



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PASLANMAZ ÇELİKLERİN LAZER NOKTA KAYNAK
YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİNİN MİKRO YAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

ESRA ÇETİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ SERKAN APAY**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PASLANMAZ ÇELİKLERİN LAZER NOKTA KAYNAK
YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİNİN MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Esra ÇETİN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Etem GÜREL
Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Arzum IŞITAN
Pamukkale Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 18/07/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

18 Temmuz 2019

Esra Çetin

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarımın bir bölümü olan numune hazırlama işlemlerinde yardımlarından dolayı İstanbul ORLazer firmasından Fatih Bey'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarım boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Anlaş Anadolu Lastik A.Ş' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sadece akademik çalışmam süresince değil, hayatım boyunca her zaman destek olan anneme ve kız kardeşlerime çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP- 2017.07.04.644 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir

18 Temmuz 2019

Esra Çetin

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER.....	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER	8
2.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	10
2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ	11
2.3. PASLANMAZ ÇELİKLERE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİLERİ..	13
2.3.1. Karbon (C)	13
2.3.2. Krom (Cr).....	13
2.3.3. Nikel (Ni)	13
2.3.4. Mangan (Mn).....	14
2.3.5. Alüminyum (Al).....	14
2.3.6. Niyobyum (Nb)	14
2.3.7. Azot (N).....	14
2.3.8. Kükürt (S).....	14
2.3.9. Titanyum (Ti)	14
2.3.10. Silisyum (Si).....	14
2.3.11. Fosfor (P)	15
2.3.12. Tungsten (W).....	15
2.4. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜSTÜNLÜKLERİ.....	15
2.5. KAYNAK YÖNTEMLERİ VE PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI..	18
2.6. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI	22
2.6.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	23
2.6.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler	26
2.6.3. Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler	29
2.6.4. Martenzitik Paslanmaz Çelikler	30
2.6.5. Çökeltme Sertleştirilmesi Uygulanabilen Paslanmaz Çelikler	32
3. LAZER VE KAYNAK TEKNOLOJİSİ	33
3.1. LAZER.....	33
3.1.1. Lazer Işınının Özellikleri	34

3.2. LAZER KAYNAK TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ	35
3.3. LAZERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI	36
3.4. LAZER TÜRLERİ	38
3.4.1. Katı Lazerler	38
3.4.2. Gaz Lazerler	38
3.4.3. Boyar Madde Lazerleri	38
3.4.4. Yarı İletkenli Lazerler	38
3.4.5. Serbest Elektronlu Lazerler	38
3.5. LAZER KAYNAĞI	39
3.6. LAZER KAYNAĞI ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	43
3.6.1. Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı	43
3.6.2. İletimsel Lazer Kaynağı	44
3.7. LAZER KAYNAĞINDA KULLANILAN KORUYUCU GAZLAR.....	45
3.8. LAZER KAYNAK PARAMETRESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER	46
3.9. LAZER KAYNAĞIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	47
3.10. KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN LAZER SİSTEMLERİ.....	48
3.11. CO ₂ LAZER SİSTEMİ	48
3.12. ND: YAG LAZER SİSTEMİ	50
3.12.1. Nd: YAG Lazer Parametrelerinin Dikış Kaynağına Etkisi	52
3.12.2. Nd: YAG Lazer Kaynak Yönteminin Avantajları;	55
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	56
4.1. DENEYDE KULLANILAN ANA MALZEME	56
4.2. DENEYLERDE KULLANILAN KAYNAK MAKİNESİ	56
4.3. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI VE KAYNAĞIN YAPILIŞI.....	57
4.3.1. Kaynak Numunelerinin Hazırlanması	57
4.3.2. Lazer Kaynağının Yapılışı	59
4.4. NUMUNE HAZIRLAMA VE METALOGRAFİK İNCELEME.....	60
4.5. EDS ÇİZGİ ANALİZİ	63
4.6. NUMUNE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	63
4.7. ÇEKME TESTİ	64
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	66
5.1. DENEY NUMUNELERİNİN MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	66
5.1.1. AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları	66
5.1.2. AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları	68
5.1.3. AISI 321 Östenitik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları	70
5.1.4. AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları	72
5.2. LAZER NOKTA KAYNAĞI MAKRO GÖRÜNTÜLERİ.....	74
5.3. EDS ÇİZGİ ELEMENT ANALİZİ	75
5.4. SERTLİK ÖLÇÜMÜ DENEY SONUÇLARI.....	77
5.5. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI.....	79
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
7. KAYNAKLAR	84



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. İnce krom oksit tabakası.	8
Şekil 2.2. Demir- krom denge diyagramı.	10
Şekil 2.3. Paslanmaz çeliklerin üretim şeması.	12
Şekil 2.4. Schaeffler ve Delong diyagramları.	17
Şekil 2.5. Katılaşma faz sınırlarını da içeren WRC-1992 diyagramı.	17
Şekil 2.6. Krom ve nikel miktarlarına göre paslanmaz çeliklerin mikro yapıları.	23
Şekil 2.7. Östenitik paslanmaz çeliğin mikro yapısı.	25
Şekil 2.8. Ferritik paslanmaz çelikte ITAB'da tane irileşmesi ve martenzit ağı.	28
Şekil 2.9. Ferritik çeliğin mikro yapısı.	28
Şekil 2.10. Ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı.	29
Şekil 2.11. Martenzitik paslanmaz çeliğin yapısı.	31
Şekil 2.12. Martenzitik paslanmaz çelik kaliteleri.	31
Şekil 3.1. Basitleştirilmiş tipik bir lazer şeması.	34
Şekil 3.2. Lazer ile kaynak işlemi sırasında oluşan bölgeler: Ana metal, Erimis bölge, ısı tesiri altındaki bölge.	40
Şekil 3.3. Bir lazer cihazının temel elemanları.	40
Şekil 3.4. Darbeli lazer anahtar deliği kaynak işleminin şematik çizimi.	41
Şekil 3.5. Lazer sistemi.	42
Şekil 3.6. Lazer ışının malzeme yüzeyine etki bölgesi.	43
Şekil 3.7. Derinlemesine nüfuz kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumunun şematik kesit görünüşü.	44
Şekil 3.8. İletimsel lazer kaynağı kapalı kaynak havuzunun kesit görünüşü.	45
Şekil 3.9. CO ₂ lazer üretim sistemi.	49
Şekil 3.10. Nd: YAG lazer sistemi.	51
Şekil 3.11. Nd: YAG lazer sistemi elemanları prensip şeması.	52
Şekil 3.12. Atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı.	52
Şekil 3.13. a) Direnç nokta kaynağı b) Halka-lazer kaynağı c) C-lazer kaynağı d) Brezel-lazer kaynağı örneklerinin kesitleri.	54
Şekil 4.1. Kullanılan Nd: YAG lazer kaynak sistemi.	57
Şekil 4.2. Numune ölçülerinin gösterimi.	58
Şekil 4.3. Numune sabitleme düzeneği a) Kapalı görüntü b) Kesit görüntüsü.	58
Şekil 4.4. Kaynak işlemine hazır numuneler.	59
Şekil 4.5. Bakalite alınan kaynatılmış paslanmaz çelikler.	61
Şekil 4.6. Zımpara ve parlatmada kullanılan cihazı.	62
Şekil 4.7. Nikon Eclipse MA100 model optik mikroskop.	62
Şekil 4.8. FEI Quanta FEG 250 model SEM cihazı.	63
Şekil 4.9. Mikro sertlik ölçüm cihazı.	64
Şekil 4.10. Çekme deneylerinin yapıldığı test cihazı.	65
Şekil 5.1. AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.	66
Şekil 5.2. AISI 304 çeliğinin kaynaklı birleştirme genel görüntüleri.	67
Şekil 5.3. AISI 304 malzemelerin kaynak bölgesinin optik mikroskop görüntüleri.	67
Şekil 5.4. AISI 304 malzemelerin ITAB görüntüleri.	68

Şekil 5.5. AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.	68
Şekil 5.6. AISI 316 çeliğinin kaynaklı birleştirme genel görüntüleri.	69
Şekil 5.7. AISI 316 malzemelerin kaynak bölgesinin optik mikroskop görüntüleri.	69
Şekil 5.8. AISI 316 malzemelerin ITAB görüntüleri.	70
Şekil 5.9. AISI 321 östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.	70
Şekil 5.10. AISI 321 çeliğinin kaynaklı birleştirme görüntüsü.	71
Şekil 5.11. AISI 321 malzemelerin kaynak metalinin optik mikroskop görüntüsü.	71
Şekil 5.12. AISI 321 malzemelerin ITAB görüntüsü.	72
Şekil 5.13. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.	72
Şekil 5.14. AISI 430 malzemelerin kaynak bölgesinde oluşan porozite görüntüsü.	73
Şekil 5.15. AISI 430 malzemelerin kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri.	73
Şekil 5.16. AISI 430 malzemelerin ITAB görüntüleri.	74
Şekil 5.17. a) 304 x 20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü b) 316 x 20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü c) 321 x 20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü d) 430 x 20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü.	75
Şekil 5.18. 304 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemedan kaynak dikişine doğru çizgi analizi.	76
Şekil 5.19. 316 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemedan kaynak dikişine doğru çizgi analizi.	76
Şekil 5.20. 321 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemedan kaynak dikişine doğru çizgi analizi.	77
Şekil 5.21. 430 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemedan kaynak dikişine doğru çizgi analizi.	77
Şekil 5.22. Sertlik ölçüm sonuçları.	78
Şekil 5.23. Lazer nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmiş numunelerin çekme grafikleri.	79
Şekil 5.24. AISI 304 malzemenin kopma görüntüsü üst alt sac.	80
Şekil 5.25. AISI 316 malzemenin kopma görüntüsü üst alt sac.	80
Şekil 5.26. AISI 321 malzemenin kopma görüntüsü üst alt sac.	81
Şekil 5.27. AISI 430 malzemenin kopma görüntüsü üst alt sac.	81

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler	18
Çizelge 2.2. Kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması.....	20
Çizelge 2.3. Yaygın olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik türleri	30
Çizelge 3.1. Lazerlerin genel kullanım alanları	37
Çizelge 3.2. Lazer kaynak parametrelerinin incelenmesi.....	46
Çizelge 3.3. CO ₂ moleküllerinin titreşim şekilleri	49
Çizelge 4.1. Paslanmaz çelik malzemelerin kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	56
Çizelge 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan Nd: YAG lazerinin teknik özellikleri.	57
Çizelge 4.3. Deney numunelerinin birleştirilme kombinasyonu.	59

KISALTMALAR

AA	Alternatif akım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AISI	Amerikan demir ve çelik enstitüsü
API	Amerika petrol enstitüsü
ASTM	Amerikan malzeme standardizasyon ve test kurumu
A-TIG	Aktif flaks tungsten inert gaz
DA	Doğru akım
DSC	Farklı tarama kalorimetrisi
EDS	Enerji dispersif spektrometresi
EN	European norm
HMK	Hacim merkezli kübik
HV	Vickers sertlik
IEC	International electrotechnical commission
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
MAG	Metal aktif gaz
MIG	Metal asal gaz
RSW	Nokta direnç kaynağı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TM	Tahribatsız muayene
TS	Türk standartları
TÜRKAK	Türk akreditasyon kurumu
TIG	Tungsten asal gaz
TRIP	Dönüşüm etkili plastisite çelikleri
YAG	Yitrium alüminyum garnet
XRD	X- Işınları difraksiyon
QP	Su verilmiş ve işlem görmüş

SİMGELER

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
Ar	Argon
C	Karbon
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbondioksit
H ₂	Hidrojen
He	Helyum
Kg	Kilogram
MHz	Mega hertz
Mn	Mangan
MnO	Mangan oksit
MgO	Magnezyum oksit
Nb	Niobyum
Nd	Neodimyum
O ₂	Oksijen
P	Fosfor
S	Kükürt
SiO ₂	Silisyum dioksit
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit
V	Vanadyum

ÖZET

PASLANMAZ ÇELİKLERİN LAZER NOKTA KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Esra ÇETİN
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY
Temmuz 2019, 88 sayfa

Paslanmaz çelikler, çeşitli endüstrilerde ve çevrelerde yaygın olarak kullanılmakta olan mühendislik malzemelerinin önemli bir sınıfını oluşturmaktadır. Gelişmekte olan Türkiye endüstrisinin paslanmaz çeliklere olan gereksinimi her geçen gün artmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler, martenzitik paslanmaz çelikler, ferritik paslanmaz çelikler, çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler ve çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler şeklinde baskın olan metalürjik fazlara göre sınıflandırılan paslanmaz çeliklerin büyük bir bölümünün kaynak kabiliyeti yüksektir ve ark kaynakları, direnç kaynakları, elektron ve lazer ışın kaynakları ile ergitmeli olarak kaynak edilebilirler. Kaynak ile malzeme birleştirme özellikle metal işlenen sanayilerde çok yoğun olarak kullanılan bir üretim yöntemidir ve temeli, herhangi bir dış enerji kaynağı ile birleştirilecek iki malzemenin birleşim bölgesinin ve eğer varsa dışarıdan eklenecek dolgu maddesinin yüksek enerji ile ısıtılarak malzemelerin eriyip birbirine yapışmasına dayanmaktadır. Bu çalışmada, paslanmaz çeliklerin kaynak yöntemlerinden olan lazer nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinin karakterizasyonu incelenecektir. Kaynak yapmak için kullanılan dış enerji kaynaklarından bir tanesi lazer ışınıdır. Lazer ışınının diğer enerji kaynaklarından en büyük farkı, kolaylıkla parça üzerinde istenilen noktaya yönlendirilebilmesidir. Bu sayede kaynakla birleştirilecek bölgeye istenilen miktarda enerji lokal olarak uygulanabilmektedir. Kullanılan lazer kaynağı yöntemiyle, 1 mm kalınlığındaki AISI 304, AISI 316 ve AISI 321 kalite östenitik, AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelik saclarının birleştirilebildiği gösterilmiştir.

Anahtar sözcükler: Lazer nokta kaynağı, Mikro yapı incelemesi, Paslanmaz çelik.

ABSTRACT

THE EFFECT OF WELDING STAINLESS STEELS WITH LAZER SPOT WELDING METHOD ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES

Esra ÇETİN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences,

Department of Composite Material Technologies

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Serkan APAY

July 2019, 88 pages

Stainless steel is an important class of engineering materials, which are widely used in various industries and environments. The demand of our developing country industry for stainless steels is increasing day by day. Most of the stainless steels classified as metallurgical phases predominantly in the form of austenitic stainless steels, martensitic stainless steels, ferritic stainless steels, precipitation hardenable stainless steels, and double phase (duplex) stainless steels. Have a high weldability and are resistant to arc welding, laser welding can be welded with laser beam welding. Welding is a method of production which is used extensively in metalworking industries, and is based on the combination of two materials to be combined with any external energy source and if it is heated with high energy of the filler material to be added from outside, it melts and bonds to each other. In this study, the characterization of the weld zone of stainless steels combined with laser spot welding, one of the welding methods of stainless steels, will be examined. One of the external energy sources used for welding is a laser beam. The biggest difference of laser beam from other energy sources is that it can be easily directed to the desired point on the part. In this way, the desired amount of energy may be applied topically to the area to be welded. It has been shown that 1 mm thick AISI 304, AISI 316 and AISI 321 quality austenitic and AISI 430 ferritic stainless steel sheets can be joined by laser spot welding method.

Keywords: Laser spot welding, Microstructure, Stainless steel.

1. GİRİŞ

Endüstride yaygın olarak kullanılan malzemelerden olan paslanmaz çeliklerin içeriğinde demir, karbon ve nikel alaşımları olup temel özelliklerini içerdikleri krom oranı belirler. Demir alaşımlı malzemelerin korozyon dayanımlarını arttırmak için yapılan çalışmalar sonucu gelişen paslanmaz çeliklerin kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışın temel nedeni korozyon ortamlarda, mekanik özelliklerini kaybetmeden gösterdikleri mükemmel korozyon dirençleridir [1]. Bunun yanında paslanmaz çeliklerin büyük bir bölümünün kaynak kabiliyeti yüksektir. Ark kaynakları, direnç kaynakları, elektron ve lazer ışın kaynakları ile ergitmeli olarak kaynak edilebilmeleri uygulama alanlarını daha da genişletmiştir. Ark kaynakları; örtülü elektrotla ark kaynağı, Tungsten Asal Gaz (TIG) kaynağı, Metal Asal Gaz (MIG) kaynağı, Tozaltı ark kaynağı şeklindedir. Direnç kaynakları ise elektrik direnç kaynağı, yakma alın kaynağı ve saplama kaynağı olarak sınıflandırılır [2].

Dünyada son yıllarda görülen hızlı teknolojik gelişim ve rekabet, kaynak yöntemleri gelişiminde de etkili olmuştur. Lazer kaynak yöntemiyle hızlı ve sağlam kaynaklı birleştirmeler elde edilmesi nedeniyle, bu yöntemin endüstride kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu yöntem ile diğer kaynak yöntemlerine nazaran lazer ışınları yönlendirilebilmelerinin iyi olması ve yüksek miktarda enerjinin, çok ufak bölgelere kolayca ulaşabilmesi sebebiyle oldukça ileri bir kaynak yöntemidir. Lazer ışının diğer enerji kaynaklarından en büyük farkı, kolaylıkla parça üzerinde istenen noktaya yönlendirilebilmesi sayesinde kaynak ile birleştirilecek bölgeye istenilen miktarda enerji lokal olarak uygulayabilmesidir [3].

1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu konu ile ilgili çeşitli literatür çalışmaları yapılmıştır.

Wang ve arkadaşları lazer nokta kaynak yöntemi kullanarak üç farklı güç girdisi ile nilkelli (Zr-Cu-Ni-Al) ve nikelsiz (Zr-Cu-Ag-Al) malzemeleri birleştirilerek kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini incelenmişlerdir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) ve Vicker'in mikro sertlik testleri sonucunda kristalizasyon davranışlarının

karşılaştırılması üzerine çalışmalar yaparak nikelsiz malzemenin daha iyi kaynaklanabilirliğe sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [4].

Hozorbakhsh ve arkadaşları hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak ince paslanmaz çelik levha (SUS304) üzerine lazer mikro-kaynak ile ısı transferi üzerine yaptıkları araştırmada geliştirilmiş termal modellerin uygulanmasında lazer gücü, tarama hızı ve spot çapı gibi lazer parametrelerinin pik değerinin üzerindeki önemli etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda ince paslanmaz çelik levhaların kaynak bölgesinin geometrisinin birleşme kuvvetinde önemli bir rolü olduğu ortaya koymuşlardır [5].

Meco ve arkadaşları maksimum 8000 W ile sürekli dalga fiber lazer kullanarak lazer kaynak-lehimleme tekniği 2 mm kalınlığında çelik (XF350) ile 6 mm kalınlığında alüminyuma birleştirmek için iletim modunda güç uygulandı [6].

Torkamany ve arkadaşları lazer kaynağı modunun, düşük karbonlu ve östenitik paslanmaz çeliklerin lazer nokta kaynaklarının mikro yapı ve mekanik performansına etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada zayıf tabakadaki füzyon bölgesi büyüklüğünün, düşük karbonlu çelik tabakanın, östenitik tabakanın mekanik mukavemetinin belirlenmesinde kontrol edici faktörler olduğu gösterilmiştir [7].

Desai ve Bag, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak lazer mikro nokta kaynaklarının sayısal simülasyonu ile termo-mekanik analizinde yer değiştirme kısıtlarının etkisi üzerine yaptıkları çalışmada ısı gerilmenin, mekanik kısıtlamalara kıyasla, sıcaklığa bağlı kalıntı gerilmelere ve plastik gerilmeye daha fazla etki eden faktör olduğunu gözlemlemişlerdir [8].

Baruah ve arkadaşı, modern endüstriyel gereksinimler için lazer mikro kaynağı yöntemini Ti6Al4V alaşımında kaynak atışının etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, lazer ısı kaynağının darbe parametrelerinin kaynak eklem yapısı üzerinde kesin bir etkiye sahip olduğunu, parametre seçimindeki karmaşıklık, numunenin geometrik boyutlarında azalma ile artacağını gösteren sonuçlar elde etmişlerdir [9].

Junhao Sun ve arkadaşları alüminyum alaşımı ve düşük karbonlu çelik gibi birbirinden farklı iki malzemenin lazer kaynağı ile birleştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, bu iki farklı malzeme sınıfının lazer mikro kaynak yöntemiyle birleştirilebileceğini göstermişlerdir [10].

Çalığülü ve arkadaşları farklı mikro yapısal karakteristik bileşenli AISI 430 ferritik ve AISI 304 Östenitik paslanmaz çeliğin CO₂ Lazer ışını ile kaynağını incelemişlerdir. Çalışmalarında, lazer ışın kaynağı 2000 ve 2500 W güç girişlerinde ve 100-200-300 cm/dak'da argon ve helyum atmosferlerinde deneyler yaparak bu parametrelerin ısıdan etkilenen bölgelerin mikro yapıları optik mikroskop, SEM, EDS ve (X-Işınları Difraksiyon) XRD analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) genişliği, artan kaynak hızına bağlı olarak çok daha ince hale gelirken, artan ısı girişine bağlı olarak daha da büyüdüğü gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesinin gerilme kuvvetleri ölçülerek de bu sonuç doğrulanmıştır [11].

Kaya yaptığı çalışmada, TIG, MIG ve örtülü elektrod ark kaynak yöntemlerini kullanarak, kalınlığı 3 mm olan AISI 304 östenit paslanmaz çelik levha ve yine aynı kalınlıktaki AISI 430 ferritik paslanmaz çelik levhaları birleştirilerek malzemelerin çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı, mikrosertlik ve mikro yapı özelliklerini incelemiştir. Çekme testleri sonucunda tüm numunelerde kopmanın, ferritik paslanmaz çelik esas metal tarafında ve kaynak metaline yakın olan ITAB'da gerçekleştiğini gözlemlemiştir. En yüksek çekme dayanımını ise TIG kaynağı ile birleştirilen bağlantıdan elde etmiştir. Çentik darbe testlerinde, ark kaynağı kullanılarak birleştirilen bağlantının çentik darbe kırılma değeri, TIG ve MIG kaynağı ile birleştirilmiş bağlantıların enerjisine göre çok düşük çıkmıştır. Yapılan mikrosertlik test sonuçlarına göre, tüm kaynak yöntemlerinde en yüksek sertlik değeri AISI 430 ferritik paslanmaz çelik esas metal tarafında kaynak metaline yakın olan ITAB'da ölçülmüştür. Mikro yapı incelemelerinde, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin ısı tesiri altındaki bölgede net bir şekilde tane irileşmesinin meydana geldiği gözlemlenmiştir [2].

Köse ve arkadaşları tarafından, CO₂ lazer kaynak yöntemiyle birleştirilen 95x330x4 mm ölçülerindeki AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğin mekanik ve metalürjik özellikleri araştırılmış, çalışma sonucunda hiçbir işleme tabi tutulmadan birleştirilen numunelerin mekanik özelliklerinin istenilen değerlerin altında kaldığını gözlemlenmiştir. Kaynak öncesi ön tav ve kaynak sonrası gerilme giderme ısı işlemi uygulanarak kaynaklanan numunelerin ise yapılarındaki martenzitin temperlenmesi ile özellikle ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metalinde mikro çatlak yayılımının engellenmesi sonucunda istenilen ve kabul edilebilir mekanik özellikler elde edilmiştir [12].

Badhekaa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, nokta kaynak yöntemiyle birleştirilen 0,5 mm kalınlıktaki AISI 420 kalite martenzitik paslanmaz çeliğin üzerinde kaynak akımının,

kaynak bölgesine etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, çekme kopma yükünün kaynak akımındaki artış ile artarken, gerilme yükü ve süneklilik oranının kaynak akımındaki artışı ile azaldığı gözlemlenmiştir [13].

Spena ve arkadaşları nokta kaynağının kaynak akımı, süresi, kuvveti gibi parametrelerini değiştirerek bu faktörlerin mekanik performans üzerindeki etkilerini değerlendirerek, otomotiv uygulamaları için yeni geliştirilen Quenched and Partitioning (QP) ve TRIP çeliğinin bu kaynak yöntemiyle kaynaklanabilirliğini araştırdıkları çalışmada, kaynak akımı, kaynak kuvvetini etkileyen ana işlem parametresi olduğu gözlemlenmiştir. Bu parametreyi, basınç kuvveti ve kaynak süresinin izlediği tespit edilmiştir [14].

Kahraman ve arkadaşlarının TIG kaynak yöntemi kullanarak birleştirilen 316L östenitik paslanmaz çelik numunelerin kaynak bölgesindeki sertlik, nüfuziyet ve mikro yapıları incelemeleri üzerine yaptıkları çalışmada, argon içerisine %1,5 ve 5 H içeren saf Ar ile kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda argon gazına eklenen hidrojen miktarının artmasıyla nüfuziyetin arttığı gözlemlenmiştir. Mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, ergime bölgesinden kaynağın merkezine doğru belirgin yönelmeler gözlemlenmiştir. Isı tesiri altındaki bölgede ise hidrojen miktarının artışıyla doğru orantılı olarak tane irileşmesinde artış olduğu görülmüştür [15].

Durgut ve arkadaşları AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin kaynak kalitesini belirleyen parametrelerden kaynak zamanı ve akım şiddetinin etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, çekme makaslama yükü taşıma kapasitesi ve sertlik değerleri tayin edilerek mikro yapı incelemeleri yaparak mekanik özelliklerinin kaynak akım şiddeti ve kaynak zamanına bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Nokta direnç yöntemiyle kaynaklanan numunelerin çekme makaslama yükünün kaynak süresi ve akım değeri ile paralel arttığı gözlemlenmiştir. Bunun ısı girdisi artışına bağlı olarak artan kaynak çekirdek boyutu ile ilgili olduğu düşünülmektedir [16].

Shah ve arkadaşları tarafından 304 paslanmaz çeliğinin lazer kaynağı ile birleştirilmesi sırasında kaynak bölgesindeki sıcaklık ve hız alanının genişliği, penetrasyon derinliği ve yayınım hacmi, erime ve katılaşma davranışlarını incelenmiştir. Yapılan boyutsal analizler, yayınım bölgesinin taşınımının ısı transferi ve yayınım bölgesi geometrisi üzerindeki önemli rolünü ortaya koyduğu görülmüştür.

Yayınım bölgesinin katılaşma davranışını analiz etmek için sıcaklık gradyanları, katılaşma oranları ve soğutma oranları gibi ilgili katılaşma parametreleri açıklanmıştır.

Katılaşmada ilerleme ile yayınım bölgesi ara yüzündeki alanın, sıcaklık gradyanı azalırken katılaşma oranının arttığı gözlemlenmiştir [17].

Martinson ve arkadaşlarının nokta direnç kaynağı ve lazer nokta kaynağında yüksek penetrasyon ve düşük soğutma hızının elde edilebileceği en uygun kaynak şeklini belirlemek için yaptıkları çalışmada, nokta direnç kaynağı, halka-lazer kaynağı, C-lazer kaynağı ve brezel-lazer kaynağı olmak üzere 4 farklı kaynak geometrisi kullanmışlardır. Halka konfigürasyonunda, başlangıç noktasında penetrasyon eksikliğini, tam penetrasyona sahip olan bitiş noktasıyla üst üste bindirerek azaltmıştır. Bu şekilde yapılan kaynakta anahtar deliği çökmesinin neden olduğu düşük kaynak kalitesi sorunu gözlemlenmemiştir [18].

Soltani ve arkadaşlarının AISI 304L - AISI 316L paslanmaz çelik bağlantılarının TIG ve Nd: YAG lazer kaynağı ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, TIG kaynak teknikleri kullanılarak birleştirilen 304L ve 316L paslanmaz çelik saclarının lazer kaynağı sırasındaki gerilim ve lazer ışını spot büyüklüğünün TIG kaynağı sırasında gerilim, hareket hızı ve destek gazı varlığının akma dayanımı, uzama, sertlik ve kaynak genişliğine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, TIG kaynağının kaynak derinliğinin lazer yönteminden daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. Bunun yanında TIG ve lazer kaynakta voltaj arttıkça örneklerin dayanıklılığının ve tokluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Lazer kaynağında spot destek boyunun artırılmasıyla kuvvet, tokluk ve sertlik değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, TIG kaynağı sırasında destek gazının varlığı, numunelerin mukavemet, tokluk ve sertliğinin artmasına neden olmuştur [19].

Alcock ve arkadaşları diyot lazeri kullanarak 304L paslanmaz çeliğinde derin penetrasyon kaynağı elde etmek için çalışmalar yapmışlardır. Deneme numunesi olarak kullanılan 10 mm kalınlığındaki plakaların alın kaynağı, kaynak uzunluğu boyunca 12 kW'lık bir lazer gücünde ve 1,5 m/dk'lık bir kaynak hızında tam penetrasyon ile başarılı bir şekilde yapılmıştır [20].

Fuerschbach ve arkadaşı, lazer nokta kaynak enerjisinin ve süresinin erime ve emilim üzerine etkisi üzerine yaptıkları çalışmada, 304 paslanmaz çelik numunesi üzerinde net ısı girişi için kalorimetrik ölçümler yapılmıştır. 304 paslanmaz çelik üzerindeki darbeli Nd YAG lazer nokta kaynakları için enerji emiliminin kalorimetrik ölçümlerinin %38-%67 arasında değiştiği ve ışın yoğunluğu veya kaynak penetrasyonu ile korelasyon

göstermediği bulunmuştur. Deneysel verilerin ve teorik modelin analizi sonucunda, aynı enerjinin uzun süreli atımlarına karşı kısa süreli atımların erimesinde önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir [21].

Spena ve arkadaşları Fiber lazer - hibrid kaynağında, kaynak yönünün mikro yapısal karakterizasyonuna etkisi üzerine yaptıkları çalışmada numune olarak 5083 alüminyum alaşımı incelenmiştir. Sonuç olarak lazer arklı hibrit kaynak yönteminde göreceli kararlı ark ve kararlı işlemin elde edilebileceğini ve düşük gözeneklilik seviyesine sahip kaynak boncuklarının elde edilebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, düşük gözenek eldesi için kaynak havuzunda daha az hava olması, anahtar deliğinin daha stabil olması ve kaynak havuzundan kabarcıkların daha kolay kaçması izlenebilecek yollar olarak belirlenmiştir [14].

Vasantharaja ve arkadaşlarının kaynak işlemlerinin 316L paslanmaz çelik kaynaklı bağlantı noktalarındaki artık gerilme ve çarpılma üzerindeki etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında, TIG ve Aktif Flaks Tungsten İnert Gaz (A-TIG) kaynağı ile yapılan 16 mm kalınlığında 316L paslanmaz çelik kaynak bağlantılarında yaptıkları kaynak işlemleri sonucunda çift taraflı A-TIG kaynağı ile üretilen kaynak bağlantısının, en düşük artık gerilme değerini ve minimum bozulmayı sergilediğini gözlemlemişlerdir [22].

Dancette ve arkadaşları ileri yüksek mukavemetli çelik nokta kaynaklarının çekme kayma kırılması üzerine çalışmalar yaparak, başarısızlık tipi geçişindeki ana eğilimlerin kaynak geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu saptamışlardır. Tespit edilen ana başarısızlık mekanizması gerilme lokalizasyonu ve temas yüzeyindeki çentik ucundan sünek kaymada, çatlaklar ilk önce çentik ucunun karmaşık bir karma mod yüklemesinin, yükleme yönünün yerine gerçekleştiği kaynağın yan tarafında görülmektedir. Modelleme ile ara yüzey başarısızlığın engellenmesinde kullanılabilecek çentik ucundaki Race integralinin tahmin edilmesine yönelik TRIP-780 punta kaynakları örneği ile yük taşıma kapasitesi için doğru tahminlerde bulunulduğu gözlemlenmiştir [23].

Li ve arkadaşları tek ve çift nokta lazer kaynağı sırasında 321 paslanmaz çelikteki akış dinamiğini inceledikleri çalışmada, tek noktadan lazer kaynağı sırasında oluşan tümseklerin varlığı nedeniyle kararsız olan anahtar deliği duvarı, çift nokta lazer kaynağı yöntemiyle anahtar deliği dengesi sayesinde iyileştirilerek oluşan tümsek varlığının azaltıldığı gözlemlenmiştir [24].

Han ve arkadaşları kaynak işlemi tasarımı için nükleer yakıt ayırıcı ızgaralarını yüksek kalitede elde etmek için simülasyon tekniği ile Zircaloy-4 plakalarını kullanarak sonlu elemanlı bir lazer kaynağı modeli geliştirmişlerdir. Faz geçişleri ve geçici sıcaklık ile dinamik malzeme özellikleri belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmalarda, kaynak bozulmaların, erimiş bölgenin ve ITAB'ın geometrisine büyük ölçüde bağlı olduğunu gözlemlenmiştir. Geliştirilen model ile geçici sıcaklık izotermi, kaynak havuzlarının boyutları ve karşılık gelen termal deformasyonlar tahmin edilebilmektedir [25].

Li ve arkadaşları lazer kaynağı uygulamalarında, kaynak hızı değişiminin kaynak geometrisi üzerindeki etkisini görmek amacıyla 1,5 mm kalınlıktaki BS1449 metal sac malzeme üzerinde yaptıkları çalışmalarda, düşük kaynak hızlarında çentikli yüzey oluştuğu ve göreceli olarak yüksek kaynak hızlarında bunların önlenebileceğini ve net şekilli bir kaynak yüzeyinin elde edilebileceği gözlemlenmiştir [26].

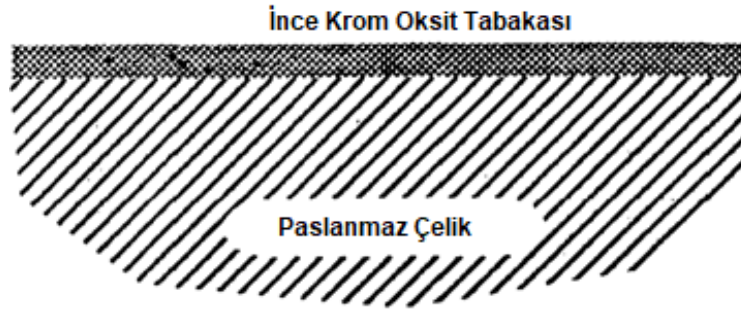
Kaynaklı birleştirmelerde kullanılan yöntemlerin temel amacı, iki malzemeyi birbirine sökülemeyecek şekilde birleştirmektir. Burada önemli olan nokta birleştirilen malzemelerin mekanik özelliklerini bozmadan mümkünse iyileştirerek birleştirme yapmaktır. Bu nedenle kaynaklı birleştirme sırasında malzemeye daha düşük ısı girdileri ile ITAB ve geçiş bölgelerinde tane yapısı irileşmesi ve düzensiz yapıyı önleme adına lazer kaynak yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir. Lazer kaynak yöntemleri malzemede yüksek nüfuziyet sağlarken dar bir alanda ITAB oluşmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, lazer nokta kaynak yöntemiyle birleştirilen farklı özellikte paslanmaz çeliklerin metalürjik yapısını karakterize etmek için mikro yapı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki belirlemektir. Ayrıca bağlantının mikro yapı görüntüleri alınarak kaynak bölgesinin mikro yapıyı nasıl etkilediği, elde edilen sonuçların kıyaslanmasıyla sanayi ortamında faydalı bir kaynak işleminin bu parametreler ile yapılabileceği öngörülmektedir. Standart bir kesit alınarak hazırlanan malzemelerin lazer nokta kaynak yöntemiyle birleştirilerek kaynak kalitesini arttırıp ana malzemenin mikro yapı değerlerinin çok bozulmadan birleştirmenin oluşması hedeflenmektedir. Yapılan literatür taramalarında elektrikli nokta direnç kaynaklarına sıklıkla rastlanmasına rağmen lazer nokta kaynağının daha az kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, farklı türlerde seçilen AISI 430 ferritik ve AISI 304, 316, 321 östenitik paslanmaz çelik sacları lazer nokta kaynağı yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir.

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Son yıllarda dünya çapında en yaygın kullanılan malzemeler arasında olan paslanmaz çeliklerin yapıları demir, karbon, molibden veya nikel elementleri içeren alaşımlardır ve karakteristik özelliklerini kromdan alırlar. Paslanmaz çeliklerin yaygın olarak kullanılan malzeme sınıfına girmelerinin temelindeki etken farklı kalite ve özelliklerde elde edilmeleridir. Günlük yaşamda çatal ve bıçak gibi mutfak eşyalarından, büyük sanayi tesislerine kadar uzanan geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Demir alaşımlarının çoğunda olduğu gibi çeliklerin de geneli oksijen ile temas sonucu oksitlenerek yüzeylerinde pas adı verilen bir tabaka oluşturur. Paslanma olarak adlandırılan bu süreç boyama, epoksi bazlı reçine ile yapılan kaplamalar, galvanizleme olarak bilinen çinko kaplama işlemleri ile ertelenir ya da durdurulur [27].

Paslanmaz çeliklerde bu paslanmazlık özelliğinin oluşabilmesi için bileşimlerindeki Cr oranı en az %12 olmalıdır. Kolay korozyona uğrayan demir alaşımlarının korozif ortamlara dayanımlarını güçlendirmek amacıyla paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. Paslanmaz çelik kullanımının yaygınlaşmasında, atmosfer ile teması sonucu pasivite tabakası olarak adlandırılan koruyucu krom oksit (Cr_2O_3) tabakasının oluşması büyük rol oynamaktadır. İnce krom oksit tabakası Şekil 2.1’ de gösterilmektedir. Bu şekilde oluşum gösteren çeliklere paslanmaz çelik adı verilir.



Şekil 2.1. İnce krom oksit tabakası.

EN 10088-1: 2005 standardında, paslanmaz çeliklerin en az %10,5 Cr, en çok %1,2 C

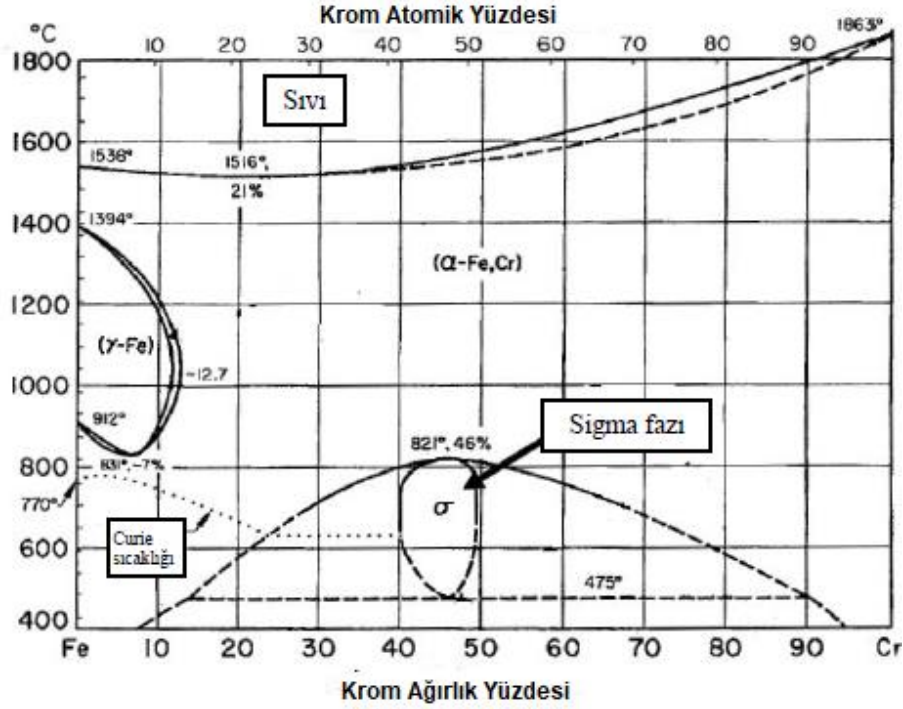
içermesi gerektiği belirtilmiştir. Bu oranı belirlemek için birçok çalışma yapılmış nihayetinde atmosferik korozyon ve ani paslanmalara karşı direncin optimum değeri bu oranda sağlanmıştır. Metalin hava ile teması sırasında aniden meydana gelen bu şeffaf, yoğun, elastik ve ince yapıdaki amorf katman sayesinde paslanmaz çelikler, kimyasal tepkimeye girmez ve mekanik özelliklerini yitirmeden korozif ortamlara karşısında yüksek direnç gösterirler. Paslanmaz çeliklerde krom miktarı artışı, korozif ortamlara karşı direnç ile doğru orantılı olarak artmaktadır [29].

Pasif oksit tabakayı etkileyen çok çeşitli korozif faktörler bulunmaktadır. Atmosferdeki oksijen, tuzlu deniz suyu, nem, sıcaklık farklılıkları, hava kirliliği bu faktörlerin ön plana çıkanlarındandır. Bu faktörler çelik sacların kullanım performanslarını ve malzeme kalitelerini olumsuz etkileyerek paslanmaz çeliklerin korozyona uğramasına neden olabilir. Bahsedilen bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için metal yüzeylerine uygulanan kaplamalardan faydalanılmaktadır. Bu kaplamalar birer bariyer görevi üstlenerek, metalin atmosfer, su ve diğer korozif ortamlara karşı olan davranışını iyileştirmektedirler. Pasif oksit tabakasının incilmesi durumunda malzemede korozyon riski artmaktadır. Paslanmaz çeliklerde görülen korozyon türleri; çukur korozyonu, aralık ve taneler arası korozyondur. Bu korozyon türleri, korozif faktörler ve malzemenin metalürjik koşulların yanında mevcut gerilmelerden de etkilenirler. Bu nedenle malzemenin kullanılacağı ortam koşulları göz önünde bulundurularak uygun kalitenin seçilmesi gerekmektedir [27].

Paslanmaz çeliklerin kimyasal yapıları değiştirilerek kullanım alanına göre baskın karaktere sahip alaşımlar elde edilebilir. Örneğin korozyon dayanımı krom miktarı yükselterek artırılabilceği gibi molibden ve nikel benzeri alaşım elementleri eklenmesi sonucunda da artırılabilir. Ayrıca paslanmaz çelik içerisine alaşım elemanı olarak nikel, mangan, krom, titanyum, silisyum, vanadyum, alüminyum, kükürt ve selenyum gibi elementlerin katılması paslanmaz çeliğe avantajlar sağlar. Birçok alaşım elementi eklenebilir ama paslanmaz çeliklerin içyapılarını karakterize etmede en önemli alaşım elementlerini önem sırasıyla sıralarsak bunlar; krom, nikel, molibden ve mangandır. Paslanmaz çelikte yapının ferritik ya da östenitik bir içyapıda olmasını belirleyen elementler özellikle krom ve nikeldir [30].

Paslanmaz çeliklerin temelinde demir-krom sistemi yer almaktadır. Paslanmaz çeliklerdeki hacim merkezli kübik (HMK) kristal kafes yapısına sahip ferriti kararlı hale getirmek için krom elementi kullanılmaktadır. HMK kristal kafes yapısını oluşturan

östenit alanını demir- krom denge diyagramında kapalı hale getirir. Bu fazda 1000 °C civarında en yüksek krom çözünürlüğü %12'dir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi demir - krom denge diyagramında östenite rastlanmayan bölgeler 1390 °C'nin üstündeki ve 830 °C'nin altındaki sıcaklık bölgeleridir [31].



Şekil 2.2. Demir - krom denge diyagramı [31].

Paslanmaz çeliklerin büyük bir bölümünün kaynak kabiliyeti yüksektir ve ark kaynakları ile (örtülü elektrotla ark kaynağı, TIG kaynağı, MIG kaynağı, Tozaltı ark kaynağı), direnç kaynakları ile (elektrik direnç kaynağı, yakma alın kaynağı, saplama kaynağı), elektron ve lazer ışın kaynakları ile ergitmeli olarak kaynak edilebilirler [32].

2.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Paslanmaz çelikler, 1907'de İngiltere'nin Sheffield kentinde Brown-Firth Research Laboratory'den sorumlu Harry Brearley'in, tabanca namlusundaki pastan kurtulma yollarını araştırırken eski testlerden kalan paslı numuneler arasında bir tanesinin paslanmadığını fark ederek analiz ettirdiği çeliğin içeriğinde yüksek oranda krom bulunduğunu öğrenmesiyle bulunmuştur. Bunun üzerine aşınmaya daha dirençli bir çelik bulmaya çalışan Brearley, mikroskop altında incelemeyi önce örnekleri sirke limon gibi asitlere maruz bırakarak çeliğin tane yapısını incelemiştir. Kullandığı aşındırma rejanları

nitrik aside dayandığını ve bu yeni çeliğin kimyasal saldırıya şiddetle karşı koyduğunu görmüş ve korozyona dayanıklı bu yeni malzemeye “paslanmaz çelik” adını vermiştir. Harry Brearley’in bu keşfinden sonra Avrupa’da paslanmaz çelik üretimi başlamıştır. Daha sonra Krupp tarafından geliştirilen, V2A çeliği ilk patentli paslanmaz çelik olarak bilinmektedir [33], [34].

Günümüzde ise 170’e yakın paslanmaz çelik türü bulunmaktadır. Birçok ayrı endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı endüstri alanlarında kullanılan paslanmaz çeliklerde krom oranının %30’a kadar ulaştığı görülmektedir. Bunun yanında paslanmaz çeliklere eklenen elementler sayesinde talaşlı işlenebilme gibi farklı özellikler elde edilebilmektedir [35].

2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ

Endüstride yaygın olarak kullanılan paslanmaz çeliklerin üretimi teknoloji ile birlikte sürekli gelişmekte ve uzmanlık gerektirmektedir. Paslanmaz çeliklerin ergitme ve arıtma işlemlerinde tercih edilen yöntem çoğunlukla “Elektrik ark ocağı / argon oksijen karbon giderme” yöntemidir. 1970’li yıllarda geliştirilen ve paslanmaz çelik üretiminin %80’inin uyguladığı bu yöntem sayesinde, üretim maliyetlerinde belirgin oranda düşüş sağlanırken aynı zamanda kaliteden ödün verilmeden ürün eldesi sağlanmaktadır. Bunun yanında, farklı üretim teknikleri mevcut olmasına rağmen, bu bölümde yaygın olarak kullanılan elektrik ark ocağı / argon oksijen karbon giderme yöntemi ana hatlarıyla Şekil 2.3’de açıklanmıştır [36].

2.3. PASLANMAZ ÇELİKLERE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİLERİ

Krom elementi, paslanmaz çelik için korozyon ve oksidasyon karşısında dayanım sağlayan, olmazsa olmaz elementtir. Krom, demirden daha çok oksijenle reaksiyona meyillidir. Bu sebeple ortamdaki mevcut oksijenle kendisi reaksiyona girerek paslanmaz çelik yüzeyinde 20 - 30 µm kalınlığında pasif krom oksit tabakası oluşturur. Oluşan bu tabaka sayesinde malzeme yüzeyinde kaplama etkisi oluşarak elektrolit ile anot-katot arasındaki bağlantı kesilir. Oluşan bu tabaka fabrikasyon uygulamaları sırasında veya üretim esnasında deformasyona maruz kalmaktadırlar. Ancak bu koruyucu tabaka bozulsa dahi kendini onarabilme özelliği sayesinde eski özelliğine tekrar kavuşabilirler. Paslanmaz çeliklerin içerisinde paslanmazlık özelliğini sağlayan elementlerin yanı sıra, diğer bazı özellikleri geliştirmek amacıyla katılan alaşım elementleri ve karbon bulunmaktadır. Korozyon dayanımını arttırmak için krom miktarı yükseltilebilir ya da nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunlar haricinde bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama yapılarak ilave olumlu etkiler sağlanabilir. Bu alaşım elementlerinin etkileri aşağıda detaylandırılmıştır.

2.3.1. Karbon (C)

Kuvvetli bir ferrit yapıcı olan karbon, yüksek mukavemetli alaşımlara sertleştirme ve mukavemet arttırıcı etki için tercih edilmektedir. Fakat kaynak metalinin korozyon direncini ve düşük sıcaklıktaki tokluğunu negatif yönde etkilemektedirler [37].

2.3.2. Krom (Cr)

Karbür ve ferrit yapıcı olan krom, korozyon direnci sağlayan alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça mukavemet ve sürünme mukavemetine yoğun bir etkisi yoktur [37].

2.3.3. Nikel (Ni)

Kuvvetli östenit yapıcı ve dengeleyici olan nikel, yüksek kromlu ve az karbonlu çeliklerde yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini önlemek için tercih edilmektedir. Mukavemeti arttırmaya katkı sağlarlar fakat sıfır altı sıcaklıklarda kaynak metalinin tokluğunu negatif yönde etkilerler [37].

2.3.4. Mangan (Mn)

Östenit yapıcı olan mangan östenitik alaşımlarda kaynak metalinin çatlama direncini yükseltme özelliğine sahiptir [37].

2.3.5. Alüminyum (Al)

Alüminyum kuvvetli bir ferrit yapıcı olması sayesinde yüksek sıcaklıklardaki tufallaşma direncini arttırmaktadır. Yüksek mukavemetli alaşımlarda Titanyum elementi ile birleşerek yaşlanma sertleşmesinin etkilerini azaltır. Krom oranı %12 olan kaynak metale katıldığında yapıyı ferritik hale getirerek yapının sertleşmesini önler [37].

2.3.6. Niyobyum (Nb)

Niyobyum kuvvetli bir karbür yapıcıdır. Östenitik paslanmaz çeliklerde krom karbür çökmesinin dengelenmesinde etkindir. Çok güçlü bir karbür yapıcı değildir. Yüksek mukavemetli bazı alaşımlarda sertlik ve mukavemete etki amacıyla kullanılmaktadır. Martenzitik paslanmaz çeliklere karbonu bağlayarak, çeliğin sertleşme eğilimini azaltmak için yapıya eklenebilir [37].

2.3.7. Azot (N)

Kuvvetli östenit yapıcı olan azot, düşük karbonlu ve yüksek kromlu çeliklere katılarak yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini önler. Mukavemeti artırır. Sıfır derecenin altındaki sıcaklıklarda kaynak metali tokluğunu olumsuz etkiler [37].

2.3.8. Kükürt (S)

Kükürt miktarı artışına paralel olarak çeliklerin işlenebilirliği artmaktadır. Kükürt paslanmaz çeliğin oyuklanma korozyonu dayanımını azaltmaktadır. Fosfor gibi kükürt elementi de düşük sıcaklıklarda ergiyerek tane sınırlarında birikmeye meyilli bir bileşimdir [37].

2.3.9. Titanyum (Ti)

Östenitik paslanmaz çeliklerde krom karbür çökmesini önlemek için dengeleme elementi olarak kullanılır. Kuvvetli ferrit yapıcıdır. Bazı yüksek sıcaklığa dayanımlı alaşımlara sertlik ve mukavemet arttırıcı etkilerinden dolayı katılır. Bazı yüksek mukavemetli ve ısıya dayanıklı alaşımlara yaşlanma sertleşmesini etkilemek için alüminyum ile beraber katılır [37].

2.3.10. Silisyum (Si)

Özgül ağırlık ve mekanik dayanımı arttıran silisyum, paslanmaz çeliğin oyuklanma

korozyon dayanımını azaltan bir elementtir. Yapılarında %0,40'dan fazla olan çelikler silisyumlu çelikler olarak adlandırılır [37].

2.3.11. Fosfor (P)

Kükürt ve selenyum elementleri gibi fosfor da paslanmaz çeliğin oyuklanma korozyonu dayanımını azaltmaktadır. Azalan dayanım sonucunda kaynak metali çatlamaya meyilli yapıya dönüşür [37].

2.3.12. Tungsten (W)

Paslanmaz çeliklerde kuvvetli bir ferrit yapıcı olan tungsten bazı yüksek sıcaklık alaşımlarının mukavemet ve sürünme direncini arttırmak için ilave edilir [31]-[36].

2.4. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜSTÜNLÜKLERİ

Doğada bakır, platin ve gümüş gibi saf halde bulunan metaller olduğu gibi diğer elementlerle bileşik halinde olan ve bu sebeple paslanmaya meyilli metaller de bulunmaktadır. Metallerin oksijenle temasları sonrası ortaya çıkan paslanma doğal bir olaydır. Doğada bulunan demir cevheri dengesizdir ve paslanma eğilimindedir. Korunmasız haldeki demir cevherin suyun içinde bulunan oksijenle birleşmesi sonucunda paslanma meydana gelir. Hiçbir koruyucu kaplama olmayan karbon çeliklerinde atmosfer ile temas sonucu dış yüzeyde pas denilen yapı oluşarak çeliğin iç kısmını korur. Dış yüzeydeki pasın uzaklaştırılması halinde yüzeyde tekrar pas oluşur. Paslanma sürecini uzatmak veya durdurmak amacıyla çeşitli kaplamalar yapılmaktadır [30]-[38].

Paslanmaz çeliklerin üstünlüklerinden dolayı tercih sebebi olarak başta; korozyona olan dayanımları, düşük ve yüksek sıcaklıklara olan dayanımları, mekanik dayanımları, üretim kolaylığı, hijyenik özellikleri ve uzun ömürleri şeklinde sıralanabilir. Detaylı olarak üstün özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Korozyon dayanımı: Paslanmaz çeliklerde korozif ortamlara dayanım oldukça yüksektir. Düşük alaşımlı paslanmaz çelikler özellikle atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı paslanmaz çelikler ise daha yüksek korozyon dayanımına sahiptir.

Düşük ve yüksek sıcaklıklar: Paslanmaz çelik türlerinin bazıları, çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşme ile tokluklarını korurken, bazı türleri ise yüksek sıcaklıklarda dahi malzemenin mekanik dayanımında ve tufallaşmasında önemli bir düşme görülmez.

Üretim kolaylığı: Kaynakla birleştirme, soğuk ve sıcak şekillendirme, kesme ve talaşlı imalat işlemleri kullanılarak kolayca şekillendirilebilirler.

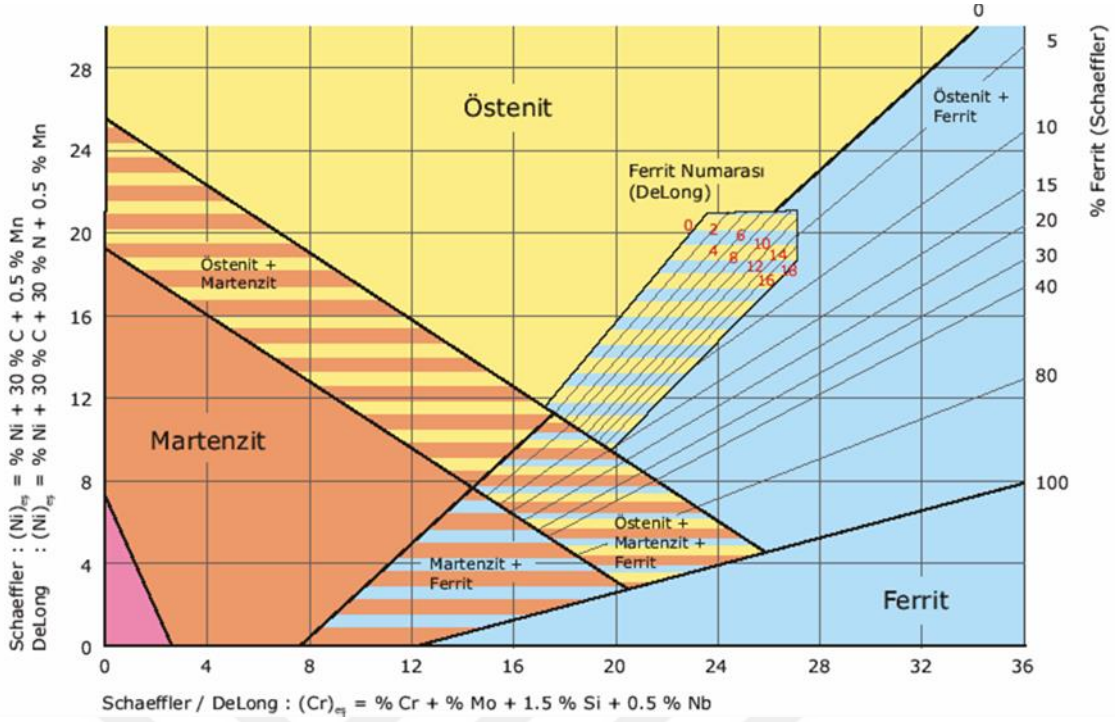
Mekanik dayanım: Çoğu paslanmaz çeliğin pekleşmesinde soğuk şekillendirme yöntemi kullanılır. Dayanımın artması ile malzeme kalınlıkları azaltılarak fiyatta ve birim ağırlıkta sağlanan düşüşler ile maliyet azaltılabilir. Bazı türlerine ise ısıtılma işlemi yoluyla yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür.

Görünüm: Farklı yüzey kalitelerinde elde edilebilen paslanmaz çelikler, yüzeylerinin kaliteli ve kolay bakımlı olması sebebiyle uzun ömürlü olarak kullanılabilir.

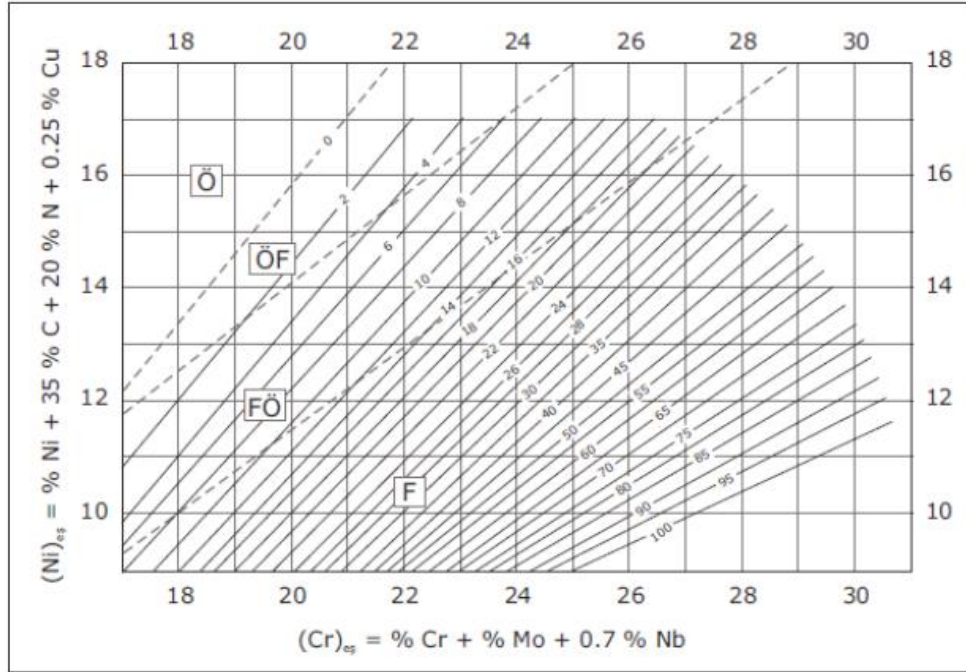
Hijyenik özellik: Kolay temizlenebilme özelliğine sahip olan paslanmaz çelikler; ilaç sanayisinde, gıda, hastane ve mutfak malzemelerinde kullanımı yaygındır [36].

Paslanmaz çeliklerin etkinlik dereceleri; ferrit fazı dengeleyicileri ve östenit fazı dengeleyici olarak gruplandırılmaktadır. Odabaş'a göre uzun araştırmalar sonucunda formüller geliştirilmeye çalışılmış, Thomas bu kapsamda çelik içerisinde yer alan diğer alaşım elementlerinin bir fonksiyonu olarak Ni elementini ifade etmiştir. Paslanmaz çelik alaşımının içyapısının sahip olduğu kimyasal analize göre belirlenmesinde Şekil 2.4 ve Şekil 2.5' de gösterilen Schaeffler ve Delong diyagramı ve WRC-1992 diyagramı kullanılmaktadır [39], [36].

Uzun süreli devam eden çalışmaların sonucunda formüller geliştirilerek, Şekil 2.4 Schaeffler ve Delong diyagramları ve Şekil 2.5 Katılaşma faz sınırlarını da içeren WRC-1992 diyagramları nikel ve krom eşdeğeri olarak hazırlanmıştır.



Şekil 2.5. Schaeffler ve DeLong diyagramları [39].



Şekil 2.6. Katılaşma faz sınırlarını da içeren WRC-1992 diyagramı [39].

Paslanmaz çeliklerin kimyasal yapıları değiştirilerek farklı özelliklere sahip alaşımlar elde edilebilir. Özellikle korozyon dayanımını artırmak için krom miktarı yükseltilebileceği gibi nikel ve molibden gibi alaşım elementleri de katılabilir. Ayrıca paslanmaz çelik içerisine alaşım elemanı olarak bakır, titanyum, alüminyum, silisyum,

niyobyum ve selenyum gibi elementlerin katılması paslanmaz çeliğe avantajlar sağlar. Özellikle paslanmaz çeliğin ferritik ya da östenitik bir içyapıya sahip olmasını belirleyen elementler krom ve nikeldir [27]. Çizelge 2.1’de ise paslanmaz çelik gruplarına ait bazı fiziksel özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler [40].

Fiziksel Özellikler	Östenitik paslanmaz çelikler	Ferritik paslanmaz çelikler	Martenzitik paslanmaz çelikler	Çökelme ile sertleşebilen paslanmaz çelikler
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (g/cm ³)	8	7,8	7,8	7,8
Isıl genleşme katsayısı (µm/m°C)	16,6	10,4	10,3	10,8
Isıl iletkenlik (W/mK)	15,7	25,1	24,2	22,3
Özgül Isı (J/kgK)	500	460	460	460

2.5. KAYNAK YÖNTEMLERİ VE PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAĞI

Günlük yaşamdan sanayiye birçok alanda kullanılan malzemelerde çeşitlilik artmakta ve ekonomik faktörlerin önemli parametre olması sonucu maliyeti düşük ürünler üretmek amaçlanmaktadır. Bu kapsamda farklı özelliklere sahip malzemelerin bir arada kullanılması yönünde yeni yöntemler geliştirilmektedir. Endüstrideki üretim yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan birleştirme tekniklerinden biri de kaynaktır. Bilindiği üzere, metal ve metal olmayan çoğu malzeme farklı kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmektedir. Kaynak yöntem ve çeşitleri genel olarak şu şekilde gruplandırılabilir; Elektrik ark kaynağı, gaz altı kaynağı, oksî – asetilen kaynağı, elektrik direnç kaynağı, enerji ışın kaynakları, katı hal kaynak yöntemleri. Bunların yanı sıra, kaynak teknolojisi konusundaki gelişmeler elektronik ve bilgisayar alanındaki

gelişmelerle daha da hızlanmıştır. Kaynak imalat yöntemi, endüstriyel işlemler nedeniyle açık hava ortamlarında, su altında vb. birçok farklı ortamda gerçekleştirilebilmektedir [41].

Ergitme kaynak yönteminin hatalara açık bir yöntem olması ve homojen olmayan soğumalara bağlı olarak makro düzeyde iç gerilmelerin oluşması bu yöntemin önemli dezavantajları olup kaynağın mukavemetini düşürmektedir. Farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde eğer boyut ve şekilleri müsaade ediyorsa ergitme kaynağına nazaran bir ergitme olayının olmaması ya da sınırlı olması, çok daha az kaynak hatası içermesi ve kaynak sonrasında minimum iç gerilmelere sahip olması nedenleriyle katı hal kaynak yöntemleri büyük bir üstünlük göstermektedir [42].

Her kaynak yöntemin farklı avantajları olduğu için doğru kaynak yöntemini bulunurken birçok parametrenin değerlendirilmesi gerekmektedir. Maliyet, üretim kolaylığı, mukavemet, kullanım süresi, korozyon dayanımı gibi birçok faktörün mevcut ürüne göre önemi göz önüne alınarak belirlenmelidir [43].

Kaynak ile malzeme birleştirme, endüstride en yaygın olarak metal işlenen sanayilerde kullanılan bir imalat şeklidir. Kullanılacak ortama ve malzemeye göre uygunluğu belirlenen kaynak yöntemi ile birleştirilecek malzemelerin birleşim bölgesi yüksek enerji ile ısıtılarak malzemenin eriyip birbirine yapışmasının sağlanmasıdır [41].

Direnç kaynağı metotlarının birçok çeşidi bulunmaktadır. Bu yöntemlerin temeli, ısıyı yoğunlaştırarak birleşim noktalarında bölgesel güçlü bir direnç meydana getirmektir. Direncin en önemli parametreleri iletkenin geometrisi ve öz direncidir. İşlem sırasında birleştirilecek malzemeler için sınırlı bir akım yolu oluşturularak, bölgesel ve yüksek direnç oluşturma yoluna gidilir. Bu kaynak yöntemi akım yoğunlaştırılması olarak bilinir. Direnç kaynağı metotlarında, akım taşıyan elektrotlar ve birleştirilen malzemelerde fiziksel bir temasın olmalıdır [44].

Çizelge 2.2. Kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması [42].

ERGİTME KAYNAĞI	BASINÇ KAYNAĞI
1. Döküm ergitme kaynağı	1. Soğuk basınç kaynağı
2. Elektrik direnç ergitme kaynağı	2. Ultrasonik kaynak
3. Gaz ergitme kaynağı	3. Sürtünme kaynağı
4. Elektrik ark kaynağı	4. Ocak kaynağı
4.1. Karbon arkı ile kaynak	5. Döküm basınç kaynağı
4.2. Metal arkı ile kaynak	6. Gaz basınç kaynağı
4.3. Koruyucu gazla kaynak	7. Elektrik direnç kaynağı
4.3.1. TIG (Normal TIG, Plazma TIG, Ark atom kaynağı)	8. Elektrik ark basınç kaynağı
4.3.2. MIG, MAG	9. Difüzyon kaynağı
4.4. Toz altı kaynağı	
5. Elektron bombardımanı ile kaynak	
6. Lazer ışını ile kaynak	

Paslanmaz çeliklerin büyük bir çoğunluğunun kaynak kabiliyeti yüksektir. Bazı sınırlamalar dışında uygulamadaki tüm kaynak yöntemleri ile uygun bir şekilde kaynak edilebilirler. Kullanılacak kaynak yöntemi seçiminde aşağıdaki faktörler göz önüne alınır;

- Cihazların erişilebilirliği, kurulumları ve kullanılabilirliği,
- Malzemenin boyutları,
- Kaynak yapılacak ortam,
- Kaynak pozisyonu,
- Paslanmaz çeliklerin kalitesi,
- Yardımcı ekipmanların durumu ve sağlanması.

Paslanmaz çeliklerin farklı malzemeler ile veya birbirleri ile kaynaklanmalarında

kullanılan kaynak yöntemleri aşağıda sıralanmaktadır;

- Örtülü elektrot ile ark kaynağı,
- Gazaltı kaynağı,
- Eriyen elektrot ile gazaltı kaynağı,
- Ergimeyen elektrot ile gazaltı kaynağı,
- Plazma arkı ile kaynak,
- Tozaltı kaynağı,
- Elektron ışın kaynağı,
- Lazer ışın kaynağı,
- Direnç nokta veya dikiş kaynağı,
- Sürtünme kaynağı,
- Difüzyon kaynağı [45].

Paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde uygulamadaki tüm kaynak yöntemleri kullanılabilmesine rağmen özellikle ince sac levhaların kaynağında lazer nokta kaynağı yöntemleri bazı özelliklerinden dolayı son zamanlarda çok tercih edilmektedir. Bu özellikler şöyle sıralanabilir:

1. Seri üretime uygundur,
2. Diğer kaynak sistemlerine göre malzemede ITAB yüksek ısı etkisiyle oluşan tahribat ve deformasyonu en azdır,
3. Çok hızlı soğuma istenilen malzemelerin kaynağı için idealdir,
4. Herhangi bir manyetik alan olmadığı için manyetik alandan etkilenme durumu olmaması,
5. Mercekler yardımıyla istenilen şekilde yönlendirilebilen ışınlar yardımıyla cam, su gibi çeşitli ortamlarda kaynak yapılma imkânı sağlar,
6. Yüksek kaynak mukavemeti elde edilir,
7. Mekanik özellikleri, fiziksel özellikleri veya farklı boyuttaki metaller kolaylıkla birleştirilebilirken kaynak bölgesi ana metale çok yakın özellik gösterir [46].

Dünyada hızla gelişen teknolojiyle alternatif kaynak yöntemleri de gelişmektedir. Paslanmaz çeliklerin birçok kaynak yöntemiyle birleştirilebilmekte fakat kaynak sırasında olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Lazer nokta kaynağı ile nokta direnç kaynağında ortaya çıkan olumsuzlukların önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Bu sebeple, çalışmada lazer nokta kaynağı tercih edilmiştir ve bu kaynak yöntemi Bölüm 3’te detaylı olarak anlatılmıştır.

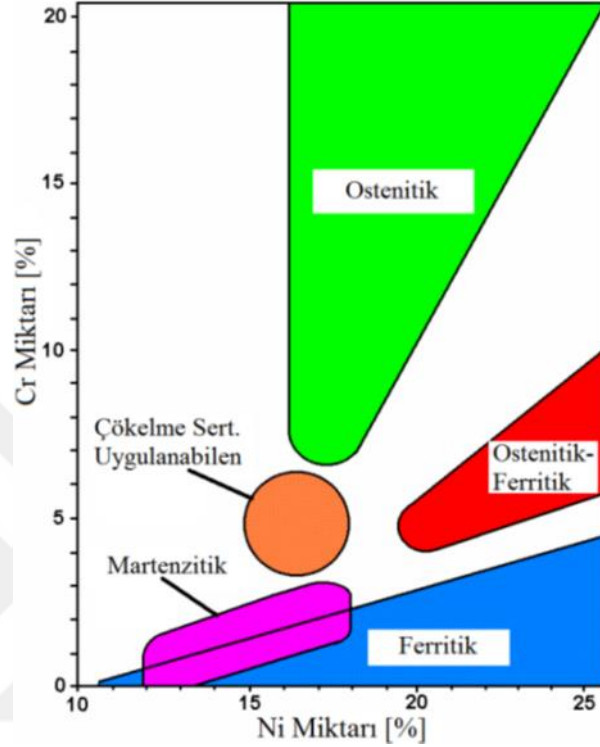
2.6. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Temel olarak demir alaşımı olup ve yapılarındaki krom metali sayesinde pasifleşme özelliği gösteren çeliklerin bu özelliğinden yola çıkılarak bu çeliklerin tanımı için İngilizce de lekesiz anlamına gelen “stainless” kelimesi kullanılmıştır. Alaşımı oluşturan diğer bileşenler paslanmaz çeliğin diğer yapısal özellikleri üzerine katkıda bulunurlar. Paslanmaz çeliklerin büyük bir bölümünün kaynak kabiliyeti yüksektir. Ark kaynağı, direnç kaynağı elektron ve lazer kaynakları, sürtünme kaynağı olmak üzere birçok kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirler. Kristal yapı ve mukavemet mekanizmalarına bağlı olarak paslanmaz çelikler 5 ana başlıkta toplanırlar;

- Östenitik paslanmaz çelikler,
- Ferritik paslanmaz çelikler,
- Ferritik-östenitik (Dubleks) paslanmaz çelikler,
- Martenzitik paslanmaz çelikler,
- Çökelme sertleştirilmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler [37].

Karbon oranları %0,02 ile 1 arasında olabilen paslanmaz çeliklerin, düşük karbon miktarları daha yayginken, yüksek oranlar martenzitik çeliklerde söz konusudur. Bunu sebebi bu paslanmaz çeliklerde karbonun varlığında, krom karbür oluşur ve genellikle tane sınırlarında krom karbür olarak çökelmekte ve bu nedenle kafes içinde çözünmüş krom miktarı %12’lik sınırın altına düşebilmektedir. Bu da malzemenin korozyona dayanıklılık özelliği kaybolmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla çelik bileşimindeki karbon yüzdesi yükseldikçe krom miktarı artırılmalı ya da karbür yapma eğilimi kromdan fazla olan elementler ilave edilerek, krom karbürün meydana gelerek kafeste çözünen kromun azalması engellenmelidir.

Paslanmaz çeliklerde krom ve nikel miktarlarına bağlı olarak değişen mikro yapıda krom östenit bölgesini daraltırken, nikel ise genişletmektedir. Şekil 2.6'da krom ve nikel miktarlarına bağlı olarak paslanmaz çeliklerde oluşan mikro yapılar şematik olarak gösterilmiştir [35].



Şekil 2.7. Krom ve nikel miktarlarına göre paslanmaz çeliklerin mikro yapıları [30].

2.6.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çeliklerin bileşimlerinde %16 ile %26 krom, %35'e kadar nikel ve %20'ye kadar mangan yer almaktadır. Bu çeliklerin östenitik olarak adlandırılmalarının sebebi ısıtılma sırasında yapılarının östenitik YMK yapıda kalmalarıdır. Nikel ve mangan temel östenit oluşturmalarıdır. Yüksek korozyon direnci ve kolay şekillenme özelliğinden dolayı pek çok mühendislik uygulamalarında tercih edildiğinden en yaygın kullanım alanına sahip olan çeliklerdir. Metalürjisiler tarafından östenitik yapıda demir alaşımları elde etmek için yapılan deneme ve çalışmalar sonucunda AISI 300 serisi olarak adlandırılan östenitik paslanmaz çelikler elde edilmiştir. Bugünün östenitik paslanmaz çelikleri %16-26 Cr, %10-24 Ni, %0,40'a kadar karbon ve diğer bazı özellikleri geliştirmek için katılmış Mo, Ti, Nb, Ta ve N gibi elementler içerir.

Östenitik paslanmaz çelikler soğuma sırasında östenit ferrit dönüşümü olmadığından su verme yolu ile sertleştirilemez. Östenitik paslanmaz çeliklerin, şekillendirilebilirlik ve

korozyon dirençleri mükemmeldir. Östenitik paslanmaz çelikler geçiş sıcaklıklarına sahip olmadıkları için, düşük sıcaklıktaki darbe özellikleri mükemmeldir. Yüksek nikel ve krom miktarı bu çeliklerin maliyetinin artmasına neden olur.

Östenitik paslanmaz çeliklerin soğuma aşamasında östenit ferrit dönüşümü olmadığından su verme yolu ile sertleştirileme özellikleri yoktur. Östenitik paslanmaz çeliklerin, şekillendirilebilme ve korozyon dirençleri oldukça iyidir. Östenitik paslanmaz çelikler geçiş sıcaklıklarına sahip olmadıkları için, düşük sıcaklıktaki darbe özellikleri oldukça iyidir. Yüksek miktardaki nikel ve krom elementi bu çeliklerde maliyetin yüksek olmasına neden olur.

Genel olarak östenitik paslanmaz çelikler nemli ortamlarda kullanım için tercih edilirler. Artan krom ve molibden içerikleri güçlü çözeltilere karşı korozyon dirençlerini arttırıcı rol oynar. Yüksek nikel içeriği sayesinde gerilmeli korozyon çatlama problemine karşı oluşan riskleri azaltır. Östenitik paslanmaz çeliklere katılan alaşım elementlerinin yoğunluğuna bağlı olarak genel korozyon, çukur ve aralık korozyonuna karşı dirençleri yükselir. Bu durum çeliğin klor içeren ortamlarda kullanılması halinde çok daha önemlidir. Çukur ve aralık korozyonuna karşı dirençleri molibden ve krom sayesinde iyileşmektedir [37].

İçyapılarına göre östenitik paslanmaz çelikler kararlı veya yarı kararlı olarak iki grupta incelenirler. Yarı kararlı östenitik paslanmaz çelikler soğuk şekillendirildiklerinde iç yapıları martenzitik veya iğnemsî bir türde içyapı gösterirler. Kararlı östenitik paslanmaz çelikler ise oldukça yüksek derecede soğuk şekil şekillendirildiklerinde bile östenitik içyapılarını korurlar. Çekme diyagramlarından bu iki tür arasındaki fark belirgin bir biçimde görülebilir. Normal gerilme-genleşme diyagramında AISI 304 çeliği östenitik davranış gösterir.

Karbon oranı düşürülerek taneler arası korozyon direnci artması sonucu elde edilen kararlı östenitik paslanmaz çeliklerin en basit örneği AISI 304L kalitedir. Korozi ortamındaki oyuklanma problemlerine karşı daha dayanıklı bir yapı elde etmek amacıyla AISI 304L bileşime %2 civarında Mo ilave edilerek oluşturulan paslanmazlar ise AISI 316L adlandırılır.

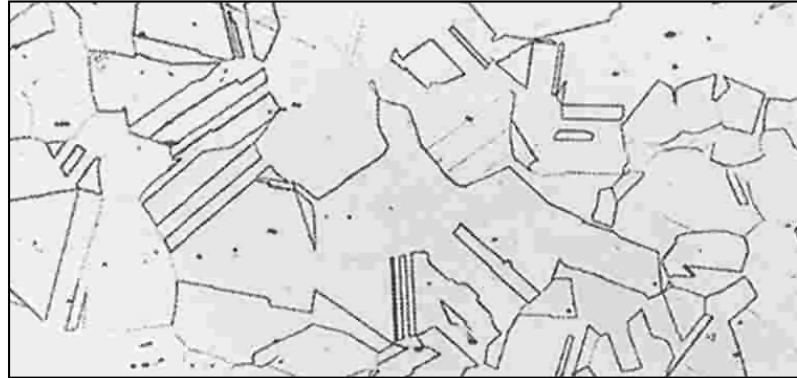
Korozi özelliği ile üstünlük sağlayan östenitik paslanmaz çelikler, orta dereceli ve şiddetli korozi ortamlar için geliştirilmiştir. Bu özelliklerinin yanında dondurucu sıcaklık derecelerinden 600 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda tokluğa sahiptir [35].

Östenitik paslanmaz çeliklerin başlıca özelliklerine kısaca değinilirse;

- İyi derecede korozyon dayanımına sahiptirler,
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri ileri seviyededir,
- Sünek bir yapıya sahiptirler ve şekillendirilmeleri kolaydır,
- Hijyenik olmalarının yanında temizlenmeleri kolaydır,
- Yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler,
- Manyetik değildirler,
- Dayanımları yalnızca soğuk şekillendirme ile güçlendirilebilir.

Bazı kullanım alanları:

Östenitik paslanmaz çelikler, yaygın olarak makina ve imalat sanayinde, asansörler, bina dış cephe kaplamaları, gıda işleme ekipmanları, mutfak gereçleri, kimya endüstrisinde, tren yolu arabaları, uçak parçaları, yaylar, antenler, ev aletleri, soğuk kaplar, yağmur olukları, sıvı gübreleme ve lapa domates tankları, fırın parçaları, pompa parçaları, ısı değiştiriciler, türbin bıçakları, basınçlı kaplar, kaynatma kazanları, uçak egzoz bacaları, jet motor parçaları, çatal, kaşık, süt taşıma malzemelerinde kullanılırlar [36]. Şekil 2.7’de östenitik çeliğin mikro yapısı görülmektedir.



Şekil 2.8. Östenitik paslanmaz çeliğin mikro yapısı [36].

Östenitik paslanmaz çeliklerde ihtiva eden karbon içeriği %0,03’ten fazla olduğu zaman, tane sınırlarında krom karbür çökelme durumu söz konusu olmaktadır. Krom karbürün çökmesi durumunda etrafındaki kromu tüketerek östenitik paslanmaz çeliğin tane sınırlarında korozyon oluşmasını (taneler arası korozyon) teşvik eder. AISI 316L östenitik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri ele alındığında ise, günümüzde pek

çok yöntemle bu tür paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri yapılabilir. Fakat paslanmaz çeliklerdeki farklı bileşimler mekanik ve fiziksel özelliklerin etkilenmesi açısından kaynak problemlerini de sebep olmaktadır. Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında karşılaşılan genel problemler özetlenecek olursa; Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinde kaynak yöntemine bağlı olarak ITAB'da; mikrosegregasyonlar, porozite, ikincil faz çökelmeler, kalıntı gerilmeler, distorsiyon, karışmamış bölgelerin oluşumu, alaşım kaybı, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi gibi istenmeyen hatalar oluşabilir. Birleştirme yöntemine göre kaynak bölgesinde farklı oluşumlar görüldüğü gibi, farklı mekanik, mikro yapısal ve korozyon özellikleri de oluşabilir.

Örneğin, TIG kaynak tekniğiyle birleştirilmiş bir AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin kaynak metalinin östenit matrisinde %2-10 oranında δ -ferrit bulunması kaynağın katılaşması sürecinde sıcak çatlakların oluşmasına neden olabilirken, Lazer kaynak yöntemiyle birleştirilme sonrası kaynak metalinde sıcak çatlak oluşma ihtimali daha düşüktür. Bunun yanında, TIG ark kaynağının koruyucu gaz türünün de mikro yapı üzerindeki etkileri de göz ardı edilmemelidir [39].

2.6.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler

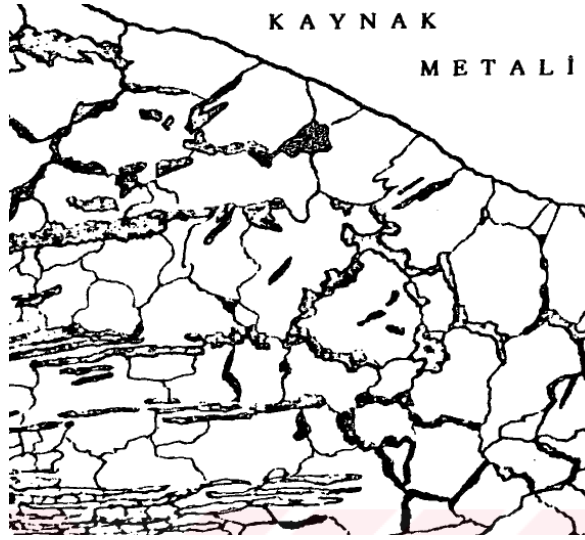
Ferritik paslanmaz çelikler %12-30 Cr, %0,12 civarında karbon içeren demir-krom alaşımlarıdır. HMK yapısına sahip bu çelikler faz dönüşümü gösteremez, çoğu zaman ısıtılma işlem şartları altında ferritik olarak kalırlar. Bu özelliklerinden dolayı ısıtılma işlemin uygulanmadığı malzemeler olarak bilinirler. Bunun yanında bu çelikler yüksek sıcaklıklardan hızla soğutulursa küçük karbon miktarları biraz sertleşme sağlamaktadır. Diğer paslanmaz çelik türlerine göre ferritik paslanmaz çelikler tasarım mühendisliği alanında büyük öneme sahiptir. Çünkü bu çelikler nikel içeren paslanmaz çelikler gibi benzer korozyon direnci sağlamalarının yanında, alaşım elementi olarak nikel ihtiyacı olmadığı için maliyetleri düşüktür. Manyetikleşme özelliğine sahip olan bu kalitedeki paslanmaz çeliklerin kaynak edilebilme kabiliyetlerinin düşük, sünekliklerinin az, çentik hassaslıklarından dolayı şekillendirme kabiliyeti östenitik paslanmaz çeliklere göre daha sınırlıdır [30].

Ferritik paslanmaz çelikler, TIG, MIG, elektrik ark kaynağı, plazma ark kaynağı, direnç kaynağı, elektron ışın kaynağı, lazer ışın kaynağı ve tozaltı kaynak yöntemleri kullanılarak kaynak yapılabilir.

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında genellikle yaşanan en büyük sorun 1150 °C’de ITAB’da meydana gelen ve kaynak dikişlerindeki toklukta aşırı seviyede düşüşe neden olan tane irileşmesidir. Bu tane irileşmesi çeliğin gevrek ve kırılgan bir yapıya sahip olmasına neden olur. Ferritik paslanmaz çeliklerde katı halde γ/α dönüşümü gerçekleşmediği için ısıtıl işlem ile bu sorun giderilemez. Bu nedenle bu oluşumu önlemek paslanmaz çeliklerin yapısına ve elektroda belli oranda N ilave edilir. Yani ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan elektrotlarda belli oranda N bulunmalıdır [47].

Ferritik paslanmaz çeliklerin kaynak işleminde yaşanan diğer bir sorun da ITAB’da meydana gelen taneler arası korozyon hassasiyetidir. Özellikle stabilize edilmemiş, yüksek Cr ve C içeren ferritik paslanmaz çeliklerde karşılaşılan problemlerdendir. Bu durum, östenitik yapıya oranla ferritik yapı içinde krom karbür çökmesi daha yüksek oranlarda olduğundan dolayı, östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında oluşan aksine, ferritik paslanmaz çelik türlerinde 900 °C üzerindeki sıcaklıklarda hızlı soğutma sırasında meydana gelmektedir. Kaynak sırasında bu tür çekilerin kaynağa yakın olan kısımları uzun süre ısıtıl etkiye maruz kaldıkları için bu bölgelerde taneler arası korozyona karşı hassasiyet artar. Bunu önlemek için stabilize edilmemiş %12 Cr’lu ferritik paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri, kaynak işleminden hemen sonra 750 °C’de tavlmalıdır [32].

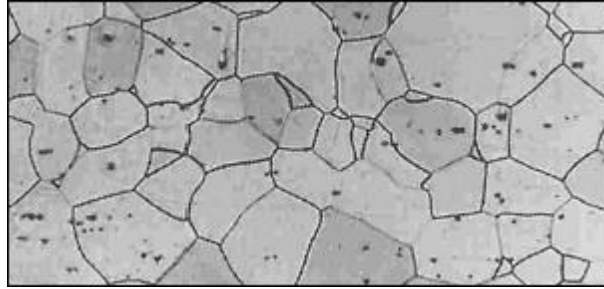
Yüksek miktarlarda Cr ve C içeren ferritik paslanmaz çeliklere ITAB özelliklerini iyileştirmek amacı ile 200 °C’lik bir ön tavlama işlemi uygulanabilir. Şekil 2.8’de %17 Cr’lu ferritik paslanmaz çelikte ITAB’da tane irileşmesi ve taneler arası martenzit ağı oluşumu görülmektedir [47].



Şekil 2.9. Ferritik paslanmaz çelikte ITAB’da tane irileşmesi ve martenzit ağı [32].

Ferritik paslanmaz çeliklerin sahip oldukları diğer özellikleri şöyle sıralanabilir;

- Klorürlü çözeltilerde gerilmeli korozyon oluşumuna karşı oldukça dirençlidirler,
- Yüksek akma mukavemetine sahiptirler,
- Düşük seviyelerdeki şiddetle soğuk şekil değiştirme sertleşmesi gösterirler,
- Manyetikleşme özelliğine sahiptirler [31].

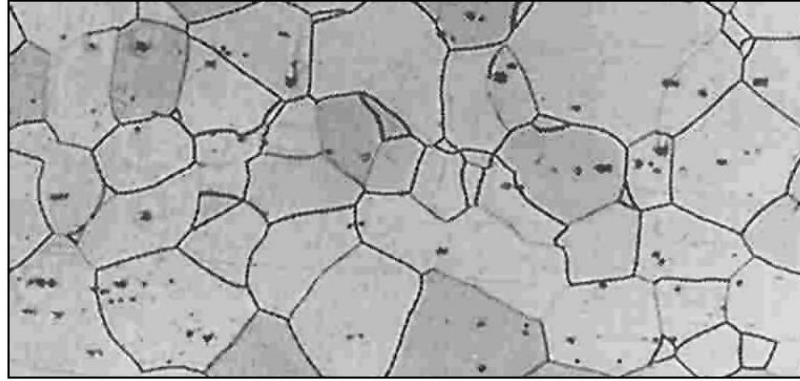


Şekil 2.10. Ferritik çeliğin mikro yapısı [36].

Teknolojideki gelişmeler sayesinde çelik üretiminde eskiye nazaran çok daha ekonomik olarak üretilen, çok az miktarlarda karbon ve azot ihtiva eden yeni tür paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. Bu çeliklerin AISI standardına göre en önemli türleri 444 (18 Cr-2 Mo) ve 26-1 (26 Cr-1 Mo) çelikleri olarak tanınmaktadır. Titanyum ve niyobyum gibi elementler sayesinde kaynak edildikleri zaman, taneler arası korozyona dirençli olan ferritik paslanmaz çelik türü elde edilmiştir. Şekil 2.9’da mikro yapısı yer alan ferritik paslanmaz çelikler, klorürlü ortamlarda oluşabilecek oyuklanma korozyonuna ve gerilmeli korozyon oluşumuna karşı da iyi direnç ve tokluğa sahiptirler [31].

2.6.3. Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler

Östenit ve ferrit fazların korozyon direnci ve mekanik özelliklerini birleştirme amacı ile geliştirilen çift fazlı çelikler, östenit taneleri içinde ferrit ya da ferrit taneleri içinde östenit içerirler. Bu paslanmaz çelik türlerinin östenitik paslanmaz çelikler karşısındaki en önemli üstünlükleri çok daha iyi korozyon dirençleri göstermeleri ve akma mukavemetlerinin neredeyse iki katı olmalarıdır [29]. Ferritik çeliklerle kıyaslandığında ise daha iyi süneklik ve tokluğa sahiptirler. Östenitik çeliklere kıyaslandığında ise daha iyi gerilme korozyonu dayanımına sahiptirler. Bu özelliklerine ek olarak, iki fazın bir arada bulunması halinde tavlınmış durumda bile 550 ile 690 MPa akma dayanımı gösterirler ve bu dayanım, fazların tek basına bulunduğu türdeki çeliklerin akma dayanımının yaklaşık iki katıdır [48]. Bu çeliklerin düşük toklukları ve gevrekleşme hassasiyetleri olduğu için makine elemanı olarak kullanımı özellikle kaynaklı montajlar ve kalın kesitler için sınırlıdır [12]. Ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı Şekil 2.10'da yer almaktadır.



Şekil 2.11. Ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı [66].

Ferritik paslanmaz çeliklerin sertleştirilebilmeleri ancak soğuk şekil değiştirme ile mümkün olmaktadır. Bu çeliklerin düşük toklukları ve gevrekleşme hassasiyetleri olduğu için makine elemanı olarak kullanımı özellikle kaynaklı montajlar ve kalın kesitler için sınırlıdır. Özetlemek gerekirse östenitik krom nikelli paslanmaz çeliklere nazaran şu üstün özelliklere sahiptir;

1. Klorürlü çözeltilerde gerilmeli korozyon çatlamasına karşı dayanıklıdır,
2. Daha yüksek akma dayanımına sahiptirler,
3. Daha az soğuk şekil değiştirme sertleşmesi gösterirler,

4. 750 °C'ye kadar manyetikleşme özelliğine sahiptirler [12].

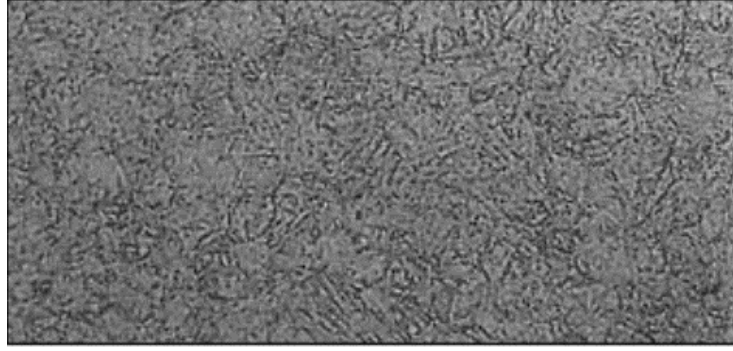
Çizelge 2.3. Yaygın olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik türleri [66].

AISI	EN 10088 Malzeme No	EN 10088 Kısa Gösterimi
409	14.512	X2CrTi12
430	14.016	X6Cr17
439	14.510	X3CrTi17
444	14.521	X2CrMoTi18-2

Yaygın olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik türleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Bu çalışmada AISI 430 ferritik paslanmaz numunenin hem kendisi hem de belirlenen östenitik paslanmaz çelikler ile kaynağı yapılarak mikro yapıları incelenmiştir.

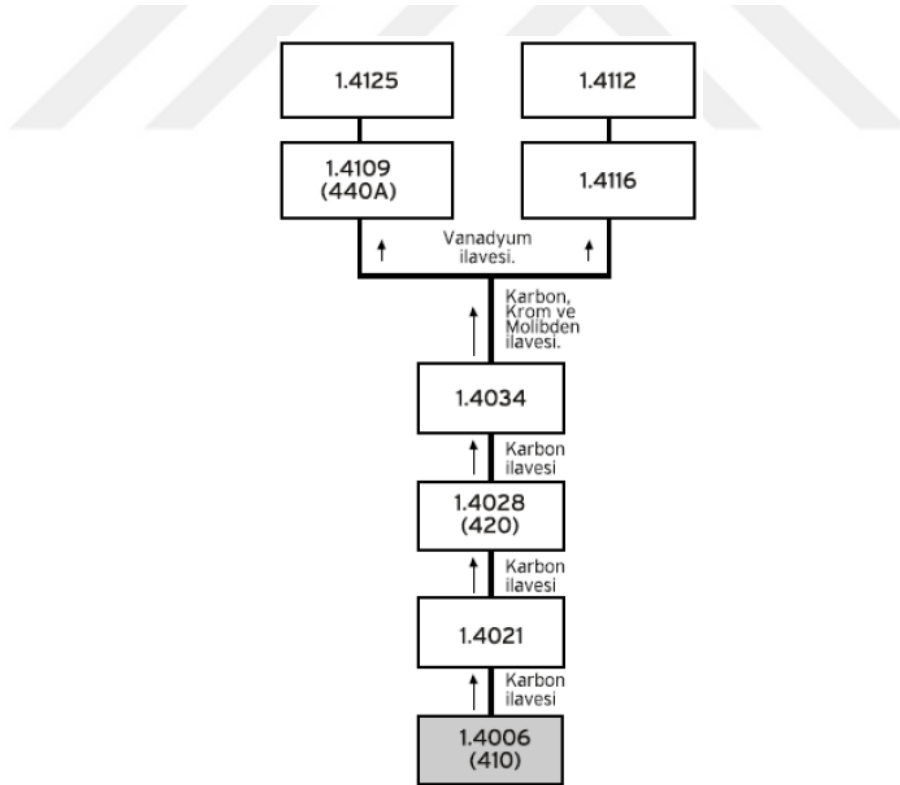
2.6.4. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Karbon miktarı %0,1'den fazla olan çelikler yüksek sıcaklıklarda östenitik içyapıya sahiptirler. Östenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950-1050 °C arasındadır. Martenzitli paslanmaz çelikler esas olarak %12–17 Cr ve östenitli bölgede su verildiğinde martenzitli bir yapı oluşturması için yeterli düzeyde karbon (%0,15–1,0 C) içeren çeliklerdir. Bu şekilde elde edilen yüksek sertlik ve mekanik dayanım, karbon yüzdesi ile birlikte artar. Bu yöntemle elde edilen çeliklere martenzitli denmesinin nedeni östenitleme ve su verme ısı işlemlerinden sonra martenzitli bir yapı geliştirebilmeleridir. Martenzitli paslanmaz çeliklerin bileşimleri sertlik ve dayanım için en uygun hale getirildiğinde bu çeliklerin yenime dirençleri östenitli ve ferritli paslanmaz çeliklere göre daha kötü olmaktadır. Martenzitli paslanmaz çelikler manyetikler ve kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür. Yüksek karbon miktarı sayesinde ısı işleme tabi tutularak sertleştirilebilirler. 420 kalite paslanmaz çelik bu gruba dâhildir. Kullanım yerleri bıçaklar, ameliyat aletleri, pimler, miller vs. olarak örneklendirilebilir [62]. Martenzitik paslanmaz çeliğin mikro yapısı Şekil 2.11'de yer almaktadır.



Şekil 2.12. Martenzitik paslanmaz çeliğin yapısı.

Kullanım yerine bağlı olarak martenzitik çelikler tavllanmış veya ıslah edilmiş durumda piyasaya sürülür. Tavllanmış olarak satın alınan ürünler yumuşak bir yapıda olduğundan imalat işlemleri uygulanıp biçim verildikten sonra ıslah işlemine (su verme + temperleme) tabi tutulur. Temperleme sıcaklığı değiştirilerek değişik özellikler elde edilir. En iyi korozyon dayanımı elde etmek için en önemli kriter, tavsiye edilen ısı işlem sıcaklığına uyulmasıdır. Şekil 2.12’de çeşitli kalitelerdeki martenzitik paslanmaz çeliklerin oluşum akışı verilmiştir [49].



Şekil 2.13. Martenzitik paslanmaz çelik kaliteleri [50].

Martenzitik paslanmaz çeliklerin sahip oldukları özellikler başlıca şu şekildedir; orta ile iyi derecede korozyon dayanımına sahip olan bu çeliklerin, mekanik dayanımları

mükemmeldir. İyi kaynak kabiliyetine ve manyetikleşme özelliğine sahiptirler [39].

Bu tür çelikler genellikle su verilmiş veya tavllanmış halde kullanılırlar. Martenzitik paslanmaz çeliklerin kritik soğuma hızları çok yavaştır. Yavaş soğuma ortamında soğumaları martenzit oluşumuna neden olur. Martenzitik durumda korozyon dirençleri çok yüksektir. 815 °C'ye kadar paslanmazlık özelliklerini korurlar [49].

Ancak yüksek sıcaklıklara çok yoğun ve fazla süre maruz kalmaları durumunda korozyon başlangıçları gözlemlenir. Bu sebeplerden dolayı 700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanım için tercih edilmezler.

Martenzitik ve çökeltme sertleşmesi sonucu oluşan paslanmaz çelikler ısıtılıp ısıtılıp sertleştirilebilirken haricindeki diğer paslanmaz çeliklere Isıl işlem uygulanamaz. Isıl işlemle sertleştirilemeyen bu çeliklere soğuk deformasyon yöntemi ile dayanım kazandırılır. Soğuk deformasyonla kazandırılan bu mukavemet artışına çalşıma sertleşmesi de denmektedir [30].

Martenzitik paslanmaz çeliklerde mekanik özellikleri geliştiren Niyobyum, Molibden ve Tungsten gibi alaşımlama elementlerinin %3'e kadar ilavesi ile yaklaşık %10,5-18 Cr içerirler [49].

2.6.5. Çökeltme Sertleştirilmesi Uygulanabilen Paslanmaz Çelikler

Çökeltme sertleşmesi uygulanabilir çelikler, östenitik, yarı östenitik veya martenzitik içyapıya sahip olabilirler. Alüminyum, bakır, titanyum ve niyobyum gibi elementlerle alaşımlama yapılarak çökelti oluşumu sağlanır. Çökeltme oluşumu sayesinde dayanımı 1700 MPa ulaşabilen paslanmaz çelikler elde edilir.

Çökeltme sertleşmesi uygulanabilir çeliklerin başlıca özellikler şunlardır;

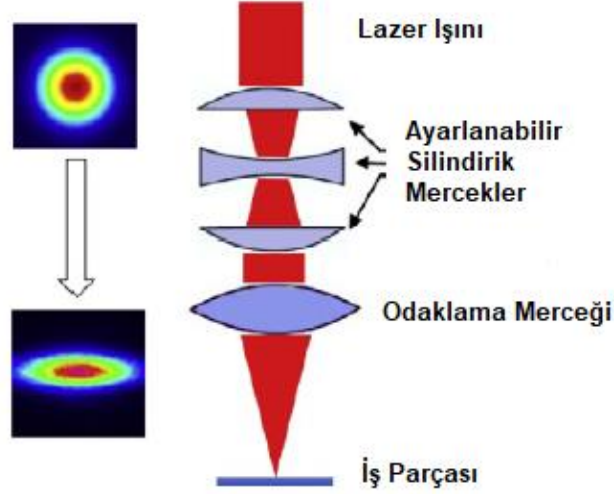
- 1) Orta ile iyi derecede korozyon dayanımına sahiptirler,
- 2) Çok yüksek mekanik dayanım göstermektedirler,
- 3) Oldukça iyi kaynak kabiliyetine sahiptirler,
- 4) Mıknatıslanma özelliğine sahiptirler [2].

3. LAZER VE KAYNAK TEKNOLOJİSİ

3.1. LAZER

Çok şiddetli, koherant ve tek renk ışık elde etmek amacıyla üretilen optik düzeneklere lazer ve maser denir. İlk kez C. H. Townes (1953) tarafından mikrodalga bölgesinde geliştirilen ve Microwave Amplification by Stimulated Emission and Radiation (Kamçılanmış Işıma ile Mikrodalga Yükseltici) kelimelerinin ilk harflerinden yararlanarak kısaca maser adı verilen düzeneklerdir. Bu buluştan sonra T. H. Miaman (1960) tarafından “Lazer” uyarılmış ışımanın yayılımı ile ışığın güçlendirilmesi (İngilizce LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) şeklinde adlandırılmıştır. Optik kaynak olan lazerlerin fotonları uyumlu bir hüzmeye şeklinde oluşmaktadır [51].

Lazerler, ışını kızıl ötesi dalga boylarından başlayıp mor ötesi dalga boylarına kadar uzanan, ışık şiddeti artırılmış tek frekansta ve eş fazlı ışınımlardan oluşan ışın demetleridir. Bir kaynağın yaydığı elektromanyetik dalgaların, dalga boyları 1 cm civarında ise böyle dalgalara mikro dalga, bu tip kaynaklara Maser denir. Eğer yayılan dalgaların dalga boyları kızıl ötesi ve mor ötesi bölge arasında tek frekansta ve eş fazlı dalgalar üreten veya yayan kaynaklara da lazer denir [52]. Şekil 3.1’de basitleştirilmiş tipik bir lazer şemasını göstermektedir. Buna göre “lazer” tüp düzeneğinin içinde bir ışın kaynağı, bu ışını tetikleyecek flash lambalar (kripton), ışını tek dalga boyunda ve tek bir demet halinde çıkaracak olan %98 ve %100 yansıtıcı aynalardan oluşan bir sistemdir [32].



Şekil 3.1. Basitleştirilmiş tipik bir lazer şeması [53].

3.1.1. Lazer Işınının Özellikleri

Lazer ışını, diğer ışık kaynaklarının yaydıkları ışığa kıyasla şiddet, uyumluluk, yönlendirilebilirlik ve bant genişliği yönünden üstünlüklere sahiptir. Bu özelliklerin hepsi birbiriyle bağlantılı özellikler olup, yönlendirilebilirlik özelliği, uyumluluğun yanal bir görünüşü iken, bant genişliği uyumluluğun boyca bir görünüşüdür.

Lazer ışınının gücüne örnek olarak yakut lazerinin darbe şeklindeki ışını mercek ile odaklandığında 3-4 mm kalınlığındaki çelik bir sacı çok rahat delebilmektedir. Bu olay darbelerin toplam enerjisi olağanüstü büyük olmasından değil, darbe enerjilerinin konsantrasyonlarının hacimsel ve zamansal olarak çok büyük olmasından kaynaklanmaktadır.

Lazer ışınlarının çok hassas işlemlerde kullanılması çok küçük çaplarda odaklanabilmelerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin 0,1 mm lazer ışının yönlendirildiği optik cihazın kenarlarındaki aynaları yardımıyla odaklama işlemi sağlanır.

Lazer ışının bir başka karakteristik özelliği ise yüksek derecelerde sıkıca demetlenmektedir bu sebeple lazer ışınlarının bant genişlikleri çok dardır [54].

Lazer ışının özellikleri lazer tipine ve optik cihazın şekline bağlı olarak değişim göstermektedir. Lazer ışığının önemli özellikleri şunlardır;

- Lazerin tek dalga boyuna sahip olması,
- Yüksek derecede uyumluluğa sahip olması,

- Çok uzak mesafelere kadar saçılmadan paralel olarak gidebilmesi,
- Lazer ışını tek renkli olması,
- Lazerler ışınlarının yüksek dereceden doğrultu özelliğine sahip olması,
- Enerji aynı frekans değerinde yayıldığından hedeflenen noktada çok yüksek yoğunluğa ulaşabilmesi,
- Lazer ışını, ışın kesitinde sabit bir enerjiye sahip değildir,
- Lazer ışınları oldukça iyi odaklanabilmektedir [54].

Lazer ışını derin nüfuziyet kaynağı için birçok değişken önemlidir;

- Lazer ışını: dalga boyu, güç, polarizasyon, odak çapı, odaklanma sayısı, yoğunluk dağılımı,
- Proses ortamı: yardımcı gaz, gaz hızı, lülenin çeşidi, lüle geometrisi, tel çapı, tel hızı,
- Çalışılan parça: malzeme, kalınlık, yapı, yüzey durumu, kenarların hazırlanması,
- Kullanım: kaynak hızı, kaynak yönü, odak yeri (pozisyonu), ivme,
- Çalışılan parçanın geometrisi (2D, 3D), kaynak pozisyonu, ulaşılabilirlik [58].

3.2. LAZER KAYNAK TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ

Lazer teknolojisinin tarihsel gelişimin başlangıcı 1950’li yıllarda dayanmaktadır. Lazer ışını üretmek için termodinamik dengedeki bir noktadan aktif lazer konumuna enerji transfer edilmelidir. Lazer ışını, atomların, iyonların veya moleküllerin yüksek enerjili halden düşük enerjili hale geçişleri sırasında oluşmaktadır.

1916 yılında, uyarılma yoluyla enerji düzeyleri yükselen atomların, kendi enerji seviyelerinden daha alt bir enerji düzeyine düşmeleri sırasında enerji açığa çıkardıkları biliniyordu. Kendiliğinden oluşan bu enerji oluşumunu kontrol altına alabilmek, enerjiyi belli bir dalga üzerinde toplayarak istenilen şiddete yükseltebilmek üzerine çalışmalar yapıldı.

Bu çalışma alanlarına verilebilecek ilk örnek olarak Dicke, nüfus terslemesi durumunu oluşturmak (pompalama işlemiyle uyarılmış atomların sayısını arttırmak) için, kısa süreli darbe kullanma fikrini 1954’te ortaya atmıştır. Söz konusu nüfus terslemesi,

kendiliğinden emisyon ile şiddetli bir patlama üretmektedir. T.H.Maiman tarafından bulunan ilk darbe esaslı katı lazerin ardından bu alana olan ilgi artmış ve araştırmacılar tarafından çok kısa bir süre içinde elli çeşit lazer geliştirilmiştir. 1957’de Gould, lazeri oluşturacak olan Fabri – Perrot boşluğunu tasarlamış, ilk lazer makalesini 1959’da yayınlamıştır 1958’de Schawlow ve Townes “Infrared and Optical Masers” başlıklı bir makale yayınlamıştır [54], [55].

1960 yılının sonlarına doğru Jovan, Bennet ve Herrat tarafından Helyum-Neon lazeri geliştirilerek ilk gaz lazeri imal edilmiş olup, 1962 yılına Stevenson yarı iletkenlerle çalışan lazeri bularak lazer çağının gelişimine ivme kazandırmış ve 1964 yılında Patel CO₂ lazerini geliştirmiştir.

Lazer konusunda pek çok çalışma yapan araştırmacılardan birisi olan Kahraman, lazerle ince metal ve kabloların kaynak işlemi üzerine çalışmıştır. Yaptığı bu çalışmada, 0,1 ve 1 mm kalınlığında farklı özelliklere sahip metallerin kaynağını başarılı bir şekilde gerçekleştirmiştir [46].

Lazer uygulamalarında delik çapının delik derinliğine oranı 1/1 ile 1/20 arasında değişen delikleri açmak en sert malzemelerde dahi mümkündür. Aynı zamanda mikro işlemcilerin (mikroçip) üretilmesinde gerekli olan µm seviyesindeki kaynağın yapılması da mümkün olmaktadır.

Bilgisayar kontrollü lazer takım tezgâhları hem ekonomik oldukları için hem de işlem hassasiyetlerinin yüksek olması sebebiyle öncelikli olarak tercih edilen tezgâhlar olmuşlardır. Lazer çıkış enerjileri 5-75 Joule ve darbe uzunlukları 1,2 ile 3 ms arasında değişen lazer ışınlarının toplayıcı bir mercekle yardımıyla malzeme yüzeyine odaklanması sonucu, odak yüzeyinde büyük bir güç yoğunluğu meydana gelmektedir. Oluşan bu güç yoğunluğundan dolayı malzeme önce ısınmakta sonrasında eriyerek buharlaşmaktadır. Böylece ısı olarak işlenebilmekte ve bu işlemde malzemenin fizik ve termik özellikleri önemli rol oynamaktadır [46].

3.3. LAZERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Endüstriyel alanda çok geniş kullanım alanına sahip lazerlerin uygulama alanları şu şekilde sıralanmıştır;

1. Lazerle delme,

2. Lazerle kesme,
3. Lazerle yüzey sertleştirme,
4. Lazerle markalama,
5. Gravür yapma ve helezon açma,
6. Lazerle ölçüm;
 - a) Holografik inferometre,
 - b) Lazer speckle tekniği,
 - c) Lazer diagnostikleri,
7. Lazer ile hız ölçümü,
8. Lazer kaynak [46].

Teknolojinin hızla ilerlemesi ile birlikte birçok lazer türü daha kolay ulaşılır hale gelmiş ve ilk olarak 1970’li yıllarda süpermarketlerde barkod okuyucu olarak günlük hayatımıza girmeye başlamıştır. Daha sonraları da cd okuyucu, yazıcı gibi birçok aletle evimize girmiştir. Günlük kullanımın dışında değişik birçok alanda kullanılmaktadır [56]. Çizelge 3.1’de lazerin genel kullanım alanları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Lazerlerin genel kullanım alanları [55].

Lazerlerin Uygulama Alanları						
Düşük Şiddetli Lazerler				Yüksek Şiddetli Lazerler		
İletişim	Metroloji	Doküman Depolama	Eğlence	Askeri	Medikal	Isı Kaynağı
Optik Fiber İletişimi	Holografi	Baskı	Lazer gösterileri	Hedef belirleme	Tümör Terapisi	Kesme Delme Kaplama
Telekomünikasyon	Uzunluk/hız ölçümü	Tarama	Pointerler	Gözlem	Cilt/diş/göz Cerrahi	Kaynak
Optik bilgi depolama ve hesaplama	İnterferometri	Data depolama	Audio-akustik kayıt	Atomik Füzyon	Anjiyoplasti	Yüzey İşleme

3.4. LAZER TÜRLERİ

3.4.1. Katı Lazerler

Katı lazer yöntemi için kullanılan ilk malzeme yakuttur. Yapısında üç değerli krom iyonları içeren, şeffaf bir alüminyumoksit kristalidir. Darbesiz çalışmada yakut kristalleri 30-40 kW, darbeli çalışmalarda ise 30-100 mW güç sağladığı gözlemlenmiştir. Yakut lazerinin ardından neodimli cam ile lazer keşfedilmiştir. Neodim cam lazeri yakut lazerin aksine sadece darbeli olarak çalışmaktadır [54].

3.4.2. Gaz Lazerler

Bu lazer türünde etkin ortam çoğu zaman gaz karışımından oluşmaktadır. En yaygın olanları, güçleri zayıf (miliwatt düzeyinde) olmakla birlikte helyum-neon lazerleridir [54].

3.4.3. Boyar Madde Lazerleri

Bu lazer türünde etkin ortam sıvı çözelti halindeki organik moleküllerden oluşmaktadır. Mor ötesi veya görünür ışıkla uyarıldıklarında 100 nm ya da daha fazla bir tayf oluştururlar [54].

3.4.4. Yarı İletkenli Lazerler

Lazer, eklemlili diyot biçiminde birleştirilmiş kimi yarı iletkenler ile elde edilmektedir. Eklemlideki akımın yoğunluğuna, sıcaklığa ve katkı maddelerine bağlı olan dalga boyu dizisi kızıl ötesi ışınlarına kadar uzanır. Lazerin gücü birkaç miliwatt ile birkaç yüz miliwat arasında değişir. Bu lazerlerin uygulama ortamları genellikle optik lifli telekomünikasyon sistemleridir [54].

3.4.5. Serbest Elektronlu Lazerler

Yüksek enerjili elektron paketlerini manyetik alan oluşturmaya yarayan bir sistem olarak adlandırılan bir dizi mıknatıstan oluşan şiddetli bir ışın kaynağı elde etme imkânı sunar [54].

3.5. LAZER KAYNAĞI

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation kelimelerinin baş harflerinden oluşan Lazer ışını ile kaynak (laser beam welding), konsantre edilmiş enerji ışınlarının (elektron ışını plazma jet vb.) kullanılma tekniklerinden bir tanesidir. Diğer kaynak yöntemlerinin kullanılmadığı durumlar için geliştirilmiş bir kaynak yöntemi olan lazer kaynağı, temassız yüksek enerjili bir ışın işlemidir. Lazer kaynağı, işlemdeki hassasiyet, uygun şekilleri kaynaklama kabiliyeti, boşluksuz kaynaklar üretme kabiliyeti, inanılmaz kısa devre süresi ve düşük ısı girişi nedeniyle geleneksel ark kaynağı işlemlerinden daha iyidir [57].

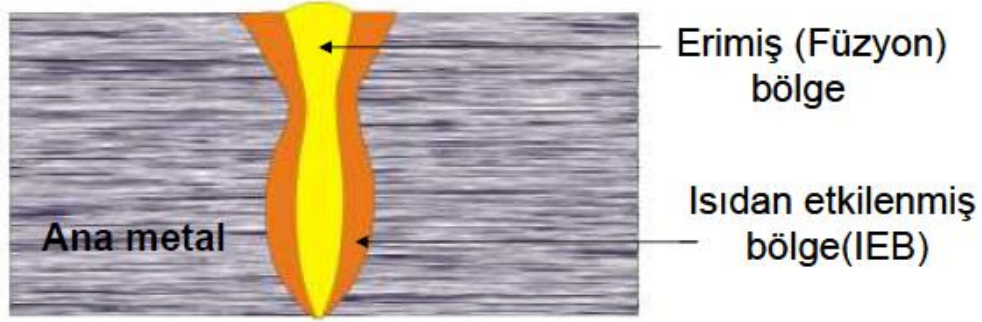
Ergitme kaynak yöntemi olan lazer kaynağında güç yoğunluğu, malzeme buharlaşmadan ergiyecek şekilde ayarlanmalıdır. Lazer ışın en önemli üstünlüğü çok güçlü olmasıdır. Elde edilen lazer ışın gücünün tepe değeri 1 milyar Watt'tır. Işın, bir optik mercek yardımıyla çok küçük bir alana (0,01 - 0,10 mm çaplı) yoğunlaştırılarak enerji girdisi olarak kullanılabilmesi lazer kaynağın temelini oluşturur. Lazer arklı hibrit kaynağında, lazer gücü anahtar deliği üreten ısının ana kaynağıdır ve derin penetrasyon kaynağını sağlar [58].

Lazer kaynağının çalışma prensibinin temeli her atomun sahip olduğu enerji (kuantum) seviyesine dayanır. Bir lazer sistemi temel olarak iki ana parçadan oluşur. Bunlar lazer kafası olarak bilinen optik resonatör ve düzenli enerji kaynağı sağlayan kumandadır. Lazer ışınları bir dış kaynaktan enerji absorpsiyonu ile uyarılarak etrafa foton yayarlar ve yayılan bu fotonların bir kısmı maddenin içerisinde bulunduğu kabın yüzeylerinden yansiyarak maddeyi oluşturan atomlara çarpar. Bu çarpmalar yeni fotonların yayılmasına neden olur. Bu şekilde zincirleme devam eden reaksiyonlar sonucunda ortamda eş fazlı ve monokromatik bir ışık oluşur. Çevreleyici kap üzerindeki optik bakımdan geçirgen bir delik yardımıyla oluşan ışının bir kısmı kaptan dışarı çıkartılarak istenilen doğrultuda yönlendirilir.

Lazer ışınının oluşması için gerekli olan dış enerji, genel olarak sisteme kimyasal, elektriksel ve optik olarak iletilir. Günümüzde, endüstride kullanılan en yaygın uyarma yöntemi CO₂ lazerlerde kullanılan yüksek frekanslı elektrik akımı ve katı hal Nd: YAG ve İtterbium Fiber lazerlerde kullanılan flaş lamba ve diyotlardır [32].

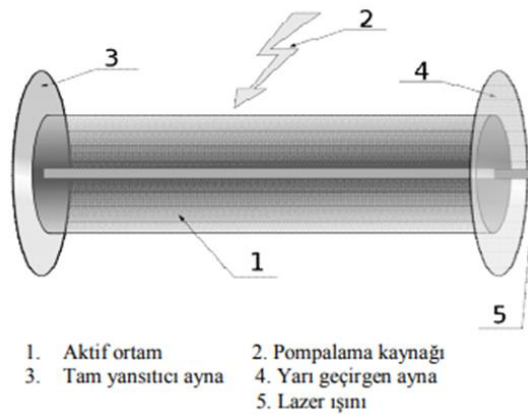
Lazer kaynak işlemi, kaynak yapılacak malzemelerin birleşme yüzeyleri eritildikten sonra soğumaya bırakılması ile gerçekleştirilen bir füzyon işlemidir. Lazer kaynak uygulanan

malzemede birbirinden farklı üç bölge oluşur (Şekil 3.3). Birinci bölge ana metaldir ve kaynak yapılan metali içeren bu bölge kaynak işlemi süresince hiçbir değişime uğramaz. İkinci bölge füzyon bölgesidir (eritilmiş metal), kaynak işlemi süresince eriten metali içeren bölgedir. ITAB olarak da bilinen üçüncü bölge kaynak işlemi süresince ana metalde oluşan ısı ile birlikte bazı değişimlere uğrar (Şekil 3.2), [59].



Şekil 3.2. Lazer ile kaynak işlemi sırasında oluşan bölgeler: Ana metal, Erimiş bölge, ısı tesiri altındaki bölge [59].

Mikron ölçüsündeki alanlar üzerinde çok yüksek güçler doğrudan lazer sisteminin ince bir malzemeyi kaynatması için gerekli enerji miktarı, aynı ölçülerdeki malzemenin elektrik ark kaynağında kaynatılması için gerekli olan enerji miktarının 1/10'u kadardır. Günümüz şartlarında, yüksek ergime noktalarından dolayı kaynatılmaları çok zor olan Tungsten, Platin, Molibden gibi yüksek dirençli metallerin kaynağı, lazerlerin ürettiği yüksek enerji sayesinde başarılı bir şekilde yapılmaktadır [46]. Şekil 3.3'te lazer cihazının temel elemanlarının görseli yer almaktadır.



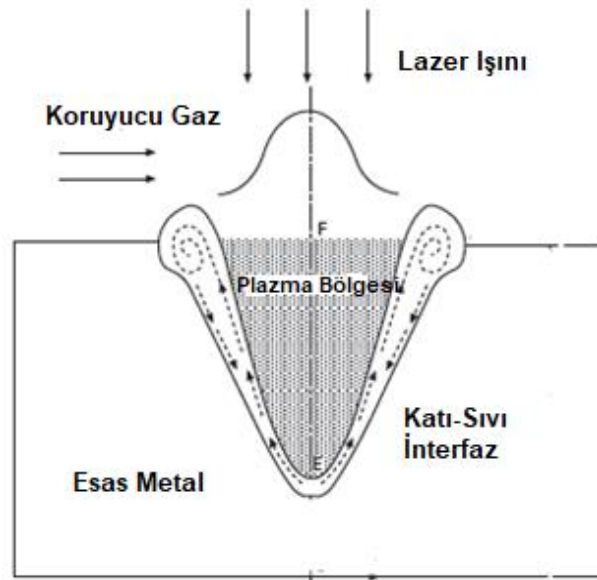
Şekil 3.3. Bir lazer cihazının temel elemanları [56].

Bir lazer sistemi temel olarak iki ana parçadan oluşur. Bunlar lazer kafası olarak bilinen

optik resonatör ve düzenli enerji kaynağı sağlayan kumandadır. Lazer kafasına gönderilen enerjinin bir bölümü lazer aktif madde tarafından elektromanyetik bir ışına çevrilir. Aktif ortam katı sıvı veya gaz olabilir. Sıvı hal lazeri tercih edilmemekle beraber katı hal lazeri uygulamalarında en fazla Neodin-YAG ve Neodin-cam, nadir olarak da Rubin (yakut) kullanılmaktadır. Gaz hal lazerlerinde malzeme işlemek için yaygın olarak CO₂ tercih edilirken nadir olarak argon lazeri aktif madde olarak kullanılmaktadır [44].

Lazer kaynak sistemlerinde malzemeye enerji aktarımı, enerji yoğunluğu yüksek (10 kW/cm²) lazer ışınının aynalar ve fiber optik kablolar yardımı ile iş parçasına odaklanması sonucu gerçekleştirilir. İş parçasına odaklanan enerji yoğunluğu yüksek ışın demeti sıvı metal havuzu ile çevrelenmiş olan ince bir buhar kolonu üretir. Sonrasında lazer ışını ilerleyerek sıvı metal kanal içine akar ve böylece kaynak işlemi gerçekleştirilmiş olur. Oldukça dar kaynak bir genişlikte olmasına rağmen Lazer ışını ile oldukça yüksek kaynak derinliği elde edilmektedir [46].

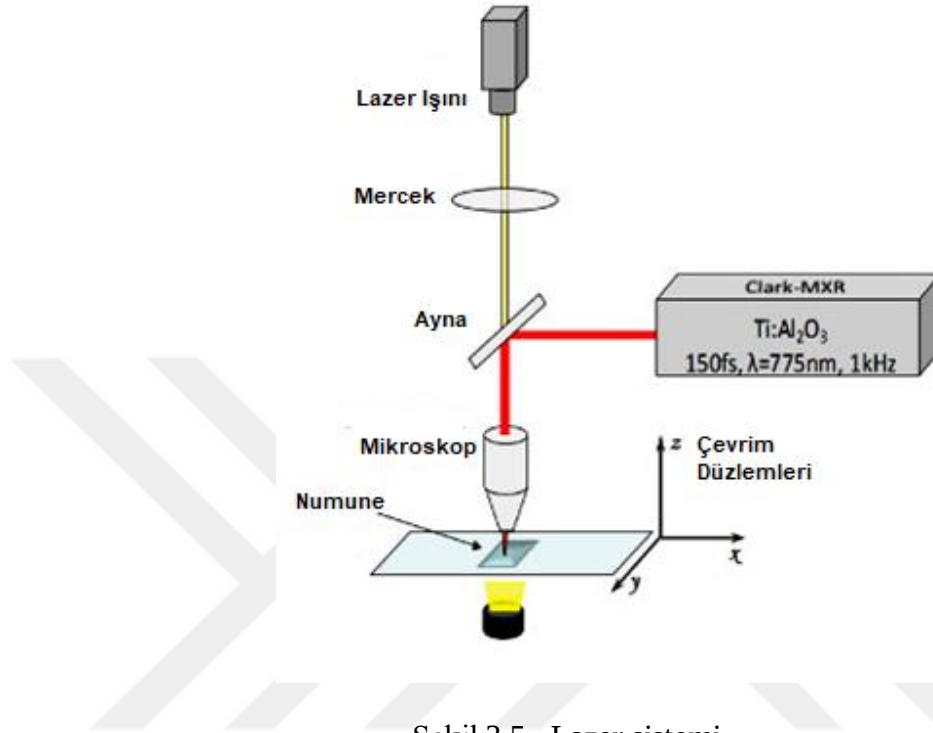
Lazer ışınının odak çapı oldukça küçük olması nedeniyle, lazer kaynağının açıklığı doldurma özelliği kötüdür. Lazer kaynağının avantajları olarak yüksek kaynak derinliği, yüksek kaynak hızı, düşük toplam ısı girdisi ve yüksek çekme dayanımından bahsedilebilir [51].



Şekil 3.4. Darbeli lazer anahtar deliği kaynak işleminin şematik çizimi [60].

Şekil 3.4'te Darbeli lazer anahtar deliği kaynak işleminin şematik çizimi gösterilmiştir. Elektrik arkının aynı kaynak havuzunda lazerle kullanılması nedeniyle, malzemenin içindeki lazer emilimi de artar. Güç yoğunluğu, lazerle kaynak sırasında kaynak üzerinde

en büyük etkiye sahiptir. Güç yoğunluğu, gücün ışın noktası alanına oranıdır. Güç yoğunluğu uygulanan güç ile doğru orantılıdır güç arttıkça güç yoğunluğu artar ve ışın noktası alanı arttıkça azalır. Büyük ışın noktaları, belirli bir lazer gücü için daha az nüfuzlu daha geniş anahtar delikleri oluşturur [61].



Şekil 3.5. Lazer sistemi.

Şekil 3.5'te lazer sistemi gösterilmektedir. Lazer arklı hibrit kaynak, verimliliği arttıran daha yüksek kaynak hızı gibi faydalı özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, kaynak penetrasyonu kaynak hızından ters yönde etkilenir. Yüksek bir kaynak hızında etkileşim süresi daha azdır, bu nedenle kaynağın birim uzunluğu başına ısı girişini azaltır, bu da kaynak nüfuzunu azaltır. Bunu telafi etmek için daha fazla lazer gücü gereklidir ve sabit bir kaynak havuzu hacmini korumak için dolgu tel besleme hızı arttırılmalıdır. Dolgu teli besleme oranına kaynak hızı, anahtar deliğinin ve tüm sürecin kararlılığı için önemli bir faktördür [53].



Şekil 3.6. Lazer ışının malzeme yüzeyine etki bölgesi [60].

Lazer teknolojileri, TIG biriktirme kaynağı gibi geleneksel işlemlerle karşılaştırıldığında birçok avantaj sunar. Lazer ışını tarafından üretilen termal yük yalnızca kaynağın kendisini çevreleyen alanı etkiler, seyreltme, bozulma ve termal stres oluşumunu azaltmayı mümkün kılar [60]. Lazer ışın kaynağının kendisini çevreleyen alana etki bölgesi yukarıdaki Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Lazer kaynak sırasında optik radyasyon, elektrik çarpması, yangın, patlama ve duman kaynaklı güvenlik tehlikeleri yaşanabilmektedir. International Electrotechnical Commission (IEC) tarafından yayınlanan IEC 825-1: 1993, lazer güvenliği ile ilgili uluslararası standarttır. Lazerlerin güvenli kullanımı için standartlar AISI tarafından oluşturulur [53].

3.6. LAZER KAYNAĞI ÇALIŞMA PRENSİBİ

Lazer kaynağı iki tipte olabilmektedir. Bu tipler;

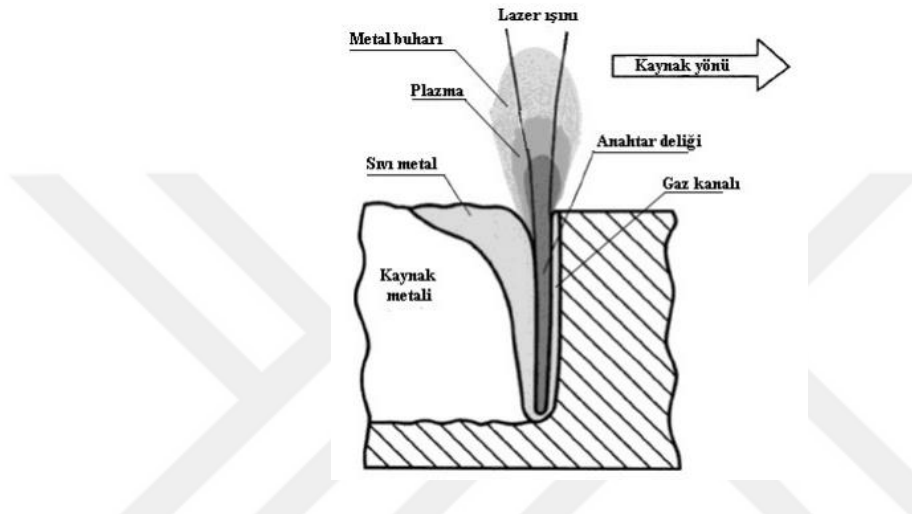
- Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı (Keyhole laser welding),
- İletim lazer kaynağı (Conduction laser welding) [41].

Bu iki kaynak çeşidi arasındaki temel fark, iletimle kaynak sırasında kaynak havuzunun kapalı, derinlemesine kaynak işleminde açık olması ve lazer demetinin daha derine etki etmesidir.

3.6.1. Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı

Derinlemesine nüfuz yöntemi ile elde edilen lazer kaynağına Anahtar Deliği (kılavuz çukur) anlamına gelen ‘Key Hole’ yöntemi de denir. Lazer ışın demetinin güç yoğunluğu

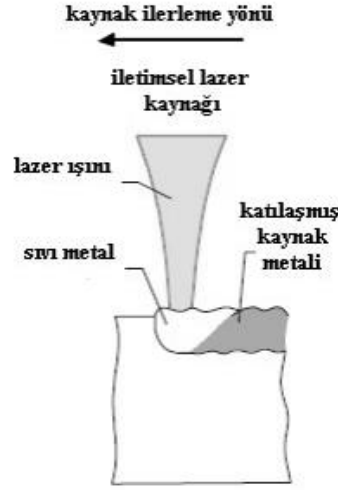
yeterince büyükse malzeme yüzeyinde anahtar deliği elde edilir. Lazer demet ışının malzeme yüzeyinde oluşturduğu kaynak çukurunda ergime havuzu meydana gelir ve bu bölge kararlı bir yapıdadır. Derinlemesine kaynak işleminde kaynak havuzu açıktır ve lazer demeti daha derine etki eder. Anahtar deliği oluşturarak malzemelerin kaynatılması özellikle kalın saclar için tercih edilen bir yöntemdir [41]. Şekil 3.7’de derinlemesine nüfuz kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumunun şematik kesit görünüşüne yer verilmiştir [55].



Şekil 3.7. Derinlemesine nüfuz kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumunun şematik kesit görünüşü [56].

3.6.2. İletimsel Lazer Kaynağı

Lazer iletim prensibinde malzemenin lazer ışın enerjisini yutarak, kaynama noktasına ulaşmasıdır. Kaynama noktasındaki malzemelere uygulanan sabit bir yük malzemelerde birleşmeye sebep olur. Bu iki kaynak çeşidi arasındaki temel fark, derinlemesine kaynak işleminde açık olan kaynak havuzunun, bu yöntemde kapalı olmasıdır. İletimsel lazer kaynağı, lazer güç yoğunluğunun malzemeleri kaynatma noktasına getirmeye yetmediği fakat malzemeyi ergitebildiği durumlarda kullanılan bir yöntemdir [41]. İletimsel lazer kaynağı kapalı kaynak havuzunun kesit görünüşü Şekil 3.8’de yer almaktadır [55].



Şekil 3.8. İletimsel lazer kaynağı kapalı kaynak havuzunun kesit görünüşü [56].

3.7. LAZER KAYNAĞINDA KULLANILAN KORUYUCU GAZLAR

Kaynak işlemlerindeki parametrelerin en önemlilerinden birisi kullanılan koruyucu gazın özellikleridir. Kaynak türlerinde gaz karışımı ve gaz özelliklerinin kompozisyonu kaynak yapılacak malzemeye bağlı olarak değişir. Koruyucu gazın seçiminde ergimiş metal ve gazlar arasında meydana gelecek metalürjik ve kimyasal etkileşimler göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin lazer kaynağında koruyucu gaz, plazma oluşumunu minimuma indirerek istenilen kaynak nüfuziyetine ulaşmak açısından oldukça önemli bir role sahipken, ark kaynağında ise arkın korunmasında koruyucu gazın yoğunluğunun önemli bir etkisi vardır. Koruyucu gazların en önemli rolü kaynak bölgesinde oksidasyonu oluşumunu engellemektir. İkinci ve kritik etkisi ise kaynak bölgesi içinde yaratılabilecek plazma ve kaynak bölgesi üzerindeki buhar oluşumunu engellemek ve plazma oluşumunu durdurmaktır. Diğer bir önemli rolü de lazer ışınının kaynak bölgesine en az kesilme ile ulaşımı sağlayarak kaynak kalitesinin iyileştirilmesidir. Koaksiyel ve taraflı gaz akış nozullarıyla, gazı kaynak bölgesine yönlendirmenin her ikisi de kullanılan alışıla gelmiş yöntemlerdir.

Genellikle koruyucu gaz olarak helyum ve argon kullanılmaktadır. Yüksek iyonizasyon enerjisinden dolayı helyum gazı tercih edilir. Azot da helyum ile yer değiştirilebilerek kullanılan bir gazdır, aynı özelliklerin birçoğuna sahiptir ve daha ucuzdur. Gaz debileri genellikle 10-40 L/dk, daha yüksek kaynak hızları için daha yüksek debiler gereklidir. Gaz akışının optimizasyonunun kaynak nüfuziyetine etkisi görülebilir. Azot gazının kullanımı, helyumdan daha çok plazma ateşlemesine ve sınırlandırılmış bir kaynak

nüfuziyet derinliğine yol açmaktadır [50]. Koruyucu gazlar ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda istenilen amaçlara ulaşmak için, numune yüzeylerinde gaz akışı tarafından yaratılan basınç kaydedilerek çalışma parametreleri üzerindeki etkisi analiz edilmektedir. Bu sebepten araştırmalarda genellikle malzemeyi oksidasyondan korumayı garanti edecek, plazma oluşumunu bastırarak en yüksek kaynak nüfuziyeti gerçekleştirecek en az gaz akış hızlarının belirlenmesi gerekir [62].

3.8. LAZER KAYNAK PARAMETRESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELER

Lazer kaynağın parametresini etkileyen ana parametreler, lazerin dalağa boyu ve kullanılan mercekle lazer demetini nüfuz etme oranı, lazer ışının gücü, lazerin çalışma şekli (sürekli dalga veya darbeli), kaynak karakteristiği. Lazer kaynaklarda kaynak bölgesinin derinliği lazerin güç yoğunluğuna ve lazer kaynağın hızına bağlıdır. Kaynak derinliği güç yoğunluğu ile doğru orantılı, kaynak hızı ile ters orantılıdır. Lazer kaynağı sürekli (CW), darbeli (Pulsed) veya Q-anahtarlama modda çalışabilir. Lazer kaynak parametrelerinin incelemek üzere oluşturulan özet tablo Çizelge 3.2’de yer almaktadır.

Çizelge 3.2. Lazer kaynak parametrelerinin incelenmesi [32].

Lazer Kaynak Parametreleri	İşlevi	Etkisi
Lazer Gücü	Yeterli kaynak derinliğinin elde edilmesi [9]	Nüfuziyet Derinliği
		Kaynak sıçraması
Kaynak metali soğuma hızı	Yeterli sertliğe ve tokluğa ulaşılması [8]	Kaynakta çatlak oluşumu
		Çekme dayanımı
Koruma gazı	Oksidasyona karşı kaynağın korunması, kaynağın yüzey kalitesinin ve pürüzsüzlüğünün sağlanması [7]	Koruma gazının etkisi
		Farklı tip koruma gazının etkisi
		Boşluk, çatlak gibi kaynak hataları
Lazer kaynak hızı	Kaynağın nüfuziyeti ve şeklinin kaynak hızı ile olan ilişkisi [10,11].	Kaynak nüfuziyeti
		Kaynağın şekli

3.9. LAZER KAYNAĞIN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Avantajlar;

- Düşük ısı girişinden dolayı, küçük ITAB ve çalışılan parçada, düşük termal bozulmalar ve daha düşük deformasyon riski,
- Yüksek kaynak hızları (dakikada birkaç metreye kadar),
- Derin ve dar kaynak şekli,
- Minimum kirlilik,
- Atmosfer ortamında kullanım,
- Kolay otomasyona izin vermesi,
- Doldurucu malzemelere ihtiyaç duymaması,
- Karışık bağlantı konfigürasyonları ve farklı malzemelerin kaynaklanabilirliği,
- Normalde, kaynak sonrası operasyonlar gerekli değildir.

Dezavantajlar;

Lazer kaynağı, birçok avantaja sahiptir fakat diğer kaynak tekniklerinde olduğu gibi lazer kaynağı da bazı dezavantajlara sahiptir. Bunlar;

- Odaklanmış nokta büyüklüğünden dolayı yakın birleştirme bağlantı elemanlarına ihtiyaç duyar,
- Bir boşluğu bağlamak (köprü kurmak) için sınırlanmış yeteneğe sahiptir,
- Kaynak lazeri, özellikle CO₂ lazerleri taşınabilir değildir,
- Düşük elektrik verimliliğine sahiptir.
- Ekipman ve operasyon maliyetleri yüksektir,
- Kaynak hızı aralarında 0,5 mm'den daha fazla boşluklara sahip bağlantı elemanlarında kaynak hızı ciddi bir şekilde düşer.
- Yüksek yansıtıcı malzemelerde kaynak işlemi yapmak zordur [63], [64].

3.10. KAYNAK YÖNTEMİNDE KULLANILAN LAZER SİSTEMLERİ

Lazer kaynak sistemleri uygulama alanına göre iki ana gruba ayrılır:

Yüksek güçte katı-hal lazer sistemleri;

- a) Ruby lazer sistemi,
- b) Glass lazer sistemi,
- c) YAG lazer sistemi,

Yüksek güçte gaz lazer sistemleri;

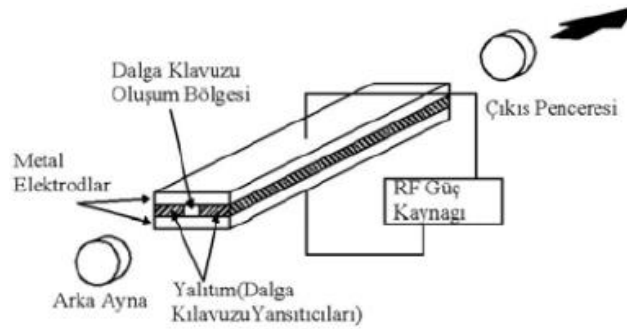
- a) CO₂ lazer sistemi,
- b) Argon iyon lazer sistemi [46].

Birçok endüstriyel türü bulunan lazer kaynak yöntemlerinde yaygın olarak CO₂ lazeri ve katı hal (Nd: YAG) lazerleri kullanılmaktadır. (Nd: YAG) katı hal lazeri metalik malzemelerin mikro kaynak ve kesme işlemlerinde (0,2-0,4 mm kalınlıklar için), CO₂ lazeri ise makro ölçüde kaynak ve kesme işlemlerinde (1-15 mm kalınlıklar için) kullanılır. Pratikte ise lazer kaynağı uygulamaları; darbeli ve sürekli olmak üzere iki temel şekilde uygulama alanı bulunmaktadır [43].

3.11. CO₂ LAZER SİSTEMİ

CO₂ lazerleri; 10,6 µm'lik dalga boyuna sahip, kızılötesi lazer radyasyonu yayarlar ve yaklaşık olarak yüzde 10 ile 13 arasındaki genel verimlilik oranlarına sahiptirler. Bir CO₂ lazerindeki, lazer aktif ortamı; CO₂ (lazer aktif molekülü olan), N₂ ve He gazlarından oluşan bir karışımdır. Lazer aktif ortam simülasyonu (uyarılması), gazdaki elektriksel boşalma ile başlar. Bu uyarılma işlemi boyunca; nitrojen molekülleri, elektron çarpışmasından gelen enerjiyi, CO₂ moleküllerine transfer eder. Enerjiyle uyarılmış CO₂ moleküllerine, daha düşük bir enerji seviyesine (düşük titreşimli/hareketli seviyeye) geçiş, lazer ışın demeti yayılımına öncülük eden foton salınımı tarafından eşlik edilir. CO₂ molekülleri, gaz karışımının büyük bir kısmını oluşturan helyum atomlarıyla çarpışarak, temel enerji seviyelerine dönerler ve temel enerji düzeyindeki CO₂ molekülleri, o zaman, bir sonraki döngü için hazırdırlar. Bir gaz karışımındaki, elektriksel gaz boşalmasının tetiklenmesi doğru akım ya da radyo frekansı uyarılmasından biriyle başlar. Doğru akımla uyarılmış lazerlerde, elektrotlar arasındaki gaz boşalması, elektrik

enerjisinin doğrudan lazer gazıyla bağlantılı olmasına izin verir. CO₂ lazer üretim sistemi işleyişinin görseli Şekil 3.9’da verilmiştir [63].



Şekil 3.9. CO₂ lazer üretim sistemi [62].

Endüstride özellikle malzeme işlemede (kaynak, kesme, kaplama, ısıtma işlemi, markalama vb) kullanılan lazer türlerinden gaz hal lazeri olarak da CO₂ lazeridir. CO₂ moleküllerinin uyarılması, elektronların ve N₂ moleküllerinin lazer gazında yer alması ile bir yandan uyarılma işlemine katkı sağlamakta, bir yandan da önemli derecede enerji depolama işlemi yürütmektedir. N₂ moleküllerinin konsantrasyonu CO₂ moleküllerine göre yaklaşık 5 kat daha büyük olabilmektedir.

CO₂ molekülleri üç farklı şekilde titreşim kabiliyeti ile hareket edebilmektedirler. CO₂ molekülleri farklı titreşim şekilleri Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. CO₂ moleküllerinin titreşim şekilleri [43].

TİTREŞİM ADI	TİTREŞİM ŞEKLİ	KISA GÖSTERİMİ
Simetrik Titreşim	$\rightarrow \leftarrow$ O-C-O $\leftarrow \rightarrow$	XOO
Eğme Titreşimi	O- $\uparrow$ C- $\downarrow$ - O	OXO
Asimetrik Titreşim	$\rightarrow \rightarrow$ O-C-O $\leftarrow \leftarrow$	OOX

Kısaca X olarak gösterilen ifade, titreşim adı altında verilen titreşim şekli için enerji seviyesini belirtmektedir.

CO₂ lazer kaynağının avantajları;

- Elektriksel verim yüksektir,
- İşletme maliyeti düşüktür,
- Yüksek güçlere kolayca ölçeklendirilirler.

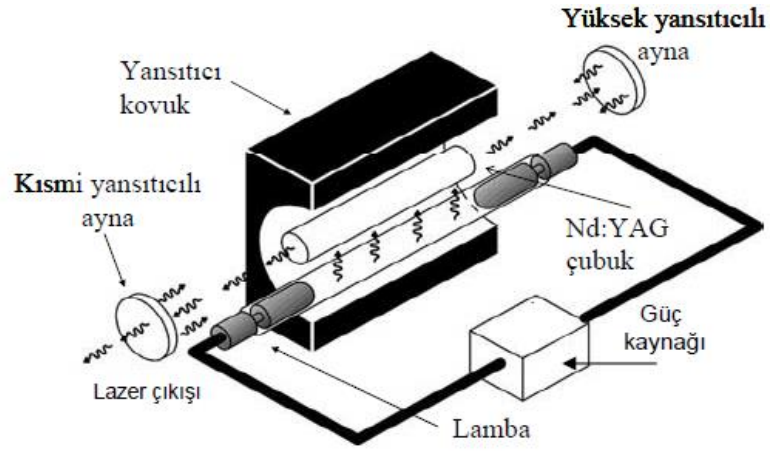
CO₂ lazer kaynağının en büyük dezavantajı ise yansıma katsayısı yüksek malzemelerin kaynak ile birleştirilmeleri sırasında çok büyük yansıma göstermeleridir [62].

3.12. ND: YAG LAZER SİSTEMİ

Nd: YAG lazeri, 1064 nm lazer çıkışı üretmek için, 810 nm'lik bölgedeki ışık enerjisini soğuran bir kristalden oluşmuş katı durum lazeridir. Lazer aktif ortamı; nadir bulunan neodyum (Nd³⁺ iyonu) içeren, tek bir sentetik YAG (YAG; Yitrium Alüminyum Garnet kelimelerinin baş harflerinden meydana gelmiştir) kristalidir ve 1.064 µm dalga boyuna sahip, kızıl ötesi lazer ışığı yayar. Bu yöntemde Nd: YAG lazerinde depolanan element olarak neodmiyum (Nd) kullanılır. YAG kristali enerjiyi absorbe eder ve bunu birkaç mm çapındaki tek dalga boylu kızıl ötesi ışın demetine dönüştürür[63].

Kaynak uygulamaları için kullanılan mevcut Nd: YAG lazerinin ortalama çıkış güçleri 0,3-3 kW aralığındadır. Teknolojideki son gelişmeler sayesinde bu değer 4 kW değerine kadar çıkabilmektedir. Nd: YAG lazeri çalışma modlarına göre üçe ayrılır;

- Sürekli mod (Biçim),
- Darbeli mod,
- Q-Anahtarlamalı mod [62].

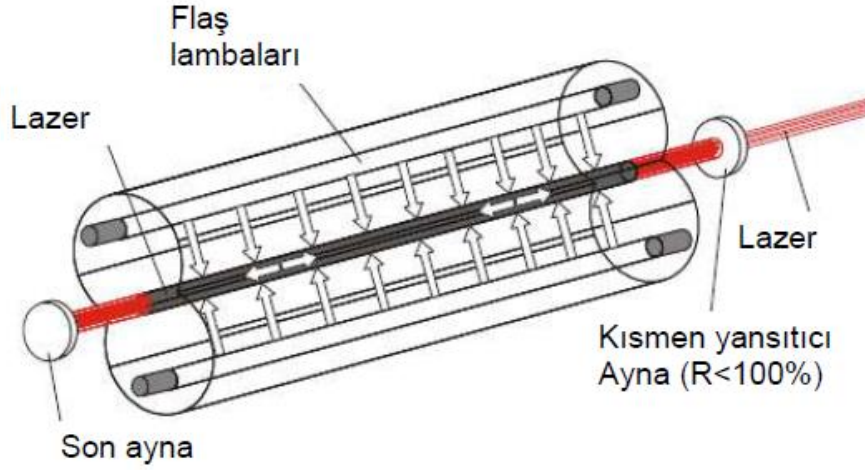


Şekil 3.10. Nd: YAG lazer sistemi [32].

Şekil 3.10’da Nd: YAG lazerinin çalışma prensibi gösterilmektedir. Burada Nd: YAG çubuğunun uyarılmasıyla ortaya çıkan lazer ışını yansıtıcı oyuk içerisinde %100 yansımali ayna ve %98 yansımali aynalar arasında defalarca gidip gelerek yönlendirilir. Sonuçta düz ve tek bir dalga boyuna sahip olan lazer ışını %98 yansıtıcı aynadan geçerek ortama verilir. Lazer çubuğu ve flaş lambası pompa boşluğuna akan su sayesinde soğutulurlar [62], [63].

Endüstride özellikle malzeme işlemede (kaynak, kesme, kaplama, ısıtma işlem, markalama vb) için en çok tercih edilen lazer türlerinden biri katı hal lazeri olan Nd: YAG lazeridir. YAG lazerinin çıkışı yüksek ortalama güçlerde çalışma yeteneği olmadığından sınırlıdır. Kaynakta kullanılan yüksek güçlü ticari lazerlerde YAG kristalinin yerini CO₂, azot ve helyum gazlarının karışımıyla doldurulmuş bir tüp almaktadır.

Geleneksel Nd: YAG lazerleri, çıkış güç seviyelerinde sınırlandırılmış olmalarına karşın; Nd: YAG lazerlerinin dalga boyu, yüksek yansıtılabilirlik özelliğine sahip metallerin (alüminyum ve bakır gibi) işlenmeleri için, Nd: YAG lazerini daha uygun hale getiren, CO₂ lazer dalga boyu ile karşılaştırıldığında, metal yüzeyleri tarafından, daha kolay soğutulurlar. Buna ek olarak, ışın demetinin idaresi için, optik fiberlerin kullanımı, endüstrideki esneklik ve entegrasyon açısından, YAG lazerleri için bir avantajdır. Nd: YAG lazeri, yüksek hassasiyetli ya da mikro işlem gerektiren uygulamalarda daha çok kullanılmaktadır. Şekil 3.11’de Nd: YAG lazer sistemi elemanlarının işleyiş prensipleri gösterilmektedir [58].

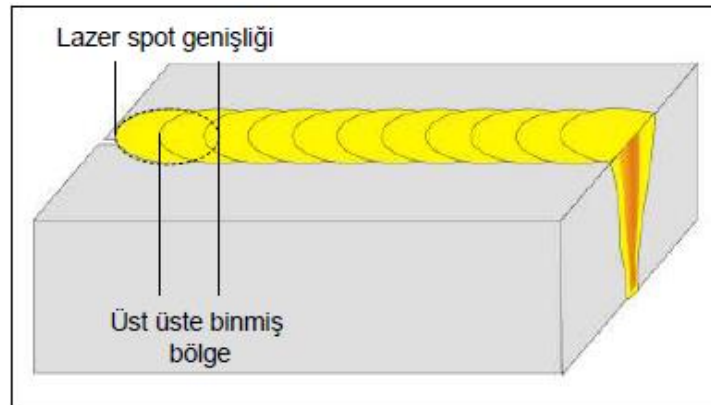


Şekil 3.11. Nd: YAG lazer sistemi elemanları prensip şeması [59].

Nd: YAG lazerinin ışıması, fiber optik yoluyla çalışılacak parça üzerine taşınabilir. Bu nedenle Nd: YAG lazer ışının hareket kabiliyeti, bu lazer tipini, CO₂ lazer kaynaklarına göre daha kullanışlı yapmaktadır [58].

3.12.1. Nd: YAG Lazer Parametrelerinin Dikiş Kaynağına Etkisi

Nd: YAG lazerler sürekli çıkış modu, atımlı çıkış modu ve Q-anahtarlı mod olmak üzere üç farklı şekilde çıkış sağlar. Nd: YAG lazerleri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı yeni bir teknolojidir. Özellikle otomotiv, elektrik ve elektronik endüstrisinde çok ilgi gören bir birleştirme yöntemidir. Nd: YAG lazerler ile dikiş kaynağı işlemi; periyodik bir şekilde tekrarlanan lazer atımlarının, materyal yüzeylerinin kısmen üst üste getirildiği kaynak bölgesinde bir eriyik veya dikiş oluşturması ile gerçekleşir. Dikiş kaynağının oluşumu Şekil 3.12’de gösterilmiştir [59].



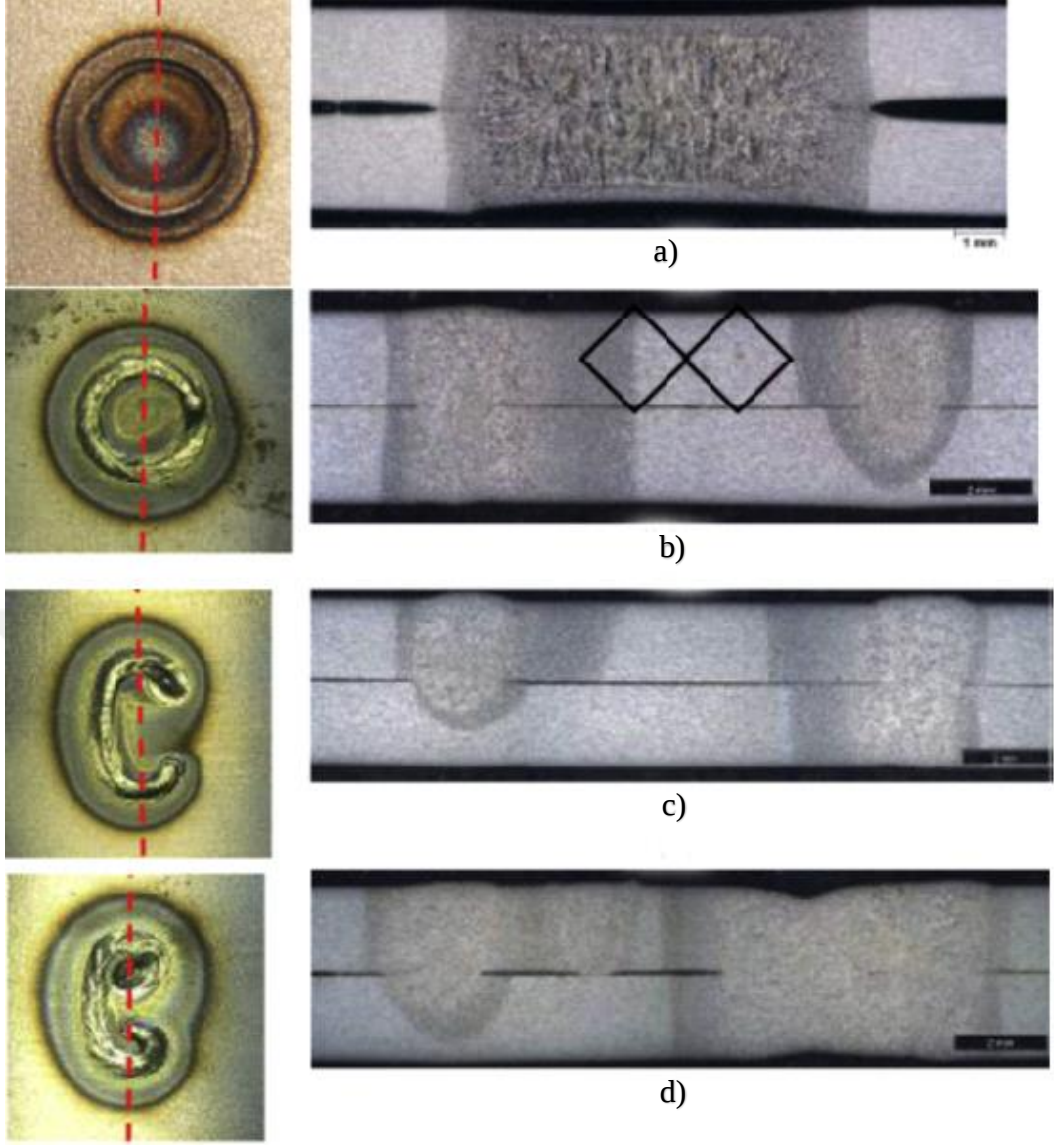
Şekil 3.12. Atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı [59].

Dikiş kaynağının oluşumu ve kalitesi; kullanılan atımlı lazerin atım enerjisi, süresi, sekli, frekansı, odak genişliği ve kaynak hızı olmak üzere birçok farklı parametreye bağlıdır. Bu parametrelere ek olarak modern Nd: YAG lazerleri kHz tekrarlama oranlarında da atım seklini kontrol etme olanağı sağlamaktadır. Bu esneklik ısı aktarımını daha önce hiç elde edilememiş doğrulukta kontrol etme imkânı vermektedir. Bunlara ek olarak nüfuz etme derinliği, eriyik havuzu sekli ve boyutu, kaynamaya başlama süresi ve anahtar deliği kontrolü de kaynak kalitesinde önemli etkenlerdir. Kaliteli bir kaynak bu lazer parametrelerin doğru kombinasyonu sağlandığında mümkün olmaktadır [59].

Yüksek penetrasyon ve düşük soğutma hızının elde edilebileceği en uygun geometri için; Nokta direnç kaynağı ve Lazer nokta kaynağı; Direnç nokta kaynağı, halka-lazer kaynağı, c-lazer kaynağı ve brezel-lazer kaynağı olmak üzere 4 farklı kaynak geometrisi (Şekil 3.13) kullanılarak sonuçları incelenmiştir.

Nokta direnç kaynağı ve Lazer nokta kaynağı artık gerilmelerin karşılaştırılmasında, nokta direnç kaynak dikişlerinin, lazer nokta kaynak dikişlerine göre daha yüksek artık gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynak işleminin son noktasında lazer kaynağında tam penetrasyon olduğu görülmektedir. Şekil 3.13.b'deki dikdörtgenler, artık gerilmelerin deneysel tespiti için gösterge hacminin nominal boyutunu göstermektedir.



Şekil 3.13. a) Direnç nokta kaynağı b) Halka-lazer kaynağı c) C-lazer kaynağı d) Brezel-lazer kaynağı örneklerinin kesitleri [18].

Taneler arası gerilmeler, malzeme plastik deformasyona uğradığında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, mikro streslerin kırımınla belirlenen stres sonuçları üzerindeki etkisi en aza indirilmelidir.

Halka kaynaklı geometrisi, c-kaynağı ve brezel geometrilerine göre daha düşük soğutma oranları gösterirken, brezel geometrisi, kaynakların başlangıç ve bitiş noktalarını, uygulanan aşırı gerilime karşı koruma ile koruyarak, uygulanan gerilime ve gerilime karşı koruyabildiği görülmüştür.

Lazer nokta kaynağının halka kaynaklı geometrisi, c-kaynağı ve brezel geometrilerine göre daha düşük soğutma oranları gösterirken, brezel geometrisi, kaynakların başlangıç

ve bitiş noktalarını, uygulanan aşırı gerilime karşı koruma ile koruyarak, uygulanan gerilime ve gerilime karşı koruyabildiği görülmüştür.

Kaynak yolu geometrileri için yapılan literatür çalışmalarında lazer kaynaklarının başlangıç noktası genellikle düşük penetrasyon ve yüksek soğutma hızı nedeniyle başarısızlığa eğilimli olduğu, bitiş noktası da anahtar deliği çökmesinin bir sonucu olarak biriken yabancı maddeler nedeniyle başarısızlığa eğilimli olduğu görülmüştür. En uygun kaynak geometrisi için “Halka” konfigürasyonu, başlangıç noktasında penetrasyon eksikliğini, tam penetrasyona sahip olan bitiş noktasıyla üst üste bindirerek azaltır [18].

3.12.2. Nd: YAG Lazer Kaynak Yönteminin Avantajları;

- Birkaç mikron mertebesindeki bölgelere çok rahat odaklanabilir,
- Kaynak hızı yüksektir,
- Aynı ve farklı metaller kaynatılabilir,
- Otomasyona olan uygunluğu çok iyidir,
- İşletme maliyeti düşüktür,
- Kaynak işlemi dolgu malzemesi kullanılmadan/kullanılarak gerçekleştirilebilir,
- Fiber optik ışın bırakım sistemi vardır,
- Yansıtıcı metallerde daha az yansıma oluşur [43], [54], [62].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, AISI 304, AISI 321 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çelik sacları ve AISI 430 ferritik paslanmaz çelik sacları lazer nokta kaynak yöntemi ile aynı kalitedeki numuneler birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin kaynak ara yüzeylerinin mikro yapı incelenmiş, çekme deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1. DENEYDE KULLANILAN ANA MALZEME

Deneylerde ana malzeme olarak Sakarya Dörtüol Sanayi Bölgesinden temin edilen 1000x2000x1 mm ölçülerindeki paslanmaz çelik saclar kullanılmıştır. Numunelerin her biri 170 mm uzunluğunda kesilmiştir. Kaynatılan paslanmaz çelik malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu malzemeler çeşitli östenitik ve ferritik paslanmaz çelikler lazer nokta kaynağının mikro yapı etkilerini incelemek amacıyla seçilmiştir.

Çizelge 4.1. Paslanmaz çelik malzemelerin kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Paslanmaz Çeliklerin Kimyasal Bileşimi (%)									
Kalite	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
304	0,08	2,0	0,75	0,045	0,03	19	9	-	Kalan
316	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	17	12	2,5	Kalan
321	0,08	2,0	1,0	0,04	0,03	18	11	-	Kalan
430	0,12	1,0	1,0	0,045	0,03	17	0,75	-	Kalan

4.2. DENEYLERDE KULLANILAN KAYNAK MAKİNESİ

Deneyisel çalışmalarda OR LASER Firması tarafından üretilen atımlı Nd: YAG lazeri kullanılmıştır. Deneylerde güç 180 W olarak sabit alınmıştır. Odak çapı 0,80 mm olarak alınmıştır. Deneyisel çalışmalarda kullanılan OR LASER markalı Pulsed Nd: YAG, 1064 nm lazeri ve uygulaması Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Kullanılan Nd: YAG lazer kaynak sistemi.

Lazer kaynağında kullanılan OR LASER markalı Pulsed Nd: YAG, 1064 nm kaynak cihazının teknik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

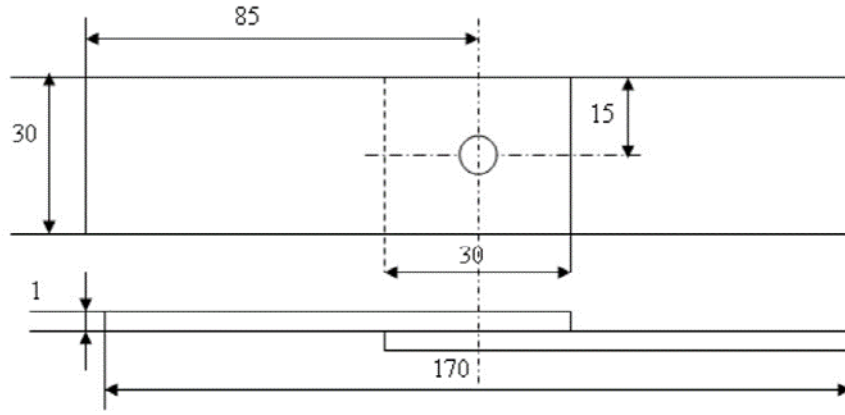
Çizelge 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan Nd: YAG lazerinin teknik özellikleri.

Maksimum ortalama güç	300 W
Maksimum tepe gücü	10 kW
Atım uzunluğu değişim aralığı	0,3 ms- 50 ms
Frekans değişim aralığı	5 Hz - 500 Hz
Dalga boyu	1064 nm

4.3. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI VE KAYNAĞIN YAPILIŞI

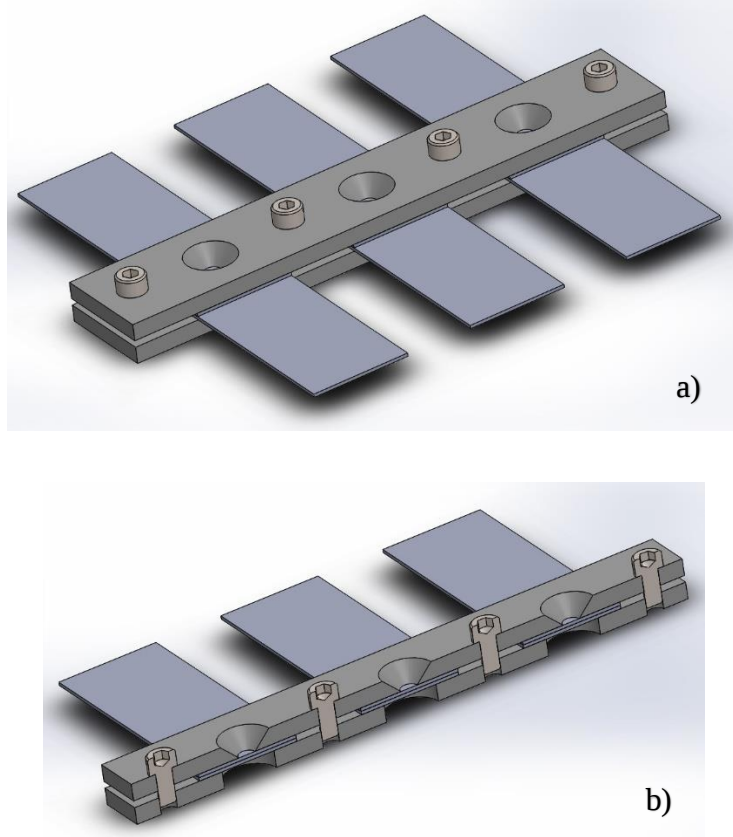
4.3.1. Kaynak Numunelerinin Hazırlanması

Kaynak numuneleri 1000x2000x1 mm ölçülerindeki paslanmaz çelik saclar, uzunluğu 170 mm olacak şekilde giyotin makasla kesilmiştir. Numune ölçüleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Numunelerin kesim sonrası temizlikleri (zımpara taşı ile) mekanik yollarla yapılmıştır.



Şekil 4.2. Numune ölçülerinin gösterimi.

Kaynağı yapılacak numunelerin işleme hazırlanması kaynak kalitesi ve test cihazlarına tabii tutulması açısından büyük önem taşımaktadır. Kaynak sırasında oluşabilecek gözenekleri minimum hale getirmek amacıyla kaynağı yapılacak numuneler için sabitleme düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Numune sabitleme düzeneği a) Kapalı görüntü b) Kesit görüntüsü.

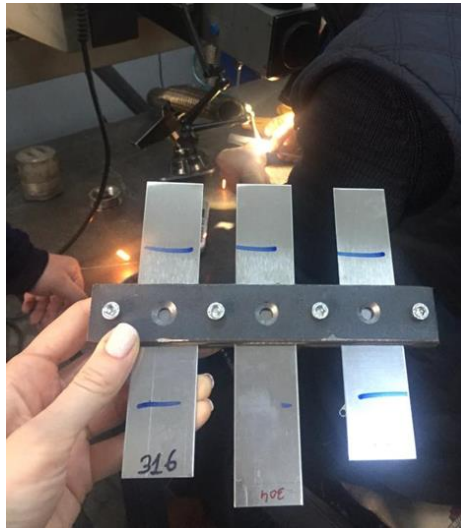
4.3.2. Lazer Kaynağının Yapılışı

Öncelikle, deney parçalarının birleştirilebileceği, kaynak parametrelerini belirlemek için ön deneyler yapılmıştır. Ön çalışmalarda, lazer kaynak işlem parametrelerinden; kaynak akımı ve kaynak zamanı değiştirilerek numunelerin birleştirilebildiği kaynak parametreleri belirlenmiştir. Ön deneylerin değerlendirilmesi sonucunda; elektrot kuvveti 7 kN olarak sabit alınıp, kaynak akımı olarak 8 kA ve kaynak zamanı olarak ise 5 periyotun (1 periyot = 0,02 s) uygun olduğuna karar verilmiştir. Sabitleme düzeneğine koyulan AISI 304, AISI 321 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çelik sacları ve AISI 430 ferritik paslanmaz çelik sacları aynı kalitedeki numuneler birbirleri içinde birleştirilerek toplamda 20 adet kaynatılmış numune elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Deney numunelerinin birleştirilme kombinasyonu.

1. Numune	2. Numune	Kaynaklı Numune
321	321	5 adet
430	430	5 adet
316	316	5 adet
304	304	5 adet

Çizelge 4.3'teki gibi eşleştirilen sac numuneler Şekil 4.4'te gösterilen sabitleme düzeneğine yerleştirilerek lazer nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Kaynak süresince elektrot kuvveti sabit tutulmuştur.



Şekil 4.4. Kaynak işlemine hazır numuneler.

Kaynak yolu geometrilerini belirlemek için yapılan literatür çalışmalarında lazer kaynaklarının başlangıç noktası genellikle düşük penetrasyon ve yüksek soğutma hızı nedeniyle başarısızlığa eğilimli olduğu ve bitiş noktasının da anahtar deliği çökmesinin bir sonucu olarak biriken yabancı maddeler nedeniyle başarısızlığa eğilimli olduğu görülmüştür.

Yüksek penetrasyon ve düşük soğutma hızının elde edilebileceği en uygun geometri için; nokta direnç kaynağı ve lazer nokta kaynağında; direnç nokta kaynağı, halka-lazer kaynağı, c-lazer kaynağı ve brezel-lazer kaynağı olmak üzere 4 farklı kaynak geometrisi kullanılarak sonuçları incelenmiştir.

Taneler arası gerilmeler, malzeme plastik deformasyona uğradığında önemli bir rol oynar. Bu nedenle, mikro streslerin kırınımıyla belirlenen stres sonuçları üzerindeki etkisi en aza indirilmelidir.

Halka kaynaklı geometrisi, c-kaynağı ve brezel geometrilerine göre daha düşük soğutma oranları gösterirken, brezel geometrisi, kaynakların başlangıç ve bitiş noktalarını, uygulanan aşırı gerilime karşı koruma ile koruyarak, uygulanan gerilime ve gerilime karşı koruyabildiği görülmüştür.

Halka konfigürasyonunda, başlangıç noktasında penetrasyon eksikliğini, tam penetrasyona sahip olan bitiş noktasıyla üst üste bindirerek azaltmıştır. Bu şekilde yapılan kaynakta anahtar deliği çökmesinin neden olduğu düşük kaynak kalitesi sorunu gözlemlenmemiştir [18].

Yapılan araştırmalar sonucunda en iyi kaynak kalitesinin halka geometrili lazer kaynağı ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple çalışmada numunelerin kaynağı halka geometrili lazer kaynağı ile yapılmıştır.

4.4. NUMUNE HAZIRLAMA VE METALOGRAFİK İNCELEME

Kaynak işlemlerinden sonra örneklerin teste tabii tutulabilmesi için bir takım çalışmaların yapılması gerekmektedir. İlk olarak numuneler yüzeylerindeki atıklarından temizlenmiştir. Ardından malzemelerin optik mikroskop görüntülerinin alınabilmesi için lazer nokta kaynağı ile birleştirilen numuneler şerit testere yardımı ile kaynak yönüne dik olarak kesilmiştir. Daha sonra numunelerin mikro yapı çalışmaları için numuneler bakalite alınmıştır. Bakalite alınan kaynatılmış paslanmaz çelikler Şekil 4.5'te yer

almaktadır. Bakalite alınan paslanmaz çelik malzeme numuneleri sulu zımpara makinasında çeşitli partikül boyutlarında (320, 400, 600, 800, 1000, ve 1200 kumluk) SiC sulu zımpara kâğıtlarıyla sırasıyla zımparalama işlemine tabi tutulmuştur.



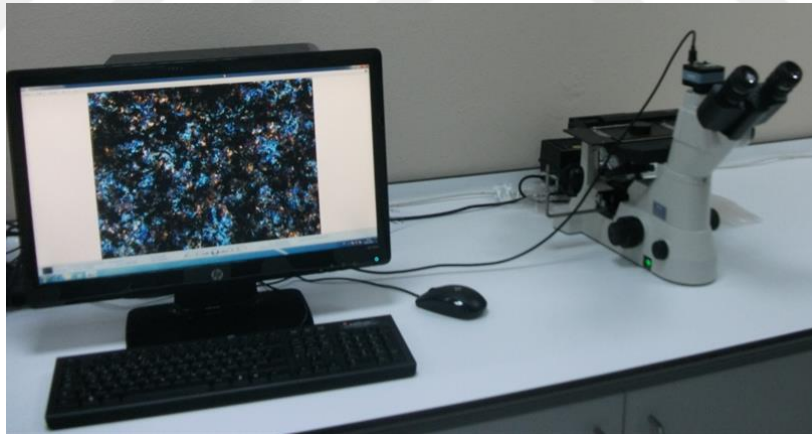
Şekil 4.5. Bakalite alınan kaynatılmış paslanmaz çelikler.

Zımparalama işlemi biten numuneler parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeylerdeki pürüzlülükleri tamamen gidermek amacıyla numuneler zımparalama işleminin ardından sırasıyla 6 ve 1 mikronluk alümina süspansiyon yardımı ile keçe üzerinde parlatılma işlemine geçilmiştir. Parlatma işlemi, dönen bir disk üzerine yerleştirilmiş 3 μm bir keçe ile gerçekleştirilmiş ve bu keçe 3 μm 'lik ve 1 μm 'lik elmas pasta emdirilmiştir. Parlatma işlemleri esnasında 300 dev/dak hız kullanılmış olup, her bir numune en az 5 dakika süreyle disk üzerinde çok düşük bir yük uygulayarak tutulmuştur. Yüzeyleri parlatılan numuneler paslanmaz çeliklerin mikroyapı incelemelerinde kullanılan oksalik asit çözeltisi ile elektrolitik olarak 18 saniye sürede dağlanmışlardır. Şekil 4.6'da deneysel çalışmaların mikroyapı incelemelerinde kullanılan Metkon marka Forcipol-1V model zımparalama ve parlatma cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.6. Zımpara ve parlatmada kullanılan cihazı.

Hazırlanan numunelerden Nikon marka Eclipse MA100 model bilgisayara görüntü aktarabilen optik mikroskop ile gerekli görülen bölgelerden mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Şekil 4.7’de mikroyapı çalışmalarının yapıldığı optik mikroskopun fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 4.7. Nikon Eclipse MA100 model optik mikroskop.

Bakalite alınan ve metalografik hazırlıklar sonrasında optik mikroskop ile mikroyapı görüntüleri alınan numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile daha ince ve hassas olarak mikroyapı incelemesine tabi tutulmuştur. SEM ile inceleme yapılmasının amacı optik mikroskopun büyütme oranının sınırlı olmasıdır. Şekil 4.8’de deneyde kullanılan FEI marka Quanta FEG 250 model SEM cihazına ait görüntü verilmiştir.



Şekil 4.8. FEI Quanta FEG 250 model SEM cihazı.

4.5. EDS ÇİZGİ ANALİZİ

Lazer nokta kaynağı ile birleştirilen numunelerden kaynak bölgesinde ve etrafında elementsel olarak değişimleri belirlemek adına EDS çizgi analizi ve element haritalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Element incelemeleri yine Quanta FEG 250 SEM ve EDS donanımı ile gerçekleştirilmiştir.

4.6. NUMUNE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Mikroyapı incelemeleri ardından numuneler sertlik ölçüm işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Kaynaklanan numunelerin sertlik değerleri, Metkon marka DUROLINE-M model cihaz (Şekil 4.9) ile HV cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde 100 g yük kullanılarak her bölge için 5 ölçüm yapılarak sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.9. Mikro sertlik ölçüm cihazı.

4.7. ÇEKME TESTİ

Birleştirmelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için çekme testi numuneleri TS 287 EN 895 standardına göre hazırlanmıştır. TS 287 EN 895 standartları kapsamında yapılan çekme deneyi herhangi bir ergitme kaynağı işlemi ile birleştirilen metalik malzemelerin, tahribatlı deneylerinden enine çekme deneyini gereklilikleri doğrultusunda yapılmıştır. Standartta, bir alın kaynaklı birleştirmenin çekme dayanımını ve kırılma yerini tespit etmek için yapılan enine çekme deneylerinde kullanılan deney numunelerinin ölçülerini ve deney prosedürünü kapsamaktadır. Kaynak bölgesinden enine olarak alınan deney numuneleri, 20-22 °C olan ortam sıcaklığında kopana kadar artan bir çekme yükü uygulanarak çekme testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan çekme test cihazı Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Çekme deneylerinin yapıldığı test cihazı.

Her bir kalitedeki kaynak numunesi için üç adet olarak hazırlanan çekme numuneleri, oda sıcaklığında Utest marka Elektromekanik Üniversal deney cihazı ile 2 mm/dk ilerleme hızında çekme testine tabi tutulmuştur.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. DENEY NUMUNELERİNİN MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

Ferritik ve östenitik paslanmaz çelik saclar kullanılarak lazer nokta kaynağı ile birleştirilen deney numunelerinin mikro yapı analizleri için oksalik asit-su karışımından oluşan bir çözelti hazırlanarak elektrolitik dağlama işlemi yapılmıştır. Hazırlanan bu karışımın içerisinde elektrolitik dağlama işlemi ile malzemelerin dağlaması işlemi yapılmıştır. Bu işlemten sonra numune yüzeyi asitten arındırmak için saf alkolle temizlenerek, numunelerin mikroskopta mikro yapı incelemeleri yapılarak tane yapıları incelenmiştir.

5.1.1. AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları

Lazer nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı Şekil 5.1’de verilmiştir. Optik görüntülerinden kaynak metalinin oldukça küçük tanelere sahip olduğu görülmektedir.

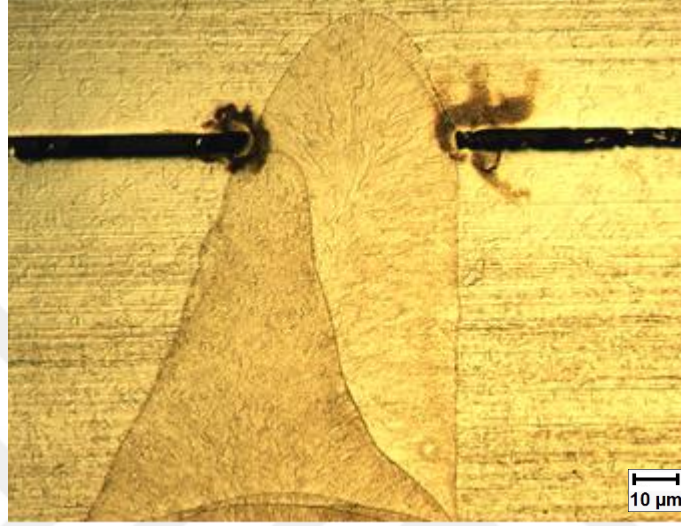


Şekil 5.1. AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.

Bu tip kaynak yöntemlerinde birleştirme esnasında elde edilen kaynak şekli ve nüfuziyeti geometrisi kaynak cihazının gücü, seçilen kaynak voltajı, amperi ve ilerleme hızına bağlıdır [55], [62].

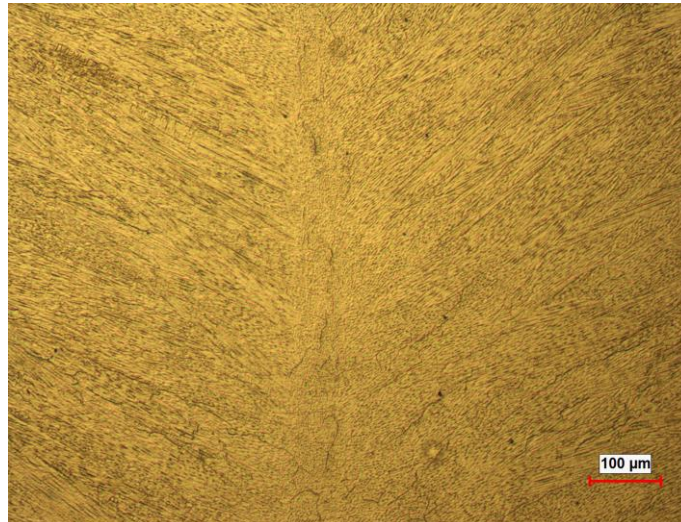
Bu kaynak yönteminde malzeme çok hızlı bir şekilde ergime sıcaklığına ulaşması ve hızla soğuması sonucu bir yapı ortaya çıkmakta ve oluşan yapı çok ince olduğu ve yüksek büyütme görüntülerin alınması ile gözlenmektedir (Şekil 5.2).

Şekil 5.2’ de görüldüğü üzere kaynak yapılırken malzemede kayma meydana geldiği için kaynak nüfuziyetinde sıkıntı olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.2. AISI 304 çeliğinin kaynaklı birleştirme genel görüntüleri.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ana malzemenin östenitik yapıda iken kaynak dikişinin dentrit kollarından oluşan mikroyapıda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. AISI 304 malzemelerin kaynak bölgesinin optik mikroskop görüntüleri.

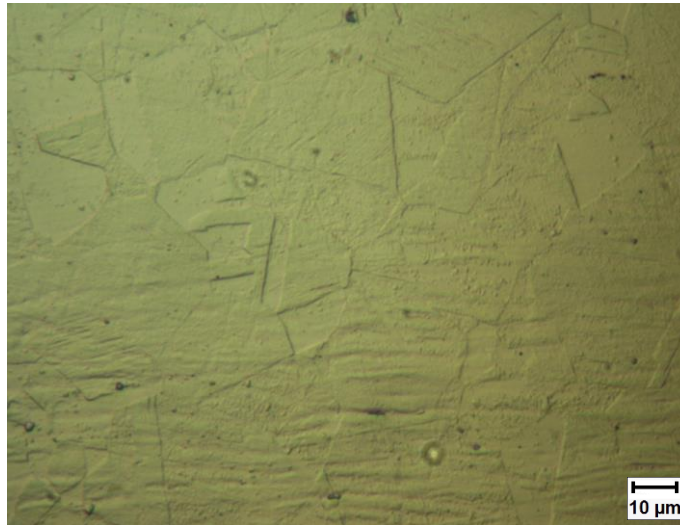
Şekil 5.4'te AISI 304 malzemelerin ana malzeme tane yapısı ve ITAB'daki tane yapısı geçiş görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.4 AISI 304 malzemelerin ITAB görüntüleri.

5.1.2. AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları

Lazer nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 316 kalite östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı Şekil 5.5'te verilmiştir. Östenitik yapısından dolayı kaynak metalinin oldukça küçük tanelere sahip olduğu görülmektedir.



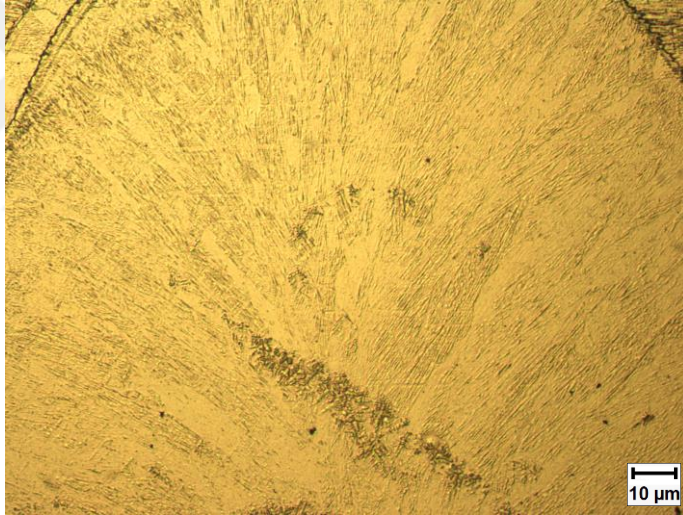
Şekil 5.5. AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.

Şekil 5.6'da AISI 316 çeliğine yapılan kaynak esnasında üst üste gelen atım sonucu oluşan kaynak bölgesinin görüntü yer almaktadır.



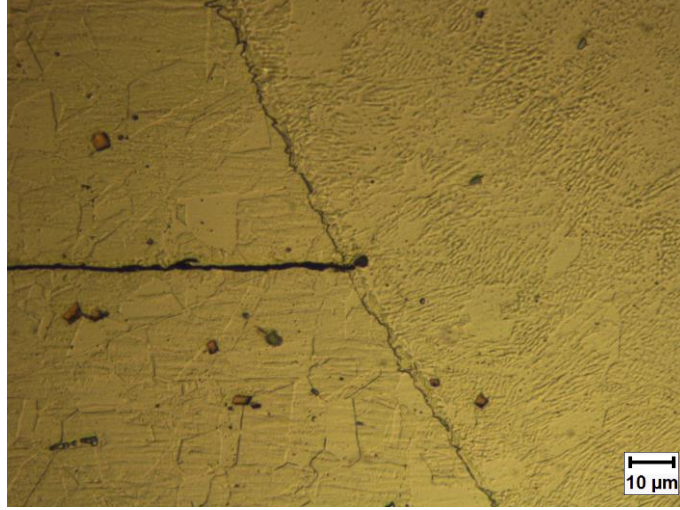
Şekil 5.6. AISI 316 çeliğinin kaynaklı birleştirme genel görüntüleri.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde kaynak bölgesindeki tane yapılarının dentrit kollarından oluşan mikroyapıda olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. AISI 316 malzemelerin kaynak bölgesinin optik mikroskop görüntüleri.

Yapılan lazer nokta kaynağında malzeme yüzeyinde ve kaynak dikişlerinin olduğu kısımlarda karbür çökeleklerinin olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.8).

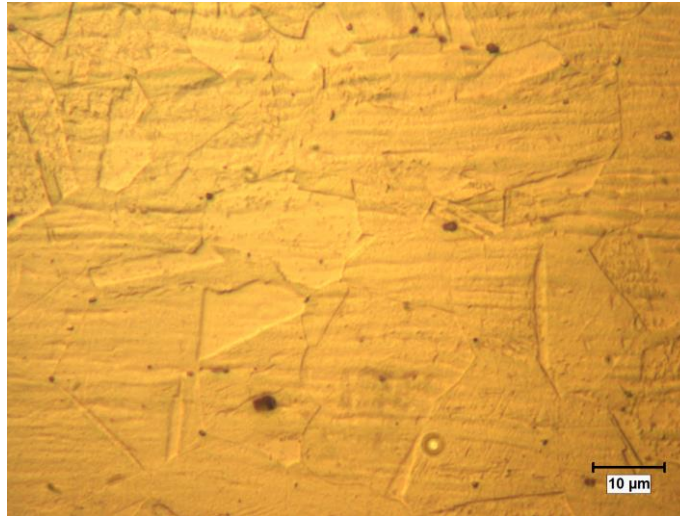


Şekil 5.8. AISI 316 malzemelerin ITAB görüntüleri.

Lazer nokta kaynak yönteminde malzemenin çok hızlı bir şekilde ergime sıcaklığına ulaşması ve hızla soğuması sonucu ortaya çıkmakta ve oluşan yapı AISI 316 kalite paslanmaz çeliklerde de meydana gelmektedir. Optik görüntülerinden kaynak metalinin oldukça küçük tanelere sahip olduğu görülmektedir.

5.1.3. AISI 321 Östenitik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları

Lazer nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çelik malzemenin optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. AISI 321 östenitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.

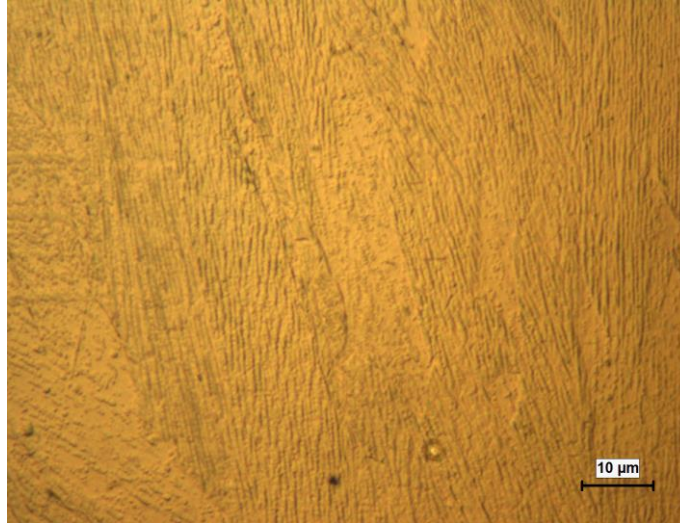
Şekil 5.10’da AISI 321 çeliğinin kaynak bölgesinin görüntüsü yer almaktadır. Kaynak

bölgesindeki tane yönelmelerinin merkeze doğru yönelimi çok net gözükmemektedir.



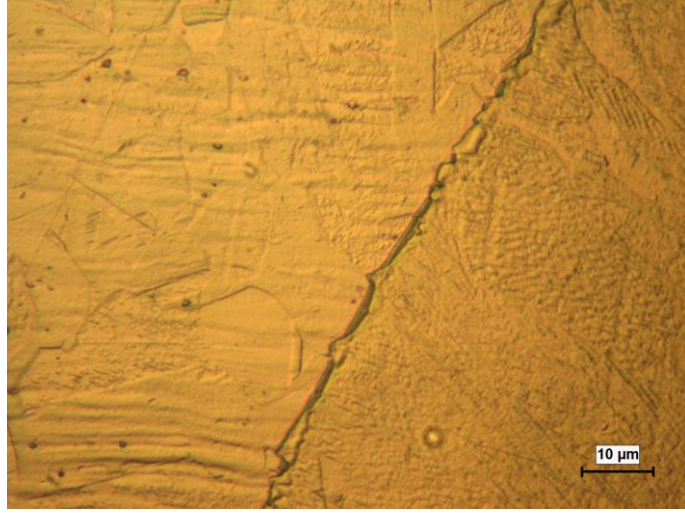
Şekil 5.10. AISI 321 çeliğinin kaynaklı birleştirme görüntüsü.

Şekil 5.11’de AISI 321 östenitik paslanmaz çelik olan kaynak metalinin optik mikroskop görüntüsü yer almaktadır. Nd: YAG Lazer ile yapılan kaynak sonucunda kaynak bölgesindeki tane yapılarının yönelimleri net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.11. AISI 321 malzemelerin kaynak metalinin optik mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.12’de AISI 321 malzemelerin ITAB görüntüsü yer almaktadır. AISI 321 kalite paslanmaz çeliklerde kaynak bölgesindeki metalinin oldukça küçük tanelere sahip olduğu görülmektedir.



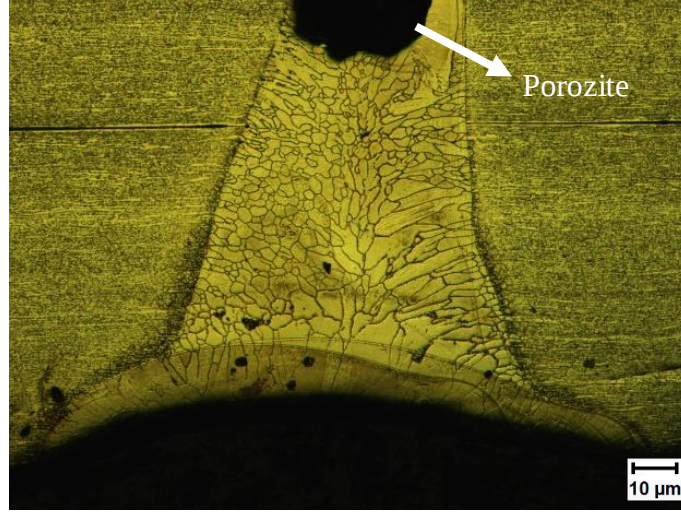
Şekil 5.12. AISI 321 malzemelerin ITAB görüntüsü.

5.1.4. AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çelik Sac Malzemelerin Metalografik İnceleme Sonuçları

Lazer nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelik malzemenin optik mikroskop görüntüsü Şekil 5.13’te verilmiştir.

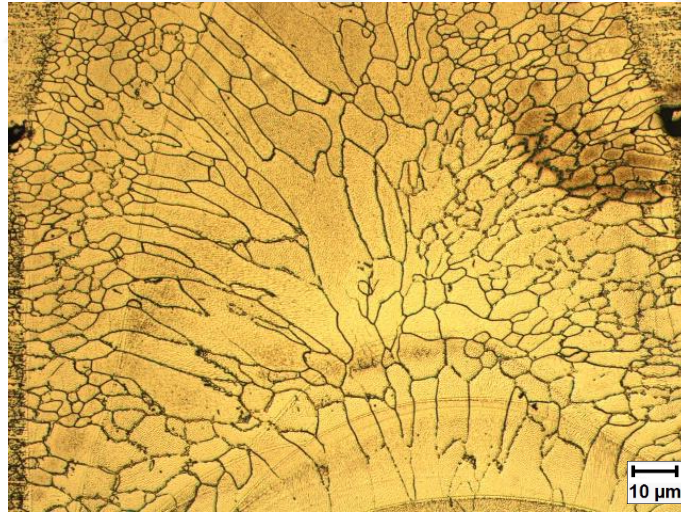


Şekil 5.13. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.



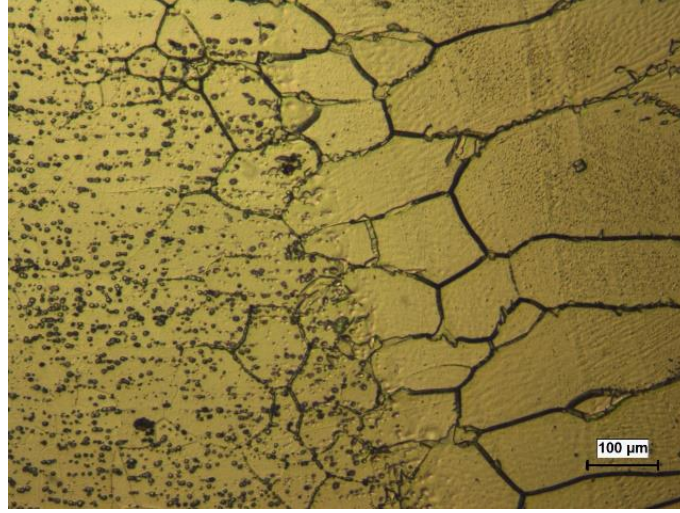
Şekil 5.14. AISI 430 malzemelerin kaynak bölgesinde oluşan porozite görüntüsü.

Şekil 5.14'te AISI 430 malzemelerin kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerin ITAB'larında tane irileşmeleri görülmektedir (Şekil 5.15). Yürük ve arkadaşları yaptıkları çalışmada buna kaynak esnasında artan ısı girdisinin soğuma hızını ve katılaşmayı yavaşlatmasının sebep olduğunu tespit etmişlerdir [65].



Şekil 5.15. AISI 430 malzemelerin kaynak metalinin optik mikroskop görüntüleri.

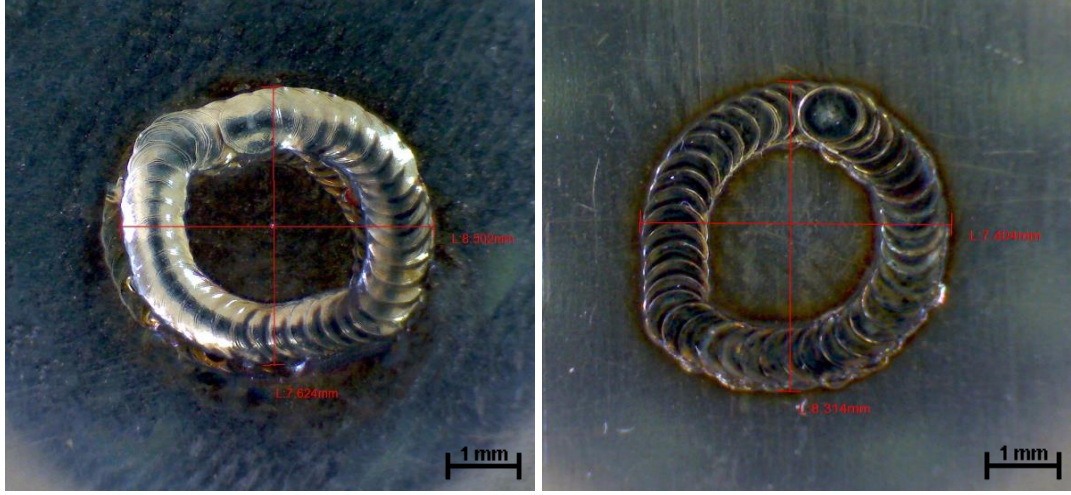
Şekil 5.16'da AISI 430 malzemelerin ITAB görüntüleri yer almaktadır. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerin ITAB'larında ana metal tane yapısı ile kıyaslandığında tanelerin irileştiği görülmüştür.



Şekil 5.16. AISI 430 malzemelerin ITAB görüntüleri.

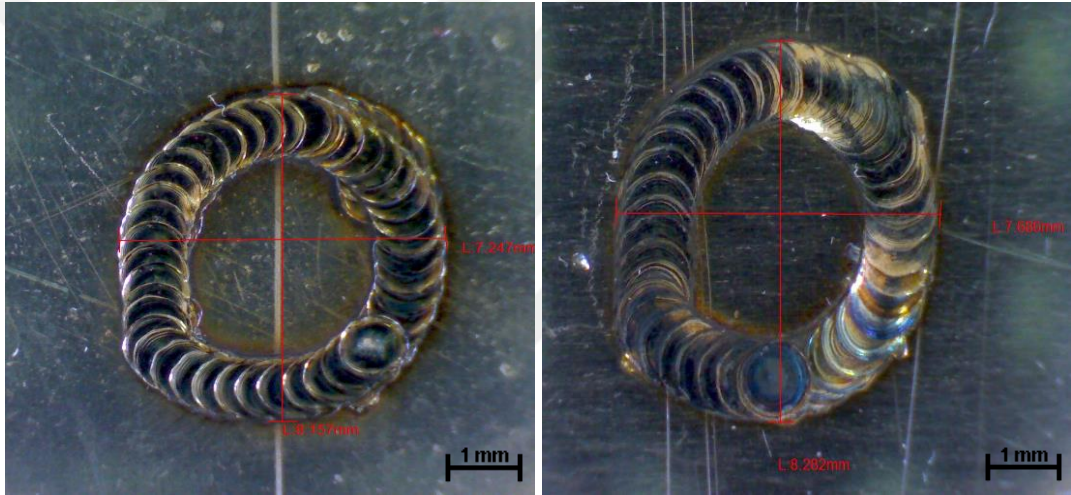
5.2. LAZER NOKTA KAYNAĞI MAKRO GÖRÜNTÜLERİ

Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında numunelerin lazer nokta kaynakları yapıldıktan sonra üstten kaynak dikişinin ovalliğini de görebilmek adına 20 kez büyütme makro görüntüleri çekilmiştir. Bu görüntülerin çekilme amacı kaynak uygulamasında literatür araştırmaları sonucunda belirlenen halka kaynak formunun oluşup oluşmadığının belirlenmesidir.



a)

b)



c)

d)

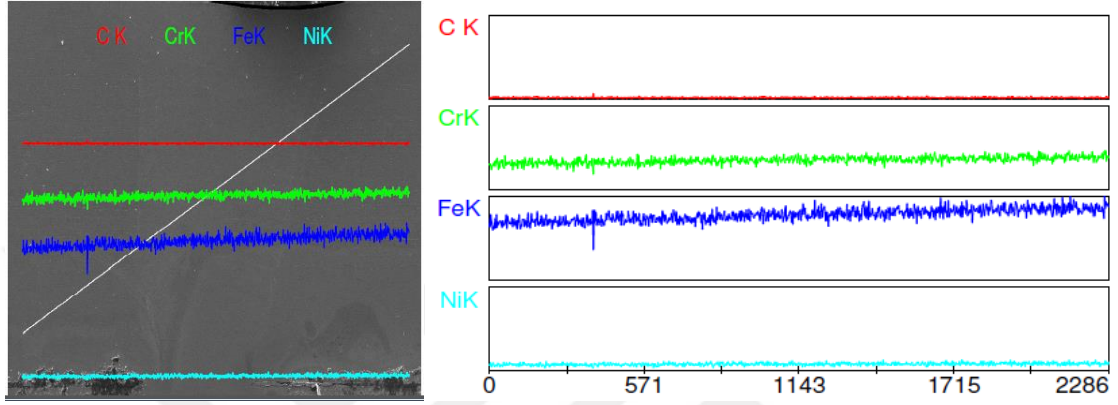
Şekil 5.17. a) 304x20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü b) 316x20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü c) 321x20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü d) 430x20 ölçülü kaynak bölgesinin görüntüsü.

Genel olarak makro görüntüler incelendiğinde kaynak dikişlerinin halka formunda yapıldığı görülmüştür. Böylece literatür araştırmalarında elde edilen kaliteli dikiş formu elde edilmiştir.

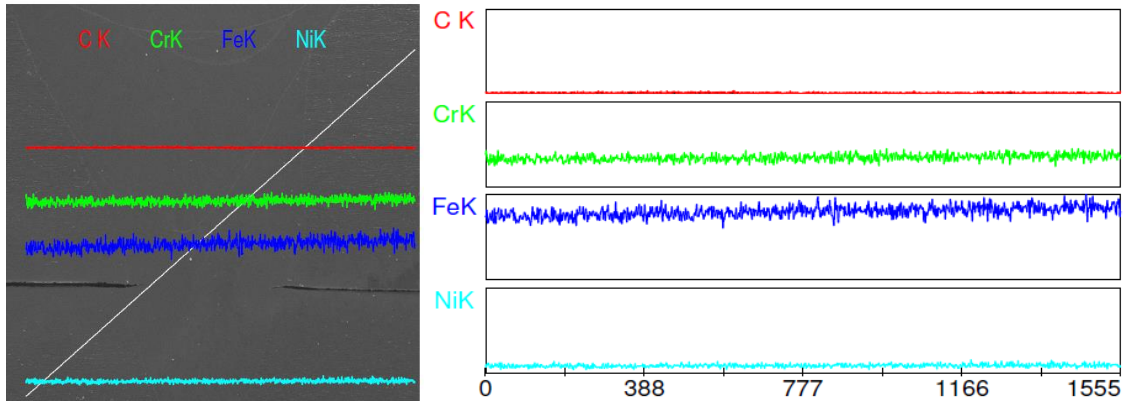
5.3. EDS ÇİZGİ ELEMENT ANALİZİ

EDS analizi her numuneye uygulanmıştır. EDS analizi ortaya çıkan sonuçlar aşağıdaki grafikte sunulmuştur. Numunelere EDS analizinin uygulanmasındaki sebep,

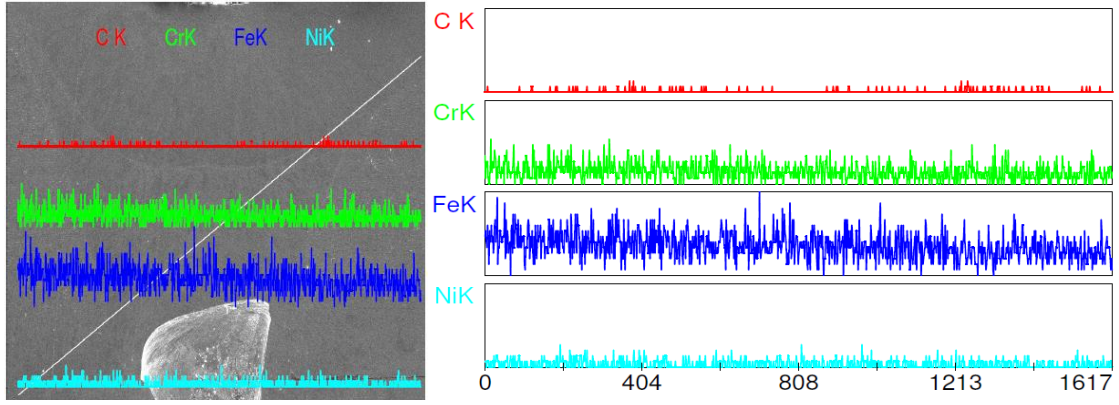
numunelerdeki sertlik artışına neden olan elementin veya elementlerin ortaya çıkartılmasıdır. Şekil 5.18’de 304 kalite paslanmaz çelikte ana malzemeden kaynak dikişine doğru çizgi analizi, Şekil 5.19’da 316 kalite paslanmaz çelikte ana malzemeden kaynak dikişine doğru çizgi analizi, Şekil 5.20’de 321 kalite paslanmaz çelikte ana malzemeden kaynak dikişine doğru çizgi analizi, Şekil 5.21’de 430 kalite paslanmaz çelikte ana malzemeden kaynak dikişine doğru çizgi analizi gösterilmektedir.



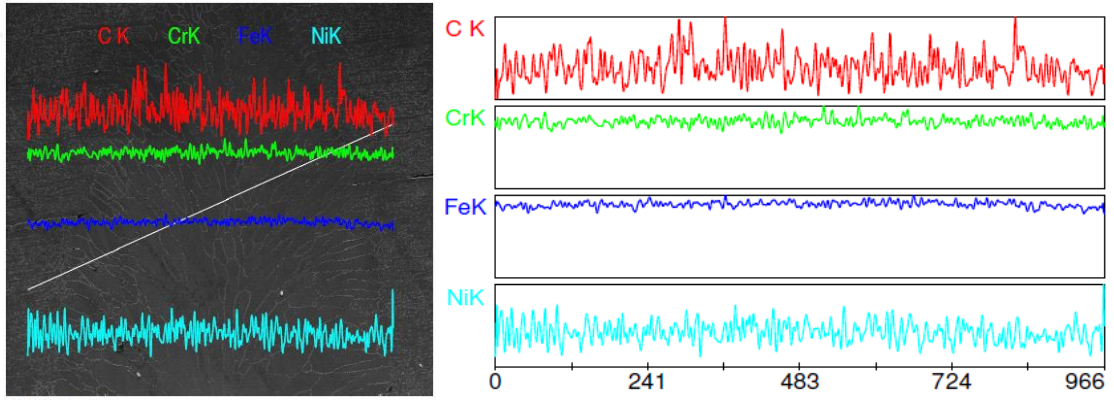
Şekil 5.18 304 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemeden kaynak dikişine doğru çizgi analizi.



Şekil 5.19. 316 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemeden kaynak dikişine doğru çizgi analizi.



Şekil 5.20. 321 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemedan kaynak dikişine doğru çizgi analizi.



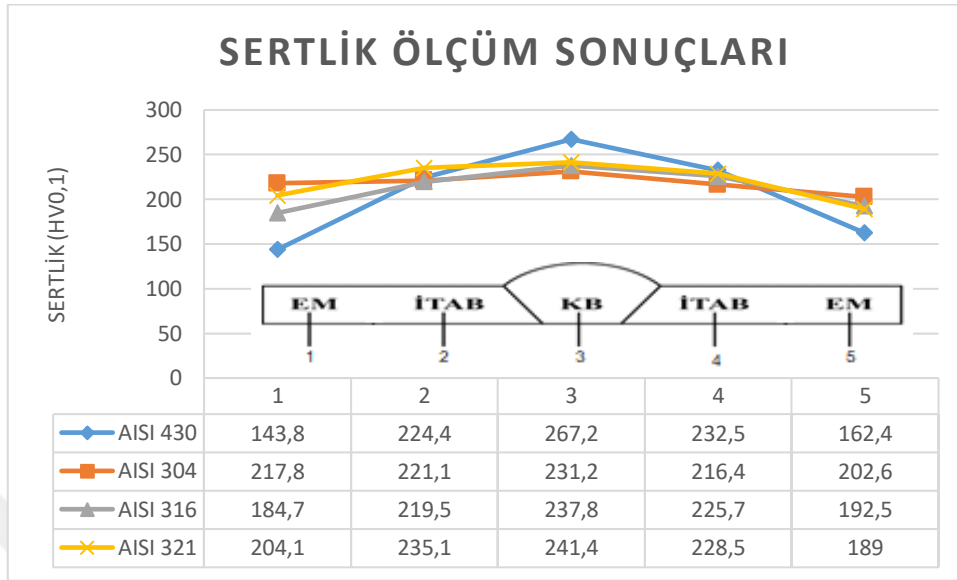
Şekil 5.21. 430 Kalite paslanmaz çelikte ana malzemedan kaynak dikişine doğru çizgi analizi.

304, 316 ve 321 kalite paslanmaz çeliklerine yapılan lazer nokta kaynağının ana malzemedan kaynak dikişine çizgi analizleri sonuçları incelendiğinde demir, krom ve nikel elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Karbon elementine rastlanmamıştır. Ferritik tip olan 430 kalite paslanmaz çeliğin çizgi analizinde ise diğerlerinde olduğu gibi yine demir, krom ve nikel varlığına rastlanırken diğerlerinden farklı olarak karbon elementi varlığı da tespit edilmiştir.

5.4. SERTLİK ÖLÇÜMÜ DENEY SONUÇLARI

Lazer nokta kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneler mikroyapı incelemelerinden sonra sertlik ölçüm işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin birleşimlerinden elde edilen sertlik deney sonuçları grafik olarak verilmiştir. Sertlik deneyi sonuçları genel olarak incelendiğinde; kaynak bölgesinden esas metale doğru sertlikte bir düşüş olduğu göze

çarpmaktadır. Burada en yüksek sertlik değerleri kaynak metalinden ölçülürken onu sırasıyla ITAB ve ana malzeme takip etmektedir.



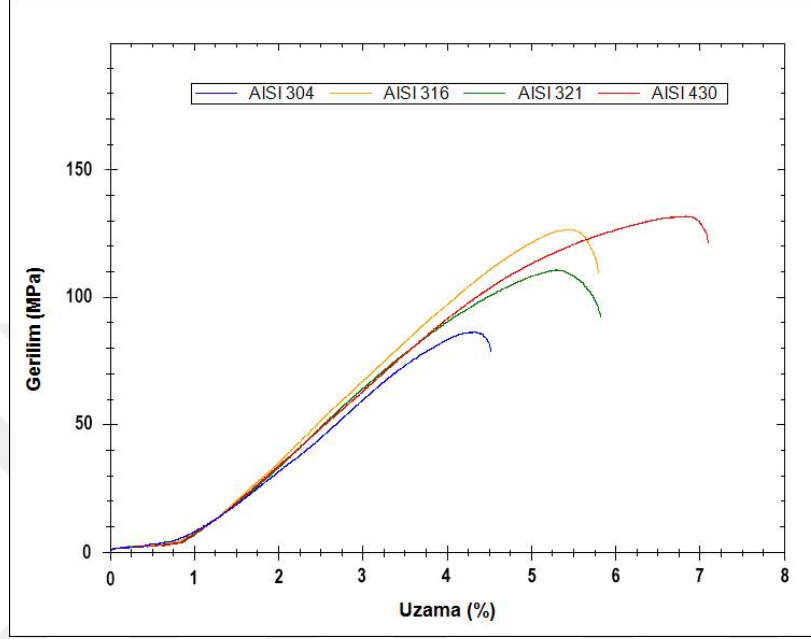
Şekil 5.22. Sertlik ölçüm sonuçları.

Şekil 5.22’de yer alan sertlik ölçüm sonuçları incelendiğinde, kaynaklı bağlantıdaki ITAB ve kaynak metali sertliklerinin ana metalden yüksek olduğu görülmektedir. Grafik bir başka açıdan değerlendirildiğinde her dört deney numunesinde de en yüksek sertlik değeri kaynak metalinden elde edilmiştir. Ferritik paslanmaz çelik olan AISI 430 çeliği kaynak metalinde en yüksek sertlik 267,2 HV_{0,1} ölçülürken en düşük sertlik 143,8 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür.

Elde edilen veriler doğrultusunda östenitik paslanmaz çeliklerin sertlik değerleri incelendiğinde; AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin kaynaklı numunesinde en yüksek sertlik değeri 231,2 HV_{0,1} olarak ölçülürken en düşük sertlik 202,6 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür. AISI 316 kalite östenitik paslanmaz çeliğin kaynaklı numunesinde en yüksek sertlik değeri 237,8 HV_{0,1} olarak ölçülürken en düşük sertlik 184,7 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür. AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çeliğin ise kaynaklı numunesinde en yüksek sertlik değeri 241,4 HV_{0,1} olarak ölçülürken en düşük sertlik 189 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür. İfade edilen değerlere göre kaynak bölgesinin ana malzemeye göre daha sert bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5.5. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

Farklı kalitedeki AISI 304, AISI 316, AISI 321 ve AISI 430 paslanmaz çeliklerinin lazer nokta kaynaklı birleştirilen numunelerinden elde edilen çekme test grafikleri Şekil 5.23'te verilmiştir.



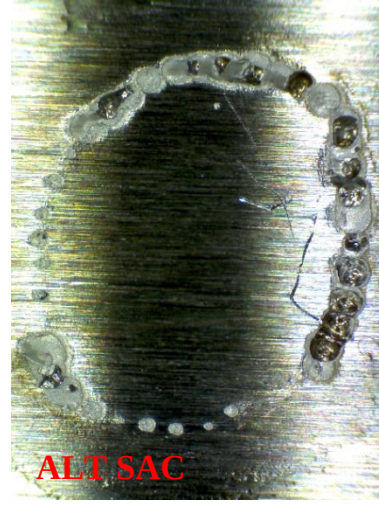
Şekil 5.23. Lazer nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmiş numunelerin çekme grafikleri.

Kaynak işlemlerinde kullanılan metallerin çekme test sonuçları incelendiğinde en düşük uzama değeri AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik malzemede meydana gelirken en yüksek uzama değeri ise AISI 430 ferritik paslanmaz çelikte görülmüştür. Lazer nokta kaynağı ile birleştirilen AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin uzama miktarı %7,1 AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin uzama miktarı %5,7 AISI 321 östenitik paslanmaz çelikte uzama miktarı %5,8 olarak ölçülürken en düşük uzama miktarı AISI 304 kalite paslanmaz çelikte %4,45 olarak ölçülmüştür. En yüksek kopma uzamasının AISI 430 ferritik paslanmaz çelikte görülme sebebi olarak yapıda karbon elementinin de bulunmasının etkisi olduğu düşünülmektedir. Sertlik sonuçları ile karşılaştırıldığında kaynak metalindeki en yüksek sertliğe AISI 430 ferritik paslanmaz çelikte ulaşılmıştır. Aynı zamanda en düşük yüzde uzama gösteren AISI 304 paslanmaz çelik en düşük kaynak sertliğine de sahip olduğu görülmüştür.

Çekme testi sonrasında kopan bölgelerin makro görüntüleri 20 büyütme ile çekilmiştir. Kopan malzemelerin görüntüleri Şekil 5.24 – 27’de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 5.24. AISI 304 malzemenin kopma görüntüsü a) üst sac b) alt sac.



a)



b)

Şekil 5.25 AISI 316 malzemenin kopma görüntüsü a) üst sac b) alt sac.

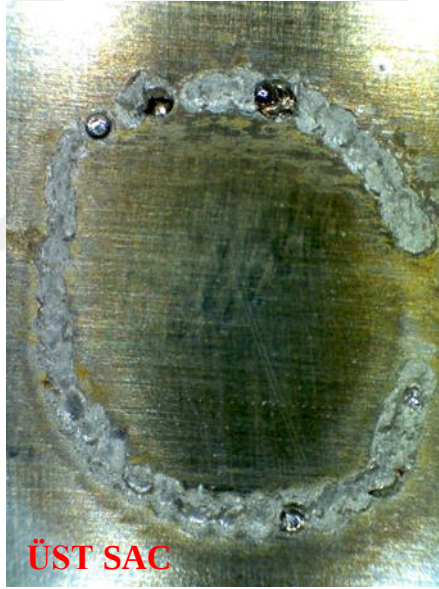


a)

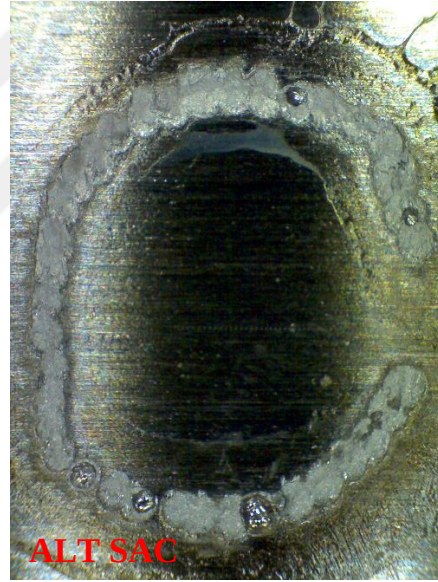


b)

Şekil 5.26. AISI 321 malzemenin kopma görüntüsü a) üst sac b) alt sac.



a)



b)

Şekil 5.27. AISI 430 malzemenin kopma görüntüsü a) üst sac b) alt sac.

Lazer nokta kaynaklı birleştirme parçaları çekme testi sonrası kopan bölgelerin makro görüntüleri incelendiğinde, alt ve üst parçalardan malzemelerin koparak ayrılma gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu da lazer nokta kaynağının iyi kalitede birleşme sağladığını göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı paslanmaz çeliklerin lazer nokta kaynağı ile birleştirilmesinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Bütün paslanmaz çelikler lazer nokta kaynağı ile birleştirilebilmiştir.
- Paslanmaz çeliklerin lazer nokta kaynağında malzeme kalınlığı arttıkça kullanılan lazer kaynak makinesinin de gücünün artması gerektiği görülmüştür.
- AISI 430 paslanmaz çeliklerin kaynağında kaynak dikişinde porozite oluşumu olduğu görülmüştür.
- Numuneler üst üste tam temas ettirilmediğinde kaynak nüfuziyetinin azaldığı ve neredeyse numunelerde kaynama değil yapışmanın olduğu tespit edilmiştir.
- Ana malzemeden kaynak dikişine doğru geçiş bölgesinin dar olduğu görülmüştür.
- Kaynak dikişi tanelerinin merkeze doğru yönlendiği tespit edilmiştir.
- Halka-lazer kaynak geometrisi kullanılarak elde edilen kaynağın başlangıç noktasındaki dikiş nüfuziyeti, 180 derece karşı noktasına göre daha derindir.
- Kaynak dikişi mikro sertliklerinin, ana malzeme sertliklerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin kaynak bölgesi diğer östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinden daha serttir. AISI 430 ferritik paslanmaz çelik kaynak dikiş sertliğinin artmasına, kaynakta oluşan krom karbürün sebep olduğu düşünülmektedir.
- Östenitik paslanmaz çeliklerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ana malzemede kaynak dikişinin dentrit mikroyapıda olduğu tespit edilmiştir.
- AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerin ITAB'larında tane irileşmesi görülmüştür.
- Çekme testi sonuçları incelendiğinde AISI 430 ferritik paslanmaz çelik %7,1 uzama göstermiştir. En düşük uzama %4,45 ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelikte ölçülmüştür.

- Kopan bölgelerin makro görüntüleri incelendiğinde, kaynaklı birleştirmede ayrılmanın alt ve üst sacların birbirinden parça kopararak meydana geldiği tespit edilmiştir.

Yukarıda verilen deneysel çalışma sonuçlarına göre aşağıdaki öneriler verilebilir.

- Farklı paslanmaz çelik türleri birbirleri ile lazer nokta kaynağı ile kaynatılarak mekanik özellikleri incelenebilir.
- CO₂ gazı lazer kaynağı ile daha derin nüfuziyeti elde edilebileceğinden tüm numuneler bu yöntemle kaynatılabilir.
- Lazer nokta kaynağı işleminde gücü daha yüksek (500W, 700W vb.) kaynak makineleri kullanılabilir.
- Bu deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kalınlığı 1 mm'dir. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda bu kalınlıktan daha ince malzemelerin lazer nokta kaynağı ile kaynaklanabilirliği çalışılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] F. Demiren, “Nano akışkan kullanılarak minimum miktarda yağlama yöntemi ile sürdürülebilir frezelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [2] Y. Kaya ve N. Kahraman, “Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi,” *Politeknik Dergisi*, c.14, sayı 4, ss. 263-270, 2011.
- [3] A. Hasanbaşoğlu, “Direnç kaynak yöntemiyle birleştirilen if çelikleri ile östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi,” Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2005.
- [4] H. Sen Wang, Y. Z. Su, J. Shian-Ching Jang, and H. G. Chen, “A comparison of crystallization behaviors of laser spot welded Zr-Cu-Ag-Al and Zr-Cu-Ni-Al bulk metallic glasses,” *Materials Chemistry and Physics*, c. 139, sayı 1, ss. 215-219, 2013.
- [5] A. Hozoorbakhsh, M. I. S. Ismail, A. A. D. M. Sarhan, A. Bahadoran, and N. B. A. Aziz, “An investigation of heat transfer and fluid flow on laser micro-welding upon the thin stainless steel sheet (SUS304) using computational fluid dynamics (CFD),” *International Communications of Heat and Mass Transfer*, c. 75, sayı 1 ss. 328-340, 2016.
- [6] S. Meco, G. Pardal, S. Ganguly, S. Williams, and N. McPherson, “Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components,” *Optics and Lasers in Engineering*, c. 67, sayı 5, ss. 22-30, 2015.
- [7] M. J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, and M. J. Hamed, “Effect of laser welding mode on the microstructure and mechanical performance of dissimilar laser spot welds between low carbon and austenitic stainless steels,” *Materials and Design Journal*, c. 34, sayı 1, ss. 666-672, 2012.
- [8] R. S. Desai and S. Bag, “Influence of displacement constraints in thermomechanical analysis of laser micro-spot welding process,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 16, sayı 2, ss. 264-275, 2014.
- [9] M. Baruah and S. Bag, “Influence of pulsation in thermo-mechanical analysis on laser micro-welding of Ti6Al4V alloy,” *Optics & Laser Technology*, c. 90, sayı 8, ss. 40-51, 2017.
- [10] J. Sun, Q. Yan, W. Gao, and J. Huang, “Investigation of laser welding on butt joints of Al/steel dissimilar materials,” *Materials and Design Journal*, c. 83, sayı 8, ss. 120-128, 2015.
- [11] U. Çalgülü, H. Dikbaş, and M. Taşkın, “The effects of high weldings speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar components (AISI 430 – AISI 304) welded by CO₂ laser beam welding,” *New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, c. 5, sayı 2, ss. 160-177, 2010.

- [12] C. Köse ve R. Kaçar, "AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğin CO₂ lazer ışını kaynak yöntemiyle kaynak kabiliyetinin araştırılması," *New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, c. 7223, sayı 6, ss. 13-27, 2015.
- [13] V. J. Badheka, S. K. Agrawal, and N. Shroff, "Resistance spot welding of martensitic stainless steel - Part I," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, c. 4, sayı 3, ss 52-60, 2009.
- [14] P. Russo Spena, M. De Maddis, G. D'Antonio, and F. Lombardi, "Weldability and monitoring of resistance spot welding of Q&P and TRIP steels," *Metals*, c. 6, sayı 11, ss. 270-275, 2016.
- [15] N. Kahraman, A. Durgutlu, ve B. Gülenç, "316L paslanmaz çeliğin tig kaynağında koruyucu argon gazına hidrojen ilavesinin kaynak bölgesi tane morfolojisine etkilerinin araştırılması," *Politeknik Dergisi*, c.4, sayı 2, ss. 223-228, 2004.
- [16] E. Durgut ve R. Kaçar, "Dubleks," *Gazi Üniversitesi. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 26, sayı 2, ss. 341-348, 2011.
- [17] A. Shah, A. Kumar, and J. Ramkumar, "Analysis of transient thermo-fluidic behavior of melt pool during spot laser welding of 304 stainless-steel," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 256, sayı 11, ss. 109-120, 2018.
- [18] P. Martinson, S. Daneshpour, M. Koçak, S. Riekehr, and P. Staron, "Residual stress analysis of laser spot welding of steel sheets," *Materials and Design Journal*, c. 30, sayı 9, ss. 3351-3359, 2009.
- [19] H. Mohammad Soltani and M. Tayebi, "Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by tig and Nd:YAG laser welding," *Journal of Alloys and Compounds*, c. 767, sayı 9, ss. 112-121, 2018.
- [20] J. A. Alcock and B. Baufeld, "Diode laser welding of stainless steel 304L," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 240, sayı 9, ss. 138-144, 2017.
- [21] P. W. Fuerschbach and G. R. Eisler, "Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption," *Science and Technology of Welding and Joining*, c. 7, sayı 4, ss. 241-246, 2003.
- [22] P. Vasantharaja, M. Vasudevan, and P. Palanichamy, "Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316L stainless steel weld joints," *Journal of Manufacturing Processes*, c. 19, sayı 7, ss. 187-193, 2015.
- [23] S. Dancette, D. Fabrègue, V. Massardier, J. Merlin, T. Dupuy, and M. Bouzekri, "Investigation of the Tensile Shear fracture of Advanced High Strength Steel spot welds," *Engineering Failure Analysis*, c. 25, sayı 5, ss. 112-122, 2012.
- [24] L. Li, H. Xia, G. Ma, and G. Peng, "Flow dynamics during single- and dual-spot laser welding with one common keyhole of 321 stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 255, sayı 1, ss. 841-852, 2018.
- [25] Q. Han, D. Kim, D. Kim, H. Lee, and N. Kim, "Laser pulsed welding in thin sheets of Zircaloy-4," *Journal of Materials Processing Technology*, c. 212, sayı 5, ss. 1116-1122, 2012.
- [26] L. Li, R. Eghlio, and S. Marimuthu, "Laser net shape welding," *Journal of Manufacturing Processes*, c. 60, sayı 1, ss. 223-226, 2011.
- [27] A. Yürük, "Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen farklı özellikteki paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinin karakterizasyonu," Yüksek lisans tezi,

- İmalat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2015.
- [28] M. Gülsün, “Östenitik paslanmaz çeliklerin tozaltı kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliği ve mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.
- [29] R. Çetinalı, “AISI 316L paslanmaz çeliğin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla işlenebilirliğinin araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [30] M. Türkan, “Kaynaklı ve kaynaklı olmayan östenitik paslanmaz çeliklerin korozyif ortamlardaki çekme davranışları,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Pamukkale, Türkiye, 2013.
- [31] T. Aydın, “Paslanmaz çeliklerin MIG kaynağında kullanılan gazlar ve etkileri,” Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [32] C. Güneş, “Benzinli enjektörlerin lazer kaynağı ve lazer kaynak parametreleri,” Yüksek lisans, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [33] Anonim, (2019, 23 Mart). [Online]. Erişim: <http://www.estainlesssteel.com/historyofstainlesssteel.shtml>.
- [34] Anonim, (2019, 23 Mart). [Online]. Erişim: <http://www.stainless-steel-world.net/basicfacts/a-brief-history-of-stainless-steels.html>.
- [35] T. Teker, “AISI 430/AISI 1040 çelik çiftinin anahtar deliği plazma kaynak yöntemi ile birleştirilmesi, mikroyapı ve mekanik özelliklerin araştırılması,” Doktora tezi, Metalurji Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2010.
- [36] A. Aran ve M. A. Temel, *Paslanmaz Çelik Üretimi*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Sarıtaş Teknik Yayın, 2004, böl. 3. ss. 22-29.
- [37] B. Bakırcıoğlu, “Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği üzerinde farklı kesici kenar formlarının etkisinin karşılaştırmalı olarak araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [38] E. Gözütok, “Paslanmaz çeliklerin tig kaynağında argon-hidrojen gaz karışımının kaynaklı birleştirmenin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi,” Doktora tezi, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2016.
- [39] C. Köse, “Medikal alanda kullanılan paslanmaz çeliklerin lazer kaynak kabiliyeti ve kaynaklı bağlantıların biyoaktivite ve biyokorozyon davranışlarının araştırılması,” Doktora tezi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2015.
- [40] T. Osmanoğlu, “AISI 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikro yapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri,” Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri

- Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [41] G. Puskulcu and F. Koculur, "Laser welding method and applications," *Engineer and Machine*, c. 50, sayı 5, ss. 8-17, 2009.
- [42] E. Esendir, "Farklı metallerin nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [43] N. Kahraman, B. Gülenç, *Modern Kaynak Teknolojisi*, 3. baskı, Ankara, Türkiye: Epamat Basım Yayın, 2016, böl. 12, ss. 198-206.
- [44] F. Hayat, "Çift-fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında mho ile kaynak süresinin mekanik özelliklere etkisi," Bilim uzmanlığı tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye, 2005.
- [45] M. Baytemir, "Ostenitik AISI 310-ferritik AISI 430 paslanmaz çeliklerin elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2011.
- [46] F. Şen, "Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bağlantısının lazer nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve ısı gerilmelerin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2001.
- [47] E. Kaluç, "Ferritik-ostenitik paslanmaz çelik çiftinin nokta kaynağında kaynak parametrelerinin çekme-makaslama mukavemetine ve tanelerarası korozyona etkisi," Doktora tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1998.
- [48] B. Kocabekir, "Isı Girdisi ve kaynak atmosferinin 316L paslanmaz çeliklerin direnç kaynak birleştirmelerine etkisi," Bilim uzmanlığı tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye, 2006.
- [49] T. Osmanoglu, "AISI 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikroyapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri," Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [50] H. D. AK, "Geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle üretilen aısı 304l ve AISI 316l östenitik paslanmaz çeliklerin özelliklerine sinterleme koşullarının etkisi," Yüksek lisans tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [51] Anonim, (2019, 11 Mayıs). *Laser* [Online]. Erişim: <http://www.britannica.com/technology/laser>.
- [52] B. Turhan, "Araç aydınlatma ürünlerinde geleneksel plastik parça birleştirme yöntemlerinin lazer kaynak yöntemi ile karşılaştırılması," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2018.
- [53] J. Lawrence, *Advances In Laser Materials Processing*, 2. baskı, Kidlington, United Kingdom: Elsevier, 2018, böl. 12, ss. 302-315.

- [54] A. Karaaslan, *Laser ile Malzeme İşlemleri*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Literatür Yayınları, 2009, böl. 2, ss. 23-54.
- [55] R. O. Uzun, “Lazerle kaynak işleminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [56] U. Özdemir, “Lazer kaynaklı alüminyum alaşım bağlantıların kırılma mekaniği ve mukavemet açısından incelenmesi,” Doktora tezi, Makina Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2012.
- [57] S. Saravanan, K. Raghukandan, and N. Sivagurumanikandan, “Pulsed Nd: YAG laser welding and subsequent post-weld heat treatment on super duplex stainless steel,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 25, sayı.8, ss. 284-289, 2017.
- [58] M. Gao, X. Y. Zeng, and Q. W. Hu, “Effects of welding parameters on melting energy of CO₂ laser-GMA hybrid welding,” *Science Technology Welding Joining*, c. 43, sayı.3, ss. 517-522, 2006.
- [59] E. Akman, “Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2006.
- [60] S. Katayama, *Handbook of Laser Welding Technologies*, 1. baskı, India, New Delhi: Woodhead Publishing, 2013, böl. 4, ss. 89-91.
- [61] C. M. Allen, G. Verhaeghe, P. A. Hilton, C. P. Heason, and P. B. Prangnell, “Laser and hybrid laser-MIG welding of 6.35 and 12.7 mm thick aluminium aerospace alloy,” *Material Science Forum*, c. 39, sayı 8, ss. 519-521, 2006.
- [62] S. Çelen, “Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2006.
- [63] R. Hajavifard, “Fotovoltaik elementlerin üretiminde, alüminyum alaşımlı ince levhaların lazer puls nokta kaynağında parametre araştırması,” Yüksek lisans tezi, Makina Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2011.
- [64] Y. Karol, “Yüksek basınçlı pres döküm ile üretilmiş magnezyum alaşımı malzemelerde lazer kaynağının incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Makina Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye, 2010.
- [65] A. Yürük, B. Bozkurt, ve N. Kahraman, “S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mig kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 4, sayı 6, ss. 90-97, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Esra ÇETİN
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.05.1991 ve Düzce
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : esraacetiin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kompozit Malz. Tek. A.B.D.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Metalürji ve Malzeme Müh.	Sakarya Üniversitesi	2015
Lise	Sayısal	Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2009

YAYINLAR

Apay, S., Çetin, E., “AISI 430 paslanmaz çeliğinin lazer nokta kaynağıyla kaynatılmasının mikroyapı özelliklerine etkisi”, *International Science and Technology Conference*, Paris, France, 2018.

Apay, S., Çetin, E., “Lazer nokta kaynağı ile kaynatılan aısı 304 paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi”, *International Science and Technology Conference*, Paris, France, 2018.