

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**AISI 430Ti PASLANMAZ ÇELİKLERDE LAZER KAYNAK GÜÇ
FAKTÖRÜNÜN KAYNAK DAYANIMINA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Koray GÜLER

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı**

EYLÜL, 2020

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**AISI 430Ti PASLANMAZ ÇELİKLERDE LAZER KAYNAK GÜÇ
FAKTÖRÜNÜN KAYNAK DAYANIMINA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Koray GÜLER
(Y1813.080001)**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ömer Faruk ERKENDİRCİ

EYLÜL, 2020

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “AISI 430Ti Paslanmaz Çeliklerde Lazer Kaynak Güç Faktörünün Kaynak Dayanımına Etkilerinin Araştırılması” adlı çalışmamın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Kaynakça ’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim.
(07/09/2020)

Koray GÜLER

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda bana her zaman akademik görüş ve düşünceleriyle yol gösteren Sn. Prof. Dr. Ömer Faruk ERKENDİRCİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu projeyi yaparken numune hazırlama süreçlerinde değerli ustalarım Samet BALCI ve Dinçer ERGENE'ye, laboratuvar ekibinden ustalarım Servet SAPMAZ ve Alkin DEĞİRMENCİ'ye kalite sorumlusu Sn. Asude BALAKAN'a, proje sorumlusu Merve Topçu'ya, BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. Alan Yöneticisi Sn. Bülent ÇETİN ve Sn. Zeynel YILMAZ'a, Üretim Müdürü Sn. Özgür SARIKAYA'ya, Bakım Müdürü Sn. Emre YİĞİT'e proje yöneticisi Sn. Hilal SUCU'ya, Fabrika Direktörü Sn. Serkan ÖZTÜRK'e ve bütün ekip arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Desteklerinden dolayı kardeşim Ece GÜLER ve babam Ferhat GÜLER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bana getirdiği şanstı dolayı kızım Alisa'ya,

Hep yanımda olarak bu zorlu süreci kolaylaştıran, hayatımın her anında benden desteğini esirgemeyen canım eşim Nur GÜLER' e teşekkür ederim.

Eylül, 2020

KORAY GÜLER

AISI 430Ti PASLANMAZ ÇELİKLERDE LAZER KAYNAK GÜÇ FAKTÖRÜNÜN KAYNAK DAYANIMINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

İki malzemenin birbiriyle birleştirilip tek bir malzeme elde edilmesine kaynak adı verilir. Titanyum ve alaşımları düşük ağırlıkları, dayanımları ve gösterdikleri ek üstün özellikler ile fiziksel ve kimyasal açıdan endüstride yaygın olarak tercih edilen paslanmaz çelik alaşımlarındandır. Günümüz şartlarında farklı talepler ve şartlara uygun malzemeler elde etmek için, farklı özelliklerde ve farklı bağlantı yöntemleriyle aynı ya da farklı metalleri birleştirme ihtiyacı doğar. Bu yöntemlerden biri olan lazer, İngilizce Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, yani uyarılmış radyasyon salınımlarıyla ışığın kuvvetlendirilmesi sözcüklerinin baş harflerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Lazer ışın kaynağı sanayide sağladığı bir çok avantajla günümüzde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Titanyum metali kaynaklanması zor olan metallere dendir fakat lazer kaynak yöntemiyle uyumlu özellikler göstermektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte yöntemin Titanyum metali üzerinde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Lazer kaynağı uygun parametrelerle iyi kalitede ürün sağlayan bir yöntemidir. Diğer yöntemlere göre avantajı bu parametrelerinin ayarlanabilir ve takip edilebilir olmasıdır. Yöntemin temel parametrelerini inceleyecek olursak lazer gücü, kaynak hızı ve odak noktası bunların başında gelir.

Bu çalışmada AISI 430Ti paslanmaz çeliği üzerinde, lazer gücünün kaynaklanan malzemenin dayanımına etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için, beş farklı güç değerinde numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler sertlik, çekme, hasar analizi testleri ve mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. İncelemeler sırasında çekme dayanımının, kopma dayanımının ve yüzde uzama miktarının lazer gücü artışıyla birlikte arttığı, fakat belirli bir değerden sonra düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde ise, iri taneli yapıdan ince taneli yapıya geçişin düzenli olduğu fakat lazer gücü artışının bir süre sonra kaynak bölgesinde erimeye ve

tane irileşmesine sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmalar, karşılaştırmalı olarak yürütölmüş sonuçlar, deneyler ve bulgularla raporlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer kaynak, Titanyum alaşımlı metaller, Çekme testi, Lazer parametreleri, mikroyapı

INVESTIGATION OF EFFECT OF THE LASER WELDING POWER FACTOR ON WELDING STRENGTH AT AISI 430Ti STAINLESS STEEL

ABSTRACT

Joining two materials with each other and obtaining single material is named welding. Titanium and its alloys are one of the most common usage stainless steel alloys in industrial usages. Due to physical and chemical properties and with their lower weight, strength and superior properties. In nowadays, in order to expectation of materials fitting for different demands and conditions, it is needed to join the same or different metals with different properties and different connection methods. One of these methods that is called laser, has been created by combining with English initials of Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. The laser welding has wide range usage area in today with many advantages in the industry. Titanium metal is one of the metals that are robust for welding, but it shows features compatible with laser welding method. With technological advances, the usage of the laser welding method with Titanium metal is getting increasing in. Laser welding is a welding method that provides qualified quality product with fixed parameters. Some of obvious advantageous features accordance to other methods are that adjustability and traceability. If would focus on basic parameters of the method, these are laser power, welding speed and focus point.

In this study, the effect of laser power on the strength of the joint metal was investigated on AISI 430Ti stainless steel. In experimental studies, samples have been produced with five different powers. The produced samples were subjected to hardness, tensile, fracture, surface tests and microstructure investigations. During tensile test examinations, it was determined that the rupture strength, tensile strength and permanent elongation amount increased with the increasing of laser power, but decreased after a certain value. In microstructure studies, it has been observed that the transition from coarse-grained to fine-grained structure is regular, but laser power increasing causes melting in welding zone and after causes grain coarsening. Thus,

the data were subjected in comparison the results were reported with experiments and investigation.

Key Words: Laser welding, Titanium alloy metals, Tensile test, Laser welding parameters, Microstructure

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ONUR SÖZÜ	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xv
I. GİRİŞ	1
II. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	3
A. Paslanmaz Çelikler	3
B. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması	4
1. Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	5
2. Östenitik Paslanmaz Çelikler	7
3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler	7
4. Dupleks Paslanmaz Çelikler	8
5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler	8
C. Paslanmaz Çeliklerin Alaşım Elementleri	10
D. Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler.....	12
E. Titanyum Alaşımları	15
III. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ.....	17

A. TIG Kaynağı Yöntemi	19
B. Örtülü Elektrot ile Ark Kaynağı Yöntemi	20
C. MIG-MAG Kaynak Yöntemi	20
D. Tozaltı Kaynağı Yöntemi	21
E. Lazer Kaynak Yöntemi.....	22
IV. LAZER KAYNAK YÖNTEMİ	23
A. Lazer Işını	23
1. Katı Hal Lazerleri : Nd-YAG Lazer, Yakut Lazer, Ti-Safir Lazer.....	25
2. Gaz Lazerleri.....	27
3. Diyot Lazerleri	27
B. Lazer Kaynağı.....	28
C. Lazer ile Kaynak Yöntemleri.....	33
1. İletimsel Lazer Kaynak	35
2. Derinlemesine Lazer Kaynağı.....	36
D. Lazer Kaynak ile Birleştirme Yöntemleri.....	40
1. Alın Alına Kaynak	40
2. Bindirme Kaynağı.....	41
3. Köşe Kaynağı.....	41
4. Kaynak	41
E. Lazer Kaynak Ekipmanları	41
1. Odaklama Ekipmanları	41
2. Lazer Üretici.....	43
3. Pompa Kaynağı.....	43
4. Yansıtıcılar	44
F. Lazer Kaynak Yönteminde Koruyucu Gaz.....	44
G. Titanyum Alaşımların Lazer Kaynağı	47

H. Lazer Kaynak Yönteminde Güvenlik Seviyeleri	47
1. Birinci Sınıf Lazerler	47
2. İkinci Sınıf Lazerler	48
3. Üçüncü Sınıf Lazerler	48
a. Üçüncü Sınıf a tip Lazerler	48
b. Üçüncü Sınıf b tip Lazerler	48
4. Dördüncü Sınıf Lazerler	49
İ. Verimliliği Artırıcı Uygulamalar	49
J. Yöntemin Avantajları	50
K. Uygulama Alanları	52
V. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	54
VI. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	62
A. Mekanik Testler	62
1. Sertlik Testi Sonuçları	62
2. Çekme Testi Sonuçları	63
3. Hasar Analizi Sonuçları	69
B. Mikroyapı Analizleri	71
C. Genel Sonuçlar ve Öneriler	76
VII.KAYNAKÇA	78
ÖZGEÇMİŞ	82

KISALTMALAR

HMK	: Hacim Merkezli Kübik
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
AISI	: Amerikan Demir ve elik Enstitüsü
ISO	: Uluslararası Standardizasyon rgt
DIN	: Alman Standardizasyon Enstitüsü
EN	: Avrupa Normları
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
ANSI	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
Nd-YAG	: <i>Neodymium</i> -doped Ytrium Aluminium Garnet
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
MIG	: Metal İnerit Gaz
MAG	: Metal Aktif Gaz
TIG	: Tungsten Inert Gas
MPa	: Mega Pascal
GPa	: Giga Pascal
kN	: Kilo Newton
DC	: Doğru Akım
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
HV	: Vickers Sertliği
m	: Metre
dk	: Dakika
W	: Watt
cm²	: Santimetrekare

sn : Saniye

mm : Milimetre

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1. Ti alaşımlarının genel özellikleri.....	15
Çizelge 2. Farklı kaynak işlemleri için ısı güç yoğunlukları.....	22
Çizelge 3. Lazer kaynak anında yaşanan fiziksel olaylar.....	38
Çizelge 4. Bazı alaşım metallerine ait buharlaşma süreleri.....	39
Çizelge 5. Koruyucu gazların bazı özellikleri	47
Çizelge 6. AISI430 Ti alaşımının kimyasal bileşimi	54
Çizelge 7. AISI430 Ti alaşımının mekanik özellikleri.....	54
Çizelge 8. Lazer kaynak parametreleri.....	55
Çizelge 9. Sertlik değeri sonuçları.....	62
Çizelge 10. Çekme testi sonuçları	65
Çizelge 11. Mikroyapı ölçüm değerleri.....	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.	Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.	Paslanmaz çelik türlerine ait mikro yapı görüntüleri.....	5
Şekil 3.	Ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı	6
Şekil 4.	Shaeffler diyagramı	9
Şekil 5.	Alaşım elementlerinin mekanik ve kimyasal özelliklere etkisi	12
Şekil 6.	Demir karbon denge diyagramı	13
Şekil 7.	Perlit fazının oluşum mekanizması.....	14
Şekil 8.	Kaynak kabiliyetini etkileyen girdiler	18
Şekil 9.	Kaynak yöntemleri	18
Şekil 10.	TIG kaynağı şematik gösterimi	19
Şekil 11.	Örtülü elektrotla kaynak yöntemi	20
Şekil 12.	Tozaltı Kaynağında Kullanılan Alın Bağlantı Şekilleri	21
Şekil 13.	Lazer ışınının oluşma prensibi.....	23
Şekil 14.	Lazer ışın cihazı şematik gösterimi	24
Şekil 15.	Lazer ışınının parça üzerine yansıtılması	25
Şekil 16.	Nd-YAG lazer sistemi şematik gösterimi.....	26
Şekil 17.	Nd: YAG lazeri dikişi görüntüsü.....	26
Şekil 18.	CO ₂ lazeri şematik gösterimi.....	27
Şekil 19.	Lazer kaynak kalitesini etkileyen parametreler	30
Şekil 20.	Lazer gücünün nüfuziyet derinliğine etkisi	30
Şekil 21.	Kaynak yöntemine göre dikiş geometrileri	31

Şekil 22. Lazer kaynak esnasında oluşan bölgeler	31
Şekil 23. Lazer gücünün kaynak dikişi üzerine etkisi	32
Şekil 24. Odaklanma ve kaynak yapılabilecek bölge	32
Şekil 25. Malzeme ve odaklanmış ışın	33
Şekil 26. İletim ve derinlemesine kaynak yöntemi.....	34
Şekil 27. İletimle ve derinlemesine kaynağın farkları	34
Şekil 28. İletimle lazer kaynak düzeneği	35
Şekil 29. İletimsel kaynaktan derinlemesine kaynağa geçiş.....	36
Şekil 30. Derinlemesine kaynak şematik gösterimi.....	37
Şekil 31. Derinlemesine kaynak yönteminin aşamaları.....	38
Şekil 32. Metal yüzeyine lazer ışını teması sonrası süreçler	39
Şekil 33. Lazer kaynak ile birleştirme yöntemleri.....	40
Şekil 34. Merceğin kaynak kafasındaki görünümü	42
Şekil 35. Odaklama ekipmanı ve bağlantı şekli.....	43
Şekil 36. Odak noktası ayarı ve görseli	43
Şekil 37. Optik rezonatörde dalga oluşumu.....	44
Şekil 38. Koruyucu gaz akışı sebebiyle oluşan deformasyon.....	45
Şekil 39. Koruyucu gazın pozisyonu	46
Şekil 40. Lazer Uyarı İşareti	48
Şekil 41. Yakıcı cam etkisi	49
Şekil 42. Lazerlerin kullanım alanları.....	53
Şekil 43. Zwick/Roell kesme kalıbı.....	56
Şekil 44. Zwick Roell Z020 çekme cihazı.....	56
Şekil 45. Mitutoyo marka sertlik ölçüm cihazı.....	57
Şekil 46. Struers Secotom 60 kesme cihazı	57
Şekil 47. Struers CitoPress-30 bakalit kalıplama cihazı	58

Şekil 48. Struers Tegramin 30 zımparalama ve parlatma cihazı	58
Şekil 49. Struers Lavamin temizlik ve kurutma cihazı.....	59
Şekil 50. Adler-Atzmittel marka bakalit dağılayıcı asit	59
Şekil 51. Bakalit görüntüsü.....	60
Şekil 52. Leica DMi 8 Mikroskop	60
Şekil 53. Tescan Vega 3 SB marka taramalı elektron mikroskobu	61
Şekil 54. Çekme testi numunesi	64
Şekil 55. Farklı güçlerden alınan çekme testi numuneleri.....	64
Şekil 56. Çekme testi cihazına bağlanmış numune (a) Çekme cihazına monte edilmiş numune, (b) Kopma sonrası numune görüntüsü.....	64
Şekil 57. Farklı güçlere ait çekme testi sonuç grafikleri (a) 900W, (b) 1100W, (c) 1250W, (d) 1350W, (e) 1450W.....	67
Şekil 58. Farklı güçlere ait kopma yüzeyi görüntüleri (a) 900W, (b) 1100W, (c) 1250W, (d) 1350W, (e) 1450W.....	70
Şekil 59. Kaynak bölgesi mikroyapısı	71
Şekil 60. Farklı güçlere ait mikroyapı ve SEM görüntüleri (a) 900W, (b) 1100W, (c) 1250W, (d) 1350W, (e) 1450W.....	76

I. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler ve alaşımları içeriğinde en az %10 krom metali barındıran demir alaşımlarındandır. İçeriğindeki krom metali sayesinde doğada oksitlenmeye karşı direnç oluştururlar. Paslanmaz çelikler genel olarak şekillendirilebilme ve kaynak edilebilme özellikleriyle ön plana çıkarlar. Gelişen teknolojiyle birlikte günümüz endüstriyel uygulamalarında çokça yer almaktadırlar. Paslanmaz çeliklerin tek başına kullanımında, bazı özellikleriyle istenen şartları sağlamadığı durumlar olabilir. Bu yüzden içerisine katılan alaşım elementleriyle istenen özellikleri karşılar hale gelirler. Bu alaşım elementlerinden en çok tercih edileni titanyum metalidir. Titanyum alaşımlı metaller yüksek mukavemete sahip olmalarının yanı sıra kimyasal etkilere karşı da dirençlidirler. Titanyum alaşımları kaynak yöntemlerinde de sıkça kullanılmaktadır. Fakat birçok gaz türüne karşı duyarlılık gösterdiklerinden kaynak edilme yöntemleri özenle seçilmelidir. Titanyum alaşımlarının en iyi performans gösterdiği yöntemlerden biri de lazer kaynak yöntemidir.

Lazer ile kaynak yöntemi temiz ve kontrol edilebilir olmasıyla günümüz teknolojisinde ön plana çıkmaktadır. Aynı ya da farklı metalleri birleştirmede kullanılabilen lazer kaynak yöntemi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İşlem süresindeki hızı, otomasyon kabiliyeti ve seri üretime uygunluğu, parametlerinin izlenebilir ve ayarlanabilir olması lazer kaynağını sanayide tercih edilir hale getirmiştir.

Bu tez çalışmasında Titanyum alaşımı olan 0,6 mm kalınlığındaki AISI 430Ti metali, farklı güç değerleri kullanılarak lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Çalışma esnasında beş farklı güç değeriyle numuneler üretilmiş, lazer güç değerinin kaynaklanmış parçaların mekanik ve mikro yapı özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Bölüm 2’de paslanmaz çelikler ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Paslanmaz çeliklerin bileşim oranları, sınıflandırılmaları, kullanım alanları anlatılmıştır. Paslanmaz çeliklerin neden tercih edildiği, avantajları,

dezavantajları, kullanılan alaşım elementleri ve özellikleri belirtilmiştir. Tez alışması konusu sebebiyle Titanyum alaşımları geniş kapsamda anlatılmıştır.

Bölüm 3'te paslanmaz çeliklerin kaynaklanma kabiliyeti detaylandırılmıştır. Kaynak kabiliyetine ek olarak paslanmaz çeliklere uygulanabilen kaynak yöntemleri ve metallerin üzerindeki etkileri anlatılmıştır.

Bölüm 4'te tezin ana konusu olan lazer kaynak yöntemi hakkında literatür bilgileri verilmiştir. Lazer ışını elde etme yöntemleri, lazer kaynak yöntemleri, Titanyum alaşımlı metallerin lazerle birleştirilmesi, yöntemin avantajları ve dezavantajları hakkında detaylar işlenmiştir.

Bölüm 5'te deneysel çalışmalar kapsamında numunelerin hazırlanma aşamaları, hazırlanmış numunelerin metalografik testler için kesim ve bakalite alma işlemleri ve kullanılan ekipmanların teknik detayları aktarılmıştır. Üretilen numuneler sertlik testi, çekme testi, hasar analizi ve mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuş elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolarla desteklenmiştir.

Bölüm 6'da tez çalışmasında varılan sonuçlar özetlenmiş ve gelecek çalışmalar için öneriler verilmiştir.

II. PASLANMAZ ÇELİKLER

A. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler kütleli olarak içeriğinde en az %10,5 oranında Krom (Cr) içeren Demir (Fe) esaslı alaşımlardır. Çelikler atmosfer şartlarında diğer alaşımlar gibi paslanma problemi yaşarlar. Çeliklerin yüzeyinde oluşan paslanma tabakası, oksitlenme probleminin metalin iç yüzeyine ilerlemesini engelleyemez. Paslanmayı önleyebilmek için ince fakat düzenli bir oksit tabakasına ihtiyaç duyulur. Paslanmaz çeliğin içeriğindeki artan Cr miktarıyla doğru orantılı olarak, yüzeyinde oluşan oksit tabakası korozyona engel olur.

Cr çeliğin içerisinde Oksijen (O_2) ile güçlü bir kimyasal bağ kurar. Çeliğin yüzeyinde oluşan krom oksit tabakası ne kadar güçlü olursa korozyon ve oksidasyona karşı çelik pasifize edilmiş olur. Bu duruma krom oksit tabakasının koruyuculuğu sebebiyle aktif hal denir.

Yüzeyde oluşan krom oksit tabakası kalıcı değildir. Ortamın aşındırıcı etkisi, çeliğin türü ve kimyasal bileşim oranları tabakanın kalıcılığını etkiler. Fakat optimum koşullar sağlandığında krom oksit tabakası kalıcıdır ve çeliğin korozyon ilerleme hızı oldukça düşüktür. Krom oksit tabakası aşındığında ya da yok olduğunda çelik normal karbonlu ya da az alaşımlı çelikler gibi korozyona uğrar. Bu sebepten dolayı paslanmaz çeliklerin korozyon direncinin oluşabilmesi için % 12'den fazla Cr içermesi önerilir (Arslan. 2018).

Krom oksit tabakası oluşturmak için kimyasal bir işlem yapılmasına gerek duyulmaz. Atmosfer ortamında Cr, kolaylıkla O_2 ile tepkimeye girerek çeliğin yüzeyinde koruyucu tabakayı oluşturur. Çeliğin pasif hale getirilmesi, yüzeyinde bulunan serbest Fe' in, oksitlerin ve kirliliklerin uzaklaştırılması ile sağlanır. İçeriğinde % 12' den fazla Cr bulunan çelikler nitrik asit gibi güçlü oksitleyicilere ve atmosfer etkilerine karşı da direnç gösterir. Fakat sadece Cr içeren çelikler hidroklorik asit (HCl) ve sülfürik asit (H_2SO_4) gibi asitlere karşı direnç gösteremezler. Bu tarz asitler, çeliğin yüzeyinde oluşan koruyucu krom

oksit tabakasını aşındırır ve çeliği korunmasız hale getirir. İndirgeyici asitlere karşı direnç gösterebilmesi için günümüzde Nikel (Ni), Magnezyum (Mg) ve Molibden (Mo) içeren paslanmaz çelikler üretilmektedir. Bu alaşım elementlerini yüksek oranda içeren çeliklerin mikroyapıları farklı biçimde değişkenlik gösterir.

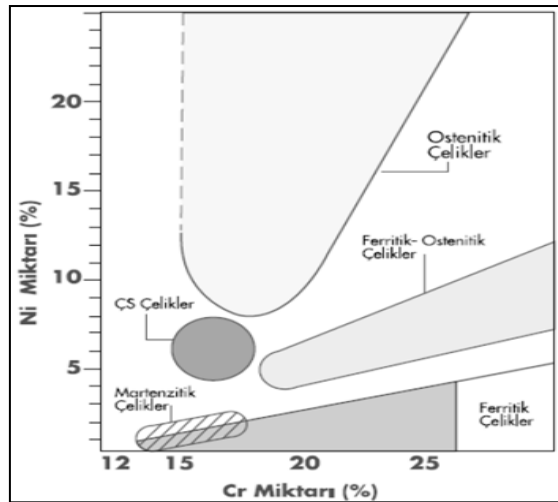
Yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça paslanmaz çeliklerin oksitlenme direnci artar. Bazı çelikler plastik deformasyona diğerlerine göre daha dirençlidir. Bir malzemenin deformasyona bağlı olarak sertleşmesi gerilme sertleşmesi olarak adlandırılır. Gerilme sertleşmesi katsayısı malzeme içerisinde oluşan çıkıkların oranıdır. Katsayının yüksek oluşu malzemenin süneklik özelliğini ifade eder (Korkmaz, 2019).

Günümüz teknolojisinde 170'ten fazla üretilmiş paslanmaz çelik bulunmakta ve her geçen gün özellikleri optimize edilerek geliştirilmektedirler(Arslan. 2018).

B. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Sanayide çokça kullanım alanı olan paslanmaz çelikler yüksek korozyon direncine ve sağlam mekanik özelliklere sahiptir (Yılmaz, Barlas, 2011).

Genel olarak paslanmaz çelikler Fe-Cr-Ni alaşımlarıdır ve içeriğindeki bu elementlerin oranlarına göre 5 farklı gruba ayrılırlar.



Şekil 1. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması

Kaynak: (Arslan. 2018)

Paslanmaz saclarda mikroyapıya en çok etki eden alaşım elementleri Cr, Ni, Mo ve Mangan (Mn)'dır. Cr ve Ni östenit ya da ferritik olma durumunda etkilidir. Ferritik yapıdaki çeliklerin iç yapısı ferrit tanelerinden, östenitik yapıdaki çeliklerin iç yapısı östenit tanelerinden oluşmaktadır. Martenzitik yapıdaki çeliklerin iç yapısında ferrit yapının içerisindeki gibi karbür dağılımları görülür. Dupleks paslanmaz çeliklerin yapısında östenit matris yapısının içerisindeki gibi ferrit levhalarının oluştuğu görülür(Arslan. 2018).



Şekil 2. Paslanmaz çelik türlerine ait mikro yapı görüntüleri

Kaynak: (Kökey, 201).

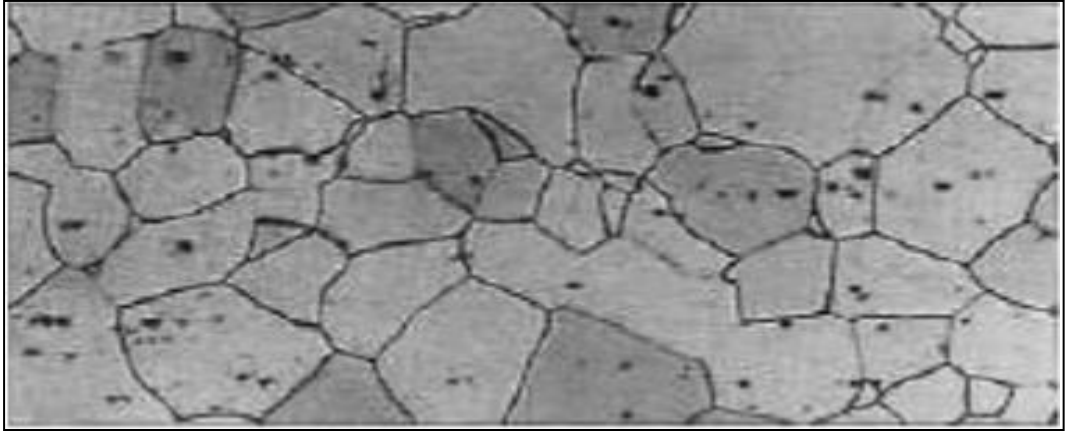
1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Tezin deneysel çalışmalarında kullanılan AISI 430Ti çeliğinin de bu grupta yer aldığı ferritik paslanmaz çelikler; sertleştirilme özellikleri düşük, şekillendirilme özellikleri yüksek ve atmosfer şartlarından kaynaklı korozyona dirençli Fe-Cr alaşımlarıdır. En çok kullanılan paslanmaz çelikler 430 serisidir. Ferritik paslanmaz çelikler otomotiv egzoz sistemleri, çamaşır makinesi tamburları gibi zorlu paslandırıcı ortamlara ek olarak uygun fiyatları sebebiyle gıda sanayi, petro kimya ve kimya endüstrisinde de yoğunlukla kullanılmaktadır (Kökey, 201).

Ferritik çelikler normal şartlarda sünek yapıda özellik gösterirler. Fakat yüksek sıcaklıklara ısıtıldığında, süneklik ve tokluk değerlerinde düşüş görülür.

Ortamda kaynak anında ve kaynak sonrası soğuma süreci esnasında termal döngüler oluşur. Bu termal döngüler esnasında ferritik çelikler korozyona karşı daha yüksek hassasiyet gösterir. Kaynak anında yükselen sıcaklık etkisiyle kaynak bölgesinde tane irileşmesi meydana gelir. Taneler arası oluşan kromkarbür korozyon direncinin düşmesine sebep olur. Mekanik özellikler kötü yönde etkilenir, ek olarak kaynak bölgesinde ikincil fazların oluşmasına sebebiyet verir (Cunat, ark. 1991).

İkincil fazların oluşumu bazı kaynak yöntemlerinde daha kolay kontrol edilebilir. Bu yöntemlerin başında lazer kaynak uygulamaları gelmektedir. Farklı bağlantı yöntemlerine uygunluğu ve yeni malzeme tiplerinin katkısıyla lazer kaynak yöntemi diğer ergitmeli kaynak yöntemlerinin sebep olduğu olumsuz durumları giderebilmektedir. Bu yüzden son yıllarda çok geniş uygulama alanı bulmaktadır (Kökey, 201).



Şekil 3. Ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı

Kaynak: (Arslan, 2018).

Ferritik paslanmaz çelikler Cr oranı % 11,5–30,5, Karbon (C) oranı % 0.20 ve az miktarda Alimünyum (Al), Niyobyum (Nb), Titanyum (Ti) ve Mo gibi alaşım elementleri içerir. İçerdikleri C miktarı çok azdır ve bu sebeple östenitik faza geçemezler.

Isı etkisi altında kaynak dikişinde tane büyümesi görülür. Bu dayanımı düşüreceğinden kaynak elektroduna Azot (N) eklenir. Eklenen N ince taneli yapı oluşmasını sağlar ve böylece kaynak dikişinin dayanımı artırılmış olur. Uygulanan kaynak yöntemi kullanılan paslanmaz çeliğin sınıfına göre çok dikkatli seçilmelidir. Ferritik çelikler için kaynak bölgesi, 1150 °C'nin üzerindeki

sıcaklıklarda çok az kalmalıdır. Kaynak bölgesine kısa aralıklarla işlem uygulanmalı ve hızlı soğutma yapılmalıdır (Emre, 2013).

2. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenit paslanmaz çeliklerin genel içeriği %16 ile %26 arasında Cr, %10 ile %24 arasında Ni ve C oranı %0,4 oranındadır. Östenitik çeliklerin özelliklerini geliştirmek için Mo, Nb, Ti ve N gibi alaşım elementleri kullanılır. İçeriğinde bulunan Cr çeliği ferritiğe döndürme eğilimindedir. Bu eğilimi gidermek için bazı östenit yapıcı elementler kullanılır. Mikroyapıları dönüşüm göstermediğinden, diğer çeliklere uygulanan sertleştirme ve normalleştirme işlemleri uygulanamaz. Fakat sertliği artırmak için soğuk şekillendirme yöntemleri kullanılabilir. Düşük karbonlu ve az alaşımlı çeliklere göre dayanımları ve süneklik özellikleri daha iyidir. Fakat sertleştirme işlemlerine karşı dirençli oluşları ve ısı iletkenliklerinin düşük olması zor işlenebilir çelikler arasında olmalarının sebeplerindedir (Arslan. 2018).

Paslanmaz çeliklerin en çok kullanılan grubu östenitik çeliklerdir. Mekanik özellikleri diğerlerine göre daha iyi olan bu çeliklerin maliyeti de daha uygundur. Yüksek dayanım değerlerine sahip olan östenitik çelikler 550 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda oksitlenmeye karşı dirençlidirler. Az alaşımlı çeliklerle birlikte kullanıldıklarında ısıl genleşmeye bağlı sorunları giderilmiş olur (Yılmaz, Barlas, 2011). İçeriğine katılan alaşım elementleriyle sıcak çatlak oluşumu engellenebilir (Emre, 2013). Bu sayede inşaat, gıda sektörü, basınçlı tanklar, fırın komponentleri, ısıtıcılar, mutfak gereçleri, dişli çark ve makine parçaları gibi her gün artan geniş bir kullanım alanına yayılmışlardır (Yılmaz, Barlas, 2011).

3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik çelikler tavlanmış ya da ıslah edilmiş malzemeler olarak bilinirler. Östenitik çeliklere işlem uygulanmasıyla elde edilirler. Yüzdesel olarak içeriğinde % 0,1 ve üzerinde C içeren çelikler östenittir. Östenitlenme sıcaklığı değişkenlik göstermekle beraber 950°C-1050°C arasındadır. Bu sıcaklığa gelindiğinde çeliğe su verilirse martenzitik bir iç yapı oluşması sağlanır. Buradaki amaç sertlik derecesini yükseltmek ve mekanik dayanım özelliklerini iyileştirmektir (Arslan. 2018).

Cr miktarı % 11–18, C miktarı % 1,2 ve az miktarda Mn ve Ni içerebilirler. Tavlanma sonrası östenit yapı oluşur ve soğuma sonrası martenzit yapıya dönüşüm sağlanır. Bu yapıda çeliklerin kaynağı sonrası kaynak dikişinde çatlama görür. Sebebi martenzit yapının soğuma sonrası sertleşmesi ve kırılma bir yapıya dönmesidir. Kaynak dikişinin tokluğa ulaşabilmesi için dolgu malzemesi eklenir. Kaynak dikişinin sünek yapıda olması için sonrasında ısı işlem uygulanması önerilir. Martenzitik çelikler atmosfer ortamında korozyona karşı dirençlidir. Kullanım alanları valfler, dişliler, pimler, yük altında çalışan miller, türbinler ve kanatlarda yaygındır (Emre, 2013).

4. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Çift fazlı çelikler olarak bilinirler. İç yapısında iki fazı birden eşit oranda barındırırlar. Östenitik ve ferritik özellikler gösterirler fakat özellikleri iyileştirilmiştir. Östenitik çeliklerden daha iyi gerilme korozyonu dayanımına, ferritik çeliklerden daha iyi tokluk ve süneklik kabiliyetine sahiptirler. Asit ve su kaynaklı olabilecek klor direnci, gerilme korozyonu, kırılma dayanımı, mukavemet ve oyukluk korozyonuna karşı direnç kabiliyetleri yüksektir. Kullanım alanları orta dereceli sıcaklık ortamlarıdır (Arslan. 2018).

Son dönemde kullanım alanları hızla gelişmektedir. Yüksek akma dayanımı ve korozyon direncine sahip olmalarıyla tek fazlı östenitik ve ferritik çeliklere göre daha üstündürler. Çift fazlı yapıyı elde etmek için Cr oranı % 21–25 ve Ni oranı % 5–7 içeren çelik, 1000–1050°C sıcaklıkta tavlanır ve hızlı soğutma yapılır. Çift fazlı yapı genel olarak ferrit yapıya dönme eğilimindedir. Ni oranı % 8-10 civarına getirildiğinde yapı içerisinde daha çok östenit kalması sağlanır ve çift fazlı yapı korunmuş olur (Emre, 2013).

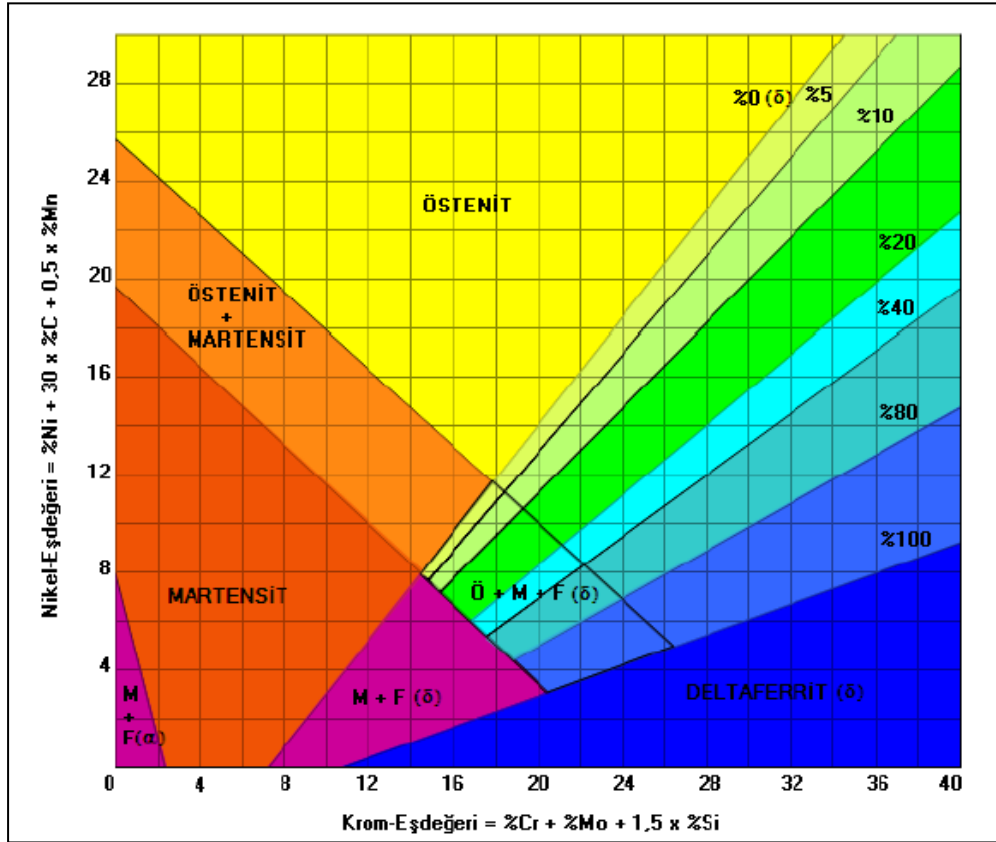
5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Fe-Cr-Ni içeren paslanmaz çelik ailesinin bir koludur. Bakır (Cu), Al Ti, Nb, Mo vb. alaşım elementlerinden bir ya da birkaç tanesinin etkisi ile çökeltme sertleşmesi gösterirler. Yaşlandırma yani çökeltme sertleştirme yöntemi uygulanmasının amacı çeliğin mukavemetini artırmaktır (Arslan. 2018).

Kendi içlerinde martenzitik, yarı östenitik ve östenitik olarak üçe ayrılırlar. Martenzit yapıyı elde etmek için 1038 °C' den hızlı şekilde soğutma işlemi

yapılır. Ardından çok fazla sert olmadıkları için 482–621°C sıcaklık aralığında yaşlandırma işlemiyle sertleştirilmiş olurlar. Yarı östenitik yapıda martenzit yapı oluşturmak için oda sıcaklığının altına inilmesi gerekir. 732–954°C sıcaklıkları arasında homojenleştirme işlemi uygulanarak alaşım elementlerinin yapıdan ayrılarak çökmesi sağlanır. Kararsız haldeki yapıda martenzit dönüşüm sıcaklığı yükselir. Oda sıcaklığına doğru soğutulan çeliğin yapısı martenzit hale gelmiş olur. Uygulanan yaşlandırma işlemleriyle martenzit yapının korozyon direnci, tokluk ve sünekliği artırılmış olur. Kaynak işlemi esnasında dayanım artırılmak isteniyorsa dolgu metali kullanılır. Kaynaktan önce ve sonra ısıl işlem uygulanır. Bu gruptaki çelikler kaynaklanma özellikleri zor çeliklerdir. Düşük ısı girdisinin olduğu uygulamalarla kaynak edilmesi önerilir (Emre, 2013).

Mn, Silisyum (Si), Mo, Ni, Ti ve N gibi alaşımlar paslanmaz çeliklerin mikroyapısının istenen özelliklere getirilmesini sağlar. Alaşım elementleri ve oranlarının etkisini belirlemek amaçlı Cr ve Ni eşdeğerlik kavramı Schaeffler diyagramında Şekil 4’te gösterilmiştir (Arslan. 2018).



Şekil 4. Schaeffler diyagramı

Kaynak: (Arslan. 2018).

Paslanmaz çeliklerin petrokimya, gıda tankları, mutfak gereçleri, kara ve deniz ulaşım araçları gibi geniş bir yelpazede kullanım alanları vardır. (Korkmaz, 2019).

C. Paslanmaz Çeliklerin Alaşım Elementleri

Alaşımli çelikler normal karbonlu çeliklerin sağlayamadığı özellikleri elde etmek amacıyla üretilmiş bir ya da birden fazla alaşım elementi barındıran çeliklerdir. Çeliğin içerisinde bulunan maddeleri ikiye ayırmak mümkündür. Bunlar çeliğin elde edilmesi esnasında çeliğe katılan yabancı maddeler ve çeliğin özelliklerini değiştirmek amaçlı katılan katkı maddeleridir. Yabancı maddeler; Fosfor (P), Si, Kükürt (S), Mn, O₂ ve N' tur. Katkı maddelerinin amacı çeliğe dayanım, sertlik, korozyon direnci, daha iyi mıknatıslanma özelliği, yüksek sıcaklık dayanımı, elektrik direnci, aşınma direnci ve daha yüksek genleşme özelliği kazandırmaktır. Her bir alaşım elementinin ve oranının çeliğe başka bir katkısı olacaktır (Arslan. 2018).

C: Çeliğin yapı taşı elementlerinden olan C, içeriğinde bulunduğu çeliğin karakteristik özelliğini belirler. C oranı çeliğin akma ve kopma değerlerini artırırken, uzama ve şekillenebilme özelliğini düşürür.

Cr: Çeliğe paslanmaz özelliğini katan elementtir. Çeliğe ferritik yapı kazandırır. Çeliğin içerisindeki C oranı artarsa Cr miktarının da artması gerekir. Cr karbür çeliğin paslanmaz özelliğine zarar vereceğinden, kromdan daha yüksek karbür bileşimi yapma yüzdesi yüksek elementler eklenmelidir. Ortamda serbest kalan Cr paslanmazlığın sstenmeyen durum olan krom karbür oluşumuna sebep olup paslanmazlığın düşmesine sebebiyet verecektir. Korozyon ve aşınma direncini artırırken, aynı zamanda sertleşme özelliği de kazandırır.

Mn: Mekanik özelliklere olumlu yönde etki eder. Sünekliği azaltırken aynı anda çeliğin dayanımını ve sertleşme özelliğini artırır. Karbonla birleştiğinde çeliğe verdiği olumlu özellikler artar.

Si: Çelikten O₂' i uzaklaştırmak için kullanılır. Aynı zamanda akma, çekme ve elastikiyet özelliklerine katkıda bulunur. Ucuz bir element olmasından kaynaklı yay çeliklerinde tercih edilir.

P: Akma ve çekme dayanımını artırmasına rağmen çeliğin içerisinde istenmeyen elementlerdendir. Soğuk kırılmalığa sebep olur ve eğme kabiliyetini düşürür. Çeliğin içerisine üretim aşamalarında istenmeyen şekilde katılır ve sonrasında uzaklaştırılır.

S: Fe ile birleştiğinde malzemenin gevrekliğini artırır.

Ni: Östenit özelliği artıran elementtir. Tavlanmış çeliklerin dayanım ve tokluğunu artırır. Yüksek şekillendirilebilme özelliğine katkıda bulunur.

Mo: Sertleşme kabiliyetini artırır. Sağladığı karbür ve ferrit yapısıyla tane büyümesini engeller. Menevişlenme işlemi sonrası oluşan gevrekliği azaltır. Aşınma ve korozyon direncine önemli şekilde katkı sağlar.

Çinko (Zn): Diğer alaşım elementleriyle birleştiğinde dayanım artırıcı özellik gösterir. Yüksek Zn oranı sıcak çatlama ve soğuma esnasında çekmeye sebebiyet verir.

Kobalt (Co): Alaşımli takım çeliklerinde kullanılır. Yüksek sıcaklıkta sertliği koruyucu etki yapar.

Tungsten (W): Yüksek sıcaklıklarda sertliği korur ve aşınma direncini artırır. Yüksek hız çeliklerinde kullanılır.

Vanadyum (V): Tane boyutlarının incelmelerini sağlayarak çökeltme sertleşmesi yoluyla dayanımı artırır. Diğer alaşım elementleriyle birleşerek çeliğin akma ve çekme dayanımlarına olumlu yönde katkıda bulunurlar.

Ti: Karbür ve nitrür yapma özelliği yüksektir. Tane inceltici özelliğinin yanında krom karbürün etkisini azaltmak için çeliğe eklenirler.

Nb: En yüksek tane inceltme ve karbür yapıcı özelliği olan alaşım elementidir. Ti' nin yaptığı etkiye benzer etkiler yapar. Bazı durumlarda Ti ile birlikte de kullanılabilir. Krom karbürü engelleme özelliğine sahiptir ve ferrit yapıyı artırıcıdır.

Al: Çeliğin içerisinde istenmeyen O_2 ' i gidermek için kullanılır. Tane küçültücü etkisinin yanında dayanım ve tokluk özelliklerini de artırır.

Kalay (Sn): Dayanım özelliklerine etkisi çok fazla değildir. Düşük ergime sıcaklığına sahip bileşikler oluşturduğundan haddeleme esnasında kopmaya sebep olur.

Cu: Korozyon direncini artırır. Mekanik dayanımlara olumlu etki gösterir. Şekillendirilebilme ve soğuk çekilebilme özelliğini düşürür.

N: Nitrür oluşturma özelliği sebebiyle önemli bir elementtir. Yaşlanmaya sebebiyet verir. Diğer yandan dayanım, korozyon direnci ve sertliği artırır.

Alaşım Elementi	Sertlik	Muhavemet	Akma Noktası	Uzama	Kesit Daralması	Darbe Direnci	Elastisite	Yüksek Sıcaklığa Dayanım	Soğuma Hızı	Karbur Olupunu	Ajama Direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oxitletirme Eğilimi	Korozyon Direnci
Si	↑	↑	↑↑	↓	-	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	-
Mn ⁺	↑	↑	↑	-	-	-	↑	-	↓	-	↓↓	↑	↓	-	-
Mn ⁺⁺	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	-	-	-	-	↓↓	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	-
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	-	↓↓↓	↑↑↑
Ni	↑	↑	↑	~	~	~	-	↑	↓↓	-	↓↓	↓	↓	↓	-
Al	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓	-	↓↓	-
W	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	-
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓	↑↑	↑↑	↑	-	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↑↑	-	↑↑↑	↓	-	↓	-
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	-
S				↓	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↑↑↑	-	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑

*perlitik çeliklerde
**östenitik çeliklerde

↑ artırır ↓ azaltır ~ değişmez - önemsiz.

Şekil 5. Alaşım elementlerinin mekanik ve kimyasal özelliklere etkisi

Kaynak: (Arslan, 2018).

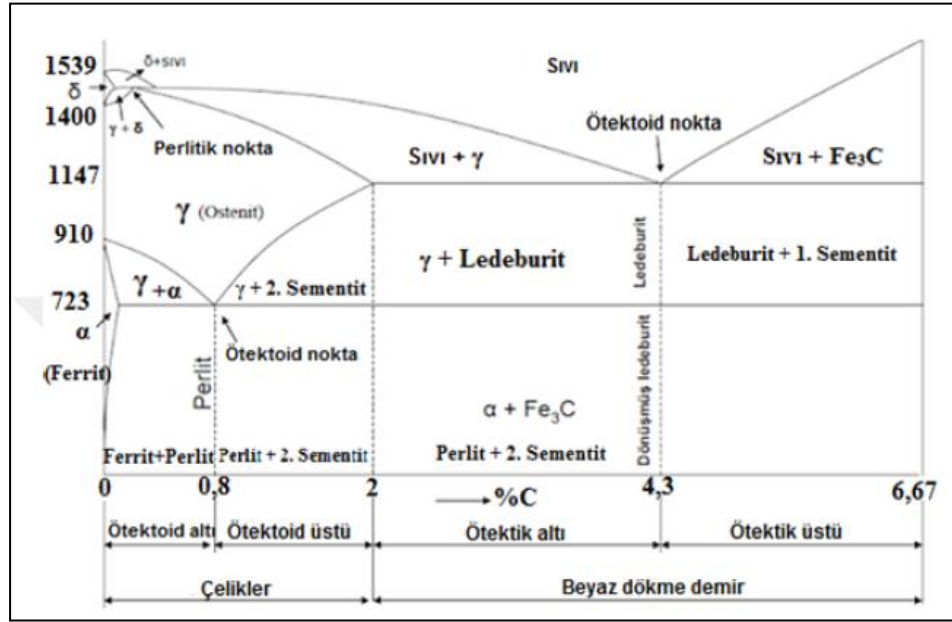
D. Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler

Çeliğe uygulanan ısıl işlemler şekillendirme ve amaca uygun özellikler elde etmek için yapılır. Yapılan ısıl işlemler tavlama, sertleştirme ve menevişlemedir.

Demirin ergime sıcaklığı 1535 °C' dir. Demir ergime sıcaklığına ulaşınca kadar üç farklı hali görülür. Bunlar; oda sıcaklığı ile 912 °C arasında HMK, 912 °C ile 1398 °C arasında YMK ve 1398 °C ile ergime sıcaklığı arasında yine HMK yapıda bulunur. Dönüşüm safhaları allotropik yapıdadır. Tek başına demirin

mekanik özellikleri mühendislik çalışmaları için zayıf yapıdadır. Fakat Fe-C alaşımı olan çelik, dünyanın en yüksek mukavemetine sahip metalidir.

Çeliğin fazlarını açıklamak, sıcaklıklarla karışım yapılarını göstermek açısından yaygın bir kullanım olan Fe-C diyagramı Şekil 6' da verilmiştir. Bu denge diyagramı üzerinde α (alfa), γ (gama), δ (delta), sıvı ve sementit (Fe_3C) fazları ile ledeburit (γ +sementit) ve perlit (α +sementit) karışım yapıları görülmektedir.

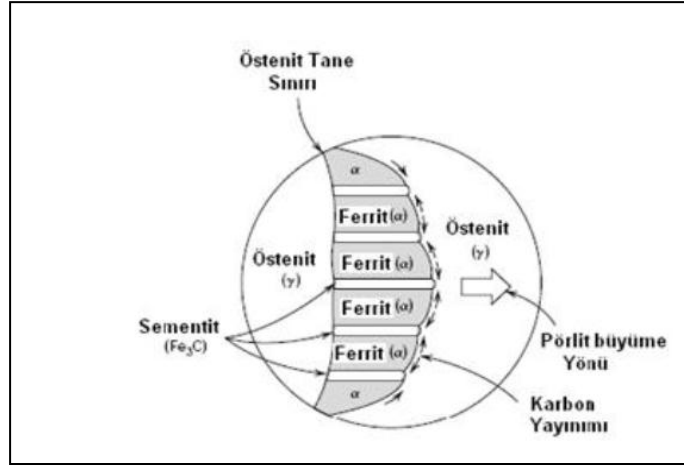


Şekil 6. Demir karbon denge diyagramı

Kaynak: (Arslan. 2018).

α : Demirin içerisinde az oranda Cu erimesiyle oluşan arayer katı ergiyidiğir. Ferrit yapısındaki en yüksek çözünmüş C oranı % 0,008 dir. HMK yapıda olup çeliğin içerisindeki en yumuşak faz olarak tanımlanır. Düşük sertlikte ve sünek yapıdadır. Sınırlarında C bakımından zengin sementit bölgeleri oluşabilir.

$\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$: Ferrit ve sementit fazlarının karışımı olan C içeriği %0,83 ötektoid yapıdır. Yavaş soğuma şartları sağlandığında 723 °C'de oluşmaya başlar. Taneli ve lamelli tür olarak ikiye ayrılır. Taneli türü elde etmek için 723 °C sıcaklıkta tavlama işlemi ve sonrasında yavaş soğuma yapılır. Lamelli türü elde etmede havada soğutma yöntemi kullanılır. Perlit fazının oluşumu Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Perlit fazının oluşum mekanizması

Kaynak: (Arslan. 2018).

γ : YMK yapıdaki çözeltilidir. İçeriğinde %2 oranında C bulunabilir. Yumuşak yapıdadır ve manyetik özellikte değildir. 723 °C'nin üzerinde her türlü çelik bileşiminde bulunabilir.

sementit: Çelik içerisindeki en sert faz olup kırılkan yapıdadır. İçeriğinde % 6,67 C içerir. Çekme dayanımı düşük fakat basma mukavemeti yüksektir. 723 ° C' nin altında menevişleme işlemi yapılarak iğneli yapıdan küresel hale dönebilir.

ledebürit: Mekanik olarak östenit ve sementit fazların karışımıdır. Diyagramdaki ötektik haldir.

grafit: Oda sıcaklığında 723 ° C'nin altında uzun süreli tavlama işlemiyle ortaya çıkar. Si elementi grafit oluşumunu tetikler.

Genel olarak çelikleri içeriğindeki C oranı doğrudan etkiler. Buna ek olarak yapılan ısı işlemler ve içerisine katılan alaşım elementlerinin cinsi, oranı, dağılımı karakteristiğinin değişmesine sebebiyet verir. Isıl işlemler üç ana gruba ayrılabilir. Bunlar tavlama, sertleştirme ve menevişlemedir. Soğuma hızının yüksek olması veya su verme işlemi çeliği kırılkanlaştırırken, yavaş soğuma ve tavlama işlemi yumuşaklığı ve sünekliği artırır. Isıl işlemlerde asıl olan çeliği belirlenmiş bir sıcaklığa kadar ısıtmak, o sıcaklıkta belirlenen sürede bekletmek ve belirlenen soğuma hızıyla soğutmaktır (Arslan. 2018).

E. Titanyum Alaşımları

Gösterdikleri üstün özellikler ile fiziksel ve kimyasal açıdan endüstride yaygın tercih edilen paslanmaz çelik alaşımlarındandır. Diğer metallere göre daha hafiftirler. Özgöl ağırlıkları $4,51 \text{ gr/cm}^3$ ve ergime noktası 1680°C ' dir. Ergime noktasının yüksek olması sebebiyle kritik ekipmanların yanma problemi de ortadan kalkmıştır. İç yapı olarak hegzagonal kafes yapısındadırlar. Oksitlenmeye karşı yüzeyde bir tabaka oluştururlar. Korozyon yaratıcı tepkimelere dayanıklıdırlar. Ti ve alaşımları protezlerde, damar stentlerinde, implantlarda sıklıkla kullanılırlar (Aydın, 2010).

Ti ve alaşımları sanayide çokça kullanılan alaşımlardan biridir. Yüksek korozyon direnci, hafif fakat dayanıklı yapıları, ısıl direnç, düşük yoğunluk, biyouyumlulukları ile tercih edilirler. 1950' li yılların başında muhteşem metal olarak adlandırılan Ti sanayi alanlarında, tank üretiminde, eşanjörlerde, gemilerde, uzay araçlarında, jet motorlarında, basınçlı kazanlarda, medical uygulamalarda ve diğer üretim tesislerinde sıkça kullanılırlar. Kaynaklanmaları zordur. Çünkü kaynak anında atmosferle etkileşime geçebilirler. Kaynak uygulamalarında çokça tercih edilen yaygın paslanmaz çelik alaşımlarındandır (Köse, Karaca. 2017). (Kaya, Kahraman. 2011). Ti alaşımları α (alfa), $\alpha+\beta$ alaşımları ve β (beta) olarak üç gruba ayrılırlar. α alaşımları tamamen α fazından, β alaşımları yüksek oranda β fazından, $\alpha+\beta$ alaşımları ise normal sıcaklık şartlarında α ve β fazına sahiptir. Titanyum alaşımlarının fazlara göre özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. (Ceyhun, Karaca. 2019).

Çizelge 1. Ti alaşımlarının genel özellikleri [11]

	α	$\alpha+\beta$	β
Yoğunluk	Düşük	Düşük	Yüksek
Mukavemet	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süneklik	Düşük	Yüksek	Düşük/Yüksek
Tokluk	Yüksek	Yüksek	Düşük/Yüksek
Sürünme	Yükse	Yüksek	Düşük
Korozyon Direnci	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük/Yüksek
Oksidasyon	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük
Soğuk Şekillenme	Çok Düşük	Düşük	Düşük/Yüksek
Kaynak Kabiliyeti	Yüksek	Yüksek	Düşük

Kaynak: (Uyguntürk. 2020)

Ti ve alaşımlarının lazer ile kaynaklanması esnasında yüksek ısı girdisinin azaltılmasıyla birlikte yapılacak çok hızlı soğuma, dikiş bölgesinde tane irileşmesi engellenmiş olur. Böylece dar bir kaynak dikişi elde edilebilir. Ayrıca kaynak işlemi sonrası solüsyon uygulanması yada yaşlandırma ile dikiş bölgesinin mekanik dayanımı artırılmış olur (Ceyhun, Karaca. 2019).

Son dönemde mühendislik alanlarında kullanımıyla öne çıkan Ti ve alaşımları doğada bulunurluğu açısından Al, Fe ve Mg' dan sonra dördüncü sıradadır. Ti ilk olarak 1791 yılında William Gregor tarafından bulunmuştur. Aşınma oranı çok düşük olan Ti, aşınmalara karşı oldukça dayanıklıdır. Asitlerin aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklı olmasının yanında nitrojen (NO₂)'le yanma özelliğine sahiptir. Uzay ekipmanlarının en önemli parçaları Ti metalinden yapılmaktadır. Üretim alanında yapılan iyileştirmelerle Ti alaşımlarının kullanım alanları genişlemiştir. Dayanımları 480 -1100 MPa aralığındadır.. (Köse, Karaca. 2017). Ti çok sayıda metal ile alaşımlanabilir. Bu şekilde akma dayanımı, sünekliği ve tokluğu artırılır. Elektrik direnci iyidir. Bunun sebebi elektron yönüne zıt yönde zayıf bir iletken olduğu içindir. Isıl genleşme katsayısı düşüktür. Doğaya zararsız olması açısından biomalzeme olarak kullanılabilirler (Uyguntürk. 2020). İnsan vücudundaki sıvının asidik değer pH 7.4 tür. Ti bu değerdeki asitlerden etkilenmediği için rahatlıkla insan vücudunda kullanılabilir. Kaynak anında yüksek sıcaklık etkisiyle atmosferle çabuk etkileşime girdiği için geleneksel tip kaynak yöntemleri için kullanılamazlar. Gazlara karşı çok duyarlı oldukları için kaynak işlemi sırasında birçok önlem alınmaktadır (Işık, 2013). En uygun birleştirme yöntemi lazer kaynağıdır. Lazer soğurma katsayısı en yüksek metaldir (Köse, Karaca. 2017).

Sanayideki kullanımlarının yaygınlaşmasıyla Ti ve alaşımlarının kaynaklanması önemli hale gelmiştir. Gazlara karşı çok duyarlı oldukları için kaynak işlemi sırasında birçok önlem alınmaktadır(Işık, 2013).

III. PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAYNAK KABİLİYETİ

Malzemeye ısı, basınç ya da ikisinde uygulanarak aynı ya da farklı tipteki malzemelerin ilave malzeme katılarak ya da katılmayarak birleştirilmesine kaynak adı verilir. Malzemenin eritilmesi kaynak için en önemli parametre olup, erimeyi malzemenin kalınlığı, bağlantı tipi, iletkenlik katsayısı, kaynak öncesi sıcaklık, malzemenin ergime sıcaklığı, varsa elektrot açısı ve ısı girdisi etkilemektedir.

Günümüz şartlarında farklı talepler ve şartlara uygun malzemeler elde etmek için, farklı özelliklerde ve farklı bağlantı yöntemleriyle aynı ya da farklı metalleri birleştirme ihtiyacı doğar. Farklı ya da aynı paslanmaz metaller birbirleriyle kaynaklanarak malzemenin ilk halinden daha yüksek özelliklere sahip ve ihtiyaca uygun ürünler elde edilebilir. Paslanmaz çeliklerin kaynağında birden fazla yöntem kullanılabilir. Paslanmaz çeliklerin avantajlarının yanında, içeriğinde bileşim oranının özelliklerine direkt etki etmesi kaynak problemleri de oluşturabilir (Arabacı, Çimen. 2007).

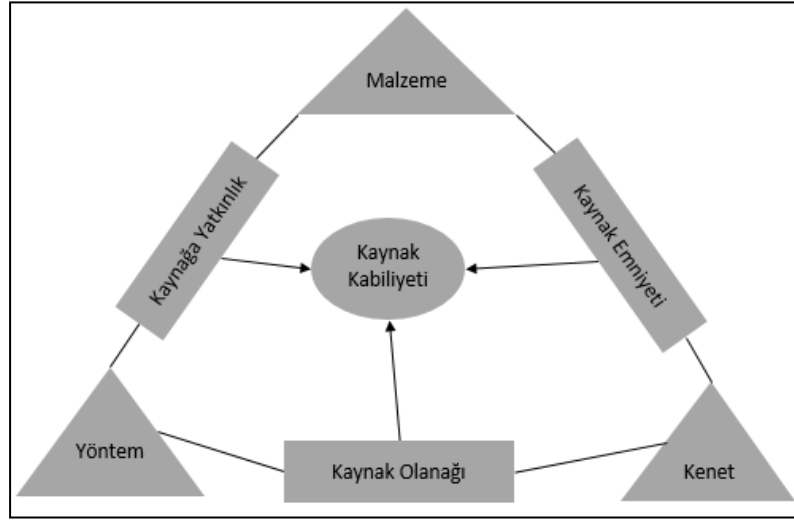
Genel olarak paslanmaz çelik malzemelerin kaynak kabiliyetleri diğer malzemelere göre iyidir. Ark, direnç, lazer, sürtünme kaynağı ve sert lehimleme gibi yöntemler kullanılarak kaynak edilebilirler.

Kaynak yöntemlerinin hepsinde birinci koşul, kaynak edilecek yüzeyin ve eklenecek dolgu metalinin temiz olmasıdır. Özellikle ısı ve elektrik iletkenlikleri çok düşük olan çeliklerin kaynağında, yüksek ısı girdili bir kaynak yöntemi kullanılırsa ısı kaynak bölgesinden uzaklaşamaz ve çarpılma riski oluşur (Emre, 2013).

430 tip çeliklerin kaynaklı birleştirmelerinde alınan iyi sonuçlar, içerdikleri yüksek miktarda Cr ve az miktarda C içeriğine sahip olmalarındandır. Ayrıca martenizitik yapı oluşturmamaları kaynak bölgesinde yüksek dayanıma ulaşılmasını sağlar. 430 grubu çeliklerin kendisiyle olan birleşmeleri mekanik

özelliklerinin çok daha yüksek olmasını sağlar. Fakat kaynak sonrası dikiş bölgesinde sertlik düşüşü yaşanacağı unutulmamalıdır (Arabacı, Çimen. 2007).

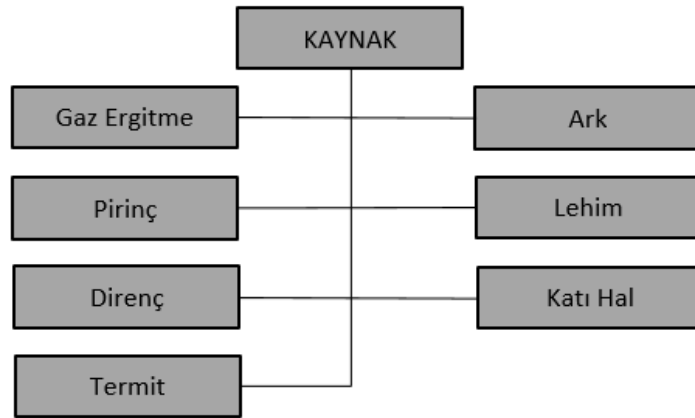
Metalik malzemelerin kaynak kabiliyeti çok iyi olmasa da paslanmaz çelikler kaynağa çok yatkındır. Kaynak kabiliyeti, malzemenin istenen şartları sağlayacak uygun bir yöntemle sorunsuz birleştirilebilmesidir. Şekil 8’ de kaynak kabiliyetini etkileyen girdiler gösterilmiştir.



Şekil 8. Kaynak kabiliyetini etkileyen girdiler

Kaynak: (Yılmaz, Barlas, 2011).

Bugünkü şartlarda 100 adedin üzerinde teknikle kaynak yapılabilmektedir. Şekil 9’ de kaynak yöntemleri 8 ana grupta toplanmıştır.



Şekil 9. Kaynak yöntemleri

Kaynak: (Yılmaz, Barlas, 2011).

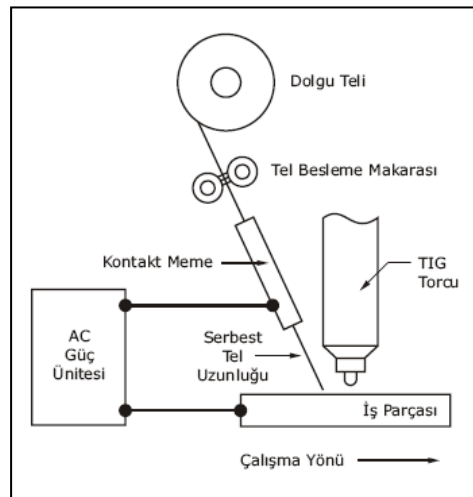
A. TIG Kaynağı Yöntemi

Yaygın metal birleştirme yöntemlerinden biridir. İnce kesite sahip paslanmaz çelikler ilave metal ya da ilave metalsiz TIG kaynağıyla birleştirilebilir. Diğer kaynak yöntemlerine göre üstünlüğü giren ısı miktarının ve ilave edilen metalin birbirinden bağımsız olmasıdır. Bu özelliği sayesinde 0,1 mm kalınlığındaki çok ince saclara uygulanabilir. Ayrıca kaynak işlemleri sırasında kolaylıklar sağlar. Genel kullanım alanları borular, araç egzoz sistemleri, kimyasal donanımlar ve otomotiv sektörüdür(Yılmaz, Barlas, 2011).

Tüm kaynaklanabilen paslanmaz çeliklere uygulanabilen bir yöntemdir. Genel itibariyle toryum, seryum ve lantan ile alaşımlandırılan tungstenden yapılmış elektrotlar kullanılır. Koruyucu gaz genellikle Argon (Ar)' dur. Fakat kalın parçaların kaynağı esnasında Helyum (He) ya da H ile birlikte Ar kullanılır.

Yöntemin düşük voltajla yapılabilir olması ince sacların kaynak bölgesinde yanık oluşturmaması için önemli bir avantajdır. Ark W elektrot ile iş parçası arasında temas olmadan atlayarak oluştuğu için kaynak bölgesi daha az kirlenir. TIG kaynağı otomatikleştirilebilir ve paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılabilir.

W elektrotlar birbirine yakın tutularak kaynak hızı artırılabilir. Birden fazla elektrot kullanılması yüksek hızlarda görülen kenar yanığı sorununu da ortadan kaldırır (Emre, 2013).



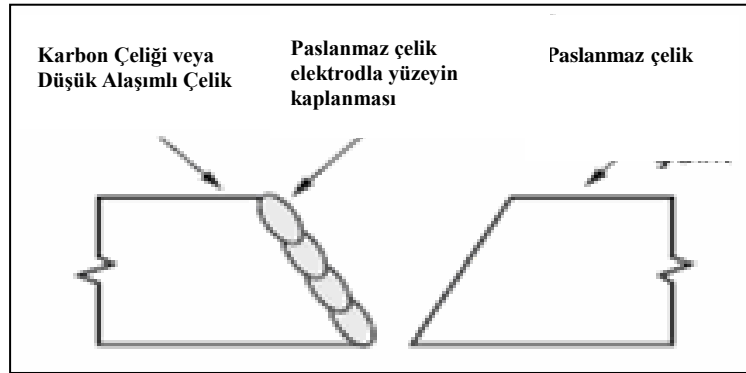
Şekil 10. TIG kaynağı şematik gösterimi

Kaynak: (Emre, 2013).

B. Örtülü Elektrot ile Ark Kaynağı Yöntemi

Elektrotla gerçekleştirilen kaynak yöntemlerindedir. Bu yöntemdeki ark mesafesi mümkün mertebe kısa olmalıdır. Elektrot örtüsü kaynak banyosuna değmemelidir. DC elektrotlar nüfuziyet açısından gayet iyidir. Östenitik çeliklerde ve dik kaynak uygulamalarında sıkça tercih edilirler. Fe tozlu elektrotlar yatay pozisyondaki kaynak uygulamalarında da kullanılabilirler.

Genel olarak gereksiz ısı girdisinden kaçınılmalıdır. Düşük hızlar ince sacların kaynağında, yüksek hızlar kalın sacların kaynağında kullanılır. Elektrotların nem alması kaynak kalitesini doğrudan etkiler ve kaçınılmalıdır. Elektrotlar sızdırmaz kaplarda saklanmalıdır. Elektrot değişiminde dikiş yüzeyi ve dikiş sonunda cüruf iyice temizlenmelidir. Aşırı nüfuziyet çatlak oluşumuna sebebiyet olacaktır.



Şekil 11. Örtülü elektrotla kaynak yöntemi

Kaynak: (Emre, 2013).

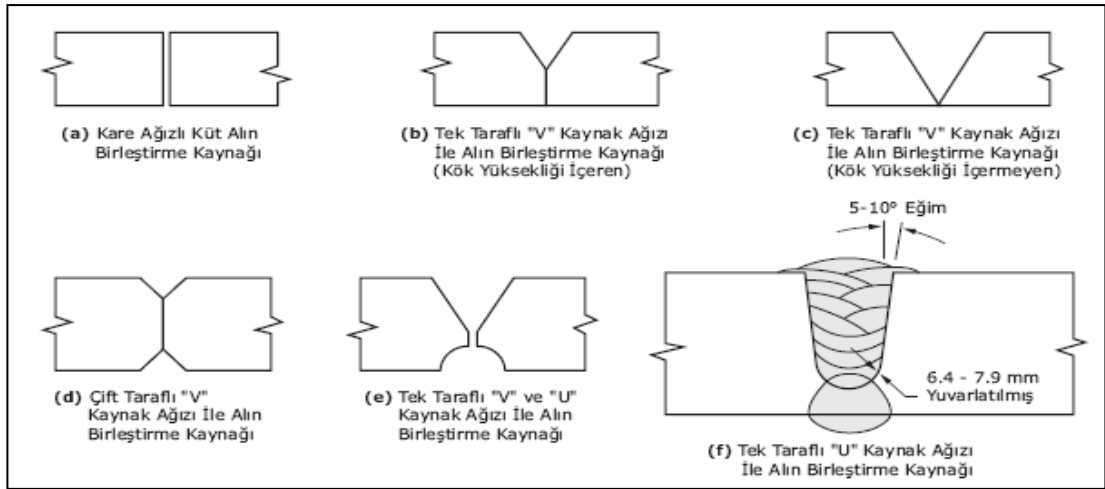
C. MIG-MAG Kaynak Yöntemi

Kaynak banyosu katılaşıyorken bölgenin havayla temasını kesen bir gaz tarafından korunduğu yöntemlerdir. Ergimiş metale hava teması yani O₂ girişi oksidasyona sebebiyet vereceğinden kaynak kalitesini olumsuz etkiler. Kaynaklanmış metalin dayanımında ve tokluğunda düşüş görülür. Bölgeyle hava temasının kesilmesi bir soygaz tarafından yapılır. He ve Ar sıklıkla bu yöntem için kullanılan gazlardır. Kullanılan koruyucu gazın içerisindeki yabancı gazlar çok büyük önem taşır. Örneğin karbondioksit (CO₂) dikiş çevresinde C birikmesine sebep olup korozyon dayanımını düşürücü etki yapacaktır. Yöntem 6

mm kalınlığında saclara kadar uygulanabilmektedir. Kaynak işleminin tek taraftan gerçekleştirilmesi ve kaynak ağzının uygun bir seviyede tutulması homojen erime için kritik parametrelerdir.

D. Tozaltı Kaynağı Yöntemi

Yüksek ısı gerekliliği ve soğumanın yavaş olması gereken kaynak durumları için kullanılan bir yöntemdir. Toz kullanımından kaynaklı metalin içeriğinde Si görülebilir. Bu durum yırtılma ve çatlama riskini artırır. Östenitik yapıdaki çeliklerin kaynağında kullanılması önerilmez iken, ferritik yapılarda yüksek kaliteye sahip kaynak dikişlerinin elde edilmesi olağandır.



Şekil 12. Tozaltı Kaynağında Kullanılan Alın Bağlantı Şekilleri

Kaynak: (Emre, 2013).

32-38 mm kalınlığa kadar olan saclarda kullanılabilir. Kaynak bölgesi uzun süre erimiş halde kalır. Yöntem genellikle düz pozisyonda yapılır ve kaynak dikiş kenarları düzgündür. Kullanılan tozlar eritilmiş ve aglomere edilmiş olmak üzere iki gruptadır. Eritilmiş tip tozlar, elementlerin yüksek sıcaklıklarda eritilip toz taneleri halinde parçalanması şeklindedir. Aglomere tozlar elementlerin bağlayıcılar ile bağlanıp pişirilmesi ile elde edilir. Kaynak anında hız yükselirse dikiş dayanımı azalacak, hız azalırsa dayanım yükselecektir. Kaynak hızı nüfuziyet derinliğini doğrudan etkileyen parametrelerdendir (Emre, 2013). Bazı kaynak yöntemleri için gerekli güç yoğunlukları Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı kaynak işlemleri için ısı güç yoğunlukları

Kaynak İşlemi	Güç Yoğunluğu (W/ m ²)
Toz Altı	5 x 10 ⁶ -10 ⁸
Gaz Altı	5 x 10 ⁶ -10 ⁸
Plazma	5 x 10 ⁶ -10 ¹⁰
Lazer veya Elektron	5 x 10 ¹⁰ -10 ¹²

Kaynak: (Akman, .2007)

E. Lazer Kaynak Yöntemi

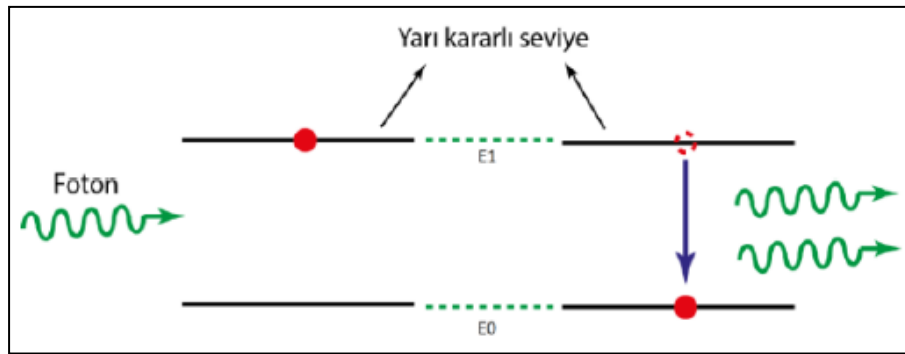
Metal sacların lazerle kaynağı diğer kaynak yöntemlerine göre avantajlıdır. Çalışılabilen bölgenin dar olması, yüksek sıcaklıklarda kontrol, istenen derinliğe odaklanabilme, aynı ya da farklı malzemelerin kaynatılabilmesi gibi seçim açısından öne geçiren özelliklere sahiptir. Lazer kaynakta kritik parametreler istenen kaliteye ve malzemeye uygun ayarlandığında kaliteli kaynak elde etme ihtimali yüksektir. Parametrelerin uygun olmaması ya da yanlış değerlerin ayarlanması durumunda malzemedeki delikler, kesikler ya da kalitesiz kaynak dikişleri oluşabilir (Özcan ve ark.2004).

IV. LAZER KAYNAK YÖNTEMİ

Lazer, kelimesi ingilizce Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, yani uyarılmış radyasyon salınımlarıyla ışığın kuvvetlendirilmesi sözcüklerinin baş harflerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur (Püskülcü, Koçulular, 2009). Lazer ışını tek renkli, uyumlu ve yönlendirebilir parlak ışın demetidir. Fiziksel temeli Einstein 'ın teorisi olan uyarılmış ışımaya dayanır (Akman, 2007). Patenti Amerikalı fizikçi ve mühendis Gordon Gould tarafından 1977 de alınmıştır(Uyguntürk. 2020).

A. Lazer Işını

Lazer ışını maddenin dışardan harici bir uyarıcı ile uyarılarak foton yayınımlı sağlanarak elde edilmektedir (Püskülcü, Koçulular, 2009). Farklı enerji seviyelerine sahip atomlar aradaki enerji farkına eşit seviyede fotona sahiptirler. Aynı frekansta bir ışıkla enerjisi yükseltelen atom sürekli o seviyede kalmaz. Yüksek enerji seviyesinden düşük seviyeye geçerken eşit seviyede fotonu çevreye bırakır. Lazer ışınının oluşma prensibi şematik olarak Şekil 13' te gösterilmiştir (Uyguntürk. 2020).



Şekil 13. Lazer ışınının oluşma prensibi

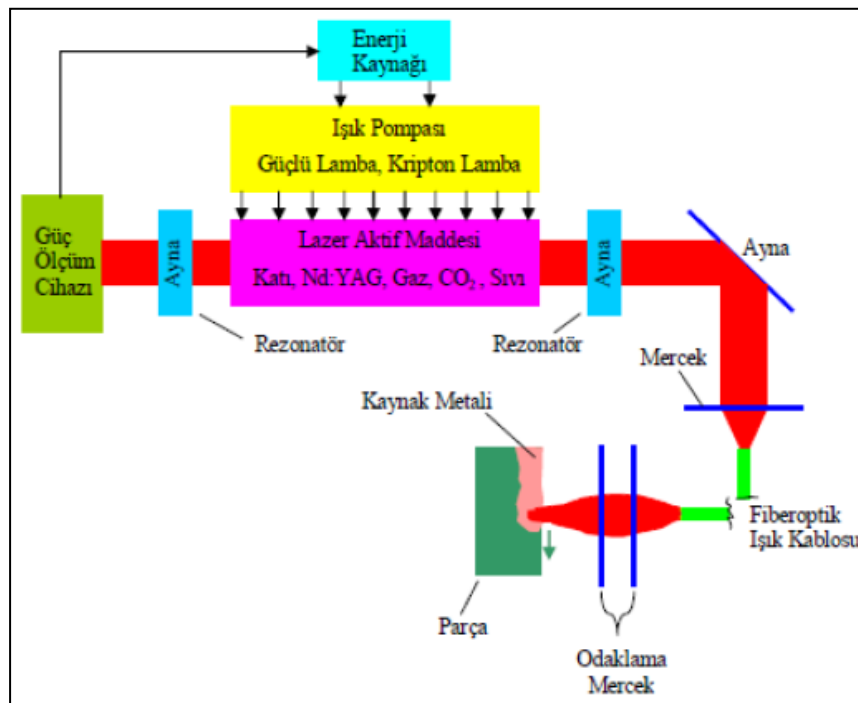
Kaynak : (Uyguntürk. 2020)

Yukarıda bahsedilen harici enerji genel olarak kimyasal, optik ve elektriksel olabilir. Etrafa saçılan fotonlar içerisinde buldukları kap ya da aynalardan

yansiyarak tekrarlı reaksiyonlarla bir ışık demeti oluşturur. Lazer ışınları kızılötesi dalga boylarından mor ötesi dalga boylarına kadar yayılım gösteren ışın demetleridir. Bu yüzden lazer sistemleri çok uzun mesafelerde enerji kaybı yaşanmadan iletilebilirler (Püskülcü, Koçulular, 2009). Birçok yoldan elde edilebilen lazer ışını elektromanyetik ışımayı güçlendiren ve morötesinden kızılötesi bölgeye kadarki dalga boylarında ışıma verebilen bir aletten elde edilir (Akman, 2007). Lazer ışını üretebilmek için kullanılan üç farklı yöntem vardır. Bunlar katı hal lazerleri, gaz lazerleri ve diyot lazerleridir.

Lazer ışını çok yüksek enerjiye sahip ışınlardır ve çok uzak mesafelere sac kılı kalınlığında bir ışın demetiyle taşınabilir (Uyguntürk. 2020). Lazer ışını malzemenin üzerine özel ekipmanlar kullanılarak yansıtılır. Oluşturulan lazer ışını fiber optik kablolar ve yansıtıcı aynalar kullanılarak yönlendirilir ve iş parçasının üzerine odaklanır (Püskülcü, Koçulular, 2009). Lazer ışını elde edebilmek için; ışığı güçlendiren kazanç ortamı, uyarıcı görevi gören güç kaynağı ve geri besleme sistemleri gereklidir (Akman, 2007).

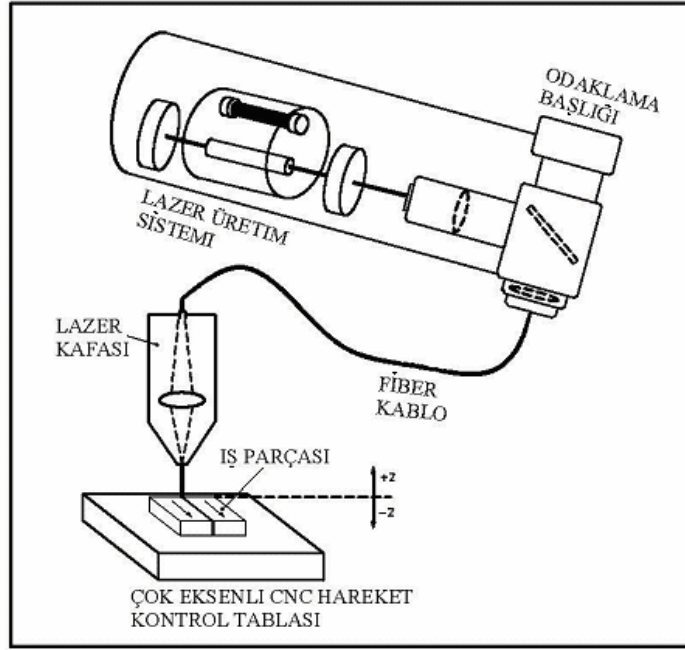
Şekil 14' te lazer ışın cihazı ve onun ekipmanlarını şematik olarak görülmektedir.



Şekil 14. Lazer ışın cihazı şematik gösterimi

Kaynak: (Aydın, 2010).

Güçlendirilen ışık, atomları hareketlendirerek manyetik dalgalar şeklinde proton üretilmesi sağlanır (Aydın, 2010). Oluşturulan ışık demeti istenilen noktaya yönlendirilebilir. Doğru bir lazer kaynağı için ışının parça üzerine doğru yönlendirilmesi çok kritiktir. Işının doğru yansıtılması için kaynak dikişine göre konumu, odaklama düzlemi, ışının yoğunluğu, kaynağın hızı ve atmosfer şartları belirleyici rol oynar (Çelen, 2006). Şekil 15' te lazer ışınının yansıtılması gösterilmiştir.



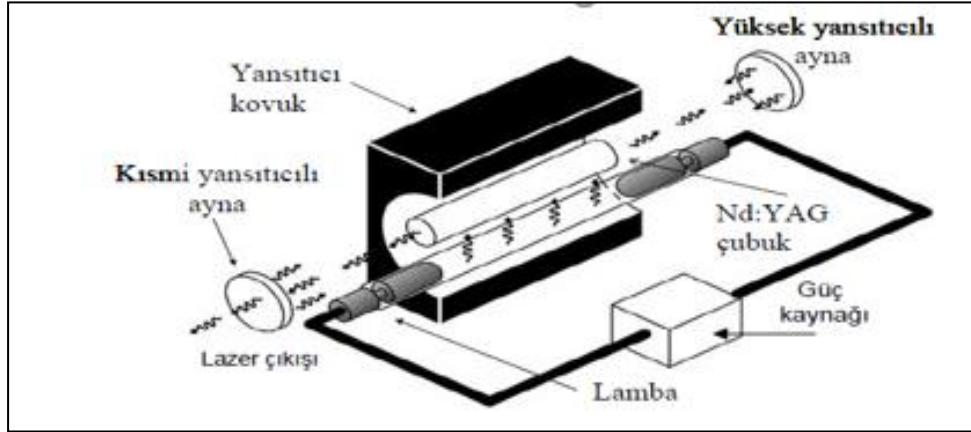
Şekil 15. Lazer ışınının parça üzerine yansıtılması

Kaynak: (Çelen, 2006).

1. Katı Hal Lazerleri : Nd-YAG Lazer, Yakut Lazer, Ti-Safir Lazer

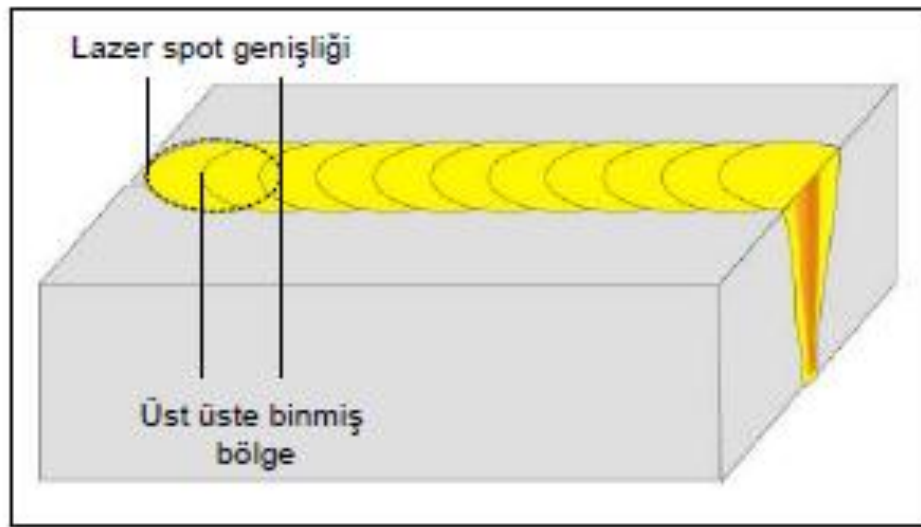
Tarihte ilk üretilen lazer Yakut lazeridir. Yakut içeriğinde Cr bulunduran bir kristaldir. Cr atomları kırmızı renk ışınların yayılmasını sağlar. Sonrasında Neodimyum (Nd) -YAG lazeri geliştirilmiştir. Silindirik bir kristalin iki ucu kaplanır ve ışık geçirmez ve kap içerisinde sabitlenir. Uyarıcı olarak ilgili uyarıcılar yerleştirilir. Uyarılan kristalden 1064 nm dalga boyunda lazer ışını üretilebilir. Bu tip lazerlerde kristalin içerisinde sıcaklığa bağlı stresler oluşabilir. Bu yüzden silindirik kristaller yerine disk ya da ince uzun fiber lazerler geliştirilmiştir. Fiber optik kablunun içerisinden geçirilen lazer ışını daha kolay kontrol edilir. Daha yüksek güç yoğunluğu elde edilir ve taşınabilir olmaları

sayesinde sıkça kullanılırlar. Işının kalitesi sebebiyle genel olarak çelik malzemelerin kaynağında kullanılırlar. Genel olarak kalın sacların birleştirilmesine uygundur, bu yüzden gövde kaynaklarında tercih edilirler (Püskülcü, Koçulular, 2009). Optik kayıpların en düşük olduğu yöntemdir. Çok sert, dayanıklı, iyi optik ve iletkenlikleri sebebiyle tercih edilmişlerdir.



Şekil 16. Nd-YAG lazer sistemi şematik gösterimi

Kaynak: (Akman, 2007).

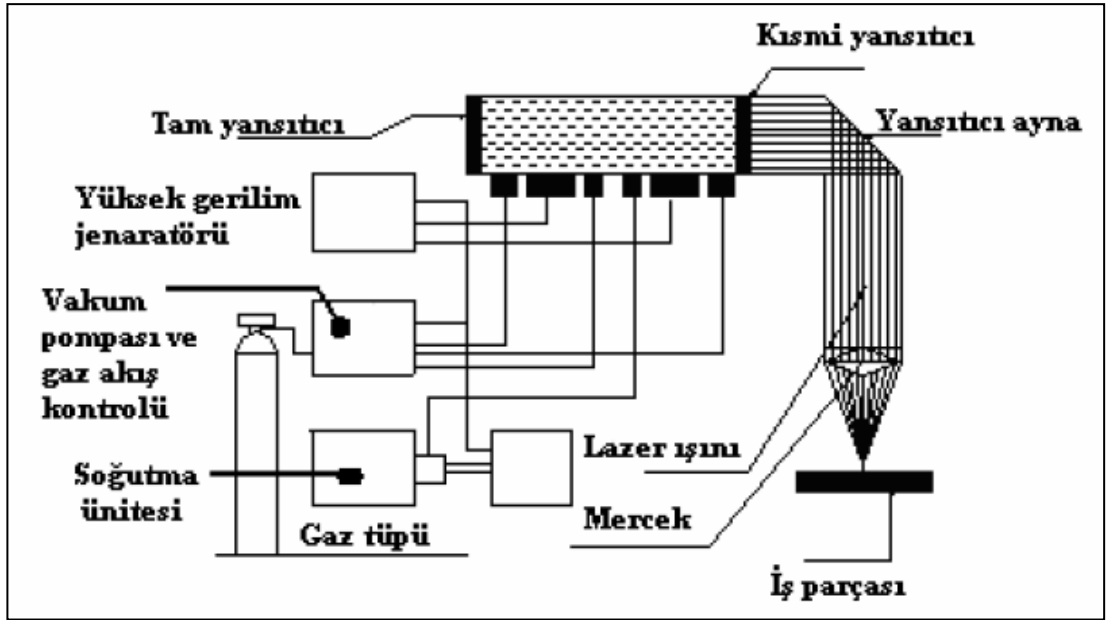


Şekil 17. Nd: YAG lazeri dikişi görüntüsü

Kaynak: (Akman, 2007).

2. Gaz Lazerleri

İstenen lazer türüne göre He, Neon (Ne) ya da karışım gazları olarak kullanılabilen gazlar, bir kabın içerisine koyulurlar. Kabın içerisindeki elektronlar sayesinde, uyarılarak lazer ışını üretilirler. He-Ne lazerleri sıkça tercih edilir. Ar ise en yaygın kullanılan gaz lazeridir (Akman, 2007). Yapılan çalışmalarla CO₂ gazının da istenen özellikleri sağladığı görülüp uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Püskülcü, Koçulular, 2009). (Kose, Kacar. 2015). Kolay uygulanabilir olması ve elde edilen lazerin yüksek güçlü olması sebebiyle plastik malzeme işleminde sıkça kullanılırlar. Genel olarak diğer malzeme işleme yöntemlerine göre daha ucuzdurlar (Uyguntürk. 2020) Bu tip lazerlerin dezavantajı kabın, içerisindeki gazın soğutulabilmesi amaçlı çeşitli türbin ve ekipmanların gerekliliğidir. Bu yüzden arıza ve maliyetleri diğerlerine göre daha yüksektir (Püskülcü, Koçulular, 2009). Sistemin şematik resmi Şekil 18' de gösterilmiştir.



Şekil 18. CO₂ lazeri şematik gösterimi

Kaynak: (Uyguntürk. 2020)

3. Diyot Lazerleri

Yarı iletken kristal malzemeler kullanılarak lazer ışını elde edilir. İki kutup arasında gezen elektronlar enerjilerini kaybederken foton yayarlar. Yayılan bu fotonlar, elektronlarla tekrar çarpışarak elektronlardan daha fazla foton

üretmesini sağlarlar. Yeterli foton elde edildiğinde lazer ışını oluşur. Verimli olmaları ve metal endüstrisine uyumlulukları sebebiyle çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Püskülcü, Koçulular, 2009).

B. Lazer Kaynağı

Lazer kaynağı aynı ya da farklı malzemeleri biraraya getiren ergitmeli kaynak yöntemidir (Uyguntürk. 2020). Lazer ışın kaynağı sanayide sağladığı bir çok avantajla günümüzde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Yöntem birden fazla metalin birbiriyle kaynaklanmasına olanak sağlar. Yoğunlaştırılmış ısı kaynağı haline dönüştürülerek dar ve derin nüfuziyet gerektiren alanlara uygulanarak, yüksek hızda kaynak ihtiyacına cevap verebilmektedir. Yöntem genel olarak otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır. Araçların şasi, şanzıman, kapı ve gövde bölgelerindeki kaynak ihtiyaçlarına yüksek seviyede cevap verebilmektedir. Örnek olarak Audi markası otomotivlerinin tüm gövde kaynağını lazer yöntemini kullanarak yapmaktadır (Püskülcü, Koçulular, 2009).

Lazer kaynak, yüksek oranda en-boy değişimi olacak şekilde ve çok dar alanlarda yapılabilir. Lazer kaynak ortamında hava şartları çeşitli şeffaf malzemeler kullanılarak kontrol edilebilir (Özcan ve ark.2004).

Lazer kaynakta kaliteyi doğrudan etkileyen parametreler, ekipman parametreleri ve iş parçası olarak ikiye ayrılır. Ekipman parametreleri kısmında lazerin dalga boyu, gücü, odak çapı, odak uzaklığı, çalışma modu, koruyucu gaz, hızı olarak verilebilir. İş parçası kısmında ise bileşim oranı, fiziksel durum, kalınlık, yüzey temizliği ön plana çıkar (Akman, 2007).

Lazer ile kaynak anında ışının emilimi çok kritiktir. Kullanılan lazer tipi, ışının güç yoğunluğu ve kaynak parçasının yüzey temizliği emilimi etkiler. Işının çapı düşüktür, araştırmalara göre 100 ile 1000 mikron arasında, bu yüzden malzeme üzerinde oluşabilecek olukları doldurma konusunda yeterli değildir (Püskülcü, Koçulular, 2009). (Çelen, 2006).

Kaynak anında iş parçası üzerinde başlangıç noktası hedef noktası olarak seçilir. Işın yüzeye ulaştığında ışık enerjisi ısı enerjisiye dönüşmüş olur ve hedef noktadan başlayarak metal ergitmeye başlar. Yönlendirilen ışınla birlikte hedef doğrultuda ergime devam eder. Kaynak işlemi yapmak için ısı enerjisi metalin

buharlaşma sıcaklığının altında olmalıdır. Fakat delik açma ya da kesme işlemlerinde sıcaklık metalin buharlaşma sıcaklığının üzerinde olmalıdır. Derine nüfuziyetin verimli olması için kalınlığın maksimum kalınlığının 8-10 mm olması önerilir (Özcan ve ark.2004). (Püskülcü, Koçulular, 2009).

Kaynak edilecek malzemeye enerji aktarımı aynalardan yansıyarak uygun dalga boyuna gelen lazer ışınının odaklanmasıyla olur. Eriyip buharlaşmaya başlayan metal koruyucu gaz ile birleşerek bir plazma oluşturur. Bu plazma enerjisinin malzemeye geçerek erimeye devam etmesini sağlar. Yüksek sıcaklık ve basınç farklılığı sebebiyle anahtar deliği formu oluşur. İş parçası hareketi ve ısınan buharın basıncıyla ergiyik kısım malzeme yüzeyine yükselmeye başlar. Bu yükselme ile çekme kuvveti, viskozite ve yüzey gerilmeleri ile kaynaklı genleşmeler de engellenmiş olur (Mustafa; Uğur 2009). Kaynak esnasında uygun ergiyik halin oluşması için iş parçasının ısıyı yutması gerekir. Maksimum ısı yutma ışının malzeme üzerine 90 °C'lik açıyla gelmesi halinde oluşur (Akman, 2007). Malzeme hareket ettikçe geride kalan kısım soğur ve katılaşır böylece kaynak dikişi oluşmuş olur. Oluşan kaynağın kalitesinde malzeme mekanik özellikleri çok büyük rol oynar. Malzemenin ışını yansıtması ya da yutması ve ısı iletim katsayısı kaynak dikişi kalitesini doğrudan etkiler. Kaynak kalitesini etkileyen diğer unsur ise lazer kaynak parametreleridir (Mustafa; Uğur 2009). Deneysel çalışmalar ve sonuç kısmında detayları verilecek analizlerle kaynak dikişine etki eden parametrelerin başında kaynak gücü gelmektedir.

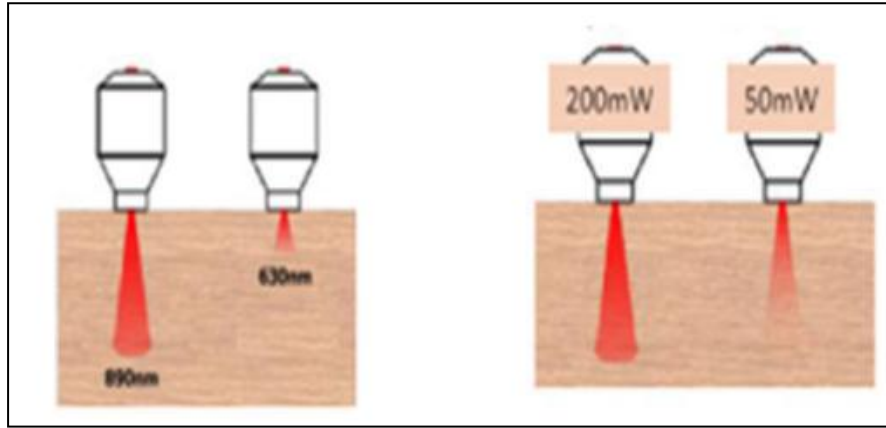
Kaynak dikişinin kalitesi kullanılan lazerin gücü, atım süresi, şekli, frekansı, odak genişliği, kaynak hızı, koruyucu gaz olmak üzere birçok parametreden etkilenir. Ayrıca nüfuziyet derinliği, kaynama başlama süresi, dikiş genişliği de kaliteli bir kaynak için doğru kombine edilmesi gereken parametrelerdir. Kaynak kalitesini etkileyen parametreler Şekil 19' da verilmiştir (Aydın, 2010).



Şekil 19. Lazer kaynak kalitesini etkileyen parametreler

Kaynak: (Akman, 2007).

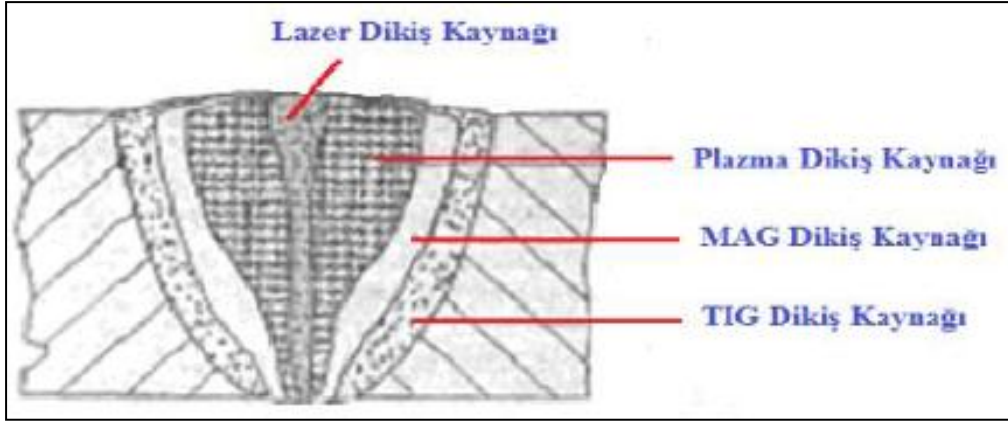
Çalışmanın konusu ve dikiş kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden olan optimum kaynak gücünü tespit etmek için kaynak hızı en alt seviyede tutulur. Hedef nüfuziyet derinliğine göre uygun kaynak gücü hesaplanır. Şekil 20' de kaynak gücünün nüfuziyete etkisi görülmektedir.



Şekil 20. Lazer gücünün nüfuziyet derinliğine etkisi

Kaynak: (Akman, 2007).

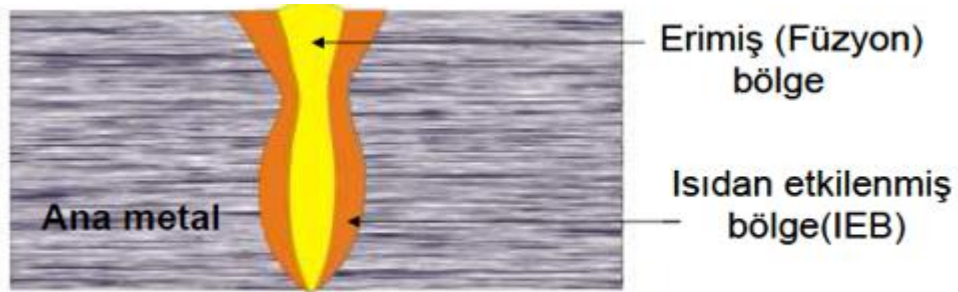
Kritik parametreler dikiş bölgesi dayanımını etkiler. Kaynak bölgesinin mukavemeti dikişin yapısıyla ilgilidir. Dikiş şekilleri farklı kaynak yöntemleri ve kullanılan koruyucu gazlara göre değişiklik göstrebilir. Şekil 21' de dikiş geometrileri verilmiştir (Uyguntürk. 2020).



Şekil 21. Kaynak yöntemine göre dikiş geometrileri

Kaynak: (Uyguntürk, 2020)

Kaynak işlemi sırasında erimiş yüzeyler birbirine değdirilir ve sonrasında soğumaya bırakılır. Bu işlem aslında bir füzyon olayıdır. Kaynak işlemi esnasında dikiş yerinde üç bölge oluşur. Birincisi ana metaldir. Bu bölgede kaynak işlemi süresi boyunca hiç bir değişim olmaz. İkinci bölge erimiş metalin bulunduğu bölgedir buraya füzyon bölgesi de denir. Üçüncü bölge ITAB olarak bilinen kaynak süresi boyunca bazı değişimler olan bölgedir (Akman, 2007). Şekil 22' de kaynak bölgesinde oluşan alanlar gösterilmiştir.

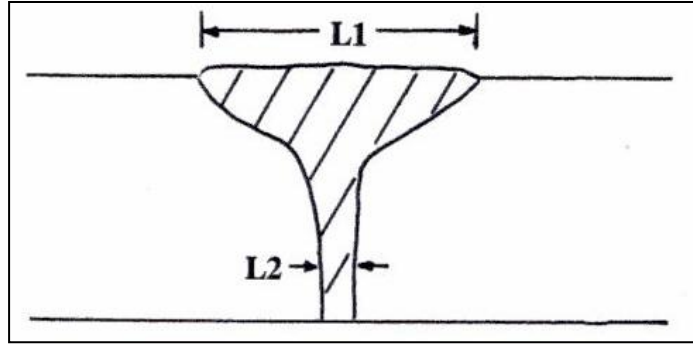


Şekil 22. Lazer kaynak esnasında oluşan bölgeler

Kaynak: (Akman, 2007).

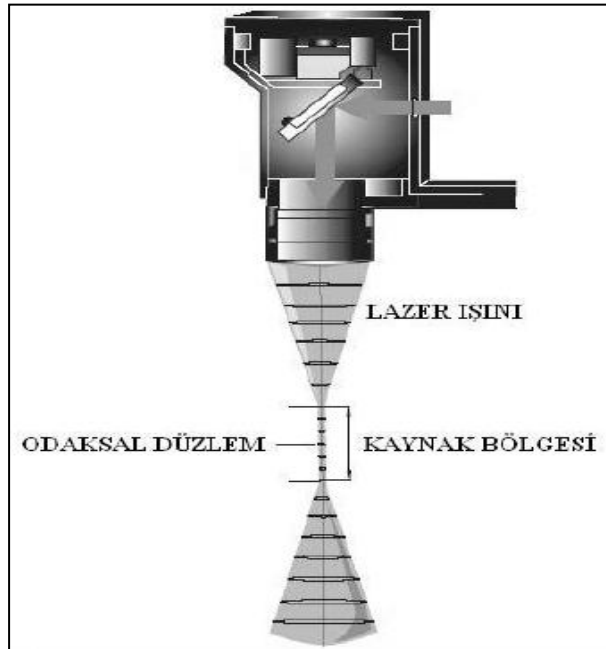
Gerekli nüfuziyet derinliğinin elde edilebilmesi için güç, belirlenmesi gereken ilk parametredir. Kalın parçaları kaynaklamak için daha yüksek güç gerekirken, ince parçalar için gerekli güç değeri daha azdır. Lazer kaynak gücü ile kaynak hızı arasında temel bir bağ vardır. Hızlı kaynak yapılması gücün etkinliğini düşürür iken, kaynak hızındaki yavaşlama lazer gücünün etkisini çok daha fazla artırabilmektedir. Aynı zamanda düşen gücün dikiş genişliğini daraltıcı

etkisi olacaktır. Kaynak hızının gereğinden yavaş seçilmesi oluşan gaz çıkışını artıracak ve gözenekliliğe olumsuz yönde etki edecektir. Şekil 23'te temsili olarak görüldüğü gibi derine inildikçe gücün etkisi azalmakta ve dikiş genişliği daralmaktadır.



Şekil 23. Lazer gücünün kaynak dikişi üzerine etkisi

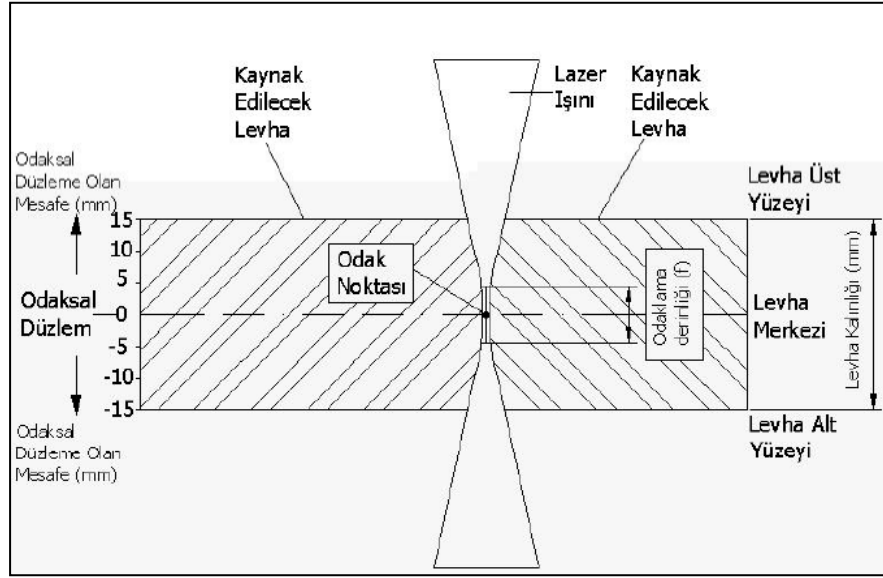
Odaklanmanın önemi ışının etkisinin tam olarak gerçekleşmesiyle ortaya çıkar. Yanlış bir odaklanma beklenen ısı girdisinin malzemeye ulaştırılamamasına ya da gereğinden fazla odaklanıp malzemenin ergiyip buharlaşmasına sebep olacaktır. Doğru odak noktasının bulunup kaynak için uygun mesafe aralığının belirlenmesi Şekil 24' te anlatılmıştır.



Şekil 24. Odaklanma ve kaynak yapılabilecek bölge

Kaynak: (Çelen, 2006).

Odaklama sadece malzeme yüzeyine değil, özellikle derin kaynaklarda malzemenin daha derinine yapılabilir. Nüfuziyet derinliği bu şekilde artırılmış olur. Şekil 25' te odaklama pozisyonu ve malzeme derinliği gösterilmektedir.



Şekil 25. Malzeme ve odaklanmış ışın

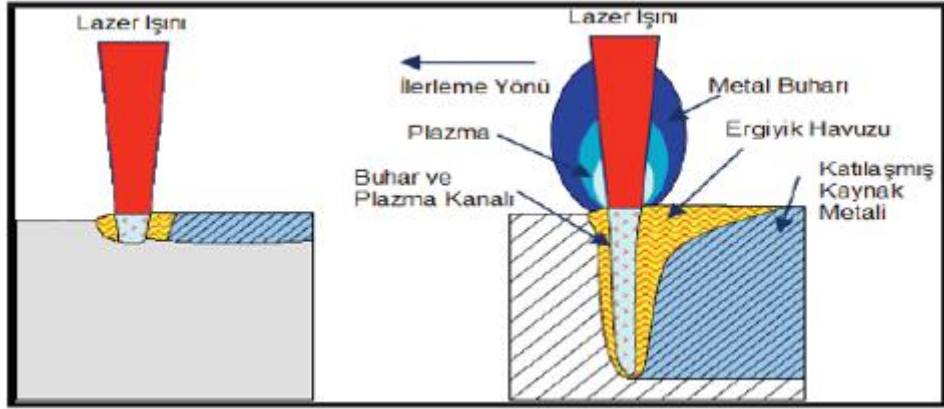
Kaynak: (Çelen, 2006).

Koruyucu gaz kullanımı lazer kaynak yöntemi için gerekli şartlardan biridir. Gazın seçiminde, malzeme ve gazın metalürjik etkileşimi dikkate alınmalıdır. En önemli fonksiyonlarından biri kaynak bölgesini korumanın yanında plazma oluşumunu durdurmaktır. Plazma oluşumu lazer ışın etkisini düşürücü etki yapar. Gazın debisi genel olarak 10 ile 40 litre/dak arasında değişir. Ayarlanan tüm bu parametrelerin ne kadar sıklıkla tekrarlanacağı darbe frekansı ile ölçülür. Birim zamanda tekrarlama sıklığının artması etkinliği yükseltecektir. Yüksek güç kullanımı darbe frekansına da bağlıdır. Darbeler arası mesafe ve darbe süresi yüksek kaynak hızlarına çıkılmasına olanak sağlar. Darbelerin üst üste binmesi kaynak dikişinin formunun korunmasında önemli rol oynar (Çelen, 2006).

C. Lazer ile Kaynak Yöntemleri

Günümüz teknolojik şartları göz önüne alındığında yöntem iki temel şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar iletimle ve derinlemesine kaynak yöntemleridir (Akman, 2007). Lazer kaynağın uygulama alanının genişliği birçok

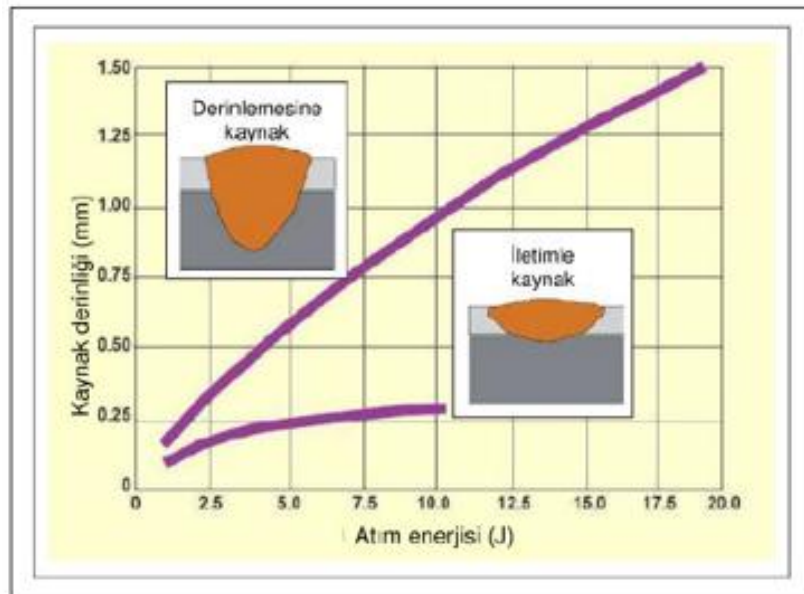
araştırmacının ilgisini çekmektedir. Ara yüzey reaksiyonlarının sınırlı olması en önemli avantajdır. Kaynak bağlantı bölgesinin dayanımı göz önüne alındığında en iyi birleştirme yöntemidir (Akkurt,ve ark 2012). Şekil 26' da iki yöntemin temsili gösterimi verilmiştir.



Şekil 26. İletim ve derinlemesine kaynak yöntemi

Kaynak: (Akkurt,ve ark 2012).

İki yöntem arasındaki temel fark iletimle kaynakta kaynak havuzu kapalı derinlemesine kaynakta açıktır. Ayrıca iletimle kaynak genel olarak ince sacların kaynatılmasında kullanılırken, derinlemesine kaynak kalın sacların birleştirilmesinde kullanılır (Akman, 2007).



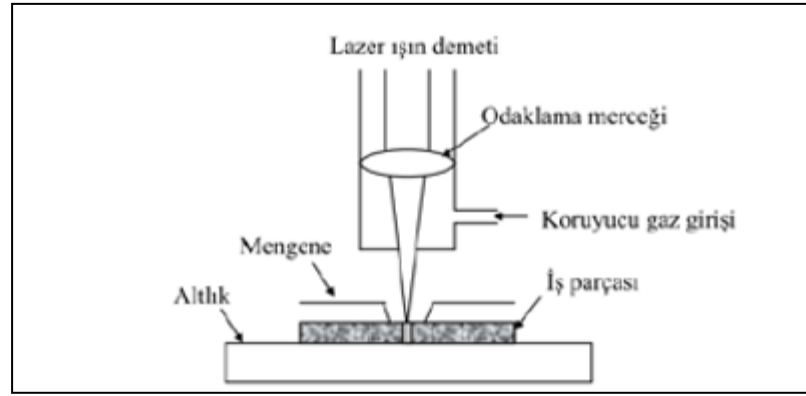
Şekil 27. İletimle ve derinlemesine kaynağın farkları

Kaynak: (Püskülcü, Koçulular, 2009).

1. İletimsel Lazer Kaynak

Temel prensip malzemenin lazer ışının enerjisini emerek kaynama noktasına ulaşmasıdır. Bu metotta ışın malzemeyi kaynama noktasına ulaştırılmaz fakat yeterli ergimeyi sağlayarak birleşmeye hazır hale getirir. İstenen noktaya gelen malzeme üzerine kuvvet uygulanır ve birleşme sağlanır. 0.5 mm'nin altında olan sac malzemelerin kaynatılması için uygun bir yöntemdir (Uyguntürk. 2020).

İletimle lazer kaynağı Şekil 28'de gösterilen düzeneikle, ince metallerin kaynatılmasında kullanılır.



Şekil 28. İletimle lazer kaynak düzeneği

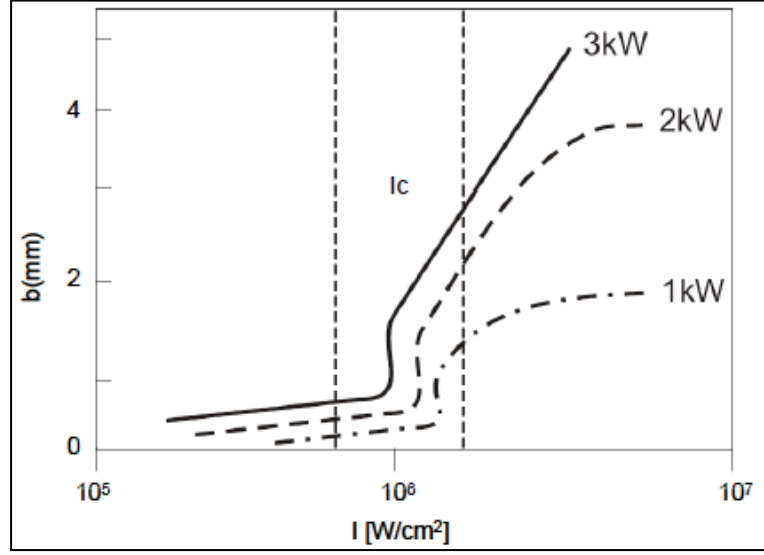
Kaynak: (Püskülcü, Koçulular, 2009).

Şekilde görüldüğü gibi ışın demeti malzeme yüzeyine gönderilir. Genellikle iş parçası yüzeyinin altına odaklanan lazer ışın demeti yüzeye düşürülür. Gelen ışının bir kısmı ergime için kullanılır. Lazer ilgili bölgeden harekete başladığında ergiyik soğuyarak katılaşmaya başlar. Diğer kısmı metaller ışığı emmediği için geri yansır (Püskülcü, Koçulular, 2009).

Kaynak derinliği çok fazla değildir. Odak pozisyon tam malzeme üzerinde ya da malzeme içerisine girmiş şekilde olabilir. Sıcaklığın ince iş parçalarında derinlik boyunca homojen dağıldığı kabul edilir. Isı girdisi malzemenin kaynama noktasının çok az altında olduğu durumlarda maksimum kaynak derinliğine ulaşılır.

Yöntemde ITAB 'ın havayla temasını kesmek ve oksitlenmeyi engellemek için koruyucu gaz kullanılır. Koruyucu gaz sistem lazer ışın gönderiyorken eş zamanlı gönderilir. Genel olarak Ar ve He, bazı durumlarda karışım gazlar ve CO₂ kullanılır (Akman, 2007).

İletimle kaynaktan derinlemesine kaynağa geçmek için lazer gücü ve atım süresi artırılır. Şekil 29'da iki yöntem arasındaki geçiş gösterilmektedir.



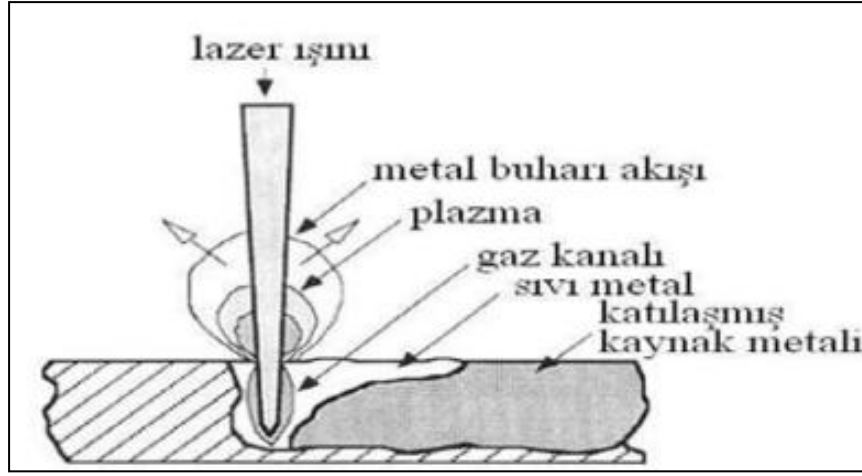
Şekil 29. İletimsel kaynaktan derinlemesine kaynağa geçiş

Kaynak: (Püskülcü, Koçulular, 2009).

Burada lazer şiddeti (I), kritik şiddet (I_c), kaynak derinliği (b) ile gösterilir. Çoğu metal için kritik güç yoğunluğu 10^6 W/cm^2 'dir. Bu değerden sonra buharlaşma artmaya başlar ve anahtar deliği (key hole) oluşur.

2. Derinlemesine Lazer Kaynağı

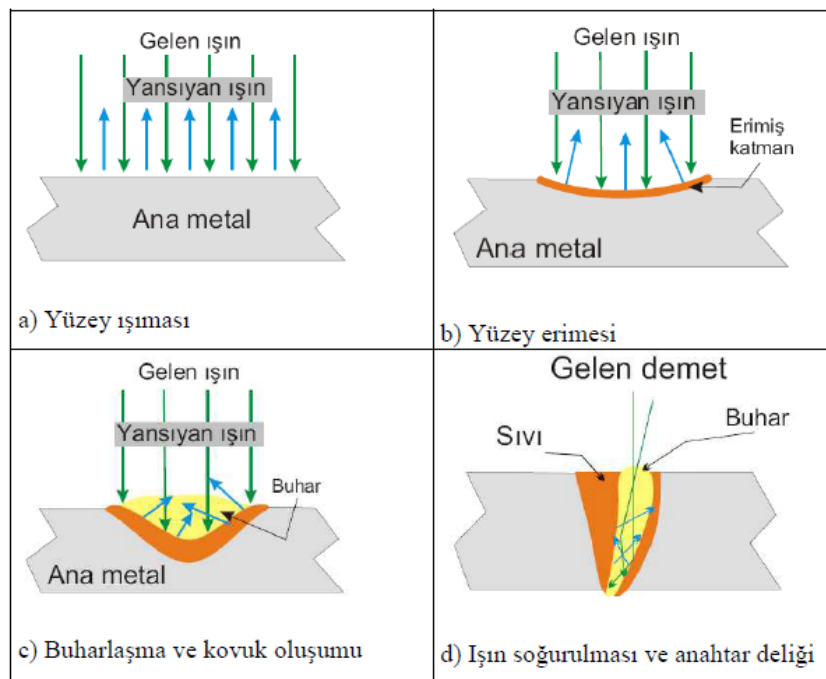
Literatürde yöntem 'Key Hole' (anahtar deliği) de denilir. Lazer ışını malzemeyi eritmeye başladığında malzeme yüzeyinde ergiyik metalle birlikte bir buhar kanalı oluşur. Bu buhar kanalının yarıçapı malzeme üzerine düşen lazer ışın demetinin yarıçapına eşittir (Püskülcü, Koçulular, 2009). Ergiyik metalin içerisinde oluşan anahtar deliği formu, malzemede oluşan yüzey gerilmesi, buhar basıncı ve yer çekimi etkisiyle açık kalmaktadır. Yöntemin şematik görünümü Şekil 30'da şematik olarak verilmiştir.



Şekil 30. Derinlemesine kaynak şematik gösterimi

Kaynak: (Akman, 2007).

Oluşan metal buharı bazı durumlarda iyonlaşarak buhar kanalı üzerinde plazma oluşumuna sebep olabilir. Bu plazma lazer ışınının soğurulmasına, zaman zaman yansıtılmasına ya da odaktan sapmasına sebep olabilir. Bu da düzensiz kaynağa, yetersiz derinliğe veya odaklama ekipmanlarının zarar görmesine sebep olabilir (Uyguntürk. 2020). Bu zararı ve oksitlenmeyi önlemek amaçlı sisteme yine kaynak işlemiyle eş zamanlı koruyucu gaz ilavesi yapılır. Seçilen güç parametresi ekipman hızında gerekli ergimeyi sağlayacak fakat metali tamamen buharlaştırmayacak şekilde seçilmelidir. Derinlemesine nüfuz işlemleri Şekil 31’de temsili olarak gösterilmektedir (Yavuz, Çam. 2015).



Şekil 31. Derinlemesine kaynak yönteminin aşamaları

Kaynak: (Akman, 2007).

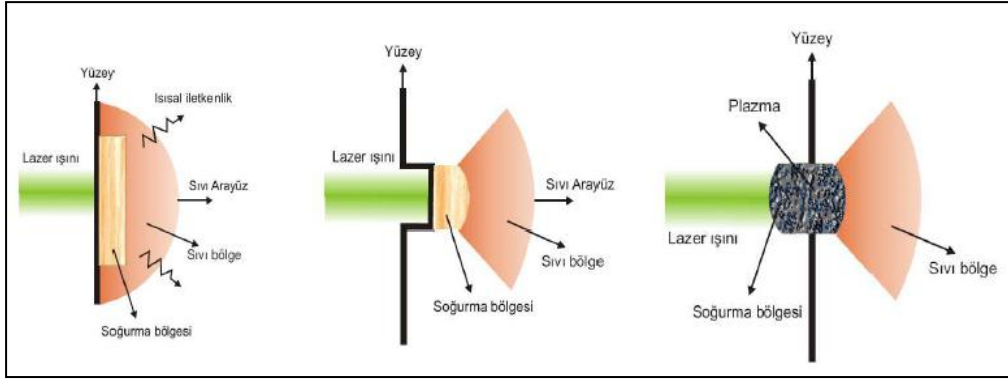
Lazer yöntemiyle malzeme kaynatılırken bazı fiziksel olaylar gerçekleşir. Gerçekleşen fiziksel olaylar Çizelge 3' te verilmiştir.

Çizelge 3. Lazer kaynak anında yaşanan fiziksel olaylar

Hedefin Özelliği	Fiziksel Nedeni
Işığı Soğurma	Işıktan gelen enerjinin ne kadarının hedef tarafından soğurulduğunu gösterir
Isı Transferi	Madde içindeki ısısal enerji akışını ve ve sıcaklık dağılımını belirler
Termodinamik	Malzeme içindeki gerçekleşecek fiziksel özelliklerin başlama sıcaklığını belirler

Bu olaylardan birincisi soğurmadır. Soğurulma olayı ışının dalga boyu, metalin özellikleri, lazer ışınının gelme açısı, polarizasyon ve odaklanma mesafesinden etkilenmektedir.

İkinci fiziksel olay iletimdir. Fotonları soğuran atomlar ışımaya yapacaktır. Isısal zaman sabiti bir malzemenin içindeki ısının iletilmesi ve belirli bir derinliğe ulaşmasını ifade eden birimdir. Etkili bir lazer kaynak için lazer atım süresi ve malzeme ısısal zaman katsayısı birbirine yakın olmalıdır. Bundan sonra moleküller arası titreşim başlayacak ve bağlar zayıflayacaktır. Bu da üçüncü durumu ortaya çıkaracak ve metal eski haline dönemeyip ergiyik halini alacaktır (Akman, 2007). Metal yüzeyine lazer ışını çarptığında erime, buharlaşma ve plazma oluşumu görülür. Gerçekleşen fiziksel olaylar Şekil 32'de gösterilmiştir.



Şekil 32. Metal yüzeyine lazer ışını teması sonrası süreçler

Kaynak: (Akman, 2007).

İstenen durum, metalde erimenin maksimum seviyesine buharlaşma olmadan ulaşmaktır. Yüzeydeki buharlaşmayı önlemek etkili bir kaynak derinliği yakalamak için önemli hususlardan biridir. Sabit lazer kaynak gücü için bazı metallerin buharlaşma sıcaklığına ulaşma zamanı Çizelge 4’ da verilmiştir.

Çizelge 4. Bazı alaşım metallerine ait buharlaşma süreleri

Metal	Soğurulan Lazer Işınması (W/ cm ²)
Kurşun	118 ms
Çinko	128 ms
Magnezyum	245 ms
Titanyum	319 ms
Krom	1.54 ms
Nikel	1.84 ms
Demir	1.86 ms
Alüminyum	3.67 ms
Molibden	5.56 ms
Bakır	8.26 ms
Tungsten	10.46 ms

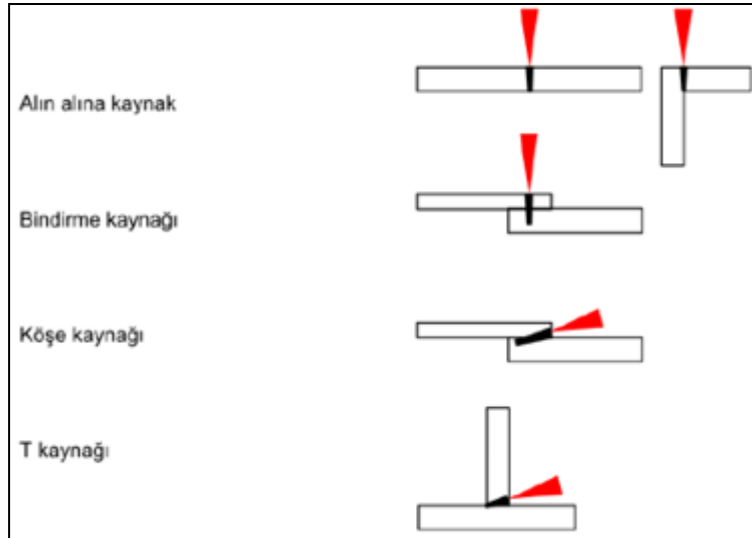
Kaynak: (Çelen, 2006).

İşlem esnasında önemli olan cihazın verdiği güç kapasitesinden ziyade malzeme üzerine düşürülen güç yoğunluğu (P_d)’ dur. Denklem 1’ den hesaplanır.

$$P_d = \frac{4 P_{in}}{\pi D_b^2} \quad (1)$$

D. Lazer Kaynak ile Birleştirme Yöntemleri

Doğru ve sağlam bir birleştirme için öncelikle sağlanması gereken şartlar malzeme kaynak yüzeylerinin birbirine tam teması, lazer ışınının tüm yüzeye eşit olarak uygulanması ve parçaların doğru yerleştirilmesidir (Çelen, 2006). Lazer kaynakta kullanılan birleştirme yöntemleri genel olarak dört grupta toplanır. Bunlar alın altına, bindirme, T ve köşe kaynağıdır (Püskülcü, Koçulular, 2009). Birleştirme yöntemlerinin görselleri Şekil 33' te verilmiştir.



Şekil 33. Lazer kaynak ile birleştirme yöntemleri

Kaynak: (Püskülcü, Koçulular, 2009).

1. Alın Alına Kaynak

En kolay birleştirme yöntemidir. İki malzeme arasında bırakılacak mesafe levha kalınlığının % 0.05' i kadar olmalıdır. Farklı kalınlıklardaki malzemelerin kaynağında ışının büyük bir kısmı kalın sacın üzerine odaklanmalıdır. Malzemelerin kaynak anında sabitlenmesi kritiktir (Püskülcü, Koçulular, 2009). Işın her iki parçaya eşit düşürülmelidir. Işın sapma oranı \pm % 10'dan fazla olmamalıdır. Kaynak esnasında oluşan buharın dışarı atılması için en uygun yöntemdir (Çelen, 2006).

2. Bindirme Kaynağı

Kaynak dikiş pozisyonunun çok önemli olmadığı durumlarda kullanılır. Yanlış hizalamanın olduğu durumlarda bile iyi sonuçlar alınabilir. Çoklu birleştirmelerde de iyi sonuçlar alınır. İki farklı malzemenin kaynağı esnasında ince malzemenin kalın malzeme üzerinde olması kritik durumdur (Püskülcü, Koçulular, 2009). Eğer uygun sabitleme yöntemi kullanılırsa çoklu sacların kaynağında dahi başarılı sonuçlar alınır.

3. Köşe Kaynağı

Kritik parametrelerin doğru seçildiği durumlarda istenen derinliklerde kaynak yapma kabiliyetine sahiptir. Malzemelerin iyi sabitlendiği ve boşluk toleransının en ince sac kalınlığının % 0.05' i kadar ayarlandığı durumda yüksek performans gösterir. Parametrelerin doğru ayarlanamaması durumunda yanıklar, nüfuziyet derinliğinde problemler ve dayanım yetersizlikleri ortaya çıkar (Çelen, 2006).

4. Kaynak

Herhangi bir köşe durumu olmadığında ışın 10 derecelik açılarla düşürülmelidir. Odak noktasının ayarlanması kritik olduğundan yanlış ayarlama durumlarında nüfuziyet etkilenir. Boşluk toleransının en ince sac kalınlığının % 0.05' i kadar ayarlandığı durumda yüksek performans gösterir. Ağır malzemelerin kaynağında tercih edilebilen bir yöntemdir (Püskülcü, Koçulular, 2009). Metaller genel olarak % 20-30 arasında yansıtıcılığa sahiptir (Akman, 2007). İyi bir dayanım dikiş boyunca tüm bileşenlerin ergitilmesiyle yakalanır (Çelen, 2006).

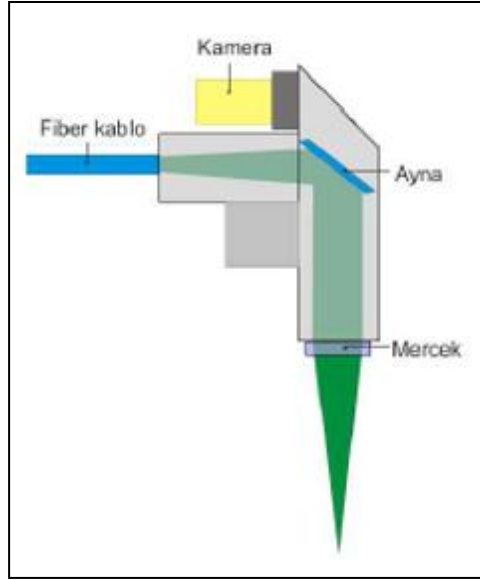
E. Lazer Kaynak Ekipmanları

Bütün lazer kaynak yöntemleri ışık, elektrik, elektron ışını ve kimyasallarla atomların uyarılması prensibine göre çalışır. Lazer kaynak sistemleri 4 ana gruptan oluşur.

1. Odaklama Ekipmanları

Mercekler lazer kaynak için kritik ekipmanlardandır. Odaklanma mesafesi ve ışın çapı, enerjinin iş parçası üzerinde yoğunlaştırılması ve doğru ergime için

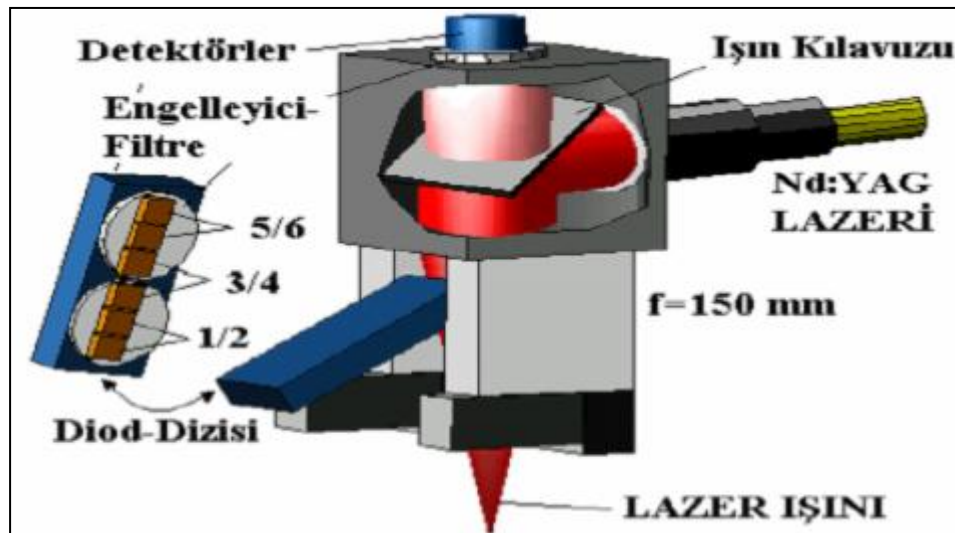
birincil önem taşır. Optik kabloyla getirilen lazer ışını toplayıcı ya da dağıtıcı merceklerle parça üzerine düşürülür. Eklenebilen kamera özelliğiyle operasyon baştan sona izlenebilir (Püskülcü, Koçulular, 2009). Şekil 34' te lazer kaynak kafasına monte edilmiş merceğin temsili görüntüsü verilmiştir.



Şekil 34. Merceğin kaynak kafasındaki görünümü

Kaynak: (Akman, 2007).

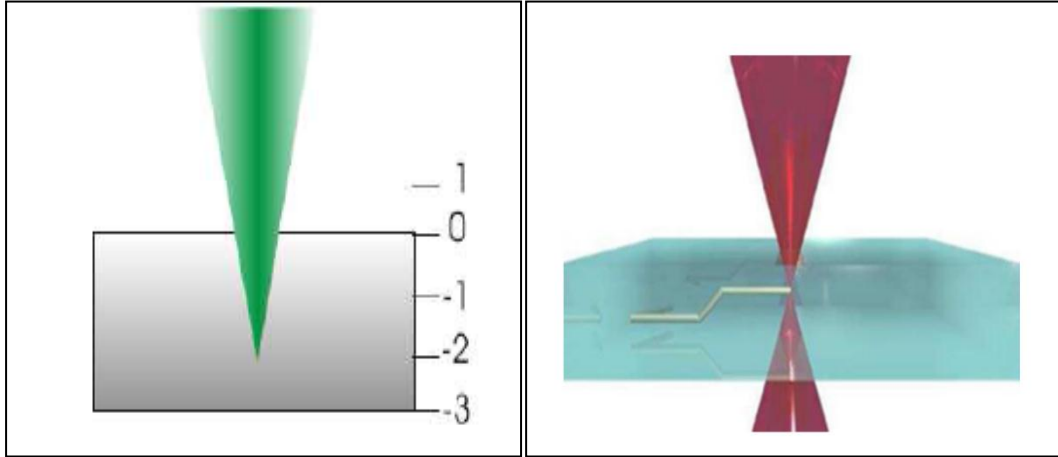
Odaklama ekipmanı, ışını fiber optik kablodan alır. Fiber optik kablo; lazer taşıyıcı öz, ışının sürekli merkezde kalmasını sağlayan ayna giydirilmiş orta bölüm, ışığın dışarı sızmasını engelleyici dış kısım olarak üç bölümden oluşur. Odaklanma ekipmanı fiber optik kablo lazer kafasının bağlantı şekli temsili olarak Şekil 35'de gösterilmiştir (Uyguntürk. 2020).



Şekil 35. Odaklama ekipmanı ve bağlantı şekli

Kaynak (Uyguntürk. 2020).

Lazer ışının odağı hedefin tam belirlenmesi ve ısı dağılımını kontrol etmek açısından çok önemlidir. Işın çapını belirlemek için özel plakalar üzerine belirli aralıklarla atım yapılır. En küçük çap seçilmeye çalışılır. Şekil 36' da odak noktası ayarı ve görseli verilmiştir (Akman, 2007).



Şekil 36. Odak noktası ayarı ve görseli

Kaynak: (Akman, 2007).

2. Lazer Üretici

Işının ortaya çıkmasını sağlayan uyarılma işleminin yapıldığı alandır. Lazer aktif maddesi katı (Nd-YAG), sıvı (renkli bir eriyik) ve gaz (CO_2) olabilir. Bu aktif maddeye göre yakut, He-Ne, CO_2 - NO_2 , Kripton (Kr) ve Nd lazeri gibi çok sayıda lazer çeşidi vardır. Bu seçilen lazer fazına göre ışık morötesi, yeşil, mavi, kırmızı veya kızılötesi gibi farklı renklerde olabilir (Uyguntürk. 2020). Nd-YAG katı lazerinde aktif bir madde ile zenginleştirilmiş bir kristal çubuk, CO_2 gaz lazerinde içinde aktif gazlar bulunan bir tüp ve fiber lazerinde optik kablunun çekirdeğinin lazer aktif madde ile zenginleştirilmesi sayesinde aktif ortam sağlanmaktadır (Püskülcü, Koçulular, 2009).

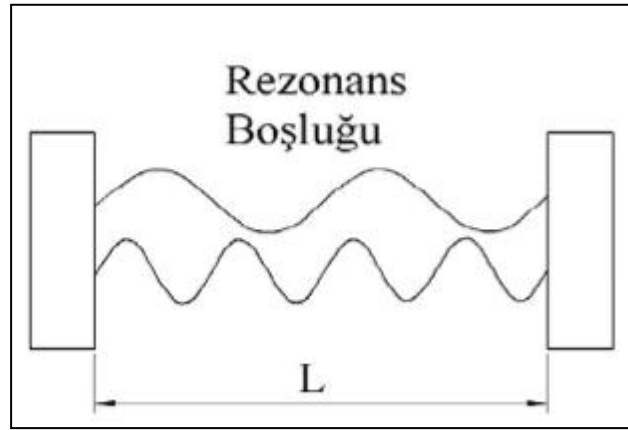
3. Pompa Kaynağı

Atomların uyarılması için bir enerjiye ihtiyaç duyulur. Pompa kaynağı bize bu enerjiyi verir. Elektrik enerjisi ya da optik enerji pompalama olarak iki gruba ayrılabilir. Elektrik pompa kaynağında atomlar üst seviyelerine elektrik enerjisi

kullanılarak çıkartılırlar. Optik enerji pompalama yönteminde ışık yoluyla tahrik edilirler. Diyotlu lazer için deşarj lambası ya da tüplü lamba gibi elemanlar kullanılır (Püskülcü, Koçulular, 2009). Besledikleri enerji, ışık ve ışın üretimi döngüsü süresince devam eder. Pompalama kaynağı olarak elektrik, doğru akım, ışık, ışın, ısı, atom, kimyasal reaksiyon, güneş ya da diyot lazer enerjisi gibi kaynaklar tercih edilebilir (Uyguntürk. 2020).

4. Yansıtıcılar

Lazer ışını ilk retildeğinde dalga boyu uzundur ve kaynak işleminde kullanılabilmesi için dalga boylarının kısaltılması gerekir. Bunun için iki tip ayna kullanılır. Birinci tip ayna az geçirgenliğe sahip (% 0,5 - %2 arasında) aynalarla geri ileri hareket eder. İkinci tip aynaya ulaştığında kısmen daha geçirgen (yaklaşık % 40-50) aynalarla yönlendirilerek belirlenmiş dalga boyuna ulaşılması sağlanır. Belirlenmiş dalga boyuna ulaşmak tamamen aynalar arasındaki mesafeye bağlıdır (Püskülcü, Koçulular, 2009). Işının dalga boyu ve ayna mesafesi uyumludur. Mesafe yarım dalga boyunun tam katına eşit olmalıdır. Bu Şekilde rezonatör rezonansa geçer. Şekil 37' de optik rezonatörde dalga oluşumu verilmiştir (Uyguntürk. 2020).



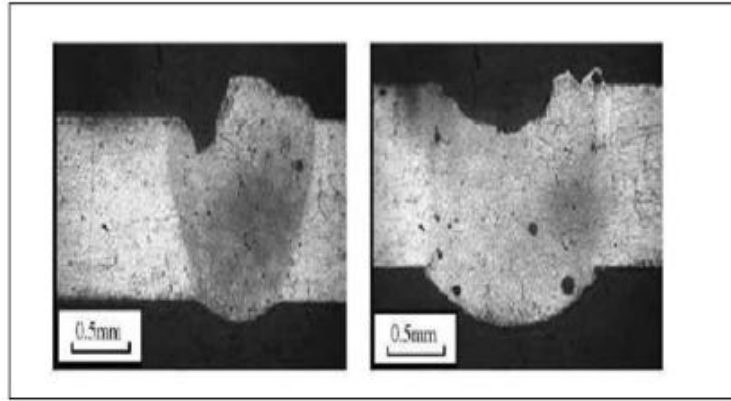
Şekil 37. Optik rezonatörde dalga oluşumu

Kaynak: (Uyguntürk. 2020).

F. Lazer Kaynak Yönteminde Koruyucu Gaz

Koruyucu gazlar işlemi daha kararlı hale getirmek ve ergimiş bölgenin atmosferle temasını kesmek için kullanılırlar. Atmosfer teması, oksidasyona

sebebiyet vereceğinden kaynak işlemleri esnasında istenmeyen durumdur. Kullanılan gazın içeriği, akış debisi ve zamanlaması kaynak kalitesini doğrudan etkiler. Gaz akış debisinin hızlı oluşu ergimiş bölgede şekil bozukluklarına, yavaş kalışı bölgenin oksitlenmesine sebebiyet verir. Işının kaynak kafasından çıktıktan sonra malzeme yüzeyine kadar iletilmesini sağlar. Gazın basıncı merceğin ömrünü de yakından etkiler. Koruyucu gazın yönünün ayarlanmaması Şekil 38’de görüldüğü gibi kaynağın üst kısmında deformasyonlara sebep olur (Akman, 2007).

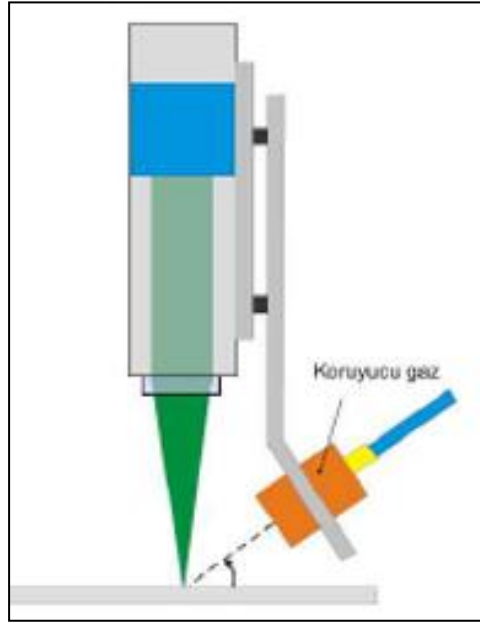


Şekil 38. Koruyucu gaz akışı sebebiyle oluşan deformasyon

Kaynak: (Püskülcü, Koçulular, 2009).

Gazaltı yöntemiyle yapılan kaynak yönteminde koruyucu gazın özelliği kaynak bölgesini ve ergimiş metali atmosfer içeriğindeki O₂ ve N gazlarının etkisinden korumaktır. Oluşan arkın cinsine, malzeme transferine ve iş parçası için harcanması gereken enerjiye etki eder. Kaynak bölgesini korumak için bir tane gaz kullanılabildiği gibi üçten fazla gazın karıştırıldığı uygulamalar da olabilir. Ergiyik metalle yaşanabilecek kimyasal etkiler göz önüne alınarak seçilmelidir. Endüstri şartlarında en çok Ar ve onun diğer gazlarla kombinasyonu kullanılır. O₂, He, Hidrojen (H₂), CO₂ gazları ile farklı oranlarda karıştırılarak kullanılabilir (Yılmaz, Barlas, 2011). Argon gazının diğerlerine göre avantajı, viskozitesindeki düşüklük ve He ile karşılaştırıldığında daha stabil arklar oluşturmasıdır (Emre, 2013). Örneğin, ergime ve damlacık oluşumunu kolaylaştırmak için koruyucu gaz Ar’ın içine belirli miktarda O₂ eklendiği durumlar olabilir. Bazı TIG ve MIG kaynağı uygulamalarında Ar’ın içeriğine fiziksel ve kimyasal özellikleri tamamen farklı H₂ de eklenebilmektedir.

Ar renksiz, kokusuz, tatsız, yanma özelliği olmayan, zehirsiz bir gazdır. Havadan daha ağır olup, atmosferden elde edilerek kullanılır. Düşük iyonlaşma özelliğine sahiptir. En iyi özelliği akış hızının çok düşük olması ve daha kararlı ark oluşumunu destekleyerek yanıkları azaltıcı etkisidir. Kalın parçaların kaynağında genellikle Ar kullanılır (Yılmaz, Barlas, 2011). Şekil 39' da koruyucu gazın lazer kafasına göre pozisyonu gösterilmiştir.



Şekil 39. Koruyucu gazın pozisyonu

Kaynak: (Akman, 2007).

Argona He ilavesi koruyucu gazı daha iletken ve nüfuziyet derinliğini artırıcı etki yapar. Kalın parçaların kaynağında kullanılan bir yöntemdir. Argona H₂ ilavesi ark gücünü artırıcı etki yapar ve iletkenliği yüksek olduğundan dar ve derin nüfuziyet ihtiyacı olan alanlarda kullanılır. H₂ O₂'yi indirger ve yüzeyde oksit oluşumunu engelleyerek kaynak dikişinin görüntüsünü iyileştirir. Argona CO₂ eklenmesi kaynak bölgesinin sıcaklığını yükseltir ve diğer gazları uzaklaştırır. Böylece derin nüfuziyet ve yüksek hız gerektiren durumlarda kullanılır. Argona N₂ eklenmesi ergiyik metalin içerisinde kalıcı ferrit miktarını ve artık gerilmeleri azaltıcı etki yapmaktadır. Fakat N₂ miktarının çok artışı sertliği ve distorsiyonları artırıcı etki yapar. Argona belirli oranlarda katılan gazların bazı özellikleri Çizelge 5' de verilmektedir.

Çizelge 5. Koruyucu gazların bazı özellikleri

Gaz Tipi	Kaynama Noktası (°C)	Kimyasal Davranış
H ₂	-252.9	İndirgen
Ar	-185.9	İnert
He	-268.9	İnert
N ₂	-195.8	Reaktif
CO ₂	-78.5	Oksitleyici
O ₂	-183.0	Oksitleyici

Kaynak: (Akman, 2007).

Koruyucu gazın kaynak bölgesine aktarımı sırasında önemli hususlardan birtanesi, gazın akış hızı ve yönüdür. Türbülans oluşması durumunda kaynak dikişi olumsuz etkilenir. Gaz aktarımı kısmen yavaş ve geniş açıyla yapılmalıdır.

G. Titanyum Alaşımların Lazer Kaynağı

Ti alaşımlarının maliyetinin yüksek olması Ti ve O₂' nin ayrılması için enerji gereksiniminin yüksek olmasıdır. Yalnızca çok gerekli durumlarda kullanılırlar. Genel itibariyle rot, valf, miller, egzoz sistemleri, süspansiyon ve fren sistemlerinde kullanılırlar (Akman, 2007).

H. Lazer Kaynak Yönteminde Güvenlik Seviyeleri

Lazer ekipmanları IEC 60825-1 ve ANSI Z136.1 standartlarına uygun olmak zorundadır. Farklı ülkelerde ilave standartlar eklense de Avrupa Birliği normları için ilgili standartları sağlamak gereklidir. Standartlar izin verilen korunmasızlık değerleri ve çalışma modları üzerine oluşturulmuştur. Lazerler tehlike seviyelerine göre dört sınıfa ayrılır. Ayrım kriterlerini ışının dalga boyu ve gücü etkiler. İnsan sağlığına etkisine göre sınıflandırılırlar (Çelen, 2006).

1. Birinci Sınıf Lazerler

0,4 mW altında güce sahip lazerlerdir. Güvenli seviyededirler. Lazer ışınına çıplak gözle bakılması önerilmez ama insan sağlığına zararlı değildir. Tehlike

koşulları göz önüne alındığında düzenli kontrol ve ölçüm gerektirmeyen tipteki cihazlardır. Örnek olarak diyot lazerler verilebilir (Püskülcü, Koçulular, 2009). Lazer ekipmanı üzerinde yer alan ikaz işareti Şekil 40' ta verilmiştir.



Şekil 40. Lazer Uyarı İşareti

Kaynak: (Çelen, 2006).

2. İkinci Sınıf Lazerler

Ortalama 1 mW lazer gücüne sahip gözle görülebilir dalga boyunda ışın yayan cihazlardır. Göz kapağı kapandığında doğal koruma sağlanabilir. Çıplak gözle bakılması retinada hasarlara yol açabilir. Örnek olarak He-Ne lazerleri bu sınıfa girmektedir.

3. Üçüncü Sınıf Lazerler

Gözle direkt ya da dolaylı olarak bakılması göze zarar verecektir. Ciltle temasında kalıcı hasarlara sebep olmayan lazerlerdir. İkiye ayrılırlar.

a. Üçüncü Sınıf a tip Lazerler

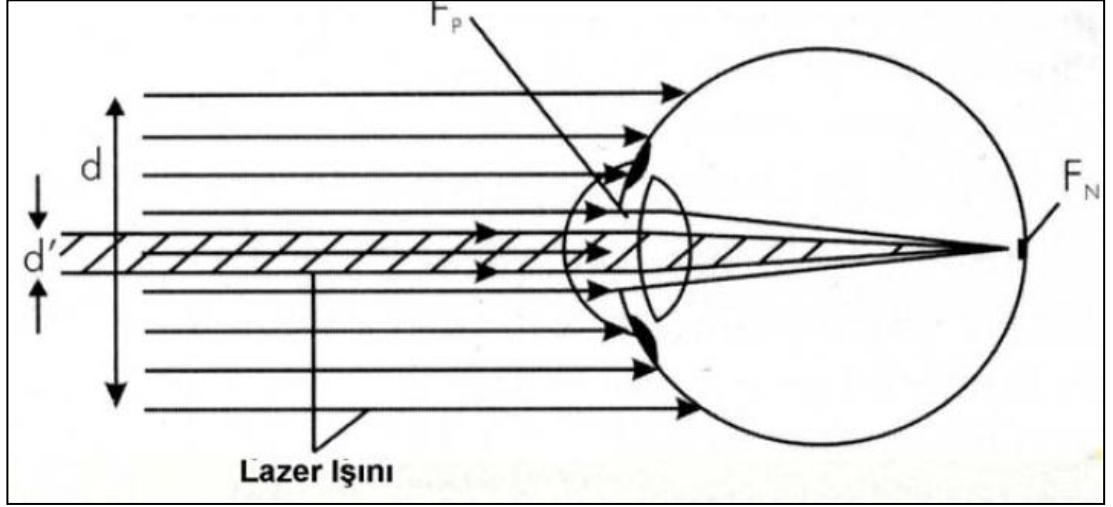
Lazer ışımına kesinlikle çıplak gözle bakılmaması gerekir. 1-5 mW değerleri arasında güç üretebilen tehlikeli lazerler sınıfındadır. Örnek olarak He-Ne lazerleri verilebilir.

b. Üçüncü Sınıf b tip Lazerler

5-500 mW değerleri arasında güç üretebilen sistemlerdir. Yangın çıkarabilme tehlikesine sahiptirler. Koruyucu gözlük olmadan yaklaşılmaması gerekir.

4. Dördüncü Sınıf Lazerler

Yüksek güç sınıfındaki lazerlerdir. Yangın çıkarma tehlikesi olup, insan cildinde ve gözünde kalıcı hasarlar oluşturan ekipmanlardır. Kapalı kabin içerisinde çalıştırılmaları ve üst düzey güvenlik tedbirleri alınması gerekir. İnsan gözü mercekle etkisine sahiptir. İçerisine gelen lazer ışınını retina üzerine mikron mertebesinde odaklar. Bu odaklanma 300.000 katlık yoğunluk artışına denk gelir. Bu durum literatürde yakıcı cam etkisi olarak adlandırılır. Bu durum gerçekleştiğinde göz korneasında kalıcı hasarlar meydana gelir. Bu yüzden tüm şartlarda, göz koruyucu ekipmanların lazer sistemlerinin kullanımda olduğu alanlarda ulaşılabilir ve zorunlu olması gerekir (Çelen, 2006).



Şekil 41. Yakıcı cam etkisi

Kaynak: (Çelen, 2006).

İ. Verimliliği Artırıcı Uygulamalar

Yansıtıcı özellik sıcaklık artışıyla birlikte düşüş gösterir. Sonuçta, lazer ışını soğurulmasında bir artış olur. Absorbe edilen enerji (P_{in}) sistemden verilen enerjiye

(P_{giren}) oranlandığında kaynak verimi (η) ortaya çıkar.

$$\eta = P_{in} / P_{giren} \quad (2)$$

Erime oranı, ϵ ile gösterilmektedir. Verimli bir kaynak için metalin eritilmesi gerekir.

$$\varepsilon = (v \cdot d \cdot W \cdot \Delta H_m) / P \quad (3)$$

ε giren lazer gücünün eritme hızıyla ilişkilidir. P_{giren} lazer gücünü, v kaynak hızını, d levha (sac) kalınlığını, W ışın genişliğini, ΔH_m erime sıcaklığında metalin ısı içeriğini ifade etmektedir. Verimi artırmak için çeşitli uygulamalar yapılabilir. Metal üzerine soğurucu bir kaplama uygulanıp enerjinin emilimi artırılır. Yüzey pürüzlülüğü zımparalama ya da kum püskürtme gibi yöntemlerle artırılabilir ve yansıtma azaltılmaya çalışılır. Ön tavlama prosesi uygulanabilir. Profile yeniden şekillendirme yapılabilir ya da oksitleme/nitritleme uygulanabilir.

J. Yöntemin Avantajları

Yöntemin en önemli avantajı güç yoğunluğunun yüksek olması, yüksek hızda kaynak yapılabilmesi, deformasyonların az olması, işlemin öncesi ve sonrasında kimyasal reaksiyonların oluşmamasıdır. Lazer ile kaynakta çok dar dikiş genişliği elde edilebilir ve yöntem otomasyona çok uygundur (Püskülcü, Koçulular, 2009). (Kose, Kacar. 2015).

Otomasyon ile çıkan ürün kalitesinin artması sağlanmıştır. Kaynak ağzı açılmasına gerek kalmadan köşeli kaynak ya da kalın parçalara kaynak yapılabilir. Her türlü malzemeye uygulanabilir ve kaynak sırasında aynı ya da farklı malzemeler birbiriyle birleştirilebilir. Işık enerjisinden ısı girdisi elde edildiği için iş parçası tamamen kaynaklanabilir. Dikiş bölgesinin mukavetine artırıcı etki yapar.

ITAB, ışının doğrudan etkilediği ve önce erime sonra birleşmeyi sağlayan bölgedir. Diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında çeşitli avantajları vardır. Ark kaynaklarında ısı yüksek elektrik akımıyla oluşur. Metal üzerine odaklanma tam olarak sağlanamadığından, malzemenin ergitilmesi için gerekli olan ısı etkisi kaynak hızı düşürülerek yükseltilir. Bu şekilde yüksek ısı girdisi malzemenin istenen özelliklerinin bozulmasına sebep olur. Lazer kaynağında ise ışın net şekilde malzemenin istenen bölgesine odaklanılabilir. Olması gereken ısı girdisi sağlanır ve daha hızlı yapılabilir. Bu, malzemenin istenen mekanik özelliklerinin korunmasını sağlar (Püskülcü, Koçulular, 2009). Ayarların otomasyon uygunluğu ve göstergeler sayesinde hassas şekilde yapılabilir. Mikron

mertebesindeki alanlara odaklanılabilir. Temassız çalışması sayesinde kaliteli yüzey oluşur.

Lazer kaynağının en büyük avantajı, kaynağın vakum olmayan bir ortamda gerçekleştirilebilmesidir. Kaynağın tane boyutu, kaynak mekanizmasıyla ilişkili soğutma hızından etkilenir (Akman, 2007). Şartlara bağlı olarak kaynak hızı 14 m/dk' ya kadar çıkabilir. Kaynaklanmış malzemede ciddi deformasyonlar oluşturmamaktadır. Malzeme mekanik özellikleri diğer kaynak yöntemleri sonuçlarıyla karşılaştırıldığında kaynak öncesine yakındır. Çok dar alanlarda, sert ve dirençli alanlarda dahi uygulanabilmektedir. Herhangi bir dolgu malzemesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Güç yoğunluğu isteğe ve ekipmana bağlı olarak 106 W/cm²' ye kadar çıkabilmektedir (Püskülcü, Koçulular, 2009).

En düşük ısı enerjisi ile nüfuziyet etkisi çok iyi bir kaynak işlemidir. ITAB diğer yöntemlere göre daha dardır. Kaynak yerinin yorulma dayanımı diğer yöntemlere göre daha yüksektir. Karmaşık tasarımlı parçaların kaynağında da rahatlıkla uygulanabilir. Isı girdisinin azlığı sebebiyle distorsiyonlar yok denecek kadar azdır. Şeffaf malzemelerin kaynağında yapılabilir (Uyguntürk. 2020).

Kalitesel olarak vakum altında elektron kaynağı yöntemine eş değerdir. Oda sıcaklığında kullanılabilir. Ek olarak yüksek derinlik ve genişlik oranına sahiptir. Robot kollarına montajı yapılabildiği için lokasyon hassasiyeti gerektiren durumlarda avantaj sağlamaktadırlar (Akman, 2007). Suyun altında kaynak yapılabilir. İleri teknolojik ekipmanlarla malzemenin iç yapısı dahi görüntülenip önlemler alınabilir. Malzeme üzerindeki kirliliğin yaratacağı kalitesizliği önlemek için temizleyici lazerler kullanılabilir (Aydın, 2010).

Yöntemin başlıca dezavantajları sert malzemelerde çok fazla sert kaynak dikişi oluşturması ve nüfuziyet derinliğinin 0,1 mm-8 mm arasında verimli olmasıdır. Yüksek yansıtıcı özellik gösteren malzemelerin kaynağında ek önlemler alınması gerekliliğidir.

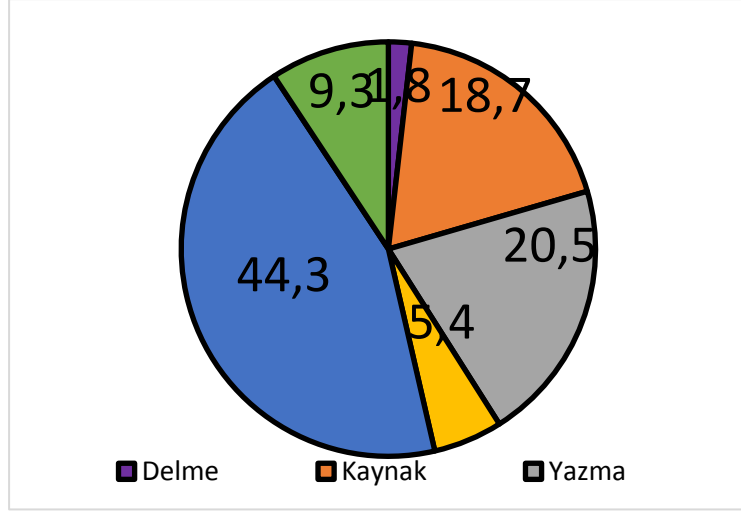
Yöntemin geliştirilebilir yanları; ilk yatırım maliyeti, direk temaslarda insan sağlığına zararlı olması ve çok parlak malzemelerde matlaştırma gerekliliğidir (Uyguntürk. 2020).

K. Uygulama Alanları

En önemli uygulama alanları sac malzemelerin kaynatılması işlemidir. Yöntemin kullanım alanının % 30'unu otomotiv sektörü oluşturmaktadır. Sanayide kesme, markalama ve kaynaklama işlemlerinde çok yoğun kullanılır. Metal sanayi sektöründe lastik, metal ve tekstilde kullanılan enjeksiyon kalıplarının onarılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Püskülcü, Koçulular, 2009). Petro-kimya, arıtma tesisleri ve medikal endüstri alanlarında paslanmaz çeliklerin lazer kaynaklı uygulamalarına çokça rastlanılır (Kose, Kacar. 2015). Yüksek ergime sıcaklığına sahip metallerin kaynağında kullanılabilir. Sağlık sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Askeri alanda silahların geliştirilmesinde ve insansız hava araçlarında yaygındır. Otomotiv sektöründe markalamada da kullanılırlar (Uyguntürk. 2020).

Otomobil, uçak, gemi makineleri sanayide ve çelik konstrüksiyonların birleştirilmesinde lazer kaynağı çokça tercih edilir. Hafifliğin ve sağlamlığın hayati önem taşıdığı uçak sektöründe lazer kaynak yöntemiyle birleştirme yapılarak ağırlık % 15 düşürülmüştür. Aynı zamanda diğer benzer kaynak yöntemlerine göre maliyet % 20 daha tasarruflu hale getirilebilmektedir. Gemi ve lüks yatların yapımında, bu yöntemin kullanılması hafiflik, kalite, güven ve ekonomi açısından uygun ürünlerin yapımına kolaylık sağlar. İnce saclara güvenli şekilde uygulanabilmesi özellikle araç ve gemi gövdelerinin hafifletilmesine ve enerji tasarrufuna olanak sağlamaktadırlar (Püskülcü, Koçulular, 2009).

Lazerler malzeme işleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Özellikle hafifliğin önemli olduğu uçak endüstrisinde delme, soğutma sektöründeki sert malzemelerin işleme zorluklarının sıkça yaşandığı kesme, yüzey işleme, markalama gibi yöntemlerde lazer ışını sıklıkla kullanılmaktadır. Mikro işlemlere uyum sağlamaları, aynı zamanda işlem hızı, kalitesi ve temiz oluşu tercih sebebi olmaktadır. Lazerin sanayideki kullanım yüzdeleri Şekil 42' de verilmiştir.



Şekil 42. Lazerlerin kullanım alanları

Kaynak: (Akman, 2007).

Geniş bir alanda kullanımı olan lazerler ile organik ya da inorganik, aynı ya da farklı metaller birleştirilebilmektedir. Al ve Mg gibi alaşımların kaynağında da kullanılabilmesi diğer kaynak yöntemlerine göre avantaj sağlar (Akman, 2007).

V.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Titanyum alaşımları lazer kaynak uygulamalarına uygunlukları dolayısıyla sıkça kullanılır. Bu çalışmada üretilen numunelere lazer kaynak işlemi için gerekli yumuşaklığın ve stabilizasyonun sağlanması amacıyla kimyasal bileşimi Çizelge 6' da verilen AISI 430 Ti ferritik paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Kullanılan sacın kalınlığı 0.6 mm'dir. Mekanik özellikleri Çizelge 7' da verilmiştir.

Çizelge 6. AISI430 Ti alaşımının kimyasal bileşimi

C	Cr	Ti	Mn	P	Si	S	Fe
0.0-	16.00-	0.50-	0.0-	0.0-	0.0-	0.0-	80-
0.05	18.00	0.80	1.00	0.04	1.00	0.02	85

Kaynak: (Kaya, Kahraman. 2011).

Çizelge 7. AISI430 Ti alaşımının mekanik özellikleri

a_0 (mm)	Isıl İşlem	R_m (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A_{80} (%)	S_0 (mm ²)
0,6	Tavlı	515	310	30	65

Kaynak: (Kaya 2010)

Birleştirme operasyonunun tamamı TRUMPF LASER Ar gaz kaynak makinesi ile yatay pozisyonda ilave metal kullanılmadan farklı lazer ışın güçlerinde yapılmıştır. Güç değerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisini inceleyebilmek için numuneler farklı güç değerlerinde birleştirilmiştir. Güç etkisinin doğru tespiti için numune üretimi esnasında diğer kritik parametrelerin

değerleri Çizelge 8’de verildiği gibi sabit tutulmuştur. Üretilen parçalar 900W, 1100W, 1250W, 1350W ve 1450W lazer gücü değeriyle birleştirilmiştir.

Çizelge 8. Lazer kaynak parametreleri

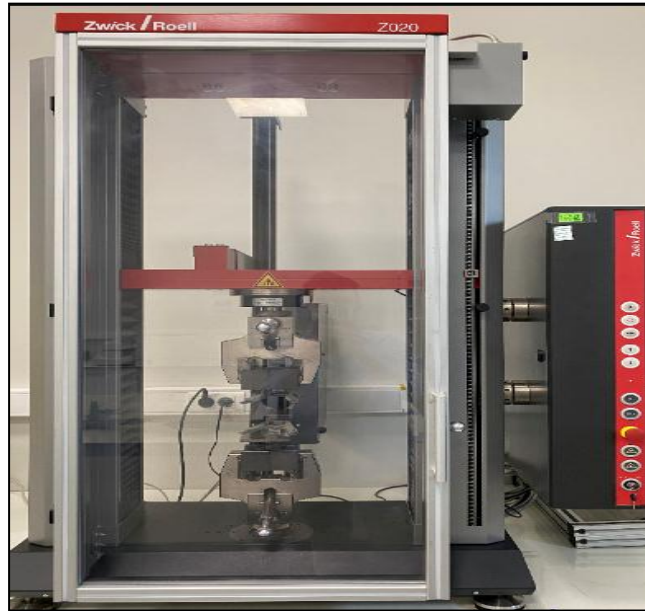
Lazer Gücü (Watt)	Kaynak Hızı (m/dk)	Koruyucu Gaz	Gaz Debisi (lt/dk)	Odak noktası (mm)
900	5	Ar	20	0,9
1100	5	Ar	20	0,9
1250	5	Ar	20	0,9
1350	5	Ar	20	0,9
1450	5	Ar	20	0,9

Çalışmalar kapsamında güç faktörünün mekanik özelliklere etkisini inceleyebilmek için numunelere sertlik ve çekme testleri uygulanmış ve numunelerin davranışları karşılaştırılmıştır. Çekme test numuneleri Şekil 43’de Zwick/Roell marka kesme kalıbında ebatları DIN EN ISO 6892-1 standardı referans alınarak hazırlanmıştır. İşlem haddeleme yönüne 90°lik açıyla gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri öncesi üretilen numunelerden şekli belirlenmiş formlarda numuneler alınır. 150 x 300 x 0.6 mm boyutlarında numune alma işlemine çıkan parçanın şeklinden dolayı papyon numune çıkarma denir.



Şekil 43. Zwick/Roell kesme kalıbı

Papyon çıkarma işlemi sonrasında numunelerin farklı güç değerlerindeki özelliklerini incelemek için çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri Şekil 44’te verilen Zwick/Roell Z020 marka cihazla DIN EN ISO 6892-1 standardı referans alınarak lazer kaynak yönüne paralel yapılmıştır.



Şekil 44. Zwick Roell Z020 çekme cihazı

Sertlik incelemeleri için numunelere 500 gram ön yük uygulanmıştır. Sertlik testleri için Şekil 45’ te verilen Mitutoyo marka sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 45. Mitutoyo marka sertlik ölçüm cihazı

Güç değişiminin mikroyapıya etkilerinin incelenmesinde ölçüsüz çıkarılan numunelerin kesimi, kalıplama cihazına girebilmesi için yüzeyden ve kesitten olmak üzere Şekil 46’da verilen Struers Secotom 60 marka kesme cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 46. Struers Secotom 60 kesme cihazı

Kesilen parçalar bir sonraki aşamada Şekil 47’ de verilen Struers CitoPress-30 cihazıyla bakalite alınmıştır. Sonrasında bakalite alınan numuneler Şekil 48’ de gösterilen Struers Tegramin 30 zımparalama cihazıyla kabadan

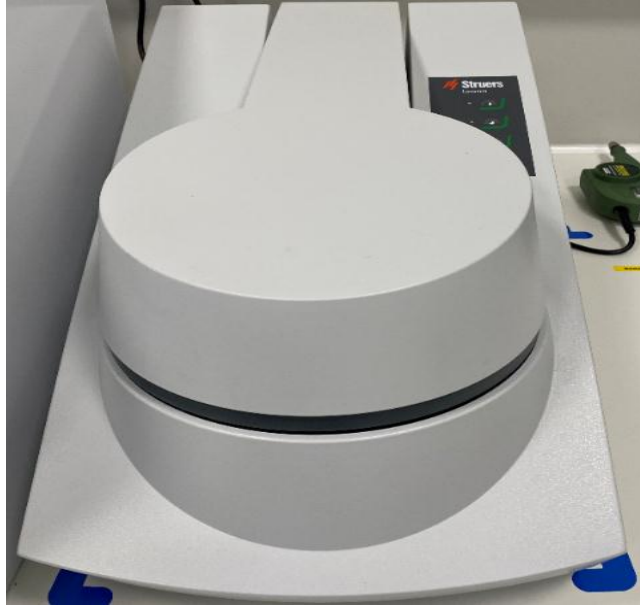
inceye doğru 240-500-800 ve 1200 grid zımparalar ile dört aşamada zımparalanmıştır. Ardından kaba işlemden ince işleme doğru 9 µm, 3 µm ve 1/4 µm boyutunda elmas solüsyonla parlatılmıştır.



Şekil 47. Struers CitoPress-30 bakalit kalıplama cihazı



Şekil 48. Struers Tegramin 30 zımparalama ve parlatma cihazı



Şekil 49. Stuers Lavamin temizlik ve kurutma cihazı

İşlemlerin sonunda bakalit yüzeylerindeki kalıntılar Şekil 49’da verilen Stuers Lavamin temizlik ve kurutma cihazı ile temizlenmiş, mikroskop incelemeleri için Şekil 50’ de verilen Adler-Atzmittel marka asit dağlayıcı ile 3-5 sn arasında süre ile dağlanmışır. Dağlanmış bakalitler görüntü alınmak üzere Şekil 51’ de verildiği gibi mikroskop incelemelerine hazır hale gelmiştir.



Şekil 50. Adler-Atzmittel marka bakalit dağlayıcı asit



Şekil 51. Bakalit görüntüsü

Numunelerin bakalite alınan görüntüleri Şekil 52'deki Leica DMi 8 Mikroskop ile 10x büyütme katsayısıyla incelenmiştir. Kopma yüzeylerine hasar analizi yapılmış olup incelemelerde Şekil 53'de gösterilen Tescan Vega 3 SB SEM cihazı kullanılmıştır. Görüntüler 15 kV elektron voltaj ile çekilmiş olup ışın yoğunluğu ayarı 10 olarak seçilmiştir. Büyütme 500 x oranındadır.



Şekil 52. Leica DMi 8 Mikroskop



Şekil 53. Tescan Vega 3 SB marka taramalı elektron mikroskobu

VI. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde deneysel çalışmalar kısmında verilen sertlik testi, çekme deneyi ve mikroyapı incelemelerinin sonuçları ve yorumlarına yer verilmiştir. Sonuçlar benzer çalışmalarla kıyaslanmış ve sonraki çalışmalarda yapılabilecek akademik çalışma önerileri eklenmiştir.

A. Mekanik Testler

1. Sertlik Testi Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde farklı değerlerdeki lazer gücünün kaynak yapılmış malzemenin sertliğine etkisi incelenmiş ve sertlik testi sonuçları Çizelge 9’ da verilmiştir.

Çizelge 9. Sertlik değeri sonuçları

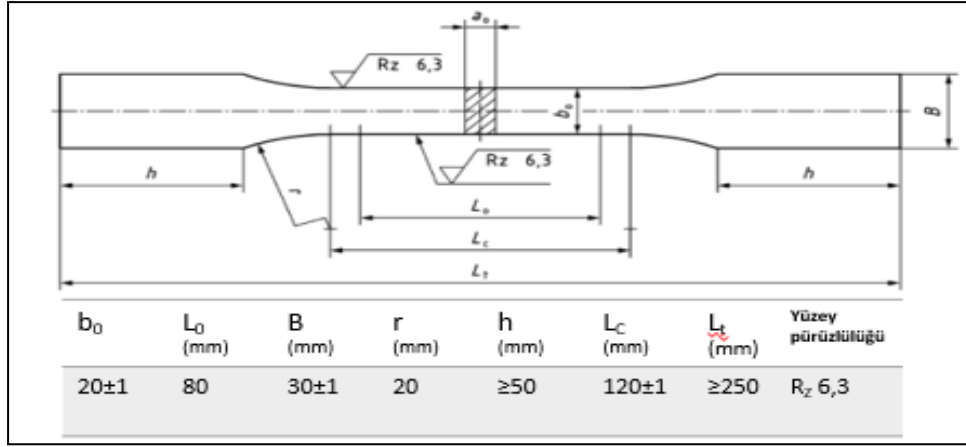
Lazer Gücü (Watt)	Ana Metal (HV)	Kaynağa Yakın Bölge (HV)	Kaynak Bölgesi (HV)
900	171,7	190,8	214,2
1100	170,8	201,2	245,5
1250	172	210,1	247,2
1350	171,2	225,7	267,5
1450	173	232,8	277,6

Ana metal, kaynağa yakın bölge ve kaynak bölgelerinden oda sıcaklığında alınan ölçümlerle oluşturulan kaynaklı test numunelerinin metal sertlik dağılımı, mikro sertlik ölçümü (HV) ile belirlenmiştir. Çizelge 9’da görüldüğü gibi, farklı lazerler ile elde edilen kombinasyonlarda ana metal bölgesindeki sertlik değişimi aynı seviyededir. Kaynağa yakın bölge ile ana metal karşılaştırıldığında sertlik değeri kaynak bölgesine yaklaştıkça artmaktadır. Malzeme üzerinden alınan

ölçümlerde en yüksek değere kaynak bölgesinde ulaşılmıştır. Buradan yola çıkılarak, kaynaklama operasyonu ve güç etkisi arttıkça malzeme sertleşme eğilimi göstermektedir. Bunun temel sebeplerinden birisi olarak artan ısı girişi soğuma hızını düşüreceğinden malzeme içerisindeki sert fazlar artmasıdır. Benzer çalışmada Çakmakaya ve arkadaşları farklı hızlarda ve farklı güçlerde numuneler kaynaklamış sertlik ve güç artışının paralel trend göstermesini soğuma hızı kaynaklı faz oluşumlarıyla ilişkilendirmişlerdir (Çakmakaya 2016). Kaynaklama operasyonu sonrası gücün etkisiyle kaynak güç faktörünün 900 W'dan 1450 W'a yükselişle sertlik paralel olarak artış gösterir. Güç değerindeki artış sertlik değerine yükseltici yönde etki yapmıştır. Uzun ve Keleş kaynak parametreleri üzerine yaptıkları çalışmada, lazer gücü artışının birleşme sonrası malzeme sertliğini artırdığını tespit etmiştir (Mustafa; T. Uğur Ç. 2009). Durgutlu ve arkadaşları benzer çalışmalarında kaynaklanan parçada artan sertlik değerinin çekme dayanımı değerlerini artırıcı etki yaptığını doğrulamışlardır (Durgutlu, ve ark. 2015). Ertem ise yaptığı çalışmada, güç değerlerini değiştirerek farklı bölgelerden sertlik ölçümü almış en yüksek değeri kaynak bölgesinden almış ve kaynaklamanın sertlik değerini artırdığını raporlamıştır (Taşkin. Çalgulu. Kolukisa. 2019) Böylece çalışmamızda güç etkisinin tanımlanan bir güç değerinin diğer bir güç değeriyle, bağlantı noktasının kırılma/kopma riskinin incelenmesinde karar verici bir parametre olarak kullanılmıştır. Sertlik değerinin artışı bağlantının kırılma/kopma riskini artıracığından değerlendirmeye alınan bir parametre olacaktır.

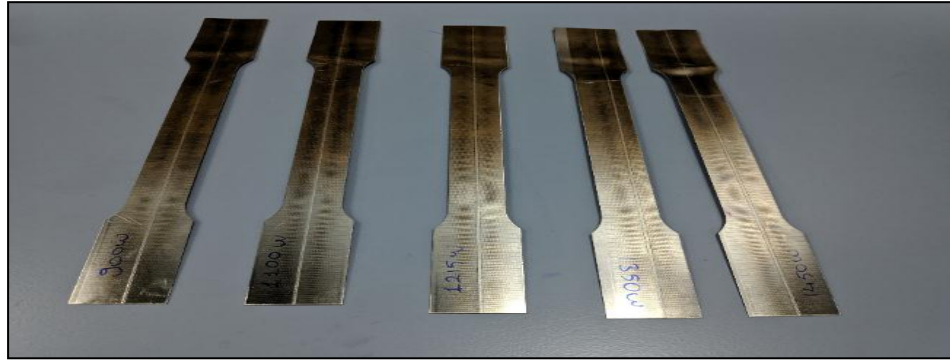
2. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testlerinde kullanılmak için her güç değerinden üçer adet olmak üzere beş farklı güç değerinden toplamda 15 adet numune üretilmiştir. Çekme testi numunesi temsili görseli Şekil 54' te, gerçek parçaların görüntüsü Şekil 55' te, Şekil 56'da ise numunenin çekme testi öncesi ve sonrasında görüntüsüne yer verilmiştir. Test sonuçlarını değerlendirme üç testin ortalaması baz alınmıştır.

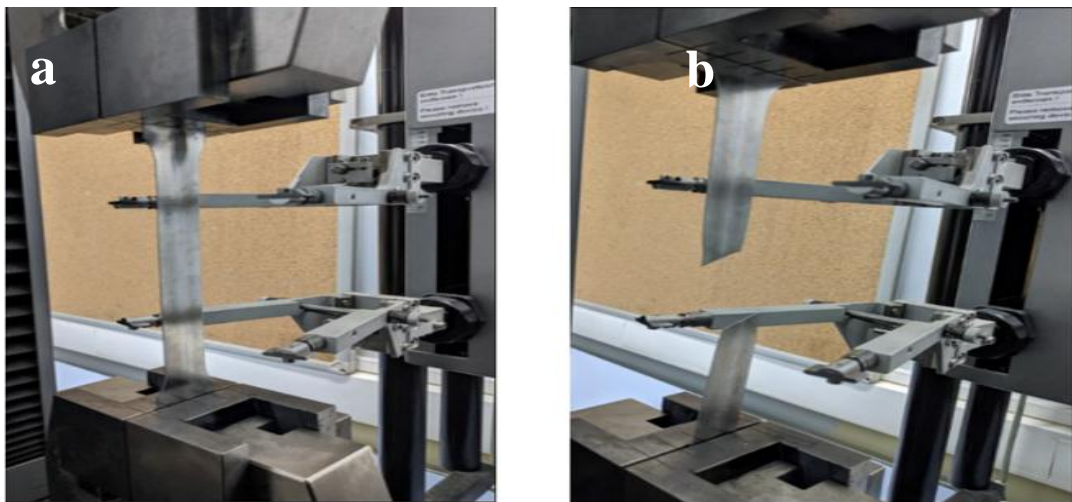


Şekil 54. Çekme testi numunesi

Kaynak: (Mercan. 2019)



Şekil 55. Farklı güçlerden alınan çekme testi numuneleri



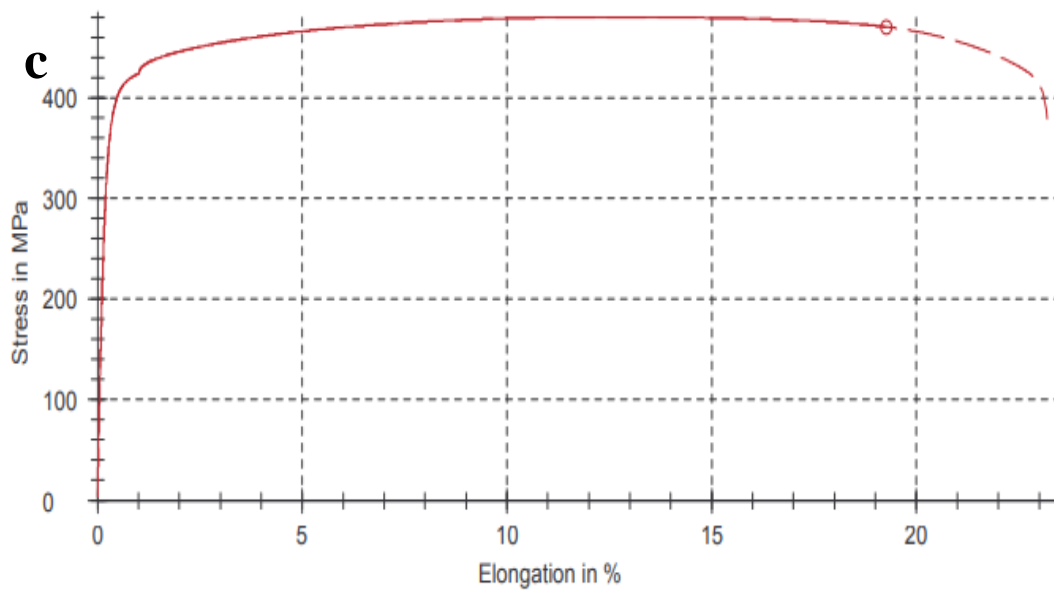
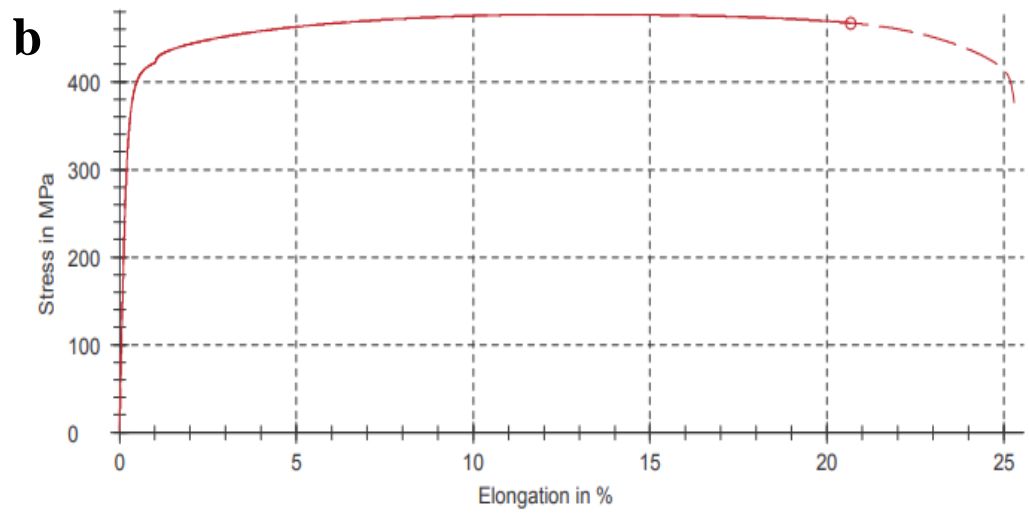
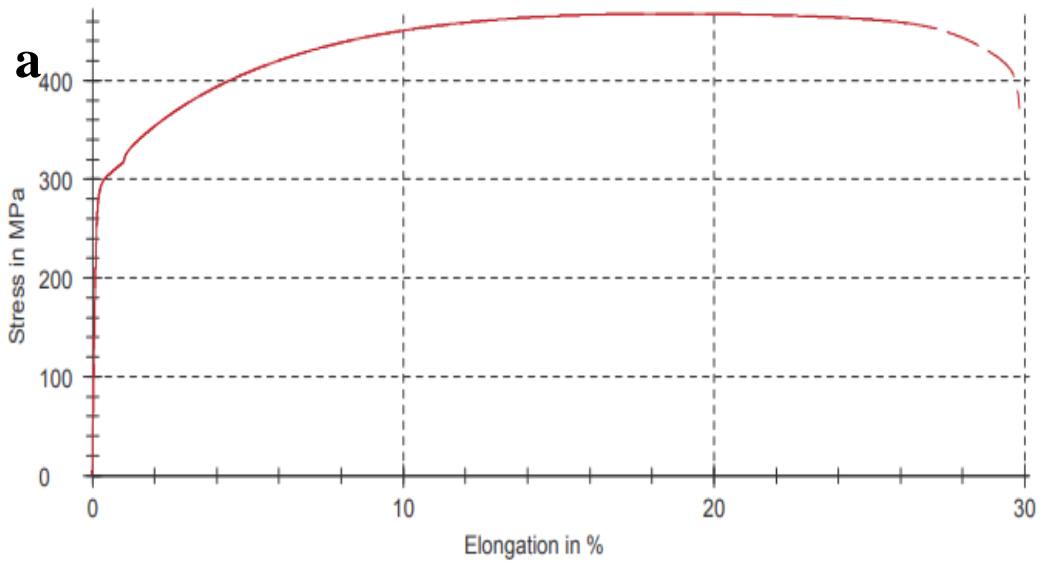
Şekil 56. Çekme testi cihazına bağlanmış numune (a) Çekme cihazına monte edilmiş numune, (b) Kopma sonrası numune görüntüsü

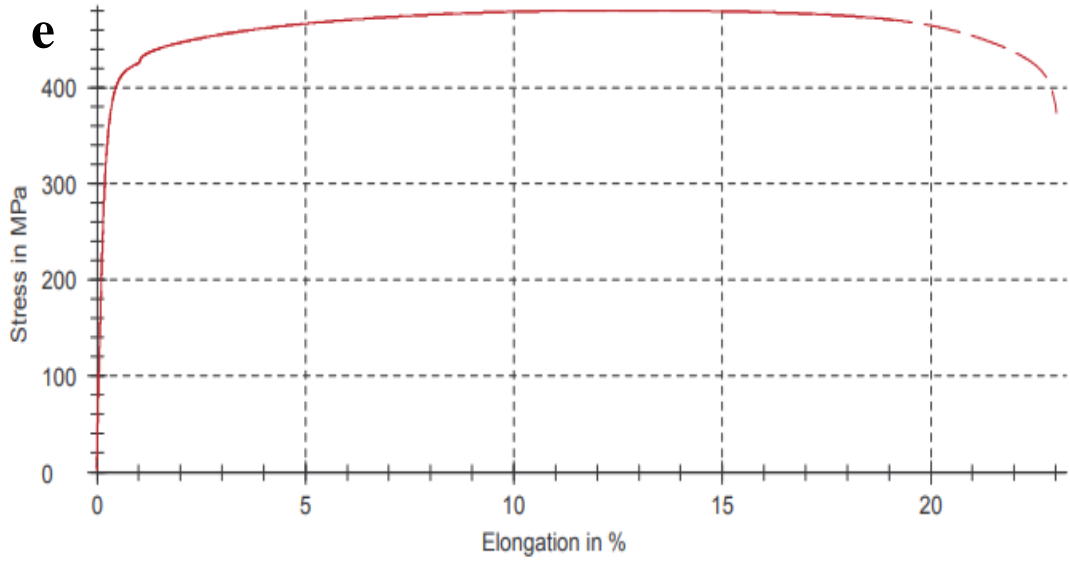
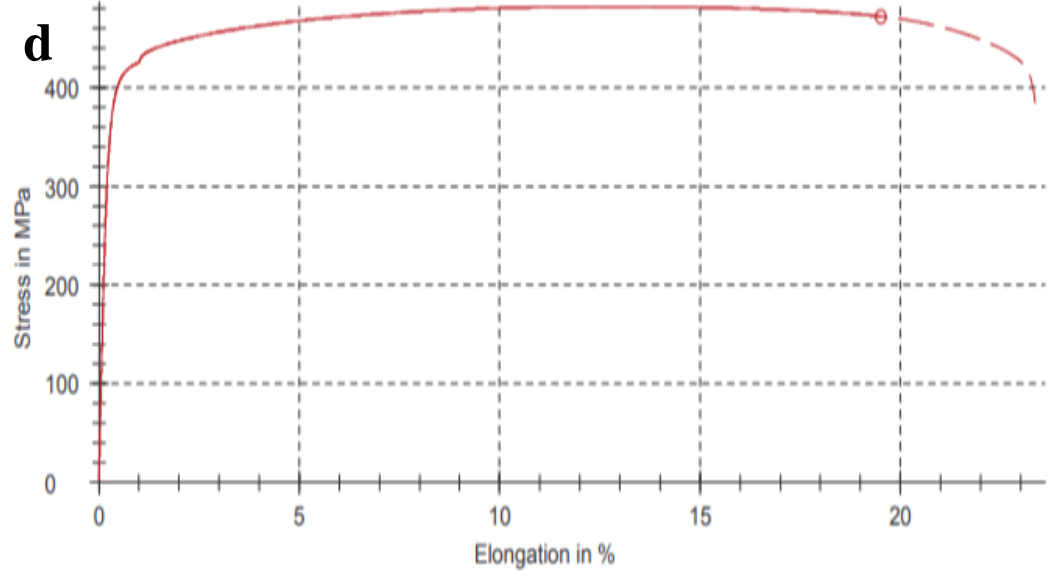
Çekme deneyi sonuçları Çizelge 10’ da gösterilmektedir. Çekme deneylerinde hataları minimize etmek için her güç değerinden üçer adet numune test edilmiş ve değerler ortalamalara göre yorumlanmıştır. Burada m_E elastisite modülü, $R_{p0.2}$ akma dayanımı, R_m çekme dayanımı, F_m maksimum kuvvet, A_G çekme uzaması, R_B kopma dayanımı, A_{80mm} kopma uzamasını temsil etmektedir.

Çizelge 10. Çekme testi sonuçları

Güç (W)	Numune No	m_E (GPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	F_m (kN)	A_G (%)	R_B (MPa)	A_{80mm} (%)
900	1	106	292	350,3	5,7	12,9	274	24,9
900	2	110	279	422,4	5,9	17,2	334	28,5
900	3	140	274	425,7	5,7	14,7	335	29,4
1100	1	152	359	435,6	5,7	12,2	345	22,7
1100	2	158	357	453,1	5,9	11,9	350	23,9
1100	3	158	362	458,1	5,9	12,2	347	23,7
1250	1	149	364	441,3	5,7	12,6	357	25,1
1250	2	163	365	463,5	6	12,5	365	23,9
1250	3	165	368	465,9	5,9	12,0	366	23,4
1350	1	170	402	489,5	5,7	12,8	386	25,3
1350	2	190	405	490,6	6	12,2	385	23,8
1350	3	183	409	494,6	5,9	11,9	392	24,4
1450	1	107	293	350,9	5,6	12,9	275	25,2
1450	2	140	320	380,2	6,1	12,1	335	24,9
1450	3	143	325	385,3	6,1	12,1	345	24,5

Çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 57 de verilmiştir.





Şekil 57. Farklı güçlere ait çekme testi sonuç grafikleri (a) 900W, (b) 1100W, (c) 1250W, (d) 1350W, (e) 1450W

Çekme testi sonuçları yorumlanıyorken dört temel değere odaklanılmıştır. Bu değerler $R_{p0.2}$, R_m , R_B ve A_{80mm} 'dir.

Lazer güç değeri 900 W'dan 1350W'a giderken $R_{p0.2}$ değerinde düzenli bir artış vardır. Ancak aynı parametrenin 1450 W' a geldiğinde ani şekilde düşüşe uğradığı görülmüştür. Benzer bir çalışmada Uyguntürk ve arkadaşları, farklı lazer kaynak güçlerine sahip titanyum alaşımli numuneler üretmiş, çekme testleri

uygulamış ve lazer gücü artış trendiyle $R_{p0.2}$ ve R_B değerlerinin arttığını bildirmişlerdir.

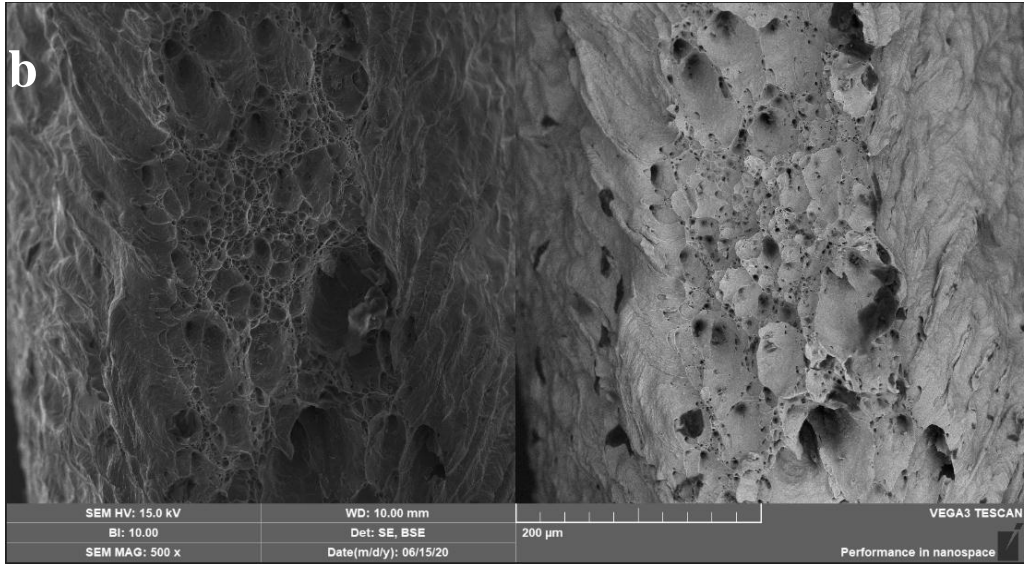
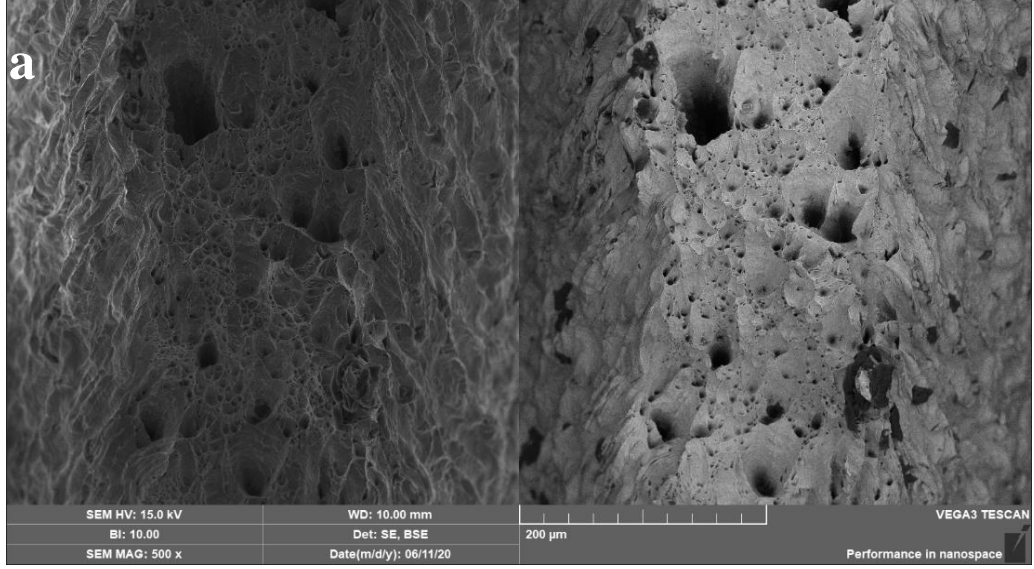
R_m yükselişi, malzemenin deformasyona direncini ifade ettiği için kaynak yapılmış bağlantı dayanımının güç artışıyla yükseldiğini gösterir. Sonuçlardaki gözlemler R_m değeri davranışının buna benzer olduğunu, değer artan güç parametresi ile arttığı ancak 1450 W değerinde ani bir düşüş eğilimi gösterdiği görülmüştür. Kaynak bağlantısının daha yüksek güç kullanılarak kaynaklanmasının, dayanımı belirli bir değere kadar doğrudan etkilediği görülmektedir. Benzer bir çalışmada Akkurt ve arkadaşlarının elde ettiği bulgular, lazer gücünün artışıyla ısı girişinin arttığını, bunun belirli bir süre sonra R_m değerine negatif etki ettiği yönünde olmuştur (Işık, 2013). Kökey ve arkadaşları benzer araştırmalarında, lazer gücü ve R_m arasındaki pozitif ilişkiyi doğrulamışlardır (Kose, Kacar. 2015). Artan güç ile beraber birim alana düşen ısı artışı kaynaklı nüfuziyet artmış ve dayanım değerleri artan eğilim göstermiştir. Benzer çalışmada Ertem, kaynak gücünü azaltarak yaptığı çalışmada azalan güç ile birlikte nüfuziyetin düştüğünü istenilen mukavemete ulaşamadığını raporlamıştır (Taşkin. Çalgulu. Kolukisa. 2019).

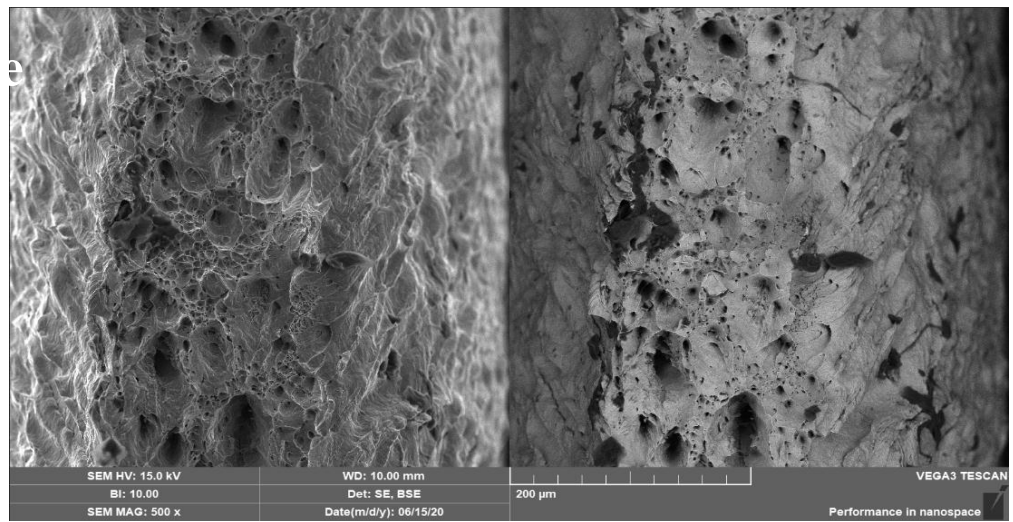
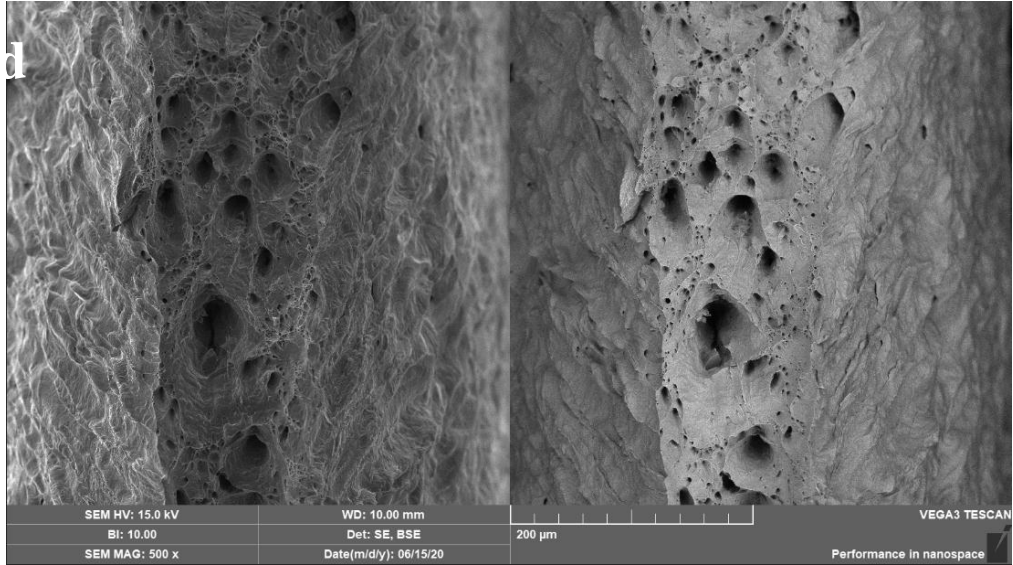
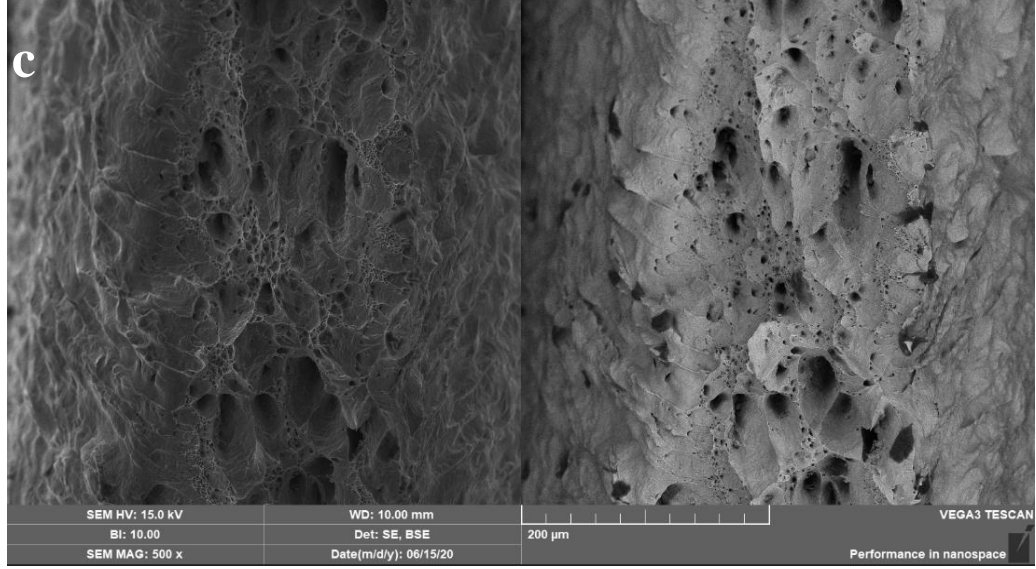
R_B diğer kritik iki parametreye benzer davranış göstermiştir. Kopma mukavemeti, artan güç parametresiyle artış yönünde doğrusal bir trend halinde iken buna karşın 1450 W değerinde ani bir düşüş yaşanmıştır. Artan güç değeri malzemeye gönderilen ısı değerini artırmakta ve artan ısı, malzeme molekülleri arasındaki bağı kalıcı olarak hasara uğratmaktadır. Buna bağlı artan güç seviyesi malzemenin daha iyi ergimesini sağlayarak birleşmeyi güçlendirirken, belli bir noktadan sonra aşırı ergimeye bağlı olarak dayanım değerinde düşüş görülmüştür. Yüce lazer kaynağının mukavemete etkisini incelediği çalışmada ısı girdisinin artışıyla ergiyik havuzunun genişlik ve derinliğinin artacağını buna bağlı olarak malzeme mekanik dayanımının düşeceğini raporlamıştır (Yüce. 2018).

A_{80mm} değerleri incelendiğinde farklı güç değerlerinde farklı değerler görülmektedir. Artan güç parametresi kopma uzaması değerine yükseliş yönünde etki etmiştir. Artan güç parametresi malzemenin sertliğini artırdığından kopma uzaması değerinde düşüş beklenmektedir. Fakat deney sonuçlarında bu trend net olarak gözlemlenememiştir.

3. Hasar Analizi Sonuçları

Hasar analizlerinde kırık yüzey topografisi ve hasar modu analizi için sekonder (ikincil) elektron dedektörü, kırık yüzeyde herhangi bir safsızlığın olup olmadığını kontrolü için back-scattered (geri saçılan) elektron dedektörü kullanılmıştır. 5 farklı güç değeri için çekme testlerinin ardından, kopma yüzeylerinden alınan görüntüler Şekil 58’de verilmiştir.



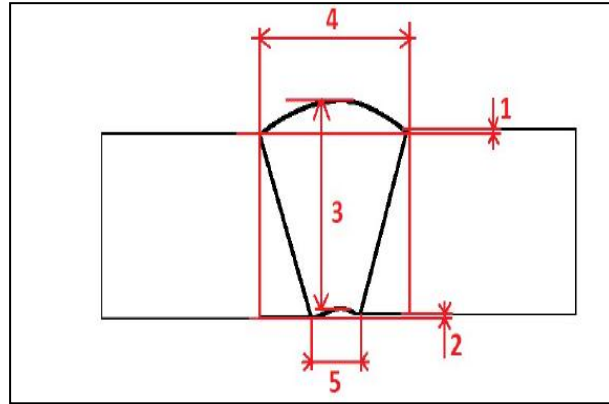


Şekil 58. Farklı güçlere ait kopma yüzeyi görüntüleri (a) 900W, (b) 1100W, (c) 1250W, (d) 1350W, (e) 1450W

Görüntüler incelendiğinde, çekme testi sonuçlarından yola çıkarak akma mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin 1350 W' a kadar çok yakın ve doğrusal olarak arttığı, sonrasında artan sıcaklık etkisiyle oluşan termal artık gerilmelere bağlı olarak azaldığı anlaşılmaktadır. Şekil 58' deki numunelerin kırık yüzey hasar analizi incelendiğinde, sünek-kırılgan geçişi gösteren çukur şeklindeki yüzey morfolojisi görülmektedir. Kopma anları kırılma bir yapıda meydana gelmiştir. Numune yüzeyleri, tanecik içi ayrılmalar ve mat çukurlarda parlak görülen kırılmalar, kırığın sünek kırılma kırılma geçişi şeklinde oluştuğunu kanıtlar.

B. Mikroyapı Analizleri

Mikroyapı ölçümlerinde kullanılacak ölçüm şemasının gösterimi Şekil 59' de verilmiştir. Mikroyapıya ait görüntülerde 5 farklı güç değerinin ölçümlerinde her değer için 5 bölgeden ölçüm değeri alınmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 11' de gösterilmiştir.



Şekil 59. Kaynak bölgesi mikroyapısı

Çizelge 11. Mikroyapı ölçüm değerleri

Güç (Watt)	Alan 1	Alan 2	Alan 3	Alan 4	Alan 5
900	21,166 μm	14,888 μm	255,170 μm	790,939 μm	247,252 μm
1100	8,427 μm	7,165 μm	601,623 μm	925,365 μm	381,604 μm
1250	7,527 μm	9,413 μm	600,124 μm	963,469 μm	391,712 μm
1350	10,459 μm	11,969 μm	659,206 μm	860,059 μm	487,067 μm
1450	13,981 μm	7,415 μm	623,352 μm	961,745 μm	455,791 μm

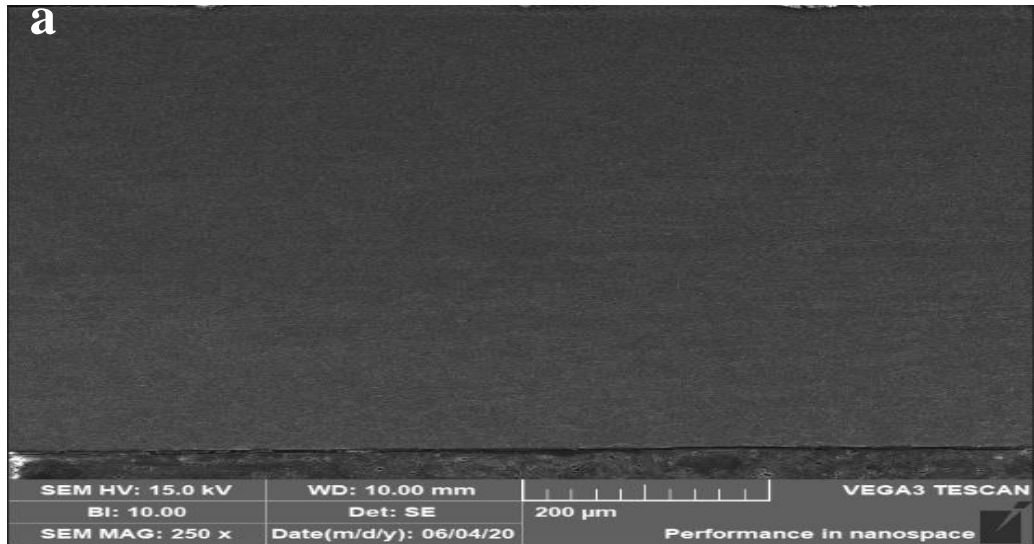
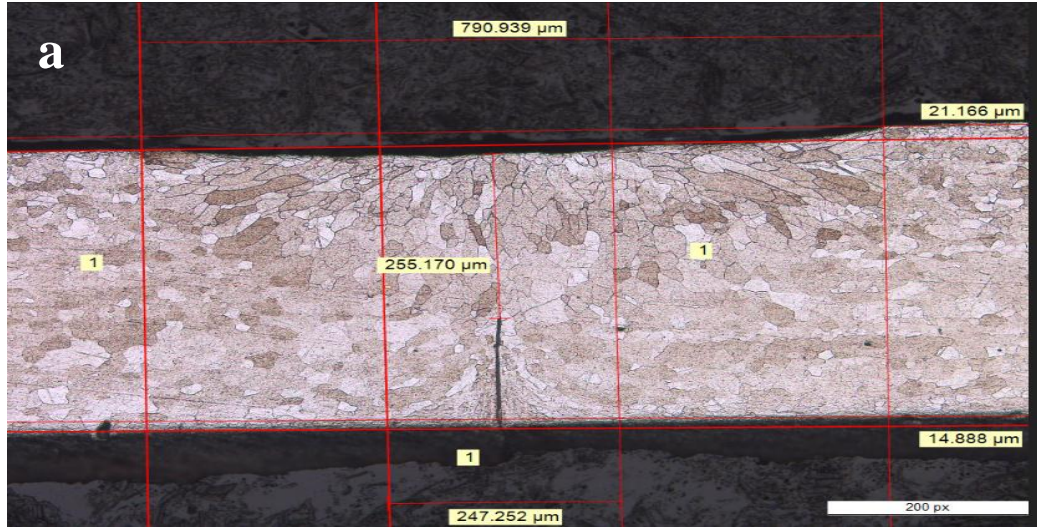
Test numuneleri bakalite alınmadan önce göz ile incelenmiş kaynak süreksizliği, gaz boşluğu, çatlak veya renk değişikliği problemleriyle karşılaşılmamıştır.

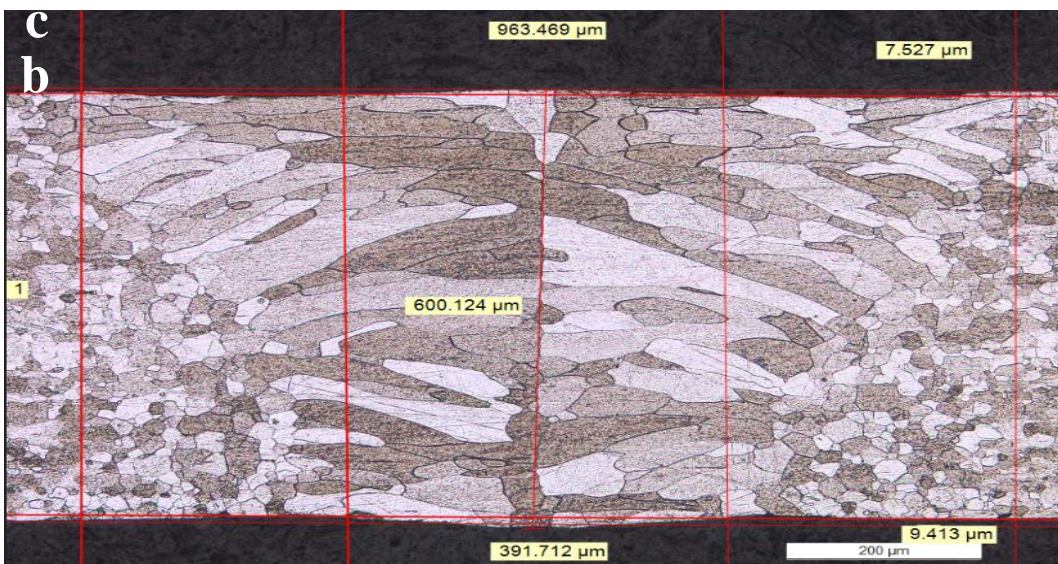
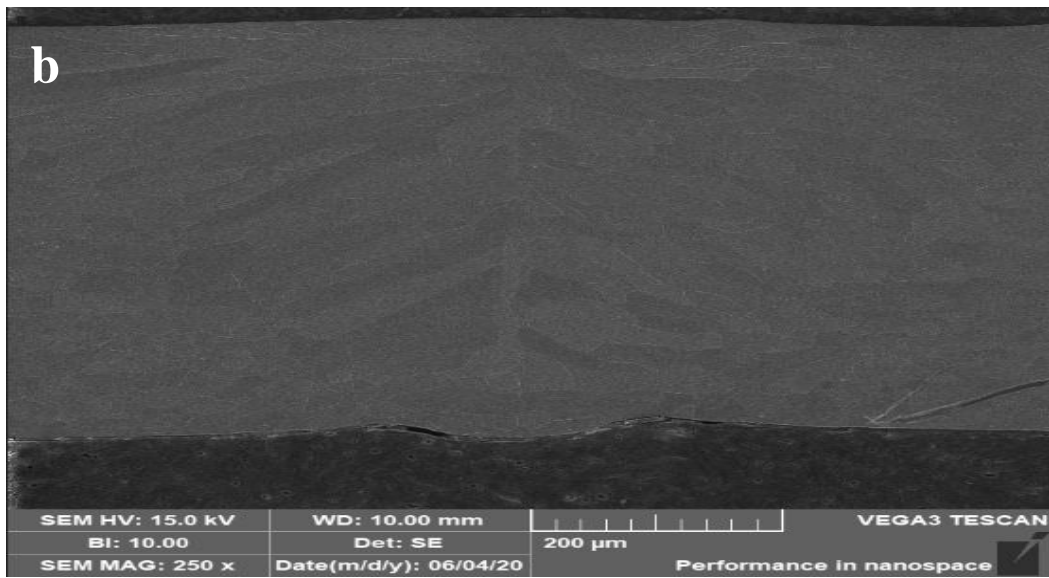
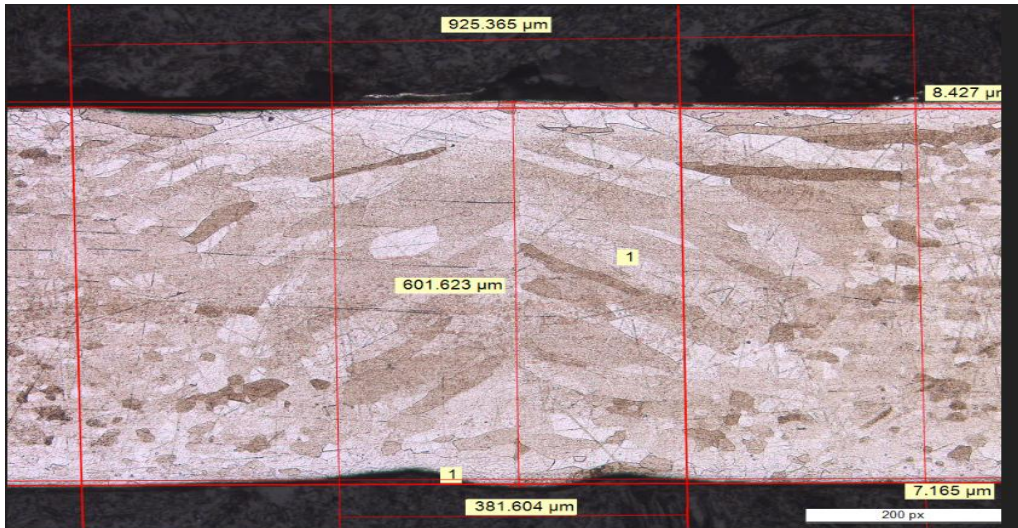
Ancak farklı lazer güç değerleri, aynı koşullarda üretilen numunelerin mikroyapısı üzerinde farklı etkiler göstermiştir. Şekil 60' da verilen mikroyapı görsellerinde 900 W numunenin birleşme bölgesinde, sac derinliğinin tamamına ulaşmak için yeterli penetrasyonun gerçekleşmediği görülmektedir. Düşük güç yetersiz erimeye sebep olduğundan iki tabaka arasında tam bağlantıya ulaşılamamıştır. Uyguntürk ve arkadaşları tarafından bildirilen benzer konuyla ilgili makalede, düşük lazer gücündeki birleşmelerde iki metali birleştirmek için yeterli penetrasyon derinliğine ulaşılamayacağı raporlanmıştır Ertem tarafından yapılan, lazer kaynak parametre değişkenliklerinin kaynak dikişi üzerine etkisinin incelendiği çalışmada, diğer parametrelerin sabit tutulup gücün düşürülmesinin penetrasyon derinliğinin düşeceğini ve ısı girdisinin azalmasına bağlı olarak yeterli erimenin gerçekleşmeyeceğini bildirilmiştir (Taşkin. Çalgulu. Kolukisa. 2019).

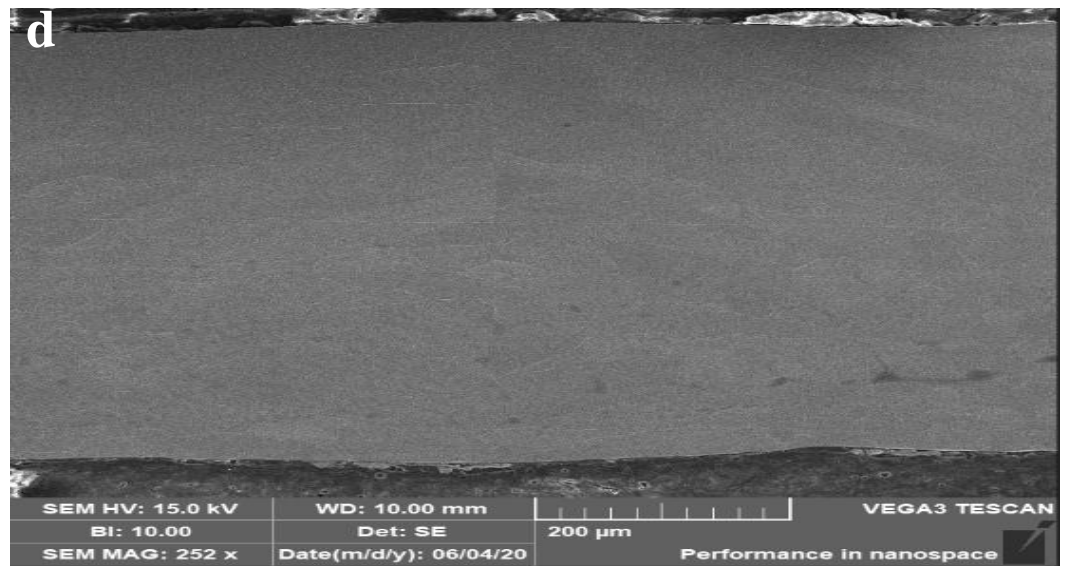
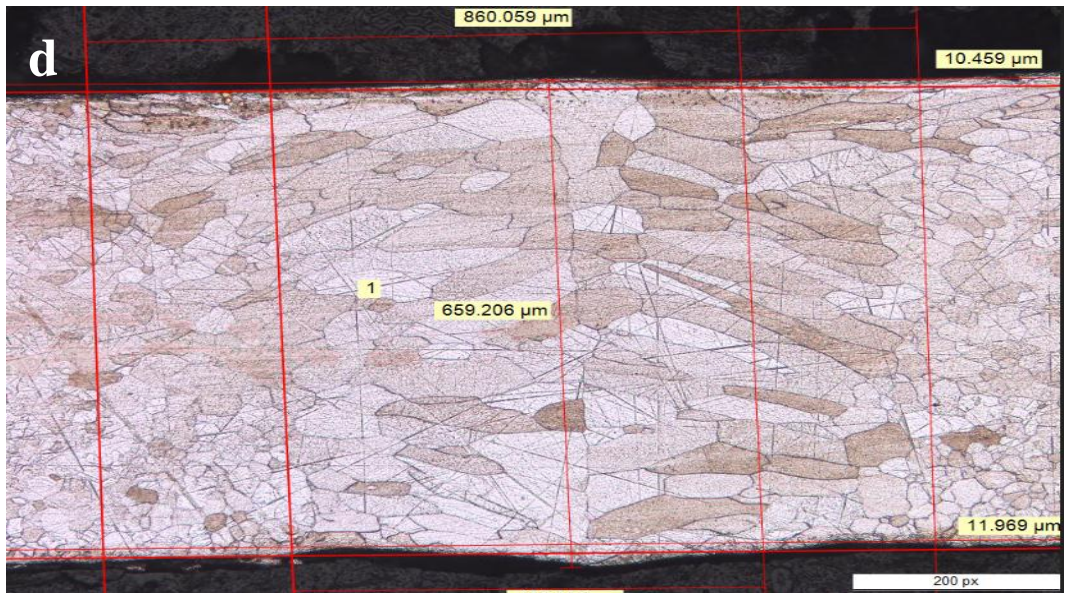
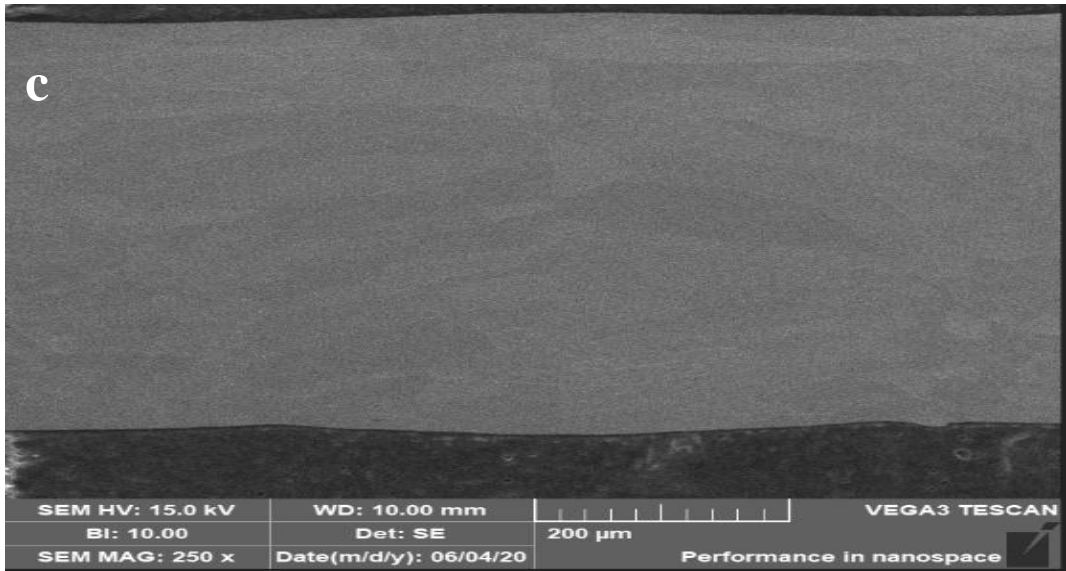
1100 W numune incelemelerinde penetrasyon bölgesi V yapısının oluştuğu fakat kabadan ince taneli yapıya geçişin tam olarak gerçekleşmediği tespit edilmiştir. İki yapı arasındaki ayrım kolayca tespit edilebilmekte ve buna ek olarak V yapısının kaynak bölgesi alt kısmına ulaşamadığı ve bu yönde lazer gücü etkisinin azalması da beklenmektedir. 1250 W'lık numunede ise kaba taneler oluşumu net şekilde fark edilmekte, ince tanelerden kaba tanelere geçiş kısmen keskin şekilde gerçekleşmektedir. Buna ek olarak iki sacın birleşme çizigisi açıkça görülebilir durumdadır. Kaba taneli yapılar 1350 W'da tam dağılım gösterir. Kaba tanelerden ince tanelere geçiş kontrollü şekilde gerçekleşmiştir. Kaynağın üst ve alt taraflarındaki yükseklik farkı (Alan 1 ve 2) ortalama seviyededir. Kaynak bölgesinin derinliği (Alan 3), diğer örneklere kıyasla en derin nüfuziyet alanına ulaşmıştır. Kaynağın üst alanı (Alan 4), diğer örneklerden daha az yayılmışken, alt alanın daha geniş olduğu görülmektedir. Bu bize penetrasyon alanının üst ve alt bölgede istenen duruma yakın dağıldığını göstermektedir. Ayrıca, mikroyapıda yanık izleri bulunmamıştır. Köse ve Karaca tarafından hazırlanan bir çalışmada, lazer kaynak gücü artarken aynı zamanda

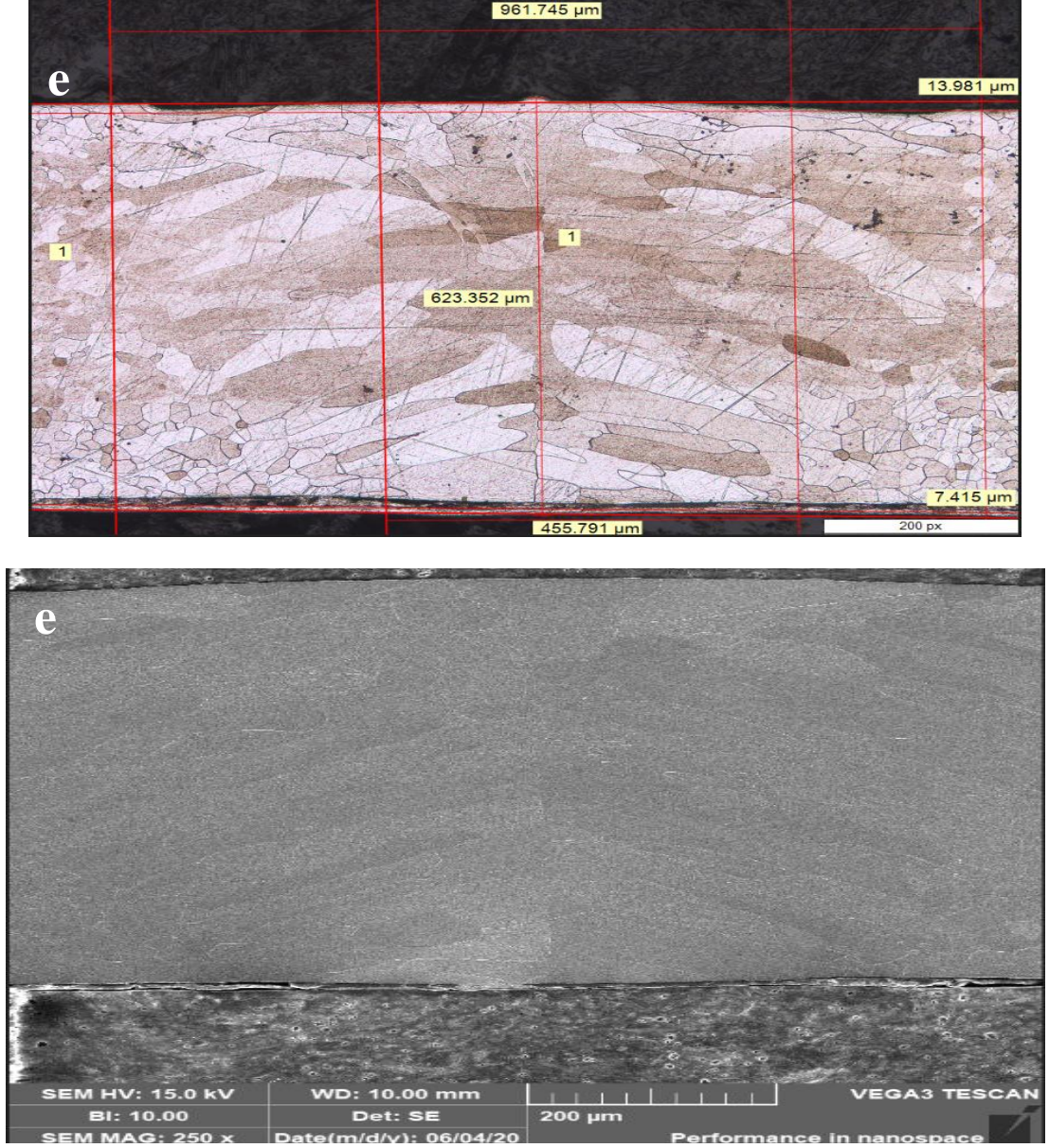
ısının arttığı, ısıl girdiye bağlı olarak ısıl işlem etkisinin arttığı ve kaba tanecik oluşumunun görüldüğü raporlanmıştır (Sezer. 2019).

1450 W'lık numunede farklılaşan yapı gözlenmiştir. Kaba taneli yapıların kontrolsüz büyüdüğü görülmektedir. İnce taneli yapıdan kaba taneliye geçiş aşaması, homojen şekilde yayılmamıştır. Kaynak nüfuziyet bölgesinin V yapısına dönüştüğü, erimiş bölgenin alt bölgede daraldığı görülmektedir. Mikroyapı görüntüsü incelendiğinde ısıya bağlı deformasyonlar kaynaklı, belirgin yanıklar olduğu tespit edilmiştir. Köse ve Kaçar, yaptığı çalışmada ısı girdisinin fazla olduğu alanlarda kalıntı gerilimlerin fazlalaşarak dayanımın azaldığını raporlamışlardır (Ceyhun, Kaçar. 2015).









Şekil 60. Farklı güçlere ait mikroyapı ve SEM görüntüleri (a) 900W, (b) 1100W, (c) 1250W, (d) 1350W, (e) 1450W

C. Genel Sonuçlar ve Öneriler

Metal endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahip olan titanyum alaşımlarının lazer kaynağı ile kombinasyonunun başarılı olduğu sonucu tez içerisindeki numune üretimlerinde ve yapılan testlerde doğrulanmıştır. Bu çalışmada, farklı değerlerdeki lazer kaynak gücünün titanyum alaşımlı test numunelerinin mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada farklı güç değerlerinde üretilen numunelere mekanik ve mikroyapısal testler uygulanmış,

veriler mikroskop ve SEM cihazı ile görüntülenmiş ve değerler çizelge haline getirilip yorumlanmıştır.

Öncelikle numuneler üzerinde testler öncesi gaz boşluğu, çatlak oluşumu incelenmiş herhangi bir soruna rastlanmamıştır. Mekanik testler kapsamında sertlik testi, çekme testi ve hasar analizleri yapılmıştır. Bu testler kapsamında oluşan değerler incelendiğinde artan güç değerinin malzeme sertliğini artırdığı görülmüştür. Lazer güç değerinin artışı çekme testi sonuçlarına göre akma, çekme ve kopma dayanımına pozitif yönde etki yapmıştır. 900 W ile artış gösteren değerler 1450 W değerinde ani düşüş göstermiştir. Artan güç değerinin malzemeye aktardığı ısı miktarını artırdığı, ergime etkisiyle numune dayanımının düştüğü raporlanmıştır. Hasar analizi sonuçlarında tane içi ayrılmaları ve çukurlarda görülen kırılmalar, kırığın sünek kırılğan şeklinde oluştuğunu kanıtlamaktadır.

Mikroyapı incelemeleri için numunelere bakalite çıkarma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan numuneler mikroskop incelemelerine tabi tutulmuştur. 900W test örneğinde lazer kaynak alanınında tamamlanmış penetrasyon derinliği görülmemiştir. 1350 W test numunesi kendisinden daha düşük ve daha yüksek güç değerleri ile karşılaştırıldığında, çekme testlerinde daha fazla mukavemet göstermiştir. Ayrıca kaynak nüfuziyeti 1350 W değerinde en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Mikroyapı, lazer gücüyle beraber artan ısı etkisinden doğrudan etkilenmiş ve kaba taneler gözlemlenmiştir. Güç eğiliminin belirli bir noktadan sonra düştüğü kanıtlanmıştır.

Lazer kaynak işlemlerinin günümüz şartlarında çokça uygulama alanı olsa da yayılımı hızla devam etmektedir. Kullanım alanı gittikçe yayılan uygulamayla ilgili ileride yapılacak araştırmalar için atılacak adımlar, kaynak hızı, odak noktası ve birbirleri arasındaki ilişki ve bu kritik parametrelerinin kaynak dikişi üzerindeki etkileri araştırılabilir.

VII. KAYNAKÇA

DERGİLER

A. AKKURT, Ş. AYDIN, İ. OVALI, (2012) **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**. 18, 37-45

ARABACI, U. ÇİMEN, M.Y (2007) Gazi Üniversitesi **Fen Bilimleri Dergisi** Part C: Tasarım ve Teknoloji. 7, 927-937

CEYHUN, K. KARACA, E. (2019) Balıkesir Üniversitesi **Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**. 21, 232-243.

CEYHUN, K., KAÇAR R,(2015) **Kaynak İlerleme Hızının Aisi 316L Paslanmaz Çelik Lazer Kaynaklı Birleştirmelerinin Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi**. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, . 30(2).

DURGUTLU, A., N. KAHRAMAN, and B. GÜLENÇ, (2015) **Al-Si Alaşımının TİG Kaynağında Darbeli Akımın Mikroyapı, Sertlik, Eğme ve Çekme Dayanımına Etkisi**. Politeknik Dergisi, 2008. 11(4).

KORKMAZ, M.E. (2019). Düzce Üniversitesi **Bilim ve Teknoloji Dergisi**. 7, 628-639

YILMAZ, R BARLAS, Z.(2011).Pamukkale Üniversitesi **Mühendislik Bilimleri Dergisi**. 11, 391-400

KİTAP

KÖKEY, C. SEZGİN, S. ÇAVUŞOĞLU, N. İRİZALP, S.G. SAKLAKOĞLU, İ.E. (2016) **Mühendis ve Makina**. 57, 65-72.

TEZLER

- AKMAN, E. (2007) **Ti6Al4V titanyum alaşımlarının atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi**, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ARSLAN, S. (2018.) **AISI 430 paslanmaz çeliklerin V bükme işleminde ileri ve geri yaylanmanın deneysel olarak incelenmesi**, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- ÇELEN, S. (2006) **Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, 9 Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- İŞİK H. (2013) **Robotik Fiber Lazer İle Kaynak Prosesi Tasarımı Ve Parametrelerinin Optimizasyonu**, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul
- KÖSE, C KARACA E (2017) **ti6al4v Alaşımının Fiber Lazer Kaynak Kabiliyeti** 1308 7223 Gaziosmanpaşa University, Tokat
- ÖZCAN, M. TARAKCIOĞLU, N. KAHRAMANLI Ş. (2004) **Saç Malzemelerin Lazer Kaynak Parametreleri** Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu C. 3, S:1-2004
- SEZER S. (2019) **Titanyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi** Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek lisans tezi
- YÜCE, C., (2018) **Yüksek Mukavemetli Çelikler İle Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağı İle Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Bağlantı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi**. Bursa Uludağ Üniversitesi Doktora Tezi 45-65

MAKALELER

- AYDIN, K. KARAAĞAÇ, İ (2010) El-Cezeri **Journal of Science and Engineering**. 5, 693-705

- ÇAKMAKKAYA, M. (2016) **Lazer Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Farklı Tür Çeliklerin Kaynak Dikiş Geometrisi ve Nüfuziyetine Kaynak Parametrelerinin Etkisi.** Journal of Materials and Mechatronics: A. 1(1): p. 1-11.
- CUNAT, P.-J. DAVIDSON, J.H. (1991) C.d.d.d.T.d. France, **Working with Stainless Steels: A Manual for Craftsmen and Technicians**, SIRPE Editeur1991.
- ERTEM R.U., (2013). Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi **Paslanmaz Çeliklerde Lazer Kaynak Parametre Değişimlerinin Dikiş, Geometrisine Etkisinin İncelenmesi** Araştırma makalesi, Bursa
- KAYA Y. (2010) **Aisi 304 Ve Aisi 430 Paslanmaz Çeliklerin Tig, Mig Ve Örtülü Elektrod Ark Kaynağıyla Birleştirilebilirliğinin Araştırılması** Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der Cilt 25, No 3, 549-557,
- KAYA, Y. KAHRAMAN, N. (2011) Journal of Polytechnic. **Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Çekirdek Oluşumuna Etkisi** 14, 263-270 (2011).
- KOSE, C. KACAR, R (2015) **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture** of Gazi University. 30, 225-235 (2015).
- MERCAN S. (2019) **Kaynak Bağlantılarında Hasar Analizi** International Journal of Innovative Engineering Applications vol. 3, issue 2
- MUSTAFA; T. UĞUR Ç. (2009) **AISI 430/1010 Çelik Çiftinin Lazer Kaynağında Kaynak Gücünün Birleşmeye Etkisi.** Fırat Üniversitesi Mühendislik Dergisi. Cilt. 21 Sayı 1, s11-22. 12p
- PÜSKÜLCÜ, G. KOÇULULAR, F. (2009) **Lazer Kaynak Yöntemi Ve Uygulamaları.** Engineer & the Machinery Magazine. Aralık 2009, Sayı 599, s8-17. 10p
- TAŞKIN M. ÇALGULU U. KOLUKISA S. (2019) **Kaynak Hızının AISI 430 Ferritik Paslanmaz — AISI 1010 Düşük Karbonlu Çeliğin Lazer Kaynağına Etkisi** Sayfalar: 598-608

UYGUNTÜRK, E. (2020) Titanyum Boruların Tig Ve Lazer Kaynak Yöntemleri
İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Makalesi

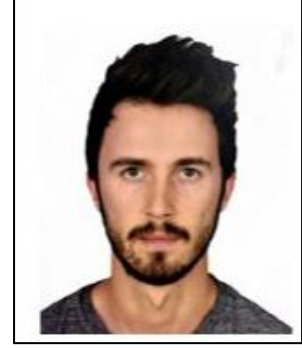
YAVUZ H, ÇAM G. (2015) Lazer-Ark Hibrit Kaynak Yöntemi Mühendis ve
Makina - Cilt: 46 Sayı: 543

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Koray GÜLER

Doğum Tarihi ve Yeri: 02.01.1991 / Silivri

E-posta : kry.glr@hotmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2020, İstanbul Aydın Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- **Şişecam Otomotiv Fabrikası A.Ş.** : 2015-2016, Kalite Mühendisliği
- **Şişecam Otomotiv Fabrikası A.Ş.** : 2016-2017, Üretim Mühendisliği
- **Bosch Siemens Ev Aletleri A.Ş.** : 2017-Halen, Üretim Mühendisliği