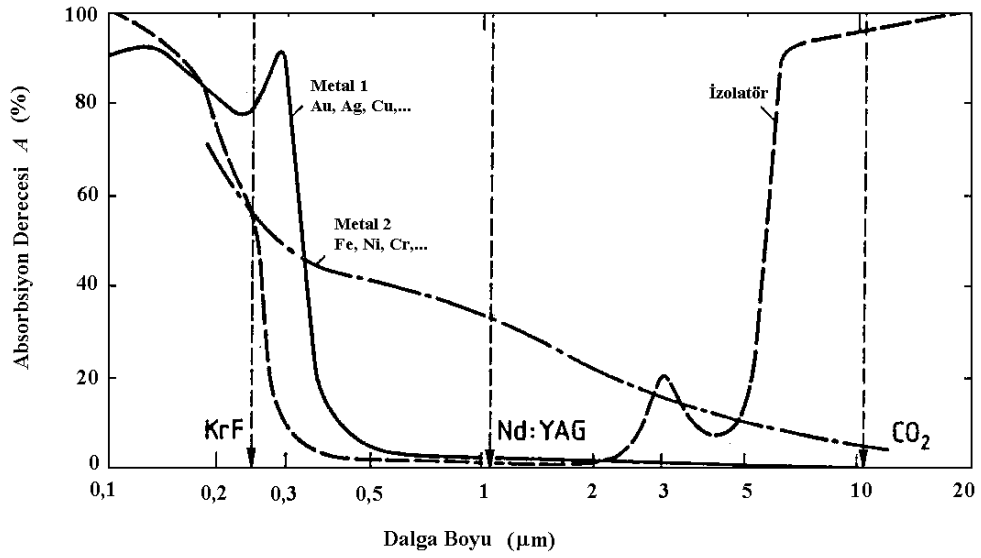
Kaynak: (Karaaslan, 2023)

Laser ışınının malzeme ile etkileşimi ile oluşan olaylar önemli derecede laserin güç yoğunluğuna, dalga boyuna, ışının polarizasyonuna ve ayrıca ışın ile etkileşim halindeki malzemeye bağlıdır. Sözü edilen parametrelerin değiştirilerek, güç yoğunluğunun artırılması ile laser ışını / malzeme arasındaki etkileşimin değişimi Şekil 4.2’de açıklanmaktadır. Buna göre; güç yoğunluğunun 10^4 W/cm²

değerine kadar olması halinde absorblanan (soğurulan, yutulan) enerji öncelikle ışının dalga boyuna, malzeme özelliklerine ve yüzeyin durumuna bağlıdır. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, metalsel malzeme, gelen ışının sadece küçük bir yüzdesini soğururken, geriye kalan büyük kısım yansıtılmaktadır. Ancak paralel polarize ışık eğik olarak gönderilirse, düşme açısının artması ile soğurulma miktarı da önemli derecede artmaktadır. Gönderilen enerji, malzemenin bölgesel olarak ısınmasını sağlamaktadır; böylesi bir durum parçaların sertleştirilmesi için tipik bir örnektir (Richter, 1995).

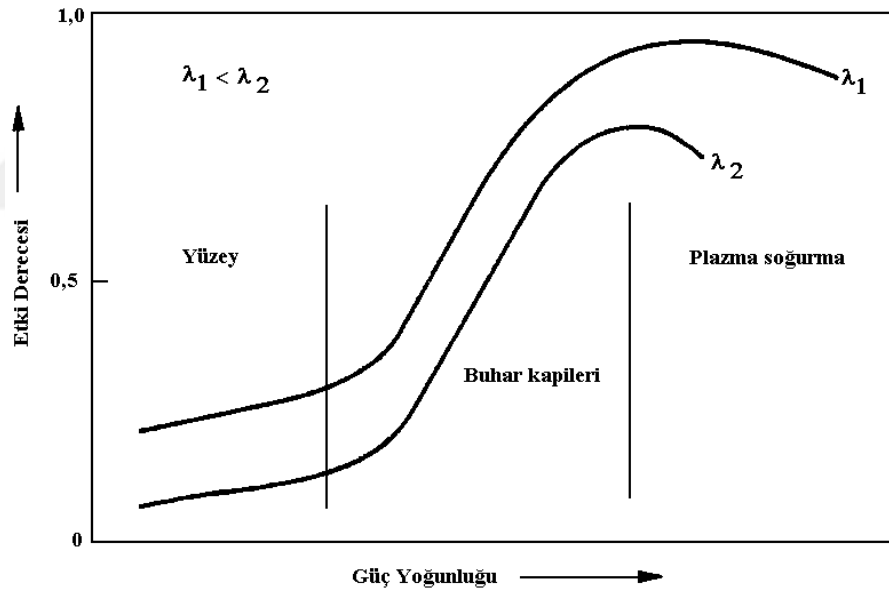
Gücün artırılması veya odaklamanın kuvvetlendirilerek güç yoğunluğunun $10^5 - 10^6 \text{ W/cm}^2$ aralığına yükseltilmesi ile yüzey ergimesi ve bölgesel buharlaşma başlamaktadır; böylece soğurma da bir miktar artmaktadır.

Güç yoğunluğunun 10^6 W/cm^2 değerine yükseltilmesi ile bir buhar kanalı (buhar aralığı, anahtar deliği) oluşur ve bu aralık odaklanmış laser ışınının çapı kadar bir büyüklüktedir. Böylesi bir durum kaynak, kesme ve delme için karakteristiktir; gönderilen ışının büyük bir kısmı malzeme tarafından soğurulmuştur. Laser ışınının dalga boyu, malzemenin yüzey durumu ve malzeme özellikleri, böylesi bir durumda soğurma miktarı için daha az rol oynamaktadırlar. Güç yoğunluğu daha çok artırılıp, $10^7 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ aralığına kadar yükseltilirse, etki edilen malzemenin buhar aralığı birim alana gelen gücün artması ile büyüyerek, malzeme yüzeyinin üzerinde bulunan çevre gazı iyonlaşmakta ve plazma oluşmaktadır. Oluşan bu plazma da laser ışınının bir kısmını soğurarak parça üzerinde bir tabaka oluşmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda ise daha düşük bir derinlik ve geniş bir çalışma geometrisi (örneğin; kaynak dikişleri) ortaya çıkmaktadır. Böylesi bir durumda dalga boyunun etkisinin dikkate alınması gerekmektedir; çünkü plazma, küçük dalga boyuna sahip ışını büyük dalga boyuna sahip ışıdan oldukça çok daha az soğurmaktadır (Sundman ve Thermo, 1993).



Şekil 4.3: Normal Açık ile Oda Sıcaklığında Parlak Yüzeyle Düşen Işının Dalga Boyuna Bağlı Olarak Soğurulma Miktarı.

Kaynak: (Karaaslan, 2023)



Şekil 4.4: Güç Yoğunluğunun ve Dalga Boyunun Fonksiyonu Olarak Metalsel Malzemelere Etki Eden Enerji

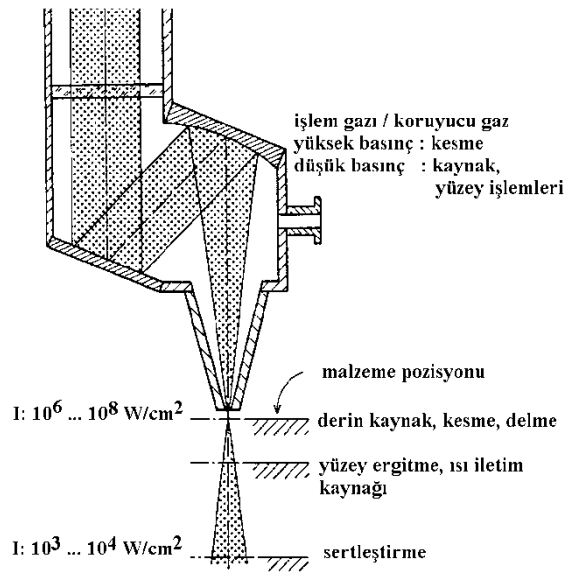
Kaynak: (Karaaslan, 2023)

Soğurulma miktarını tek başına yüklenmiş enerji olarak tanımlamak yeterli değildir. Çalışma alanındaki lazer ışınının güç yoğunluğuna dayalı olarak (yönteme göre) ışının %5 – 90'ı malzeme içine gönderilir. Şekil 4.4, enerji yüklenmesi değerlerini güç yoğunluğuna bağlı olarak göstermektedir. Buna göre, lazer güç yoğunluğu arttıkça, malzemenin ışını soğurma miktarı artmakta ve sonuçta ışının malzemedeki etkinlik derecesi de büyümektedir. Ancak, etki edilen malzemenin

buhar aralığı birim alana gelen gücün (güç yoğunluğunun) artması ile büyüdüğünde, malzeme yüzeyinin üzerinde bulunan çevre gazı iyonlaştığından oluşan plazma ışını soğurmaya başlar. Bunun sonucunda ışının malzemedeki etki derecesi azalır (Şekil 5.4). Laser tipine göre daha düşük dalga boyuna sahip olan ışının plazma tarafından daha az soğurulması, malzemedeki etki derecesinin daha az düşmesini sağlamaktadır (Gültekin, 1985).

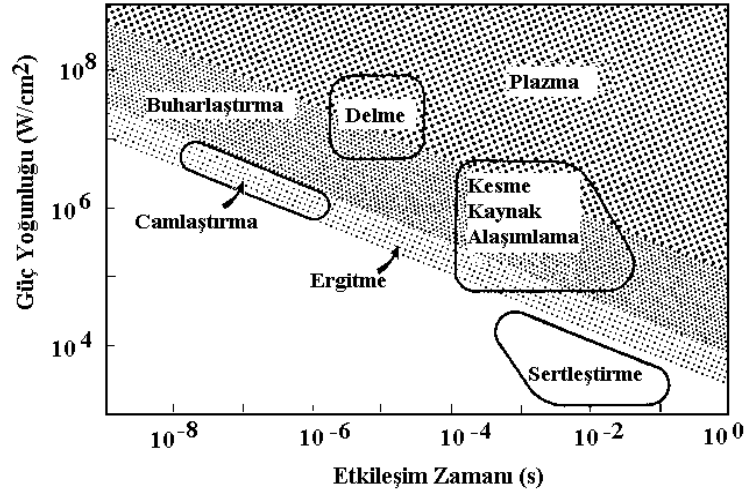
Laser ışının sertleştirme, delme gibi daha değişik işlemler yapabilmesi için, parçadaki ışın konumunun uygun duruma getirilmesi ve uygun güç yoğunluğunun ayarlanması ile malzemedeki önemli fiziksel olayların oluşumu gerçekleştirilmektedir. Farklı parametrelerin seçilmesi ile elde edilen farklı güç yoğunluklarının etkisi altında laser ışını / malzeme etkileşimi sonucunda gerçekleştirilebilen laser işlemlerinden bazıları Şekil 4.5’de şematik olarak verilmiştir.

Şekil 4.6, güç yoğunluğuna ve laser ışını / malzeme etkileşimi zamanına bağlı olarak, sertleştirme, ergitme, yüzey camlaştırma (yüzeyde amorf ve çok sert camsı yapı oluşturma), kaynak, kesme, alaşımlama, delme gibi işlemlerin bölgelerini göstermektedir. Güç yoğunluğunun artışı ile laser / malzeme etkileşimi daha kısa sürede gerçekleşmekte ve belli bir değere kadar laser ışınının malzemedeki etki derecesi artmaktadır. Görece daha düşük güç yoğunluğu aralıklarında yüzey işlemleri gerçekleştirilirken, daha büyük güç yoğunluklarında ise kaynak ve kesme gibi işlemlerin yapılması sağlanmaktadır (Karaaslan vd., 1996).



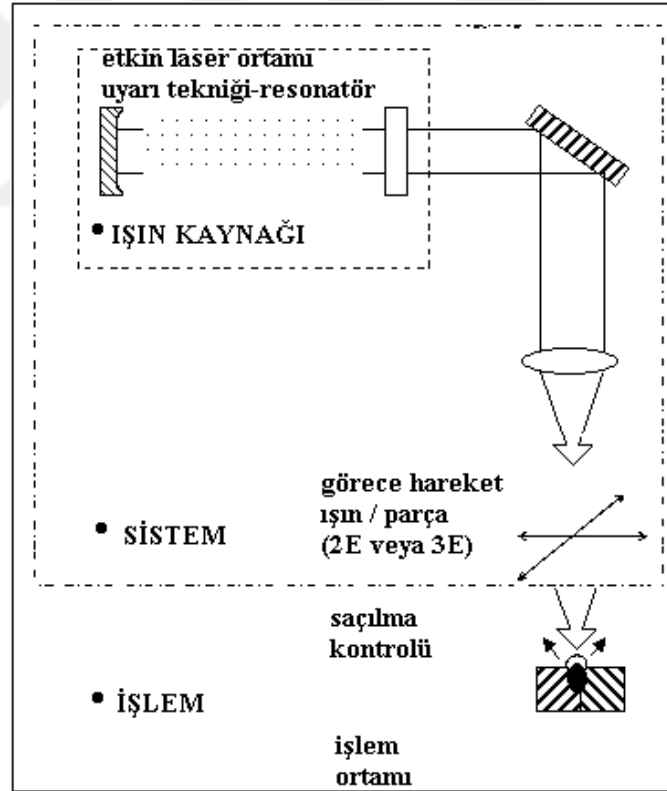
Şekil 4.5: Laser Işını – Malzeme Etkileşimi

Kaynak: (Karaaslan, 2023)



Şekil 4.6: Parametre Değişimine Göre Birkaç Yöntemin Niteliği ve Durum Değişimi

Kaynak: (Karaaslan, 2023)



Şekil 4.7: Bir Laser Cihazın Çalışma Prensibi ve Bileşenleri

Kaynak: (Karaaslan, 2023)

Şekil 4.7, laser işlem cihazının prensibini ve cihazın bileşenlerini vermektedir. Işın kaynağı olarak adlandırılan ve etkin laser ortamında uyarı tekniği ile “resonatör”de üretilen laser ışını, ışın yönlendirici ve ışın şekillendirici sistemleri

aracılığı ile istenen güç yoğunluğu değerinde, laser / malzeme etkileşim bölgesine yönlendirilir. İşlem bölgesine taşınan laser ışını, hareketli optik sistemler ve/veya çalışma tezgahının yardımı (çalışma tezgahının yukarı-aşağı şeklinde hassas ayarlanması) ile parça üzerinde odaklanarak yoğunlaştırılır. İşlem sırasında önemli olan başka bir parametre ise kullanılan gazın cinsi ve gazın akış hızıdır (Karaaslan, 1999).

Öne çıkan çeşitli özellikleri yönünden birbirlerinden farklı birçok laser türü vardır. Bunlar etkin ortama göre (katı, gaz, sıvı, yarı iletken), uyarılma biçimine göre (flaş, gazlı boşaltma tüpü, akım pompalamalı, kimyasal tepkime) ya da çalışma şekline göre (sürekli, başıboş, tetiklemeli) sınıflandırılabilirler.

Bir yansıtıcı ile çevrili helis biçiminde veya doğrusal flaş düzenekli, optik uyarma genellikle ve özellikle katı laserleri için, elektriksel boşalma veya elektriksel uyarma ise gaz laserleri için kullanılır. Kimyasal tepkime ile uyarma birbirlerini etkileyen maddeler (örneğin; döteryum florür molekülleri veren flor + döteryum) kullanarak uyarılmış durumda moleküller üretmeye dayanır. Bazen üretilen molekülün temel hali ayrışık olduğundan, ancak uyarılmış elektron hallerinde bir bağlı hal vardır, bu da işgal edilme sayısının tersine çevrilmesini kolaylaştırır (örneğin; soygaz halojenürleri) (Schultz, 1974).

Etkin ortamın uyarılma durumuna bağlı olarak elde edilen laserler sürekli laserler ve darbeli laserler olarak ayrıca iki ayrı gruba ayrılırlar. Etkin ortam sürekli olarak uyarıldığında, laser yayını kalıcı olabilir; böylece sürekli laser elde edilir. Uyarma flaşla yapılırsa, yayının darbeleridir ve böylece darbeli laser elde edilir. Bir laser darbesinin süresi, genellikle flaşın süresinden küçük olduğundan uyarılmış düzey (seviye) ardışık olarak boşalır ve yeniden dolar, bu da flaşın çalışmasının sona ermesi ile tamamlanan birbirine yakın laser darbelerinden oluşmuş bir dizinin elde edilmesine neden olur; başıboş çalışma. Darbeli bir laserde, çalışma eşiğine erişildiğinde laser yayını engellenebilirse uyarma daha yüksek bir düzeye dek sürdürülebilir. Daha sonra yayını, çok kısa (birkaç nano saniye kadar) bir darbe biçiminde serbest bırakılarak, tepe değeri oldukça büyük bir güç elde edilebilir (Ebner, 1995). Yayını başlatmak için döner prizma ya da akustik etki gibi değişik yöntemler kullanılabilir.

İşlem tekniklerinde geleneksel yöntemlere göre çok büyük üstünlükler sağlanmaktadır. Ayrıca söz konusu işlemlerin çok geniş bir malzeme yelpazesinde gerçekleştirilebilir olması da, laserin endüstrideki önemini daha da artırmaktadır.

Laser ışını, ayna gibi optik elemanlar veya katı hal laserlerindeki gibi fiber-optik kablolar ile ışın kaynağından çalışma ortamına çok kolay bir şekilde taşınabilmektedir. Gerçekleştirilecek işlem tekniği için mercekler veya ayna sistemleri yardımı ile sadece gerekli olan enerji yoğunluğu, işlem yapılacak ortama aktarılmaktadır; örneğin malzemelerin sertleştirilmesinde gerekli olan güç yoğunluğu yaklaşık olarak 103 W/cm^2 değerindeyken, kesme için gerekli olan değer daha büyük ve 106 W/cm^2 'dir. Laser ışını, sayısal değerlerin yönlendirilmesi, malzeme üzerindeki odaklamanın görece değişimi ve bu bölgedeki çalışma bandının kalıcılığının gerçekleşmesi için olanak sağlamaktadır. Çok küçük çaplı bir odaklama etkisinde çevreyi etkilemeden ve enerjide çok fazla bir güç kaybı olmadan çalışma ortamına laser ışınının aktarılması ile yüksek bir işlem hızı ve yüksek çalışma kalitesine ulaşılmaktadır. Kesme veya sertleştirme işlemi sonrasında yapılacak ilave işlemlerin indirgenmesi veya bu işlemlere hiç gerek duyulmaması, laserin geleneksel yöntemlere göre olan üstünlüklerine örnek olarak verilebilir (Karaaslan ve Ebner, 1999).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

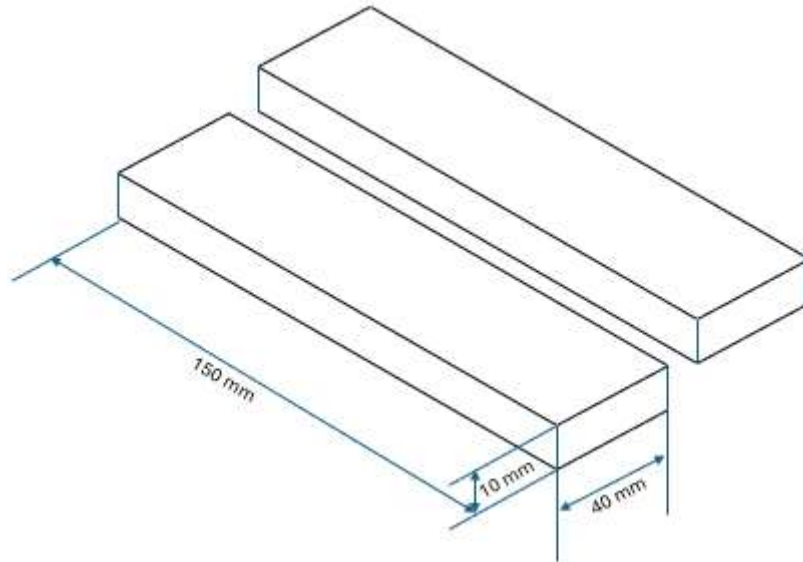
Bu çalışmada 316L kalite paslanmaz çelik tozları DMLS eklemeli imalat sistemiyle üretilmiş ve elde edilen plakalar farklı laser parametreleri kullanılarak ilave tel kullanılmadan birleştirilmiştir. Kaynak edilmiş numunelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri karakterize edilerek, en uygun kaynak parametreleri belirlenmiştir.

5.1 Kullanılan Malzeme

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan DMLS tekniği kullanılarak üretilen plakaların kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de ve boyutları Şekil 5.1’de şematik olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1: DMLS Tekniği İle Üretilmiş Plakaların Kimyasal Bileşimi

% Ağırlıkça	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
316L (1.4404)	0,03	2	0,045	0,03	1	16-18	10-14	2-3



Şekil 5.1: DMLS Tekniği ile Üretilmiş Plakaların Şematik Görüntüsü

5.2 DMLS Tekniği İle Plakaların Üretimi

Çalışmada Toz Yataklı Laser Sinterleme (PBLF) yöntemi olan Direkt Laser Metal Sinterleme (DMLS) yöntemi kullanılmıştır. Numunelerin üretimi EOS M290 metal makinesi ile gerçekleştirilmiştir.

Ön denemeler sonrasında üretimde 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 seçilmiştir. Plakaların üretim parametreleri Çizelge 5.2’de tekrar tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2: DLMS Tekniği ile 316L Paslanmaz Çelik Plakaların Üretim Parametreleri

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 İmalat ile üretilen plakalar laser ışın kaynak tekniği ile telsiz üretileceği için, üretim tasarımında kaynak ağızı olmayacak şekilde düz bir üretim şekli gerçekleştirilmiştir. Üretilen parçaların görüntüsü, kaynak pozisyonu ile birlikte Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2: Üretilmiş Plakaların Kaynak Pozisyonu

5.3 Laser Işın Tekniği İle Kaynak

DMLS tekniği ile üretilmiş parçaların kaynağında Nd:YAG laser ışın üretici seçilmiş ve kaynaklar farklı güç, hız ve gaz akışı ile gerçekleştirilmiştir. Laser kaynağında kullanılan, Nd:YAG makinesinin görseli Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Eklemeli İmalat Tekniği ile Üretilmiş Plakaların Kaynağında Kullanılan Nd: Yağ Makinesi

Kullanılan laser makinesi GeKa Laser3000 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 metre uzunluğunda fiber optik kablosu olup, aynı zamanda osilasyon özelliği ile kaynak banyosuna ve geometrisine etki etme özelliği mevcuttur.

DLMS tekniği ile üretilmiş plakaların kaynağında uygun laser kaynak parametrelerinin belirlenmesi için, farklı güç, farklı laser ışın genişliği, frekans ve gaz debileri ile 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 ve gaz debisi ile kaynak hızı optimizasyonu yapılmıştır. Çizelge 5.3'te seçilen kaynak parametreleri verilmiştir.

Çizelge 5.3: Plakaların Laser Kaynağında Seçilen Kaynak Parametreleri

Numune No.	Laser Gücü (Watt)	Frekans (Hz)	Işın Genişliği (mm)	Gaz (Ar-Bar)
1	2100	10	4	135
2	2100	10	5	130
3	1500	2	5	120
4	1500	4	5	125

5.4 Kaynaklı Parçaların Karakterizasyonu

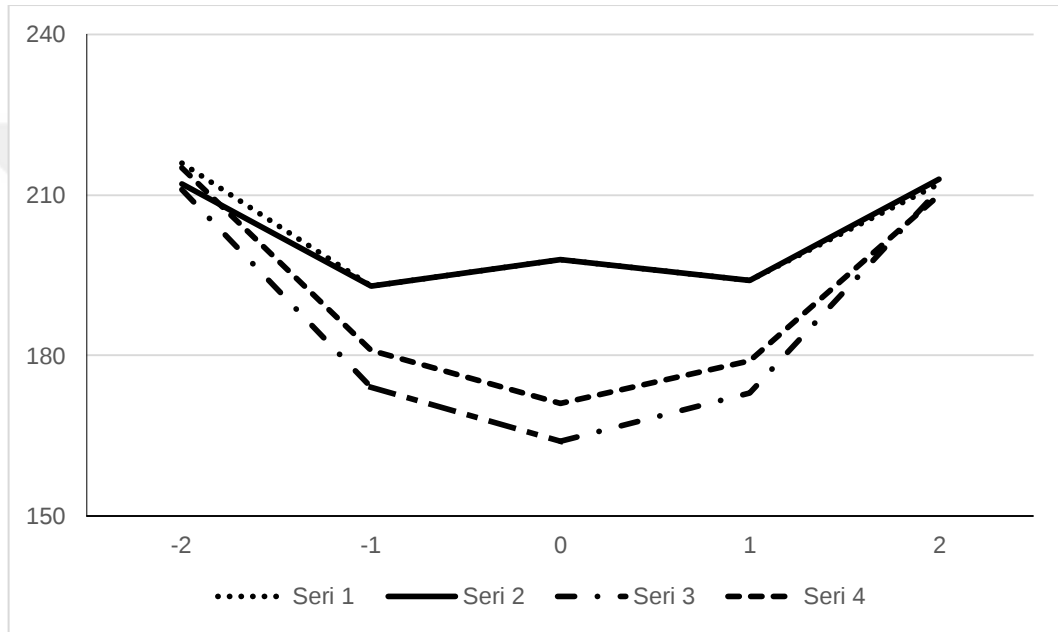
İlave tel kullanmadan seçilmiş olan uygun kaynak parametreleri ile birleştirilmiş plakaların mikro yapıları ışık mikroskobu ve elektron mikroskobu ile görüntülenmiş, sertlikleri HV-Vicker's yöntemi ile belirlenmiştir.

Mikro yapı görüntülemeye ayrıca oluşan fazların SEM-EDS analizleri gerçekleştirilmiş olup, kaynak sonrası olası korozyona dayanım değerleri yorumlanmıştır. Mikro yapı görüntülemeye, dokusal değişimler, tane boyutu ve oluşan fazlar ile ortaya konmuş, küçük büyütme görüntüleme ile ayrıca kaynak dikiş geometrisi, ITAB genişliği ve esas metal-kaynak bölgesi geçişinin görüntüleri alınmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Sertlik

Sertlik deneyi esas metalden kaynak dikişine kadar aralıklarla taranarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sertlik tarama sonucu Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1: Kaynak Edilmiş Eklemeli İmalatlı Parçaların Esas Metalden Kaynak Dikişine Kadar Sertlik Değişimi; Seri1 Numune 1, Seri2 Numune 2, Seri3 Numune 3, Seri4 Numune 4

Laser ışını ile tel kullanmadan kaynak edilmiş 4 adet numunenin sertlik dağılımı incelendiğinde, genel olarak kaynak bölgesinde sertlik değerlerinin esas metale göre düşme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Bunun temel nedeni kaynak ısısının ergime ve ITAB’da oluşturduğu tavlama etkisinin özellikle tane büyümesine ve ayrıca paslanmaz çelikteki karbürlerin boyut ve dağılımlarına etki ederek ortaya çıkması olarak söylenebilir.

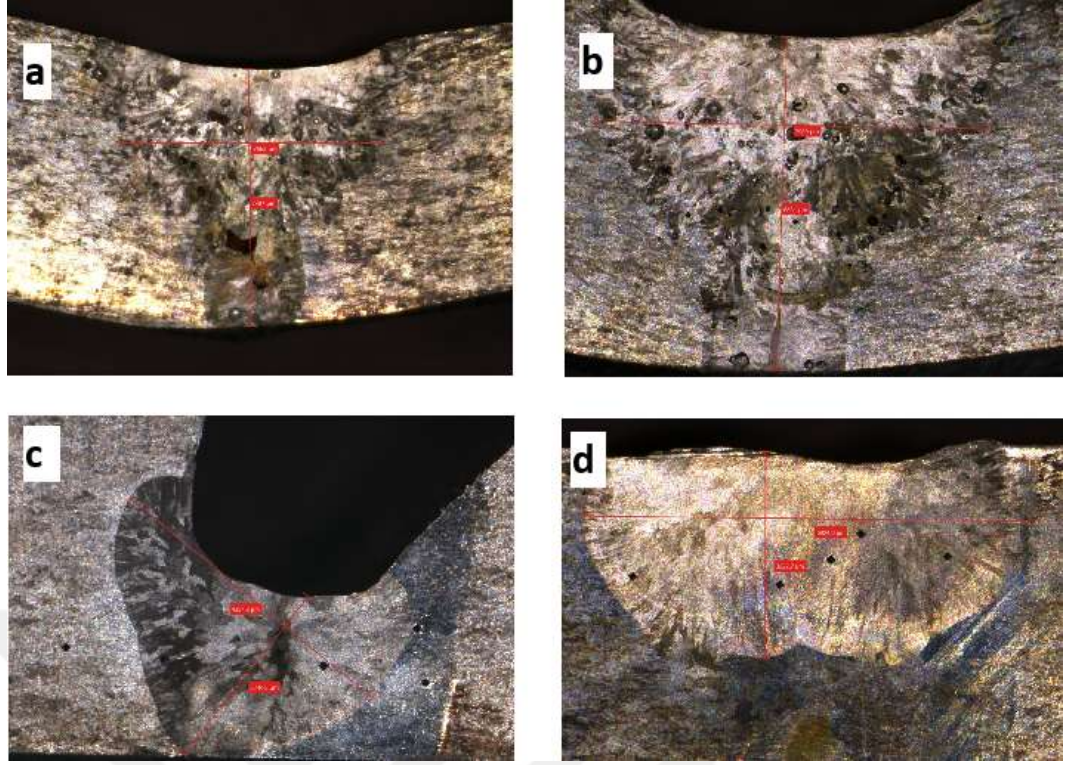
Kaynak bölgesindeki sertlik düşmesinin bütün numuneler için benzer şekilde olduğu gözlemlenmesine karşın, laser ışın parametrelerinin ve ayrıca kaynakta kullanılan gazın farklı değerlerde oluşu 1-4 numuneleri için farklı sertlik değerlerinin oluşumuna yol açmıştır. Genel olarak kaynak güç değerinin, laser ışın genişliğinin,

frekansın ve gaz debisinin değişimi ile kaynak bölgesine aktarılan kaynak ısısının değişimi, kaynak dikişinin katılma hızına ve ITAB’da farklı sürelerde tavlama etkisine neden olduğu için, her numunede elde edilen sertlik farklılığına neden olmaktadır. Laser gücünün artışı, laser ışın genişliğinin azalması, frekansın yükselmesi ve gaz debisinin artışı, kaynak sırasında malzemeye giren ısı miktarını azaltmaktadır. Bu durumda kaynak dikişi daha hızlı katılırken ITAB daha kısa sürede tavlı olarak kalmaktadır. Böylece kaynak dikişi ve ITAB’ı içeren kaynak bölgesinin sertliğindeki azalma daha düşük değerlere doğru ötelenmektedir. Buna karşın laser ışın genişliğinin artışı, laser frekansının azalışı ve gaz debisinin düşmesi ile kaynak banyosunda daha yüksek bir ısı girdisi gerçekleşmekte olup, bu da kaynak banyosunun geç katılmasına ve ITAB’ın daha uzun süre ile tavlı şekilde kalmasına yol açmaktadır. Buna bağlı olarak kaynak dikişindeki tane boyutunun giren ısı miktarına göre daha büyük olarak şekillenmesi ve ayrıca ITAB’da da tane boyutu ve karbür boyutunun irileşmesi, sertlikte daha dramatik bir düşüş olmasına neden olmuştur.

Farklı laser ve kaynak parametreleri ile yapılmış deneylerden elde edilen sonuçlara göre en düşük kaynak bölgesi sertlik dağılımı 3 numaralı numunede belirlenirken, en yüksek sertlik dağılımları ise 1 ve 2 numaralı numunelerde ortaya çıkmıştır. Bu durumda DLMS tekniği ile üretilmiş plakaların kaynaklı imalatı sonrasında servis edilmesinde statik ve dinamik yükler altında kullanım örnekleri ele alındığında, esas metalin mikroyapı ve mekanik özelliklerine benzer özellikler sergileyen 1 ve 2 numaralı numuneler tercih edilebilirken, özellikle 3 numaralı numunede ortaya çıkan sonuçlara bağlı olarak statik ve dinamik yükler altında dayanım değerlerini esas metale göre daha düşük olduğu ve serviste kaynak bölgesinde risk teşkil edeceği tespit edilmiştir.

6.2 Mikroyapı

Kaynaklı parçaların mikroyapıları, kaynak geometrisini dahil edecek şekilde küçük büyütmelemlerle ve ayrıca mikroyapıdaki dokusal farklılıkların ortaya konması amacıyla daha büyük büyütmelemlerle hem ışık mikroskobuyla hem de SEM elektron mikroskobuyla gerçekleştirilmiştir. Işık mikroskobu ile elde edilen görüntüler Şekil 6.2a-d’de verilmiştir.



Şekil 6.2: Ön Çalışmalardan Elde Edilen Kaynak Dikiş Geometrileri; a: Numune 1, b: Numune 2, c: Numune 3, d: Numune 4

Çalışmanın ilk aşamasında uygun laser ve işlem parametreleri denemeleri yapılmış, özellikle birleşme özellikleri ve kaynak sonrası açısız çarpılma değerleri dikkate alınarak daha uygun laser ve işlem parametreleri çalışmalarına devam edilmiştir. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi numune 1’de kaynak nüfuziyeti tüm parça kalınlığı için yeterli olup, giren ısı miktarı ve kullanılan gaz debisine göre kaynak sonrası açısız çarpılma görülmüştür. Ayrıca kullanılan gazın ilk denemelerde yetersiz miktarı, kaynak dikişinde yoğun bir şekilde gözenek oluşumuna neden olduğu tespit edilmiştir.

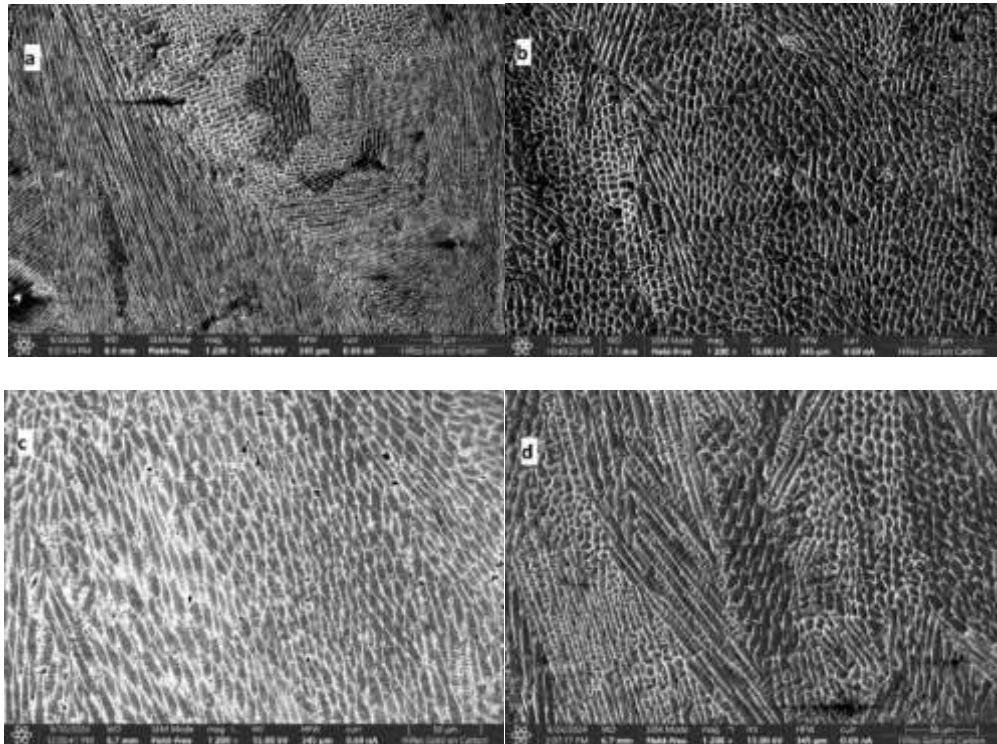
Numune 2 incelendiğinde (Şekil 6.2 b), kaynak dikiş geometrisinin daha düşük değerlerde kaldığı, gaz debisine bağlı olarak benzer şekilde gaz boşluğunun mevcut olduğu görülmektedir.

Numune 3 için yapılan ön deneylerde, gaz debisinin aşırı yüksek seçimi ve ayrıca 280 Watt gibi yüksek kaynak gücü kaynak banyosunda sıvı sıçrantısına neden olmuştur. Bunun sonucu olarak hem aşırı metal kaybı hem de aşırı açısız çarpılma tespit edilmiştir. Gaz debisinin numune 1 ve 2 ön deneylerine göre daha uygun olduğu, Şekil 6.2 c’de görüldüğü gibi daha az gözenek ile belirlenmiştir.

Numune 4 ön çalışmalarında ise seçilen düşük kaynak gücüne bağlı olarak kaynak dikiş geometrisi düşük derinlik ve daha büyük kaynak genişliği ile ortaya çıkmıştır.

Yapılan ön deneylere göre elde edilen kaynak geometrileri incelendikten sonra kaynak gücü, kullanılan frekans, laser ışını genişliği ve gaz debisi değerleri ile (Çizelge 6.3 kaynak parametreleri) en uygun kaynak dikiş geometrisi, gözenek oluşmayan bir kaynak dikişi ve görece düşük ısı girdisini sağlayacak sonuçların elde edilmesi amacıyla yeni deney tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yapılan yeni deneysel çalışmalar sonucunda daha uygun bir şekilde elde edilen kaynak dikiş geometrilerinde mikroyapısal incelemeler detaylı bir şekilde SEM mikroyapısal görüntüleme ile ortaya çıkartılmıştır. Özellikle kaynak dikişi ve ITAB'da oluşan dokuların 1-4 numuneleri için farklılıkları ortaya konmuş ve buna bağlı olarak her bir numune için ön deneylerden sonra seçilen kaynak parametreleri ile oluşan mikroyapılar elde edilmiştir.

Şekil 6.3'te, ön deneyler sonrasında optimize edilmiş kaynak parametreleri ile birleştirilen numunelerin kaynak dikişinde katılaşma hızına bağlı olarak ortaya çıkan mikroyapıları verilmiştir.



Şekil 6.3: DLMS Yöntemi İle Üretilmiş Plakaların Laser Işını Kaynağı Sonrasında Elde Edilen Kaynak Dikişlerinin SEM Mikroyapısı; a: Numune 1, b: Numune 2, c: Numune 3, d: Numune 4

Şekil 6.3 a’da görüldüğü gibi 1 numaralı numunede giren ısı miktarının kaynak parametrelerine göre düşük olmasıyla katılaşma hızı yükselmiş ve buna bağlı olarak ortaya çıkan dokuda östenit taneleri ve tane sınırlarında görülen karbür ötekiği dağılımı görece daha ince bir dokunun oluşumuna izin vermiştir. Kaynak parametrelerinin seçimine bağlı olarak Şekil 6.3 b,c,d mikroyapıları incelendiğinde, kaynak dikişi mikroyapısında giderek kabalaşan östenit tanelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu mikroyapı dağılımına bağlı olarak 1 numaralı numune (Şekil 6.3 a) diğerlerine göre daha yüksek bir sertlik değerine sahip olmuş, buna karşın en kaba taneli yapıya sahip 3 numaralı numunede ise en düşük sertlik değeri elde edilmiştir (Şekil 7.1 sertlik grafiği).

Şekil 6.4 a-d, DLMS yöntemi ile üretilmiş plakaların laser ışın kaynağı sonrasında kaynak dikişi-ITAB geçişini göstermektedir. Seçilen kaynak parametrelerine bağlı olarak toplam giren ısı miktarı kaynak dikişinin katılaşma hızını doğrudan etkilediği için katılaşma sırasında bu ısının ITAB’a doğru akışını da doğrudan etkilemiştir. Buna bağlı olarak ITAB’da 316L östenitik paslanmaz çeliğin ITAB’ında sıcaklığın yaklaşık 1100-400⁰C aralığına düşünceye kadar geçen süre ITAB dokusunu doğrudan etkilemiştir.

Seçilen kaynak parametrelerinin değerine bağlı olarak toplam giren ısı miktarı düştükçe kaynak dikişi-ITAB geçişinde daha kısa süreli ısı akışı olurken, bunun tersi; giren ısı miktarının artışıyla kaynak dikişi-ITAB arasındaki ısı akış süresi artarak mikroyapıyı doğrudan etkilemiştir.

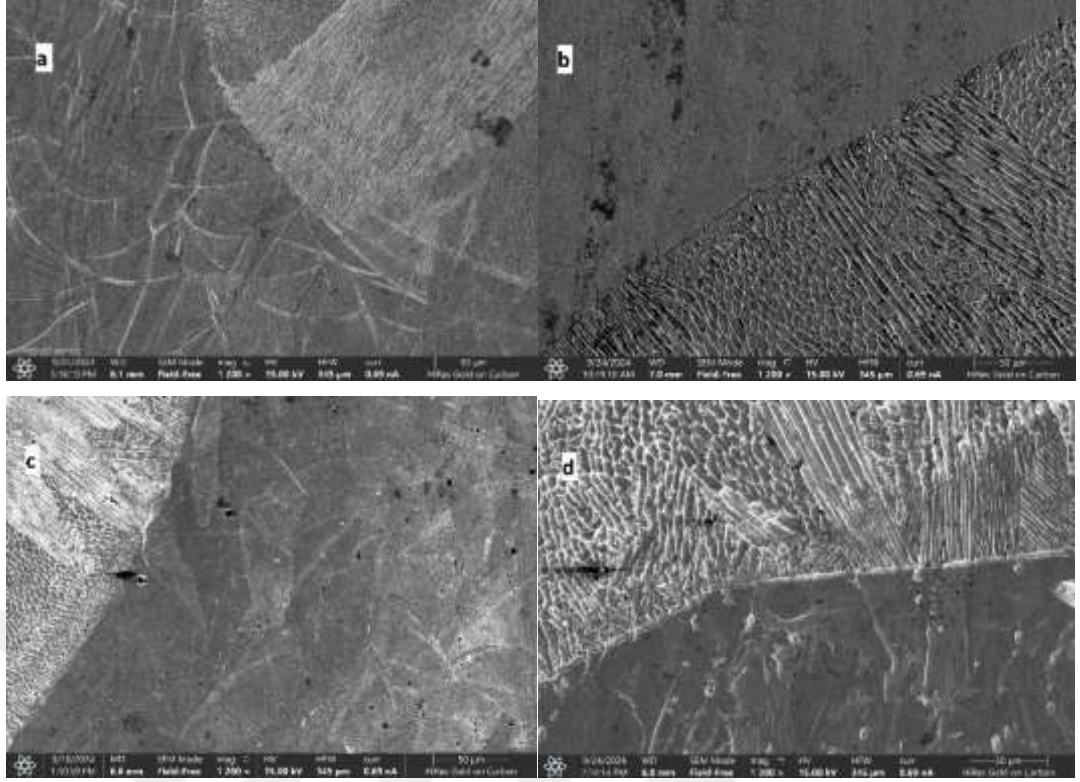
Şekil 6.4 a-d SEM mikroyapıları incelendiğinde en düşük ısı girdisinin Şekil 6.4-a’da olduğu, en yüksek ısı girdisinin ise Şekil 6.4-d’de olduğu tespit edilmiştir. Buna göre Şekil 7.4-a’da daha ince taneli mikroyapısal dağılım gözlemlenirken Şekil 6.4-d’de yeniden kristalleşme etkisi ile daha kaba taneli bir geçiş bölgesi belirlenmiştir.

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynak edilebilirliği ortaya koyan temel unsurlardan biri, kaynak banyosunun katılaşma sürecinde sıcak çatlak oluşmaması, diğeri ise kaynak dikişi ve ITAB’da karbür irileşmesinin olmaması fenomenidir. Seçilen kaynak parametreleri ile her ne kadar plakada farklı katılaşma süreçleri ve buna bağlı olarak soğuma hızları ile ortaya çıkan farklı mikroyapılar elde edilmiş olsa da, bu parametreler ile gerçekleştirilen kaynakların hiçbirinde kaynak

dikişı için sıcak çatlak ve ITAB’da aşırı karbür irileşmesi gözlemlenmemiştir. (Şekil 6.4a-d).

Uygun kaynak değerleri için seçilen laser gücü, ışın genişliği, frekans ve gaz debisine bağlı olarak gerçekleşen birleşmelerde giren ısı değerler kaynak banyosundaki katılma hızlarına bağlı olarak farklı ısı akışlar ortaya çıkarmıştır. Her 4 numune için sıcak çatlak ve aşırı karbür irileşmesi gözlemlenmemiş olsa da, seçilen kaynak parametrelerine bağlı olarak mikroyapısal farklılıklar ve buna bağlı mekanik özellik farklılıkları ortaya çıkmıştır. Şekil 6.4-a’da ısı sürecin hızlı olması daha ince bir mikroyapısal dağılım sonucunu ortaya çıkartırken, Şekil 6.4-c’de görüldüğü gibi; özellikle ITAB’da tane irileşmesi ve ayrıca daha büyük boyutta karbür dağılımı tespit edilmiştir. Böylesi bir mikroyapısal farklılık Şekil 6.4-c numunesinde daha düşük mekanik özelliklerin oluşumuna neden olmuştur.

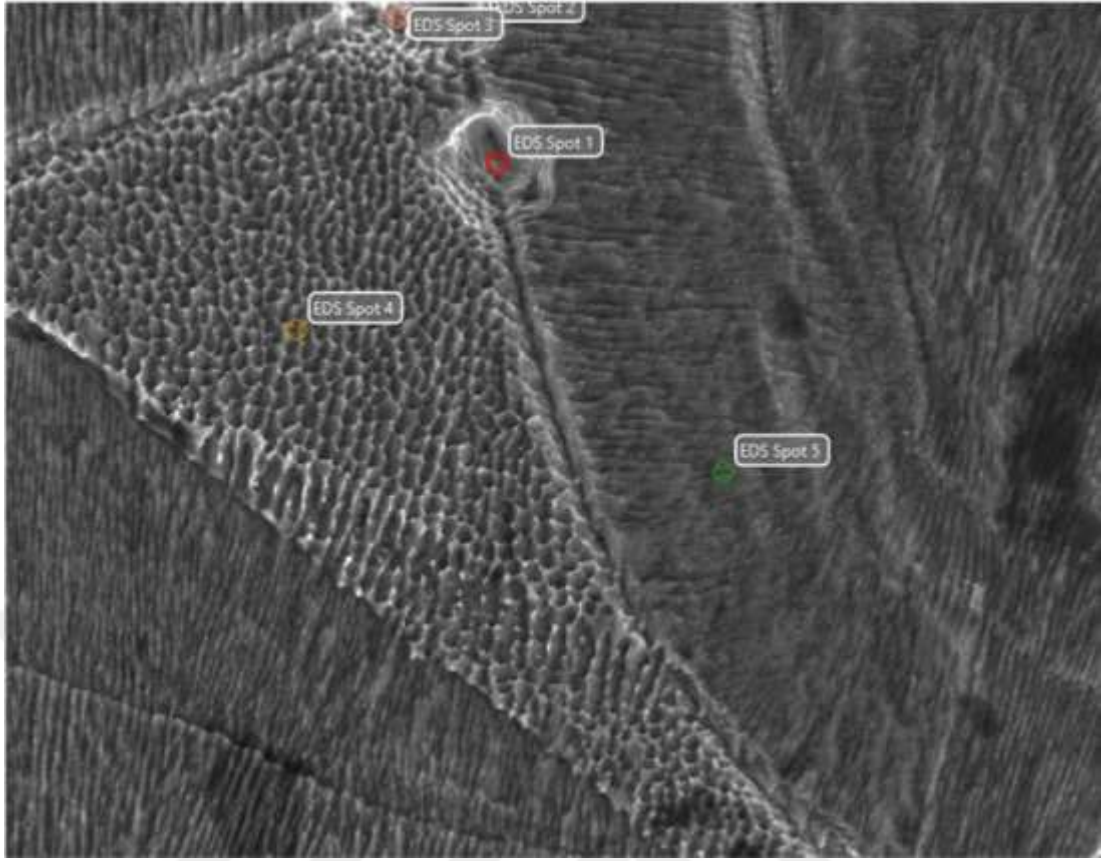
SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre; her 4 numunede farklı mikroyapısal dağılım görülmüş olsa da, laser ışını ile yapılan kaynak uygulamalarının tamamında, geleneksel kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilen birleşmelere göre toplamda giren ısı değerler düşüktür. Buna bağlı olarak her 4 numune için sıcak çatlamanın olmadığı ve aşırı karbür çökmesinin gerçekleşmemesi nedeniyle tane sınırı korozyonunun riskinin oluşmayacağı söylenebilir. 4 farklı uygulamada kullanılabilecek bu numunelerin kaynak kabiliyetleri laser ışını ile birleştirme ile uygundur.



Şekil 6.4: DLMS Yöntemi ile Üretilmiş Plakaların Laser Işın Kaynağı Sonrasında Kaynak Dikişİ-ITAB Geçişİ SEM Mikroyapıları

6.3 EDS Analizi

Kaynak edilmiş parçaların kaynak bölgesinde (kaynak dikişİ ve ITAB) oluşan karbürlerin faz analizleri (SEM-EDS) yöntemi ile tespit edilmiş olup, elde edilen sonuçlar, DLMS ile üretilmiş esas metal için ve 4 plakanın farklı parametreler ile kaynak edilmiş numunelerinde ITAB, kaynak dikişİ SEM görüntülerinden analiz edilerek Şekil 6.5 – Şekil 6.13 ve Çizelge 6.1 - Çizelge 6.9’da verilmiştir.

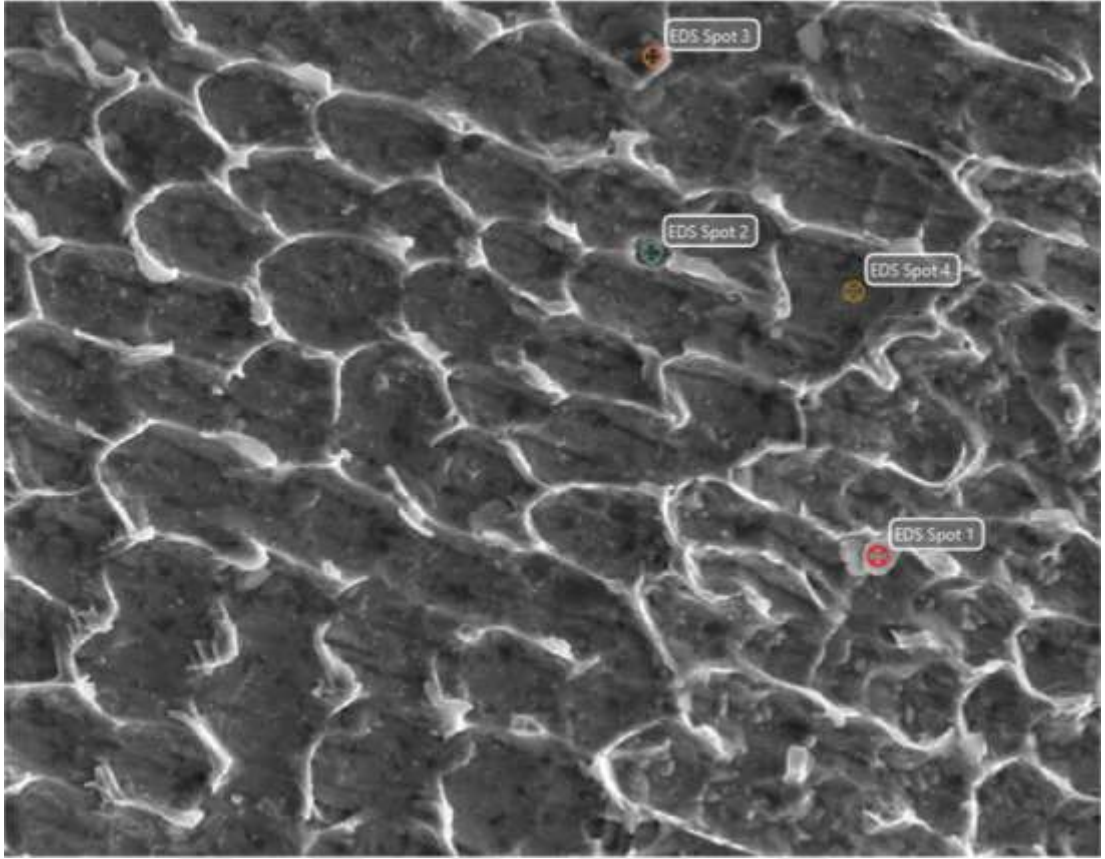


Şekil 6.5: DLMS Yöntemi ile Üretilmiş 316L Plakanın Esas Metal İçin EDS Analiz Noktaları

DLMS yöntemi ile üretilmiş parçaların EDS analizleri Şekil 6.5'te görüldüğü gibi farklı noktalardan alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapıda bulunan elementlerin % ağırlıkça eldesi analizleri sonuçları şekilde belirlenen noktalara göre Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1: DLMS Yöntemi ile Üretilmiş 316L Plakanın Esas Metal İçin EDS Analiz Sonuçları

Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)				
	1	2	3	4	5
C	2,04	2,44	8,11	1,54	2,80
Cr	24,52	20,91	15,78	17,46	17,23
Ni	5,03	7,89	11,68	12,72	12,55
Fe	68,41	69,57	64,43	68,28	67,42



Şekil 6.6: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 4mm, gaz Debisi: 135 Bar

Çizelge 6.2: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in Kaynak Dikişi EDS Analiz Sonuçları

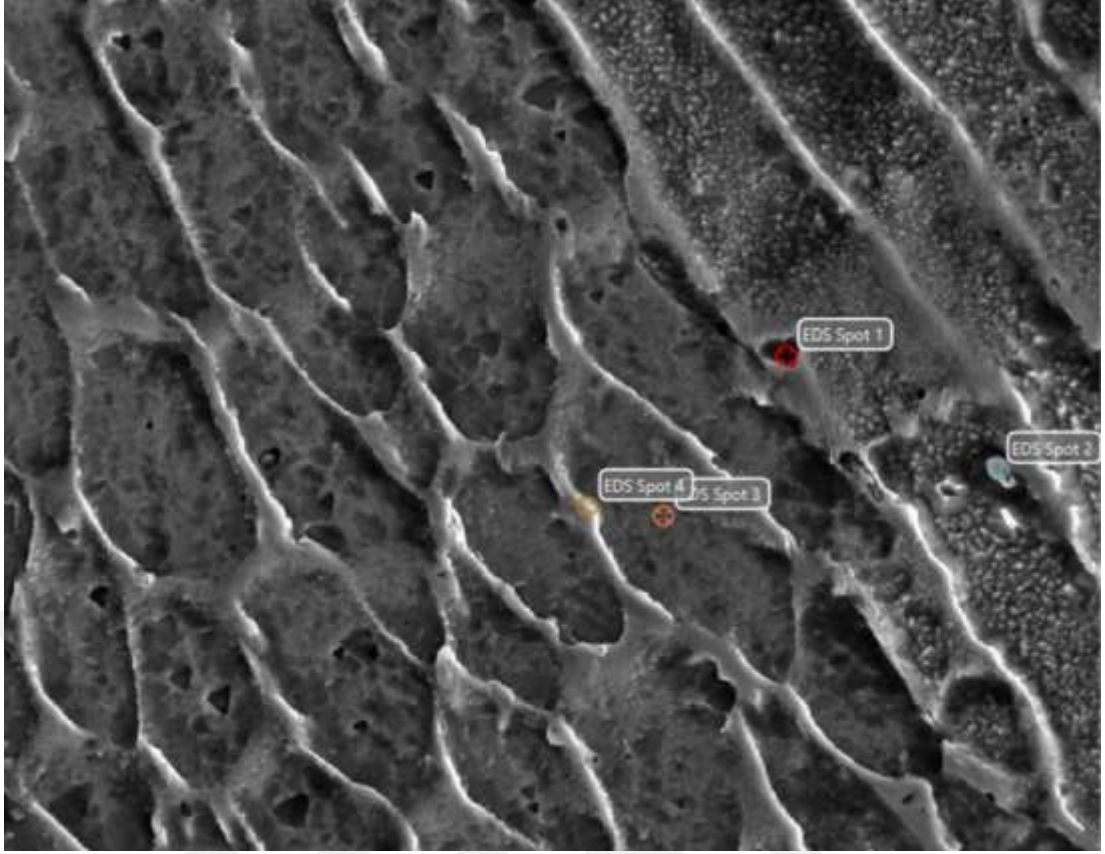
Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)			
	1	2	3	4
C	10,95	0,23	29,41	5,69
Cr	4,84	20,35	16,01	16,87
Ni	1,75	12,65	6,04	11,37
Fe	82,46	66,70	48,54	66,07



Şekil 6.7: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in ITAB'daki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 4mm, Gaz Debisi: 135 Bar

Çizelge 6.3: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune1'in ITAB'daki EDS Analiz Sonuçları

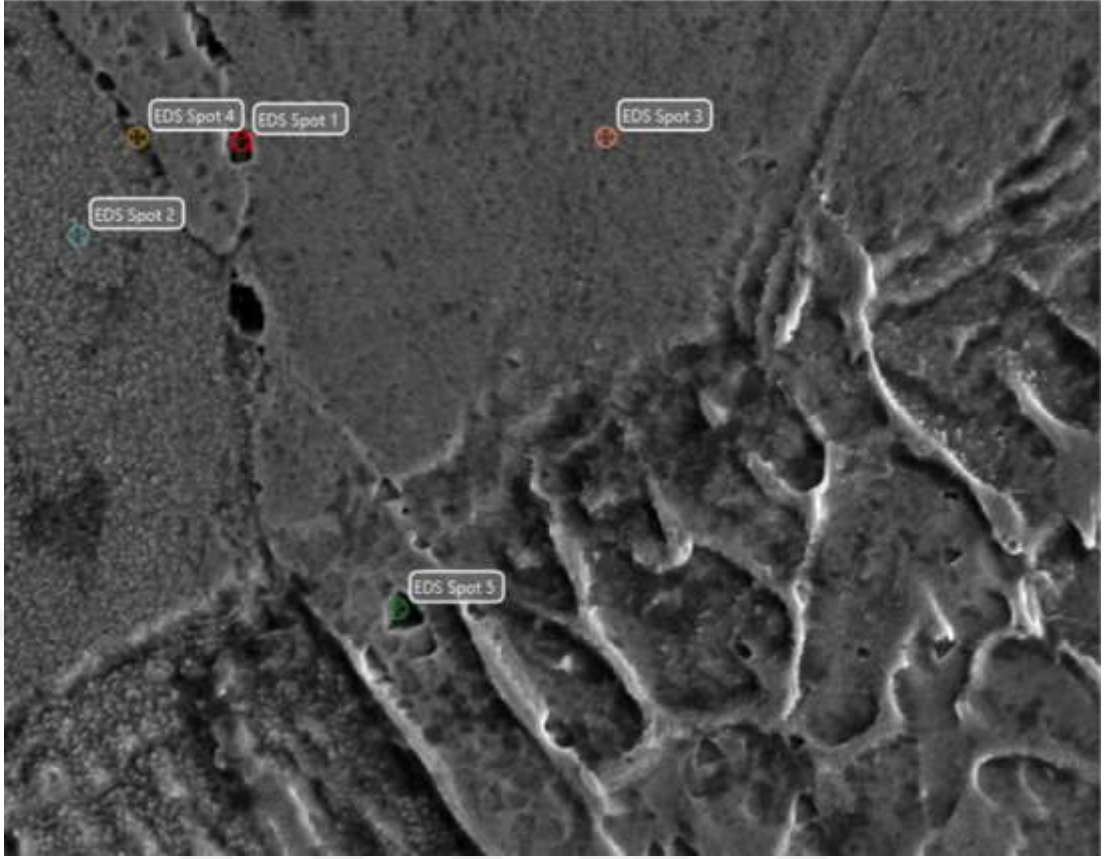
Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)					
	1	2	3	4	5	6
C	2,76	2,24	4,12	0,01	3,06	0,13
Cr	18,02	17,52	17,33	19,18	17,22	18,07
Ni	12,77	12,72	11,2	11,79	12,90	12,68
Fe	66,45	67,02	67,35	69,02	66,82	69,12



Şekil 6.8: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 130 Bar

Çizelge 6.4: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin Kaynak Dikişi EDS Analiz Sonuçları

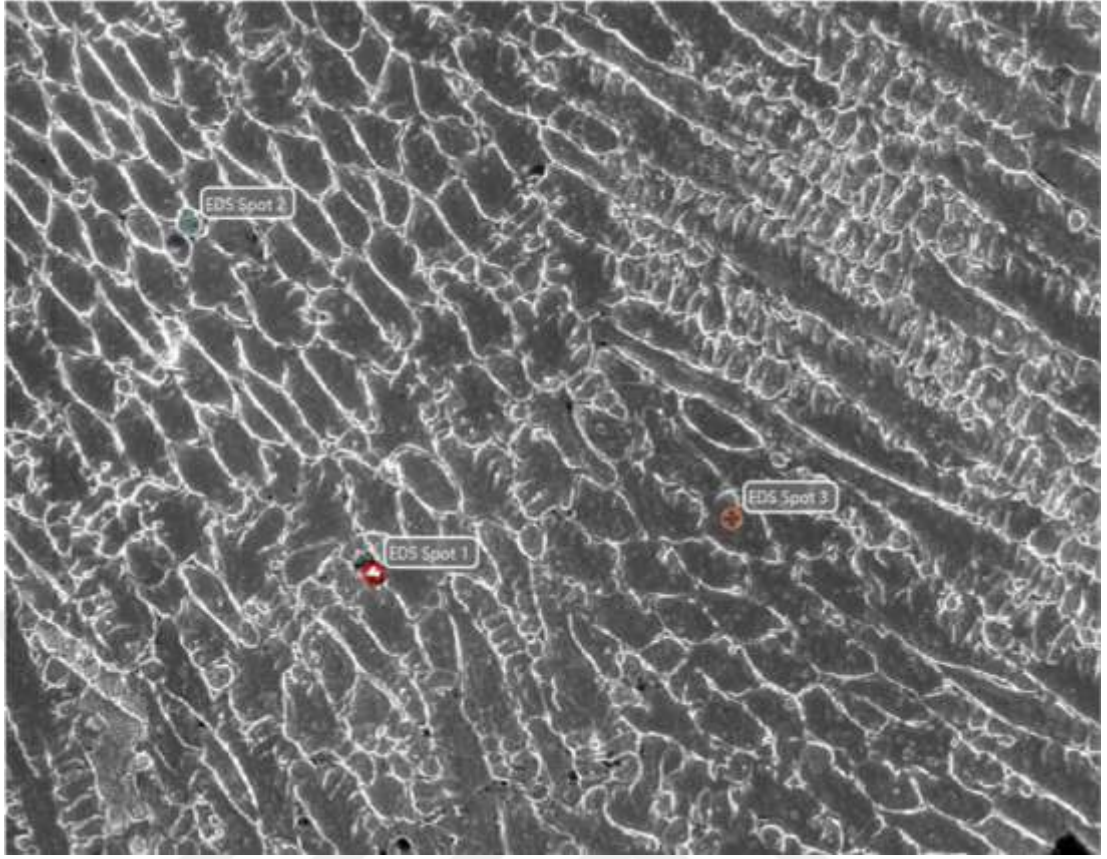
Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)			
	1	2	3	4
C	12,18	4,37	3,50	4,53
Cr	17,01	16,76	16,04	16,79
Ni	9,87	12,77	12,44	12,71
Fe	60,94	66,10	68,02	65,97



Şekil 6.9: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin ITAB'daki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 2100 W, Frekans: 10 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 130 Bar

Çizelge 6.5: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune2'nin ITAB EDS Analiz Sonuçları

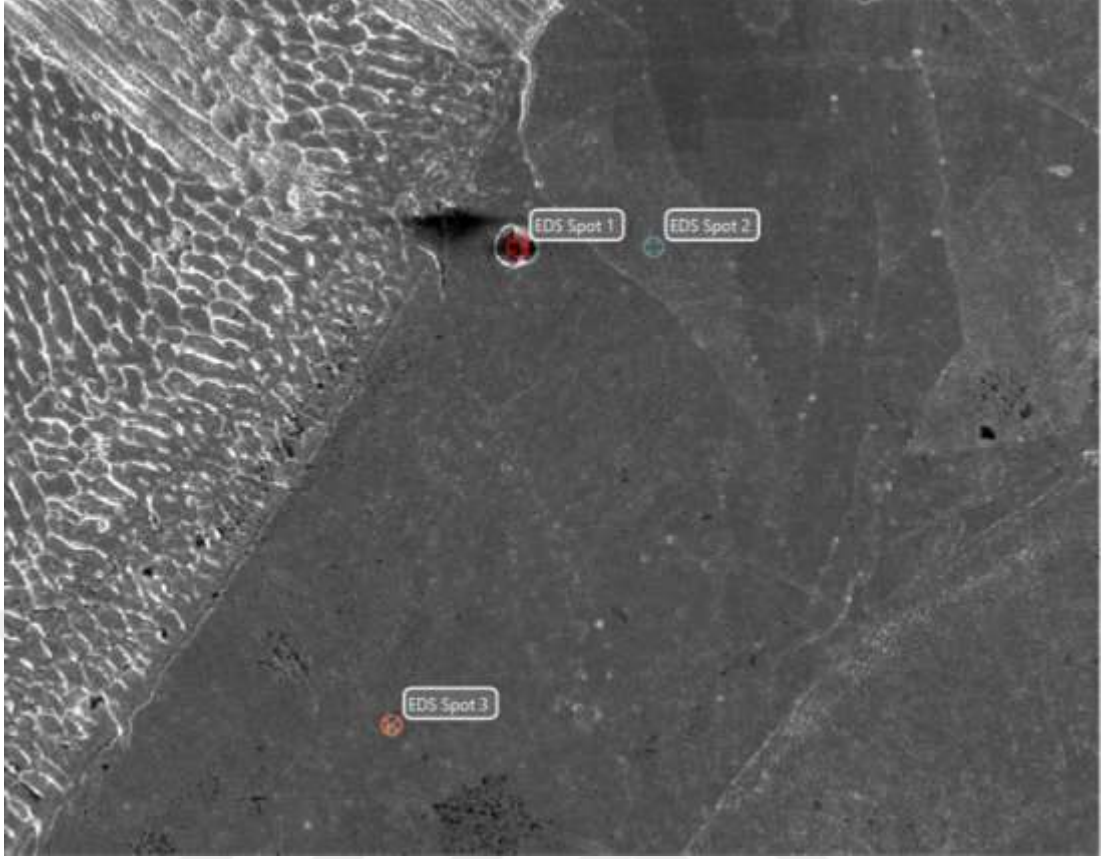
Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)				
	1	2	3	4	5
C	1,08	5,55	2,81	4,29	6,26
Cr	18,60	16,26	16,40	16,49	14,57
Ni	11,04	12,63	12,60	12,40	11,68
Fe	86,28	65,56	68,19	66,82	67,49



Şekil 6.10: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 2 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 120 Bar

Çizelge 6.6: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün Kaynak Dikişi EDS Analiz Sonuçları

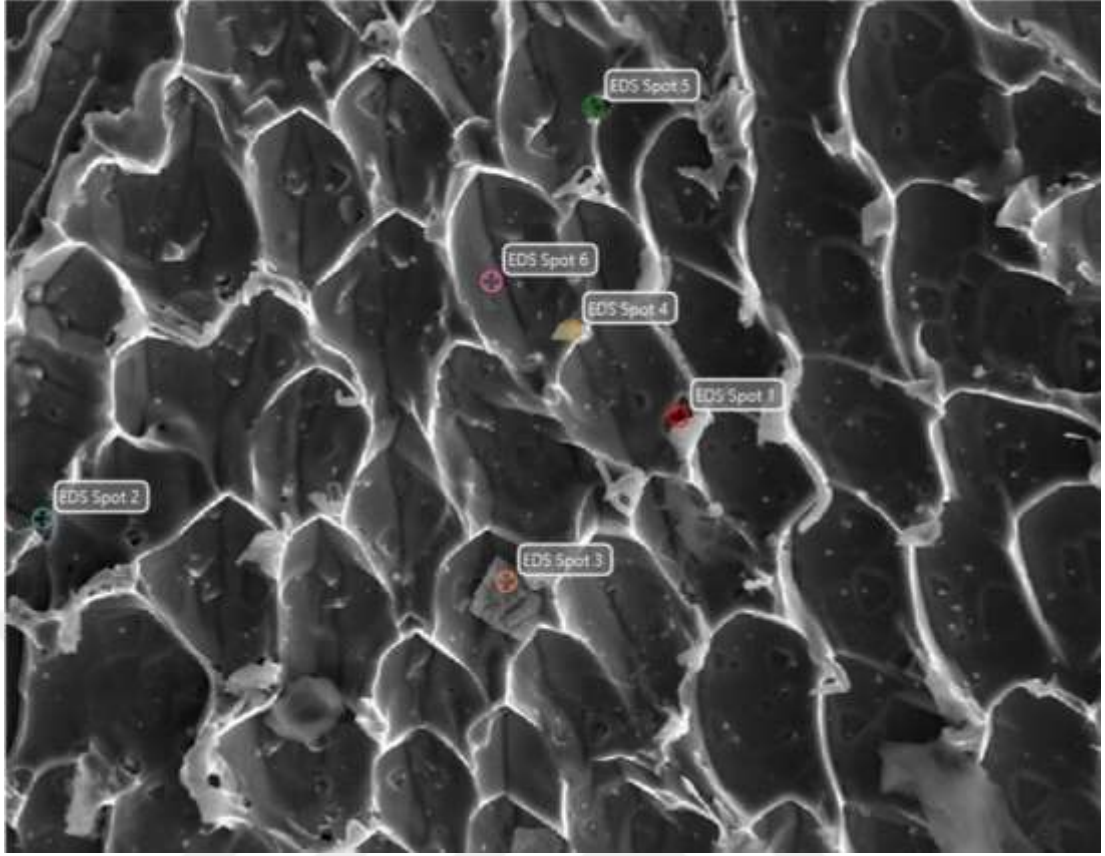
Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)		
	1	2	3
C	37,99	0,02	7,13
Cr	5,92	16,97	15,87
Ni	2,86	12,06	12,08
Fe	53,23	70,95	64,92



Şekil 6.11: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün ITAB EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 2 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 120 Bar

Çizelge 6.7: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune3'ün ITAB EDS Analiz Sonuçları

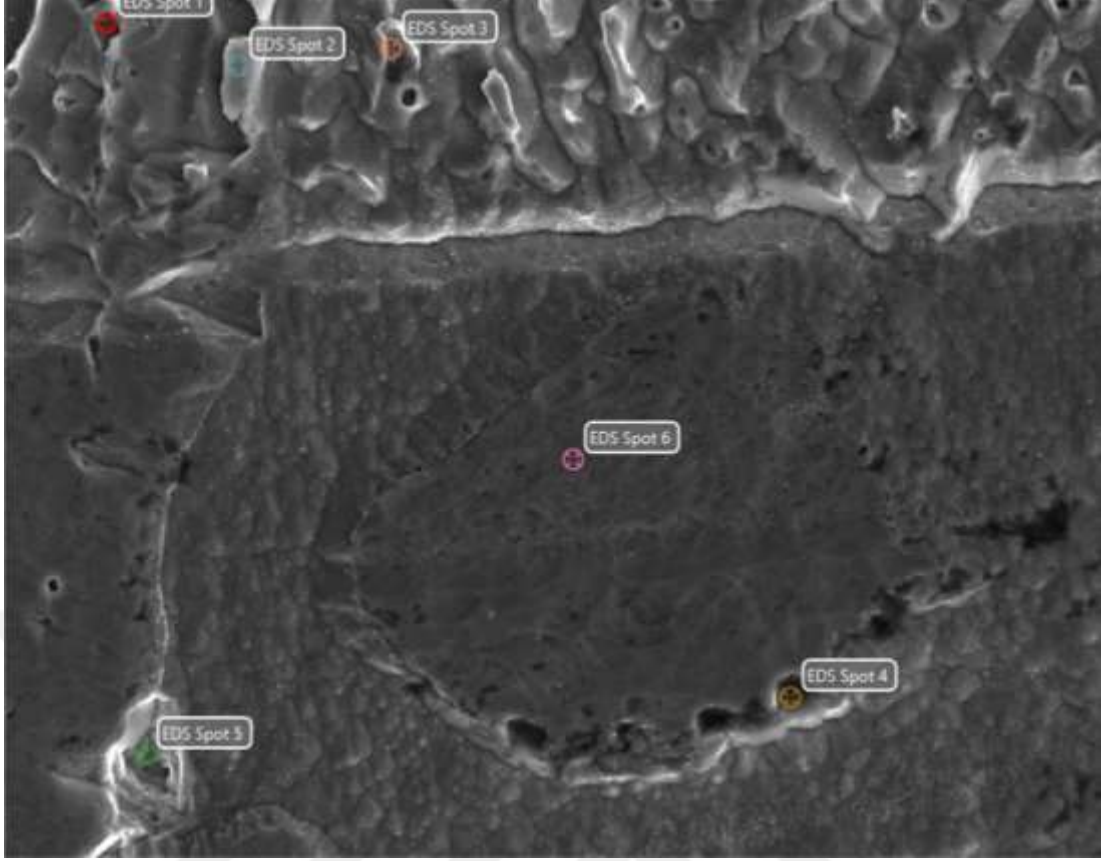
Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)		
	1	2	3
C	0,32	4,67	5,01
Cr	30,53	16,81	16,87
Ni	1,99	12,60	12,61
Fe	67,16	65,92	65,51



Şekil 6.12: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün Kaynak Dikişindeki EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 4 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 125 Bar

Çizelge 6.8: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün Kaynak Dikişi EDS Analiz Sonuçları

Element	EDS Analiz Noktası (% Ağı.)					
	1	2	3	4	5	6
C	0,03	0,09	1,50	7,64	2,81	10,44
Cr	20,32	20,14	21,15	20,51	18,28	14,94
Ni	9,95	9,00	4,30	8,24	12,72	11,04
Fe	69,7	70,77	73,05	63,61	66,19	63,58



Şekil 6.13: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün ITAB EDS Analiz Noktaları; Kaynak Parametreleri: Laser Gücü: 1500 W, Frekans: 4 Hz, Işın Genişliği 5mm, Gaz Debisi: 125 Bar

Çizelge 6.9: Laser Işını ile Kaynak Edilmiş Numune4'ün ITAB EDS Analiz Sonuçları

Element	EDS Analiz Noktası (% Ağ.)					
	1	2	3	4	5	6
C	11,11	5,65	1,02	44,61	3,27	2,70
Cr	16,03	17,57	19,41	9,76	22,08	16,93
Ni	10,32	13,00	13,12	6,55	7,03	12,88
Fe	62,54	63,78	66,45	39,08	67,62	67,49

EDS sonuçları değerlendirildiğinde; kaynak parametrelerine bağlı olarak hem kaynak dikişinde hem de ITAB'da krom karbür çökelmeleri görülmüş ve buna bağlı olarak dikiş ve ITAB'da bölgesel krom fakirleşmesi ortaya çıkmıştır.

Kaynak edilmiş numunelerde oluşan kaynak dikişlerinde genel olarak östenit matris yapı ve sınır bölgelerde karbür ötektiği görülmüştür. Kaynak parametrelerine göre ısı girdisi yüksek olduğunda ve buna bağlı olarak katılaşma hızının difüzyona

olan etkisiyle bölgesel karbür çökeltisinin oluştuğu da belirlenmiştir. Benzer durum ITAB'da da ortaya çıkmış ve özellikle kaynak dikişine yakın bölgelerde bu durum kendini daha etkin bir şekilde belli etmiştir. Gerek kaynak dikişinde gerekse ITAB'da oluşan bu karbür çökeltilerinin EDS nokta analiz sonuçları Şekil 6.5'ten Şekil 6.13'e kadar gösterilmiş olup bu bölgelerde 2 (iki) şekilde korozyona dayanım değerlerinin düşme riskinin olabileceği söylenebilir; 1. durumda krom fakirleşmesi etkisi ile korozif ortama karşı dayanımın düşmesi, 2. durumda ise çökelti ve matris arasındaki kimyasal potansiyel farkın büyümesi nedeni ile, galvanik hücre etkisiyle korozyon dayanımının düşmesidir.



7. SONUÇLAR

DLMS tekniği ile üretilen malzemelerin ısıtılma işlemi, talaşlı şekil verme, plastik şekil verme ve kaynak gibi son işlem yapmadan doğrudan kullanım yerlerinde servis edilmesi, bu tekniğin en büyük avantajı olarak görülmektedir. Ancak gelişen teknolojiye göre, değişen malzeme taleplerine göre ve bunların genelinde parça şeklinin, boyutunun ve farklı malzemeler ile birlikte çalışma isteklerinin günümüzde belirgin bir şekilde artmış olması, DLMS tekniği ile üretimin yetersizliğini ve bu nedenle en büyük dezavantajını ortaya çıkarmaktadır. Özellikle farklı malzeme kombinasyonlarında ve yapısal olarak farklı boyutlardaki taleplerin karşılanmasında bu yöntem sınırlı bir şekilde bu taleplere yanıt vermektedir. Bu bağlamda DLMS tekniği ile üretimin daha geniş sahalarda rol oynayabilmesi için bu teknik ile üretilmiş parçaların, özelliklerin bozulmadan kaynak tekniği kullanılarak daha geniş bir yelpazede kullanım sahasına açılma çalışmaları ve araştırmaları yoğun olarak devam etmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında DLMS tekniği ile üretilmiş 316L plakaların farklı boyutlarla servis edilmesi durumu hipotezi ile, üretilmiş plakaların laser ışını yöntemiyle birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Plakaların laser ışını ile birleştirilmesinde herhangi bir ilave malzeme kullanılmadan, sadece laser ışını parametreleri, kaynak hızı ve kullanılan gaz gibi değişkenlerle farklı değerlerle kaynak işlemleri yapılmıştır.

Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilmiş olan eklemeli imalat ürünlerinin kaynak dikişi, ITAB ve esas metal bölgelerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon çalışmasında amaç DLMS tekniği ile üretilmiş bir ürünün kaynak tekniği ile ne kadar bir değişime uğradığı, mikroyapısal bu değişimlerin ve dönüşümlerin malzemenin mekanik özelliklerinde nasıl etki ettiğini tespit etmek olmuştur. Bu amaçla her kaynak sonrasında kaynak dikişi ve ITAB ışık mikroskobu, SEM görüntüleme tekniği ile mikroyapısal olarak incelenmiş, her bölgede sertlik ve EDS analizleri ile yapısal dönüşümler mikroyapıya bağlı olarak ortaya konmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre; uygun olmayan laser gücü, laser ışın çapı, kaynak hızı ve kullanılan gaz debisi parametrelerinin kullanılmasıyla aşağıda yer alan birleşme özellikleri ortaya çıkmıştır:

1. Laser gücünün artışıyla kaynak banyosunda yüksek seviyede sıçrantı oluşmuş, katılaşma sonucunda kaynak dikişinin yüzeyinde sıçrantıya bağlı olarak kavitasyon gözlemlenmiştir.
2. Kaynak çapının geniş seçilmesi (5 mm) ile eklemeli imalat ürünlerinin birleştirilmesinde geniş bir kaynak dikiş geometrisi ortaya çıkmış ve bunun sonucunda toplam giren ısı miktarına bağlı olarak daha yüksek oranda karbür çökmesi tespit edilmiştir.
3. Kaynak hızının yavaş olmasına bağlı olarak giren ısı miktarının özellikle ITAB'da çökelti miktarının azalmasına ve boyutunun artışına yol açmış, bunun sonucunda esas metale göre bu bölgede sertlikte düşme görülmüştür.
4. Kullanılan Argon gazının 125 lt/dk'dan düşük olması durumunda kaynak banyosunda yüksek düzeyde gözenek gözlemlenmiştir.

Farklı parametreler ile gerçekleştirilen kaynaklarda tezin amacına yönelik, eklemeli imalat ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik malzemelerin özelliklerinin kullanılabilir seviyede olacak şekilde minimum seviyede değişmesine izin verecek şekilde en uygun kaynak parametreleri ile çalışmalar sürdürülmüştür. Uygun olmayan kaynak parametrelerinin değiştirilmesi ve deneylerin yenilenmesi sonucunda aşağıdaki kaynak birleşme sonuçları elde edilmiştir:

1. Laser gücü, diğer parametreler de optimize edildikten sonra en uygun değer ile 316L paslanmaz çeliğe etki edilerek, sıçrantı olmaksızın ve ayrıca yeterli bir nüfuziyet derinliği ile birleşme sağlanmıştır.
2. Laser ışın çapının düşürülmesi ile daha derin ve hızlı kaynak yapma imkanı sağlanmış, ayrıca ışın çapının düşürülmesi ile laser güç değerinin de azaltılması ve böylece sıçrantının önüne geçilmesi de gerçekleştirilmiştir. Bunların sonucunda kaynak sırasında giren toplam ısı miktarı da azaltılmıştır.
3. Giren ısı miktarının kaynak ışın çapı ile düşürülmesi ve buna göre kaynak hızının artırılması sonucunda gerek kaynak dikişinde gerekse ITAB'da çökeltilerin dağılımları esas metaldeki çökelti dağılımına benzer olacak

şekilde ortaya çıkartılmıştır. Böylece dikiş ve ITAB'da elde edilen mikroyapıya göre mekanik özellikler de esas metal özellikleri ile benzer şekilde ortaya çıkmıştır.

4. Yeterli gaz kullanımıyla laser önünde oluşan plazmanın yeterli süpürülmesi sayesinde hem seçilen laser gücünün etkin olarak kullanılması sağlanmış hem de kaynak bölgesinde yeterli bir koruma ortamı etkisi yaratmıştır.

Günümüzde ve gelecek zaman diliminde farklı boyut, farklı malzeme türleri ve farklı malzeme kombinasyonları ile servis koşullarına cevap verecek nitelikte üretimlerin gerçekleştirilmesi için, kullanılan üretim yöntemlerinden sonra kaynak işlemini zorunlu kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 316L paslanmaz çeliğin laser ışını ile birleştirilmesi sonucunda bu ürünlerin kaynaklı şekilde kullanılabileceği ortaya konmuş ve farklı ürünlerde de laser ışını ile birleştirme yapılarak farklı boyut ve kombinasyonda eklemeli imalatlı ürünlerin kullanılabilirliğine ışık tutulmuştur.

KAYNAKLAR

- Ahn, S.B. Walker, S.C. Slimmer, A. Russo, A. Gupta, S. Kranz, E.B. Duoss, T.F. Malkowski, and J.A. Lewis, (2011). Planar and Three-Dimensional Printing of Conductive Inks, J. Vis. Exp.
- Badıru, A.B, Valencia, V.V, LIU, D., (2017). Additive Manufacturing Handbook, CRC Press, U.S.A..
- Baeumel, A. (1975). Korrosionsarten und ihre Erscheinungsformen bei nichtrostenden Staehlen. Schw. Schn.
- Berman, B., (2012). "3D Printing:The New Industrial Revolution", Business Horizon, 55, 155-162.
- Brandt, M., Laser (2017). Additive Manufacturing, Materials, Design, Technologies and Applications, Woodhead Publishing, U.K.
- Brauns, E., und W. Schwenk (1961). Untersuchung der Lochfraßkorrosion an chemisch beständigen austenitischen Staehlen. Archiv Eisenhüttenwesen 32.
- Canzi, P., Marconi, S., Manfrin, M., Magnetto, M., Carelli, C., Simoncelli, A. M. ve Benazzo, M. (2018). KAYNAK YOK
- Castner, H.R. (1992) Material and Prosedure Considerations for Welded Austenitic Stainless Steels, 8th Annual North American Welding Research Conference, Edison Welding Institute, Columbus, Ohio.
- Class, I. (1965).Überblick über das Gebies der Spannungsrißkorrosion. Werkstoffe und Korrosion 16
- D. Espalin, D.W. Muse, E. MacDonald, and R.B. Wicker, (2014). 3D Printing Multifunctionality: Structures with Electronics, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol 72.
- De Ferri Metallographie II, Gefüge der Staehle, Verlag Stahleisen m.b.H. Düssrldorf, 1966.
- Duley, W.W., (1976). CO2 Lasers: effect and Applications, New York, Academic Pres.
- Ebner, R., (1995). Laserstrahlschweissen von Massivbauteilen: Konstruktion-Materialauswahl-Qualitaetsicherung-Bauteilprüfung, Montanuniversitaet, Leoben.
- Engstorm, D.S., Porter, B., Pacios, M., Bhaskaran, H., (2014). "Additive Manufacturing-A Review", Journal of Materials Research, 29, 1792-1816.
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams C.B., Wang, C.C.L., Shin, Y.C., Zhang, S., Zavaretti, P.D., (2015). "The Status,

Challenges and Future of Additive Manufacturing in Engineering”
Computer-Aided Design, 69, 65-89.

- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., (2015). Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, Springer, U.K.,
- Gu, D.D., Meiners, W., Wissenbach, K., Roprawe, R., (2012). “Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms, International Materials Reviews.
- Gültekin, N., (1985). Kaynak Tekniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, Sayı 184.
- Heuser, H. (1986). Schweißen von Duplex-Stählen, Jahrbuch Schweißtechnik’93, S. 69/77. DVS-Verlag, Düsseldorf 1992. Fiehn, H. , R. Spahn, H. Wehner und H. Zürn: Duplex-Stähle – ihre Verarbeitung und geeignete Schweißzusätze. DVS-Bericht 105, S. 29/35. DVS-Verlag, Düsseldorf.
- Hügel, H., (1992). Strahlwerkzeug Laser, Teubner-Studienbücher: Maschinenbau, ISBN 3-519-06134-1, Stuttgart.
- Jiang, R., Kleer, R., Piller, F.T., (2017). “Predicting the Future of Additive Manufacturing: A Delphi Study on Economic and Societal Implications of 3D Printing for 2030”, Technological Forecasting & Social Change 117, 84-97.
- Karaaslan, A. (2018). Mühendislik Aşamaları İçin Faz Diyagramları, İstanbul.
- Karaaslan, A., (1999). Laserstrahlschweißen heterogener Verbindungen, Institut für Metallkunde und Werkstoffprüfung, Dissertation an der Montanuniversität Leoben.
- Karaaslan, A., (2023). Laser ile Malzeme İşleme, Güncellenmiş 2. Baskı, Efe Akademi Yayınları.
- Karaaslan, A., Ebner, R., Brandstaetter, E. (1996). “Laserschweißen von Gußeisen GGG 40/50/60 mit Einsatzstahl 16 MnCr 5 unter Verwendung von Zusatzmaterial”, 4. Studententag des Hüttewesens , P17, Freiberg – Deutschland.
- Karaaslan, A., Ebner, R., Brandstaetter, E. (1999). “Primärkristallisation beim Laserschweißen von Chromstahl mit Stahlguss mit und ohne Zusatzstoff”, Metallographietagung, Prakt. Met. Sonderband 30, S.107, Austria.
- Khalil, C., Leutenecker, B., Meboldt, M., (2015). “Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing”, Procedia CIRP, 36, 230-235.
- Kıyasöz and A. Karaaslan, (2012). “Dübel Paslanmaz Çeliklerde Oluşan Yüksek Sıcaklık Fazlarına Genel Bir Bakış” Metalurji, vol. 162.
- Kogelnik, H., Li, T., (1966). Laser beams and resonators, Applications of Optics, 5 S.1550.
- Kong, D., Dong, C., Ni, X., Zhang, L., Yao, J., Man, C., Cheng, X., Xiao, K., Li, X.: (2019). Mechanical properties and corrosion behavior of selective laser melted 316L stainless steel after different heat treatment processes. J. Mater. Sci. Technol. 35, 1499.

- Maurer, E., (1933). Zur Entstehung der rostsicheren Staehle. Z. Für. Elektrochemie.
- Milewski, J.O., (2017). Additive Manufacturing of Metals, From Fundamentals Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry, Springer Series in Materials Science, U.S.A.
- Özer, G. (2020). Eklemeli Üretim Teknolojileri üzerine bir derleme. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi.
- Pitscheneder, W., Ebner, R., Breuer, A., Zuba, G., (1995). Schmelzbadsimulation beim Laserschweissen, BHM, Österreich.
- Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. J. Mater. Eng. Perform. 22, 3872
- Rapatz, E.: Die Edelstahle. Springer-Berlag, Berlin 1951.
- Richter, H., (1993). Fügetechnik, Schweissttechnik, DVS Verlag, ISBN 3-87155-904-0, 1995.
- Schmidt, W., und O. Jarleborg: Die nichtrostenden ferritischen Staehle mit 17% Chrom. Climax Molybdenum, Düsseldorf.
- Schultz, H., (1974). Elektronenstrahlschweissen, Fachbuchreihe Schweisstechnik Bd.55, DVS Verlag, Düsseldorf.
- Scwaab, P. (1983) Das Ausscheidungsverhalten des ferritisch-austenitischen Stahles X2CrNiMoN22.5 Sonderbaende der Praktischen Metallographie, Band 14
- Srivatsan, T.S., Sudarsan, T.S., (2016). Additive Manufacturing, Innovations, Advances and Applications, CRC Press, U.S.A.
- Sundman, B., Thermo-Calc user's guide, Stockholm.
- Szklarska-Smialowska, Z. (1971). Review of Literature on Pitting Corrosion Published since 1960. Corrosion (Houston) 27.
- Uriondo, A., Miguez, M.E., Perinpanayagam, S., (2015). "The Present and Future of Additive Manufacturing in the Aerospace Sector: A Review of Important Aspects", Journal of Aerospace Engineering.
- Uriondo, A., Miguez, M.E., Perinpanayagam, S., (2015). "The Present and Future of Additive Manufacturing in the Aerospace Sector: A Review of Important Aspects", Journal of Aerospace Engineering, 1-16
- Zhang, B., Xiu, M., Tan, Y.T., Wei, J., Wang, P. (2019). Pitting corrosion of SLM uncoated 718 sample under surface and heat treatments. Appl. Surf. Sci. 490, 556.