

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AISI 316 L PASLANMAZ ÇELİĞİN LAZER KAYNAĞINDA
LAZER KAYNAK PARAMETRELERİNİN METALURJİK YAPIYA
ETKİSİ VE ISI DAĞILIMININ İNCELENMESİ

ŞEYMA YILMAZ

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AISI 316 L PASLANMAZ ÇELİĞİN LAZER KAYNAĞINDA
LAZER KAYNAK PARAMETRELERİNİN METALURJİK
YAPIYA ETKİSİ VE ISI DAĞILIMININ İNCELENMESİ

ŞEYMA YILMAZ

Dr. Öğr. Üyesi İsmet TIKIZ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Salim ASLANLAR
Jüri Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.

Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 07.02.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)

.....
Şeyma YILMAZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi' ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dahilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
(İmza)

.....
Şeyma YILMAZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bulunuşundan bu yana paslanmaz çelikler sadece metal sektörü ile sınırlı kalmayıp geniş bir alanda kullanım alanı bulmuştur. Bu yaygın kullanım paslanmaz çelikler üzerine yapılan çalışmaların da artmasına yol açmıştır. Bu çalışmaların başlıca araştırma konularından biri de çeliklerin kalıcı birleştirilmesinde kullanılan kaynak yöntemlerindeki parametre seçimlerinin kaynaklı parçanın kalitesine olan etkilerinin araştırılmasıdır. Bu çalışma ile diğer yöntemlere göre nispeten daha yeni bir yöntem olan lazer kaynağının en sık kullanılan paslanmaz çeliklerden olan AISI 316 L östenitik çeliğinin kaynağında kullanımı ile kaynak parametrelerindeki değişimin kaynak metalurjisine ve ısı dağılımına olan etkileri araştırılmıştır. Tez çalışmasının lazer kaynağındaki parametrelerin etkilerini tespit ederek lazer kaynağı yapacak kişilere parametre seçme konusunda yardımcı olması amaçlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimimin tamamında yol gösterici olan, bilgi ve birikimi ile bana katkıda bulunan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İsmet TIKIZ'a, tez çalışmamın bilhassa deneysel kısımlarında her türlü desteği ve kolaylığı sağlayan ikinci danışmanım sayın Prof. Dr. Ersin KAYAHAN'a, deneylerin yapılması ve hazırlık süreçlerinde çokça yardımı olan Öğr. Gör. Levent CANDAN, Mohamad ALHJHAMOUD diğer Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (LATARUM) çalışanlarına, metalurjik görüntüleme her türlü imkanı sağlayarak cömertçe bilgilerini paylaşan Doç.Dr. Şaban Hakan ATAPEK ve Arş.Gör.Dr. Gülşah AKTAŞ ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans hayatımın tüm bu zorlu sürecinde her türlü maddi manevi desteği sağlayarak beni asla yalnız bırakmayan kıymetli aileme ve süreçteki en büyük destekçilerimden olan değerli arkadaşım Büşra YILGIN ve kardeşim Saliha KONAR'a en içten sevgilerimi sunarım.

Mart - 2023

Şeyma YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	3
2.1. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri.....	3
2.2. Paslanmaz Çeliklerde Kullanılan Alaşım Elementleri ve Etkileri	4
2.2.1. Krom.....	4
2.2.2. Nikel	4
2.2.3. Mangan	5
2.2.4. Silikon.....	5
2.2.5. Molibden.....	6
2.2.6. Karbon	6
2.2.7. Azot	6
2.2.8. Diğer Alaşım Elementleri.....	6
2.3. Paslanmaz Çeliklerde Faz Diyagramı	7
2.3.1. Demir-Krom Denge Diyagramı.....	7
2.3.2. Demir-Krom-Karbon Diyagramı.....	8
2.3.3. Demir-Krom-Nikel Diyagramı	10
2.4. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	11
2.5. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması.....	11
2.5.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	12
2.5.1.1. Mikroyapıları.....	14
2.5.1.2. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	14
2.5.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler	15
2.5.2.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	16
2.5.2.2. Mikroyapıları ve Kaynaklanabilirliği.....	16
2.5.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	16
2.5.3.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	17
2.5.3.2. Mikroyapıları.....	18
2.5.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler.....	19
2.5.4.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	19
2.5.4.2. Mikroyapıları.....	20
2.5.5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	20
2.5.5.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	21
2.5.5.2. Mikroyapıları.....	21
2.6. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti	21
2.6.1. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Kullanılan Diyagramlar.....	23
2.6.1.1. Schaeffler Diyagramı	23
2.6.1.2. De Long Diyagramı.....	26

2.6.2. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları	26
2.6.3. Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları	27
2.6.4. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları	28
2.6.4.1. Delta Ferrit Fazının Oluşumu	28
2.6.4.2. Sigma Fazının Oluşumu	29
2.6.4.3. Kaynak Hataları	29
2.6.5. Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları	31
2.6.6. Çökeltme Sertleşmeli Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları	32
3. LAZER IŞIN KAYNAĞI	34
3.1. Lazer	34
3.2. Lazer Işını ve Lazer Işını Oluşumunun Fiziksel Temelleri	35
3.2.1. Enerji Seviyeleri Arasındaki Geçiş ve Foton Yayılımı	35
3.2.1.1. Uyarılmış Soğurma	36
3.2.1.2. Kendiliğinden Emisyon ve Uyarılmış Emisyon	37
3.2.2. Boltzman Dağılımı ve Nüfus Terslenmesi	40
3.2.3. Negatif Soğurma	41
3.3. Lazer Sistemleri ve Lazer Sisteminin Temel Elemanları	42
3.3.1. Lazer Sisteminin Elemanları	42
3.3.1.1. Lazer Aktif Maddesi	43
3.3.1.2. Enerji (Pompalama) Kaynağı	44
3.3.1.3. Optik Rezonatör (Yansıtıcı Aynalar) ve Odaklama Elemanları	45
3.4. Lazerlerin Sınıflandırılması	48
3.4.1. Sıvı Lazerler	48
3.4.2. Gaz Lazerler	49
3.4.3. Yarı İletken Lazerler	51
3.4.4. Katı Hal Lazerleri	52
3.4.4.1. Nd: YAG Lazerler ve Nd: YAG Lazer Sistemlerinde Lazer Oluşumu	53
3.5. Lazer Kaynağı	58
3.5.1. Lazer İletim Kaynağı	58
3.5.2. Lazer Nüfuziyet Kaynağı	59
3.5.3. Lazer Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları	60
3.5.4. Lazer Kaynak Parametreleri	62
3.5.4.1. Lazer Gücü	63
3.5.4.2. Kaynak Hızı	64
3.5.4.3. Koruyucu Gaz	65
3.5.4.4. Diğer Kaynak Parametreleri	66
3.5.5. Lazer Kaynağında Makroyapı ve Mikroyapı	68
4. MATERYAL VE YÖNTEM	69
4.1. Materyal	69
4.2. Kaynak Ön Hazırlığı	69
4.3. Lazer Kaynak Cihazı	70

4.4. Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi	70
4.5. Kaynak Deneyleri	74
4.6. Metalografik Numune Hazırlığı	75
4.7. Optik Görüntüleme ve Metalürjik İncelemeler	76
4.8. Kaynağın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi	77
4.8.1. Geometri ve Mesh Oluşturma.....	77
4.8.2. Termal Sınır Koşulları ve Değişkenlerin Tanımlanması.....	78
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	81
5.1. Kaynak Bölgelerindeki Yapının Makro Boyutta İncelenmesi	81
5.1.1. Kaynak Şekli, Birleşme ve Nüfuziyet	81
5.1.2. Penetrasyon Derinliği ve Kaynak Genişliği	83
5.2. Ferrit ve Martenzit Oranı Tespiti	86
5.3. Metalografik İncelemeler	87
5.3.1. Kaynak Metali Mikroyapısı	87
5.3.1.1. Oksidasyon Oluşumu ve Oksit Tabakası.....	88
5.3.2. ITAB ve Ana Metal Mikroyapıları	91
5.3.2.1. Ferrit Bantları	92
5.3.2.2. ITAB Genişliği ve Tane İrileşmesi	93
5.4. Sonlu Elemanlar Metodu ile Termal Analiz	95
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR	100
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	107
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Fe-Cr Denge Diyagramı	8
Şekil 2.2.	Karbonun östenit fazı bölgesini genişletmesine olan etkisi	9
Şekil 2.3.	Fe-Cr-C diyagramı a. %13 Cr b. %17 Cr	9
Şekil 2.4.	Fe-Cr-Ni Diyagramı a. %70 Fe b. %60 Fe	10
Şekil 2.5.	Kaynak kabiliyetini etkileyen etmenler	22
Şekil 2.6.	Schaeffler diyagramı	24
Şekil 3.1.	Atomun normal durumdaki ve uyarılmış durumdaki enerji seviyesi	36
Şekil 3.2.	Uyarılmış soğurma (a), kendiliğinden emisyon, (b) uyarılmış emisyon	38
Şekil 3.3.	Uyarılmış soğurma ve uyarılmış emisyon	39
Şekil 3.4.	Üç enerji seviyeli bir sistemde nüfus terslenmesi	40
Şekil 3.5.	Işığın x kalınlığında bir cisim içerisinden geçişi	41
Şekil 3.6.	Lazer sisteminin temel bileşenleri	42
Şekil 3.7.	Yaygın kullanılan lazer sistemlerinin aktif maddeleri, dalga boyları ve çalışma modları	43
Şekil 3.8.	Flaş lambası elektrik devresi	45
Şekil 3.9.	Optik rezonatörde dalga oluşumu	46
Şekil 3.10.	Eğrilik yarıçaplarına göre yansıtıcı aynalar	47
Şekil 3.11.	Sıvı lazer sistemi	49
Şekil 3.12.	Gaz lazer sisteminin temel bileşenleri	50
Şekil 3.13.	Yarı iletken diyot lazerin şematik gösterimi	51
Şekil 3.14.	Nd: YAG lazer sistemi	53
Şekil 3.15.	Nd: YAG lazerinde enerji seviyeleri	54
Şekil 3.16.	Nd: YAG lazer sistemlerinde enerji seviyeleri arasında geçiş ve lazer oluşumu	55
Şekil 3.17.	Lazer iletim kaynağı	59
Şekil 3.18.	Lazer nüfuziyet kaynağı aşamaları	60
Şekil 3.19.	Lazer kaynağında kaynağın kalitesine etkisi olan kaynak parametreleri	62
Şekil 3.20.	Nd: YAG lazerde kaynak parametrelerinin malzemeye bağlı olarak kaynak türüne etkisi	63
Şekil 3.21.	Lazer gücü ve kaynak hızına bağlı penetrasyon ve derinlik/genişlik oranı değişimi	64
Şekil 4.1.	Bant zımpara makinesi ve zımpara bandı	69
Şekil 4.2.	Ultrasonik yıkama cihazı	70
Şekil 4.3.	Lazer odak mesafesi ve darbe enerjisi tespiti için kullanılan numunelerin tablaya sabitlenmesi	71
Şekil 4.4.	Odak uzaklığı tespiti deneyi sonrası numune	72
Şekil 4.5.	Darbe enerjisi tespiti deneyi sonrası numune	73
Şekil 4.6.	Deney numunelerinin kaynak tablasına sabitlenmesi ve kaynak aşaması	74
Şekil 4.7.	Bakalite alınmış kaynaklı numuneler	75
Şekil 4.8.	Mikrotest Multipol Advanced otomatik zımparalama ve parlatma cihazı	75
Şekil 4.9.	Metalürjik inceleme için kullanılan optik mikroskop	76
Şekil 4.10.	Kaynaklı birleşme yapılacak numunelerde geometri oluşturma	77
Şekil 4.11.	Mesh oluşturma	77

Şekil 4.12.	Konveksiyon uygulanan bölgeler	78
Şekil 4.13.	Moving Heat Flux uygulanan bölgeler	78
Şekil 5.1.	4 numaralı numunenin kaynaklı birleştirme denemesi sonrası elde edilen görüntüsü	81
Şekil 5.2.	Kaynaklı numunelerden optik mikroskop ile x5 büyütmede alınan makro görüntüler	82
Şekil 5.3.	Argon koruyucu gazı altında yapılan kaynakların darbe enerjisine bağlı kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği	84
Şekil 5.4.	Oksijen koruyucu gazı altında yapılan kaynakların darbe enerjisine bağlı kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği	85
Şekil 5.5.	Hava gazı altında yapılan kaynakların darbe enerjisine bağlı kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği	85
Şekil 5.6.	Schaeffler Diyagramı ile ferrit oranı tespiti	87
Şekil 5.7.	1. numunenin kaynak metal bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	88
Şekil 5.8.	2. numunenin kaynak metal bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	89
Şekil 5.9.	3. numunenin kaynak metal bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	89
Şekil 5.10.	5. numunenin kaynak metal bölgesinden x20 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	89
Şekil 5.11.	6. numunenin kaynak metal bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	90
Şekil 5.12.	7. numunenin kaynak metal bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	90
Şekil 5.13.	8. numunenin kaynak metal bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	90
Şekil 5.14.	9. numunenin kaynak metal bölgesinden x20 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti	91
Şekil 5.15.	Kaynak sonrası kaynak metal yüzeyinde görülen oksidasyon kalınlığı	91
Şekil 5.16.	AISI 316 L çelik malzemenin ana metal bölgesinden x50 büyütme ile alınan görüntü	92
Şekil 5.17.	1. Numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü	93
Şekil 5.18.	2. Numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü	93
Şekil 5.19.	9. Numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü	94
Şekil 5.20.	8. Numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü	94
Şekil 5.21.	7. Numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü	94
Şekil 5.22.	15 J darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımı	95
Şekil 5.23.	20 J darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımı	96
Şekil 5.24.	25 J darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımı	96

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması	11
Tablo 2.2.	Standart martenzitik çeliklerin bileşimi	13
Tablo 2.3.	Martenzitik paslanmaz çeliklerin uygulama alanları	13
Tablo 2.4.	Ferritik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları	15
Tablo 2.5.	Östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları	17
Tablo 2.6.	Östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan çökeltiler	18
Tablo 3.1.	Nd: YAG lazerine ait optik ve spektroskopik parametreler	56
Tablo 3.2.	Çalışma moduna göre Nd: YAG lazerlerin karakteristikleri	57
Tablo 3.3.	Lazer iletim ve lazer nüfuziyet kaynağının avantajları ve dezavantajları	60
Tablo 3.4.	Lazer kaynağında yaygın olarak kullanılan koruyucu gazların karşılaştırılması	66
Tablo 4.1.	AISI 316 L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu	69
Tablo 4.2.	Lazer odak mesafesi tespiti için lazer parametreleri	71
Tablo 4.3.	Deneyde kullanılacak darbe enerjilerinin tespiti için kaynak parametreleri	72
Tablo 4.4.	Lazer kaynak parametreleri	73
Tablo 4.5.	Kaynak numunelerine ait parametreler	79
Tablo 5.1.	Kaynaklı parçalarda parametrelere bağlı kaynak genişliği, penetrasyon derinliği ve oranı	83
Tablo 5.2.	DeneySEL sonuçlara ve simülasyon sonuçlarına göre kaynak genişliği ve penetrasyon derinliklerinin karşılaştırılması	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Alpha prime (Kromca zengin ferrit çökeltisi)
$^{\circ}\text{C}$: Celcius (sıcaklık birimi)
λ	: Işığın dalga boyu
μ	: mikro
σ	: Sigma fazı
AISI 304	: 304 kalite östenitik paslanmaz çelik
AISI 309	: 309 kalite östenitik paslanmaz çelik
AISI 316L	: Düşük karbonlu paslanmaz çelik
Al	: Alüminyum
A_{xy}	: E_x durumundan E_y durumuna kendiliğinden emisyon oranı
Ar	: Argon
c	: Işık hızı
CO_2	: Karbondioksit
Cr	: Krom
CrO	: Kromoksit
$\text{Cr}_{eş}$: Krom eşdeğerliği
$(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$: Karbür
$(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$: Karbür
Cu	: Bakır
D_b	: Lazer ışın çapı
DP 600	: Çift fazlı çelik
E_1	: 1. Enerji düzeyi
E_2	: 2. Enerji düzeyi
F	: Atoma çarpan foton yoğunluğu
Fe	: Demir
Fe-Cr	: Demir-krom
Fe-Cr-C	: Demir-krom-karbon
Fe-Cr-Ni	: Demir-krom-nikel
H	: Planck sabiti
HCl	: Hidroklorik asit
He	: Helyum
Hz	: Elektromanyetik dalganın frekansı
kb	: Boltzman sabiti
Mo	: Molibden
N	: Azot
N_x	: t anında E_x enerji seviyesinde birim hacimde bulunan atom sayısı
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
$\text{Ni}_{eş}$: Nikel eşdeğerliği
s	: saniye
S	: Kükürt
St.6222	: Yüksek mukavemetli çelik
T	: Malzeme sıcaklığı

Ti	: Titanyum
P	: Fosfor
P_d	: Lazer güç yoğunluğu
P_{in}	: Işın demetinin gücü
V	: Volt
W	: Watt
W_{xy}	: Yutma oranı

Kısaltmalar

BPP	: Beam Parameter Product (Işın Kalite Faktörü)
HAZ	: Heat Affected Zone (Isıdan Etkilenmiş Bölge)
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
Nd: YAG	: Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet (Neodyum katkılı İttriyum Alüminyum Granat)
TIG	: Tungsten Inert Gas (Tungsten İner Gaz)

AISI 316 L PASLANMAZ ÇELİĞİN LAZER KAYNAĞINDA LAZER KAYNAK PARAMETRELERİNİN METALURJİK YAPIYA ETKİSİ VE ISI DAĞILIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Metallerin birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri kaynak ile birleştirmedir. Kaynak işlemi esnasında açığa çıkan yüksek sıcaklık parçaların birleşmesini sağlarken kaynak sonrası parçada istenmeyen bazı olumsuz etkilerin oluşmasına da yol açabilmektedir. Bu sebeple doğru kaynak yöntemi ve parametrelerin doğru seçimi kaynaklı parçadan beklenen özelliklerin karşılanması için çok önemlidir. Lazer kaynağı bu aşamada avantajlı ve yenilikçi bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Lazer ışınının küçük bir noktaya yönlendirilmesi ile dar bir kaynak dikişi oluşması, kaynak genişliği az iken derin bir penetrasyon oluşturabilmesi, farklı metallere rahatlıkla uygulanabilmesi ve benzeri birçok avantajı lazer kaynağını diğer yöntemlerin önüne geçirmektedir. Lazer kaynağının avantajlarından faydalanabilmek ve etkili bir kaynak yapabilmek için kaynak parametrelerini doğru seçmek çok önemlidir. Bu sebeple bu çalışmada AISI 316 L paslanmaz çelik parçalar darbe enerjisi ve koruyucu gazlar değiştirilerek farklı kaynak parametreleri ile darbeli modda Nd: YAG lazer cihazı kullanılarak birleştirildi. Birleşme sonrası kaynaklı parçaların metalurjik yapısı mikroskop altında incelenerek kaynak genişliği, penetrasyon derinliği, ferrit bantları, ITAB genişliği ve oksit tabakası kalınlıkları ölçüldü. Kaynak işlemleri ANSYS programının Transient Thermal modülünde modellenerek ısı dağılımları tespit edildi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldı. Hem deneysel yöntemin hem de bilgisayarda analiz yönteminin kullanıldığı bu çalışmada amaç kaynak parametrelerinin kaynaklı parçanın metalurjik yapısına olan etkisini tespit etmek ve ısı dağılımını incelemektir. İncelemeler sonucu artan darbe enerjisi ile kaynak genişliği, penetrasyon derinliği, ferrit bant sayısı ve ITAB genişliğinin arttığı görülmüştür. Argon, hava ve oksijen gazları ile yapılan kaynaklarda oksitlenmeyi önleyen en iyi koruyucu gazın argon olduğu tespit edilmiştir. Bilgisayarda yapılan modelleme işlemindeki sonuçların ise deneysel sonuçlar ile benzer olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 316 L, ANSYS, Mikroyapı, Nd: YAG Lazer, Lazer Kaynağı.

THE EFFECT OF LASER WELDING PARAMETERS ON METALLURGICAL STRUCTURE AND INVESTIGATION OF HEAT DISTRIBUTION IN LASER WELDING OF AISI 316 L STAINLESS STEEL

ABSTRACT

One of the most common methods of joining metals is welding. While the high temperature released during the welding process ensures the joining of the parts, it can also cause some undesirable negative effects on the part after welding. For this reason, the correct welding method and the correct selection of the parameters are crucial to meet the expected characteristics of the welded part. Laser welding emerges as an advantageous and innovative method at this point. Many advantages such as the formation of a narrow weld seam by directing the laser beam to a small spot, the ability to create a deep penetration when the weld width is narrow, the ability to easily apply to different metals, and many similar advantages make laser welding ahead of other methods. It is very important to choose the welding parameters correctly in order to benefit from the advantages of laser welding and to make an effective welding. For this reason, in this study, AISI 316 L stainless steel parts were combined using Nd: YAG laser device in pulsed mode with different welding parameters by changing pulsed energy and shielding gases. The metallurgical structure obtained after the joining was examined with the microscope and the weld width, penetration depth, number of ferrite bands, HAZ width and surface oxidation thicknesses were measured. The heat distributions were determined by modeling the welding processes in the Transient Thermal module of ANSYS and compared with the results. The aim of this study, in which both experimental and computer analysis methods are used is to determine the effect of welding parameters on the metallurgical structure of the welded part and to examine the heat distribution. As a result of the investigations, it was observed that weld width, penetration depth, number of ferrite bands and HAZ width increased with elevated pulsed energy. It has been determined that the best shielding gas that prevents oxidation in welding with argon, air and oxygen gases is argon. It was determined that the results of the modeling process on the computer were similar to the experimental results.

Keywords: AISI 316 L, ANSYS, Microstructure, Nd: YAG Laser, Laser Welding.

1. GİRİŞ

Günümüz metal endüstrisinde çeliklerin bilhassa da paslanmaz çeliklerin geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Paslanmaz çeliklerin korozyona dayanıklı olmaları, mekanik dayanımlarının yüksek olması, uzun ömürlü olmaları, imalata ve şekillendirmeye uygun olmaları gibi avantajlara sahip olmaları bu çelikleri diğer çeliklerin önüne geçirerek kullanımının daha da artmasına yol açmıştır. Endüstride büyük bir yer edinen bu çeliklerin birleştirilmesi de böylelikle önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Yılmaz ve diğ., 2011).

Metallerin kalıcı olarak birleştirilmesinde en çok tercih edilen birleştirme yöntemlerinden biri kaynak ile birleştirmedir (Aydın, 2018). Birçok kaynak yöntemi olmasına rağmen her kaynak yöntemi ile parçaları birleştirebilmek ya da aynı kalitede kaynak dikişi elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu noktada lazer kaynağı diğer kaynak yöntemlerine göre daha etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer kaynak metodlarında lazer cihazının giremediği dar alanlara kaynak yapılamamaktayken lazer ışınının dar bir noktaya yönlendirilebilmesi ile küçük ya da birleştirilmesi zor parçalar kolaylıkla birleştirilebilmektedir. Diğer kaynak yöntemlerinin geniş bir kaynak dikişi oluşturması parçanın mekanik özelliklerini olumsuz etkilemekteyken lazer kaynağı ile çok dar bir alan ısıdan etkilenmekte bu sayede parçanın mukavemeti de daha iyi korunabilmektedir. Bu özelliklere ek olarak lazer kaynağının otomasyona uygun olması, temiz bir yöntem olması, farklı metallerin birleşmesine olanak sağlaması vb. diğer birçok özelliği bu yöntemin metallerin birleştirilmesinde daha sık tercih edilmesine sebep olmaktadır (Akman, 2006).

İyi kalitede bir kaynak elde edebilmek için doğru kaynak yöntemi seçilmesine ek olarak kaynak parametreleri de doğru tespit edilmelidir. Kaynak parametreleri doğru seçilemediğinde birleştirilecek parçalarda birleşme yerine delinme ya da parçanın kesilmesi meydana gelebilir. Kaynaklı birleşme sağlanmasına rağmen birleşen parçalarda tam nüfuziyet olmaması, çatlak oluşumu, gözenek oluşumu ya da sıçrama gibi istenmeyen durumlar görülebilir. Bunların dışında metalurjik yapıda ikincil faz oluşumları ya da mukavemeti düşüren diğer oluşumlar gözlemlenebilir (Olsen, 2019; Güneş, 2012).

Lazer kaynağında lazer gücü, lazer ışın çapı, lazer cihazının çalışma modu, lazer odak uzaklığı, lazer ışınının dalga boyu, koruyucu gaz, kaynak hızı ve daha birçok kaynak parametresi vardır (Özcan, 2004). Bu parametreler içinde kaynağa en çok etkisi olan parametrelerden iki tanesi lazer gücü ve koruyucu gazdır. Lazer gücü arttıkça parçaya geçen ısı miktarı artar bununla birlikte nüfuziyet, kaynak genişliği ve penetrasyon derinlikleri de artar (Akman, 2006). İdeal bir kaynak bağlantısında kaynak derinliğinin fazla genişliğin ise az olması beklenir. Literatürde darbeli iletim kaynaklarında kaynak genişliğinin penetrasyon derinliğine oranı için en uygun değer 0,5 ile 1 arasında olduğu belirtilmiştir (Bhatt ve diğ, 2018). Koruyucu gazın ise lazer kaynağında iki görevi vardır. Bunlardan ilki kaynak yapılan bölgede plazma oluşumunu en aza indirerek kaynak nüfuziyetini sağlamak, ikincisi ise ergimiş metalin havadaki gazlar ile etkileşime girmesini engelleyerek yüzeyde oksidasyon oluşmasını önlemektir (Çelen, 2006).

Literatürde, lazer kaynak parametrelerinde değişikliklerin kaynaklı parçaların metalografisine olan etkileri ile alakalı çalışmalar bulunmaktadır.

El Bataghy çalışmasında (1997) lazer kaynak parametrelerinin östenitik çeliklerde kaynak metali bölgesi şekline ve katılaşma yapısına olan etkilerini incelemiş, maksimum çıkış gücü 5 kW olan CO₂ lazer cihazını sürekli modda kullanarak lazer kaynağı yapmıştır. Artan lazer enerjisi ile penetrasyon derinliğinin arttığı fakat kaynak profilinin çok etkilemediği görülmüştür.

Karaağaçlı çalışmasında (2006) lazer kaynak parametrelerinin mikroyapıya ve mekanik özelliklere olan etkisini incelemiştir. Bu incelemede St.6222 ve DP 600 yüksek mukavemetli çeliğini kullanarak bu çelikleri CO₂ lazer cihazı ile birleştirmiştir. Artan lazer gücünün kaynak genişliği, penetrasyon derinliği ve nüfuziyeti arttığını görmüştür.

Uzun ve ark. (2010) AISI 304 paslanmaz çelik parçaları 4 kW çıkış güçlü CO₂ lazer cihazı ile alın kaynağı yaparak birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin kaynak kalitesine olan etkilerini incelemiştir. İncelemelerinde artan lazer enerjisi ile parçaya ısı geçişinin arttığını ve mikroyapıda dendritik kol oluşumunun arttığını gözlemlemişlerdir.

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler içerisinde baskın olarak Fe-Cr, Fe-Cr-C ya da Fe-Cr-Ni element grupları bulunan yüksek alaşımlı çeliklerdir. Çeliğin paslanmazlık özelliği göstermesi için bileşiminde ağırlıkça en az %10,5 krom ihtiva etmesi gerekmektedir. Bu krom seviyesinde, metal korozif çevre şartlarıyla karşılaştığında yüzeyini kaplayacak bir CrO tabakası oluşturur ve bu tabaka metali oksidasyon ve korozyona karşı korur (Lippold ve diğ., 2005; Acar, 2020). Yüksek sıcaklıklarda dahi oksidasyona karşı yüksek dirence sahip olması sebebiyle ısıya dayanıklı alaşımlar olarak da bilinirler (Lippold ve diğ., 2005).

Paslanmaz çeliklerin sağlık sektörü, otomotiv sektörü, gıda sektörü, denizcilik uygulamaları, mutfak ekipmanları ve enerji sektörü gibi çok çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır (Lippold, 2005).

2.1. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri

Korozyon Dayanımı: Paslanmaz çeliklerin tamamı içeriğindeki Cr sebebiyle korozyona karşı dayanıklıdır. Alaşımdaki Cr oranına bağlı olarak atmosferik korozyondan daha korozif olan asidik, alkalik ve klorür içeren ortamlara karşı bile dayanıklı olabilmektedirler. Bu sebeple mutfak ekipmanları, cerrahi aletler, bina konstrüksiyonları gibi birçok alanda kullanılırlar (Aran, 2003; URL-1).

Mekanik Dayanım: Paslanmaz çelikler farklı amaçlar için kullanılabilen güçlü ve dayanıklı çeliklerdir. Yüksek çekme mukavemetleri vardır. Isıl işlemlerle ve soğuk şekillendirme ile malzemeye istenilen dayanıklılık kazandırılabilir (URL-1).

İmalat Kolaylığı: Paslanmaz çeliklerin kalitesine bağlı olmakla birlikte çoğu sıcak ve soğuk şekillendirmeye elverişlidir. Kesme işlemi kolaylıkla yapılabilir, talaşlı imalat ve kaynak işlemleri ile biçimlendirilebilirler (URL-1).

Görünüm ve Hijyenik Özellik: Metal yüzeyinde oluşarak paslanmazlığı sağlayan krom oksit tabakası metale parlak bir görünüm kazandırır. Bakımı ve temizliği kolay olan bu çeliklerin görünümü ve kalitesi uzun yıllar boyunca korunabilir (Palabıyık, 2013).

Uzun Ömürlülük ve Ekonomi: Paslanmaz çelikler yüksek dayanımlı olması ve bakımının kolaylığı gibi sebeplerden dolayı uzun ömürlüdürler. Paslanmaz çelikten üretilen

ekipmanların üretim maliyeti yüksek olsa da çelik malzemenin uzun ömürlü olması sebebiyle uzun vadede paslanmaz çelikler uygun maliyetlidir (Uğur, 2005).

2.2. Paslanmaz Çeliklerde Kullanılan Alaşım Elementleri ve Etkileri

Paslanmaz çelikler temelde içeriğinde %50 ile %80 aralığında demir (Fe) bulunduran krom, nikel, karbon elementleri dahil edilmiş demir bazlı alaşımlardır. Bu alaşımlara malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek, korozyon dayanımını arttırmak ya da istenilen mikroyapıyı elde edebilmek için ilave alaşım elementleri eklenir. Manganez ve silikon tüm paslanmaz çelik alaşımlarına eklenmekte olup ilave olarak molibden, azot, niyobyum, titanyum, alüminyum, bakır, tungsten, nitrojen, silisyum gibi elementler de eklenebilir (Lippold ve diğ, 2005; Tümer, 2012).

Her elementin çelik üzerinde ayrı bir etkisi bulunduğundan malzeme özelliklerinin ve dolayısıyla kaynak işlemlerinin daha iyi kontrolü için alaşım elementlerinin etkileri bilinmelidir (Lippold ve diğ, 2005).

2.2.1. Krom

Krom paslanmaz çeliklerde kullanılan temel elementlerden olup en önemli özelliği alaşımın korozyon dayanımını arttırmak ve oksidasyon direnci sağlamaktır (Uğur, 2005). Ferrit yapıcı bir elementtir, ağırlıkça %12'den fazla krom içeren demir-krom alaşımları tamamen ferritik yapıdan oluşmaktadır. Krom ayrıca güçlü bir karbür yapıcıdır, bu sebeple neredeyse tüm paslanmaz çeliklerde karbür oluşumu gözlenir. Krom paslanmaz çeliklerde gevrekliğe yol açan intermetalik bileşenlerin oluşumuna da etkisi büyük olan bir elementtir. Ferritik alaşımlarda yüksek krom miktarı, özellikle karbon ve nitrojen varlığında zayıf tokluk ve süneklikle sonuçlanabilir. Alaşımında yüksek krom bulunan çeliklerle yapılan kaynaklı imalatlarda kabul edilebilir mekanik özelliklerin sağlanması için dikkatli davranılması ya da alaşım içeriğindeki karbon ya da nitrojenin azaltılması gerekmektedir (Lippold ve diğ, 2005).

2.2.2. Nikel

Nikelin en büyük etkisi alaşımlarda östenit fazını oluşturmaktır, alaşıma yeterli miktarda nikel katıldığında oda sıcaklığında ve altındaki sıcaklıklarda dahi östenit faz alanı genişletilebilir. Bu sebeple kaynak sonrası hızlı soğumada östenit oluşumunu arttırmak için dolgu malzemelerinde de kullanılır. Nikel güçlü bir karbür yapıcı değildir, genelde

intermetalik bileşen oluşumuna sebep olmaz (Lippold ve diğ, 2005). Ancak yine de alaşımdaki varlığı çökeltme etkisine yol açabilir (ASM, 1985). Nikelin ferritik alaşımlarda korozyon dayanımını geliştirdiği yönünde bazı kanıtlar da bulunmaktadır. Nikel ayrıca gerilme korozyonu çatlama direncini azaltmaktadır, martenzitik ve ferritik alaşımlardaki en büyük faydası ise dayanıklılığı arttırmasıdır. Bazı durumlarda mekanik özellikleri iyileştirme amaçlı kromlu çeliklere eklenmektedir. Kaynak metali tokluğunu yükseltici etkisi de bulunmaktadır (Karcı, 2008).

2.2.3. Mangan

Mangan bütün alaşımlı çeliklerde kullanılan bir elementtir. Östenitik paslanmaz çeliklerde ağırlıkça %1-2 oranında bulunur. Ferritik ve martenzitik çeliklerde ise genellikle ağırlıkça %1'den daha az bulunur. Alaşım içerisindeki mangan ve nikel miktarına bağlı olsa da, mangan genellikle östenit yapıcı bir element olarak bilinir. Düşük sıcaklıklarda östenitin kararlı halde kalması ve martenzite dönüşümünün engellenmesi için etkili bir elementtir ancak yüksek sıcaklıklarda ferrit yapıcıdır (Uğur, 2005). Döküm uygulamalarında sıcak çatlama önlemek için kullanılmıştır. Bazı özel alaşımlara östenitik fazda nitrojenin çözünürlüğünü arttırmak için de eklenir böylece yüksek azot içerikli alaşımların eldesinde kullanılır. Manganın mekanik özelliklere etkisi çok fazla olmamakla birlikte, katı çözümlü güçlendirmesine katkıda bulunur ve bir miktar gevrekliğe yol açar (Uğur, 2005; Lin ve diğ, 1993).

2.2.4. Silikon

Silikon çeliğin erimesi esnasındaki deoksidasyon için alaşımlara eklenir ve neredeyse tüm paslanmaz çeliklerde ağırlıkça %0,3 - %0,6 aralığında bulunur. Alaşım içerisinde %4 ve %5 oranında bulunduğu korozyon direncini arttırdığı görülmüştür. Ferrit ya da östenit yapıcı özelliği net değildir ancak östenitik çeliklerde (ağırlıkça %1'den fazla bulunduğu), ferritik çeliklerde ve martenzitik çeliklerde ferrit oluşumuna yardımcı olur. Silikonun demirle bileşik yapması durumunda alaşım kırılma eğiliminde olmaktadır (Lippold ve diğ, 2005). Katılaşma esnasında ayrılarak nikel ile birleşmesi halinde düşük erime noktalı ötektik bileşenlerin de oluştuğu bilinmektedir (Lin,1991). Ayrıca silikon erimiş çeliğin akışkanlığını arttırmaktadır bu sebeple kaynak dolgusu metaline normalden biraz fazla eklenir (Lippold ve diğ, 2005).

2.2.5. Molibden

Molibdenin paslanmaz çeliğin türüne göre alaşımda farklı etkileri bulunmaktadır. Çukurlaşma ve çatlak korozyon direncini arttırmak için ferritik, östenitik ve dubleks çeliklere %6'ya kadar, süper östenitik çeliklere ise daha fazla oranda eklenir. %0,5 oranında molibden ilavesi ile çelikte ikincil sertleşmeyi arttırarak daha yüksek çekme mukavemeti sağlanır. Molibdenin alaşımdaki varlığı ferrit oluşumunu ve mikroyapıda tutunmasını sağlar, bu sebeple martenzitik çeliklerde ferrit tokluk ve sünekliliği azaltır. Bir diğer negatif etkisi de sıcak işlemeyi zorlaştırmasıdır (Lippold ve diğ, 2005).

2.2.6. Karbon

Karbon östenit yapıcı bir elementtir. Alaşımların sertliğini ve mukavemetini artırır. Kaynak metalinin tokluğuna ve korozyon direncine negatif etkisi olduğu için alaşımdaki oranı kontrol edilmelidir (Karcı, 2008).

2.2.7. Azot

Azotun paslanmaz çeliklerde çukurlaşma direncini artırma, mukavemeti artırma ve östenit içeriğini artırma gibi etkileri bulunmaktadır. Çatlak korozyonuna karşı da dayanımı arttırmaktadır (Gunn, 1997). Ferritik çeliklerde tokluğa ve korozyon dayanımına karşı olumsuz etkisi bulunmaktadır (Uğur, 2005).

2.2.8. Diğer Elementler

Yukarıda ayrıntılı belirtilen elementler dışında paslanmaz çelik alaşımlarında kullanılan çok sayıda element vardır, bunların hepsi çeliğe farklı özellikler kazandırmak için kullanılır. Örneğin sülfür, selenyum ve kurşun malzemenin işlenebilirlik özelliğinin artırılması için alaşıma eklenir ve korozyon direncini düşürür. Tungsten, dubleks paslanmaz çeliklere eklenerek çukurlaşma korozyonu direncini iyileştirir ve ferrit oluşumuna katkı sağlar. Alüminyum düşük kromlu ferritik çeliklerde genel korozyon direncini arttırmak için eklenir, tane küçültücü etkisi vardır. Kobalt, martenzitik çeliklerde martenzit oluşum sıcaklığını artırır ve östenit oluşumunu sağlar (Lippold ve diğ, 2005). Hidrojen gazı çeliğin katı iç yapısında bulunduğu yapıda çatlak oluşturur ve bu çatlaklar mekanik özelliklerin bozulmasına yol açar. Oksijen, oluşturduğu oksitli bileşikler ile çeliğin tokluğunu düşürücü etkileri bulunmaktadır (URL-1).

2.3. Paslanmaz Çeliklerde Faz Diyagramları

Saf demir farklı sıcaklıklarda farklı faz ve kafes yapısına sahiptir, aynı şekilde çelikler de içerisinde bulunan alaşım elementi miktarına ve sıcaklığa bağlı olarak farklı fazlarda bulunurlar. Paslanmaz çeliklerin bu fazlara göre sınıflandırılması ve mekanik özelliklerinin tespitinde bu fazların etkili olması sebebiyle, malzemenin hangi fazda olduğunun bilinmesi önemlidir (Lippold, 2005).

Paslanmaz çelikler Fe-Cr, Fe-Cr-C ya da Fe-Cr-Ni element gruplarından oluştuğu için faz dönüşümlerinde ve kararlı hallerindeki faz durumlarının tespitinde üç ayrı denge diyagramı kullanılır. Ancak alaşım içerisinde Fe, Cr ve Ni dışında daha birçok element bulunduğu için bu diyagramlar kaynağın mikroyapısını anlamada tam doğru sonuçlar vermez. Faz diyagramları denge durumları baz alınarak tasarlandığı için kaynakta kullanılan dolgu malzemesinin içerdiği elementler, kaynağın hızlı ısınması ve soğuması gibi durumlar bu denge durumunu bozarak faz diyagramlarından çıkan sonuçları etkileyebilmektedir (Lippold, 2005).

2.3.1. Demir-Krom Denge Diyagramı

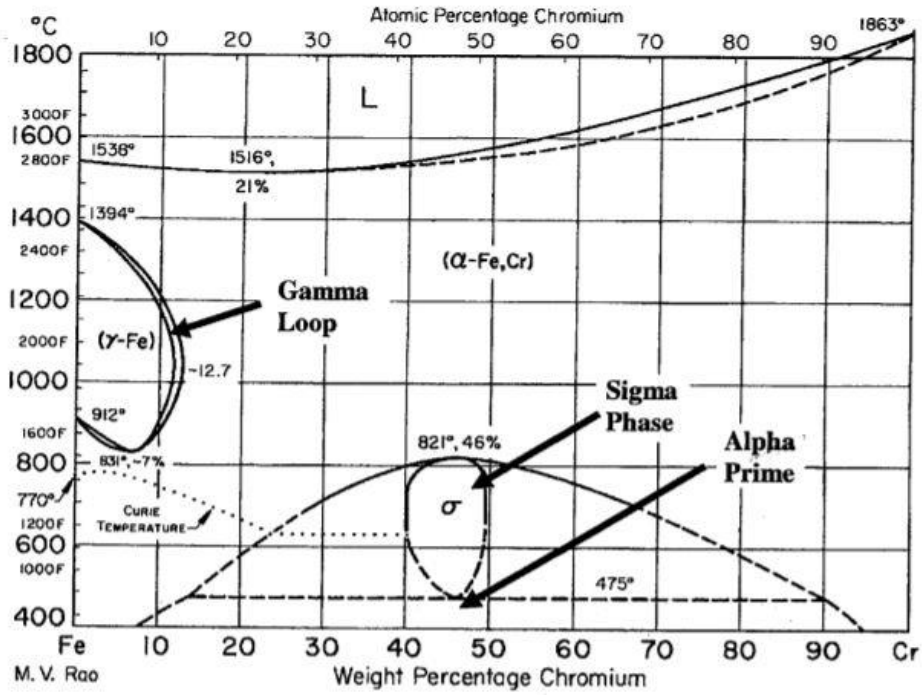
Demir-krom denge diyagramı demir içerisindeki krom oranına ve sıcaklığa göre yaklaşık olarak alaşımın faz durumunu gösteren bir diyagramdır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi krom demir içerisinde yüksek sıcaklıklarda tamamen çözünebilmektedir (Lippold ve diğ., 2005).

Bu diyagrama göre ağırlıkça %12,7’den fazla krom içeren tüm alaşımlar yüksek sıcaklıklarda ferrit fazından oluşmaktadır. Daha düşük krom oranlarında ise sıcaklığın 1394 °C ve 912 °C aralığında olduğu Gama döngüsü adı verilen kısım içerisinde alaşımın fazı östenittir. Ancak bu östenit hızlı soğuma ile martenzite dönüşebilir. Östenit alanının genişletilmesi için östenit dengeleyici olan C ve N elementlerinin oranı alaşımda artırılabilir, böylelikle östenit içerisinde kromun çözünürlüğü artar. Demir-krom alaşımlarının katılaşmasında ise yapı tamamen ferritten oluşmaktadır (Durukan ve diğ., 2015).

Krom oranının %20’yi aştığı durumlarda sigma fazı olarak adlandırılan düşük sıcaklık denge fazı da görülmektedir. Bu faz tetragonal kristal yapıdadır, oluşumu için 600 °C ve

800 °C aralığında uzun süre gerekmektedir. Kırılgan ve sert bir faz olması sebebiyle alaşımlar içerisinde oluşumu istenmemektedir (Lippold ve diğ, 2005).

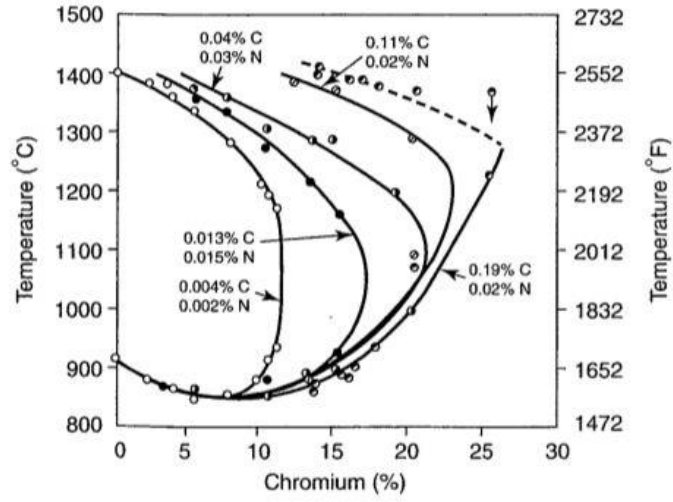
Bu diyagramda ayrıca Alpha Prime (α') adı verilen çökelmelerin oluştuğu bölge de görülmektedir. Bu bölge 475 °C altındaki sıcaklıklar için geçerlidir, $\sigma + \alpha$ fazlarından oluşur. 475 °C gevrekliği de denilen bu olayda alfa kafesi içinde kromca zengin çökeltiler oluşur. Çökeltiler 400 °C ve 540 °C aralığında daha çok şekillenirler ve alaşımda %14'ten fazla krom bulunduğu durumlarda şiddetli gevrekliğe yol açarlar (Lippold ve diğ, 2005).



Şekil 2.1. Fe-Cr denge diyagramı (Lippold ve diğ, 2005)

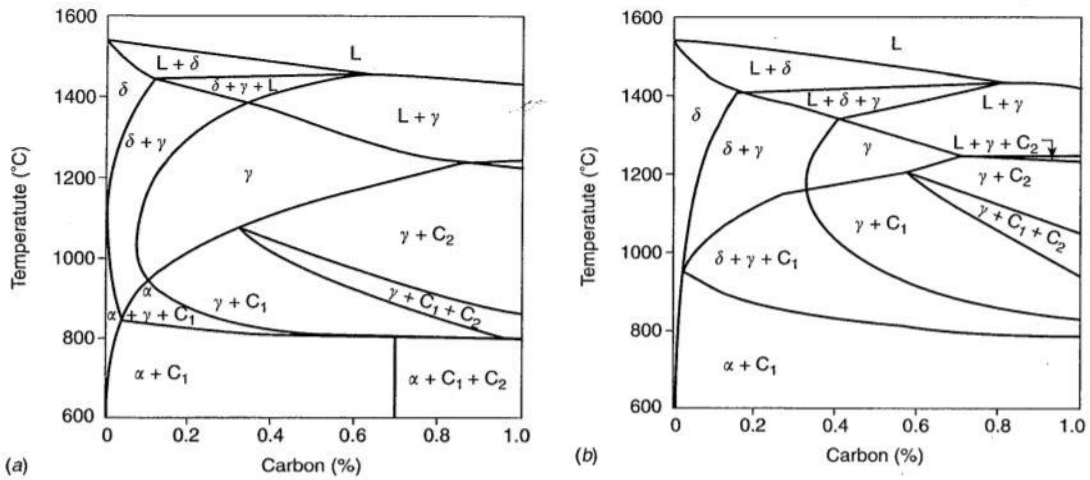
2.3.2. Demir-Krom-Karbon Diyagramı

Fe-Cr alaşımına eklenen karbon Demir-Karbon denge diyagramını önemli ölçüde değiştirir ve diyagramı daha karmaşık bir hale getirir. Karbon östenit yapıcı bir element olduğu için alaşımdaki oranının artması gama döngüsü bölgesini genişletecek ve daha yüksek krom içeriklerinde, daha yüksek sıcaklıklarda östenitin kararlı halde olmasına izin verecektir. Karbonun gama döngüsü bölgesi sınırlarına olan etkisi Şekil 2.2'de gösterilmektedir (Lippold, 2005).



Şekil 2.2. Karbonun östenit fazı bölgesini genişletmesine olan etkisi (Lippold ve diğ, 2005)

Fe-Cr-C alaşımlarının faz durumunu sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelemek için içerisinde sabit değerler bulunan daha karmaşık faz diyagramları kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te kromun alaşım içerisindeki oranının %13 ve %17 baz alındığı iki ayrı diyagram bulunmaktadır, bu diyagramlarda karbon oranı miktarına ve sıcaklığa göre faz durumu tespit edilir. Fe-Cr diyagramlarından daha karışık olan bu diyagramlarda ek olarak C_1 ve C_2 değerleri bulunmaktadır. C_1 , $(Cr,Fe)_{23}C_6$ karbürünü; C_2 ise $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürünü ifade etmektedir (Lippold ve diğ, 2005).



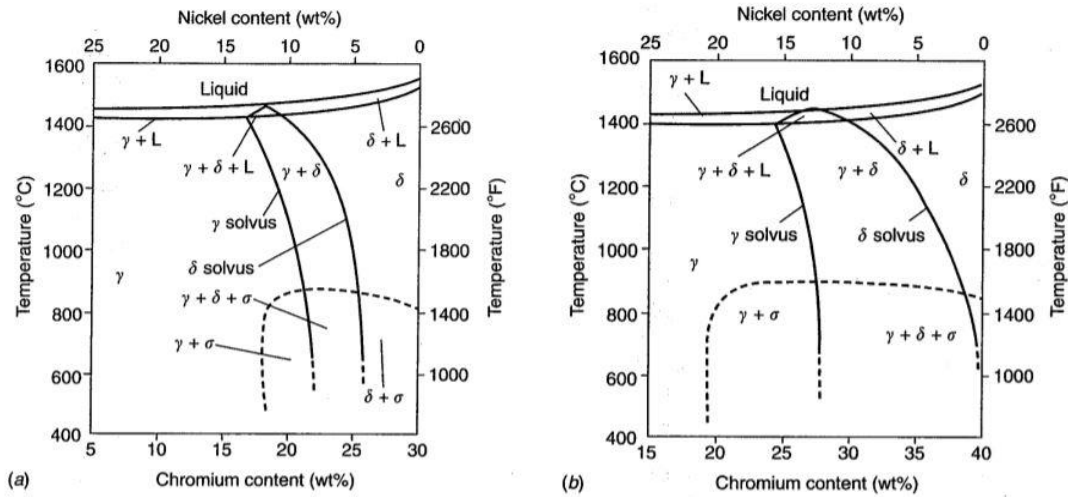
Şekil 2.3. Fe-Cr-C diyagramı a. %13 Cr b. %17 Cr (Lippold ve diğ, 2005)

Düşük kromlu ferritik çeliklerde ve martenzitik çeliklerde faz kararlılığını ve mikroyapıyı anlamak için %13 Cr oranı baz alınarak hazırlanmış olan Şekil 2.3 a'daki diyagram

kullanılabilir. %1'den daha az karbon içeren Fe-Cr-C alaşımlarında yüksek sıcaklıklarda yapı tamamen ferritten oluşmaktadır. %1'den daha fazla karbon içeren alaşımlarda yüksek sıcaklıklarda yapı östenitik olmaktadır, katılaşma sıcaklığının hemen altındaki sıcaklıklarda ise yapı östenit ve ferrit karışımı olmaktadır. Yapı tamamen soğuduğunda 1200 °C'nin altında tamamen östenit olacaktır. Soğutma hızına bağlı olarak yapı östenitten martenzite dönüşebilir. Hızlı soğutmalarda ortaya çıkan bu ferritik ve martenzitik yapılar mekanik özelliklerde düşüşe yol açtığı için mikroyapıda istenmeyen fazlardır. Yüksek krom içeren Fe-Cr-C alaşımları için %17 krom oranı baz alınarak hazırlanmış olan Şekil 2.3 b'deki diyagram kullanılabilir. Burada kromun ferrit yapıcı özelliğinden dolayı ferrit faz alanı genişlemiş, östenit faz alanı daralmıştır. Yüksek sıcaklıklarda östenit yapısı olması için daha yüksek karbon içeriği gerekmektedir (Lippold ve diğ, 2005).

2.3.3. Demir-Krom-Nikel Diyagramı

Fe-Cr alaşımlarına eklenen nikel östenit faz alanını genişletir ve yapının oda sıcaklığında kararlı halde östenit olmasını sağlar. Nikel ilave edilmiş bu çelikler östenitik paslanmaz çelikler ve dubleks paslanmaz çeliklerdir. Bu çeliklerin faz dönüşümlerinin incelenmesi için alaşım içerisinde demirin %70 ve %60 oranında olduğu çelikler için hazırlanmış Şekil 2.4'te gösterilen iki ayrı diyagram kullanılmaktadır (Lippold ve diğ, 2005).



Şekil 2.4. Fe-Cr-Ni Diyagramı a. %70 Fe b. %60 Fe (Lippold ve diğ, 2005).

Bu diyagram ferrit, östenit ve sıvı fazından oluşmaktadır. Katı halde, %20'den fazla krom içeriklerinde yüksek sıcaklıklarda kararlı yapı ferrittir. Sıcaklık düştükçe yapı kısmi

olarak ferritten östenite dönüşür. Östenit olarak katılaştıran bu alaşımlar oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda östenit kalacaktır (Lippold ve diğ, 2005).

2.4. Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Alaşımlı çelikler ile alaşımsız çelikler arasında alaşıma eklenen elementlerin türüne ve miktarına göre farklı fiziksel ve mekanik özellikler bulunmaktadır (Abuç, 2006).

Östenitik paslanmaz çeliğin ısı iletkenliği alaşımsız çeliğin ısı iletkenliğinin üçte biri kadardır fakat ısı genleşme katsayısı 1,5 katıdır. Alaşım içerisindeki C miktarı malzemenin sertleştirilebilme özelliğini arttırmaktadır (Abuç, 2006).

2.5. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Paslanmaz çelikler diğer malzeme sistemlerinin aksine baskın olan metalürjik faz durumuna göre sınıflandırılırlar. Bu faz durumları martenzit, ferrit ve östenit fazlarıdır (Lippold ve diğ, 2005). Östenitik paslanmaz çelik, ferritik paslanmaz çelik, martenzitik paslanmaz çelik, dubleks paslanmaz çelik ve çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelik olarak Tablo 2.1’de de görüldüğü gibi beş grupta incelenirler (Tüysüz, 1999).

Tablo 2.1. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması (Tüysüz, 1999)

Çelik Tipi	Bileşim	Mekanik Özellikler	Fiziksel Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulamalar
Östenitik	15-27 %Cr 8-35 %Ni 0-6 %Mo, Cu, N (Mn ve/veya N, Ni yerini alabilir)	Çekme dayanımı: 490-860 Mpa Akma dayanımı: 205-575 Mpa	✓ Isıl işlem uygulanam az ✓Manyetik değil	✓ Düşük sıcaklıkta iyi süneklik ✓ İyi genel korozyon direnci ✓ Yüksek sürtünme dayanımı	✓ Yüksek maliyet ✓ Sınırlı dayanım ✓ Yerel korozyon eğilimli ✓ Yüksek ısı mukeyese	Çoğunlukla genel uygulamalarda geniş olarak kullanılır.
Ferritik	11-30 %Cr 0-4 %Ni 0-4 %Mo	Çekme dayanımı: 415-650 Mpa Akma dayanımı: 275-550 Mpa	✓ Isıl işlem uygulanam az ✓ Manyetik	✓ Çok yüksek olmayan maliyet ✓ Gerilme korozyon çatlamasına karşı direnç	✓ Sınırlı dayanım ✓ Tane irileşmesin eğilimi	✓ İyi gerilme korozyon direnci ile iyi genel korozyon direnci gerektiren parçalar ✓ Deniz suyu uygulamaları

Tablo 2.1. (Devam) Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması (Tüysüz, 1999)

Ferritik	11-30 %Cr 0-4 %Ni 0-4 %Mo	Çekme dayanımı: 415-650 Mpa Akma dayanımı: 275-550 Mpa Uzama 50 mm'de: 10-25%	✓ Isıl işlem uygulana maz ✓ Manyetik	✓ Çok yüksek olmayan maliyet ✓Gerilme korozyon çatlamaına karşı direnç	✓ Sınırlı dayanım ✓ Tane irileşmesine ğilimi
Martenzitik	11-18 %Cr 0-6 %Ni 0-2 %Mo	Çekme dayanımı: 480-1000 Mpa Akma dayanımı: 272-860 Mpa Uzama 50 mm'de: 14-30%	✓ Isıl işlem ile sertleştiril ebilir	✓ Makul maliyet ✓ Yüksek sertlik ve dayanım	✓ Sınırlı korozyon direnci ✓ Sınırlı kaynak kabiliyeti
Dubleks	18-27 %Cr 4-7 %Ni 2-4 %Mu, Cu, N	Çekme dayanımı: 680-900 Mpa Akma dayanımı: 410-900 Mpa Uzama: 10-48%	✓ Isıl işlem uygulana maz	✓ Östenitik çeliklerden daha iyi mekanik özellikler ✓ Korozyon direnci	✓ σ fazı oluşumundan dolayı 475 °C sıcaklığa duyarlıdır
Çökeltme Sertleşmeli	12-28 %Cr 4-7 %Ni 1-5 %Mo, Al, Ti, Co	Çekme dayanımı: 895-1100 Mpa Akma dayanımı: 276-1100 Mpa Uzama: 10-35%	✓ Isıl işlem ile sertleştiril ebilir	✓ Çok yüksek dayanım ve korozyon direnci	✓ Karmaşık ısıl işlem gerektirirler

2.5.1. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler Fe-Cr-C grubundaki paslanmaz çeliklerdendir. Fırından östenit olarak çıkarılan çelik, havada kendiliğinden soğutulduğunda yapı martenzit olmaktadır, bu sebeple bu çeliklere havada sertleşen çelikler de denilmektedir. Çeliğin türüne göre 950 °C- 1050 °C aralığında östenitleşen %0,1'den fazla karbon bulunduran çeliklere bu sıcaklıklarda su verme işlemi uygulandığında iç yapı martenzit olmaktadır (URL-2).

Bu alaşımların içeriğindeki element oranları genelde; $C \leq \%1,2$, $\%11,5 \leq Cr \leq \%17$, $Mo \leq \%1,8$ – $Ni \leq \%6$ - $V \leq \%0,2$ aralığındadır. Çeliğin türüne göre ayrıntılı kompozisyon oranlarına ise Tablo 2.2’den ulaşılabilir (Woollin ve diğ, 1995).

Tablo 2.2. Standart martenzitik çeliklerin bileşimi (Lippold ve diğ, 2005)

Tür	UNS No.	Kompozisyon (ağırlıkça%) ^a					
		C	Cr	Mn	Si	Ni	Diğer Elementler
403	S40300	0,15	11,5-13,0	1,00	0,50	-	-
410	S41000	0,15	11,5-13,5	1,00	1,00	-	-
410NiMo	S41500	0,05	11,4-14,0	0,50-1,00	0,60	3,5-5,5	0,5-1,00 Mo
414	S41400	0,15	11,5-13,5	1,00	1,00	1,25-2,50	-
416	S41600	0,15	12,0-14,0	1,25	1,00	-	0,15 S min., 0,6 Mo
420	S42000	0,15 min	12,0-14,0	1,00	1,00	-	-
422	S42200	0,20-0,25	11,5-13,5	1,00	0,75	0,5-1,0	0,75-1,25Mo, 0,75-1,25W, 0,15-0,3V
431	S43100	0,20	15,0-17,0	1,00	1,00	1,25-2,50	-
440A	S44002	0,60-0,75	16,0-18,0	1,00	1,00	-	0,75 Mo
440B	S44003	0,75-0,95	16,0-18,0	1,00	1,00	-	0,75 Mo
440C	S44004	0,95-1,20	16,0-18,0	1,00	1,00	-	0,75 Mo
CA-15	-	0,15	11,5-14,0	1,00	1,5	1,00	0,5 Mo
CA-6NM	-	0,06	11,5-14,0	1,00	1,00	3,5-4,5	0,40-1,0 Mo

Bu çelikler atmosferik ortam şartlarında yüksek mukavemet ve korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Düşük krom ve düşük alaşım elementi içeriği sebebiyle diğer çeliklere nazaran daha düşük maliyetli çeliklerdir. Çeliğin türüne göre uygulama alanları Tablo 2.3’te gösterildiği gibidir (Woollin ve diğ, 1995).

Tablo 2.3. Martenzitik paslanmaz çeliklerin uygulama alanları (Kaya, 2014)

Çelik Türü (AISI)	Tipik Uygulamalar
403	Buhar türbin bıçakları, jet motor halkaları, yüksek gerilimli parçaların imalatında kullanılırlar.
410	Makine parçaları, pompa şaftları, jet motor parçaları, maden makineleri, yivli vafller, vida valf parçalarının imalatında kullanılırlar.
414	410 tipinin yüksek karbon modifikasyonu, çatal, kaşık, cerrahi aletler, valfler, aşınma dirençli parçalar, cam kalıpları, el takımları sebze doğrayıcıların imalatında kullanılırlar.

Tablo 2.3. (Devam) Martenzitik paslanmaz çeliklerin uygulama alanları (Kaya, 2014)

420	Yüksek sertleştirilebilirlikli çelikler, yaylar, temperlenmiş çiziciler, makine parçaları, makaslar, iğneler, sızdırmaz valflerin imalatında kullanılırlar.
422	650 °C kadar hizmet sıcaklıklarında yüksek dayanım ve tokluk özelliğine sahiptir. Buhar türbin bıçaklarının imalatında kullanılırlar.
431	Yüksek mekanik özelliklerin gerekli olduğu yerlerde kullanılan, sertleşebilen özel amaçlı çeliklerdir. Uçak ekipmanları, dövücü kollar, kağıt makineleri, civataların imalatında kullanılırlar.
440A	İyi korozyon direnci ile birlikte tip 420'den daha yüksek sertleştirilebilirliğe sahiptir. Çatal, kaşık, cerrahi takımların imalatında kullanılırlar.
440B	Çatal, kaşıklar, valf parçaları imalatında kullanılırlar.
440C	Sertleştirilebilir paslanmaz çeliklerin en yüksek sertliği oluşturur. Bilyeler, yataklar, yarış bisikletleri, jikleler, petrol kuyuları için yataklar, valf parçalarının imalatında kullanılırlar.

2.5.1.1. Mikroyapıları

Bu çeliklerin kaynağında malzemede oluşan ısınma ve soğuma sonucu gerçekleşen faz dönüşümleri için Fe-Cr-C diyagramları kullanılmaktadır. Normal durumda kafes yapısı kübik hacim merkezli (KHM) bir yapıdadır ancak çelik sertleştiğinde hacim merkezli tetragonal kristal kafes yapısına dönüşmektedir (Çelik, 2006).

Yapısında %0,1 ve %0,25 aralığında karbon içeren martenzitik çelikler ferrit olarak katılaşmaktadır ancak katılaşma sonucu malzemede bir miktar östenitte bulunmaktadır. 800°C'nin altındaki sıcaklıklarda denge fazı ferrit ve $Cr_{23}C_6$ olmaktadır. Daha yüksek karbon içeren alaşımları ise daha kırılğan ve daha sert olan martenzit fazı içermektedir (Çelik, 2006).

2.5.1.2. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Bu alaşımlar daha geniş aralıkta sertlik derecelerinde kullanılabilme için ısı işleme tabi tutulabilir (Woollin ve diğ, 1995). Akma dayanımları tavlanmış durumda 275 MPa'dan, su verilmiş ve temperlenmiş durumda 1900 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Martenzitik çeliklerin krom içeriğinin diğer kalitedeki çeliklerden daha az olması (%12 ile %14 arası), karbon içeriğinin ise daha fazla olması sebebiyle korozyon direnci diğer kalitedeki çelikler kadar iyi değildir. Karbon içeriği az olan türleri kolay şekillendirilebilir (Tüysüz, 1999).

Martenzitik çelikler genellikle mekanik özellikler ve korozyon direncindeki bozulma nedeniyle 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmaz. Manyetik özellik gösterirler (Woollin ve diğ, 1995).

2.5.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler Fe-Cr-C içeren alaşımlardır, yapısındaki baskın fazın ferrit olmasından dolayı bu şekilde adlandırılırlar. Korozyona karşı çok iyi direnç gösterirler ancak üretimi zor ve pahalıdır. Bu alaşımların içeriğindeki element oranları genelde: $C \leq \%0,08$, $\%10,5 \leq Cr \leq \%30$, $Mo \leq \%4,5$ aralığındadır. Çalışma sıcaklığı kırılma faz oluşumu nedeniyle çoğunlukla 400°C'nin altındaki sıcaklıklar ile sınırlıdır (Woollin ve diğ, 1995).

Mekanik özelliklerden ziyade daha çok korozyon direncinin birincil öncelik olduğu durumlarda kullanılırlar. İçeriğinde $\%10,5-12,5$ arası krom bulunduran düşük kromlu çelikler korozyon direncinin önemli olduğu egzoz sistemlerinde kullanılır. Süper ferritik alaşımlar ise kimyasal işlemlerde ve kağıt endüstrisinde kullanılır. Çeliğin türüne göre ayrıntılı kullanım alanları Tablo 2.4'te gösterilmiştir (Kaya, 2014).

Tablo 2.4. Ferritik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları (Kaya, 2014)

Çelik Türü (AISI)	Tipik Uygulamalar
405	Havada sertleşen 410 ve ya 403 gibi tiplerin istenmediği montajlar için sertleştirilemeyen sınıftır. Tavlama ve sertleştirme kutuları, oksidasyona dirençli bölmeler imalatında kullanılırlar.
409	Otomobil egzoz sistemleri; dönüştürücü ve kondansatör kılıfları, kuru gübre yayıcıları, tarımsal püskürtme için tankların imalatında kullanılırlar.
430	Genel olarak sertleşemeyen tiptir. Dekoratif süsleme, nitrik asit tankları, tavlama kutuları, yanma çemberleri, bulaşık makineleri, ısıtıcılar, egzost kolektörleri, motor kapakları, ısı toplayıcılar, mutfak ekipmanları imalatında kullanılırlar.
434	Kış yol şartlarının ve toz yayma bileşiklerinin varlığında atmosferik korozyona direnç için tasarlanmış 430 tipinin modifikasyonu ile elde edilirler, otomobil süsleme ve bağlayıcıların imalatında kullanılırlar.
436	430 ve 434 tiplerine benzerler. Alçak çatı omurgalarının gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Otomobil süslemeleri gibi genel korozyon ve ısı direnç uygulamaları için tercih edilirler.
442	Yüksek kromlu çelik, prensip olarak oksidasyona uğramadan yüksek sıcaklık direncine zorlu parçalar, fırın parçaları; memeler, yanma çemberleri imalatında kullanılırlar.

Tablo 2.4. (Devam) Ferritik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları (Kaya, 2014)

446	Yüksek sıcaklıklarda oksitlenme ve korozyona dirençli hizmetlerde, sıkça kükürt taşıyan atmosferlerde kullanılır. Tavlama kutuları yanma çemberleri, cam kalıpları, ısıtıcılar, ısı toplayıcılar, karıştırma çubukları, valflerin imalatında kullanılır.
-----	--

2.5.2.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Bu çelikler östenitik ve martenzitik paslanmaz çeliklere göre çok daha iyi korozyon direncine sahiptir. Gerilme korozyonu çatlamasına, çukur korozyonuna ve çatlak korozyonuna karşı dirençli çeliklerdir. Isıl İşleme sertleştirilemezler, soğuk işlemler uygulanır. Manyetik Özellik gösterirler. Yüksek sıcaklıklara östenitik paslanmaz çelikler kadar dayanıklılıkları yoktur (Kaya, 2014; Tüysüz, 1999).

Bu çeliklerin kaynaklı parçalarının mekanik özellikleri alaşım içerisindeki krom oranına bağlıdır. Düşük kromlu alaşımlarda martenzit eksikliğinde en önemli mikroyapı etkisi ferrit tane büyümesidir. Ferrit tane büyümesinin ise tokluk ve süneklığe olumsuz etkileri bulunmaktadır (Lippold ve diğ, 2005).

2.5.2.2. Mikroyapıları ve Kaynaklanabilirliği

Ferritik paslanmaz çelikler hacim merkezli kübik kristal bir yapıya sahiplerdir (Tüysüz, 1999). Bu çeliklerin mikroyapıları ağırlıklı olarak ferritik olsa da bazı koşullarda martenzitik faz oluşumu ile karbür ve nitrür çökeltileri de gözlenmektedir. Alaşımdaki karbon oranının azlığı ve krom oranının yüksek olması sebebiyle soğutulması esnasında östenit oluşumu ya hiç gözlenmez ya da çok az gözlenir. Bu yüzden östenitten martenzite dönüşüm yoluyla sertleştirme yapılamaz. Bu çeliklerin kaynaklanmasındaki en büyük problem kaynaktan sonra yeterli tokluk ve sünekliliğin sağlanamamasıdır (Kaya, 2014).

2.5.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler diğer paslanmaz çeliklere kıyasla en çok kullanılan paslanmaz çelik grubudur. Bu çeliklerde östenit yapıcı element olan Nikelin alaşımdaki oranının %8' den fazla olması sebebiyle çeliğin baskın fazı östenittir. Alaşımdaki diğer elementlerin oranı ise genellikle %16-25 krom, %8-20 Nikel, %1-2 Mangan, %0,5-3 Silikon, %0,02-0,08 Karbon (L kalitede olanların oranı %0,04'ten azdır), %0-2 Molibden, %0-0,15 Nitrojen, %0-0,2 Titanyum ve Niobyum aralığındadır (Kaya, 2014).

Ağırlıklı olarak atmosferik şartlarda ve yüksek sıcaklıklarda yüksek korozyon direnci gereken durumlarda kullanılırlar (Kaya, 2014). Çeliğin türüne göre ayrıntılı kullanım alanları Tablo 2.5'te gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları (Kaya, 2014)

Çelik Türü (AISI)	Tipik Uygulamalar
301	Yüksek pekleşme hızı, yüksek dayanım, yüksek sünekliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Tren yolu arabaları, treyler gövdeleri, uçak parçaları, sıkma bilezikleri, otomobil tekerlek kapakları, süslemeler de kullanılırlar.
304	Kimyasal ve yiyecek işleme ekipmanları, mayalama ekipmanları, soğuk kaplar, oluklar, yağmur olukları, sac kaplama imalatında kullanılırlar.
310	Isı değiştiriciler, fırın parçaları, yanma çemberleri, kaynak dolgu metalleri, gaz türbin bıçakları, yakma makinesi ısı toplayıcıları imalatında kullanılırlar.
316	Yüksek korozyon direnci ve yüksek sürünme dayanımına sahiptir. Fotoğraf ekipmanları, kanyak fiçileri, gübreleme parçaları, keççap pişirme tencereleri, maya tüpleri, imalatında kullanılırlar.
316 L	Tip 316'nın daha fazla karbon modifikasyonu taneler arası karbür çökmesinin önlenmesi zorunlu olunan kaynaklı yapılarda kullanılır. Yoğun kaynak gerektiren yerlerde kullanılırlar.
321	Çok şiddetli korozyon şartlarına maruz kaynaklı bağlantı ve 427 °C'den 871 °C'de hizmet için kararlaştırılmış, uçak egzost manifoldları, kaynatma kazanlarında, ısıl işlem ekipmanları, kabin ısıtıcıları, ateş duvarları imalatında kullanılırlar.
347	Yüksek sürünme dayanımı ile birlikte tip 321'e benzer özellik gösterirler. Uçak egzost bacaları, kimyasal maddeler için kaynaklı tanker arabaları, jet motor parçaları imalatında kullanılırlar.

Bu çelikler 760°C'ye kadarki sıcaklıklarda ve hatta daha fazlasında işlem görebilirler ancak yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve korozyon direnci özelliklerinde bozulmalar görülebilir. Düşük sıcaklıkların çeliğin özelliklerine olumlu etkisinden dolayı kriyojenik uygulamalarda da kullanılabilirler. Alaşımın içerdiği elementler sebebiyle düşük krom içerikli ferritik çeliklere ve martenzitik çeliklere göre daha pahalıdır. Ancak şekillendirilebilme ve kaynaklanabilme özelliğinden dolayı pahalı olmasına rağmen çokça tercih edilirler (Lippold ve diğ, 2005).

2.5.3.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Östenitik paslanmaz çeliklerin korozyon direnci ve çekme dayanımı martenzitik ve ferritik çeliklere göre çok daha iyidir (Tüysüz, 1999). Korozyon direnci çoğu çevre şartlarına uyum sağlayabilecek düzeydedir. Oda sıcaklığında minimum akma dayanımı

yaklaşık 210 MPa'dır. Östenitik paslanmaz çeliklerin tavlınmış durumda manyetik özelliği yoktur. Düşük termal iletkenliğe sahiplerdir (Woollin ve diğ, 1995). Bu çeliklere normalleştirme ve sertleştirme gibi ısıl işlemler uygulanamaz. Soğuk şekillendirme ile şekillendirilirler (Tüysüz, 1999).

2.5.3.2. Mikroyapıları

Bu çeliklerin kafes yapısı düşük sıcaklıklarda dahi yüzey merkezli kübik kristal yapıdadır (Tüysüz, 1999). Mikroyapıları ağırlıklı olarak östenittir ancak çeliğin kalitesine göre içerisindeki ferrit yapıcı elementler sebebiyle yapı östenit ve ferrit karışımı da olabilmektedir. Faz dönüşümleri için %70 demir içeren Fe-Cr-Ni diyagramları kullanılabilir. Krom güçlü bir karbür yapıcı olduğu için östenitik paslanmaz çeliklerin neredeyse tamamında karbür oluşumu gözlenir. Bu oluşum 700 °C - 900 °C aralığındaki sıcaklıklarda tane sınırlarında karbür çökmesi şeklinde olur. Mo, Nb ve Ti elementlerinin varlığı da yapıda karbür ve Tablo 2.6'da görülen diğer çökeltilerin oluşumunu destekler. Östenitik çeliklerde oluşan karbür çökeltileri korozyon direncini olumsuz etkilemektedir. Diğer çökeltilerin ise yüksek sıcaklıklarda yapıda uzun süre bulunması çeliğin kırılabilirliğini arttırmaktadır. Bu sebeple yapıda çökelti oluşumu kontrol altına alınmalıdır (Lippold ve diğ, 2005).

Tablo 2.6. Östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan çökeltiler (Lippold ve diğ, 2005)

Çökelti	Kristal yapısı	Latis Parametresi (nm)	Stokiyometri
MC	FCC	a= 0,424-0,447	TiC, NbC
M ₆ C	Kübik kristal yapısı	a= 1,062-1,128	(FeCr) ₃ Mo ₃ C, Fe ₃ Nb ₃ C, Mo ₅ SiC
M ₂₃ C ₆	FCC	a= 1,057-1,068	(Cr,Fe) ₂₃ C ₆ , (Cr,Fe,Mo) ₂₃ C ₆
NbN	FCC	a= 0,440	NbN
Z fazı	Tetragonal	a= 0,307, c= 0,7391	CrNbN
Sigma fazı	Tetragonal	a= 0,880, c= 0,454	Fe-Ni-Cr-Mo
Laves fazı (η)	Heksagonal	a= 0,473, c= 0,772	Fe ₂ Mo, Fe ₂ Nb
Chi fazı (χ)	BCC	a= 0,8807-0,8878	Fe ₃₆ Cr ₁₂ Mo ₁₀
G fazı	FCC	a= 1,12	Ni ₁₆ Nb ₆ Si ₇ , Ni ₁₆ Ti ₆ Si ₇
R	Heksagonal Rhombohedral	a= 0,0903, c= 1,9342 a= 0,9011 α= 74°27,5'	Mo-Co-Cr Mo-Co-Cr
ε Nitrit (Cr ₂ N)	Heksagonal	a= 0,480, c= 0,447	Cr ₂ N

Tablo 2.6. (Devam) Östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan çökeltiler (Lippold ve diğ, 2005)

Ni ₃ Ti	Heksagonal	a= 0,9654, c= 1,5683	Ni ₃ Ti
Ni ₃ (Al,Ti)	FCC	a= 0,681	Ni ₃ Al

2.5.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler, oda sıcaklığındaki mikroyapısının yarısı östenit yarısı ferrit fazından oluştuğu için Dupleks Ferritik-Östenitik Çelikler olarak adlandırılır. Alaşım içerisindeki elementlerin oranı $C \leq \% 0,03$, $\%21 \leq Cr \leq \%26$, $\%3,5 \leq Ni \leq \%8$, $Mo \leq \%4,5$, $N \leq \%0,35$ aralığındadır (Woollin, 1995). Yapıda iki ayrı faz oluşumu çeliğin 1000-1050 °C sıcaklıkta tavlanması ve sonrasında hızlıca soğutulması ile elde edilir (Türkyılmazoğlu, 2006).

Dupleks Ferritik-Östenitik paslanmaz çelikler, östenitik çeliklerden daha fazla ferrit fazı içerirler, daha fazla ferromanyetik özellik gösterirler, daha yüksek termal iletkenliğe ve daha düşük ısıl genleşmeye sahiptirler. Bu sebeple hem yüksek korozyon direnci gerektiren uygulamalarda hem de yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler. Korozyon çatlaması ve çukurlaşma korozyonu endişesi olan durumlarda östenitik paslanmaz çeliklerin yerine kullanılırlar. Petrol ve doğal gaz borularının imalatında sıklıkla kullanılırlar. Dupleks paslanmaz çelikler için 280 °C'yi aşan işlem sıcaklığı uygulanması tavsiye edilmez, düşük sıcaklıklarda da süneklik ile kırılabilirlik geçişine maruz kaldığı için kriyojenik uygulamalara elverişli değildir. Düşük sıcaklıklarda çökme reaksiyonları oluştuğu için kaynak sonrası ısıl işlem gerektiren durumlarda kullanılmaları genelde tavsiye edilmez. Çalışma sıcaklıkları genellikle -40°C ile 280 °C arasındadır. Dupleks alaşımların ısıl genleşmesi az alaşımlı çeliklere yakın olduğu için uygulama alanları benzerdir. Dupleks paslanmaz çelikler yüksek alaşım içeriği ve termo-mekanik işlemlerinin zorluğu sebebiyle östenitik paslanmaz çeliklere nazaran daha pahalıdır (Lippold ve diğ, 2005).

2.5.4.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Dupleks paslanmaz çelikler yüksek krom ve azot içeriği sebebiyle çekme mukavemeti ve akma dayanımı yüksek alaşımlardır. Yapısında hem ferrit hem de östenit fazı bulunmasına rağmen iki faz durumundan da daha yüksek mukavemet ve süneklik özelliği

sergilerler. Yapıdaki östenit fazı malzemeye korozyon direnci ve tokluk kazandırmakta iken, ferrit fazı da malzemeye dayanım sağlar (Kaya, 2014).

Akma dayanımları 425 MPa'ın üzerindedir ki bu değer östenitik çeliklerin yaklaşık iki katı kadardır. Çekme dayanımı ise östenitik çeliklerle neredeyse aynıdır. Ayrıca yapıda bulunan östenit ve ferrit taneleri birbirlerinin büyümesine engel olmaktadır, bunun sonucunda yapının küçük taneli kalması da mukavemeti arttırıcı bir diğer etmendir (Kaya, 2014).

Isıl işleme sertleştirilemezler ve manyetik özellik gösterirler (Woollin, 1995).

2.5.4.2. Mikroyapıları

Dubleks paslanmaz çelikler Fe-Cr-Ni-N grubuna ait alaşımlardır. Mikro yapısında hem ferrit hem de östenit fazları bulunmaktadır. Yapısının yarısını ferrit fazı, yarısını da östenit fazı oluşturmasına rağmen alaşım içeriğindeki ferrit yapıcı elementlerin fazla olması sebebiyle neredeyse tamamen ferrit olarak katılaşırlar. Bu çeliklerde malzemeye uygulanacak tavlama ve sıcak işlemlerde sıcaklığa ve soğutma hızına bağlı olarak mikro yapının istenilen oranda östenit ya da ferrit olması sağlanır. Bu işlemler genellikle 1000-1200 °C aralığında sıcak şekillendirme işlemi sonrasında çözme tavlaması ve oda sıcaklığında su verme işlemi şeklindedir. Dupleks paslanmaz çeliklerde alaşım içeriğinin karmaşık olması sebebiyle 1000°C altındaki sıcaklıklarda yapıda çökeltme reaksiyonları oluşabilir, bu çökelti alaşımı gevrekletirdiği için çalışma sıcaklığı kontrollü olmalıdır. Çalışma sıcaklığı azaldıkça yapının daha fazla östenit içermesi olasıdır (Aran, 2003).

2.5.5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Çökeltme sertleşmeli çelikler mukavemetlerinin büyük bir kısmını yapıdaki çökeltme reaksiyonları sayesinde edindiği için bu isimle adlandırılırlar. Alaşımdaki çökeltme reaksiyonlarından sorumlu elementler Ti, Al, Cu ve Berilyum elementleridir. Ancak Berilyum'un insan sağlığına olumsuz etkileri olması sebebiyle günümüzde bu çeliklerde alaşım elementi olarak tercih edilmemektedirler (Türkyılmazoğlu, 2006).

Çökeltme sertleşmeli çelikler alaşımı oluşturan baskın mikro yapılarına göre sınıflandırıldığında martenzitik, östenitik ya da yarı östenitik paslanmaz çelikler olarak gruplandırılabilirler. Bu çelikler genellikle savunma ve uzay sanayisinde kullanılmaktadır. Mikroyapılarına göre kullanım alanları ise martenzitik tipli olanlar için

dişliler, valfler, kamalar, miller; yarı östenitik olanlar için basınçlı kaplar, cerrahi aletler, uçak malzemeleri; olarak gösterilebilir (Türkyılmazoğlu, 2006).

Bu çelikler martenzitik ve sertleştirilmiş çelikler olduğu için üretimleri diğer çeliklere göre daha zordur ve şekillendirilmeleri için ısıl işlem gerekir. Bu sebeple diğer çeliklere nazaran daha pahalıdırlar, yüksek mukavemetli paslanmaz çeliklerin korozyon dirençlerinin yeterli gelmediği durumlarda kullanılırlar (Türkyılmazoğlu, 2006).

2.5.5.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Çökeltme sertleşmeli çelikler 1520 MPa'ı aşan yüksek çekme dayanımlarına sahiptir. Doğru ısıl işlemlerle bu yüksek mukavemet özelliğine ek olarak iyi bir süneklik ve tokluk özellikleri de bulunmaktadır, fakat bu ısıl işlemler korozyon direncini etkilediği için sıcaklığa dikkat edilmelidir. 650 °C'yi aşan sıcaklıklarda dahil kullanılabilirler ancak çalışma sıcaklığı olarak yaklaşık 315 °C önerilmektedir (Türkyılmazoğlu, 2006; Lippold ve diğ, 2005).

2.5.5.2. Mikroyapıları

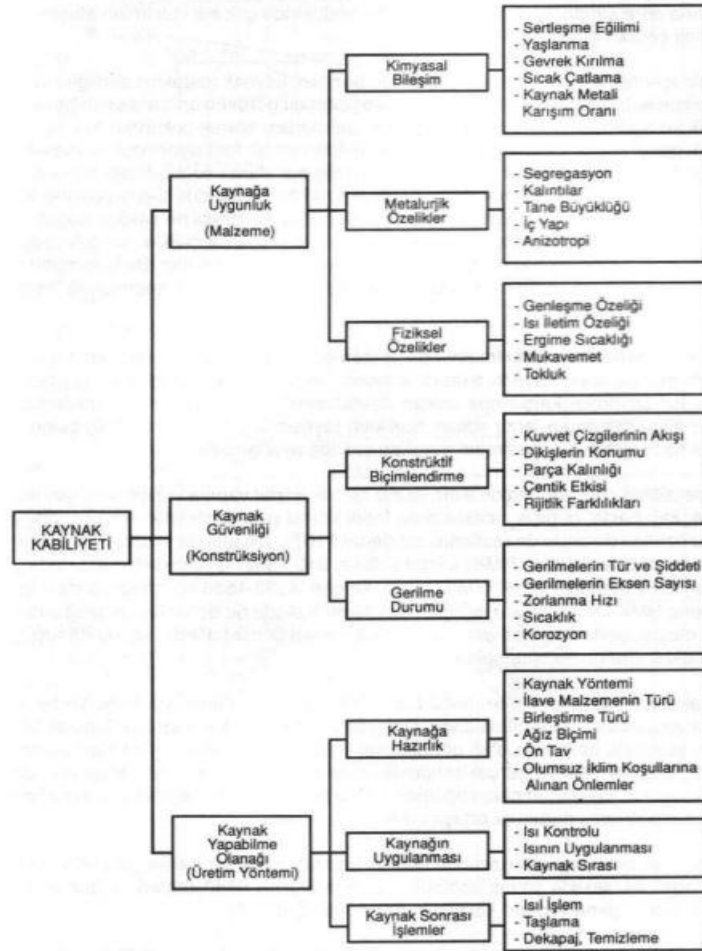
Bu çeliklerde elde edilen sertlik genellikle yapı içerisinde martenzit oluşumundan kaynaklanır. Östenitik çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler içeriğinde %25'ten fazla nikel içermesi sebebiyle %100 östenit olarak katılaşır. Bazı martenzitik çökeltme sertleşmeli çeliklerde ise katılaşma tamamen ferrit olmaktadır, soğuma esnasında bu ferrit östenite dönüşür. Yapı içerisindeki ferrit dağılımı düşük mukavemet ve süneklik sağlayacağı için östenit fazında homojenleştirme işlemi yapılarak ferrit oluşumu kontrol altına alınır (Lippold ve diğ, 2005).

2.6. Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti

Kaynak olayı neredeyse her zaman kaynak metali ve ana metalin ısı tesiri altında kalmış bölgesinde önemli bir mikro yapı değişikliğine yol açar. Bu durum istenen faz dengesinde değişikliğe, intermetalik bileşen oluşumlarına, tane büyümesine, alaşım içerisinde safsızlık oluşmasına yol açabilir (Lippold ve diğ, 2005).

Çeliklerin kaynaklı birleşimi sonucu istenen verimin elde edilebilmesi için kaynak kabiliyetinin bilinmesi çok önemlidir. Kaynak kabiliyeti burada kaynak işlemi sonrasında malzemenin ısı tesiri altında kalmış bölgesinin (HAZ) ve kaynak metali bölgesinin

özelliklerinin çok fazla değişmemesini, ana metale yakın özellikler göstermesini ifade etmektedir. İyi bir kaynak kabiliyeti, kaynak sonrasında kaynaklı parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerinin değiştirilmesi için ek bir ısıl işleme ihtiyaç duyulmaması demektir (Aydın, 2002). Çeliklerin kaynak kabiliyeti genel olarak çeliğin türüne ve alaşım içeriğine göre yorumlansa da kaynak kabiliyetini gösteren birçok etmen bulunmaktadır (Topal 2019). Kaynak kabiliyetini etkileyen bu etmenler Şekil 2.5'te gösterildiği gibidir.



Şekil 2.5. Kaynak kabiliyetini etkileyen etmenler (Aydın, 2002)

Paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetini etkileyen etmenlerden biri de kaynak yöntemidir. Kaynak yöntemi seçerken paslanmaz çeliğin cinsi, kaynağı yapılacak malzemenin kalınlığı, kaynak yapılacak ortam, kaynağın uygulanabilirliği gibi durumlar göz önünde bulundurulur. Paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan kaynak yöntemleri şu şekilde sıralanabilir: (Topal, 2019)

- Lazer ışın kaynağı,
- Erimeyen elektrot ile gaz altı kaynağı (TIG)
- Eriyen elektrot ile gaz altı kaynağı (MIG)
- Örtülü elektrot ile ark kaynağı
- Plazma ark kaynağı
- Gaz eritme kaynağı
- Tozaltı kaynağı
- Elektron ışın kaynağı
- Direnç nokta veya dikiş kaynağı
- Sürtünme kaynağı
- Difüzyon kaynağı.

Paslanmaz çelikler genel olarak kaynaklanabilir alaşımlardır (Topal, 2019). Alaşımsız çelikler için % 0,22'den az C içeriği çeliğin kaynağa uygun olduğunu gösterir. Alaşımli çeliklerde kaynağa uygunluk ise karbon eşdeğerliğine göre ya da krom ve nikel eşdeğerliği vasıtasıyla Schaeffler, De Long, Espy ve WRC diyagramları üzerinden kontrol edilir. (Ertem, 2103; Yüksel ve diğ, 1999).

2.6.1. Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Kullanılan Diyagramlar

Paslanmaz çeliklerde kaynak sonrası oluşacak mikro yapının tahmini kaynaklı parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerinin kontrolü için çok önemlidir. Ferritik faz manyetik özellik göstermesine rağmen, manyetik yöntemlerle alaşımdaki ferrit oranının tespiti zordur (Yüksel ve diğ, 1999). Bu sebeple yapı içerisindeki ferrit ölçümü diyagramlar vasıtasıyla yapılır. Bu diyagramlarla kaynağı yapılacak metallerin ve dolgu malzemesinin içerisindeki ferrit ve östenit dengeleyici elementlerin oranına göre faz durumu ve ferrit oranı belirlenir. En sık kullanılan türleri Schaeffler ve De Long diyagramları olmakla birlikte Espy ve WRC diyagramları da bu amaçla kullanılmaktadır (Aydın, 2002).

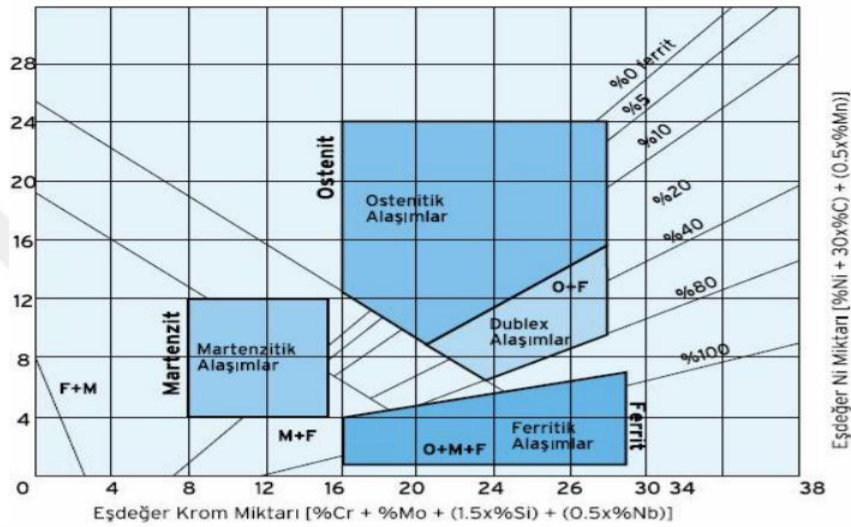
2.6.1.1. Schaeffler Diyagramı

Schaeffler Diyagramı, kaynaklarda istenmeyen bir durum olarak görülen delta ferrit fazının kontrolü amacıyla hazırlanmış bir diyagramdır (Aydın, 2002). Bu diyagram ile kaynak dikişinde sıcak çatlağı, sertleşme çatlağı ya da sigma fazı oluşma ihtimali de incelenir (URL-5). Diyagramın yatay ekseninde ferrit dengeleyici elementlerin oranı ile

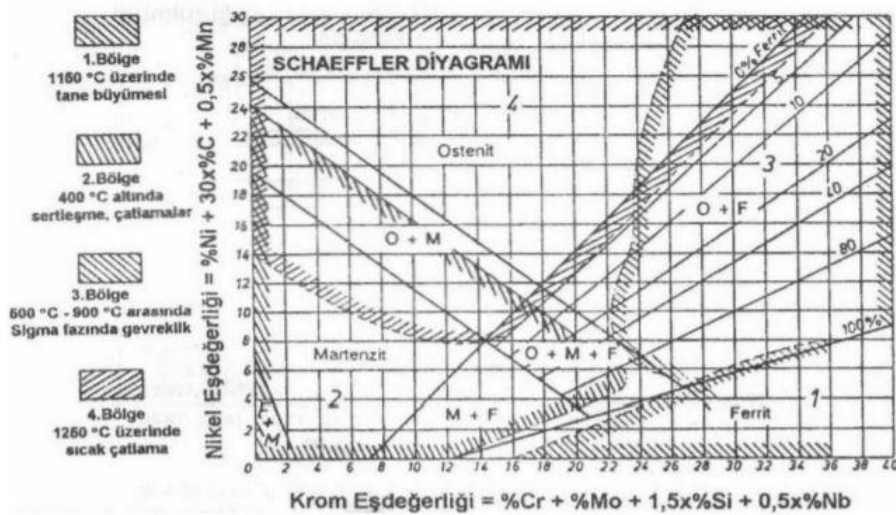
hesaplanan krom eşdeğeri, dikey ekseninde ise östenit dengeleyici elementlerin oranı ile hesaplanan Nikel eşdeğeri bulunmaktadır. Bu eşdeğerlikler alaşımda yer alan elementlerin oranına göre aşağıda belirtilen Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) ile hesaplanmaktadır (Aydın, 2002).

$$Ni_{eş} = \%Ni + 30\%C + \%0.5Mn \quad (2.1)$$

$$Cr_{eş} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad (2.2)$$



(a)



(b)

Şekil 2.6. Schaeffler diyagramı (Yorulmazel, 2007) (Aydın, 2002)

Kaynaklı birleştirme sonrası oluşacak kaynak metalinin faz durumunun bilinmesi için kaynak metali içeriğindeki malzemelerin karışım oranı bilinmelidir. Kaynak metalindeki malzemelerin oranı kullanılacak kaynak yöntemine, birleştirilecek parçaların malzemesine ve dolgu malzemesi kullanılması durumuna göre değişmektedir. Kaynak metalinin istenilen mikro yapıda olması için öncelikle kaynağı yapılacak metallerin ve dolgu malzemesinin $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş}$ 'leri bulunmalıdır. Hesaplanan $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş}$ 'lerine göre diyagram üzerinde dolgu malzemesi ve ana metalin konumları işaretlenir. Kaynak metalinin faz durumu ve ferrit numarası işaretlenen iki konum arasına çekilen bir doğru üzerinde, kullanılan malzemelerin karışım oranına göre tespit edilir (Aydın, 2002).

Schaeffler diyagramı malzemedeki oluşabilecek kaynak hatalarına göre kendi içerisinde bölgelere ayrılmıştır. Cr ve Ni eşdeğerlikleri sonucu Schaeffler diyagramı üzerinde tespit edilen nokta hangi bölgeye denk gelirse kaynaklı parçada o bölgedeki kaynak hatalarının oluşması ihtimali bulunmaktadır (Yorulmazel, 2007; Aydın, 2002). Şekil 2.6'da gösterilen Schaeffler diyagramındaki bölgeler şu şekilde izah edilebilir;

- Tamamen östenitten oluşan bölgede malzeme sıcaklık ve korozyona duyarlı olup, 1250 °C üzerinde sıcak çatlama riski bulunmaktadır (Yorulmazel, 2007; Aydın, 2002).
- %5-10 arası ferrit bulunan ferrit-östenit karışımı bölgede malzemenin korozyon dayanımı iyi olup, çatlama karşı hassasiyet yoktur. Ferrit oranının %15-30 oranına çıkmasıyla korozyon dayanımı azalır ve artan sıcaklık ile çatlama ihtimali artar. Östenit-ferrit karışımı olan bölgede özellikle yüksek krom içeriklerinde 900-500°C arasında sigma fazı gevrekliği görülür (Yorulmazel, 2007; Aydın, 2002).
- Tamamen ferritten oluşan bölgede 1150 °C üzerinde tane irileşmesi ihtimali bulunmaktadır. Bunun sonucunda kaynaklı parçada gevrekleşme görülür ve kaynak dikişinin çentik darbe mukavemeti düşer (Yorulmazel, 2007; Aydın, 2002).
- Östenit-martenzit karışımından oluşan bölgede ve östenit-martenzit-ferrit karışımından oluşan bölgede malzemedeki çatlama riski vardır, ön tavlama önerilmektedir. Martenzit-ferrit karışımından oluşan bölgede de aynı riskler bulunmakta olup, bu bölgede malzeme korozyona karşı dayanıksızdır (Yorulmazel, 2007; Aydın, 2002).
- Martenzitik bölgede 400 °C'nin altında sertleşmeler ve çatlaklar görülebilir (Yorulmazel, 2007; Aydın, 2002).

Bu diyagram ile bütün paslanmaz çeliklerin faz durumları kontrol edilememektedir. % 0,1'den fazla N içeriğinde ve mangan oranının yüksek olması durumunda kullanılamamaktadır (Yorulmazel, 2007; Aydın, 2002).

2.6.1.2. De Long Diyagramı

Kaynaklı parçadaki ferrit oranını ölçmeye yarayan bir diğer diyagram olan De Long diyagramı Schaeffler diyagramını geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar sonrasında 1959 yılında ortaya çıkmıştır (Aydın, 2002; Lippold, 2005). De Long diyagramı Schaeffler diyagramının bir kısmını kapsamakta olup, 300 kalitesindeki östenitik paslanmaz çelik grubuna hitaben hazırlanmıştır (Yüksel ve diğ, 1999). 316, 316 L ve 309 gibi yüksek alaşımlı çelik türlerinde ölçülen hesap farklılıklarından dolayı bu diyagramda izoferrit çizgilerinin eğitimi değiştirilmiştir. Bu diyagramda Schaeffler diyagramından farklı olarak azotun östenitleştirici etkisi de göz önünde bulundurulmuş ve delta ferrit oluşumunun tespitindeki hata oranı düşürülmüştür. Bu diyagramın Schaeffler diyagramından farklı bir diğer özelliği de diyagramda ferrit oranı yerine, ferrit numarası adı verilen yeni bir kavram kullanılmıştır (Yüksel ve diğ, 1999).

2.6.2. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları

Martenzitik paslanmaz çelikler kritik soğuma hızı çok düşük olan, çok yavaş soğumalarda ve kalın parçalarda dahi martenzit oluşumu gözlenen çeliklerdendir (URL-3). Kaynak sonrası soğutma sırasında temperlenmemiş martenzit oluşumu sebebiyle, en az kaynaklanabilir paslanmaz çelikler olarak bilinirler ve hidrojen kaynaklı çatlama karşı hassastırlar. Bu çeliklere kaynak sebepli kalıntı gerilmelerin azaltılması için ön ısıtma ve kaynak sonrası ısıtma işlemleri önerilmektedir. 200°C-400 °C arasında ön tavlama işlemi yapıldıktan sonra az karbonlu olan martenzitik çeliklere kaynak işlemi yapılabilir, yüksek karbonlu olan martenzitik çeliklere ise kaynak işlemi yapılmamalıdır (Tüysüz, 1999; URL-3).

Katılma ve Sıvılaştırma Çatlakları: %11-%14 aralığında krom, %0,1 -%0,25 aralığında karbon içeren martenzitik çeliklerde kaynak bölgesi delta ferrit olarak katılır bu sebeple bu çeliklerde katılma çatlaklarına duyarlılık düşüktür. Fakat alaşımda Niobyum varlığı ve Mangan miktarının az olduğu durumlarda Katılma çatlakları görülebilir. Çok yüksek

karbon içeren martenzitik çelikler östenit olarak katılaştığı için katılaşma çatlama duyarlılık daha fazladır (Lippold ve diğ, 2005).

Yeniden Isıtma Çatlakları: Kaynaklı parçalara gerilim giderme gibi ısı işlemlerinin uygulanması durumunda ya da diğer yüksek sıcaklığa tabi tutulan ısı işlemler sonucunda malzemede yeniden ısıtma çatlama olabilir. Martenzitik çeliklerdeki Molibden içeriği bu kaynak hatasına sebebiyet vermektedir. Sülfür, fosfor, antimon ve bakır gibi bazı elementlerin varlığı da yeniden ısıtma çatlaklarına yol açabilir. Cr, Mo ve V içeren çeliklerde bu çatlamların görülmesi olasıdır (Lippold ve diğ, 2005).

2.6.3. Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları

Ferritik paslanmaz çeliklerde sertleştirme su verme tavı ile yapılamadığı için martenzit oluşumuna rastlanmaz, bu yüzden kaynağı martenzitik çeliklere göre daha kolaydır (URL-3). Kaynak hataları ise genellikle alaşım içeriğindeki krom miktarına bağlı oluşan hatalardır. Düşük krom içerikli ferritik çeliklerde çatlama karşı duyarlılık düşükken, yüksek krom içeren ferritik çeliklerde hidrojen kaynaklı çatlama (hydrogen induced cracking) ya da katılaşma çatlamları (weld solidification cracking) görülebilmektedir (Lippold ve diğ, 2005).

Katılaşma Çatlama (weld solidification cracking): Katılaşma çatlama tane sınırlarında düşük erime noktalı sıvı ince tabaka oluşması, alaşım elementleri ile safsızlıkların ayrışması, katılaşma esnasında oluşan büzülme gibi sebeplerle soğumanın son aşamasında görülür. Ferritik çeliklerde katılaşma ferrit fazında olduğu için bu çeliklerde çatlama çok yaygın değildir. Ancak alaşıma eklenen T ve Nb gibi elementlerle artan safsızlık çeliği çatlama karşı duyarlı hale getirir (Lippold ve diğ, 2005).

Sıcaklık gevrekleşmesi (high temperature embrittlement): Ferritik paslanmaz çeliklerde yüksek krom içeriği sonucu oluşan bir diğer kaynak hatası da yüksek sıcaklık gevrekleşmesidir (high temperature embrittlement). Alaşım içerisindeki karbon ve nitrojen oranının fazla olması, HAZ bölgesindeki büyük tane boyutu yüksek sıcaklık gevrekleşmesine katkı sağlamaktadır (Lippold ve diğ, 2005).

Bu çeliklerin kaynağında karşılan önemli bir diğer problem de tane büyümesidir. Kaynak esnasında ITAB bölgesi sıcaklığının 1150 °C üzerine çıkması sonucunda o bölgede tane büyümesi oluşur. Bu büyüme kaynaklı parçada kırılma ve çentik darbe

mukavemetinde düşüğe yol açar. Bu sorunla karşılaşılması için kısa pasolarla kaynak yapılması ve hızlı soğutma önerilmektedir (URL-3).

2.6.4. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları

Östenitik paslanmaz çelikler, paslanmaz çelikler içerisinde en iyi kaynaklanabilen çelik türüdür. Bu çeliklerin kaynak kabiliyetini arttıran üç önemli özelliği bulunmaktadır; (Kükürtcü, 2014)

- Isı genleşme katsayıları az alaşımli ve karbonlu çeliklerin yaklaşık 1,5 katıdır (Kükürtcü, 2014).
- Oda sıcaklığındaki ısı iletim katsayıları az alaşımli ve karbonlu çeliklerin yaklaşık 1/3'ü kadardır (Kükürtcü, 2014).
- Elektrik iletim dirençleri alaşimsız çeliklerin 4-7 katı kadardır (Kükürtcü, 2014).

Östenitik çeliklerin kaynak kabiliyeti yüksek olmasına karşın kaynaklanabilirliğini etkileyen önemli birkaç faktör bulunmaktadır. Bunlar delta ferrit fazı oluşumu ve sigma fazı oluşumudur (Kükürtcü, 2014).

2.6.4.1. Delta Ferrit Fazının Oluşumu

Delta ferrit, katılaşma sırasında oluşan bir yapı olup östenitin ferrite olan normal dönüşümünden farklı bir oluşumdur. Delta ferrit taneleri östenitik paslanmaz çeliklerin soğuması esnasında sıvı halden itibaren başlayan katılaşma sürecinde yapıda oluşmaktadır. Ferrit yapıcı elementlerden olan silisyum ve molibden elementlerinin alaşımdaki varlığı delta ferrit fazı oluşumunu hızlandırmakta ve delta ferrit fazının görüldüğü sıcaklık aralığını arttırmaktadır (Aydın, 2002).

Bu faz oluşumu malzemede çatlak oluşumuna katkı sağlayarak sıcak şekil değiştirme işlemini zorlaştırmaktadır. Çelikte uzama, büzülme ve çentik darbe mukavemetini düşürmektedir. Faz oluşumunun tanecik sınırlarında olması korozyon direncini de olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple östenitik çeliklerin kaynağında delta ferrit oluşumu istenmemektedir ve kaynaklı parçada delta ferritin kontrollü Schaeffler diyagramı vasıtasıyla yapılmaktadır (Aydın, 2002).

2.6.4.2. Sigma Fazının Oluşumu

Sigma fazı östenitik, ferritik ve dubleks alaşımlı paslanmaz çeliklerde görülen tetragonal kristal yapıya sahip bir intermetalik fazdır. Çoğunlukla krom oranı %20'den fazla olan alaşımların kaynağında HAZ bölgesinin 570 °C- 1000 °C arasındaki sıcaklıklara uzun süre maruz kalması sonucu ferrit östenit ara yüzeylerinde oluşur (URL-6; Başyigit ve diğ, 2015). Bu fazın oluşumu için yapıda az da olsa ferrit bulunmalıdır. Alaşımda niyobyum, silisyum ve molibden bulunması da sigma fazı oluşumunu tetiklemektedir (Aydın, 2002). Krom oranının az olduğu alaşımlarda sigma fazı oluşumu için uzun süreler gerekmeyle birlikte krom oranı arttıkça sigma fazı oluşumu hızlanmaktadır. En hızlı oluşum ise 800 °C- 850 °C aralığında olmaktadır (Başyigit ve diğ, 2015).

Sigma fazı çok kırılmalı ve sert bir fazdır. Çeliğin uzama, büzülme ve çentik darbe mukavemetini azaltmaktadır (Aydın, 2002). Bu sebeple oluşumu istenmemektedir ve Schaeffler diyagramı ile kontrol altına alınmaktadır. Bu faz oluşumunu engellemek adına 900 °C'den 500 °C 'ye geçiş hızlı olmalıdır (Başyigit ve diğ, 2015). Yapıda sigma fazı oluştuysa da 950 °C-1050 °C sıcaklık aralıklarında yapılacak tavlama ve suda soğutma işlemi ile bu faz ortandan kaldırılabilir (Aydın, 2002).

2.6.4.3. Kaynak Hataları

Östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetini arttıran yukarıda belirtilen özellikler bazı kaynak problemlerine de yol açabilmektedir. Örneğin genleşme katsayısının yüksek olması östenitik çeliklerin kaynağında daha fazla gerilme oluşmasına ve kaynakta çatlama sebebiyet verir (Kükürtcü, 2014).

Alaşımların içeriğine göre özellikle S ve P elementlerinin varlığında da katılma ve sıvılaşma çatlakları (Weld Solidification and liquation cracking) görülebilir. Bu sebeple paslanmaz çeliklere kükürtten arındırma için argon-oksijen dekarburizasyon eriyik uygulaması yapılabilir (Lippold, 2005).

Katılma çatlama (Solidification Cracking): Katılma çatlama östenitik çeliklerde görülen önemli bir kaynak problemidir ve katılma tane sınırlarında meydana gelir. Katılma çatlama karşı duyarlılık alaşım içeriğine bağlı olmakla birlikte ferrit içermeyen östenitik çeliklerde daha yaygındır. Ferrit olarak katılan alaşımlar ise çatlama karşı dirençlidir. Yüksek ısı girdisi sonucu oluşan büyük kaynak dikişleri,

gözyaşı şeklinde kaynak havuzu oluşumuna yol açan yüksek hareket hızları ve kaynak dolumunun yetersiz olması gibi durumlar da katılaşma çatlama oluşumuna katkı sağlar. Katılaşma çatlama önüne geçmek için, kaynağın ferrit olarak katılaşmasını sağlayacak şekilde alaşım ve dolgu malzemesi içeriği buldurup bulundurmadığı kontrol edilmelidir (Lippold, 2005).

Sıvılaşma Çatlama (Liquation Cracking): Östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan diğer çatlamlar HAZ bölgesi ve kaynak metali bölgesindeki sıvılaşma çatlamlarıdır. HAZ bölgesinde gerçekleşen sıvılaşma çatlamları (HAZ Liquation Cracking) alaşım içerisindeki safsızlıkların tane sınırlarında ayrılması sonucu, füzyon bölgesine yakın kısmi erimiş bölgede tane sınırları arasında ince sıvı tabaka oluşumu sebebiyle görülür. Ana metalin içeriğinin ferritik olması ya da tane sınırlarında ferrit oluşumu sıvılaşma çatlama azaltıcı etmenlerdir. HAZ bölgesinin östenitik olması durumunda ise alaşımdaki safsızlık seviyesinin düşürülmesi, ısı girdisinin azaltılması ve tane boyutlarının küçültülmesi ile sıvılaşma çatlamlarının önüne geçilebilir. Kaynak metali bölgesindeki sıvılaşma çatlamları ise çok pasolu kaynaklarda görülen bir çatlama, tam östenitik kaynaklarda sıklıkla görülür. Kaynak dolgusu içerisinde ve küçük olduğu için mikro çatlaklar olarak bilinirler ve tespiti genelde zordur. Kaynak metalindeki ferrit içeriğinin kontrolü ile ve kaynak ısı girdisi ile bu çatlamlar kontrol edilebilir (Lippold, 2005).

Süneklik Daldırma Çatlama (Ductility Dip Cracking): Süneklik daldırma çatlama östenitik mikroyapılı alaşımlarda, Ni ya da Cu bazlı alaşımlarda meydana gelir. Sıvılaşma çatlama ile karıştırılması olasıdır ancak bu çatlamanın oluştuğu sıcaklık aralığı daha farklıdır. Malzemenin erime sıcaklığının en az yarısının üzerindeki sıcaklıklarda oluşan yüksek sıcaklık sünekliği sebebiyle oluşur. Hem HAZ bölgesinde hem de kaynak metali bölgesinde görülebilir (Lippold, 2005).

Gerilim Giderme Çatlama (Reheat Cracking): Gerilim giderme çatlama kaynak sonrası gerilim giderme amacıyla kaynak parçasının yeniden ısıtılması sonucu tane içlerinde karbür çökmesi sebebiyle oluşur. Yeniden ısıtma çatlama olarak da bilinen bu kaynak hatası genellikle östenitik çeliklerde görülmez. Ancak gerilim giderme esnasındaki sıcaklık değişiminde çok bileşenli karbür oluşturan alaşımlarda

görülebilmektedir. Hem HAZ bölgesinde hem de kaynak metali bölgesinde görülebilir (Lippold, 2005).

Kirlenme Çatlamları (Contamination Cracking): Bakır Kirlenme Çatlaması (Copper Contamination Cracking) östenitik çeliklerde ve yapı çeliklerinde görülen bir çatlama türüdür. Bakırın erime sıcaklığı olan 1085 °C üzerinde görülür. Erimiş bakır östenit tane sınırlarına nüfuz eder ve sıvı metal kırılabilirliği oluşturur. Tane sınırlarında gözlenen bakır rengi ile bakır kirlenme çatlamasının tespiti kolaylıkla yapılabilir. Bir diğer kirlenme çatlaması da Çinko kirlenme çatlamasıdır (Zinc Contamination Cracking). Bakır kirlenme çatlamasına çok benzer ancak çinkonun erime sıcaklığı daha düşük olduğu için 419,5 °C üzerinde görülür. Galvanizli çeliğin östenitik çeliklere kaynağı esnasında görülür. Galvanizli çelikten buharlaşan çinko östenitik çeliğin HAZ bölgesine ulaşarak tane sınırlarına yerleşir ve çatlama yol açar (Lippold, 2005).

2.6.5. Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları

Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynaklanabilirliği ferritik paslanmaz çeliklerden daha iyi olup, östenitik paslanmaz çelikler kadar ise iyi değildir (URL-7). Dupleks paslanmaz çeliklerin kaynağı sonrası istenilen mukavemet ve korozyon direnci elde edilmesi için genellikle ek bir ısıl işleme gerek duyulmamaktadır. Dupleks paslanmaz çeliklerde ferritik olarak katılaştıran kaynak metalinin bir kısmı soğuma esnasında östenite dönüşür, ancak soğutma hızı yüksek olursa yeterli östenit oluşumu gözlenmediği için yapı dupleks olmaktan uzaklaşır. Bu nedenle bu çeliklerin kaynağı sonrası soğutma kontrollü yapılmalıdır (URL-7). Çok yavaş soğuma hızlarında tokluk ve korozyon direnci düşmesine neden olan intermetalik gevrek fazlar oluşur. Çok yüksek soğutma hızlarında da ferrit oranının fazla olması ve nitrür çökmesi sebebiyle yine tokluk ve korozyon direncinde düşme görülür (Aydın 2002).

Katılma çatlaması (Solidification Cracking): Dupleks paslanmaz çeliklerin tümü ferrit olarak katılaştır bu sebeple östenitik alaşımlara nazaran daha fazla katılma çatlamlarına duyarlıdır. Ancak uygulamada düşük safsızlık seviyelerine sahip olmaları ve tane sınırlarında sıvı tabaka oluşma olasılığının az olmasından dolayı katılma çatlamlarına karşı genelde dirençlidirler (Lippold, 2005).

Hidrojen Kaynaklı Çatlama (Hydrogen-Induced Cracking): Dupleks paslanmaz çelikler hidrojen kaynaklı çatlamlara karşı dirençli çelikler olarak anılmasına karşın bu çeliklerde yüksek hidrojen içeriği ve mikroyapının kontrolündeki zayıflık sebebiyle hidrojen kaynaklı çatlak oluşumu gözlenebilir. Nemli ortamlarda uygulanacak toz altı kaynağı ve ark kaynaklarında düşük hidrojenli kaynak uygulamaları önerilmektedir. Gaz metal ark kaynağı ve TIG kaynakları için argon gazı korumasına hidrojen ilavelerinin yapılması çatlama olasılığına yol açtığı için dupleks paslanmaz çeliklerde hidrojen ilavesi önerilmez (Lippold, 2005).

Orta Sıcaklıklarda Gevrekleşme (Intermediate Temperature Embrittlement): Dupleks paslanmaz çeliklerde farklı fazları birarada bulundurması ve yüksek Cr ile Mo içeriği sebebiyle belirli sıcaklık aralıklarında çökelme oluşumu gözlenir. Bu sebeple bu çeliklere uygulanan sıcaklıklar 280 °C'yi aşmamalıdır ancak kaynak metalleri ve HAZ bölgesi yüksek sıcaklığa maruz kaldığı için intermetalik faz oluşumu ihtimali yüksektir. Metaller arası faz oluşumu genelde 570 °C'de başlar ve 1000 °C'de bu fazlar tekrar çözülür. Bu yüzden bu sıcaklık aralıklarında alpha-prime gevrekliği ve sigma fazı gevrekliği adı verilen 2 ayrı gevreklik durumu görülür (Lippold, 2005).

Ana metal ve HAZ bölgesi birkaç dakika 475°C 'ye maruz kaldığında HAZ bölgesinde tokluğun düşmesine sebep olan Alpha prime gevrekliği görülür. Bu gevreklik problemi çok pasolu kaynaklarda ve kaynak sonrası ısıtma işlemlerinde görülebilir. Alpha-prime gevrekliğine sebebiyet veren sıcakların üstüne çıkıldığında ise sigma intermetalik fazı görülür. Sigma fazı çok sert bir fazdır ve ferrit içeriği yüksek olan bir malzemenin kaynak sonrasında uzun süre yüksek sıcaklıklarda tutulması sonucunda görülebilir. Tüm bu intermetalik fazlar metallerin tokluk, süneklik ve korozyon direncinde düşüşe yol açtığından alaşımlarda istenmeyen oluşumlardır (URL-4).

2.6.6. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklanabilirliği ve Kaynak Hataları

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler kaynaklanabilir alaşımlardır ancak istenilen mekanik özelliklerin ve korozyon direncinin elde edilmesi için kaynak sonrasında çözeltiye alma ve yaşlandırma gibi işlemler uygulanmalıdır (URL-3). Kaynakta dolgu malzemesi kullanılması durumunda da ana metal ile aynı türde malzeme kullanılması önerilmektedir (URL-4). Kaynak öncesinde bir ön tavlama işlemine gerek yoktur.

Martenzitik ve yarı-östenitik olan türlerinin kaynağında çatlama tehlikesi bulunmamaktadır ancak östenitik olan türünün kaynağında sıcak çatlama görüldüğü için kaynağı zor çökelme sertleşmeli paslanmaz çelik grubuna girer. Bu çeliklere yapılacak kaynak en düşük ısı girdisi ile çözme tavlı yapılmış parçalar üzerine yapılmalıdır (URL-3).



3. LAZER IŞIN KAYNAĞI

3.1. Lazer

Güneşten gelen doğal ışınlar gezegenimizin temel enerji kaynağıdır ve değişik dalga boylarında yayılırlar. Taşıdıkları enerjileri dalga boylarına ve üzerine düştükleri maddelere göre aktarırlar. Bazı dalga boylarındaki ışınlar bazı malzemelerin molekülleri tarafından emildiğinde, moleküller uyarılarak titreşir ve ısı üretilir. Maddelerin ışığı soğurma miktarı ise üzerine düştüğü ışınların dalga boyuna göre değişmektedir. Işığın tüm bu, enerjisini ısı olarak bırakma yeteneği, uzun mesafelere iletilebilmesi, küçük bir noktaya odaklandırılabilmesi sonucu yüksek güç yoğunluğu ortaya çıkması gibi özellikleri bilim adamları ve mühendisleri lazer adı verilen ışık üreten makineleri geliştirmeye yöneltmiştir (Dawes, 1992).

Lazer üretim yönteminin temeli olan uyarılmış emisyon kavramının 1917 yılında Albert Einstein tarafından kurumsal olarak bulunması, negatif soğurmanın mümkün olması ve negatif soğurmalı ortam oluşturulabilmesi ile birlikte 1960 yılında ilk lazer üretimi gerçekleştirilebilmiştir (Candan, 2008).

Kelime olarak lazer ingilizcede uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışığın güçlendirilmesi anlamına gelen light amplification by stimulated emission of radiation kelimelerinin ilk harflerinin kısaltılmasından oluşmaktadır (Arcan, 2011). Normal bir ışık kaynağından çıkan ışınlar farklı dalga boylarında ve farklı renklerde olup, farklı yönlere doğru yayılım yapmakta iken yapay olarak üretilen lazer ışınları ise doğada kendiliğinden bulunan ışıklardan farklı olarak şu özelliklere sahiptir; (Topal, 2019; Kasnak ve diğ, 2016)

1- Monokromotiklik

Lazer ışınları tek bir dalga boyuna sahiptir. Işınlar kaynaktan tek renkli olarak çıkar. Lazer dalgalarının tümü birbiriyle aynı frekansta ve aynı fazdadır. Lazerin türüne göre farklı renklerde ışın elde etmek mümkündür (Cebeci, 2021).

2- Koherentlik

Fotonlar birbiriyle uyumlu olacak şekilde yayılırlar. Uyarımı sağlayan foton ile enerji değişimi sonrasında oluşan fotonun dalgaları aynı fazdadır. Lazer ışık dalgaları hem uzaysal hem de zamansal boyutta uyumludur (Cebeci, 2021).

3- Yönlenebilirlik

Lazer ışını paralel dalgalardan oluşan yüksek genlikli ışık demetleridir. Oluşan ışın tek yönlüdür ve tek bir noktaya odaklanabilir. Uzun mesafelerde dahi lazer ışını sapma yapmaz (Cebeci, 2021).

4- Güç

Lazer ışını küçük çaplıdır böylelikle enerji yoğunluğu yüksektir. Lazerle güçlü bir ışık elde edilir, elde edilen ışın darbeleri ile 10^{10} W'dan yüksek güçlere ulaşılabilir (Cebeci, 2021).

5- Hız

Lazer ışığı 10^{-12} s'lik çok hızlı süreler içerisinde üretilebilir (Şahin, 2006; Kasnak ve diğ., 2016; Hake, 1985).

Lazer günümüzde; tıp ve diş hekimliğinde, meteorolojide, savunma sanayi ve diğer mühendislik uygulamalarında, fiber optik iletişim ve holografide geniş kullanım alanı bulmaktadır (URL-8).

3.2. Lazer Işını ve Lazer Işını Oluşumunun Fiziksel Temelleri

Işık belirli bir dalga boyuna sahip bir çeşit elektromanyetik radyasyondur (Candan, 2008). Foton adı verilen parçacıklardan oluşur. Lazer ışını da bir çeşit ışık olup foton yayılımı sonucu ortaya çıkar (Baltaş, 2006; URL-9).

Lazer ışını oluşturmak için sistemde 4 şartın sağlanması gerekmektedir; (URL-10)

- 1- Sistem uyarılarak atomların yarı kararlı hale geçmesi sağlanmalıdır.
- 2- Sistemde nüfus terslenmesi olayı gerçekleşmelidir.
- 3- Uyarılmış atomların bir alt enerji seviyesine geçişi esnasında yayılan fotonların sistemde kaldığı sürenin ışıma yapmaya yetebilecek bir süre olması gerekmektedir.
- 4- Negatif soğurmayı sağlayabilecek bir ortam oluşturulmalıdır.

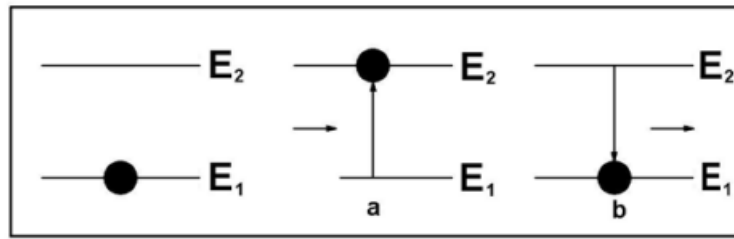
3.2.1. Enerji Seviyeleri Arasındaki Geçiş ve Foton Yayılımı

Bu aşamada elektronların atom içerisinde farklı enerji seviyelerine geçişi ve lazer ışınının eldesindeki temel fiziklerden biri olan uyarılmış emisyon sonucu foton yayılımından

bahsedilecektir. Elektronun enerji seviyeleri arasındaki geçişi için 3 durum bulunmaktadır; Birincisi uyarılmış soğurma, ikincisi kendiliğinden emisyon, üçüncüsü ise uyarılmış emisyondur.

3.2.1.1. Uyarılmış Soğurma

Atomlar kararlı durumunda belirli bir iç enerjiye sahiptirler ve termodinamik kanunları gereği bu enerjilerini minimumda tutma eğilimindedirler. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi normal durumda enerji seviyesi E_1 düzeyinde olan bir atom temel enerji seviyesindedir ve dışarıdan müdahale olmadığı sürece bu enerji seviyesinde kalmaya devam eder. Ancak atom basınç uygulama, ısıtma, hızlandırılmış atom bombardımanına maruz bırakma ya da ışık demetine maruz bırakma gibi dışarıdan bir müdahale ile uyarıldığında Şekil 3.1 a’da görüldüğü gibi içerisindeki elektron temel enerji düzeyi olan E_1 ’den E_2 seviyesine çıkar. Bu geçişte atom aradaki enerji farkı olan $\Delta E_{21} = E_2 - E_1$ kadarlık bir enerjiye sahip bir fotonu soğurmaktadır. Şekil 3.2 a’da görülen bu işleme uyarılmış soğurma denir. Atom yeni enerji seviyesinde kararsız halde olduğu için minimum enerji prensibi gereği Şekil 3.1 b’de görüldüğü gibi E_2 seviyesine çıkmış elektron tekrar E_1 seviyesine geri döner. Aradaki enerji farkını da ısı ve ışık yani foton olarak yayar. E_1 seviyesine iniş için kendiliğinden emisyon ya da uyarılmış emisyon olarak adlandırılan iki yol vardır (Topal, 2019; Çelen, 2006; Şahin, 2006).



Şekil 3.1. Atomun normal durumdaki ve uyarılmış durumdaki enerji seviyesi (Çelen, 2006)

Bu geçiş esnasında oluşan fotonun enerjisi Denklem (3.1)’de belirtilen Plank Formülü ile hesaplanır (Çelen, 2006).

$$\Delta E_{21} = h \cdot \nu_{21} = E_2 - E_1 = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.1)$$

Burada h: Planck sabiti (6.64×10^{-34} Js)

$c = \text{Işık hızı (} 3 \times 10^8 \text{ m/s)}$

$\nu_{21} = E_2$ seviyesinden E_1 seviyesine geçişte yayılan ya da E_1 seviyesinden E_2 seviyesine geçişte soğurulan elektromanyetik dalganın frekansı (Hz)

$\lambda = \text{Işığın dalga boyu (metre)}$

E_2 ve E_1 ise $E_2 > E_1$ olmak üzere sırasıyla uyarılmış durumdaki enerjiyi ve temel seviyedeki enerjiyi gösterir.

Şekil 3.1’de gösterilen uyarılmış soğurmada E_1 seviyesindeki elektronun E_2 seviyesine geçişi esnasında atom kendisine uyarıcı olarak gelen fotonun tüm enerjisini soğurmakta yani yutmaktadır. Soğurulma için fotonların atoma çarpma olasılığını ve yutma katsayısını gösteren bazı matematiksel ifadeler bulunmaktadır. Bu ifadeler Denklem (3.2) ve Denklem (3.3) de belirtildiği şekildedir (Çelen, 2006).

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12} \times N_1 \quad (3.2)$$

N_1 : t anında E_1 enerji seviyesinde birim hacimde bulunan atom sayısı

W_{12} : Yutma oranı

$$W_{12} = \sigma_{12} \times F = \sigma_{21} \times F \quad (3.3)$$

F: Atoma çarpan foton yoğunluğu

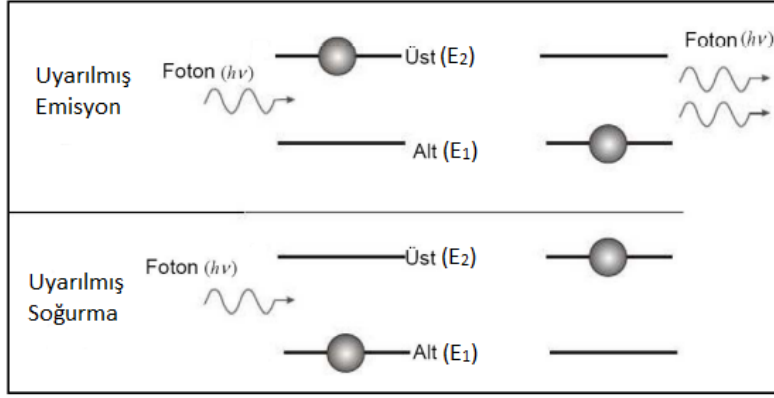
σ_{12} : Fotonların uyarılmış durumda bulunan atomlara çarpma olasılığı

σ_{21} : Fotonların uyarılmamış durumda bulunan atomlara çarpma olasılığı

3.2.1.2. Kendiliğinden Emisyon ve Uyarılmış Emisyon

E_2 seviyesine çıkmış bir elektronun E_1 seviyesine inişi için iki yol vardır. Birincisi kendiliğinden emisyon, ikincisi ise uyarılmış emisyonudur (Şahin, 2006).

Kendiliğinden emisyon dediğimiz Şekil 3.2 b’de görülen durum dışarıdan herhangi bir müdahale olmadan elektronun temel enerji seviyesi dediğimiz bir alt enerji seviyesine geçişini belirtmektedir. Bu geçiş atoma herhangi bir müdahale olmadığı durumda emisyon ömrü denilen bir süre sonunda kendiliğinden gerçekleşmektedir ve elektronun üst seviyede kalma süresine bağlıdır. Bu geçiş esnasında yayılan fotonun sahip olduğu



Şekil 3.3. Uyarılmış soğurma ve uyarılmış emisyon (Candan, 2018)

Uyarılmış emisyon da kendiliğinden emisyonla benzer bir olasılık hesabı bulunmaktadır, bu hesap Denklem (3.5)'te belirtildiği gibidir (Çelen, 2006).

$$-W_{21} \times N_2 = \frac{dN_2}{dt} \quad (3.5)$$

W_{21} : E_2 durumundan E_1 durumuna geçişteki uyarılmış emisyon olasılığı

N_2 : t anında E_2 enerji seviyesinde birim hacimde bulunan atom sayısı

$\frac{dN_2}{dt}$: kendiliğinden emisyon olasılığı

Uyarılmış emisyon olasılığı atoma çarpan foton yoğunluğuna bağlı olup Denklem (3.3)'de belirtilen yutma oranı ile aynı şekilde Denklem (3.6)'da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Bu denklem aynı zamanda lazerin oluşum olasılığını göstermektedir (Çelen, 2006).

$$W_{21} = \sigma_{12} \times F \quad (3.6)$$

F: Atoma çarpan foton yoğunluğu

σ_{12} : Fotonların uyarılmış durumda bulunan atomlara çarpma olasılığı

Denklem (3.5) ile Denklem (3.6)'nın birleşiminden aşağıda belirtilen yeni bir formül ortaya çıkmaktadır (Çelen, 2006).

$$dF = \sigma (N_1 - N_2) dz \quad (3.7)$$

N_1 : E_1 enerji seviyesindeki atom sayısı

N_2 : E_2 enerji seviyesindeki atom sayısı

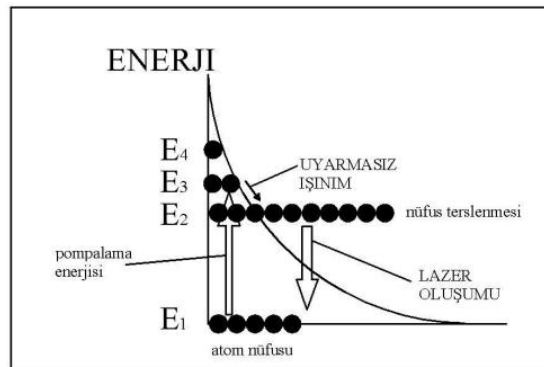
F: Atoma çarpan foton yoğunluğu

dz: z yönündeki diferansiyel ilerleme

3.2.2. Boltzman Dağılımı ve Nüfus Terslenmesi

Lazer ışın demeti oluşması için sistemde sağlanması gereken bir diğer özellikte nüfus terslenmesi meydana gelmesidir. Bir enerji seviyesindeki, nüfus o enerji seviyesindeki birim hacim başına düşen atom sayısını ifade etmektedir. Nüfus terslenmesinin tanımını yapabilmek için $E_3 > E_2 > E_1$ olmak üzere üç enerji seviyeli bir sistem düşünelim. Termal denge durumunda atomlar çoğunlukla temel enerji seviyesi dediğimiz E_1 seviyesinde bulunmaktadırlar. Bu sistem dışarıdan uyarıldığında temel enerji seviyesindeki atomlar kararsız duruma geçerek iki üst enerji seviyesine yani E_3 seviyesine çıkarlar. Kararsız durumda olan atomlar belirli bir süre sonunda E_1 ya da E_2 enerji seviyesine geri inerler. Atomların E_2 seviyesinde kalma süresinin E_3 seviyesinde kalma süresinden daha fazla olması durumunda E_2 seviyesindeki atom sayısı zamanla artar böylelikle nüfus terslenmesi olarak adlandırdığımız durum meydana çıkar. Yeni durumda N_2 , E_2 enerji seviyesindeki atom sayısı ve N_1 , E_1 enerji seviyesindeki atom sayısı olmak üzere $N_2 > N_1$ olur. Nüfus terslenmesi olması durumunda uyarılmış durumdaki atomların sayısı temel seviyedeki atomların sayısından fazladır. N_2 seviyesinde atom sayısının fazla olmasının devamlılığı halinde lazer oluşumu sağlanabilir (Çelen 2006; Candan, 2008).

İki enerji seviyeli sistemlerde nüfus terslenmesi olmadığı için lazer sistemleri en az üç enerji seviyeli sistemlerdir. Üç enerji seviyeli (düzeyli) bir sistemde nüfus terslenmesine örnek Şekil 3.4'te görüldüğü gibidir (Çelen, 2006).



Şekil 3.4. Üç enerji seviyeli bir sistemde nüfus terslenmesi (Çelen, 2006)

Boltzman dağılımı atomların farklı enerji seviyelerindeki nüfus miktarlarını gösteren olasılık dağılımıdır. Termal denge durumundaki Boltzman dağılımı için; nüfus dağılımları, enerji seviyeleri ve sıcaklık bileşenlerine göre hazırlanmış Denklem (3.8)'de belirtilen Boltzman denklemi kullanılır (Çelen, 2006).

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[-\frac{(E_2-E_1)}{k_b \times T}\right] \quad (3.8)$$

k_b : Boltzman sabiti ($1,380 \times 10^{-23}$ J/K molekül)

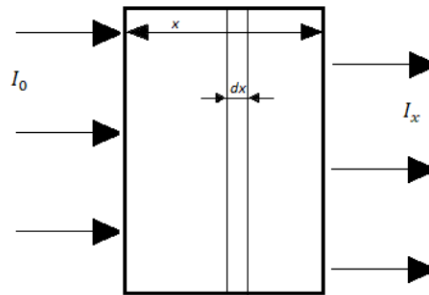
T: Malzeme Sıcaklığı

Lazer sisteminin çalışması için termal denge durumunun bozulması ve nüfus terslenmesi olması gerekmektedir. Bu durum, sıfırın altındaki sıcaklık değerlerinde, pompalama denilen bir işlemle atomların üst enerji seviyesine taşınması suretiyle sağlanır.

3.2.3. Negatif Soğurma

Klasik optikte, kaynaktan çıkan ışık bir cisim içerisinde geçtiğinde soğurularak şiddetinin bir kısmını kaybeder. Şiddeti I_0 olan bir ışık ya da elektromagnetik dalga, kalınlığı x olan bir cisim içerisinde geçirildiğinde ışığın şiddetindeki azalma Denklem (3.9)'da belirtilen Beer-Lambert yasasına göre hesaplanır. Işığın cisim içerisinde geçtikten sonraki şiddeti; başlangıç durumundaki şiddetine, içerisinde geçilen cismin soğurma katsayısına ve cismin kalınlığına bağlıdır (Kalkandelen, 1996).

$$I_x = I_0 \times e^{-\alpha x} \quad (3.9)$$



Şekil 3.5. Işığın x kalınlığında bir cisim içerisinde geçişi (Kalkandelen, 1996)

Denklemden belirtilen α cismin soğurma katsayısını temsil etmektedir. Lineer optikte soğurma katsayısı $\alpha > 0$ 'tür ve bu durumda ışık cisim tarafından soğurularak enerjisi h.

v 'nin bir kısmını içinden geçtiği cisme aktarır. Bunun tam tersi durumda yani $\alpha < 0$ olması durumunda negatif soğurma denilen olay meydana gelmektedir ve ışığın şiddeti lineer optiğin aksine cisim içerisinden geçtikten sonra artmaktadır. Negatif soğurmalı ortamın oluşturulabilmesi lazer üretiminin en büyük şartlarından biridir (Kalkandelen, 1996).

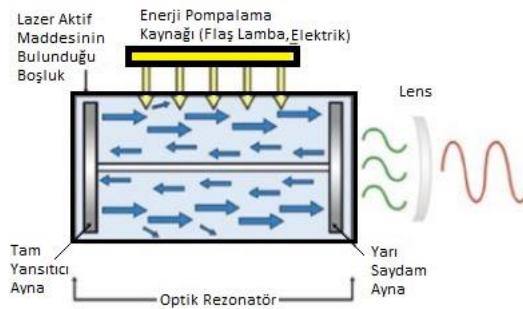
3.3. Lazer Sistemleri ve Lazer Sisteminin Temel Elemanları

Lazer ışını oluşumunun fiziksel temellerinden biri daha önce bahsedildiği gibi atomların uyarılarak üst enerji seviyelerine çıkmasıdır. Uyarılan bu atomlar lazer sistemi içerisinde yer alan lazer aktif maddesinin atomlarıdır. Lazer sistemleri için lazerin aktif maddesine, işlem moduna (sabit frekanslı veya ayarlanabilir olması durumuna göre) ya da pompalama mekanizmasına göre (üç seviyeli ya da 4 seviyeli olması durumuna göre) farklı şekilde sınıflandırmalar yapmak mümkündür. Ancak yaygın sınıflandırma lazer aktif maddesine göre yapılan sınıflandırmadır. Lazer sistemlerinden lazer ışını üretiminin daha iyi kavranabilmesi için bu aşamada önce lazer sisteminin elemanlarından sonrasında da lazer aktif maddesine göre sınıflandırılan lazer sistemlerinden bahsedilecektir (URL-11; Arcan 2011).

3.3.1. Lazer Sisteminin Elemanları

Lazer ışını oluşturan lazer sistemleri Şekil 3.6'da görüldüğü üzere genelde 3 temel bileşenden oluşmaktadır (Kasnak ve diğ., 2016). Bunlar;

- 1- Lazer Aktif Maddesi
- 2- Enerji (Pompalama) Kaynağı
- 3- Optik Rezonatör (Yansıtıcı Aynalar) ve Odaklama Elemanları

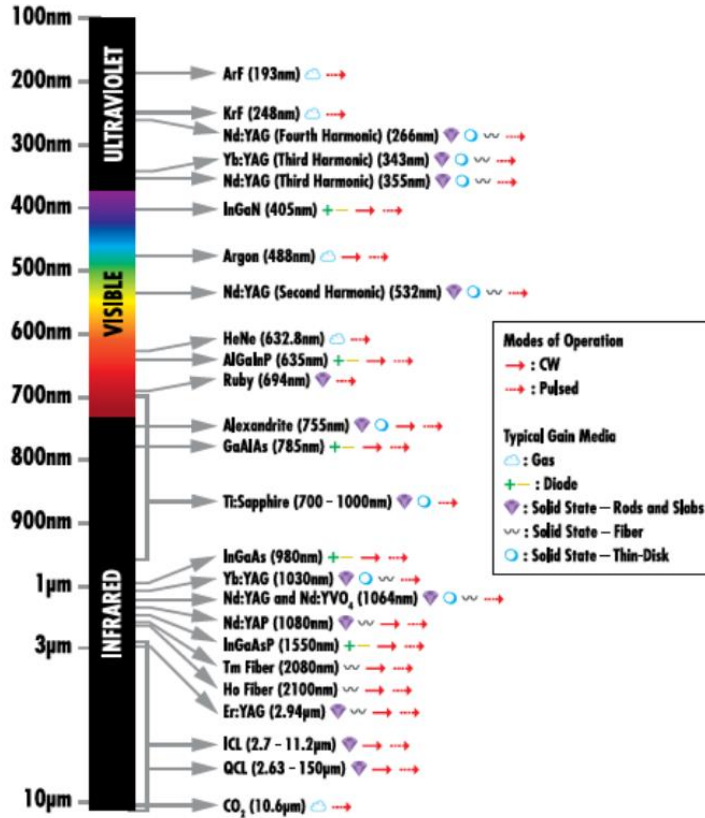


Şekil 3.6. Lazer sisteminin temel bileşenleri (Kasnak ve diğ., 2016)

3.3.1.1. Lazer Aktif Maddesi

Lazer aktif maddesi, atomların üst enerji seviyesine pompalandığı yani içerisinde uyarılmış emisyon olayının meydana geldiği maddedir. Lazer sistemindeki diğer bileşenlerin de bulunduğu nüfus terslenmesinin meydana geldiği bu alana aktif ortam ya da kazanç ortamı denmektedir. Kazanç terimi burada amplifikasyon miktarını belirtmektedir. Lazer kazanç ortamı ışığın gücünü arttıran bir ortamdır ve rezonatör kayıplarını telafi etmektedir (URL-14). Kazanç ortamı enerji pompalama kaynağı ile verilen enerjiyi emerek atomların üst enerji seviyelerine geçmesini sağlar (URL-12; Kukul, 2013).

Lazer aktif maddesi /kazanç ortamı katı, sıvı, gaz veya yarı iletken bir madde olabilir. Yaygın kullanılan lazerler spektrometrede aktif maddesine ve çalışma moduna göre Şekil 3.7’de gösterilmiştir (URL-15).



Şekil 3.7. Yaygın kullanılan lazer sistemlerinin aktif maddeleri, dalga boyları ve çalışma modları (URL-15)

Aktif maddesi katı olan lazerlerde, aktif madde olarak geçiş metalleri ya da nadir toprak iyonları katkılı kristal veya cam çubuklar kullanılmaktadır. Diğer lazer türlerine nazaran daha yüksek güç seviyelerine ulaşabilmeleri sebebiyle malzeme işleme ya da tıbbi prosedürlerde tercih edilirler (URL-15).

Kazanç ortamı gaz olan lazerlerde, aktif madde olarak Helyum, Neon nitrojen, argon, karbon monoksit, karbondioksit veya metal buharlarının karışımlarından oluşan bir gaz ortamı bulunmaktadır. Bu karışımlar cam bir tüpe doldurularak, aktif ortam görevi görürler. Özellikle CO₂ içeren türleri yüksek güç seviyelerine ulaşabildiği için malzeme işlemede sıklıkla kullanılır (URL-15).

Kazanç ortamı sıvı olan lazerlerde, aktif madde olarak organik bir boya (sıvı solüsyon) kullanılmaktadır. Bu boya lazerlerinde organik boya bir çözücü içerisinde çözünür bu esnada uyarılmış emisyonla lazer üretilir (URL-16).

Kazanç ortamı yarı iletken lazerler ise bir çeşit katı hal lazeri sayılabilir. Ancak katı hal lazerlerinde enerji kaynağı ışık iken, yarı iletken lazerlerde elektrik enerjisi kullanılır. Yarı iletken lazerlerde diyot içerisindeki p-n bağlantısı aktif ortamı oluşurmaktadır. Bu sebeple diyot lazerler olarakta adlandırılırlar. Düşük güç çıkışı olan, küçük boyutlu ve ucuz sistemler olduğundan gnlk hayatta sıklıkla kullanılan lazerlerdendir (URL-16).

Bu lazerlere ek olarak özel amaçlı kullanılan fiber lazerler, serbest elektron lazerleri, X ışını lazerler, ince disk lazerleri, fotonik kristal lazerleri gibi lazer türleri de bulunmaktadır (URL-13).

3.3.1.2. Enerji (Pompalama) Kaynağı

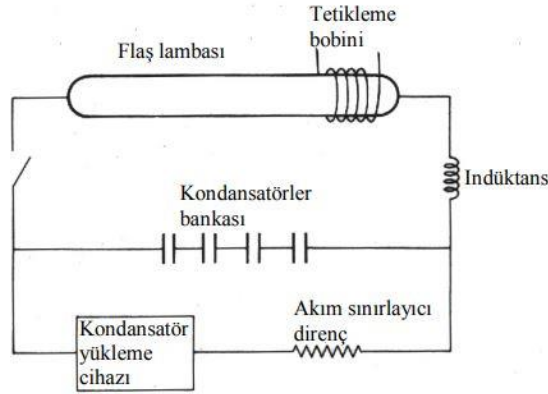
Enerji (pompalama) kaynağı lazer sistemi içerisindeki aktif maddenin atomlarını uyararak lazer oluşumunun temellerinden olan nüfus terslenmesi olayına sebebiyet veren lazer sistemi elemanlarındandır. Pompalama çoğunlukla harici bir ışık veya elektrik kaynağından sağlanır ancak kimyasal ya da nükleer reaksiyonlar ile de enerji aktarımı yapılmaktadır (URL-19).

Işık kaynağı ile optik yollardan yapılan pompalamada genellikle eliptik Őekilli kazanç ortamının bir tarafına aktif madde diğer tarafına ark lambası ya da flaş lambası yerleştirilir. Bu lambalar yansıtıcı aynaların da etkisiyle aktif maddenin yan duvarlarına etki ederek atomlara enerji geçişi sağlarlar. Lambalar ultraviyole ya da kızılötesi dalga

boyulu ışınları emen ve o ışınları yeniden uygun dalga boyu ile yayan akış tüpü adlı bir çeşit dış ceket ile kaplıdır. Lambaların uzunlukları ve aktif maddeye yakınlıkları için belirli bir oran bulunmaktadır. Çubuk şeklindeki lambaların uzunluğu çapına oranla çok yüksek ise ya çubuk uçları yansımayı önleyecek şekilde kaplanır ya da Brewster açısı denilen bir açı ile kesilir (URL-19).

Flaş lambaları lazer pompalamada kullanılan en eski enerji kaynaklarından. Katihal lazerlerindeki pompalama çoğunlukla Xenon flaş lambaları ile sağlanır. Enerjinin büyük bir kısmı ısı şeklinde harcadığından verimi düşüktür ve ömürleri kısadır. Lazer sistemlerinde sıklıkla kullanılan pompalama kaynaklarından bir diğeri olan Kuvars flaş lambaları 900°C'lere varan çalışma sıcaklıklarında çalışabilir. Bu sebeple yüksek çalışma sıcaklıklarındaki lambalar için su ile soğutma gerekebilir (URL-19).

Ark lambaları sürekli atım yapılan lazer sistemlerinde pompalama kaynağı olarak kullanılır. Bu lambalarda Xenon, kripton, argon, neon ve helyum gibi soygazlara elektrik akımını uygulanmasıyla ışık oluşumu gözlenir. Ark lambalarında kullanılan gaza göre çıkış spektrumları değişkendir. Nd: YAG lazerlerin pompalanmasında kullanılır (URL-19).



Şekil 3.8. Flaş lambası elektrik devresi (Kahraman, 2017)

Ark lambaları ya da flaş lambaları dışında mikrodalga ya da radyo frekansları ile de optik pompalama yapılabilir. Bunlar dışında elektrik deşarjı vasıtasıyla, gaz akışlarıyla ya da kimyasal reaksiyonlarla da atomların uyarılması mümkündür (URL-19).

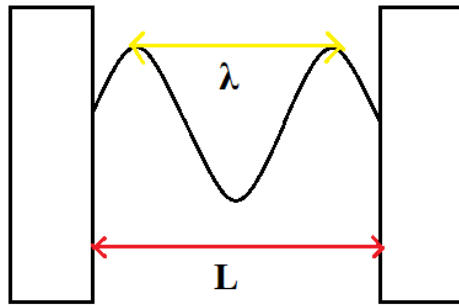
3.3.1.3. Optik Rezonatör (Yansıtıcı Aynalar) ve Odaklama Elemanları

Lazer ışını oluşumunun temellerinin foton salınımı ile ilişkili olduğu daha önceki kısımlarda bahsedilmişti. Işın oluşumu için, lazer aktif maddesinin atomlarının

pompalanması, üst enerji seviyelerine geçerek nüfus terslenmesi oluşturması ve sonrasında alt enerji seviyesine geçiş yapması gerekmektedir. Bu geçiş esnasında oluşan foton yayılımları emisyonun kendiliğinden ya da uyarılmış olup olmadığına bağlı olarak rastgele yönlü olabilir. Oluşan fotonların bir araya toplanarak doğrusal ve yüksek yoğunluklu lazer ışınına dönüşmesi için fotonları tek eksene toplayacak odaklama elemanları ve aynalara ihtiyaç duyulmaktadır. Lazer sistemi içerisinde biri tam geçirgen diğeri %98 geçirgenlikteki 2 ayna karşılıklı olacak şekilde yerleştirilir. Yansıtıcı aynalar ile kendiliğinden emisyon sonucu oluşan fotonlar bir üst enerji seviyesindeki atomlarla etkileşime girerler sonrasında da bu atomlar yine bir alt enerji seviyesine uyarılmış emisyon ile inerler. Karşılıklı aynaların varlığı bu işlemlerin devamlılığına sebebiyet vererek ışınları tek eksende toplar, ışınlar yeterli güce ulaştığında yarı geçirgen aynadan geçerek lazer ışını oluşturur (Kahraman, 2017).

Lazer sistemindeki yansıtıcı aynalar dalga yükseltici rolünde olup ışın dalgalarını üst üste toplayarak daha güçlü bir ışın ortaya çıkarır. Oluşan lazer ışınının dalga boyu (λ) yansıtıcı aynalar arasındaki mesafeye bağlıdır. Denklem 3.10'da belirtildiği gibi oluşan ışının dalga boyunun yarısının katları yansıtıcı aynalar arasındaki mesafeyi vermelidir. Bu koşul sağlandığı takdirde salınım oluşur ve rezonatörler rezonansa geçer (Çelen, 2006).

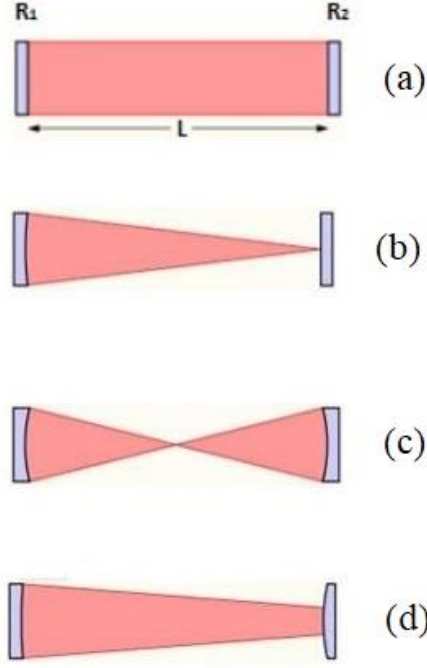
$$L = m(\lambda/2) \quad (3.10)$$



Şekil 3.9. Optik rezonatörde dalga oluşumu (Çelen, 2006)

Rezonans ortamı var olduğu sürece ışınların güçlenerek ışın demeti oluşturması ve lazer ışınının devamlılığının sağlanması beklense de ışınların aynalar arasında gelip gitmesiyle oluşan kırınım ve soğurma olayları kayıplara yol açmaktadır. Soğurma kaynaklı kayıpların azaltılması için ayna yüzeyleri yansıtıcı özellikte kaplamalar ile kaplanır.

Aynaların eğrilik yarıçaplarının da rezonatör kayıplarına etkisi bulunmaktadır, kayıpların azaltılması için dış bükey aynalar tercih edilir (Çetin, 2019).



Şekil 3.10. Eğrilik yarıçaplarına göre yansıtıcı aynalar (Çetin, 2019)

Şekil 3.10'da eğrilik yarıçaplarına göre yansıtıcı aynalar gösterilmiştir.

- Fabry-Perot olarak adlandırılan Şekil 3.10 a'da belirtilen aynada aynalar birbirine paralel ve düz olarak yerleştirilmiştir. Çoğunlukla yarıiletken lazerlerde kullanılırlar (Çetin, 2019).
- Şekil 3.10 b'de görünen aynalar yarım küresel ayna olarak adlandırılır. Bu aynalarla oluşturulan lazer ışınının kalitesi yüksektir. Fakat yüksek güçlerde aynalardan birinin odak noktasının diğer ayna olması sebebiyle odağın üzerinde olduğu ayna zarar görebilir. Bu aynalar düşük güçteki lazer uygulamalarında kullanılır (Çetin, 2019).
- Şekil 3.10 c'de görülen aynalar eş merkezli aynalardır. Bu aynalarda odak noktası lazer aktif maddesi olduğu için yüksek güçlerde aktif maddenin zarar görmesine yol açabilir (Çetin, 2019).
- Şekil 3.10 d'de görülen aynalar iç ve dış bükey aynalar olarak adlandırılır. Bu aynaların kullanıldığı sistemlerde lazer ışını rezonatöre odaklanmamaktadır. Bu sistemler genellikle yüksek güç istenilen lazerlerde kullanılır (Çetin, 2019).

3.4. Lazerlerin Sınıflandırılması

Lazerlerin sınıflandırılması pek çok kritere bağlı olarak yapılabilmektedir. Genel olarak bu kriterlere değinilecek olursa; (URL-11; URL-13)

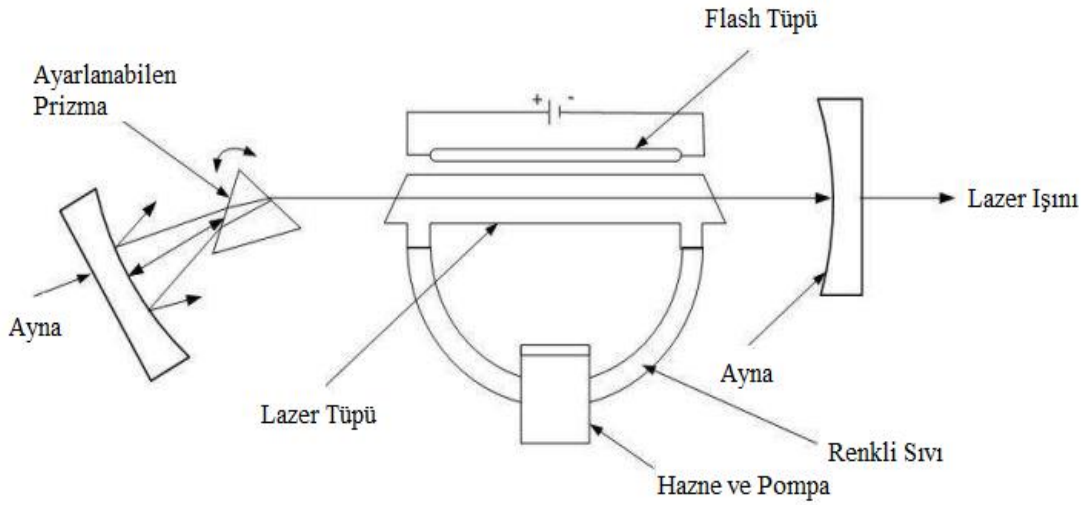
- Üretilen lazer ışınının frekansına bağlı olarak lazerler, sabit frekanslı ya da değışken frekanslı olmak üzere sınıflandırılabilirler (URL-11; URL-13).
- Üretilen lazer ışınları elektromanyetik spektrumda yer aldığı UV ışınları ile IR ışınları arasındaki bölgeye göre kızılötesi lazerler, görünür bölgedeki lazerler ve morötesi lazerler olarak sınıflandırılabilirler (URL-11; URL-13).
- Lazer sistemleri çalışma moduna göre sürekli atımlı (CW) ve darbeli atımlı olarak sınıflandırılabilirler. Darbeli atımlı lazerler kendi içerisinde Q-anahtarlamalı ve mod kilitlemeli olarak ayrıca sınıflandırılabilirler (URL-11; URL-13).
- Lazer sistemleri pompalama mekanizmasına göre, üç seviyeli lazer sistemleri ve dört seviyeli lazer sistemleri olarak sınıflandırılabilirler (URL-11; URL-13).

Fakat bu sınıflandırmalar dışında en yaygın ve en çok kullanılan sınıflandırma lazerin aktif maddesine göre yapılan sınıflandırmadır. Aktif maddesine göre lazerler; katı hal lazerleri, sıvı lazerler, gaz lazerler, yarı iletken lazerler ve plazma lazerler olarak 5'e ayrılır (Jelínková, 2013).

3.4.1. Sıvı Lazerler

Sıvı lazerler, lazer sistemi içerisinde yer alan aktif maddenin sıvı olduğu lazerlerdir. Bu lazerlerin en çok bilinen türü ise boya lazerleridir. Boya lazerlerinde organik bir boya ile çözücü bir solüsyondan oluşan seyreltik bir çözelti aktif maddeyi oluşturmaktadır (Şen, 2009). Bu çözücü genellikle metanoldür, organik boyalar için ise Rhodamine 6G ya da Xantene gibi çeşitli boya türleri bulunmaktadır (Kars, 2022; URL-17). Sıvı lazerlerde 300 ns ile 1500 ns gibi kısa aralıklarda lazer darbeleri elde edilebilir (Kars, 2022). 50 ile 100 nm aralıklarında geniş dalga boylarında yeşil ya da sarı renkli lazer ışığı üretilebilir (Potter ve diğ, 2021). Enerji kaynağının optik olduğu bu lazerlerde boşluk uzunluğu artırılarak ya da azaltılarak dalga boyları hassas bir şekilde ayarlanabilir. Ancak son yıllarda yarı iletken lazerlerde ayarlanabilirliğin artırılması ve maliyetin azalmasıyla sıvı lazerlere olan ilgi azalmıştır (Potter ve diğ, 2021).

Şekil 3.11’de bir örneği bulunan sıvı lazerin çalışma prensibi ise şu şekildedir; çözücü içerisinde çözünen boyanın atomları, pompalama işlemi sonucunda enerji seviyeleri arasında geçiş yaparak foton üretir. Bu foton başka bir atomun elektronlarını uyarır ve tekrar foton oluşumu gözlenir. Sisteme verilen enerji kesilmediği sürece karşılıklı aynaların da etkisiyle foton oluşumları artarak devam eder. Bunun sonucunda sistemde karşılıklı yerleştirilmiş aynalardan geçirgen olan ayna içerisinde fotonlar aynı faz ve frekans ile geçerek lazer ışını oluştururlar (Şen, 2009).

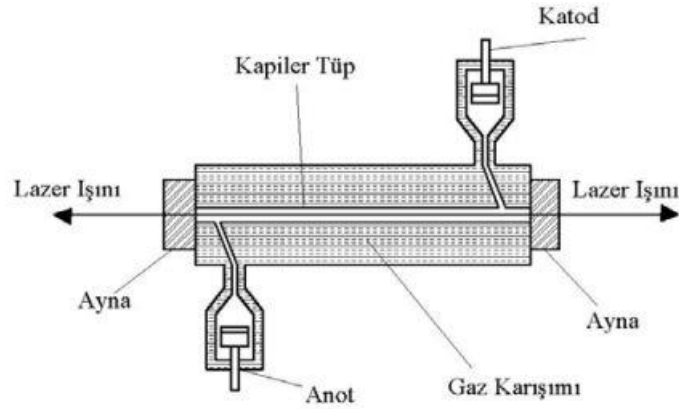


Şekil 3.11. Sıvı lazer sistemi (Şen, 2009)

3.4.2. Gaz Lazerler

Gaz lazerler lazer sistemi içerisindeki aktif maddenin gaz ya da gaz karışımından oluştuğu lazer türlerindedir. Bu lazerlerde en yaygın kullanılan aktif madde CO₂ gazı, He-Ne ya da Argon-Ion gaz karışımıdır. Gaz lazerlerin diğer lazerlerden önemli bir farklılığı bu lazerlerde enerji kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanılmasıdır. Bu lazer türleri elektrik enerjisinden lazer üretilen ilk lazer sistemi olup yine ilk defa bu lazer sistemleri ile CW lazer oluşumu gözlenmiştir (Kars, 2022).

Gaz lazer sistemleri diğer lazer sistemleri ile aynı bileşenlere sahip olup Şekil 3.12’de de görüldüğü üzere; enerji (pompalama) kaynağı, lazer aktif maddesinin bulunduğu kazanç ortamı ve optik rezonatörlerden oluşur (Çelen, 2006).



Şekil 3.12. Gaz lazer sisteminin temel bileşenleri (Çelen, 2006)

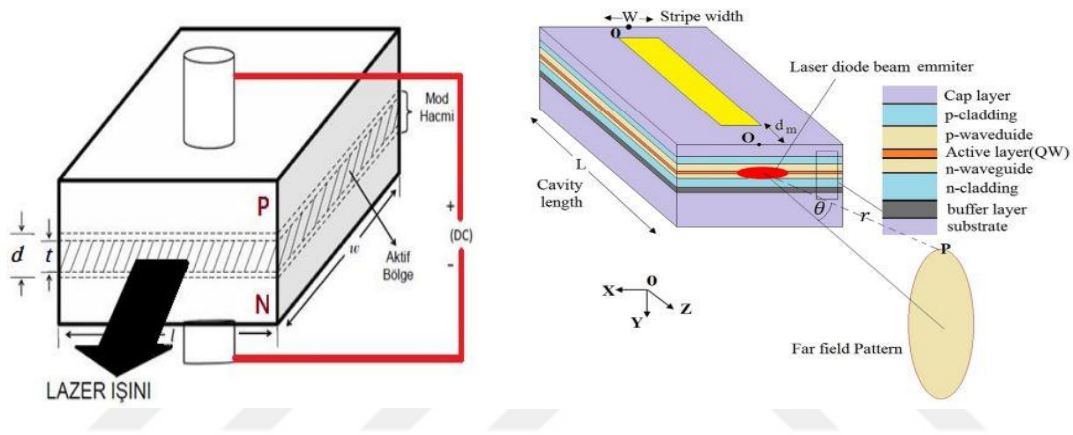
Gaz lazerlerin çalışma prensipleri He-Ne gaz karışımı içeren lazerler üzerinden şu şekilde anlatılabilir; He-Ne gaz lazerlerinde gaz karışımının büyük çoğunluğunu He gazı oluşturmaktadır. Bu gaz karışımına pompalama kaynağından yüksek voltajda 3 mA ile 20 mA arasında bir akım ile enerji gönderildiğinde He atomları Ne atomları ile çarpışarak üst enerji seviyelerine çıkar. Üst enerji seviyelerine çıkan atomlar diğer lazerlerde olduğu gibi bir süre sonra alt enerji seviyelerine geri inerler ve bu esnada foton yayılımı meydana gelir. Alt enerji seviyelerine inerken He atomları, Ne atomlarını tetikleyerek foton oluşumu devam eder. Nüfus terslenmesiyle artan foton oluşumu sonucu karşılıklı yerleştirilmiş aynaların da yardımıyla 632,8 nm dalga boyunda kırmızı renkli lazer ışını oluşumu gözlenir (Kars, 2022; URL-18). He-Ne gaz lazerlerinde güç çıkışı yaklaşık 0,5 mW-50 mW aralığında olup bu lazerler düşük maliyetli ve küçük boyutlardadır (URL-18).

Gaz lazerlerinin en bilinen bir diğer türü de CO₂ lazerleridir. CO₂ lazerlerinin aktif maddesi CO₂, He, N, H gibi elementlerin karışımından oluşmaktadır. Karışım içerisindeki N gibi elementler katalizör işlevi görerek atomların üst seviyelere çıkmasına yardımcı olurlar (Al-Qaisy, 2019). Bu lazerlerin verimi çok yüksek olup enerji kaynağından sistem içerisinde yer alan anot ve katotlara gönderilen 9-11 µm dalga boylarındaki DC akım ya da radyo frekansları ile çalışmaktadırlar (Çelen, 2006). Çalışma prensibi ise diğer lazer sistemleri ile aynı şekilde olup nüfus terslenmesi ve akabindeki uyarılmış yayılım sonucu lazer oluşumu gözlenir. CO₂ lazerlerin diğer lazerlere olan en büyük üstünlüğü MW

büyükliklerine varan güç seviyelerine ulaşılabilmesidir. Bunun dışında diğer lazerlere nazaran ışın kalitesi daha fazladır ancak güç yoğunluğu az, odak alanı geniştir (URL-18).

3.4.3. Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken lazerler, lazer diyot olarak adlandırılan kazanç ortamının yarı iletken malzemeler, elektrotlar ve bağlantı elemanları vasıtasıyla oluşturulduğu bir çeşit katı hal lazer sistemleridir. Boyutları çok küçük olup genellikle 1mm'nin altındadır. Bu sistemlerde P ve N katkılı yarı iletken materyal üzerinden elektrik geçirilerek lazer ışını oluşumu sağlanır (Özdemir, 2019; Abbasi ve diğ, 2017).



Şekil 3.13. Yarı iletken diyot lazerin şematik gösterimi (Özdemir, 2019)(Abbasi ve diğ, 2017)

Şekil 3.13'de iç yapıları gösterilen lazer diyotların en dışında elektrotlar bulunmaktadır. Elektrotlar lehim ile P ve N tipi eklemelere sabitlenmişlerdir. İki eklem arasında kalan boşluk ise uyarılmış emisyon işleminin gerçekleştiği ve sonucunda lazer ışınının oluştuğu bölgedir (Özdemir, 2019; Abbasi ve diğ, 2017).

Malzemelerin elektriksel iletkenliği, son yörüngesinde bulundurduğu elektron sayısına bağlıdır. Enerji-bant teorisine göre elektronlar atomun yörüngesinin en dışında bulunan valans bandı ya da iletkenlik bandı denilen bölgelerde toplanarak malzemenin elektriksel iletkenliğini belirlemektedirler. Elektronların valans bandında toplanması ve iletkenlik bandı ile arasında 4eV'dan fazla mesafe olması malzemenin yalıtkan olduğunu gösterir. Aradaki mesafenin fazla olmasından dolayı elektronlar valans bandından iletkenlik bandına geçiş yapamaz ve malzeme elektriği iletememiş olur. Yarı iletken malzemelerde ise aradaki boşluk daha azdır ve içerisine Al ilave edilmesi ile malzeme bant yapısı değiştirilerek elektrik iletkenliği değiştirilebilir (Özdemir, 2019).

Yarı iletken lazer sistemlerinde bir gerilim hattından sisteme elektrik verilerek atomların uyarılması ve elektronlarının enerji seviyelerini değiştirmeleri sağlanır. N bölgesinde yer alan elektronlar, P bölgesine geçerek nüfus terslenmesi oluşturur. Nüfus terlenmesi sonrası diğer lazer sistemleri ile aynı şekilde foton salınımı ve lazer ışını oluşumu gözlenir. Burada P-N eklemleri yansıtıcı özellikte olduğundan rezonatör görevi görmektedir (Özdemir, 2019; Abbasi ve diğ, 2017).

Lazer diyotlarda kullanılan en yaygın yarı iletken malzeme Alüminyum-arsenit Al-As ya da Galyum-arsenittir (Ga-As). Bu malzemelerden oluşturulan galyum-alüminyum-arsenit diyot lazeri (Ga-Al-As) ile, 750 nm ile 820 nm dalga boylarında lazer ışını elde edilebilmektedir (Özdemir, 2019).

3.4.4. Katı Hal Lazerleri

Katı hal lazerleri, içerisinde aktif madde olarak cam çubuk veya kristal çubuklardan oluşan katı malzeme kullanılan lazer sistemleridir. Uyarılmış soğurma ve uyarılmış emisyon ile sağlanan enerji düzeyleri arasındaki geçiş, çubuklara katılan ışığa özelliği bulunan iyonlar sayesinde gerçekleşir. Bu iyonlar toprak grubu elementlerinden neodyum, itterbiyum, erbiyum; geçiş metali elementlerinden titanyum ya da kromdur. Katı hal lazerlerinde en çok kullanılan kristaller; itriyum alüminyum granat ($Y_3Al_5O_{12}$), itriyum ortovanadat (YVO_4) ve ya safir (Al_2O_3) kristalleridir. Nadiren de sezyum kadmium bromür ($CsCd_3$) kristalleri kullanılmaktadır (Kars, 2022). Lazer sistemi içerisinde kullanılacak aktif madde, oluşacak lazer ışınından istenilen özelliklere göre seçilir. Kullanılan aktif maddenin türüne göre katı hal lazerleri; Yakut (Ruby) Lazer, Neodyum: YAG Lazerler ve Ti Safir Lazerler olarak sınıflandırılabilir (URL-12; Yüce, 2018; Karaağaçlı, 2019).

Katı hal lazerlerinde uyarılmış soğurma optik pompalama ile yapılmaktadır. Bu işlem oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda ve darbeli olarak yapılır (Şen, 2009). Katı hal lazerleri ile ortaya çıkan lazer ışınının dalga boyu lazer aktif maddesine göre değişkenlik göstermekle beraber bu lazerler ile 170 nm 3900 nm aralıklarında ultra kısa dalga boylu ışınlar üretilebilir. Katı hal atomların en sık dizildiği hal olduğu için katı hal lazerlerinde oluşan ışının enerji yoğunluğu yüksektir, bu lazerler yüksek titreşim kapasitesine sahiptirler (Yüce, 2018). Diğer lazer türlerine göre verimlilikleri yüksektir (Jelínková, 2013).

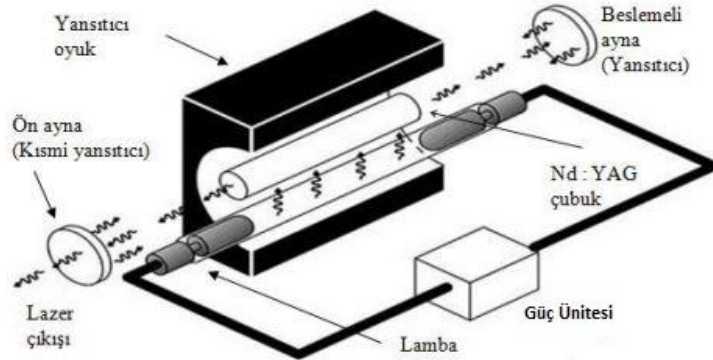
Katı hal lazerleri lazer kaynağında en sık kullanılan lazer sistemlerindedir.

3.4.4.1.Nd: YAG Lazerler ve Nd: YAG Lazer Sistemlerinde Lazer Oluşumu

Nd: YAG lazerler, bir çeşit katı hal lazeri olup, bu türün en yaygın kullanılan lazerlerindedir. Bu lazer türlerinde aktif madde olarak kimyasal formülü $Y_3Al_5O_{12}$ olan Yttrium (İtiryum)-Alüminyum-Granat'tan oluşan Nd^{+3} (Neodyum) katkılı suni kristal kullanılmaktadır (Çelen, 2006). Nd^{+3} (Neodyum)'un kristal içerisindeki katkı oranı %1 civarındadır. Bu orandan fazla Neodyum kullanılması durumunda Neodyum iyonlarının reaksiyonları sebebiyle floresan zamanı azalarak, uyarılmış emisyon süresinde bir düşüş gözlenir ve optik kalitede istenmeyen bir azalma oluşur (Akman, 2006).

Nd lazerlerde YAG kristali kullanılmadan önce farklı bileşiklerden oluşan kristaller de kullanılmıştır ancak optik kayıplar açısından en verimli kristal YAG kristali olmuştur. Bu kristal 760 nm, 808 nm ve 885 nm dalga boylarında etkin bir şekilde pompalanarak, 946 nm, 1064 nm, 1120 nm, 1320 nm ve 1440 nm dalga boylarında emisyon yapabilir. YAG kristali, ısı iletkenliği ve optik özelliklerinin iyi olması ve istenilen sertlik ile dayanıklılıkta olması sebebiyle lazer üretimi için sıklıkla tercih edilmektedir (Kahraman, 2017).

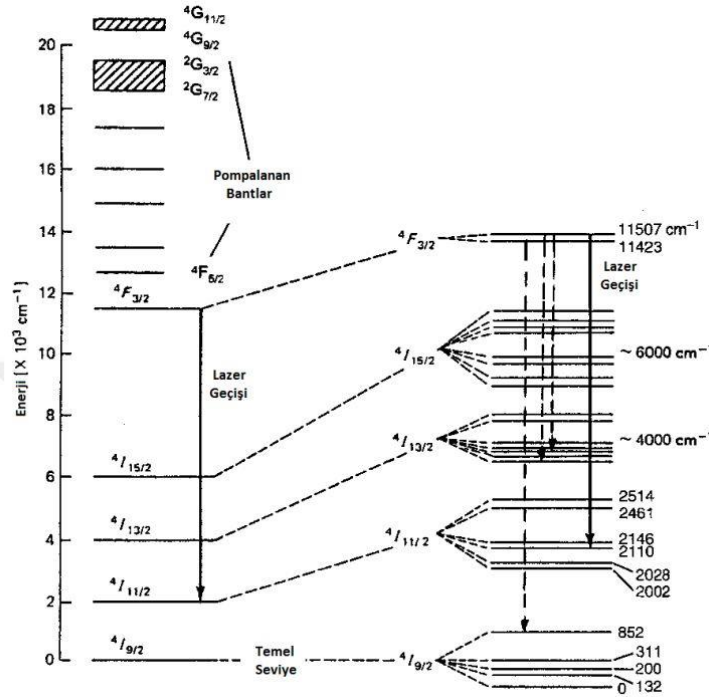
Nd: YAG lazer sistemleri Şekil 3.14'te de görüldüğü üzere diğer katı hal lazerleri gibi lazer aktif maddesi, enerji (pompalama) kaynağı, optik resonatör (yansıtıcı aynalar) ve odaklama elemanlarından oluşmaktadır (Güneş, 2012).



Şekil 3.14. Nd: YAG lazer sistemi (Güneş, 2012)

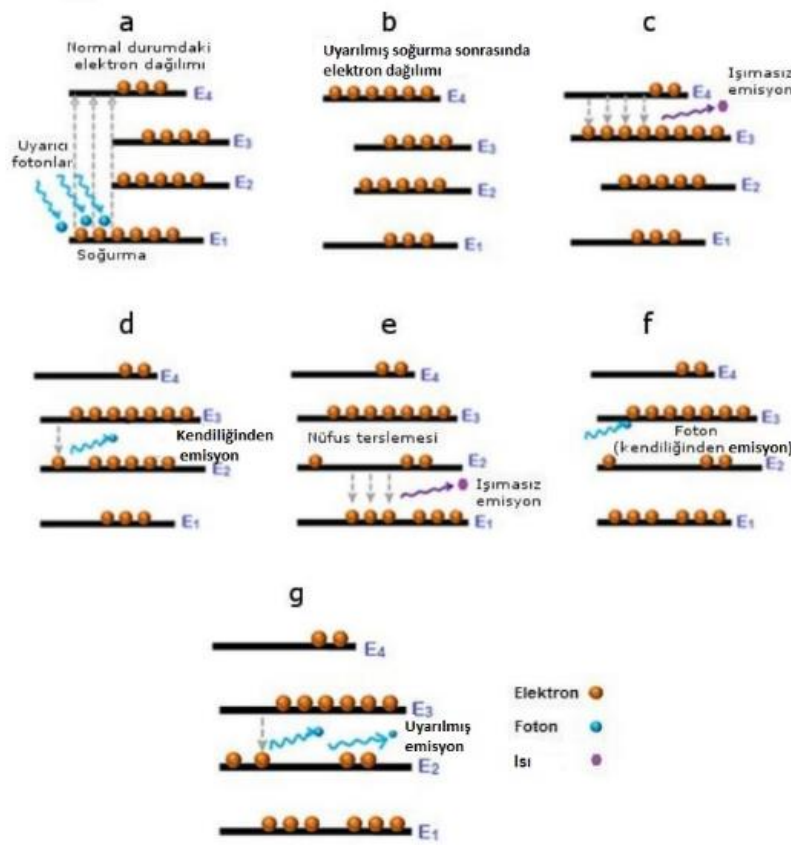
Nd: YAG lazerlerde aktif madde optik olarak pompalanmaktadır, bu işlem için de genellikle lamba ya da diyot lazerler kullanılır (Kahraman, 2017). Nd: YAG lazerlerde kullanılan lambalar çoğunlukla Tungsten Flement lamba ya da Xenon veya Krypton ark lambalarıdır. Xenon veya Krypton ark lambaları lazerin sürekli modda çalıştığı durumlarda, flaş lambaları ise atımlı modda çalıştığı zamanlarda kullanılır. Alüminyum galyum arsenit (AlGaAs) ve indiyum galyum arsenit (InGaAs) diyot lazerleri de yine Nd: YAG lazerlerin pompalanmasında kullanılan lazer sistemi elemanlarından (Kahraman, 2017).

Nd: YAG lazer sistemlerinde kullanılan nadir toprak elementlerinin 4f kabuğu kısmı doluluğa sahiptir. Bu sebeple bu sistemler 3 katlı lazer geçişi bulunan 4 enerji seviyeli sistemlerdir, enerji geçişleri 4 seviye arasında gerçekleşir (Kahraman, 2017). Şekil 3.15'te Nd: YAG lazerin enerji seviyeleri ve lazer oluşumu meydana gelen enerji kademeleri gösterilmektedir. Bu gösterimde ${}^4F_{5/2}$ enerji bant düzeyi E₄ seviyesini, ${}^4F_{3/2}$ enerji bant düzeyi E₃ seviyesini, ${}^4I_{11/2}$ enerji bant düzeyi E₂ seviyesini, ${}^4I_{9/2}$ enerji bant düzeyi E₁ temel enerji seviyesini göstermektedir. E₄'ten E₃ ve E₂'den E₁ seviyesine geçişlerde ısı yayılımı gerçekleşirken E₃ seviyesinden E₂ seviyesine geçişte lazer ışığının temeli olan foton yayılımı gerçekleşir (Kahraman, 2017).



Şekil 3.15. Nd: YAG lazerinde enerji seviyeleri (Kahraman, 2017)

Lazer ışını oluşumunun temelleri daha önceki bölümlerde 2 enerji düzeyli sistemler üzerinden anlatılmıştı. Nd: YAG lazer sistemleri 4 enerji düzeyli sistemler olduğu için bu aşamada Şekil 3.16 üzerinden yeniden anlatılacaktır;



Şekil 3.16. Nd: YAG lazer sistemlerinde enerji seviyeleri arasında geçiş ve lazer oluşumu (Kahraman, 2017)

1. Aşama: Optik Pompalama ile Uyarılmış Soğurma: Şekil 3.16 a'da görüldüğü üzere ilk aşamada Neodyum katkılı YAG suni kristaline optik pompalama yapılır. Şekil 3.16 b'de YAG kristali içerisindeki Neodyum atomlarının elektronları temel seviye olan E_1 seviyesinden E_4 seviyesine geçerek uyarılmış soğurma işlemi gerçekleştirirler (Kahraman, 2017).

2. Aşama: Kendiliğinden Emisyon ve Isı Yayılımı: Şekil 3.16 c'de E_4 seviyesinde kararsız halde olan elektronların çoğunluğu $230 \mu s$ gibi kısa bir süre sonunda bir alt seviye olan E_3 seviyesine inerek ışımasız emisyon işlemi gerçekleştirirler. Bu işlem sonunda dışarıya ısı salınımı olur. Şekil 3.16 d'de E_3 seviyesinde de kararlı halde olmayan elektronlar yine $550 \mu s$ gibi kısa bir süre sonunda E_2 seviyesine geçerek kendiliğinden emisyon olayını gerçekleştirirler. Bu işlem sonunda foton yayılımı olur. E_2 seviyesindeki

atomlar 30 ns gibi kısa bir süre sonunda bir alt seviye olan E_1 seviyesine geri inerler. Şekil 3.16 e’de görülen bu işlem sonunda dışarıya ısı salınımı olur (Kahraman, 2017).

3. Aşama: Uyarılmış Emisyon, Nüfus Terslenmesi ve Lazer Işını Oluşumu: Elektronların E_3 enerji seviyesinden E_2 enerji seviyesine geçişi esnasında ortaya çıkan fotonlar normal şartlarda dağınıktır ve tek yönlü değildir. Şekil 3.16 f’de kendiliğinden emisyon sonucu oluşan bu fotonlar lazer sistemi içerisinde karşılıklı konumlandırılan aynalara çarparak E_3 enerji seviyesindeki elektronlar ile etkileşime girerler. Etkileşim sonucu E_3 seviyesindeki elektronlar uyarılmış emisyon ile bir alt enerji seviyesi olan E_2 ’ye inerler. Şekil 3.16 g’de yansıtıcı aynalar bu işlemlerin tekrarlanmasına sebebiyet vererek ışın demetlerini bir noktada toplar ve sonucunda monokromatik, koherent bir lazer ışını oluşur (Kahraman, 2017).

Katıhal lazerlerinde kullanılan aktif madde atomik durumundan dolayı oluşan lazer ışınının özelliklerini belirlemektedir. Neodyum katkılı suni kristal kullanılan Nd: YAG lazerlerinin de optik ve spektroskopik parametreleri Tablo 3.1’de belirtildiği şekildedir.

Tablo 3.1. Nd: YAG lazerine ait optik ve spektroskopik parametreler (Akman, 2006)

Lazer dalgaboyu (λ_{ul})	1,064 μm
Lazer geçiş olasılığı (A_{ul})	$4,3 \times 10^3/\text{s}$
Üst seviye yaşam ömrü (T_{ul})	230 μs
Uyarılmış yayılma kesit alanı (σ_{ul})	$6,5 \times 10^{-23}/\text{m}^2$
Kendiliğinden yayılma çizgisi genişliği	$1,2 \times 10^{11}/\text{s}$
Kazanç bant genişliği, FWHM (ΔV_{ul})	$\Delta V_{ul} = 0,45 \text{ nm}$
Tersinme yoksunluğu (ΔN_{ul})	$1,6 \times 10^{23}/\text{m}^3$
Küçük sinyal kazanç katsayısı (g_0)	10/m
Lazer kazanç ortamı uzunluğu (L)	0,1-0,15 m
Katkı yoğunluğu	$1,4 \times 10^{26}/\text{m}^3$
Kazanç ortamı kırılma indisi	1,82
Çalışma sıcaklığı	300 K
Lazer çubuğu ısıl iletkenliği	13 W/m-K

Tablo 3.1. (Devam) Nd: YAG lazerine ait optik ve spektroskopik parametreler (Akman, 2006)

Lazer çubuğu ısıl genleşme katsayısı	$6,9 \times 10^{-6}/K$
Pompalama modu	Flaş lambası / lazer
Pompalama bandı	300-900 nm tepe noktaları 810 nm ve ya 750 nm
Çıkış gücü	1 Joule /atım
Çalışma modu	Tekli ve ya çoklu mod

Nd: YAG lazerlerde çıkış güçleri genellikle 0,3-3 kW civarındadır ve oluşan lazerin dalga boyu 1064 nm'dir. Bu lazerler sürekli mod, darbeli mod ve $Q_{anahtarlamalı}$ mod olmak üzere üç farklı çalışma modu ile çalışabilmektedirler (Çelen, 2006). Bu çalışma modları pompalamanın devamlı ya da aralıklı olmasına göre değişir (Güneş, 2012). Lazerden istenilen verimin elde edilebilmesi ve lazerin parçaya olan etkisinin kontrolü için lazerin hangi modda çalıştırılacağı önemlidir. Sürekli modda lazer çalıştığı süre boyunca ışın kesintisiz olarak ortaya çıkmaktadır. Darbeli modda ise lazer ışını belirli bir zaman aralığında kesintili olarak ortaya çıkar. Lazer kaynağı için darbeli modda çalıştırılan lazer sistemlerinde 0,1-20 ms darbe sürelerinde 1kHz'lere varan darbe frekansları gözlenmektedir (Çelen, 2006). $Q_{anahtarlamalı}$ sistemlerde optik rezonatörlerin konumu bozulur ya da rezonatörler geçici olarak kaldırılır. Pompalama işlemi devam ettikçe nüfus terslenmesiyle meydana gelen üst enerji seviyesindeki atom sayısı daha da artar. Yansıtıcı aynalardaki titreşimlerin bilinçli olarak geciktirilmesi işlemine $Q_{anahtarlamalı}$ mod denilir. Bu modda çalışan lazer sistemlerinde rezonatörler devreye girdiği anda üst seviyedeki atomlar hep birlikte alt enerji seviyesine geçeceklerinden yüksek güçte lazer ışınımı oluşur. Nd: YAG lazerler E_4 seviyesinde kalma ömrünün uzunluğu sebebiyle $Q_{anahtarlamalı}$ için uygundur ancak darbe sürelerinin kısa olması kaynağa olan uygunluğunu azaltmaktadır (Çelen, 2006; Güneş, 2012).

Tablo 3.2. Çalışma moduna göre Nd: YAG lazerlerin karakteristikleri (Çelen, 2006)

Mod	Ortalama Güç (kW)	Tepe Gücü (kW)	Darbe Süresi	Darbe Frekansı	Enerji / Darbe
Sürekli	0,3 - 4	-	-	-	-

Tablo 3.2. (Devam) Çalışma moduna göre Nd: YAG lazerlerin karakteristikleri (Çelen, 2006)

Darbeli	→4	→50	0,2-20 mS	1-500 Hz	→100
Q- Anahtarlama	→4	→100	< 1 mS	→100 kHz	10 ⁻³

3.5. Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı, lazer ışınının birleştirilecek parçaların birleşim noktasına odaklanması sonucu birleştirilecek parçalarda ya da kullanılması durumunda dolgu malzemesinde ergime oluşması ve parçaların soğuyarak katılaşması ile birleşmenin sağlandığı kaynak yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile alüminyum, bakır, krom, çelik, platin, titanyum vb. bir çok malzemenin birleştirilmesi mümkündür (Güneş, 2012).

Lazer sistemlerinden çıkan lazer ışınları çok kısa sürede parçaya ulaşır. Işının malzeme üzerinde odaklandığı noktada ışığın bir kısmı malzeme tarafından emilir, bir kısmı da malzeme üzerinden yansır. Belirli bir noktaya odaklanmış yüksek enerji yoğunluğundaki lazer ışınları malzemede ısınmaya yol açar ve devamında ergime ile buharlaşma olayları gözlenir. Lazer kaynağı oluşumunun temeli bu ergime ve buharlaşma olayına dayanır ancak lazer ışınının güç yoğunluğuna bağlı olarak iki farklı şekilde lazer kaynağı yapılabilmektedir. Bunlardan ilki iletim kaynağı ikincisi ise nüfuziyet kaynağıdır (Güneş, 2012; Yüce, 2018).

3.5.1. Lazer İletim Kaynağı

İletim kaynağı ince parçaların birleştirilmesinde kullanılan lazer kaynağı yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde parçaya odaklanan lazer ışınının enerji yoğunluğu azdır. Bu sayede ergime parçanın yüzeyine yakın bölgelerde olur, kaynak derinliği de fazla olmaz. İletim kaynağı ile nüfuziyet kaynağı arasındaki en önemli farklılık iletim kaynağında oluşan kaynak havuzunun kapalı olmasıdır (Akman, 2006).

İletim kaynağındaki kaynak oluşumunun fiziksel aşamalarından bahsedilecek olunursa, ilk olarak birleştirilecek parçaların kaynak yapılacak bölgesine lazer ışını odaklandırılır. Işının yüzeyden yansımaya uğramayan kısmı parça yüzeyinden soğurularak parçanın içerisinde dağılır. Kaynak işleminin gerçekleşmesi için parçaya gönderilen lazer ışınının enerjisi, parça sıcaklığını malzemenin ergime sıcaklığının üzerine çıkarmayacak bir seviyede olması gerekmektedir. Bu sayede buharlaşma minimum olur ve ergime ile parçaların

birleşmesi sağlanır. Bu enerji yoğunluğu için sınır değer parça malzemesine bağlı olmakla birlikte genellikle 106 W/cm^2 civarındadır, bu güç üzerinde parçanın buharlaşması artarak nüfuziyet kaynağına geçiş olur. Lazer ışını ile parçanın sıcaklığı ne kadar arttırılırsa ergime o kadar fazla olur buna bağlı olarakta kaynak derinliği artar. Birleştirilecek parçaların birleştirilme şekline göre lazer ışını parça üzerine darbeli modda punto kaynağı şeklinde ya da sürekli modda birleştirilecek yüzeylerde doğrusal olarak ilerletilmek suretiyle gönderilir (Akman, 2006).



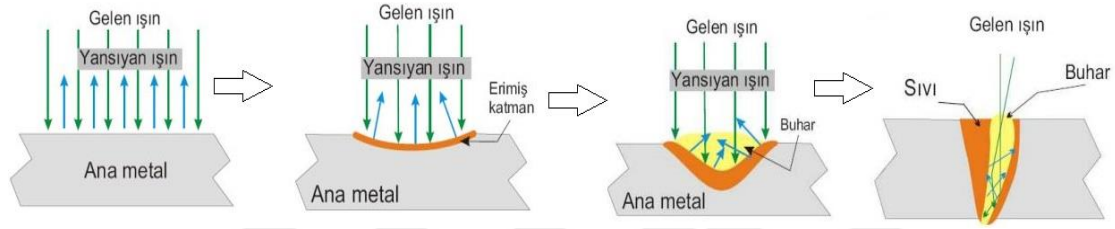
Şekil 3.17. Lazer iletim kaynağı (Çetin, 2019)

0,5 mm'nin altında inceliğe sahip sac parçaların birleştirilmesinde bu kaynak yönteminin daha etkili olduğu görülmüştür (Çetin, 2019).

3.5.2. Lazer Nüfuziyet Kaynağı

Lazer nüfuziyet kaynağı lazer ışınının enerji yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda ortaya çıkan kaynak yöntemidir. Bu yöntemde yüksek enerji sebebiyle ergime parça yüzeyleri ile sınırlı kalmayıp daha derinlere inerek parçada açık bir kaynak havuzu oluşmasına sebep olur. Kaynağın parça kesitinde oluşturduğu kaynak metali şeklinden dolayı İngilizcede keyhole (anahtar deliği) olarak adlandırılan yöntem Türkçede nüfuziyet kaynağı şeklinde ifade edilmektedir. Yüksek enerjili ışın sebebiyle bu yöntemle yapılan kaynaklar daha derin olmaktadır bu sebeple kalın parçaların birleştirilmesi için daha uygun bir yöntemdir (Akman, 2006).

Nüfuziyet kaynağı ile birleştirme yapılan parçalarda kaynak oluşumunun fiziksel aşamaları iletim kaynağından daha farklıdır. Bu yöntemde yüksek güç yoğunluğundaki lazer ışını parça üzerine odaklandığında parçada ergime ile beraber buharlaşma da görülür. Ergimiş sıvı malzeme ile oluşan buharın basıncı malzemede anahtar deliği şeklini anımsatan bir kanal oluşturur. Buharlaşan malzemenin oluşturduğu plazma da lazer ışını soğurarak kanalın yan duvarlarına etki eder ve parçanın yan duvarlarını ergiterek kanalın genişlemesine yol açar. Buharlaşan malzemenin buhar basıncı, oluşan plazmanın etkisi ve yüzey gerilimi ile ergimiş sıvı malzeme parça üzerinde ileri yönde hareket ederek açık bir kaynak havuzu oluşturur. Kaynak havuzu lazer ışını uzaklaştıkça soğuyarak katılaşır ve sonucunda iki parça birleşmiş olur (Akman, 2006).



Şekil 3.18. Lazer nüfuziyet kaynağı aşamaları (Akman, 2006)

3.5.3. Lazer Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

Lazer ışınının uzun mesafelerde yayılmadan doğrusal bir şekilde iletilebilmesi, tek bir noktaya odaklanarak kontrollü enerji aktarımı yapılabilmesi ve benzeri birçok özelliklerinden dolayı lazer kaynağının diğer kaynak yöntemlerine nazaran birçok avantajı bulunmaktadır (Güneş, 2012). Tablo 3.3’de belirtilen nüfuziyet lazer kaynağı ve iletimle lazer kaynağının avantaj ve dezavantajlarına ek olarak lazer kaynağının diğer avantaj ve dezavantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz;

Tablo 3.3. Lazer iletim ve lazer nüfuziyet kaynağının avantajları ve dezavantajları (Quintino, 2013)

Kaynak Türü	Avantajları	Dezavantajları
Nüfuziyet Lazer Kaynağı	Düşük ısı girdisi sebebiyle bozulmalar az olur. En-boy oranı yüksektir, kaynak derinliği fazladır. Verimlidir.	Kaynak sürecinin kontrolsüzlüğü Yüksek düzeyde gözeneklilik Büyük miktarda sıçrama Alaşım elementlerinin kaybı Mekanik özelliklerin bozulması Nispeten iyi ışın kalitesine sahip bir lazer sistemi gerektirir.

Tablo 3.3. (Devam) Lazer iletim ve lazer nüfuziyet kaynağının avantajları ve dezavantajları (Quintino, 2013)

İletimle Lazer Kaynağı	Kaynakta gözeneklilik ve çatlak görülmez. Kaynak sırasında sıçramalar görülmez. Isı girdisi kontrollü bir şekilde sağlanabilir. Yüksek kaliteli ışına sahip lazer sistemlerine gerek yoktur.	Kaynakta düşük verim Yavaş bir kaynak süreci Yüksek ısı girdisinin parçada bozulmaya yol açması
------------------------	---	---

Lazer kaynağının avantajları;

- ✓ Lazer ışınının küçük bir alana odaklanabilmesi sebebiyle, lazer kaynağıyla 5×10^{10} - 10^{12} W/m² aralığındaki yüksek güç yoğunluklarına ulaşılabilir (Akman, 2006).
- ✓ Lazer kaynağıyla yüksek hızda kaynak yapılabilir bu sayede dar bir kaynak dikişi oluşur. Kaynak dikişinin dar olması parçaların ısıdan etkilenen bölgesinin az olması ve parçada deformasyon oluşma riskini azaltır (Akman, 2006).
- ✓ Lazer kaynağında kaynaklı bölgenin derinlik/genişlik oranı fazladır. Bu sayede kalın parçalar dar bir kaynak dikişi ile birleştirilebilir (Akman, 2006).
- ✓ Lazer kaynağı ile farklı türden malzemeler kaynaklanabilir, birleştirme için ek bir dolgu malzemesine ihtiyaç duyulmaz (Yüce, 2018).
- ✓ Lazer kaynağı temiz bir kaynak yöntemidir, kaynak sonrası kirliliğe yol açmaz (Akman, 2006).
- ✓ Lazer kaynağı otomasyona uygundur, lazer kaynağı ile dar ve ulaşılması zor bölgelerde hassas bir şekilde kaynak yapılabilir (Akman, 2006).
- ✓ Manyetik alandan etkilenmez, vakum ya da x ışını korumasına ihtiyaç duyulmaz (Yüce, 2018).

Lazer kaynağının dezavantajları;

- ✓ Lazer kaynağı ve lazer kaynağı için kullanılan ekipmanlar konvansiyonel kaynak yöntemlerine nazaran daha yüksek yatırım maliyetine sahiptir. Özellikle Nd: YAG lazerlerde güvenlik önlemleri için alınan ek malzemeler bu kaynağın maliyetini daha da arttırabilir (Olsen, 2019).

- ✓ Yüksek hızlı kaynağa bağlı hızlı soğuma sebebiyle kaynaklı parçada sıcak çatlama, sıvı çatlama görülebilir. Kaynaklı bölgenin kaynak dikişi çok sert olup kırılma katılaşma mikroyapıları görülebilir (Olsen, 2019).
- ✓ Yüksek güçlerde parçada sıçramalar görülebilir, bu sıçramalar lazer sistemine zarar verebilir (Olsen, 2019).
- ✓ Lazer ışınlarının yansıtıcı özelliğinden dolayı ek tedbirler alınmalıdır, ışınların göz ya da cilt üzerinde herhangi bir bölgeye ulaşması bazı sağlık problemlerine yol açabilir (Olsen, 2019).
- ✓ Lamba pompalamalı Nd: YAG lazerler %1-2 arasında enerji verimliliği sağladığı için lazer kaynağının dezavantajı olarak görülebilir ancak fiber lazerler ya da doğrudan diyot lazerler ile bu oran %30'a kadar çıkmıştır (Olsen, 2019).

3.5.4. Lazer Kaynak Parametreleri

Lazer kaynağı yüksek kalitede kaynak dikişi ile parçaların birleştirilebildiği bir kaynak yöntemidir. Lazer kaynağı ile lazer ışını kontrollü bir şekilde parçalar üzerine gönderilerek zor şartlarda dahi hassas bir kaynak yapılabilir. Ancak kaynaktan istenilen verimin alınabilmesi önemli ölçüde kaynak parametrelerinin doğru bir şekilde seçilebilmesine bağlıdır. Kaynak parametreleri doğru seçilemediğinde kaynaktan istenmeyen mikroyapıların oluşması, parçalarda yeterli birleşme sağlanamaması hatta birleştirme amaçlı yapılan kaynağın birleştirmenin aksine parçayı delmesi ile sonuçlanması mümkündür (Akman, 2006).

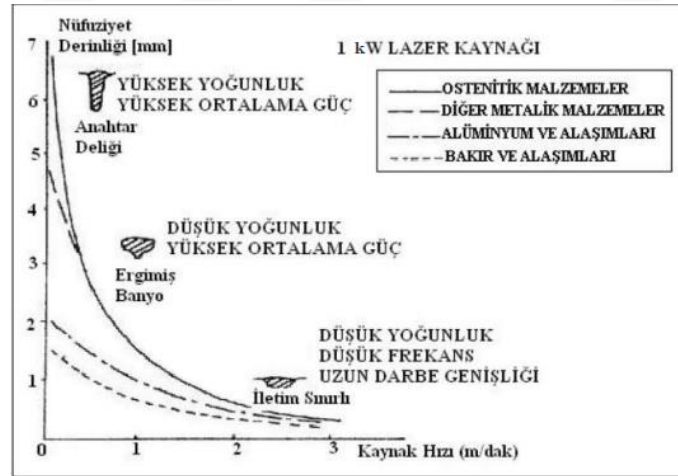


Şekil 3.19. Lazer kaynağında kaynağın kalitesine etkisi olan kaynak parametreleri (Akman, 2006)

Kaynağın kalitesini etkileyen en önemli kaynak parametreleri; lazer gücü, kaynak hızı, odak mesafesi ve koruyucu gaz şeklinde sıralanabilir. Bu parametrelere ek olarak lazer sisteminin çalışma modu, lazer ışını açısı, ışının dalga boyu ya da frekansı, kaynak yapılacak malzemelerin cinsi, kaynak yüzeyi vb. gibi birçok faktör lazer kaynağının kalitesini etkilemektedir. Biz bu aşamada kaynağa etkisi en çok olan parametreleri inceleyeceğiz (Akman, 2006).

3.5.4.1. Lazer Gücü

Lazer kaynağındaki en önemli parametrelerden biri lazer gücüdür. Lazer gücü arttıkça nüfuziyet ve buna bağlı olarakta kaynak derinliği artar. Bu sebeple lazer gücü lazer kaynağının türünü belirleyen bir parametre olup malzemenin cinsine de bağlı olmakla birlikte ortalama 106 W/cm^2 'nin üzerindeki değerlerinde lazer nüfuziyet kaynağı, altındaki değerlerinde de lazer iletim kaynağı görülür. Ancak lazer gücü hiç bir zaman tek başına kaynağın türünü etkileyen bir parametre olmamaktadır. Genellikle lazer gücü lazer hızı ile birlikte değerlendirilmelidir. Lazer gücü sabit olsa da farklı hızlarda lazer ışınının parçaya nüfuziyeti değişmekte ve kaynağa etkisi farklı olmaktadır (Akman, 2006).



Şekil. 3.20. Nd: YAG lazerde kaynak parametrelerinin malzemeye bağlı olarak kaynak türüne etkisi (Çelen, 2006)

Kaynak hızı dışında lazer gücü ile birlikte kaynağın parçadaki nüfuziyetine etkisi olan bir diğer faktör de lazer ışınının çapıdır. Lazer ışınının parçaya olan etkisini sadece lazer gücü ile değerlendirmek yetersiz kalır. Bu sebeple kaynağın değerlendirilmesi için lazer

ışın çapına bağlı olarak değişen lazer güç yoğunluğunu baz almak gerekir. Lazer güç yoğunluğu Denklem (3.11) ile ifade edilebilir (Güneş, 2012).

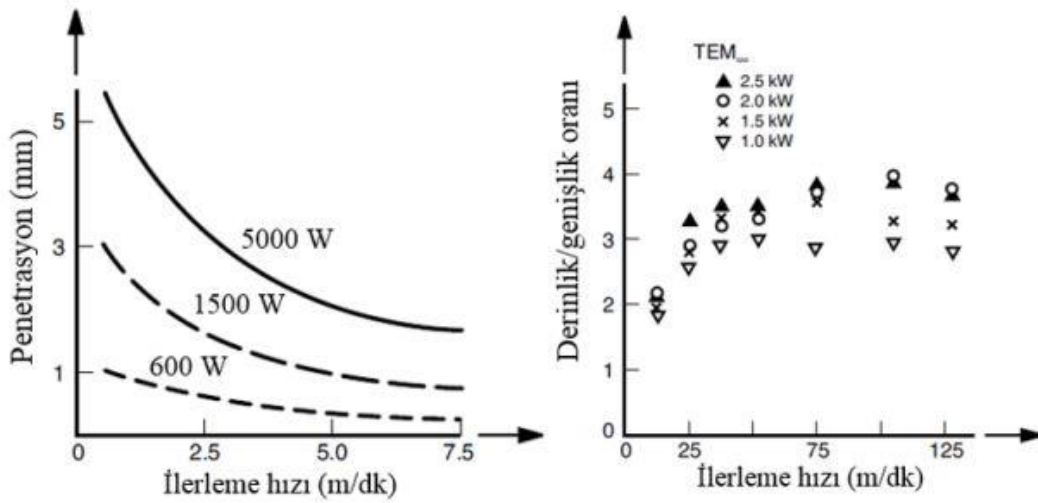
$$P_d = 4P_{in} / \pi D_b^2 \quad (3.11)$$

Burada P_d : Lazer güç yoğunluğu, P_{in} : Işın demetinin gücü, D_b : Lazer ışın çapıdır.

Denklem (3.11)'den de anlaşıldığı üzere lazer ışınının gücünün azalması ya da lazer ışın çapının artması lazerin nüfuziyetini azaltarak kaynak derinliğini azaltacaktır (Güneş, 2012).

3.5.4.2. Kaynak Hızı

Kaynak hızı, lazer gücü ile birlikte kaynağın kalitesini önemli ölçüde etkileyen bir diğer parametredir. Kaynak hızının yavaş olması belirli bir süre içerisinde parçaya daha fazla enerji geçişi olmasına yol açtığı için diğer parametrelerde değişiklik olmaması durumunda kaynak hızının azalması ile kaynak nüfuziyeti ve buna bağlı olarak kaynağın derinlik / genişlik oranı artar (Yüce, 2018).



Şekil 3.21. Lazer gücü ve kaynak hızına bağlı penetrasyon ve derinlik/genişlik oranı değişimi (Yüce, 2018)

Kaynak hızı nüfuziyete ek olarak kaynak metalinin soğuma sonrası şekline de etki eden bir parametredir. Lazer ışını üzerine düştüğü malzemeyi ergittiği için belirli bir hızın üzerindeki kaynak hızlarında ergimiş malzeme kaynak havuzunun içerisine yönelir ve orayı doldurarak soğuma sonrasında o bölgede bir tümsek oluşturur. Kaynak hızının yavaş olması durumunda ise ergimiş malzeme o bölgede halen lazer ışınının bulunması

ve yavaş geçişinden kaynaklı olarak dışarı doğru yönelir. Soğuma sonrasında bölgede tümsekliğin aksine bir çukur oluşturur (Güneş, 2012).

Kaynak hızının etkilediği bir diğer husus kaynaklı parça metalurjisinde gözlenen porozitedir. Kaynak hızı artışı kaynaklı parçada gözenekliliğin artmasına yol açar (Güneş, 2012).

3.5.4.3. Koruyucu Gaz

Koruyucu gaz lazer kaynağı üzerinde etkisi büyük olan parametrelerden bir diğeridir. Koruyucu gazın lazer kaynağına iki önemli etkisi vardır. Bunlardan ilki kaynak yapılan bölgede plazma oluşumunu en aza indirerek kaynak nüfuziyetini sağlamak, ikincisi ise ergimiş metalin havadaki gazlar ile etkileşime girmesini engelleyerek yüzeyde oksidasyon oluşmasını önlemektir (Akman, 2006).

Kaynağın yapıldığı bölgede oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle buharlaşan metal lazer ışınını emer ve kaynak yapılan bölgede plazma oluşumu gözlenir. Bu plazma lazerin parçaya geçişini engelleyerek ergimenin verimsiz olmasına ve parçalarda tam birleşme sağlanamamasına yol açar. Koruyucu gaz oluşan metal buharı ve plazmayı kaynak bölgesinden uzaklaştırarak kaynak verimini artırır. Koruyucu gaz ikinci görevi olan ergimiş metalin oksijen ile etkileşime girmesini engellemesi dışında hidrojen ve azot gibi diğer gazlar ile de etkileşime girmesini engeller. Bu sebeple kaynak yüzeyini oksidasyona karşı korumakla kalmayıp mikroyapıda talep edilmeyen mekanik değişikliklere karşı da korur. Aynı zamanda metal dışında lazer sistemini de sıçramalar ve metal buharına karşı korur (Güneş, 2012).

Koruyucu gazın türü dışında koruyucu gaz ile ilgili olarak; gazın çıkış hızı, gazın parçaya geliş açısı ve hatta gaz nozul dizaynı gibi tüm etmenler kaynak kalitesine ayrı ayrı etki etmektedir. Örneğin koruyucu gaz hızının belli bir değer altında kalması durumunda tam koruma sağlanamaz ve metal yüzeyinde oksitlenme görülür. Hız değerinin yüksek olması durumunda ise gaz basıncı ile ergimiş metalde yönelme görülür ve kaynak metalinde şekil bozukluğu oluşur (Akman, 2006).

Lazer kaynağında koruyucu gaz olarak genellikle He ve Ar kullanılır. Bunun dışında N₂, CO₂ ve O₂ gibi gazlar ve bunların belirli oranda karışımları da kullanılmaktadır. He iyonlaşma enerjisi yüksek olan, metal ile reaksiyona girmeyen iyi bir koruyucu gazdır.

He ile plazma oluşumunun kontrolü yüksek oranda sağlanabilir fakat pahalı bir gaz olduğu için kullanımı kısıtlıdır. Argon gazının ise iyonlaşma enerjisi Helyuma nazaran daha düşüktür ve metallerle tepkimeye girmesi mümkündür. Yoğun bir gaz olduğundan dolayı etkin bir şekilde koruma yapar ve pahalı bir gaz olmaması sebebiyle sıklıkla koruyucu gaz olarak kullanılır. Argon gazı ile korunan parçalarda kaynaklı yüzey daha pürüzsüzdür (URL-20).

Tablo 3.4. Lazer kaynağında yaygın olarak kullanılan koruyucu gazların karşılaştırılması (URL-20)

Koruyucu Gaz	Plazma Önleme Etkisi	Oksidasyon u Önleme Etkisi	Maliyet	Yaygın Akış Debisi	Kaynak Profili	Sınırlamalar
He	Mükemmel (24,5 eV)	İyi	Yüksek	30-40 l/dk	En derin penetrasyon	Yok
Ar	Daha düşük (15,7 eV)	Mükemmel	Orta	20-25 l/dk	Geniş	Plazma bulutu güç yoğunluğunu azaltır
N ₂ oksijensiz	Daha düşük (15,5 eV)	İyi	Düşük	20-25 l/dk	Derin	Bazı alaşımları gevrekleştirir (Ör:Ti)
CO ₂	Daha düşük (14,4 eV)	Zayıf	En düşük	30-45 l/dk	Nominal	Reaktif malzemeler için kullanışlı değil
20% He-80% Ar	İyi	Çok iyi	Orta	30-35 l/dk	Nominal	Yok

3.5.4.4. Diğer Kaynak Parametreleri

Lazer gücü, kaynak hızı ve koruyucu gaz gibi temel kaynak parametreleri dışında lazer kaynağının kalitesine etki eden birçok kaynak parametresi bulunmaktadır. Bu aşamada kısaca diğer kaynak parametrelerinin etkilerine değinilecektir.

Odak uzaklığı ve odak noktası: Lazer ışınının odak noktası odaklanan noktanın parça üzerindeki konumunu, odak uzaklığı ışının odaklandığı noktanın parçaya uzaklığını ifade etmektedir. Parçanın tam üzerine yapılan odaklamalarda odak uzaklığı 0'dır. Parçadan

daha yükseğe parça dıŐına yapılan odak pozitif odağı, parça içerisine yapılan odak ise negatif odağı temsil etmektedir. Odak noktası yüksek enerji yoğunluğuna maruz kaldığı için bu parametreler kaynağın nüfuziyetine etki etmektedir. Pozitif odak noktalarında yansımalarından kaynaklı kayıplar sebebiyle nüfuziyet tam sağlanamamaktadır. Parça üzerinde ya da içerisine yapılan odaklarda ise nüfuziyetin daha iyi olduğu görülmüştür. Bu sebeple odak noktası parçadan uzaklaŐtıka kaynak derinliği azalmaktadır denilebilir. Talep edilen kaynak derinliğine göre odak mesafesi ve odak noktası seçilmelidir (Akman, 2006; elen, 2006).

Lazer ışın apı: Lazer ışınının çapı odak noktasına gönderilen enerjinin yoğunluğuna etki etmektedir. ap küçüldükçe odak noktasına gönderilen lazer ışınının yoğunluğu artar. Bu sebeple ışın çapının küçük seçilmesi odak noktasında parçaya daha fazla enerjinin nüfuz etmesine ve kaynak dikişinin daha derin olmasına yol açar. Kaynak dikişinin derin olmasına karşın çapın küçük olması kaynak geniŐlięini ve kaynaktan etkilenen bölgenin boyutlarını azaltır (Alpar ve diğ, 2021).

Atımın tepe gücü: Bu parametre atımlı Nd: YAG lazerlerindeki atım enerjisinin atım süresine oranı ifade eder. Bu oran arttıka kaynak nüfuziyeti artar. Bu parametre atımlı lazer kaynaklarında kaynak derinliğinin kontrolünü sağlamak için önemlidir (Akman, 2006).

Darbe Süresi: Lazer ışınının bir lazer atımı esnasında parçaya temas ettiği süredir. Darbe süresi uzun tutulduğunda parçaya olan enerji geçişi artar bunun sonucunda da daha derin ve daha geniş bir bölge ısıdan etkilenir (Akman, 2006).

Atım Şekli ve kaynağın soğuma süresi: Lazer kaynağının soğuma süresi ve atım Őeklinin kaynak kalitesine etkisi vardır. Soğumanın hızlı gerçekleşmesi çatlak oluşumu, sertleşme ve gözeneklilik gibi sorunlara yol açabilir. Bu sebeple birleştirilecek parçalara kaynak öncesi ön ısıtma işlemi uygulanabilir ya da atım Şekli değiştirilerek lazer enerjisi zamana bağlı olarak kontrollü bir Şekilde parça üzerine gönderilir. Atım Őeklinin değiştirilmesi burada temel atım üzerine dahili bir atım ekleyerek atım enerjisi ve sürelerinde değişiklik yapılması ile sağlanır. Bu Şekilde yavaş bir soğuma sağlanarak kaynak hatalarının önüne geçilebilir (Akman, 2006; Güneş, 2012).

3.5.5. Lazer Kaynağında Makroyapı ve Mikroyapı

Lazer kaynağı bilindiği gibi birleştirilecek parçalara ultra kısa sürelerde lazer ışını göndererek parçalarda yüksek ısı enerjisi sonucu ergime meydana gelmesi ile birleşmenin sağlandığı bir kaynak yöntemidir. Gönderilen bu ısı enerjisi birleştirilecek parçalardaki mikroyapıyı bozarak parçaların mekanik ve fiziksel özelliklerine etki etmektedir.

Lazer kaynağında konvansiyonel kaynak yöntemlerine nazaran çok daha dar bir alan ısıdan etkilenmektedir ve mikroyapı değişimi nispeten daha azdır. Mikroyapı incelemeleri temelde 3 bölge üzerinden yapılmaktadır. Bu bölgeler kaynak metali bölgesi (ya da ergime bölgesi EB), ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve ana metal bölgesidir. Kaynak metali parçaların birleşim noktasının ve varsa dolgu malzemesinin ısıdan dolayı ergidiği ve daha sonra soğuyarak katılaştığı bölgedir. ITAB, ergime bölgesinde gerçekleşen sıcaklık değişiminden etkilenerek malzeme mikroyapısında değişikliklerin gözlemlendiği bölgedir. Ana metal bölgesi ise sıcaklıktan etkilenmeyen mikroyapıda herhangi bir değişim gözlenmeyen bölgedir. ITAB'ın malzemenin mekanik özelliklerinin kötü etkilendiği bir bölge olması sebebiyle dar olması kaynak sonrası için arzu edilen bir durumdur (Alpar ve diğ, 2021).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu başlık altında çalışmada kullanılan malzemeler, cihazlar ve yöntemler hakkında bilgilendirmeler yapıldı.

4.1. Materyal

Çalışmada lazer kaynağı ile birleştirilmek üzere AISI 316 L paslanmaz çelik parçalar kullanıldı. Çelik malzeme 100x40x3 mm boyutlarında 2 ayrı parça şeklinde ticari olarak temin edildi. Deney numune boyutları olan 20x20x3 mm boyutlarına tel erezyon işlemi ile bölünerek 20 eş parça elde edildi. Kullanılan malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1’de belirtilmiştir.

Tablo 4.1. AISI 316 L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu (Köse ve diğ, 2015)

C %	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
0,013	0,528	1,859	0,052	0,0010	16,94	2,065	9,336	0,0020	0,267
Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Zn	N	Fe
0,248	0,0338	0,014	0,086	0,099	0,0010	0,026	0,027	0,026	68,36

4.2. Kaynak Ön Hazırlığı

20x20x3 mm boyutlarındaki numuneler lazer kaynağı ile birleştirilmeden önce yüzeylerin kaynağa hazır hale getirilmesi için bazı ön hazırlık işlemleri yapıldı. Tel erezyon ile kesilen tüm parçaların birleştirilecek yüzeyleri zımparalama makinesinde P 320 bant kullanılarak yüzeylerde tam örtüşme sağlanacak seviyeye gelene kadar zımparalandı.



Şekil 4.1. Bant zımpara makinesi ve zımpara bandı

Zımparalanan parçalar Everest Ultrasonic adlı yıkama cihazı ile yüksek frekanslı ses dalgaları gönderilmek suretiyle 30°C'de 5 dakika boyunca aseton solüsyonu içerisinde yıkanarak kirlerinden arındırıldı. Yıkama cihazından çıkarılan parçalar kurutma makinesi ile kurutuldu ve kaynak yapılacak zamana kadar saklanmak üzere hava almayacak şekilde tek tek paketlenildi.



Şekil 4.2. Ultrasonik yıkama cihazı

4.3. Lazer Kaynak Cihazı

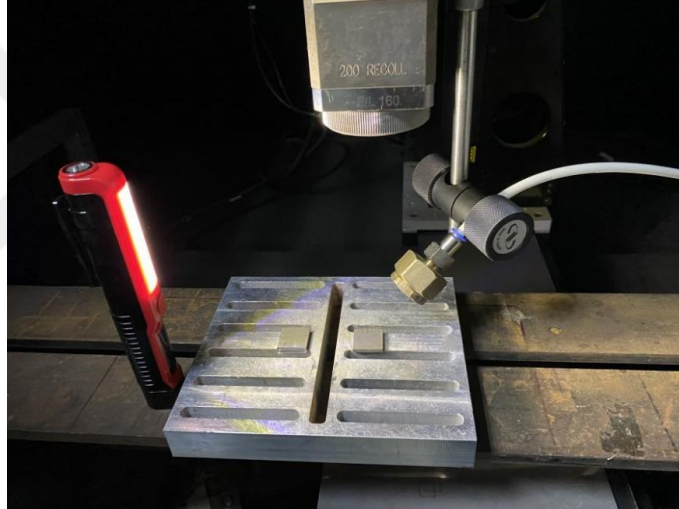
AISI 316 L paslanmaz çelik parçaların kaynağında GSI Lumonics markalı lazer cihazının JK 760 TR serisi kullanıldı. Bu cihaz 1064 nm dalga boyunda ışımaya yapan atımlı Neodimyum İtriyum Alüminyum Granat (Nd: YAG) lazeri içermektedir. Lazer cihazının gücü lazer kaynağı dışında lazer ile kesme ve delme işlemlerini de yapabilecek yeterlilikte olup maksimum ortalama gücü 600 W ve maksimum tepe gücü 10 kW'dır. Lazer cihazının sahip olduğu diğer özellikler ise şu şekilde sıralanabilir; Işın kalite faktörü (BPP) 28 mm, lazer nokta çapı 600 µm, fiber-optik kablo uzunluğu 10 m, odak uzaklığı 120 mm ve atım süresi 0,3 ms -50 ms aralığındadır.

4.4. Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada AISI 316 L paslanmaz çelik malzemeden oluşan 20x20x3 mm boyutlarındaki numuneler Nd: YAG lazer cihazı kullanılarak alın kaynağı ile birleştirildi.

Kaynak işlemleri darbe enerjisi (J) ve koruyucu gaz gibi kaynak parametreleri değiştirilerek yapıldı ve bu işlemler sonucunda farklı parametrelerle birleştirilmiş 9 kaynaklı parça elde edildi. Çalışmanın amacı bu değişkenlerin kaynak kalitesine ve mikroyapıya olan etkisini incelemektir.

Çalışmanın asıl değişkenleri olan darbe enerjisi ve koruyucu gaz parametrelerinin belirlenmesinden önce sabit tutulacak kaynak parametrelerinin tespiti için çalışmalar yapıldı. İlk olarak numune üzerine düşürülen lazer ışınının doğru çapta, oluşacak kaynağın uygun mikroyapıda olması için uygun lazer odak uzaklığı araştırıldı. Odak uzaklığının tespiti için ultrasonik yıkama cihazı ile temizlenen numunelerden biri muhafaza edildiği kilitli poşetlerden çıkarıldıktan sonra izopropil alkol ile temizlenerek yapışkanlı bant vasıtasıyla kaynak tablasına sabitlendi.



Şekil 4.3. Lazer odak mesafesi ve darbe enerjisi tespiti için kullanılan numunelerin tablaya sabitlenmesi

Tablaya sabitlenen numunelerden birinin üzerine Tablo 4.2’de belirtilen diğer parametreler sabit tutularak farklı odak mesafelerinde 5 ayrı lazer nokta atışı yapıldı.

Tablo. 4.2. Lazer odak mesafesi tespiti için lazer parametreleri

Spot Numunesi Kodu	Odak Uzaklığı (mm)	Darbe Enerjisi (J)	Atım Süresi (ms)	Frekans (Hertz)	Koruyucu Gaz
1	-2	15	5	20	Hava
2	-4	15	5	20	Hava

Tablo. 4.2. (Devam) Lazer odak mesafesi tespiti için lazer parametreleri

3	-6	15	5	20	Hava
4	-8	15	5	20	Hava
5	-10	15	5	20	Hava

Lazer nokta atışlarının numune üzerinde bıraktığı izler makro ve mikro olarak incelenerek en uygun odak mesafesinin spot numune kodu 3 olan parametrelerle sağlandığına kanaat getirildi.



Şekil 4.4. Odak uzaklığı tespiti deneyi sonrası numune

Tablo 4.2’de belirtilen parametrelerle odak uzaklığı -6 mm seçildikten sonra aynı parametrelerle kaynak deneyleri için uygun olabilecek darbe enerjilerinin tespiti için bir deney daha yapıldı. Yine Şekil 4.3’de görüldüğü gibi numune kaynak tablasına sabitlendi. -6 mm odak uzaklığı, 5 ms atım süresi, 20 Hertz frekans sabit değerlerinde koruyucu gaz olmadan Tablo 4.3’te belirtilen 5 farklı enerji değeri için numune üzerinde 10 mm ilerlemek suretiyle darbeli lazer atışları yapıldı. Lazer kaynak hızı Alhajhamoud (2022)’un çalışmasından referans alınarak bütün deneylerde 5 m/s seçildi.

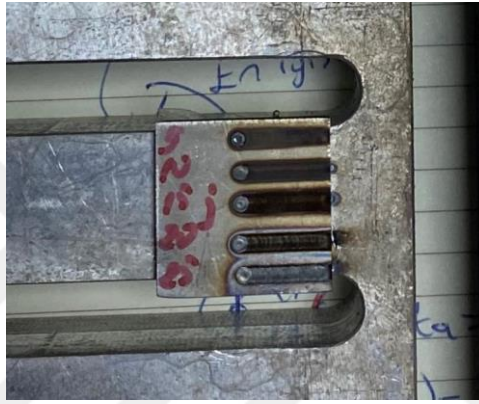
Tablo 4.3. Deneyde kullanılacak darbe enerjilerinin tespiti için kaynak parametreleri

Enerji Numunesi Kodu	Darbe Enerjisi (J)	Odak Uzaklığı (mm)	Atım Süresi (ms)	Frekans (Hertz)	Koruyucu Gaz	Kaynak Hızı (m/s)
1	5	-6	5	20	Yok	5
2	10	-6	5	20	Yok	5
3	15	-6	5	20	Yok	5

Tablo 4.3. (Devam) Deneyde kullanılacak darbe enerjilerinin tespiti için kaynak parametreleri

4	20	-6	5	20	Yok	5
5	25	-6	5	20	Yok	5

Enerji değerleri odak uzaklığı tespitinde kullanılan 15 J'un altında ve üstündeki değerlerden olacak şekilde 5J, 10J, 15J, 20J, 25J seçildi. Farklı enerjideki darbeli lazer atışlarının numune üzerinde ilerlemesi ile oluşan izler makro ve mikro olarak incelenerek en uygun değer 15J olduğuna kanaat getirildi.



Şekil 4.5. Darbe enerjisi tespiti deneyi sonrası numune

Odak uzaklığı ve darbe enerjisi için referans değer tespit edildikten sonra kaynak deneylerinde kullanılacak darbe enerjilerinin 15J'ün üstündeki değerler olan 20J ve 25J olması gerektiğine karar verildi.

Deneyle 3 farklı darbe enerjisi ile 3 ayrı koruyucu gaz altında toplam 9 adet olacak şekilde yapıldı. Nihai kaynak parametreleri kaynak öncesi numunelere yapılan deneyler ve literatürdeki çalışmalar baz alınarak Tablo 4.4'te belirtildiği şekilde seçildi.

Tablo 4.4. Lazer kaynak parametreleri

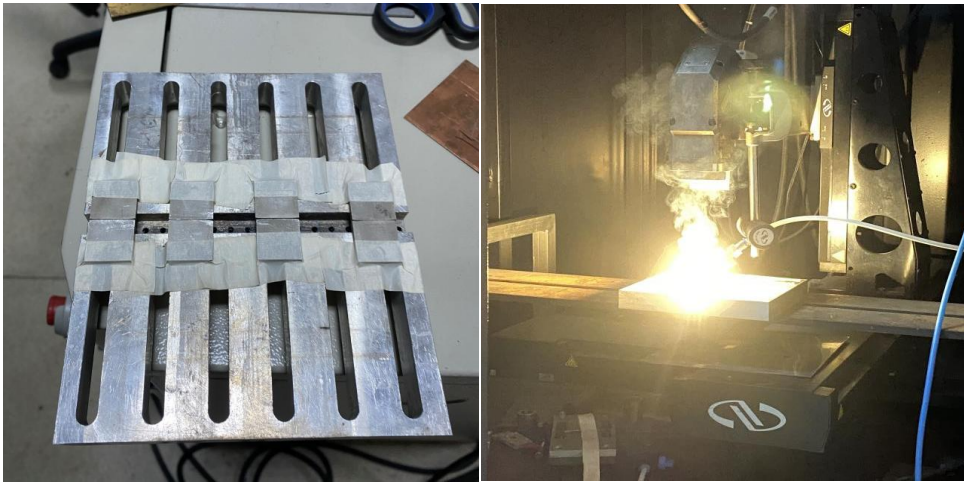
Kaynak Numune Kodu	Darbe Enerjisi (J)	Koruyucu Gaz	Odak Uzaklığı (mm)	Kaynak Hızı (m/s)	Atım Süresi (ms)	Frekans (Hertz)	Kaynak Modu
1	15	Argon (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli

Tablo 4.4. (Devam) Lazer kaynak parametreleri

2	20	Argon (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli
3	25	Argon (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli
4	15	Oksijen (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli
5	20	Oksijen (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli
6	25	Oksijen (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli
7	15	Hava (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli
8	20	Hava (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli
9	25	Hava (0-0,5 bar)	-6	5	5	20	Darbeli

4.5. Kaynak Deneyleri

Kaynak deneyleri ile 20x20x3 mm boyutlarındaki 18 adet 316 L paslanmaz çelik parça birleştirilerek 9 kaynaklı parça elde edildi. Bu işlemler için Şekil 4.6'da görüldüğü gibi numuneler sırasıyla kaynak tablasına bant ile sabitlendi. Her numune için ayrı ayrı Tablo 4.4'de görülen parametreler seçildi. Bütün numuneler seçilen parametreler ile kaynaklı birleştirme yapıldı. Bu birleştirme esnasında koruyucu gaz hortumu lazer ışınının ilerleme yönüne ters ve 45° açılı olacak şekilde yerleştirildi. 4 numaralı numune haricinde bütün numunelerde birleşme sağlandı ancak 4 numaralı numunede birleşme sağlanmadı.



Şekil 4.6. Deney numunelerinin kaynak tablasına sabitlenmesi ve kaynak aşaması

4.6. Metalografik Numune Hazırlığı

Kaynak deneylerinin tamamlanmasının ardından kaynaklı parçalardan metalografik görüntü almak için görüntüleme öncesinde bazı hazırlık işlemleri yapıldı. İlk olarak kaynaklı parçalar ortasından tel erezyon ile kesilerek kaynak kesiti alındı. Sonrasında Epoksi ve Akrilik reçine kullanılarak kesitleri alınmış kaynaklı numunelere Şekil 4.7’de görüldüğü üzere soğuk bakalite alma işlemi uygulandı.



Şekil 4.7. Bakalite alınmış kaynaklı numuneler

Yeterli sertliğe ulaşan bakalite alınmış numuneler bu işlemten sonra sırasıyla zımpara, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutuldular. Zımpara işlemi için Mikrotest markalı zımpara ve parlatma cihazı kullanıldı. Numuneler P 240, P 320, P 600 ve P 1000 zımpara kağıtları ile 350 dev/dk’da yüzey pürüzleri giderilecek kadar zımparalandı.



Şekil 4.8. Mikrotest Multipol Advanced otomatik zımparalama ve parlatma cihazı

Zımparalama işleminden sonra zımpara kağıdından kaynaklı çiziklerin giderilmesi ve yüzeyin parlatılması amacıyla numunelere parlatma işlemi uygulandı. Parlatma işlemi 3 µm elmas solüsyonuna ek olarak %30 mono etilen glikol ve %70 etil alkol karışımları kullanılarak çuha ile yapıldı. Parlatma sıvısı uygulanan numuneler kurutulduktan sonra mikroskop altında incelenerek yüzeyin yeterli parlaklığa ulaştığına kanaat getirildikten sonra numunelere dağlama işlemi yapıldı. Numuneler önce 7V altında %10 oksalik asit çözeltisinde 25 saniye elektrolitik dağlandı ancak uygun görüntü alınamadığı için kimyasal dağlama kullanılmasına karar verildi. 60 ml HCl, 60 ml Nitrik Asit ve 6 ml saf su karışımından oluşan çözelti ile 1-1,5 dk dağlama işlemi yapıldı.

4.7. Optik Görüntüleme ve Metalürjik İncelemeler

Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemi yapılan numuneler metalürjik incelemeye hazır hale geldikten sonra Olympus Bx41M-LED marka modelli optik mikroskop altında incelendi. İki ayrı kalıpta bakalite alınmış numunelerin ikisi de her görüntüleme öncesinde zımparalama, parlatma ve dağlama işlemine tabi tutuldu. Ana metal bölgesinden alından görüntüler her numune için x10 büyütme, x20 büyütme ve x 50 büyütme yapılarak alındı. Kaynaklı parçaların kaynak kesiti boyunca bütün birleşme bölgeleri 3 ayrı kısma ayrılarak yine her numune için ayrı ayrı x5 büyütme, x10 büyütme, x20 büyütme ve x50 büyütme yapılarak alındı. Bu sayede kaynak bölgesi, ana metal ve ITAB bölgelerinden makro ve mikro görüntüler elde edilmiş olundu.



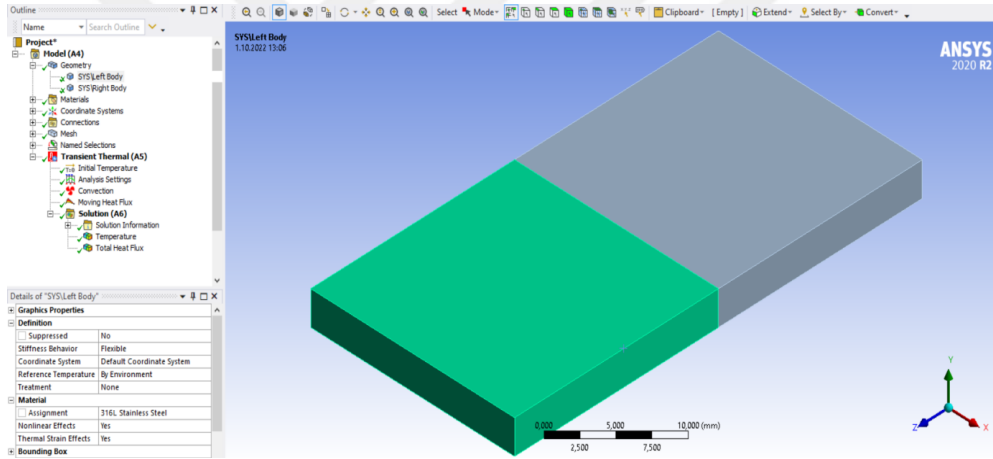
Şekil 4.9. Metalürjik inceleme için kullanılan optik mikroskop

4.8. Kaynağın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi

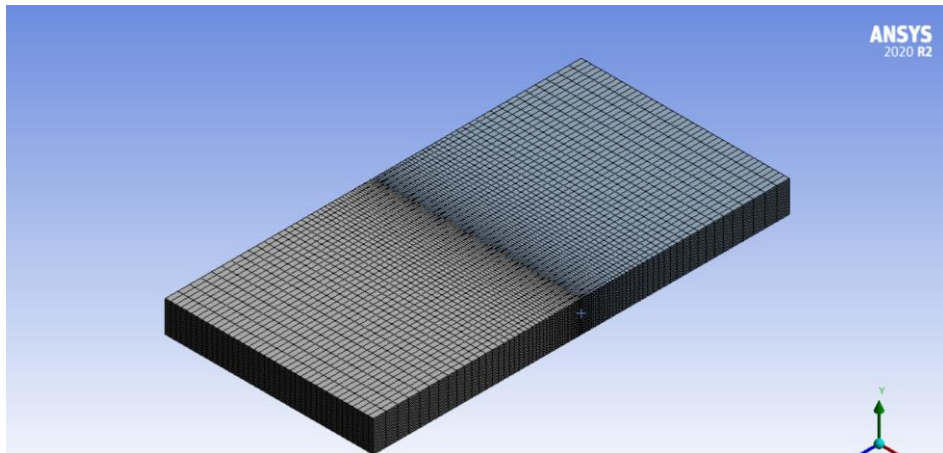
Bu aşamada yapılan lazer kaynak işlemlerinin tamamı sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı ANSYS Workbench 2020 R2 yazılımının Transient Thermal modülü kullanılarak bilgisayar ortamında simüle edildi.

4.8.1. Geometri ve Mesh Oluşturma

Kaynakla birleştirilecek parçalar ilk etapta ANSYS Geometry kısmında gerçek numune ölçüleri olan 20x20x3 mm boyutlarına uygun olacak şekilde modellendi. Numuneler Left Body ve Right Body olarak Şekil 4.10’da görüldüğü gibi ayrı parçalar şeklinde tanımlandı ve birbirine bitişik olacak şekilde geometri oluşturuldu. İki parça için de ayrı ayrı Details of “SYS\Left Body” ve Details of “SYS\Right Body” altındaki Materials kısmından malzeme ataması yapılarak parçaların malzemesi 316 L çelik malzeme seçildi.



Şekil 4.10. Kaynaklı birleşme yapılacak numunelerde geometri oluşturma

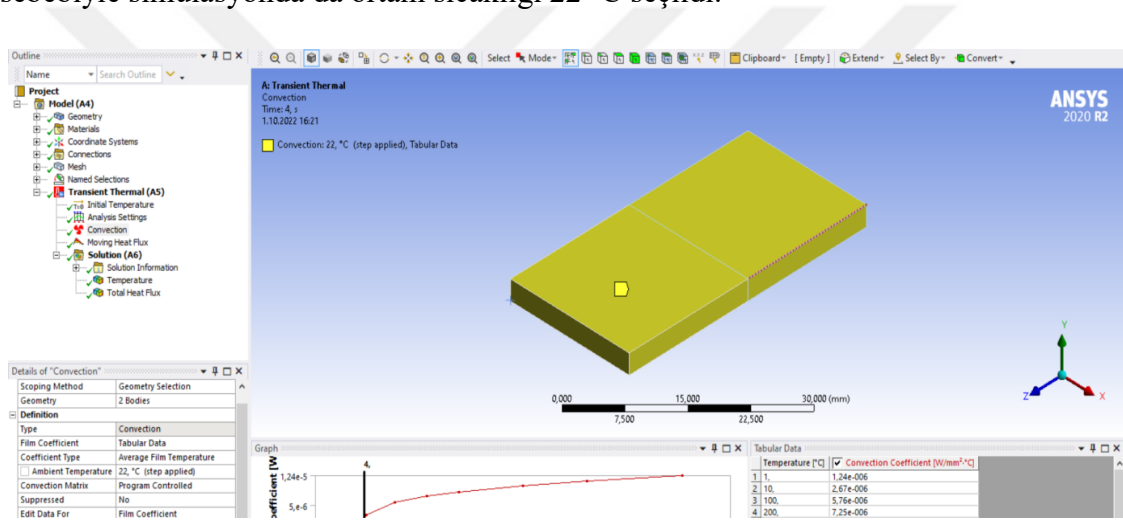


Şekil 4.11. Mesh oluşturma

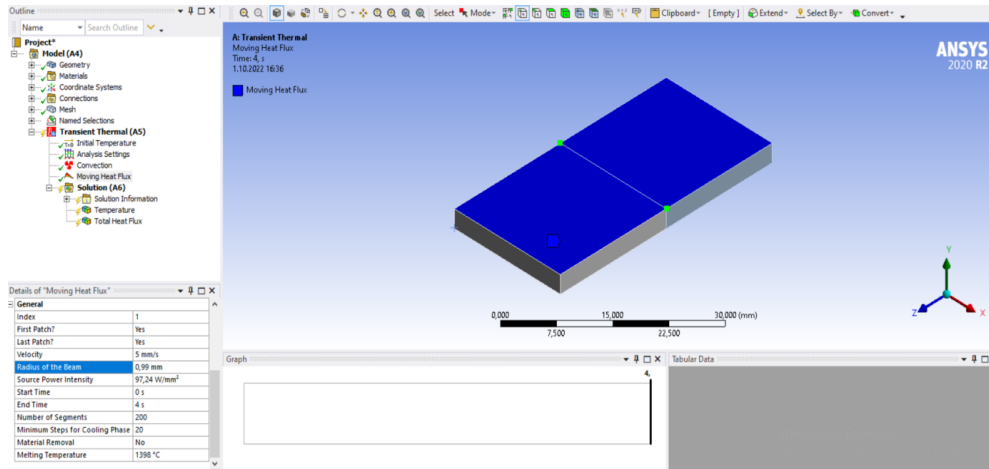
Geometrinin hazırlanması ve malzeme seçiminden sonra kaynak yapılacak bölgenin mesh tanımlaması yapıldı. Mesh tanımlamasında ısının yoğun olarak uygulandığı kaynak bölgesine daha fazla mesh atıldı, ısı dağılımı boyunca mesh miktarı azalarak ısı dağılımını daha iyi gösterecek bir mesh tanımlaması Şekil 4.11'deki gibi yapıldı.

4.8.2. Termal Sınır Koşulları ve Değişkenlerin Tanımlanması

Geometri oluşturma ve mesh işlemlerinden sonra transient thermal kısmında kaynak parametreleri ve diğer değişkenlerin tanımlaması yapıldı. İlk etapta Convection seçeneği eklenerek iki gövdeye de konveksiyon tanımlaması yapıldı. Deneyleerin oda sıcaklığında yapılması ve kaynaklı parçaların oda sıcaklığında kendiliğinden soğumaya bırakılması sebebiyle simülasyonda da ortam sıcaklığı 22 °C seçildi.



Şekil 4.12. Konveksiyon uygulanan bölgeler



Şekil 4.13. Moving Heat Flux uygulanan bölgeler

İkinci olarak kaynak işlemini temsilen hareketli ısı kaynağı eklemek için Moving Heat Flux seçeneği eklendi. Moving Heat Flux'a ait detaylarda ısı kaynağının ilerleyeceği yüzeyler Şekil 4.13'te de görüldüğü gibi seçildi. Daha sonra ısı kaynağının ilerlediği doğru olan Path x ekseninde Şekil 4.13'te yeşil ile gösterilen noktalar arasında seçildi.

Kaynak parametre değerleri ve diğer değişkenler Details of "Moving Heat Flux" kısmındaki General sekmesinde belirtildi. İlk olarak malzemenin ergime sıcaklığı Melting Temperature kısmında belirtildi. Kaynak hızını temsilen velocity 5 mm/s seçildi. Bu hız ile kaynak süresi hesaplanarak Start time ve end time kısımları düzenlendi. Lazer ışın yarıçapı Şekil 4.4'de yapılan denemelerde elde edilen spot kaynaklardan ölçülerek programda Radius of the Beam 0,99 mm seçildi. Bir diğer parametrelerden olan lazer darbe enerjisi değerleri programda yer alan Source Power İntensity kısmında belirtildi. Enerji - güç dönüşümleri için Denklem (4.1) ve Denklem (4.2) kullanıldı. Bunun sonucunda deneylerdeki değişken parametrelerden olan darbe enerjilerinin tekabül ettiği güç yoğunlukları tespit edilerek aşağıdaki tabloya işlendi ve programda Source Power İntensity kısmında belirtildi (Boyras ve diğ., 2017).

$$\text{Ortalama Güç (W)} = \text{Darbe Enerjisi (J)} \times \text{Frekans (Hertz)} \quad (4.1)$$

$$\text{Güç Yoğunluğu (W/mm}^2\text{)} = \text{Ortalama Güç (W)} / \text{Alan (mm}^2\text{)} \quad (4.2)$$

Tablo 4.5. Kaynak numunelerine ait parametreler

Kaynak Numune Kodu	Darbe Enerjisi (J)	Lazer Işın Çapı (mm)	Kaynak Hızı (m/s)	Frekans (Hertz)	Ortalama Güç (W)	Güç Yoğunluğu (W/mm ²)
1	15	1,98	5	20	300	97,24
2	20	1,98	5	20	400	129,66
3	25	1,98	5	20	500	162,07
4	15	1,98	5	20	300	97,24
5	20	1,98	5	20	400	129,66
6	25	1,98	5	20	500	162,07
7	15	1,98	5	20	300	97,24
8	20	1,98	5	20	400	129,66

Tablo 4.5. (Devam) Kaynak numunelerine ait parametreler

9	25	1,98	5	20	500	162,07
---	----	------	---	----	-----	--------



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 20x20 mm ebatlarında 3,0 mm kalınlığında AISI 316 L paslanmaz çelik malzemeler lazer kaynağıyla alın altına birleştirildi. Bu aşamada farklı kaynak parametreleri ile yapılan bu birleştirmeler sonucunda oluşan kaynağın yapısı makro ve mikro olarak incelenerek kaynak parametrelerinin etkisi tespit edildi.

5.1. Kaynak Bölgelerindeki Yapının Makro Boyutta İncelenmesi

5.1.1. Kaynak Şekli, Birleşme ve Nüfuziyet

Farklı koruyucu gaz altında farklı darbe enerjileri ile birleştirilen parçaların 4 numaralı numune hariç tamamında kaynaklı birleşme sağlandı. 4 numaralı numune için ise farklı yüzeyler tekrar temizlenerek denemeler yapılmasına rağmen Şekil 5.1’de görüldüğü üzere birleşme sağlanamadı. Birleşme olmamasına sebep olarak 15 J’lük darbe enerjisinin oksijen koruyucu gazı altında yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Isı girdisinin daha az olması sebebiyle yüzeylerde koruyucu gazın da etkisi ile ergime oluşmadan oksitlenme oluşmakta bu da malzemenin birleşmesini engellemektedir.

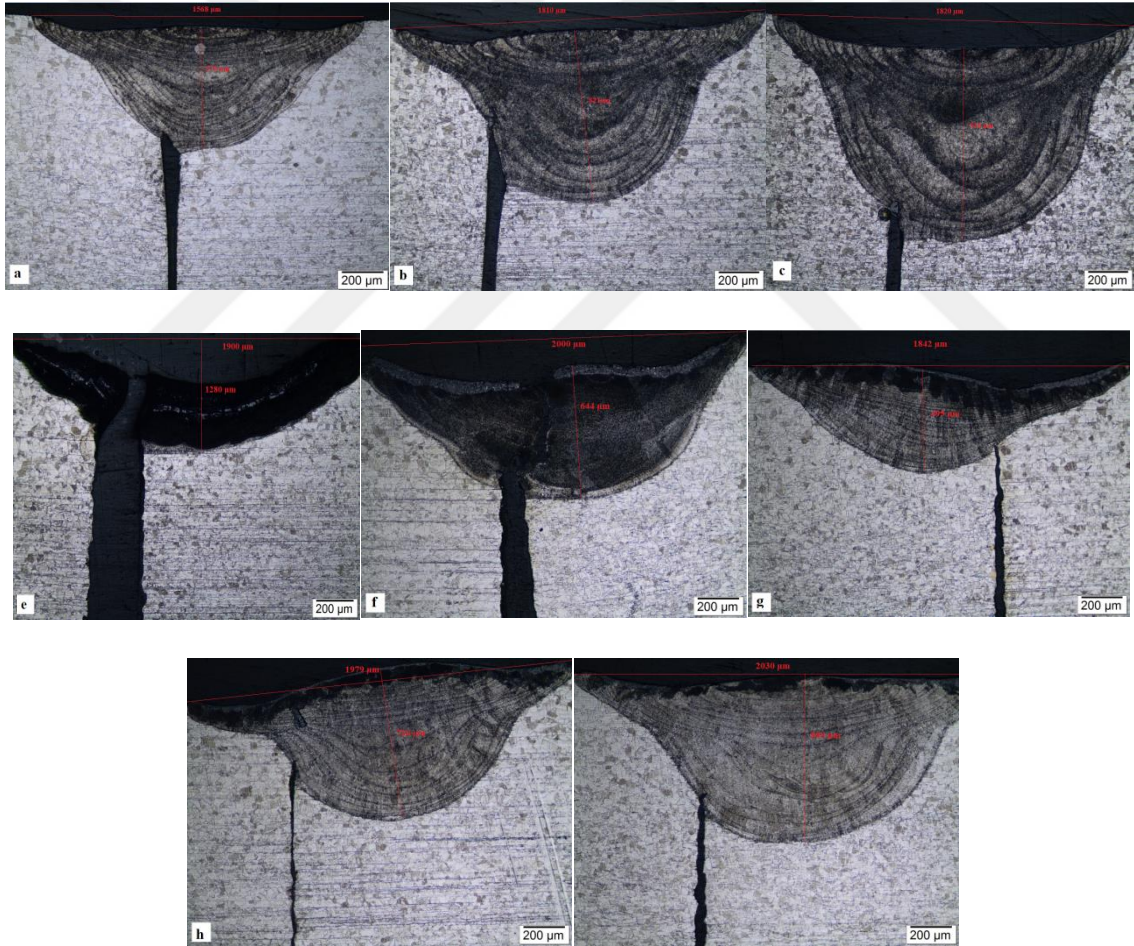


Şekil 5.1. 4 numaralı numunenin kaynaklı birleştirme denemesi sonrası elde edilen görüntüsü

Diğer kaynaklı numunelerden x5 büyütme ile optik mikroskop altında alınan görüntülere göre birleşmelerin nüfuziyet kaynağı ile değil, iletim kaynağı ile yüzey bölgesinde sağlandığı görülmektedir. Birleşme sağlanan numunelerin tamamı yüzey bölgesinden birleşmiş olup bütün yüzeylerde tam örtüşme sağlanmamıştır. Tam örtüşme sağlanmamasının asıl sebebi kaynağın iletim kaynağı ile yüzeyden birleşme yapmasıdır, ergiyen sıvı metal birleştirilen yüzeylerin tamamına temas etmemiştir ve kaynak derinliği tüm yüzeylerin birleşmesine yetecek derinlikte değildir. Ek olarak birleştirilecek

yüzeylerde yapılan zımparanın mikro boyutlarda yetersiz kalması ve ısı girdisi sonucu parçalarda çarpılma görülmesi Şekil 5.2’de görüldüğü gibi birleşecek yüzeylerde boşluk oluşmasına yol açmıştır.

Birleştirilen parçaların kaynak bölgesinden alınan görüntülerde tespit edilen bir diğer özellikte çöküntü oluşmasıdır. Çöküntüler kaynak öncesi hazırlıkların yetersiz olması ya da parametrelerin uygun olmaması gibi durumlarda ortaya çıkabilmektedir (Yılmaz, 2017). Şekil 5.2’de görüldüğü gibi 1, 2. ve 3. numunelerin kaynak yüzeyinde hafif çöküntüler görülmektedir. Burada oluşan çöküntülerin sebebinin artan darbe enerjisi ile oluşan kaynak buharının artması olduğu düşünülmektedir. 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı numunelerde ise kayda değer bir çöküntü gözlenmemiştir.



Şekil 5.2. Kaynaklı numunelerden optik mikroskop ile x5 büyütmede alınan makro görüntüler

Kaynak şekli incelendiğinde ise şu bulgular elde edilmiştir; Şekil 5.2’den de anlaşılacağı üzere ergiyen kaynak metali darbeli iletim kaynağına bağlı olarak katman katman

soğumuş ve dalgalı bir görüntü oluşturmuştur. Koruyucu gazın yatayda 45°'lik açı ile üflemesi ergiyen bölgenin yatay yönlenmesine yol açmıştır. Bu sebeple kaynak metalinin dikey eksenine çoğunlukla birleşim noktası üzerinde yer almamaktadır.

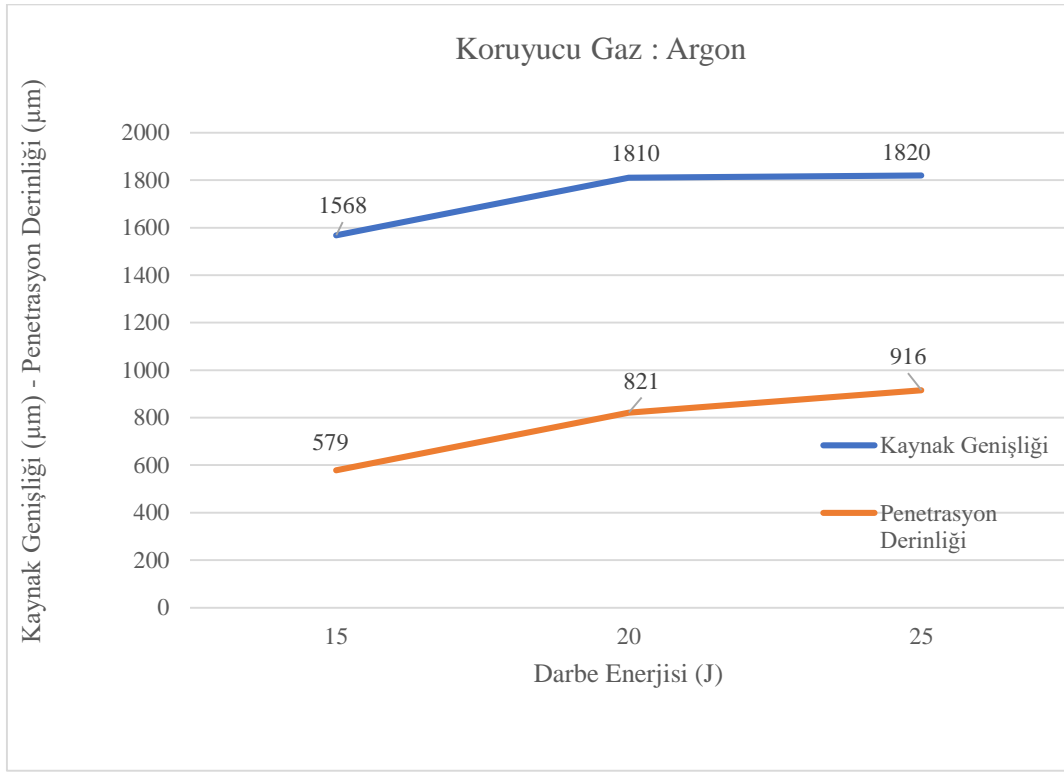
5.1.2. Penetrasyon Derinliği ve Kaynak Genişliği

Penetrasyon derinliği ve kaynak genişliğinin lazer ışın çapı, kaynak hızı ve lazer darbe gücü gibi kaynak parametrelerinden etkilendiği literatürdeki çeşitli çalışmalarda yer almaktadır. Bu çalışmadaki değişkenlerden olan darbe gücünün derinlik ve genişliğe etkisini araştırmak için birleşme sağlanan 8 numunenin kaynak metali bölgesinden görüntüler alınmıştır. Şekil 5.2'teki görüntülerden alınan kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği uzunlukları ve bunların birbirine oranı Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kaynaklı parçalarda parametrelere bağlı kaynak genişliği, penetrasyon derinliği ve oranı

Kaynak Numune Kodu	Darbe Enerjisi (J)	Koruyucu Gaz	Kaynak Genişliği (µm)	Penetrasyon Derinliği (µm)	Penetrasyon Derinliği / Kaynak Genişliği
1	15	Argon (0-0,5 bar)	1568	579	0,36
2	20	Argon (0-0,5 bar)	1810	821	0,45
3	25	Argon (0-0,5 bar)	1820	916	0,5
4	15	Oksijen (0-0,5 bar)	-	-	-
5	20	Oksijen (0-0,5 bar)	1900	1280	0,67
6	25	Oksijen (0-0,5 bar)	2000	644	0,32
7	15	Hava (0-0,5 bar)	1842	495	0,26
8	20	Hava (0-0,5 bar)	1979	726	0,36
9	25	Hava (0-0,5 bar)	2030	800	0,39

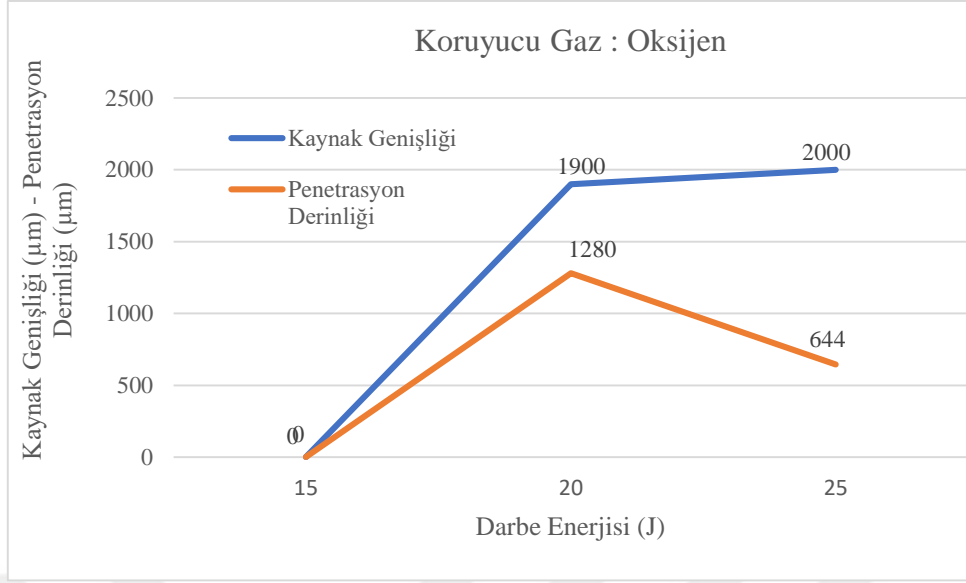
Argon gazı altında yapılan kaynaklarda 15 J darbe enerjisinde kaynak genişliği 1568 μm , penetrasyon derinliği 579 μm ; 20 J darbe enerjisinde kaynak genişliği 1810 μm , penetrasyon derinliği 821 μm ; 25 J darbe enerjisinde kaynak genişliği 1820 μm , penetrasyon derinliği 916 μm bulunmuştur. Darbe enerjisi artışı hem kaynak genişliğinde hem de penetrasyon derinliğinde artışa yol açmıştır.



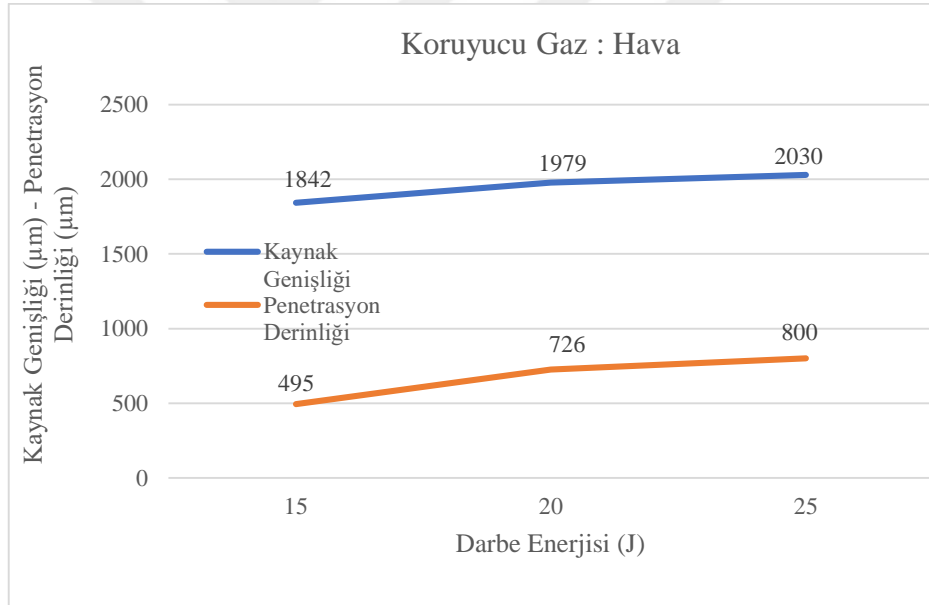
Şekil 5.3. Argon koruyucu gazı altında yapılan kaynakların darbe enerjisine bağlı kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği

Oksijen gazı altında yapılan kaynaklarda 20 J darbe enerjisinde kaynak genişliği 1900 μm , penetrasyon derinliği 1280 μm ; 25 J darbe enerjisinde kaynak genişliği 2000 μm , penetrasyon derinliği 644 μm bulunmuştur. Darbe enerjisi artışı hem kaynak genişliğinde artışa yol açmasına rağmen penetrasyon derinliğinde düşüş gözlenmiştir.

Hava gazı altında yapılan kaynaklarda 15J darbe enerjisinde kaynak genişliği 1842 μm , penetrasyon derinliği 495 μm ; 20J darbe enerjisinde kaynak genişliği 1979 μm , penetrasyon derinliği 726 μm ; 25 J darbe enerjisinde kaynak genişliği 2030 μm , penetrasyon derinliği 800 μm bulunmuştur. Darbe enerjisi artışı hem kaynak genişliğinde hem de penetrasyon derinliğinde artışa yol açmıştır.



Şekil 5.4. Oksijen koruyucu gazı altında yapılan kaynakların darbe enerjisine bağlı kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği



Şekil 5.5. Hava gazı altında yapılan kaynakların darbe enerjisine bağlı kaynak genişliği ve penetrasyon derinliği

İdeal bir kaynaklı birleştirmede kaynak genişliğinin az, derinliğin ise fazla olması talep edilir. Kaynak kalitesinin tespiti için penetrasyon derinliği ve kaynak genişliğinin oranına bakılır. Literatürde darbeli iletim kaynakları için en uygun değer 0,5 ile 1 arasında olduğu belirtilmiştir (Bhatt, 2018).

Bu ölçümlerde en yüksek kaynak genişliği 2030 µm ile koruyucu gazın hava olduğu 25J darbe enerjisindeki kaynaklı birleştirmede, en düşük kaynak genişliği 1568 µm ile

koruyucu gazın Argon olduğu 15J darbe enerjisindeki kaynaklı birleştirmede görülmüştür. En yüksek penetrasyon derinliği 1280 µm ile koruyucu gazın oksijen olduğu 20J darbe enerjisindeki kaynaklı birleştirmede, en düşük penetrasyon derinliği 495 µm ile koruyucu gazın hava olduğu 15J darbe enerjisindeki kaynaklı birleştirmede görülmüştür. Penetrasyon genişliğinin derinliğine oranının en uygun olduğu birleştirme ise 0,67 oranı ile 5 numaralı numunede gözlenmiştir.

Ölçümler sonucu artan darbe enerjisi ile 3 koruyucu gaz altında da kaynak genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Bu artış ısı girdisine bağlı olarak ergimenin daha geniş bölgelere yayılması ile ortaya çıkmaktadır. Argon ve Hava koruyucu gazı altındaki numunelerde darbe enerjisi arttıkça penetrasyon derinliği de artmaktadır. Oksijen koruyucu gazı kullanılan numunelerde ise bu durumun tersi gözlenmiştir. Bu durumun yüzeyde oksitlenme gözlenmesi ve plazma oluşmasına bağlı nüfuziyetin azalması kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Bhatt, 2018).

5.2. Ferrit ve Martenzit Oranı Tespiti

Ferrit oranının tespitinde kullanılan en yaygın methodlardan biri $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş}$ 'ne göre hazırlanmış Schaeffler Diyagramının kullanılmasıdır. Diyagramın yatay ekseninde ferrit dengeleyici elementlerin oranı ile hesaplanan krom eşdeğerliği, dikey ekseninde ise östenit dengeleyici elementlerin oranı ile hesaplanan Nikel eşdeğerliği bulunmaktadır. $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş}$ Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 ile bulunduktan sonra diyagram üzerinde doğrular ile kesiştirilerek ferrit oranı ve katılma sonrası oluşması ön görülen fazlar tespit edilir (Mohammed, 2017).

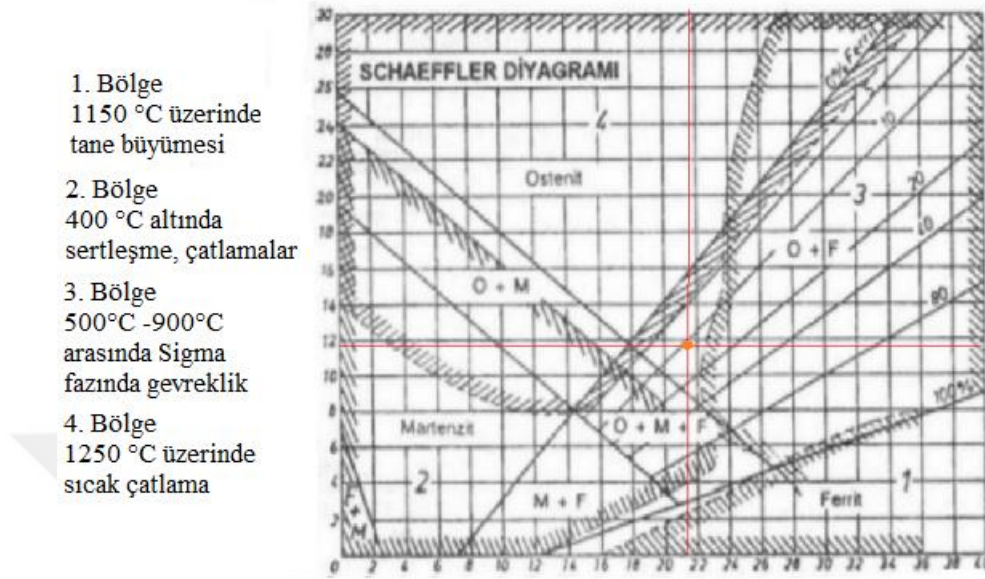
$$Cr_{eş} = 1,5(Mo) + (Cr) + 5,5(Al) + 5(V) + 2(Si) + 1,75(Nb) + 1,5(Ti) + 0,75(W) \quad (5.1)$$

$$Ni_{eş} = (Co) + 0,3(Cu) + 0,5(Mn) + (Ni) + 30(C) + 25(N) \quad (5.2)$$

Çalışmamızda kullanılan AISI 316 L malzemenin içeriğine göre $Ni_{eş}$ ve $Cr_{eş}$ hesaplandığında $Cr_{eş} = 21,69$, $Ni_{eş} = 11,64$ bulunmaktadır. Bu değerler Schaeffler Diyagramı üzerine yerleştirildiğinde ferrit oranı yaklaşık % 11 bulunmaktadır. Bu sebeple kaynak sonrası yapıda östenit ve ferrit fazlarının görülmesi muhtemeldir.

Krom ve Nikel eşdeğerliklerinin birbirine oranının ve soğuma hızının yüksek olması kaynak metalinin nasıl katıldığı hakkında da bilgi vermektedir. $Cr_{eş} / Ni_{eş}$ oranının

1,5'ten büyük olması yapının FA tipinde katılaşaacağını gösterir. Bu katılma şeklinde ilk olarak δ ferrit kristalleşir, soğuma esnasında ise östenite dönüşür.



Şekil 5.6. Schaeffler Diyagramı ile ferrit oranı tespiti

Yapıdaki martenzit oluşumunun tespiti için ise martenzit dönüşümü başlangıç sıcaklığını gösteren Eşitlik 5.3 kullanılmaktadır (Uzun, 2010). Malzeme içerisindeki alaşım elementlerine bağlı olan bu eşitlik sonucu çıkan sıcaklığın altına soğutma yapılırsa yapı içerisinde martenzit gözlenmektedir.

$$M_s (°C) = 492 - 125(\%C) - 65,5(\%Mn) - 10(\%Cr) - 29(\%Ni) \quad (5.3)$$

Bu çalışmada kullanılan AISI 316 L malzemesinin martenzit dönüşüm sıcaklığı $M_s = -71,54$ °C bulunmuş olup kaynaklı numuneler oda sıcaklığında soğutulduğundan yapıda martenzit oluşumu görülmesi mümkün değildir.

5.3. Metalografik İncelemeler

Bu aşamada kaynaklı birleşme yapılan 8 numunenin ana metal bölgesinden x10, x20, x50; kaynak metali ve ITAB bölgesinden x5, x10, x20, x50 büyütme oranları ile alınan görüntüler incelendi. Değişen kaynak parametrelerinin iç yapıya olan etkileri tespit edildi.

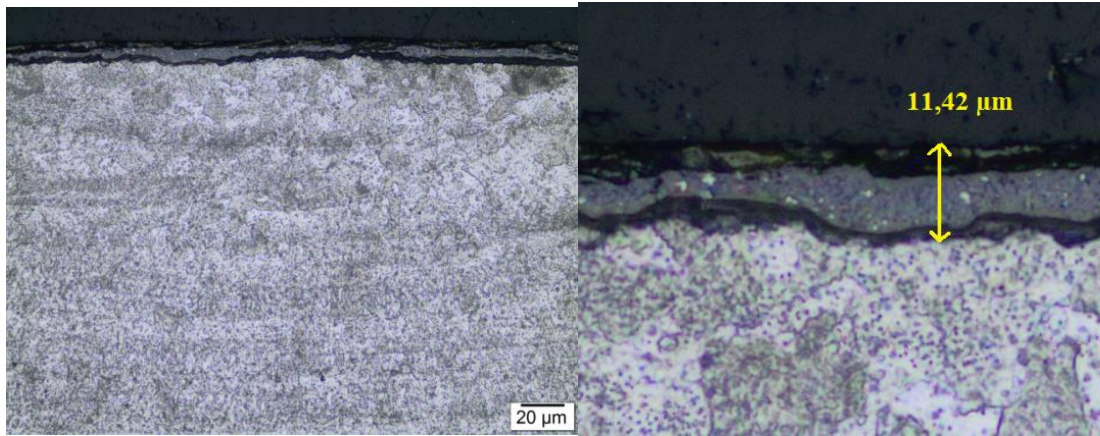
5.3.1. Kaynak Metali Mikroyapısı

Kaynak metali bölgesi birleştirilecek malzemenin lazer ışını ile ergiyip daha sonra soğuyarak katılaştığı bölgeyi temsil etmektedir. Bu sıcaklık değişimleri malzemenin

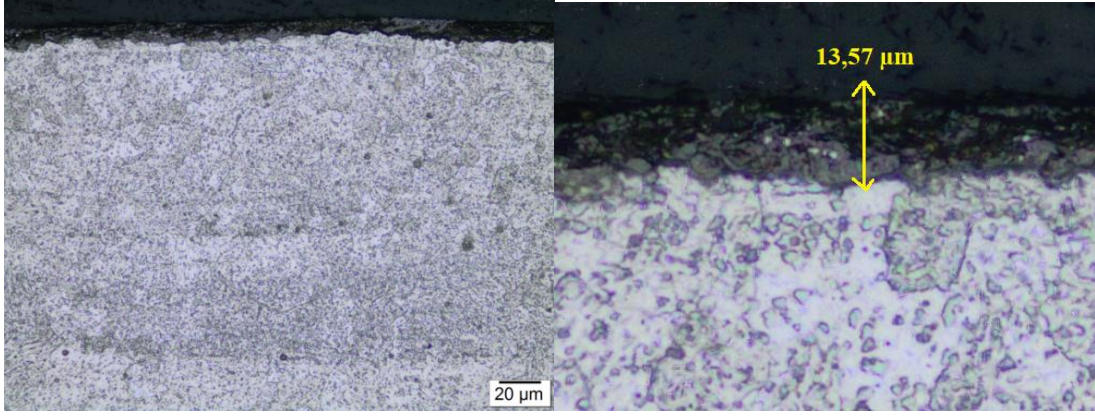
yapısında bazı değişikliklere yol açmaktadır. Yapı içerisindeki östenit, ferrit ve martenzit gibi oluşumların kaynaklı parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi bulunduğundan kaynak sonrası oluşacak mikro yapıdaki ferrit, martenzit oranının tespiti için kaynak öncesinde bazı hesaplamalar yapılmaktadır. Bu sebeple optik görüntülerin incelenmesinden önce yapı içerisinde oluşması ön görülen fazlar hesaplamalar ile tespit edilecektir.

5.3.1.1. Oksidasyon Oluşumu ve Oksit Tabakası

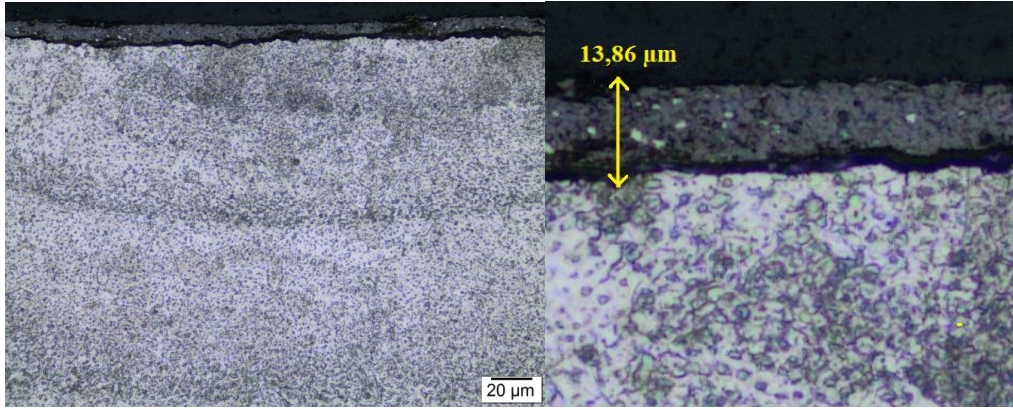
Koruyucu gazın kaynak işlemlerindeki en önemli vazifelerinden biri ergimiş metalin havadaki gazlar ile etkileşime girmesini engelleyerek yüzeyde oksidasyon oluşmasını önlemektir. Bu etkinin kontrolü için numunelerin kaynak metali bölgesinin yüzeyinden x50 büyütme ile alınan görüntüler incelendi. Kaynak işlemlerinin tamamında koruyucu gaz debisi sabit ve 20 l/dk olup kullanılan gaz değiştirilmişti. Optik görüntülere göre bütün kaynak yüzeylerinde ince bir oksit tabaka gözlemlendi. Oksit tabakalarının yüzeyde en kalın olduğu noktalar tespit edilerek bütün numunelerde oksit tabakası kalınlığı ölçüldü. En kalın tabakanın koruyucu gazın oksijen olduğu, en ince tabakanın ise koruyucu gazın argon olduğu kaynaklarda bulunduğu tespit edildi. Kaynak yapılacak bölgeye doğrudan oksijen üflendiğinde ya da hava üflendiğinde içerisinde yer alan oksijen sebebiyle yüzeyde oksidasyon oluşumu gözlemlenmiştir.



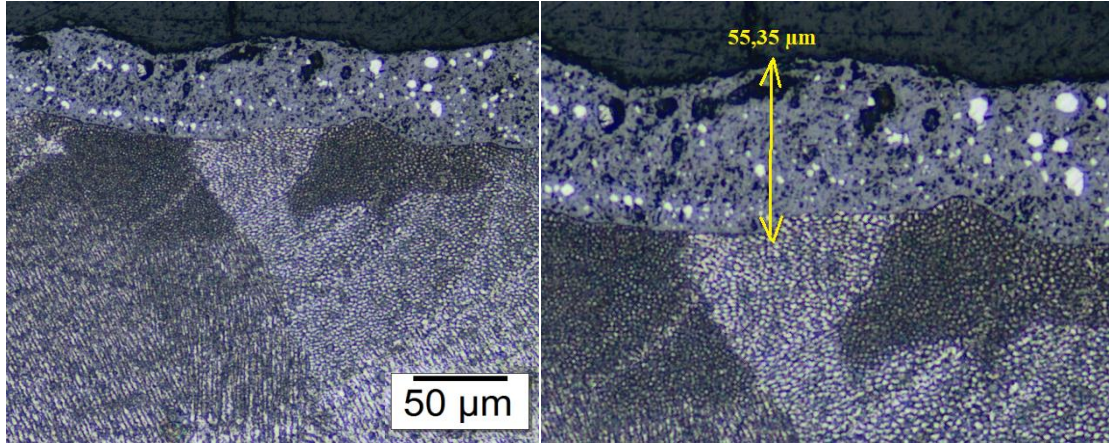
Şekil. 5.7. 1. numunenin kaynak metali bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti



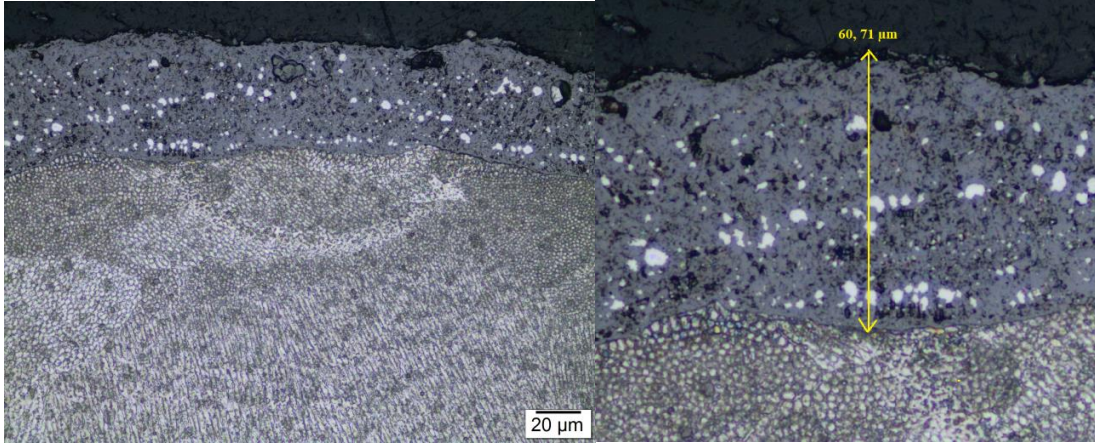
Şekil. 5.8. 2. numunenin kaynak metali bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti



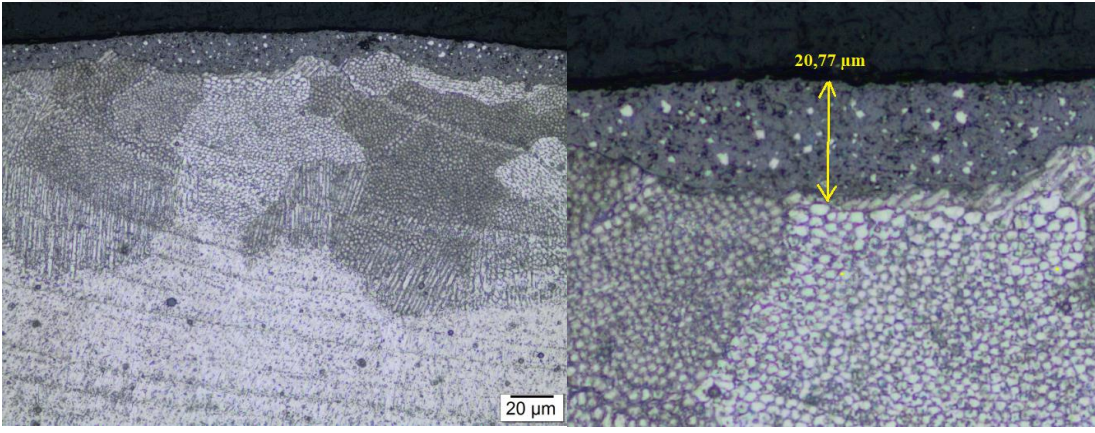
Şekil. 5.9. 3. numunenin kaynak metali bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti



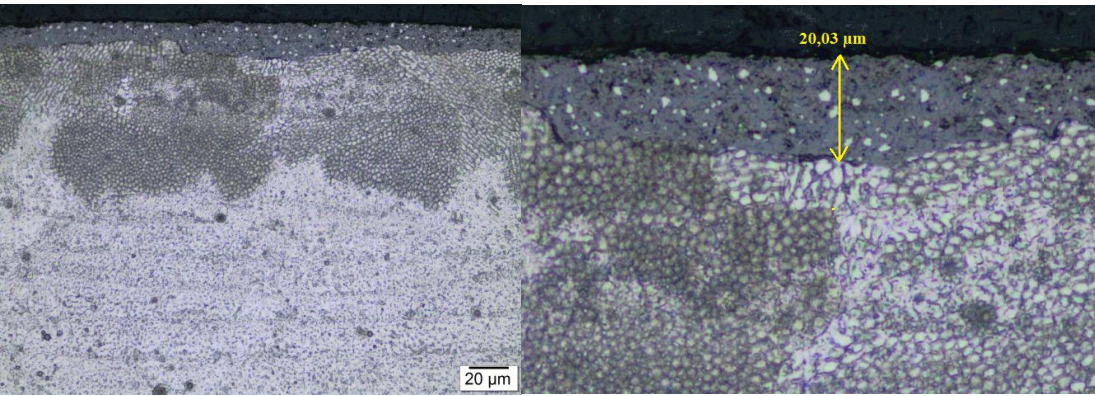
Şekil. 5.10. 5. numunenin kaynak metali bölgesinden x20 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti



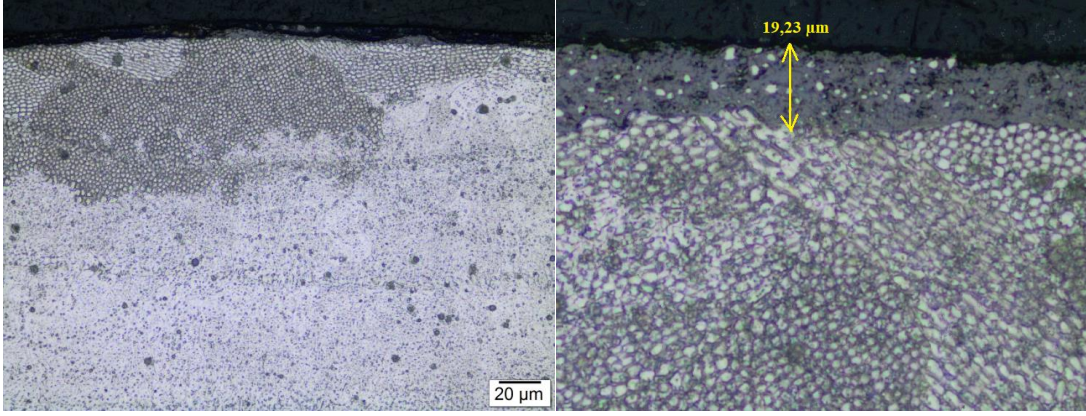
Şekil. 5.11. 6. numunenin kaynak metali bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti



Şekil. 5.12. 7. numunenin kaynak metali bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti

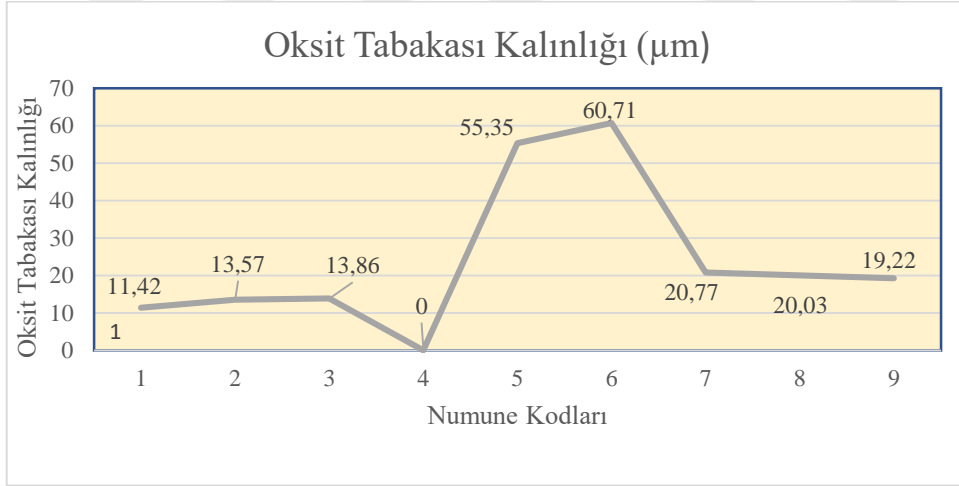


Şekil. 5.13. 8. numunenin kaynak metali bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti



Şekil 5.14. 9. numunenin kaynak metali bölgesinden x50 büyütme oranı ile alınan optik görüntü ve kesiti

Kaynaklı numunelerin kaynak metali bölgesinden alınan x50, x20 büyütme oranı ile alınan ve dijital büyütme yapılan görüntülerde oksidasyon kalınlığı ölçülerek tüm numuneler için elde edilen değerler Şekil 5.15’de gösterildi. Burada elde edilen verilere göre aynı koruyucu gaz altında yapılan kaynaklarda belirgin bir değişiklik gözlenmedi. Farklı koruyucu gazlarla yapılan kaynak işlemlerinde ise koruyucu gaz içerisinde bulunan oksijen oranı arttıkça oksit tabakasının arttığı görüldü.

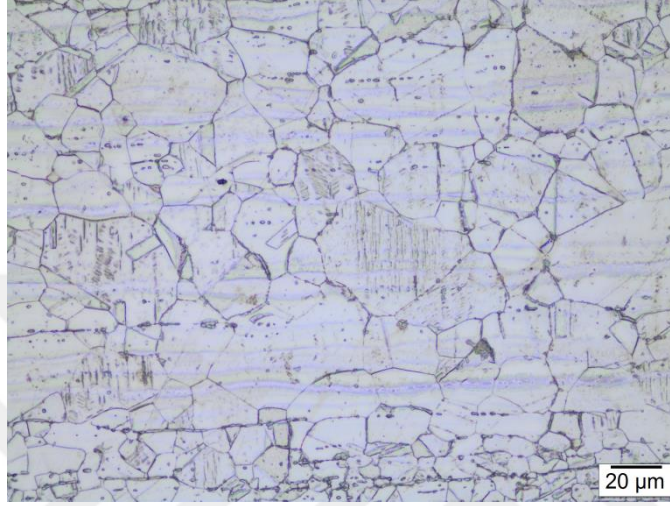


Şekil 5.15. Kaynak sonrası kaynak metali yüzeyinde görülen oksidasyon kalınlığı

5.3.2. ITAB ve Ana Metal Mikroyapıları

Ana metal bölgesi kaynaktan hiç bir şekilde etkilenmeyen malzemenin kendi yapısının korunduğu bölgedir. ITAB ise ana metalin ısıdan etkilendiği bölgedir, bu bölgede ergimiş kaynak metalinden iletilen ısıdan kaynaklı bir mikroyapı değişikliği gözlenmektedir.

Şekil 5.16’da çalışmada kullanılan AISI 316 L paslanmaz çelik ana malzemesinin mikroyapı görüntüsü bulunmaktadır. Malzemenin mikroyapısı yüzey merkezli kübik (YMK) bir yapı olan ince taneli östenit matristen oluşmaktadır. Malzemenin üretiminden kaynaklanan ikiz tane sınırları ve bantlaşmalar görülmektedir. Bu aşamada kaynak metali ve ITAB bölgeleri ana metal mikroyapısı ile karşılaştırılacaktır.



Şekil 5.16. AISI 316 L çelik malzemenin ana metal bölgesinden x50 büyütme ile alınan görüntü

5.3.2.1. Ferrit Bantları

Kaynak metalinde soğumaya bağlı katılaşma ilk olarak çekirdeklenme oluşmadan başlar. Ergimiş kaynak metalinin ana metale temas ettiği noktalarda çekirdek oluşumu gözlenir ve soğuma dendritik katılaşma olarak sonuçlanır. Ötektik reaksiyon sonucu ortaya çıkan bu kaynak metali bölgesi heterojen katılaşma ile oluşmuştur ve δ ferrit ile γ östenit katı fazlarını içerir. Bu soğuma sonucu ITAB bölgelerinde soğuma hızına bağlı olarak çeşitli uzunlukta dendritik kollar oluşur (Uzun, 2010).

1 ve 2 numaralı numuneye ait Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’deki görüntülerde kaynak metali bölgesinde soğumaya bağlı olarak ısı geçişlerini gösteren dalgalanmalar görülmektedir. ITAB bölgesinde tane sınırlarında ferrit oluşumları gözlenmektedir. Kaynak metalinden ana metale doğru ısının ilerlemesiyle yatay konumlanmış ferrit bantları oluşmaktadır. Darbe enerjisi arttıkça daha fazla ısının ana metale doğru ilerlemesi sebebiyle ferrit bantlarının arttığı Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de açıkça görülmektedir.



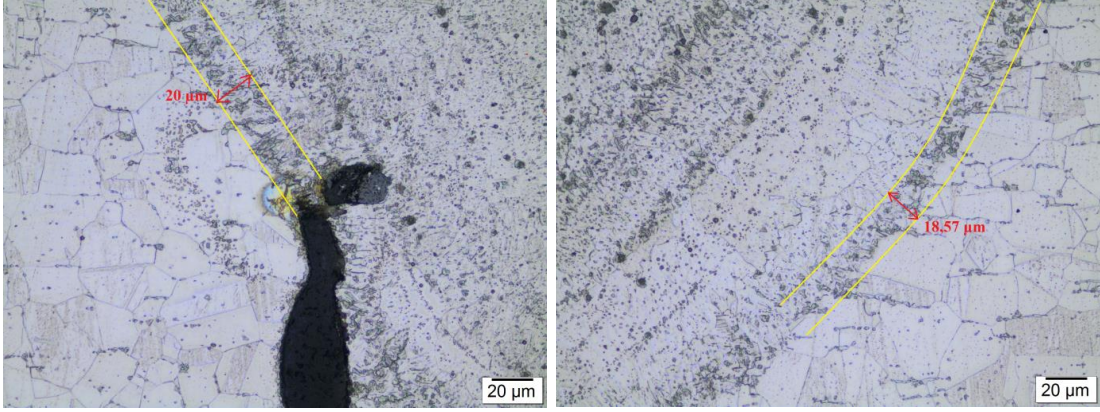
Şekil 5.17. 1. Numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü



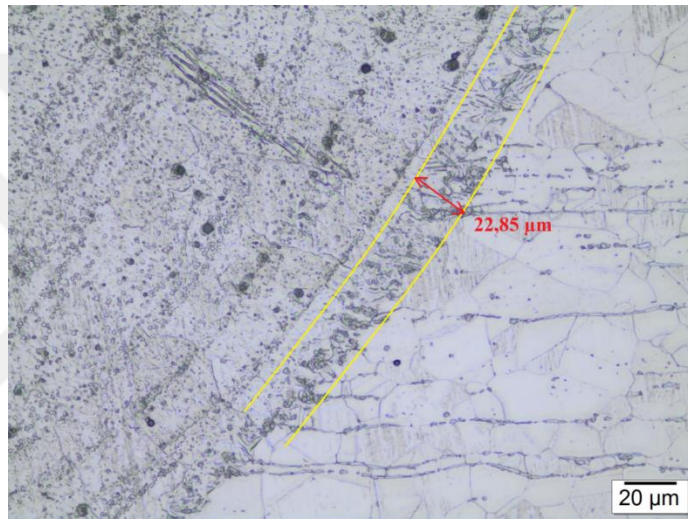
Şekil 5.18. 2. Numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü

5.3.2.2. ITAB Genişliği ve Tane İrileşmesi

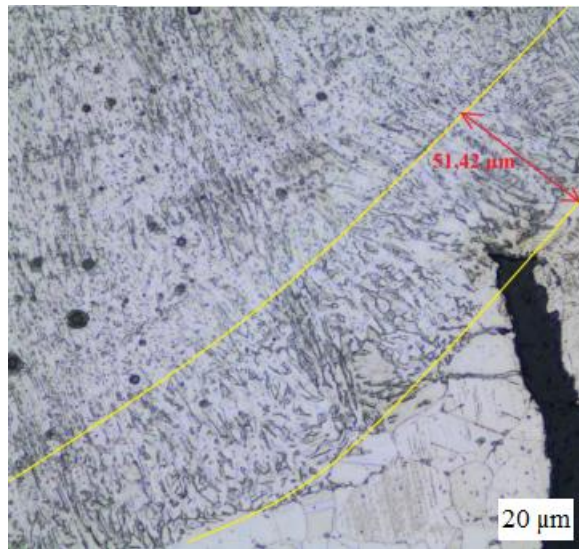
Lazer kaynağının en önemli avantajlarından biri ısı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) dar olmasıdır. Böylece malzemenin mekanik özellikleri diğer kaynak yöntemlerine göre daha iyi korunmuş olur. Birçok çalışmada raporlandığı üzere bu çalışmada da kaynaklı parçada dar bir ITAB gözlenmiştir. Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de 7., 8. ve 9. numunelerde gözlenen ITAB bölgeleri yaklaşık olarak işaretlenmiştir. Bu ölçümlere göre artan darbe enerjisi ile daha fazla alan ısıdan etkilenmiştir ve daha geniş ITAB gözlenmiştir.



Şekil 5.19. 7. numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü



Şekil 5.20. 8. numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü



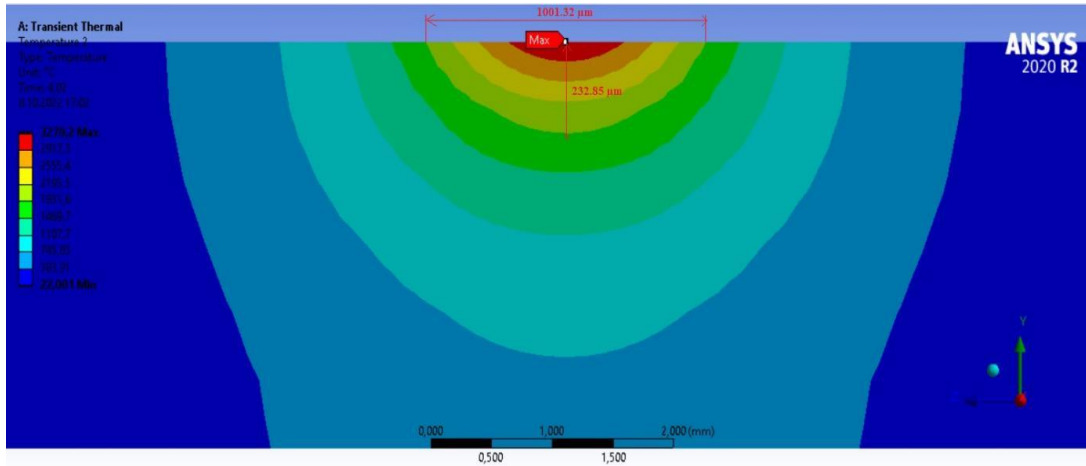
Şekil 5.21. 9. numuneden x50 büyütme ile alınan optik mikroskop görüntüsü

ITAB bölgeleri kaynak metalinden gelen ısıya bağlı olarak mikroyapının değiştiği bölgelerdir. Isının yayıldığı doğrultu boyunca yönlendirilmiş ısı dağılım hatları görülür. Bu bölgenin mikroyapısı incelendiğinde yavaş soğumayla katılaşma gecikir bunun sonucunda da tane irileşmesi gözlemlenir. Tane boyutları ısı girdisinin artmasıyla daha yavaş soğuma gerçekleştiğinden artar.

5.4. Sonlu Elemanlar Metodu ile Termal Analiz

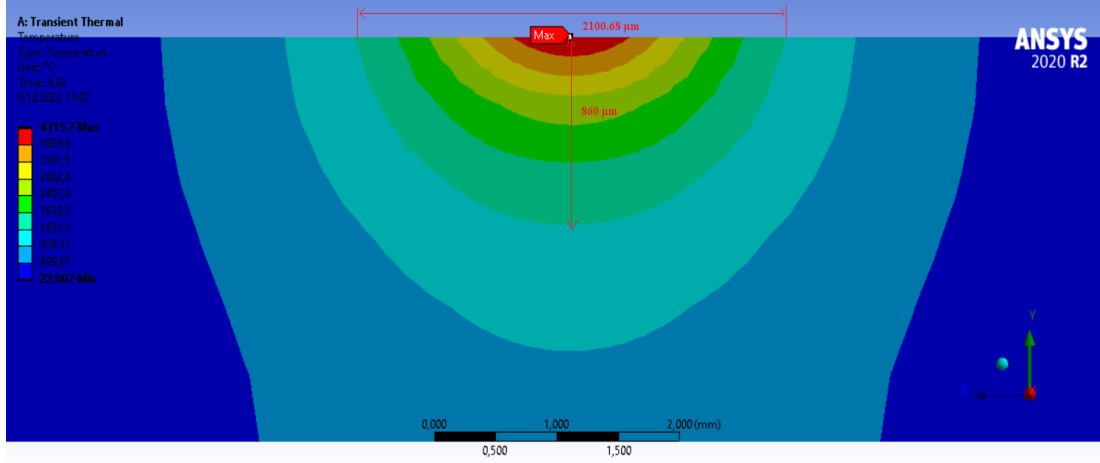
Çalışmanın bu aşamasında numunelere uygulanan lazer kaynak işlemleri bilgisayar ortamında ANSYS yazılımının Transient Thermal modülünde simüle edilmiştir. Simülasyona göre oluşan ısı dağılımları deney numunelerinin mikroskopik görüntüleri ile karşılaştırılmıştır.

316L paslanmaz çeliğin ergime sıcaklığı 1375 °C - 1450 °C aralığında olduğundan simülasyondaki ergime bölgelerinin ısı dağılımının yaklaşık bu derecelere denk gelen kısımlar olduğu varsayılmaktadır. Simülasyondaki kaynak genişliği ve penetrasyon derinlik değerleri 15J, 20J ve 25J değerleri için ayrı ayrı aşağıdaki Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24' te belirtildiği şekilde ölçülmüştür.



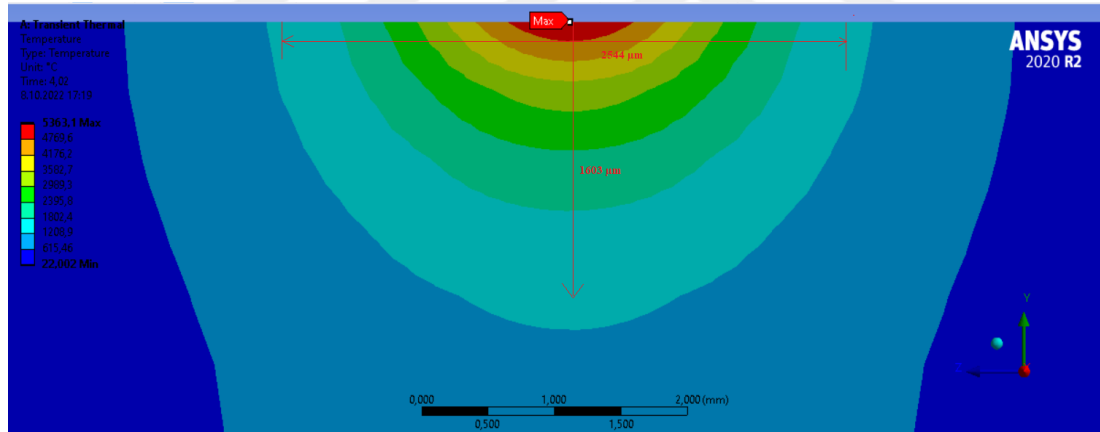
Şekil 5.22. 15 J darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımı

15 Joule darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımında kırmızı, turuncu, sarı ve açık yeşil renklerdeki bölgeler sıcaklığın 1469,7 °C'nin üzerinde olduğu bölgelerdir. Bu bölgeler sıcaklık dağılımına göre yaklaşık kaynak metali bölgesini temsil etmektedir. Bu bölgede kaynak genişliği 1001,32 μm, penetrasyon derinliği 232,85 μm bulunmuştur.



Şekil 5.23. 20 J darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımı

20 Joule darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımında kırmızı, turuncu, sarı ve yeşil renklerdeki bölgeler sıcaklığın 1453,2 °C'nin üzerinde olduğu bölgelerdir. Bu bölgeler sıcaklık dağılımına göre yaklaşık kaynak metali bölgesini temsil etmektedir. Bu bölgede kaynak genişliği 2100,68 μm , penetrasyon derinliği 860 μm bulunmuştur.



Şekil 5.24. 25 J darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımı

25 Joule darbe enerjisi uygulanan numunenin ısı dağılımında kırmızı, turuncu, sarı ve yeşil renklerdeki bölgeler sıcaklığın 1802,4 °C'nin üzerinde olduğu bölgelerdir. Açık mavi bölgeler ise 1200 °C'yi göstermektedir. Yeşil bölgeden mavi bölgeye geçişte sıcaklığın doğrusal arttığı düşünüldüğünde mavi bölgenin bir kısmı da kaynak metali bölgesine dahildir. Yaklaşık ölçümlerden alınan bu bölgelerde kaynak genişliği 2544 μm , penetrasyon derinliği 1603 μm bulunmuştur.

Tablo 5.2. Deneysel sonuçlara ve simülasyon sonuçlarına göre kaynak genişliği ve penetrasyon derinliklerinin karşılaştırılması

Darbe Enerjisi (J)	Koruyucu Gaz	Deneysel Sonuçlar		Simülasyon Sonuçları	
		Kaynak Genişliği (μm)	Penetrasyon Derinliği (μm)	Kaynak Genişliği (μm)	Penetrasyon Derinliği (μm)
15	Argon	1568	579	1001,32	232,85
15	Oksijen	-	-		
15	Hava	1842	495		
20	Argon	1810	821	2100,68	860
20	Oksijen	1900	1280		
20	Hava	1979	726		
25	Argon	1820	916	2544	1603
25	Oksijen	2000	644		
25	Hava	2030	800		

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AISI 316 L çelik parçalar Nd: YAG lazer cihazı ile alın kaynağı yapılmak suretiyle birleştirilmiştir. Bu birleştirmeler farklı kaynak parametreleri ile yapılmış olup lazer kaynak parametrelerinin kaynak kalitesine olan etkileri numunelerin metalografik incelemeleri ile araştırılmıştır. Sonrasında lazer kaynak işlemleri bilgisayar ortamında sonlu elemanlar metodu ile simüle edilmiş ve çıkan sonuçlar metalografik incelemeler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilerden çıkan sonuçlar şu şekildedir:

1. Kaynaklı parçalar birleşme ve nüfuziyet açısından incelendiğinde 9 numuneden 8'inde birleşme sağlandığı görülmüştür. Metalografik incelemelerde kaynağın iletim kaynağı olduğu görülmüş ve birleşmelerin yüzey bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir. Ergimiş kaynak metali malzeme kesiti boyunca penetrasyon yapmadığı için tüm yüzeylerde tam örtüşme gözlenmemiştir.
2. Kaynak işlemlerinde gözeneklilik ve çatlama gibi kaynak hataları gözlenmemiştir. Metalografik incelemelerde argon koruyucu gazı altında yapılan kaynakların yüzey bölgelerinde hafif çöküntüler olduğu görülmüştür. Kaynaklarda ek bir birleşme malzemesi kullanılmadığından bu çöküntülerin kaynak metalinin buharlaşmasından meydana geldiği düşünülmektedir.
3. Tüm kaynak işlemlerinde darbe enerjisi arttıkça kaynak genişliği ve penetrasyon derinliğinin arttığı görülmüştür. Sadece oksijen gazı altında yapılan kaynaklarda artan darbe enerjisi ile penetrasyon derinliğinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun yüzeydeki oksitlenme ve plazma oluşumuna bağlı kaynak nüfuziyetinin azalmasından meydana geldiği düşünülmektedir.
4. Kaynakların tümünde ince de olsa bir oksit tabakası görülmüştür. Oksijen ve hava gazları altında yapılan kaynaklarda koruyucu gazın oksijen ihtiva etmesinden dolayı oksit tabakalarının daha kalın olduğu görülmüştür. En ince oksit tabakası argon, en kalın oksit tabakasının ise oksijen koruyucu gazı altında yapılan kaynaklarda meydana geldiği tespit edilmiştir.
5. ITAB ve ana metal mikroyapıları incelendiğinde yapının çoğunlukla ince taneli östenit matrisinden oluştuğu görülmektedir. Östenit matrise ek olarak kaynak metalinden ana metale doğru ısının ilerlediği yön boyunca ferrit bantları gözlenmiştir. Soğumaya bağlı oluşan bu dendritik kolların artan darbe enerjisi ile çoğaldığı tespit edilmiştir.

6. Metalografik incelemelerde ITAB genişlikleri ve tane irileşmeleri de incelenmiştir. Artan darbe enerjisi ile daha fazla alanın ısıdan etkilendiği ve daha geniş ITAB oluştuğu görülmüştür. Artan darbe enerjisi ile ısı girdisinin artması ve yavaş soğumaya bağlı olarak tane boyutlarının da büyüdüğü gözlenmiştir.

7. Kaynak işlemleri esnasında oluşan ısı dağılımları sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Simülasyon sonuçları deney sonuçları ile uyumlu olmasa da deney sonuçlarında görüldüğü gibi simülasyon sonuçlarında da artan darbe enerjisi ile kaynak genişliği ve penetrasyon derinliğinin arttığı görülmüştür.

Elde edilen bu sonuçların lazer kaynağında koruyucu gaz ve darbe enerjisi gibi parametrelerin seçiminde fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Sonlu elemanlar metodu ile kaynak işleminin modellenmesi ve deneysel veriler ile karşılaştırılması bilgisayar ortamında yapılan kaynak işlemlerinin uygulamada yapılan kaynak işlemlerinden ne kadar sapma gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Bu çalışma ile deneysel veriye ek olarak modellemenin etkisi tespit edilmiş olup bu alanda yapılacak diğer çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, S. P., Mahdieh, M. H. (2017). Active Layer Position Optimization in Asymmetric AlGaInAs/AlGaAs Semiconductor Laser Diode Structures. *Optics Communications*, 402, 624–629.
- Abuç, S. (2006). Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Kaynağında Koruyucu Gazın Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, T02916.
- Acar, F. (2020). Kaynaklanmış Paslanmaz Çelik ve Karbon Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Taneler Arası Korozyonun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 10351437.
- Akman, E. (2006). Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd: YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 197940.
- Alhajhamoud, M., Candan, L., Ilgaz, M. A., Cinar, I., Ozbey, S., Čorović, S., Kayahan, E. (2022). Laser Welding of 316L Austenitic Stainless Steel in an Air and a Water Environment. *Materials*, 15(6), 2248.
- Alpar, T., Çelenk, O., Çavdar, K. (2021). Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Lazer Kaynağı Uygulamaları. *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3), 1139-1158.
- Al-Qaisy, S. J. S. (2019). CO2 Gaz Lazeri Kullanılarak Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Boruların Kesilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 1041.
- Aran, A., Temel, M.A. (2003). *Paslanmaz Çelik Yassı Mamul Temelleri (2)*. İstanbul: Acar Matbaacılık
- Arcan, A. (2011). Lazer Işını ile Metallerin Kesilmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 318234.
- ASM. (1985). *Metallography and Microstructures. Metal Handbook (9th ed.)* (279-296). Materials Park, Ohio: ASM International.
- Aydın, K., Karaağaç, İ., (2018). Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynağının Başlıca Uygulamaları. *El-Cezeri*, 5(2), 693-705.
- Aydın, T. (2002). Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Kullanılan Gazlar ve Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1769.

- Baltaş, H. (2006). YBaCuO ve BiPbSrCaCuO Süperiletkenlerinin Soğurma Katsayılarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 182958.
- Başıyigit, A.B., Kurt, A. (2015). Dupleks Paslanmaz Çeliklerde Sigma Fazının Korozyon Dayanımına Etkileri, *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(4), 2-7.
- Bhatt, D., Goyal, A. (2018). Effect of Parameters of Nd YAG Laser Welding on AISI 316 Stainless Steel and Brass. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Telangana, India, 13-14 July 2018.
- Boyras, İ., Yıldız, A. (2017). Lazer Çeşitleri ve Yüksek Yoğunluklu Lazer Kullanımı. *Çağdaş Tıp Dergisi*, 6, 104-109. DOI: 10.16899/ctd. 55797
- Candan, L. (2008). Karbon-Fiber Takviyeli Kompozitler ve Polikarbonat Malzemelerin Lazerler Delme Parametrelerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 232756.
- Cebeci, İ. (2021). AISI 304-310-316-430 Paslanmaz Sacların Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kerf Genişliği, Çapak Yüksekliği ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 10374340.
- Çelen, S. (2006). Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 202407.
- Çelik, E. (2006). Martenzitik Paslanmaz Çelik ve Ferritik Paslanmaz Çeliğin Kendileriyle ve Birbirleriyle Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 185318.
- Çetin, Balkız, G. (2019). 405 Nm Dalga Boylu, Yansıtımlı Kırınım Izgaralı Harici Optik Geri Beslemeli Diyot Lazer Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 10236710.
- Çetin, Ş. (2019). Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 10228322.
- Dawes, C. (1992). *Laser Welding a Practical Guide* (1st Ed.), Abington Hall, England: Woodhead Publishing.
- Durukan, T., Ergören, B., Ertürk, İ. (2015). Çeliklerin Kaynağında Oluşan Yapısal Değişimlere Alaşım Elementlerinin Etkileri, *Kaynak Kongresi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi*, Ankara, 20-21 Kasım 2015.

- El-Batahgy, A. M. (1997). Effect of Laser Welding Parameters on Fusion Zone Shape and Solidification Structure of Austenitic Stainless Steels. *Materials letters*, 32(2-3), 155-163.
- Ertem, R.U. (2013). Paslanmaz Çeliklerde Lazer Kaynak Parametre Değişimlerinin Dikiş Geometrisine Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 31, 583-593.
- Gunn, N.R. (1997). *Duplex Stainless Steels* (1st Ed). Abington Publishing, England: Woodhead Publishing
- Güneş, C. (2012). Benzinli Enjektörlerin Lazer Kaynağı ve Lazer Kaynak Parametreleri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 0102953.
- Hake, H. (1985). *Laser Light Dynamics* (1st Ed.). North-Holland Physics Publishing, Amsterdam: North-Holland.
- Jelínková, H. (2013). *Lasers for Medical Applications: Diagnostics, Therapy and Surgery*. Woodhead publishing, Cambridge: Elsevier.
- Kahraman, İ. (2017). Katıhal Lazerlerin Özelliklerine Sıcaklığın Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 470605.
- Kalkandelen, C. (1996). Azot Lazer Yapımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 30960.
- Karaağaçlı, A. (2019). Otomotiv Uygulamalarında Lazer Kaynak Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 10213389.
- Karcı, F. (2008). Soğuk Deformasyon ve Kaynak Isı Girdisinin AISI 304 Paslanmaz Çelik Direnç Kaynak Kalitesine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 312794.
- Kars, E. (2022). Doğrudan Diyot Lazer Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 24990
- Kasnak, G., Fıratlı, H. E. (2016). Lazer Fiziği ve Lazer Uygulamalarında Temel Kavramlar. *Türkiye Klinikleri Periodontoloji* (2), 1-6.
- Kaya, Y. (2014). Patlamalı Kaynak Yöntemi ile Üretilen Grade A Gemi Sacı-Paslanmaz Çelik Kompozitlerin Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 10043780.

- Köse, C., Kaçar, R. (2015). Kaynak İlerleme Hızının AISI 316 L Paslanmaz Çelik Lazer Kaynaklı Birleştirmelerinin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 225-235.
- Kukul, F. (2013). Farklı Parametrelerde Er,Cr: YSG ve Diyot Lazer Uygulamasının Mine ve Dentin Erozyonunu Önleme Üzerine Etkisinin İn Vitro olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 11655.
- Kutz, M. (2002). *Handbook of Materials Selection* (1st Ed). Wiley Publishers,, Canada: John Wiley & Sons.
- Kükürtçü, G., E. (2014). Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Kabiliyeti ve Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, T05937.
- Lin, W. (1991). A Methodology for Quantifying HAZ liquation cracking susceptibility. PhD. Dissertation, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Lin, W., Lippold, J.C., Baeslack, W.A. (1993). An investigation of heat-affected zone liquation cracking, 1: a methodology for quantification. *Supplement to the Welding Journal*, 71(4) : 135-153
- Lippold, J. C., Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels* (1st Ed). Wiley Publishers, Canada: John Wiley & Sons.
- Mohammed, G. R., Ishak, M., Aqida, S. N., Abdulhadi, H. A. (2017). Effects of Heat Input on Microstructure, Corrosion and Mechanical Characteristics of Welded Austenitic and Duplex Stainless Steels: A review. *Metals*, 7(2), 39. DOI:10.3390/met7020039
- Olsen, F. O. (2009). *Hybrid Laser-Arc Welding*. Woodhead Publishing Limited, Boca Raton: CRC Press.
- Özcan, M., Tarakcıoğlu, M., Kahramanlı, Ş. (2004). Saç Malzemelerin Lazer Kaynak Parametreleri. *Selçuk-Teknik Dergisi*,3(1-2004), 14-25.
- Özdemir, A., Ö. (2019). Yarı-İletken Diyot Lazerler İçin Mikro Bölgesi, Elektronik Sıcaklık Kontrollü Lazer Haznesi Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 10272170.
- Palabıyık, O. (2013). Soğuk Deformasyonun AISI 304 ve AISI 204Cu Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikro Yapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13446
- Potter, K. S., Simmons, J. H. (2021). *Optical Materials* (2nd Ed). Elsevier.

- Quintino, L., Assunção, E. (2013). Conduction Laser Welding. *Handbook of Laser Welding Technologies*, 139–162. DOI:10.1533/9780857098771.1.139
- Şahin, E. (2006). He-Ne / I2 (633 nm) Lazer Frekans Kararlılığı ve Mutlak Frekans Ölçümü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 3826.
- Şen, O. (2009). Sezyum (Cs) Atomik Gazı İle Mikrodalga ve Lazer Işınımının Rezonans Etkileşimi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, T03950.
- Topal, C. (2019). Robotik Lazer Kaynak ve Plazma Ark Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilen AISI 410S Ferritik Paslanmaz Çeliğin Mekanik, Mikroyapı ve Kaynak Sonrası Isıl İşlem Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 10228608.
- Tümer, M. (2012). Koruyucu Gaz Kompozisyonunun Özlü Tel Ark Kaynak Yöntemi İle Birleştirilen Paslanmaz Çeliklerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, T05622.
- Türkyılmazoğlu, A. (2006). Dupleks, Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, T02913.
- Tüysüz, G. (1999). Yüksek Azot İçeren Çökeltme İle Sertleştirilebilir Ostenitik Paslanmaz Çelikler. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 334.
- Uğur, M. (2005). Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında İç Yapının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2947.
- URL-1: https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/statik_sayfa_ekleri/ISIL%20%C4%B0%C5%9ELEM_18.06.2019.pdf, (Ziyaret tarihi: 3 Nisan 2022)
- URL-2: <https://avesis.ktu.edu.tr/kursaticin/dokumanlar>, (Ziyaret tarihi: 22 Mayıs 2022)
- URL-3: <https://docplayer.biz.tr/16660241-Paslanmaz-celiklerin-kaynak-kabiliyeti.html>, (Ziyaret tarihi: 4 Mart 2022)
- URL-4: http://www.askaynak.com.tr/contents/34/20110704120329_paslanmaz-celikler.pdf, (Ziyaret Tarihi: 19 Nisan 2022)
- URL-5: <https://www.metaluzmani.com/schaeffler-diyagrami/>, (Ziyaret tarihi: 25 Haziran 2022)

- URL-6: <https://celik.video.blog/sigma-fazi/>, (Ziyaret tarihi: 2 Mayıs 2022)
- URL-7: https://www.magmaweld.ru/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/Dubleks_paslanmaz_celiklerin_kaynagi.pdf, (Ziyaret tarihi : 11 Temmuz 2022)
- URL-8: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Lazer>, (Ziyaret tarihi: 14 Ocak 2022)
- URL-9: [https://tr.wikipedia.org/wiki/So%C4%9Furma_\(fizik\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/So%C4%9Furma_(fizik)), (Ziyaret tarihi: 19 Mart 2022)
- URL-10: <https://www.kuark.org/2012/05/laserler/>, (Ziyaret tarihi: 3 Haziran 2022)
- URL-11: [https://staff.emu.edu.tr > alimurat > LAZER Cesitleri](https://staff.emu.edu.tr/~alimurat), (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2022)
- URL-12: https://en.wikipedia.org/wiki/Active_laser_medium, (Ziyaret tarihi: 12 Mayıs 2022)
- URL-13: https://stringfixer.com/tr/Optical_laser, (Ziyaret tarihi: 14 Mayıs 2022)
- URL-14: https://www.rp-photonics.com/laser_gain_media.html, (Ziyaret tarihi: 19 Mayıs 2022)
- URL-15: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/common-laser-types/>, (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2022)
- URL-16: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/differenttypesoflasers.html>, (Ziyaret tarihi: 15 Mayıs 2022)
- URL-17: <http://alperbayraktar.com.tr/dralper-bayraktar/ayin-makalesi/188-laser-tarihce-calma-mekanii-ceitleri.html>, (Ziyaret tarihi: 1 Haziran 2022)
- URL-18: <https://www.muhendisbeyinler.net/gaz-lazerler-hakkinda-genel-bilgiler/>, (Ziyaret tarihi: 28 Nisan 2022)
- URL-19: https://stringfixer.com/tr/Laser_pump. (Ziyaret tarihi: 2 Haziran 2022)
- URL-20: <https://www.morntech.com/blog/shield-gas-for-laser-welding/>, (Ziyaret tarihi: 28 Temmuz 2022)
- Uzun, R. O. (2010). Lazerle Kaynak İşleminde Kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 269122.
- Woollin, P., Gooch, T. G. (1995). Welding processes for stainless Steels. *Welding in the World/Le Soudage dans le Monde*, (36), 75-82.
- Yılmaz, R. (2017). Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesi ve

Mekanik Özellikleri. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 598-605.

Yılmaz, R., Barlas, Z., (2011). Paslanmaz Çeliklerin Gazaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Koruyucu Gaz Kompozisyonunun Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 391-400.

Yorulmazel, S., C. (2007). Paslanmaz Çelik Konstrüksiyonlarda Oluşan Distorsyonların Etüdü. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 0032373.

Yüce, C. (2018). Yüksek Mukavemetli Çelikler İle Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa,522361.

Yüksel, M., Can, H., Köniğ, R. (1999). Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Sonrası Yapıları, *Kaynak Kongresi II. Ulusal Kongresi*, Ankara, 12-13 Kasım 1999.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yoluş, A., Kayan, G., **Yılmaz, Ş.**, Tıkız, İ., (2022). Gemilerdeki Egzoz Atık Isının Termoelektrik Jeneratörler ile Geri Kazanılması. *Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora*, 1(1), 79-87. DOI: 10.29228/jomaramphora.62218

Yılmaz, Ş., Tıkız, İ., Kayahan, E. (2022). AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Lazer Kaynağında Lazer Kaynak Parametrelerinin Metalürjik Yapıya Etkisi ve Isı Dağılımının İncelenmesi. *7. Uluslararası Akademik Öğrenci Çalışmaları Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 17 Kasım 2022.



ÖZGEÇMİŞ

İlk orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2012 yılında girdiği Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2016 yılında mezun oldu. 2020 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. 2018 yılından beri Akmercan Şirketler Grubu'nda Proje Onay Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

