



**TİTANYUM BORULARIN TIG VE LAZER  
KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE  
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**2020  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Erkan UYGUNTÜRK**

**TİTANYUM BORULARIN TIG VE LAZER KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE  
BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Erkan UYGUNTÜRK**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Ocak 2020**

Erkan UYGUNTÜRK tarafından hazırlanan “TİTANYUM BORULARIN TIG VE LAZER KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

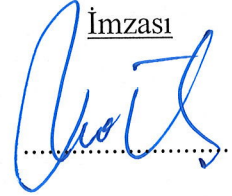
Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN  
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 18/01/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Prof. Dr. Behçet GÜLENC (GÜ)

İmzası  


Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)



...../...../2020

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Erkan UYGUNTÜRK

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **TİTANYUM BORULARIN TIG VE LAZER KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Erkan UYGUNTÜRK**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**Ocak 2020, 95 sayfa**

Bu çalışmanın amacı titanyum boruların farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilebilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaç ile titanyum borular hem TIG kaynağı hem de lazer ışın kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Kaynak işlemleri esnasında diğer bütün değişkenler sabit olmak üzere TIG kaynağı üç farklı kaynak akımı (45, 55 ve 65 A), lazer ışın kaynağında ise üç farklı lazer ışın gücü (130, 140 ve 160 W) kullanılmıştır. Her iki kaynak yönteminde de ilave metal kullanılmış ve kaynak işlemleri esnasında boru sabit hızda döndürülerek, torç yatay pozisyonda konumlandırılmıştır. Birleştirme işlemi yapılan titanyum borulara kaynak işlemi sonunda kaynak kalitesini ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, gözle muayene, çekme testi ve sertlik testi yapılmıştır. Ayrıca içyapıdaki kusurların belirlenmesi için kaynak bölgesinin mikroyapı incelemeleri ile SEM (EDS) çalışmaları yapılmıştır.

Kaynaklı numunelere yapılan göz ile muayene sonucunda TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerde herhangi bir yüzey ve kök hatasına rastlanılmazken, lazer ışın kaynaklı numunelerde kökte kısmi nüfuziyet eksikliği hatasına rastlanılmıştır. Kaynaklı numunelere yapılan çekme testleri sonucunda, TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerde kopma kaynak bölgesi dışında ana malzemedir olmuştur. Lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerde ise düşük lazer gücünde birleştirilen numunelerde kopma kaynak metalinden gerçekleşirken, yüksek lazer gücünde birleştirilen kaynaklı numunede kopma kaynak bölgesi dışından gerçekleşmiştir.

Kaynaklı numunelere yapılan sertlik testleri sonucunda en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde, en düşük sertlik değerleri ise ana malzemede olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapı çalışmalarında ise ana malzemenin küçük eş eksenli tane yapısına sahip olduğu, kaynak metali ve ITAB'ın mikroyapılarının ise daha büyük tanelerden oluştuğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Titanyum, TIG kaynağı, Lazer ışın kaynağı, kaynak metali.

**Bilim Kodu** : 91511

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE JOINABILITY OF TITANIUM PIPES WITH TIG AND LASER WELDING METHODS**

**Erkan UYGUNTÜRK**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**January 2020, 95 pages**

The aim of this study is to investigate the joinability of titanium pipes with different welding methods. For this purpose, titanium pipes are joined with both TIG welding and laser beam welding. Three different welding currents (45, 55 and 65 A) were used for TIG welding and three different laser beam powers (130, 140 and 160 W) were used for the laser beam welding. In both welding methods, filler metal was used and during welding, the pipe was rotated at constant speed and the torch was positioned in horizontal position. In order to determine the welding quality and mechanical properties of the titanium pipes which were subjected to joining process, visual inspection, tensile test and hardness test were performed. In addition, microstructural investigations of the weld zone and SEM (EDS) image analyses were performed to determine the defects in the microstructure.

As a result of visual inspection of welded samples, no surface and root defects were observed in welded samples joined with TIG welding method, while lack of penetration was detected in laser beam welded samples. As a result of tensile tests on welded samples, fracture of the samples joined by TIG welding method was formed on the base material where outside the weld zone. On the other hand, in welded samples joined with laser beam welding, fracture was formed on the welding metal on the samples which were joined at low laser power, whereas at welded sample joined at high laser power, fracture occurs in outside the weld zone.

As a result of the hardness tests on the welded samples, the highest hardness values were taken from the weld metal and the lowest hardness values were taken from the base material. In microstructure studies, it was observed that the main material had a small coaxial grain structure, whereas weld metal and HAZ (heat affected zone) microstructures were composed of larger grains.

**Key Words** : Titanium, TIG welding, Laser beam welding, Weld metal.

**Science Code** : 91511



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının planlanmasında ve yürütülmesinde desteğini ve ilgisini esirgemeyen, DanıŐman Hocam Sayın Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Tez çalıŐmalarım süresince değerli bilgilerini ve önerilerini esirgemeyen çok değerli Hocalarım Prof. Dr. Behçet GÜLENÇ, Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU ve Doç. Dr. Yakup KAYA'ya teşekkür ederim.

TIG kaynağının yapılmasındaki katkı ve desteklerinden dolayı da ÖZ-SAN Sanayi Ticaret Limited Őirketi sahibi Sayın İsa YILMAZ'a ve çalıŐanlarına, Lazer kaynağının yapılmasındaki katkı ve desteklerinden dolayı QUANT lazer kaynak ve teknoloji merkezi sahibi Sayın Murat ÖZDEMİR ve çalıŐanlarına en içten teŐekkürlerimi sunarım.

Son minnet ve teşekkür de bu çalışmada beni hiç yalnız bırakmayan AİLEME. İyi ki varsınız.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
TİTANYUM .....	4
2.1. TİTANYUMUN TARİHÇESİ .....	4
2.2. TİTANYUMUN ÜRETİMİ .....	4
2.3. TİTANYUMUN METAL ÖZELLİKLERİ .....	6
2.4. TİTANYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI .....	7
2.4.1. Ticari Saf Titanyum .....	7
2.4.2. Alfa ( $\alpha$ ) Titanyum Alaşımları .....	8
2.4.3. Alfa-Beta ( $\alpha+\beta$ ) Titanyum Alaşımları .....	9
2.4.4. Beta ( $\beta$ ) Titanyum Alaşımları .....	10
2.5. TİTANYUMUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....	12
2.6. Ti-6Al-4V .....	13
2.7. TİTANYUMUN KULLANIM ALANLARI .....	13
2.7.1. Havacılık Uygulamalarında Titanyum .....	14

## Sayfa

2.7.2. Titanyumun Biyomedikal Uygulamaları .....	15
2.7.3. Titanyumun ve Alaşımlarının Mimarlıkta Kullanımı.....	16
<b>BÖLÜM 3 .....</b>	<b>17</b>
<b>TIG KAYNAĞI.....</b>	<b>17</b>
3.1. TIG KAYNAK TEKNİĞİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ .....	17
3.2. ÇALIŞMA PRENSİBİ .....	18
3.3. TIG KAYNAK TORCU VE ELEMANLARI.....	19
3.4. TIG KAYNAK ELEKTRODLARI.....	20
3.4.1. % 2 Seryum alaşımlı elektrodlar .....	21
3.4.2. % 2 Lantan alaşımlı elektrodlar.....	21
3.4.3. Saf tungsten elektrodlar .....	22
3.4.4. % 2 Toryum alaşımlı elektrodlar.....	22
3.4.5. Zirkonyum alaşımlı elektrodlar .....	23
3.5. ELEKTROD UÇ FORMLARININ NÜFUZİYETE ETKİLERİ .....	23
3.6. KORUYUCU GAZLAR.....	24
3.7. TIG KAYNAK MAKİNALARI.....	26
3.7.1. Jeneratör ve alternatör tipi kaynak makinaları .....	26
3.7.2. Transformator-Redresör tipi kaynak makinaları.....	26
3.7.3. Üç Fazlı Redresör tipi kaynak makinaları.....	27
3.7.4. Transformator tipi kaynak makinaları.....	27
3.8. ORBİTAL TIG KAYNAĞI.....	27
3.8.1. Orbital Kaynak Sistemlerinin Kullanım Nedenleri .....	30
3.9. TIG KAYNAK YÖNTEMİNİN UYGULAMA ALANLARI .....	30
3.10. TİTANYUMUN TIG KAYNAK ÇALIŞMALARINDAN ÖRNEKLER.....	31
<b>BÖLÜM 4 .....</b>	<b>34</b>
<b>LAZER KAYNAĞI.....</b>	<b>34</b>
4.1. KAYNAĞIN TARİHÇESİ .....	34
4.2. LAZER KAYNAĞI TANIMI VE ÖNEMİ .....	35
4.3. LAZERLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	35
4.4. LAZER SİSTEMİNİN TEMEL ELEMANLARI.....	36
4.4.1. Lazer Üreteci (Aktif Madde) .....	37

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.4.2. Pompalama Kaynağı.....	37
4.4.3. Optik Rezonatörler.....	37
4.4.4. Odaklama Optik Elemanları.....	38
4.5. LAZER IŞINININ ÖZELLİKLERİ.....	39
4.6. KAYNAK İŞLEMLERİNDE KULLANILAN LAZERLER.....	40
4.6.1. CO2 Lazeri.....	41
4.6.2. Katı Hal (Nd:YAG) lazeri .....	41
4.7. LAZER KAYNAK YÖNTEMLERİ.....	42
4.7.1. Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı.....	43
4.7.2. İletimsel Lazer Kaynağı.....	44
4.8. LAZER KAYNAK UYGULAMALARI.....	45
4.8.1. Üretim Teknolojileri .....	45
4.8.2. Bilişim Teknolojileri.....	46
4.8.3. Sağlık Teknolojileri .....	46
4.8.4. Savunma ve Uzay teknolojileri .....	47
4.8.5. Otomotiv Teknolojileri .....	48
4.9. LAZER KAYNAĞINDA KULLANILAN KORUYUCU GAZLAR .....	49
4.10. LAZER KAYNAĞININ METALURJİK ÖZELLİKLERİ .....	49
4.11. LAZER KAYNAĞI İLE DİĞER KAYNAK YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	50
4.12. LAZER KAYNAĞININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI.....	49
4.13. TİTANYUMUN LAZER KAYNAK ÇALIŞMALARINDAN ÖRNEKLER..	50
 BÖLÜM 5 .....	 56
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	56
5.1. ÇALIŞMANIN AMACI .....	56
5.2. MALZEMELER.....	57
5.3. KAYNAĞA HAZIRLIK.....	57
5.4. KAYNAK UYGULAMALARI .....	58
5.4.1. TIG Kaynağı .....	58
5.4.2. Lazer Kaynağı.....	59
5.5. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARARI .....	61
5.5.1. Numunelerin Kesilmesi .....	61

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.5.2. Gözle muayene .....	61
5.5.3. Çekme Testi .....	61
5.5.4. Sertlik Testi .....	63
5.5.5. Mikroyapı çalışmaları.....	64
5.5.6. EDS çalışmaları .....	64
BÖLÜM 6 .....	66
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	66
6.1. GÖZLE MUAYENE.....	66
6.2. ÇEKME TESTİ .....	68
6.3. SERTLİK TESTİ.....	76
6.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI .....	79
6.5. SEM (EDS) ÇALIŞMALARI .....	83
BÖLÜM 7 .....	86
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	86
KAYNAKLAR.....	88
ÖZGEÇMİŞ .....	95

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	Kroll yöntemi ile titanyum eldesi.....	5
Şekil 2.2.	Sünger titanyum üretiminden sonra yapılan ergitme ve ingot eldesi.....	6
Şekil 2.3.	$\alpha$ fazlı titanyum alaşımının soğuma hızına göre oluşan mikroyapılar .....	9
Şekil 2.4.	$(\alpha+\beta)$ titanyum alaşımında soğuma hızına göre oluşan mikroyapılar .....	10
Şekil 2.5.	Alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramına etkisi.....	12
Şekil 2.6.	Rolls-Royce firması tarafından kullanımının yıllara göre artışı.....	14
Şekil 2.7.	Titanyum alaşımlarının kalça protezlerindeki kullanımı.....	16
Şekil 3.1.	TIG Kaynak yönteminin şematik gösterimi .....	18
Şekil 3.2.	TIG kaynak torcunun kısımları .....	19
Şekil 3.3.	Tungsten elektrod çeşitleri ve renklendirilmeleri .....	22
Şekil 3.4.	Yeşil renkli (Al vb. metaller için) tungsten elektrod bileme ölçüsü .....	22
Şekil 3.5.	Kırmızı renkli (Toryum alaşımlı) tungsten elektrod bileme ölçüsü.....	23
Şekil 3.6.	Aynı akımda yapılan kaynakta elektrot ucu formunun nüfuziyete etkisi .....	24
Şekil 3.7.	Akım türü, kutup türü ve elektrot formuna göre nüfuziyet formları.....	24
Şekil 3.8.	Orbital kaynak yönteminin şematik olarak gösterimi .....	28
Şekil 4.1.	Lazerin çalışma prensibi.....	36
Şekil 4.2.	Nd: YAG lazer kovuğu .....	38
Şekil 4.3.	Optik resonatörde dalga oluşumu .....	38
Şekil 4.4.	Odaklama başlığı prensip şeması ve görünümü .....	39
Şekil 4.5.	Bir Nd:YAG lazeri odaklama başlığı.....	39
Şekil 4.6.	CO2 lazerinin şematik resmi .....	41
Şekil 4.7.	Lazer ışın cihazının şematik yapısı .....	42
Şekil 4.8.	İletim ve derinlemesine kaynak işleminin karşılaştırılması .....	42
Şekil 4.9.	CMOS Kameradan alınan anahtar deliği lazer kaynağı işlemi görüntüsü....	43
Şekil 4.10.	Lazer kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumu .....	44
Şekil 4.11.	İletimsel lazer kaynağının şematik gösterimi .....	45
Şekil 4.12.	Lazer ışınının sağlıkta kullanımı .....	47

## Sayfa

Şekil 4.13. Mekanik bağlama ile lazer kaynaklı bağlantıların karşılaştırılması.....	48
Şekil 4.14. Otomotiv üretiminde lazerlerin kullanım alanları .....	49
Şekil 4.15. Kaynak yöntemine göre elde edilen dikiş geometrileri.....	50
Şekil 5.1. Kaynak ağzı açılmış parça görüntüleri a) TIG kaynağı b) lazer kaynağı .....	57
Şekil 5.2. TIG kaynak makinası .....	59
Şekil 5.3. Titanyum borunun TIG kaynağı ile birleştirilmesine ait bir örnek .....	59
Şekil 5.4. Lazer kaynak makinası ve kaynağın yapılışı .....	60
Şekil 5.5. Lazer kaynak numunesi.....	60
Şekil 5.6. Boru malzemeler için çekme testi numune ölçüleri .....	62
Şekil 5.7. Çekme numunelerinin çekme çenesi tutma yerlerinin preste düzeltilmesi .....	62
Şekil 5.8. Numunelerin düzleştirilmiş hali a) TIG kaynağı, b) lazer kaynağı.....	63
Şekil 5.9. Çekme testi cihazı.....	63
Şekil 5.10. Sertlik deneyi test cihazı.....	64
Şekil 6.1. Kaynaklı numunelerin makro görüntüleri (a, b, c TIG ve d, e, f lazer) .....	66
Şekil 6.2. Üçlü çekme grafikleri, a) TIG 3 ve b) lazer 1 kodlu numune .....	69
Şekil 6.3. TIG kaynaklı numunelerin çekme grafikleri .....	70
Şekil 6.4. Lazer ışın kaynaklı numunelerin çekme grafikleri .....	70
Şekil 6.5. TIG ve lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonrası kopma bölgeleri....	71
Şekil 6.6. Ana malzeme ile kaynaklı numune kırık yüzey görüntüleri .....	74
Şekil 6.7. TIG ve lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin sertlik grafikleri .....	75
Şekil 6.8. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgeleri .....	78
Şekil 6.9. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları .....	79
Şekil 6.10. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgeleri.....	80
Şekil 6.11. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları.....	80
Şekil 6.12. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz sonuçları .....	84
Şekil 6.13. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz sonuçları.....	85

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. Ticari saflıktaki titanyumun genel özellikleri.....	8
Çizelge 2.2. Bazı $\beta$ Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri .....	11
Çizelge 2.3. $\alpha$ , $\alpha +\beta$ ve $\beta$ alaşımlarının genel özellikleri .....	11
Çizelge 2.4. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık) .....	13
Çizelge 2.5. Mimarlıkta kullanılan bazı metallerin atmosferik dirençleri.....	17
Çizelge 3.1. Tungsten elektrodların içerikleri, renk kodları ve bazı özellikleri .....	21
Çizelge 3.2. Argon ve helyum gazlarının özellikleri .....	25
Çizelge 3.3. Çeşitli metaller için önerilen koruyucu gazlar ve elektrodlar .....	25
Çizelge 5.1. Titanyum boruların kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) .....	54
Çizelge 5.2. TIG kaynak parametreleri .....	58
Çizelge 5.3. Lazer kaynak parametreleri.....	60
Çizelge 6.1. Titanyum kaynağının renk değerlendirmesi .....	67
Çizelge 6.2. Çekme test sonuçları .....	69



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

H	: hidrojen
Ti	: titanyum
Mg	: magnezyum
Al	: alüminyum
Mn	: mangan
Si	: silisyum
Cu	: bakır
Mo	: molibden
Ni	: nikel
Cr	: krom
P	: Fosfor
S	: kükürt
Ar	: argon
He	: helyum

### KISALTMALAR

ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
TIG	: Tungsten Inert Gas
EDS	: Enerji dispersif x-ışınları spektroskopisi
OM	: Optik mikroskop
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Titanyum; özgül ağırlığı  $4.51 \text{ gr/cm}^3$  olan yorulma ve mekanik dayanımı oldukça yüksek, korozyona karşı dayanımı uzun süreli olan bir metaldir. Bu malzeme, yaklaşık  $535 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar yüksek sıcaklıkta kullanım özelliğine ve birçok doğal ortamda mükemmel korozyon dayanımlarına sahiptir. Ancak,  $535 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda bu koruyucu tabaka parçalanır ve C, N ve H atomları malzemeyi kırılganlaştırmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının istenmeyen gazlara karşı duyarlılığı farklı kaynak yöntemlerinin kullanılmasını kısıtlamakta ve bir dizi ilave önlemin alınmasını mecburi kılmaktadır. Günümüzde, bu malzemelerin kullanım artışına bağlı olarak, kaynak ile birleştirilmelerinin de daha önemli hale geldiği bir gerçektir [1].

Titanyum ve alaşımları endüstriyel uygulamalarda tercih edilen en iyi mühendislik malzemelerden bir tanesidir. Titanyum ve alaşımları uzay araçları, kimya sanayi, bazı spor aletleri imalinde, uçak, otomotiv, enerji, sağlık, nükleer güç santrallerinde, denizcilikte ve gıda endüstrisinde kullanımı yaygın olan malzemelerdendir. Titanyum malzemesi özellikle uzay sanayinde önemli bir yere sahiptir. Önümüzdeki yıllarda bu malzemeler toplam tüketimin önemli bir oranı olmaya devam edecektir. Uçak firması Boeing'in titanyum kullanımına bakılacak olursa 717 modelinde % 1 (1963), 747 modelinde % 3 (1969), 757 modelinde % 5 (1983) ve 777 modelinde % 9 (1994) oranlarında olmak üzere devamlı olarak bir artış içerisinde olmuştur. Son yıllarda titanyum alaşımlarının geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar uzay sanayisinden endüstriyel uygulamalara kaymış bulunmaktadır [2].

Titanyum malzemeler yüksek mukavemetlerinin yanında, kimyasal maddelerden (Nitrik asit, asetik asit, amonyum klorid, deniz suyu ve sülfür dioksit vs.) etkilenmeyen, insan vücudunda alerji yapmayan özellikler ile de ön plana

çıkılmaktadırlar. Titanyum, çelikten % 45 daha hafif, alüminyumdan % 60 daha ağır ve her ikisinden de üç kat daha güçlü bir malzemedir. Ömür devri maliyeti ve bakım onarım maliyeti daha düşük, servis ömrü daha uzundur. Titanyumun genel uygulamaları arasında askeri, havacılık, denizcilik, kimya, enerji üretimi, petrol ve gaz çıkarımı ve tıbbi cihazlar bulunmaktadır. Bu malzemeler endüstride ergitmeli kaynaklardan TIG, MIG, plazma, lazer ve elektron ışın kaynak yöntemleri ile birleştirilebilmektedirler [3,4]. Ayrıca bu malzemeler katı hal kaynak yöntemlerinden difüzyon kaynağı, sürtünme kaynağı ve patlamalı kaynak yöntemleri ile kolaylıkla birleştirilebilirler. Titanyum ve alaşımı malzemeler sac levha, dolu çubuk ve boru vb. formlarda üretilerek kullanılabilirler.

TIG Kaynağı, (Tungsten Inert Gas) kaynak için gerekli ısının, ergimeyen tungsten bir elektrot ve kaynatılacak iş parçası arasında oluşturulan ark tarafından sağlanan ve kaynak bölgesinin de (kaynak metali ve ITAB) elektrodu çevreleyen bir memeden gönderilen asal (inert) bir gaz tarafından korunan ergitmeli bir kaynak yöntemidir [5].

Ergimeyen bir tungsten elektrot ve arkın bir inert gaz tarafından korunduğu TIG kaynak yöntemi, son derece önemli bir birleştirme metodudur. Bu yöntemde, tungsten elektrot ile iş parçası arasında bir elektrik arkı oluşturulur. Ark bölgesi inert bir gaz veya karışım gazlar ile korunur. Bu kaynak yöntemi paslanmaz çelik, magnezyum, alüminyum, bakır ve diğer birçok demir dışı metaller gibi kaynağı zor olan metallerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

Lazer kaynağı; benzer ya da benzer olmayan malzemeleri birleştirme işleminde kullanılan ergitmeli bir kaynak yöntemidir. Yüksek kaynak hızları, çok iyi bir biçimde otomatikleştirilebilir olması ve kaynak operasyonu esnasında izleme olanağı ile sürecin kontrol edilebilirliği, lazer ışın kaynağını modern sanayi üretiminde tercih edilen bir birleştirme yöntemi haline getirmiştir. Lazer ışın kaynağı, yüksek kaynak ilerleme hızının yanında, az çarpılma, derin nüfuziyet ve yüksek olmayan toplam ısı girdisi özellikleri sebebiyle diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha üstün olup, endüstrinin birçok alanında tercih edilmektedir. Ayrıca, lazer ışınının hassas bir biçimde odaklanması ve kaynak alanına istenilen bir açıyla yönlendirilmesi, kaynak

metalinin diğer ark kaynaklarına göre çok daha dar olmasını sağlamaktadır. Lazer kaynağında derin nũfuziyet ve iyi kaynak kalitesi yanında, kaynak bõlgesi genişliğinin diğer kaynak yöntemlerine göre daha az oluşu büyük avantajlar sağlamaktadır [7,8].

Bu çalışmada ısı eřanjõrleri, kimyasal madde ve buhar taşıyıcı hatlarında sıklıkla kullanılan titanyum boru malzemeler kullanılmıştır. Ticari olarak temin edilen boru malzemeler farklı kaynak yöntemleri (TIG ve lazer) ile birleştirilmiş ve birleştirmelerin dayanımları çekme testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca kaynaklı bõlge mikroyapı, sertlik ve SEM’de EDS analiz çalışmalarıyla karakterize edilmiştir. Bu alışma ile Ülkemiz endũstri uygulamalarında hak ettiği yeri bulamayan titanyumun boru malzemelerin farklı kaynak yöntemleri ile kaynaklanabilirliği ve kaynaklı boruların servis şartlarında maruz kalacağı bazı yũklere karşı kolaylıkla dayanabileceği bilimsel veriler ile ortaya konulmuştur. Bõylelikle elde edilen sonuçlar ile titanyum boruların kaynakla birleştirilerek imalat sanayi içerisindeki kullanılabilirliğinin artacağı dũřünõlmektedir. Bu tez çalışması kapsamında belirtilen kaynak proseslerinin araştırılması, uygulanması ve prosesin geliştirilmesiyle titanyum kaynağı konusunda Ulusal bilgi birikimi ve tecrũbe kazanılacağı tahmin edilmektedir.

## BÖLÜM 2

### TİTANYUM

#### 2.1. TİTANYUMUN TARİHÇESİ

İngiliz mineralojist William Gregor 1791 yılında, Madagaskar'daki Karakum diye adlandırılan bölgedeki çalışmaları sırasında özelliğini belirleyemediği bir metal olan Titanyum ile karşılaşmış ve Manakara şehrinin isminden ilham alarak metale "Menakirit" adını vermiştir. Bundan 4 yıl sonra Alman kimyacı Martin H. Klaproth yaptığı araştırmalarla bu metalin yeni bir element olduğunu ispat etmiş ve Yunan mitolojisindeki toprağın ilk oğullarının ismi olan "Titans" isminden esinlenerek bu metale "Titanyum" ismini vermiştir [9].

Saf metalik titanyum (%99,9) Matthew A. Hunter tarafından ilk olarak 1910'da  $Ti-Cl_4$  ile sodyumun 700-800 °C'de ısıtılmasıyla hazırlanmıştır. Wilhelm Justin Kroll 1932 yılında  $Ti-Cl_4$  ile kalsiyumu birleştirerek kalitesi yüksek titanyumu üretmeyi başarmıştır [10].

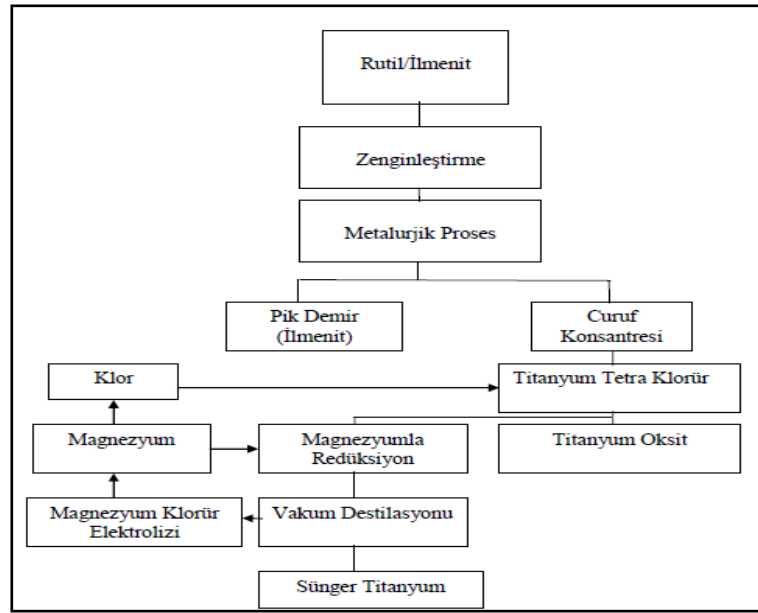
Titanyum'un eriyik halde oksijen ve azota olan afinitesi nedeniyle saf olarak elde edilmesi yüksek bir teknoloji gerektirmiş ve bu sorun ancak 20. yüzyılın ortalarında (1938-1940) Dr. Wilhelm Kroll'un geliştirdiği bir yöntem ile çözülebilmştir. Titanyum, ilk olarak 1950'li yıllarda havacılık alanında "muhteşem metal" olarak kullanılmaya başlanmıştır [11,12].

#### 2.2. TİTANYUMUN ÜRETİMİ

Titanyum cevheri rutil ( $TiO_2$ ) ve ilmenit ( $FeTiO_3$ )'dir. Öncelikle bu cevher öğütülüp manyetik ortamdan geçirilerek içerisindeki  $FeO$ 'den arındırılır ve devamında uygulanan çöktürme işlemi ile de diğer istenmeyen maddeler uzaklaştırılır. Böylece geriye kalan

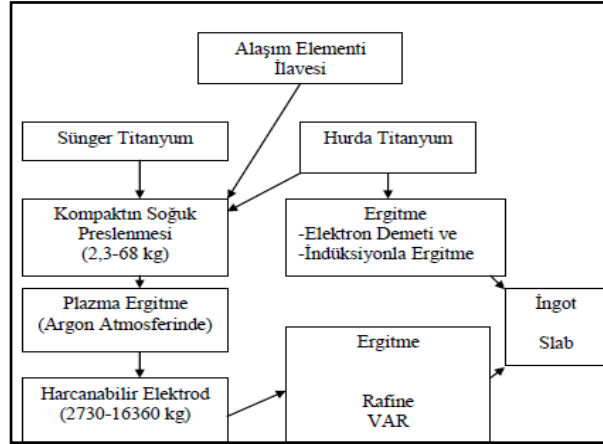
TiO<sub>2</sub> sülfürik asitle (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) reaksiyon edilerek titanil-sülfürik asit eldesi sağlanır. Devamında bu asidin sıcak su ile karıştırılması sonucunda TiO<sub>2</sub> çöker ve filtre ile süzülerek alınır. Böylelikle TiO<sub>2</sub> saf olarak üretilmiş olur. Bu bileşiği indirgemek için 1939 yılında Kroll tarafından geliştirilmiş “Kroll Yöntemi” kullanılır [13].

Şekil 2.1’de Kroll yöntemi titanyum süngeri eldesi ile sonuçlanan akış diyagramı görülmektedir. Rutil ve/veya ilmenit mineralleri cevher zenginleştirme işlemleri ile Kroll işlemine hazırlanmaktadır. İlmenit cevheri kullanılması durumunda metalurjik işlem esnasında demir içeriği pik demir olarak alınırken, TiO<sub>2</sub> curufu Kroll yönteminde kullanılmaktadır. Kroll yönteminin birinci aşamasında rutil/ilmenit mineralleri 900 °C’de klor gazıyla reaksiyona girerek TiCl<sub>4</sub> elde edilmektedir. İlmenit için klorlama reaksiyonu Denklem 2.1’de görülmektedir. TiCl<sub>4</sub> Kroll reaktöründe argon gazı ortamında sıvı Mg ile Denklem 2.2’de görülen reaksiyona girerek metalik titanyuma indirgenmektedir [14].



Şekil 2.1. Kroll yöntemi ile titanyum eldesi [14].

Elde edilen bu ürün gözenekli yapısı sebebiyle sünger titanyum olarak isimlendirilmektedir. Sıvı  $MgCl_2$  periyodik olarak reaktörden alınmakta ve elektroliz yoluyla Mg geri dönüşümü sağlanmaktadır. Şekil 2.2’de sünger titanyum üretiminin akabinde yapılan ergitme işlemleri ve ingot eldesi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.2. Sünger titanyum üretiminden sonra yapılan ergitme işlemleri ve ingot eldesi.

### 2.3. TİTANYUMUN METAL ÖZELLİKLERİ

Çeşitli titanyum alaşımlarının çok yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük sıcaklıklarda verdiği yüksek dayanım, sertlik, tokluk, düşük yoğunluk ve yüksek bir korozyon direnci gibi özellikler, havacılık ve uzay sanayisinde ve diğer yüksek performans uygulamalarında büyük ağırlık tasarruflarının yapılmasına imkan sağlamaktadır. Titanyumun elektrik direnci, elektron akış yönünün zıttı yönünde ve zayıf bir iletken olduğundan, iyi bir dirence sahiptir. Titanyum düşük yoğunlukta bir elementtir (yaklaşık olarak demirin %60'ı kadar azdır) ve alaşım ile deformasyon ile güçlendirilebilir. Isıl genleşme katsayısı çelik ve Al alaşımlarının yarısından daha düşüktür. Titanyum pasifize edilebilir ve çoğu asit mineraline ve kloroidlere karşı iyi derecede direnç göstermektedir. Titanyum nontoksiktir (zehirsizdir) ve genellikle insan kemiğine ve dokusuna uyumludur. Mükemmel bir korozyon direnci olan titanyum doğa ile olan uyumu sayesinde kimyasal, petrokimyasal uygulamalar, offshore (denizle ilgili) ve biomalzeme uygulamalarında kullanılmaktadır [15].

## 2.4. TİTANYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Titanyuma az miktarda katılan Al ve V elementleri titanyum alaşımının bazı özelliklerini ve mukavemet ve yorulma dayanımını Cp Ti'ye göre daha fazla arttırmaktadır. Al alaşım elementi,  $\alpha$ - dengeleyici olarak kullanılırken, V alaşım elementi  $\beta$ - dengesini gerçekleştirmektedir.  $\alpha$ - $\beta$  faz dönüşümünün meydana geldiği sıcaklıkta, bu elementlerin titanyum ile birleştirilmesiyle dönüşüm olayı tetiklenmiş olur ve bu sayede oda sıcaklığında hem  $\alpha$ - yapılı hem de  $\beta$ - yapılı alaşım formları meydana gelmiştir. Bu yüzden Titanyum-alüminyum-vanadyum (Ti-6Al-4V) alaşımları  $\alpha$  ve  $\beta$  oluşumlarının iki fazlı yapısına sahip olmaktadır [9].

Titanyum, metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Titanyum alaşımları matris malzeme olarak kullanıldığında, takviye elemanı ile iyi bir yapışma sağlamaktadır. Titanyum alaşımları mikroyapılarına göre dört genel gruba ayrılabilirler [16].

### 2.4.1. Ticari Saf Titanyum

Saf titanyum (Cp-Ti), % 98.635 - % 99,5 arasında titanyum içermektedir. Saf titanyumun metalinin oksijen içeriği % 0,18–0,40 arasındadır. Ticari saf titanyum; titanyumun O, N, H, C ve Fe ile birlikteki çok seyreltik alaşımı olarak görülür. O, N ve C; sünekliği düşürürken aynı zamanda malzemeyi kuvvetlendirmektedir. Bu malzemenin mikroyapısı tamamen  $\alpha$  fazından oluşmaktadır. Saf titanyumun en yaygın kullanımı 650-700 °C'de ısıl işlemlerle tavlansak kullanılmasıdır. Böyle bir tav işleminden sonra mikroyapı ince eş eksenli  $\alpha$  taneciklerinden oluşmaktadır. Eğer saf titanyum 900-950 °C'de  $\beta$  alanı içinde ısıtılırsa hızlı bir tane irileşmesi meydana gelir ve soğuma sırasında kaba tırtıllı  $\alpha$  şekillendirilir.

Ticari saflıktaki titanyum nispeten zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetini kaybeder. Fakat çok iyi korozyon direncine sahiptir [14,9,17]. Çizelge 2.1'de Ticari saflıktaki titanyumun genel özellikleri verilmektedir [17].



Çizelge 2.1. Ticari saflıktaki titanyumun genel özellikleri [17].

ASTM Standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Alaşım Elementleri				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170	240	888	880	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18
Grade 2	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25
Grade 3	380	450	920	900	0.05	0.10	0.015	0.30	0.35
Grade 4	480	550	950	905	0.05	0.10	0.015	0.50	0.40

Cp titanyumun ısı etkisi altında, zamana bağlı şekil verme direnci özelliklerinin iyi olmadığı, buna karşın soğuk deformasyonda bu özelliğinin daha iyileştiği belirlenmiştir. Saf titanyum 950 °C'nin üzerinde ısıtılarak ve 8 kg/cm<sup>2</sup>'lik basınç uygulanarak levha halindeki titanyuma şekillendirme özelliği kazandırılır [18].

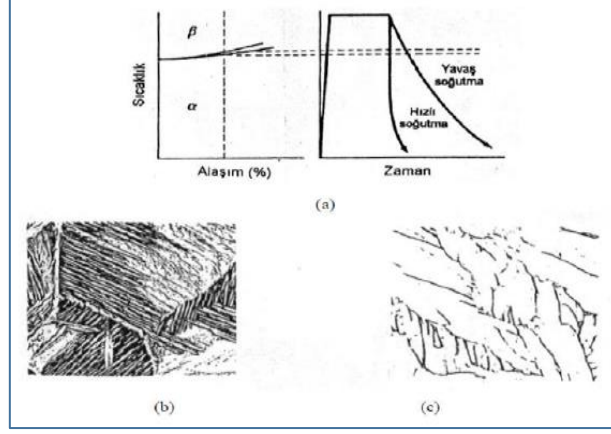
#### 2.4.2. Alfa (α) Titanyum Alaşımları

Alfa (α) Titanyum alaşımların mikroyapıları yüksek oranda α fazı içermektedir ve bu alaşımlar çoğunlukla yüksek sıcaklık mukavemeti veya sürünme mukavemeti istenen uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Alfa alaşımları % 7'ye kadar alüminyum ve az miktarda (<% 0.3) oksijen, karbon ve azot barındırırlar. Alüminyum, çoğu ticari titanyum alaşımında alfa stabilizatörü olarak yaygın şekilde kullanılır, çünkü alaşımı çevre ve yaklaşık 550 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda güçlendirebilir [16].

İçerisinde Sn, Al veya Zr bulunan α alaşımları, düşük ya da çok yüksek sıcaklıktaki ortamlarda çok tercih edilirler. α- fazını yüksek oranda içeren alaşımlar, β-fazlı alaşımlara kıyasla genellikle yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı daha yüksek mukavemet gösterirler. Çok az miktarda arayer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda bile sürdürmektedir. Sadece soğuk deformasyon sonrası α alaşımlarında meydana gelen kalıntı gerilimleri gidermek için tavlama veya yeniden kristalleşme ısı işlemi yapılabilmektedir [9,14].

α alaşımlarının mikroyapısı, tavlama sonrası uygulanan soğutma hızının etkinliğine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi malzemede soğutma işlemi hızlı yapıldığında iğnemsiz α fazının, fırında (yavaş) soğutma işlemi

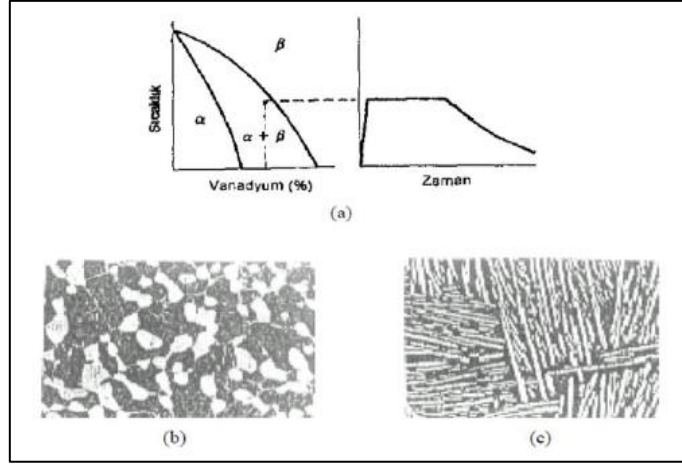
yapıldığında ise plakalı  $\alpha$  fazının yoğun olduğu bir mikroyapı oluşumuna neden olmaktadır [9]. Burada; a) tavlama işlemini, b) hızlı soğutma sonrasındaki mikroyapıyı ve c) yavaş soğutma sonrasındaki plakalı mikro yapıyı göstermektedir.



Şekil 2.3.  $\alpha$  fazlı titanyum alaşımının soğuma hızına göre oluşan mikroyapılar.

#### 2.4.3. Alfa-Beta ( $\alpha+\beta$ ) Titanyum Alaşımları

Alfa-Beta ( $\alpha+\beta$ ) Titanyum alaşımları, içeriklerinde bir ya da daha çok miktarda  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının kararlılığını yükseltmeyi sağlayan alaşım elementlerini içermektedirler. Alfa-beta alaşımları ilavesiyle iki fazlı mikroyapı karakteristiğine sahiptir. % 6 Al ve değişen miktarlarda beta oluşturuucu bileşenler Cr, V ve Mo bulunur [16].  $\alpha+\beta$  titanyum alaşımları yüksek çekme ve yorulma dayanımı ile yüksek korozyon direnci, iyi sıcak şekillendirme ve yüksek sürünme direncine sahiptir [16]. Oda sıcaklığında  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları için kullanılan dengeleyici elementlerin uygun miktarlarda hazırlanmasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının karışımından meydana gelen bir mikroyapı elde edilebilmektedir. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır [9,14]. Şekil 2.4'de ( $\alpha+\beta$ ) titanyum alaşımının (a) tavlama ısıl işlemi, (b) yavaş (fırında) soğutmadan sonra oluşan eş eksenli mikroyapısı, (c) hızlı soğutmadan sonra oluşan iğnemsî yapısı görülmektedir [9].



Şekil 2.4. ( $\alpha+\beta$ ) titanyum alaşımında soğuma hızına göre oluşan mikroyapılar.

Şekil 2.4 (a)'ya bakıldığında düşük miktarda  $\alpha$  fazı tanelerini oluşturmak ve  $\beta$  fazındaki oluşan tane irileşmesini önlemek için,  $\beta$  fazı dönüşüm sıcaklığının alt noktasına ulaşmak gerekmektedir. Belirtilen sıcaklıktan itibaren yapılan yavaş bir soğutma ile mikroyapıda Şekil 2.4 (b)'de gösterilen eş eksenli taneler; hızlı soğutma işlemi ile Şekil 2.4 (c)'de gösterilen iğnemsî yapıdaki taneler oluşmaktadır [9].

Bu alaşımlarda tavlama, yüksek süneklik, düzenli özellikler ve iyi dayanım kombinasyonu oluşturur. Yakın alfa alaşımlarına göre daha yüksek dayanım, daha iyi şekillendirilebilirlik gibi özelliklere sahip olan bu gruba Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-2S alaşımları örnek gösterilebilir [17].

#### 2.4.4. Beta ( $\beta$ ) Titanyum Alaşımları

Beta ( $\beta$ ) Titanyum alaşımları, içeriklerinde yüksek miktarlarda  $\beta$  fazını dengelemeye yardımcı alaşım elementlerini içermektedirler. Sahip oldukları kolay ve soğuk şekil verme özellikleri, dövülebilirlik ve de yüksek yoğunluk gibi olumlu özellikleriyle mevcut diğer çeşitli titanyum alaşımlarından daha farklıdır. Bu alaşımlar ( $\beta$ ) oda sıcaklığında ( $\alpha+\beta$ ) alaşımları ile aynı derecede dayanım özellikleri sergilese dahi yüksek sıcaklıklara çıktığında bu değerler ( $\alpha+\beta$ ) alaşımlarından daha düşük seviyede kalmaktadır. Bu alaşımlar kararsız alaşımlar olduklarından ( $\alpha$ ) fazının ( $\beta$ ) matrisi içinde çökeltmesi ile ( $\beta$ ) alaşımlarının sertleştirilmesi gerçekleştirilmektedir [9,14].

Bu alaşımlar önemli miktarda  $\beta$  fazı dengeleyici elementler olan V ve Mo içerirler. Beta alaşımları  $\beta$  dengeleyicilerle zenginleştirilmiş alaşımlardır. Bu nedenle soğutmanın hızlı yapılmasıyla hepsi  $\beta$ 'dan oluşan dengesiz bir faz oluşur. Tavlanmış durumda mikroyapıda sadece  $\beta$  fazı vardır.  $\beta$  matrisi içinde  $\alpha$  fazının çökmesi ile sertlik kazanabilirler. Esas dayanım katı eriyik mukavemetlenmesi ile kazandırılır. Bazı  $\beta$  titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir [17].

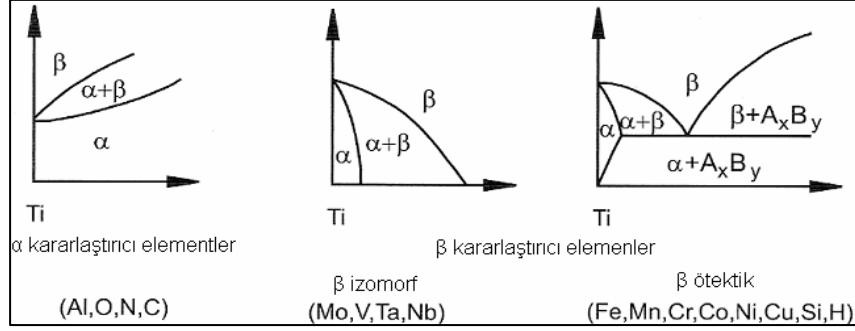
Çizelge 2.2. Bazı  $\beta$  Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri [17].

Alaşım Tipi	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	% Kesit Daralması
Ti-15Mo-5Zr-3Al	870- 1173	882- 1177	15- 20	43- 80
Ti-12Mo-5Zr-5Sn	1002	1010	17.8	56
Ti-30Nb	500	700	20	60
Ti-30Ta	590	740	28	58

Alfa+beta alaşımları ile yaklaşık aynı dayanım değerlerine sahip olan bu alaşımlar, yüksek kırılma özelliklerine sahiptirler ve korozyon dirençleri Mo ilavesiyle hızla artmaktadır. Ayrıca bu alaşımlar sıcak ve soğukta iyi bir dayanıma sahiptirler. [18]. Çizelge 2.3'de  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$  ve  $\beta$  alaşımlarının temel özellikleri, Şekil 2.5'de ise alaşım elementlerinin titanyum malzemenin faz diyagramına olan etkileri verilmiştir.

Çizelge 2.3.  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$  ve  $\beta$  alaşımlarının genel özellikleri [10].

	<b>A Titanyum</b>	<b><math>\alpha + \beta</math> Titanyum</b>	<b><math>\beta</math> Titanyum</b>
Yoğunluk	Düşük	Düşük	Yüksek
Mukavemet	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süneklik	Düşük/Yüksek	Yüksek	Düşük/Yüksek
Tokluk	Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük/Yüksek
Sürünme	Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük
Korozyon Direnci	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük/Yüksek
Oksidasyon Davranışı	Çok Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük
Soğuk Şekillendirilebilirlik	Çok Düşük	Düşük	Düşük/Yüksek
Kaynak Kabiliyeti	Yüksek	Düşük/ Yüksek	Düşük



Şekil 2.5. Alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramına etkisi [19].

## 2.5. TİTANYUMUN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Titanyum alaşımların mekanik özellikleri; alaşımın kimyasal bileşimi, faz dağılımı ve termo-mekanik süreçle doğrudan ilişkilidir. Titanyum, birçok metal ile alaşımlanabilmektedir. Bu yolla direncin artırılması, akma dayanımının yükseltilmesi ve dökülebilirlik gibi bazı özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Titanyumun Al ve V ile alaşımlanması, mekanik özellikler açısından olumludur. Ti-6Al-4V,  $\alpha$ - ve  $\beta$ -fazlarının karışımıdır.  $\alpha$ -fazı göreceli olarak daha yumuşak ve sünek iken  $\beta$ -fazı daha sert ve kırılmandır.  $\alpha$ - ve  $\beta$ -fazlarının miktarlarının değiştirilmesiyle mekanik özellikler de büyük oranda değiştirilebilmektedir. Titanyum, yüksek dayanım ve süneklik ile birlikte iyi bir tokluğa sahip olan birkaç metalden birisidir [12,20].

Saf titanyumun çekme mukavemeti yaklaşık 250 MPa'dır. Farklı titanyum alaşımlarının kopma dayanımı ise 700-985 MPa arasında değişmektedir. Saf titanyumun uzaması ise yaklaşık % 50 civarındadır. Saf titanyumun sertliği 160 HV (Vickers), alaşım ve ısıl işlem görmüş titanyumun sertliği 250-500 HV arasında değişir. Saf titanyumun akma dayanımı 170-480 MPa, kopma dayanımı ise 240-550 arasındadır ve saflığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çeşitli titanyum alaşımlarının akma dayanıklılığı 550-860 MPa arasında değişmektedir. Alüminyum, vanadyum, kalay, demir, krom ve mangan gibi elementler titanyuma ilave edilerek titanyumun dayanımını arttırmaktadır [9,18].

## 2.6. Ti-6Al-4V

Titanyum alaşımları arasında Ti-6Al-4V alaşımı kullanımı en çok olan ve tercih edilen alaşım tırüdür. Ti-6Al-4V alaşımı  $\alpha+\beta$  alaşım grubunda olup, Al  $\alpha$  dengeleyici, V ise  $\beta$  dengeleyicidir. Düşük yoğunluğu ve ısıl direnci ile yüksek mekaniksel dayanım, korozyon dayanımı ve biyo uyumluluğu nedeniyle Ti-6Al-4V alaşımı çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ti-6Al-4V alaşımı, jet motorları, uzay araçları, fůze yapımı, otomotiv sanayi, basınçlı kaplar, ortodonti, medikal implant ve cerrahi aletlerin yapımı gibi pek çok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır [21].

Ti-6Al-4V alaşımı, TIG, MIG, sůrtünme kaynağı, sůrtünme-karıştırma kaynağı, plazma ark, elektron ışın ve lazer ışın kaynağı gibi pek çok yöntemle birleştirilebilmektedir. Ancak, bu malzemelerin kaynağında bazı zorluklarla karşılaşılmaktadır. Ti-6Al-4V kaynaklı birleştirmelerinde 500°C'nin üzerine çıkıldığında, kaynak dikişinde oksijen, nitrojen, hidrojen gibi zararlı gaz absorpsiyonu tehlikesi artmakta ve mekanik mukavemette düşüşler yaşanabilmektedir [21]. Bu alaşımının kimyasal bileşimi izelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık) [21].

%C	Al	V	Fe	N	O	H	Ti
0.010	6.02	4.14	0.098	0.007	0.12	0.0020	Kalan

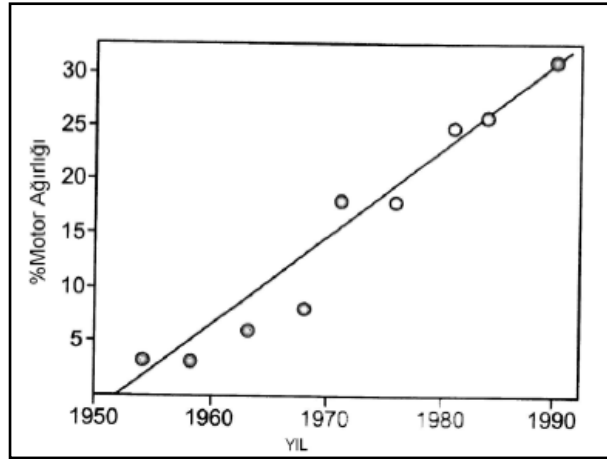
## 2.7. TİTANYUMUN KULLANIM ALANLARI

Titanyum alaşımları, havacılık sanayinde uçak ve motorlarında, gůclő, hafif, ısıya dayanıklı malzemelerin gerekli olduğu ortamlarda, deniz suyuna (korozyon) karşı dayanıklı olduğu için, titanyum gemilere, pervane şaftlarına ve denize maruz kalan diğer yapılara ait gōvdelerde, kalça eklemi gibi eklem implantlarında ve matkap ucu, bisiklet, golf sopası, saat ve dizüstő bilgisayarlar gibi çeşitli gőnlük ũrőnlerde kullanılır [22].

### 2.7.1. Havacılık Uygulamalarında Titanyum

Titanyum; diğer üstün özellikleri haricinde, yalnız düşük yoğunluğu sayesinde bile kendisine havacılık sektöründe önemli bir pazar payı bulduğunu gösteren güzel bir örnektir. 1940'ların sonunda geliştirilen Ti-6Al-4V alaşımı günümüzde bile havacılık sanayinde önemli bir yere sahiptir. Havacılık ürünlerinde, mekanik özellikler kadar üretilen parçaların kullanım ömürleri de çok önemlidir. Titanyum alaşımlarından imal edilen parçaların uzun süreli kullanım ömürleri, bu parçaları fiyat-kullanım ömrü kıyaslamasında öncü kılmaktadır. Uçak gövdelerinde genellikle yapısal eleman olarak bu malzemenin kullanılmasındaki sebep, yorulma çatlakları ilerleyişini durdurma ve önleme için kullanılmasıdır. Uçak gövdelerinin diğer bir yapısal elemanı olan Al üzerine ince, dar kuşaklar şeklinde montaj edilerek oluşan yorulma çatlaklarının ilerleyişini engellemeleri hedeflenir. Bir zamanlar en modern savaş uçakları olarak görülen F-22 ve Joint Strike Fighter uçaklarının gövdelerinde yeni bir titanyum alaşımı olan Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-2Cr-0,25Si alaşımı kullanılmaktadır. Geliştirilen bu alaşım gövde sıcaklığının en yüksek ölçüldüğü, motor yuvalarında kullanılmaktadır [23].

Titanyumun havacılık sektöründe ana kullanım alanı ise gaz türbin motorlarıdır. Modern gaz türbin motorlarının yaklaşık % 33'ü titanyum ve alaşımlardan imal edilmektedir. Bir örnek olarak; Rolls-Royce firmasının imalatını yaptığı uçak motorlarında kullandığı titanyum oranının yıllara göre sürekli artışı Şekil 2.6'da görülmektedir [23].



Şekil 2.6. Titanyumun Rolls-Royce firması tarafından kullanımının yıllara göre artışı.

Havacılık uygulamaları için titanyum kullanmanın birçok nedeni olmakla birlikte ana nedenleri şu şekilde sıralanabilir [24];

- Ağırlık tasarrufları,
- Çalışma sıcaklığı,
- Korozyon direnci,
- Kompozit uyumluluk.

### **2.7.2. Titanyumun Biyomedikal Uygulamaları**

Titanyum ve alaşımları, mükemmel mekanik, fiziksel ve biyolojik performansları nedeniyle, biyomedikal cihaz üretiminde giderek artan bir uygulama olmaktadır [24]. Biyomalzemeler, insan vücudundaki doku ya da organların görevlerini yerine getirmek veya onlara destek olmak amacıyla kullanılan malzemeler olup, metallere, polimerlere, seramiklere ve kompozitlere olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Biyomalzemelerde istenen en önemli özellik biyouyumluluk olup, kendisini çevreleyen dokuların normal değişimlerine mani olmayan ve dokuda istenmedik tepkiler (iltihaplanma, pıhtı, vb.) meydana getirmeyen malzemelerdir. Metalik biyomalzemelerden biri olan titanyum ve alaşımları, kemikle iyi bir bağ kuran ve doku tarafından yüksek kabul edilirliliğe sahip malzemelerdir [17].

Biyolojik ortamda kullanılacak malzemelerde aranan ilk şart, o malzemenin görevini gerçekleştirdiği yerde tolere edilebilmesidir. Kalça protezlerinin yanı sıra diğer eklem protezi ameliyatları, yani diz omuzları için çeşitli metalik malzemeler kullanılmıştır. Ek uygulamalar arasında travma ve spinal fiksasyon cihazları, kardiyovasküler stentler ve en yakın zamanda replasman spinal diskleri var [24]. Bir başka ifade ile biyouyumlu malzeme, kullanıldığı ortam tarafından reddedilmemelidir. Bu durumda öncelikle yapılması gereken hangi malzemelerin istenilen özelliklere sahip olduğunun tespit edilmesi ve bunların sınıflandırılmasıdır [17]. Şekil 2.7’de Titanyum alaşımlarının kalça protezlerindeki kullanımına ait bir örnek verilmiştir.





Şekil 2.7. Titanyum alaşımlarının kalça protezlerindeki kullanımı.

### 2.7.3. Titanyumun ve Alaşımlarının Mimarlıkta Kullanımı

Atmosferik korozyona karşı yüksek dayanımı, ağırlıkça hafif olmasına rağmen sağlamlığı ve dayanıklılığı, estetik görüntüsü, diğer üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri, titanyumu 21. yy.'da kullanılan en ideal yapı malzeme yapmaktadır. Çizelge 2.5. de titanyumun mimarlıkta en çok kullanılan diğer metallerle (paslanmaz çelik ve bakır) kıyaslandığında atmosferik koşullara karşı mükemmel bir dayanıma sahip olduğu görülmektedir [25].

Çizelge 2.5. Mimarlıkta kullanılan bazı metallerin atmosferik dirençleri.

	Titanyum	Paslanmaz Çelik	Bakır
Deniz tuzu partiküllerine karşı direnç	●	⊙	○
Morötesi ışınlar karşı direnç	●	●	●
Asit yağmurlarına karşı direnç(pitting)	●	⊙	⊙
Asit yağmurlarına karşı atmosferik direnç	●	⊙	○
Temas Korozyonu direnci	●	○	⊙
Korozyon akışına karşı direnç	●	○	○
Isıl Direnci	●	●	●
Aşınma direnci	●	●	○
● Mükemmel   ○ İyi   ⊙ orta   ○ Zayıf			

Atmosferik bozulmalar; örneğin asit yağmurları paslanmaz çelik ve bakır malzeme yüzeyinde farklı problemlere neden olmaktadır. Ancak Titanyum yüzeyindeki oksit tabakası sayesinde bu tür olumsuz etkiler karşısında dayanım göstermektedir. Mimari uygulamalar için Grade 1 ve 2 saf titanyum tercih edilmektedir. Dünya genelinde 1999 yılına kadar 2.000 tona yakın titanyum mimari uygulamalarda ve 1.000.000 m<sup>2</sup>'nin üzerinde çatı ve bina cephelerinde kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır [25].

## BÖLÜM 3

### TIG KAYNAĞI

TIG kaynağı; (Tungsten Inert Gas) kaynak için gereken ısının, tükenmeyen bir tungsten elektrod ile iş parçası arasında oluşan ark sayesinde ortaya çıktığı bir ergitmeli gaz altı ark kaynak yöntemidir.

#### 3.1. TIG KAYNAK TEKNİĞİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

1800 yılında Humphry Davy tarafından elektrik arkının keşfinin ardından ark kaynağı çok yavaş bir ilerleme göstermiştir. C. L. Coffin 1890 yılında inert (soy) gaz atmosferi içerisinde kaynak yapma fikrini ortaya koymuştur. 1900'lerin başında, demir içermeyen, Al ve Mg gibi metal malzemelerin kaynağı bile zordu. Çünkü bu hafif metallerin havayla hızlı tepkimeye girmeleri, kaynak işleminin gözenekli ve çöküntülü olmasına ve kaynağın zayıf olmasına neden oluyordu [26].

Ergiyik halinde bulunan kaynak banyolarının bir gaz ile korunması fikri ilk kez 1926 yılında ortaya sürülen Alexander kaynak yönteminde, kaynak bölgesi metanol gazı ile korunmuş ve sonrasında 1928 yılında Arcogen yöntemi keşfedilmiştir. Geliştirilen bu yeni yöntemde bir elektrod ile birlikte oksii-asetilen alevi beraber kullanılmıştır. 1926 yılında ABD'de Weinmann ve Langmuir tarafından kaynak banyosunun atmosferik ortamın, kaynak dikişine zararlı etkilerine karşı korunması sistematik bir şekilde incelenmiş ve hidrojenin koruyucu gaz olarak kullanıldığı Arkatom kaynak yöntemi geliştirilmiştir [27].

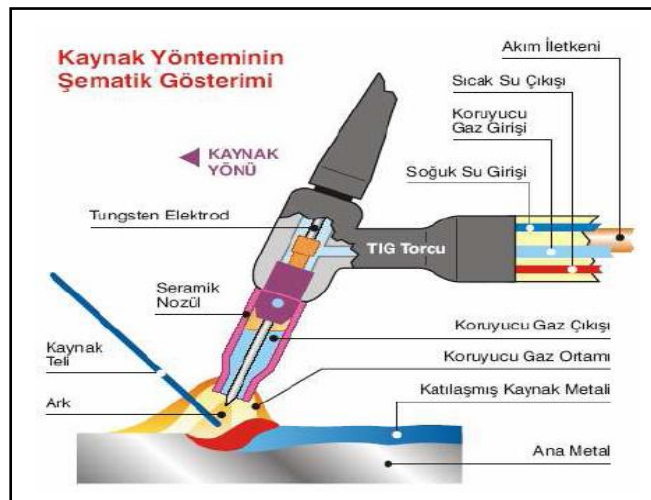
TIG kaynak tekniğı 1941 yılında son halini almış ve "Tungsten Inert Gas Welding" yada diğer adıyla "Heliarc" ismini almıştır. Çünkü koruyucu gaz olarak helyum ve elektrot olarak da tungsten kullanılmaya başlanmıştır. TIG kaynağının ilk yıllarında

elektrotların, tungstenin yüksek ergime noktasına rağmen hızlı bir şekilde ısınması, tungsten parçacıkların kaynağa transferine neden olmuştur. Bu sorunu çözmek için elektrodun polaritesi, pozitiften negatife doğru değiştirilmiş fakat bu da birçok demir bileşiği içermeyen metallerin kaynağı için uygun bulunmamıştır [28].

TIG kaynağındaki gelişmeler, takip eden 10 yıl boyunca devam etmiştir. Linde Air Products'ın su soğutmalı torcu geliştirmesi, elektrodun aşırı ısınmasını önleyerek yüksek akımlarda kaynak yapma imkanı sağlamıştır. Bunlara ek olarak, 1950'lerde, TIG tekniğine rağbet artarken, bazı kullanıcılar daha pahalı olan Argon ve Helyum gibi kaynak atmosferlerine alternatif olarak Karbondioksit gazı kullanmaya başlamıştır [28].

### 3.2. ÇALIŞMA PRENSİBİ

TIG kaynak yönteminde, kaynak edilen parça ile ergimeyen tungsten elektrod (Tungsten veya alaşımları) arasında oluşturulan bir elektrik arki, kaynak için gerekli olan sıcaklığı sağlar. Ark bölgesi bir soy (inert) gaz veya karışımları ile korunur. Çok kısa bir süre içinde bu yöntemin farklı alanlarda kullanılabilmesi ve diğer yöntemlerle kaynatılması güç olan metal ve alaşımların kaynağı için uygun olduğu anlaşılmış ve günümüzde en çok kullanılan gazaltı ark metodlarından birisi haline gelmiştir [5,29,30]. Şekil 3.1'de TIG Kaynak yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [30].

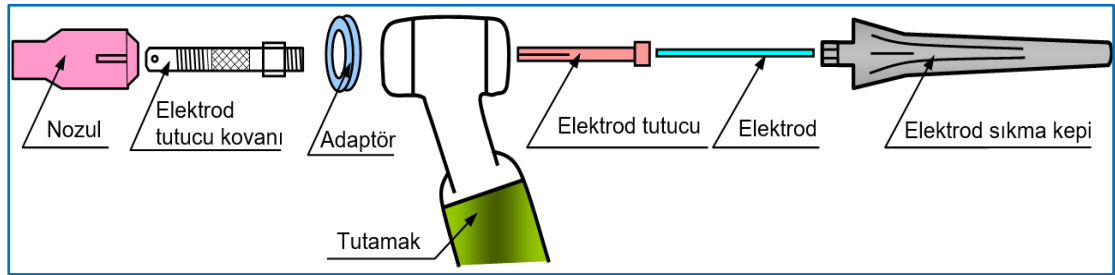


Şekil 3.1 TIG Kaynak yönteminin şematik gösterimi.

TIG kaynak yönteminde birleştirilecek malzeme cinsine göre doğru akım ya da alternatif akım kullanılabilir. Aynı kaynak makinesinde doğru ya da alternatif akım uygulanabilmekte ve işlem türüne göre (dolgu, tamir) akım çeşidi seçilebilmektedir [27].

### 3.3. TIG KAYNAK TORCU VE ELEMANLARI

Kaynak torçları iş parçası ile tungsten elektrot arasında, kaynak için ihtiyaç duyulan elektrik arkını oluşturabilmek için, akım kablosundan gelen akımı elektroda iletmek ve koruyucu gazı kaynak banyosunu koruyacak biçimde sevk etmek görevlerini yerine getirmesi için kullanılan bir elemandır. Uygulama yerine ve kullanılan akıma göre su ve hava ile soğutulan çeşitli tip torçlar mevcuttur. Genellikle 100 Ampere kadar olan torçlar hava, daha yüksek akım şiddetinde çalışanlar ise su ile soğutulurlar [5]. Şekil 3.2’de TIG kaynak torcunun kısımları şematik olarak verilmiştir. Bir TIG torcu aşağıda belirtilen kısımlardan oluşmaktadır.



Şekil 3.2. TIG kaynak torcunun kısımları [5].

Elektrod tutucusu: Bir TIG torcunun öz kısmını ergimeyen tungsten elektrodun tutucusu meydana getirir. Tutucu genel olarak üzerinde boylamasına kanallar bulunan ve bir tarafı konik bir kovandır ve bu parçaya elektrod yüksüğü adı ile de anılır. Elektrod tutucuları, TIG kaynağında elektrodu torca bağlayan ve aynı zamanda da tungsten elektroda kaynak akımını ileten bir parçadır. Tutucular genellikle bakırdan yapılır ve iç çapları kullanılan elektrodun çapına uygun olarak hassas bir toleransa sahiptirler.

Elektrot tutucusu kovanı: Elektrot tutucusu, elektrot tutucusu kovanı diye adlandırılan bir gövdenin içine girer ve bu parça da özel bir somun ile torç gövdesine sabitlenir. Elektrot tutucusu kovanı aynı zamanda gaz difüzörü görevi görerek gazı dağıtır [5].

İzolasyon halkası/Adaptör: İzolatörler nozulları sabitlemek için kullanılırlar, aynı zamanda boyun ile ısınan nozul arasında ısı kalkanı oluşturarak boyunun yıpranmasını önlerler. Standart nozul kullanıldığında izolasyon halkası, gaz lensli nozul kullanıldığında ise adaptör kullanılır.

Gaz nozulu (meme): Torç gövdesinin en uçuna sabitlenen koruyucu gaz memesi çeşitli çaplarda üretilmektedir. Bir torca; gaz ihtiyacına ve kaynak işlemine göre farklı çaplarda gaz nozulu takılabilir. Nozullar; seramik, şeffaf cam ve metal (genellikle bakır) malzemelerden üretilirler. Kullanım yerine göre ise dar ve geniş ağızlı olarak imal edilirler.

Elektrod sıkma kepleri: Elektrodların sabitlenmesi için kullanılır ve torcun modeline göre farklılık gösterir. Çalışma alanına göre ergonomik olanlar tercih edilirler. Standart ölçülerde ve elektrod boylarına göre kısa, orta ve uzun olarak değişik tipleri vardır.

### **3.4. TIG KAYNAK ELEKTRODLARI**

TIG kaynak yöntemi ile diğer geleneksel ark kaynağı yöntemleri arasındaki en temel fark, ilave metalinin elektrot tarafından karşılanmaması ve ergimeyen tungsten elektrotun yalnızca ark oluşturma görevini üstlenmiş olmasıdır. Bu bakımdan TIG kaynağında ergime sıcaklığı yaklaşık 3500 °C civarında olan tungsten, elektrot malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.1’de, ticari olarak satılan büyük tungsten elektrod tiplerini, Amerikan Kaynak Topluluğu (AWS) ve Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) sınıflandırmalarını ve elektrotta yer alan oksit miktarını ve tipini gösteren bir grafik verilmiştir [29,31].

Çizelge 3.1. Tungsten elektrodların kimyasal bileşimleri, renk kodları ve bazı özellikleri.

Elektrod	İşareti	Oksit İçeriği (%)	Katışkılar (%)	Renk Kodu	Bazı özellikleri
Katkısız (saf)	W	-	<0.20	Yeşil	Alternatif akımda ark kararlılığı iyi, elektrod ucu düzgün yarı küre şeklinde olmalı
Toryum oksit	WT 10	0.90-1.20 ThO <sub>2</sub>	<0.20	Sarı	Toryum oksit oranı yükseldikçe, elektron çıkışında açığa çıkan enerji azalmaktadır. Bu nedenle tutuşma özellikleri, dayanma süresi ve akım yüklenbilme kapasitesi artmaktadır.
Toryum oksit	WT 20	1.80-2.20 ThO <sub>2</sub>	<0.20	Kırmızı	
Toryum oksit	WT 30	2.80-3.20 ThO <sub>2</sub>	<0.20	Leylak	
Toryum oksit	WT 40	3.80-4.20 ThO <sub>2</sub>	<0.20	Portakal	
Zirkonyum oksit	WZ 4	0.30-0.50 ZrO <sub>2</sub>	<0.20	Kahverengi	Kaynak banyosu elektrod tarafından daha az kirlenir.
Zirkonyum oksit	WZ 8	0.70-0.90 ZrO <sub>2</sub>	<0.20	Beyaz	
Lantan oksit	WL 10	0.90-1.20 LaO <sub>2</sub>	<0.20	Siyah	Toryum oksitli elektrodlarla oranla daha uzun kullanım süreleri. (plazma ark yöntemleri)
Seryum oksit	WC 20	1.80 - 2.20 CeO <sub>2</sub>	<0.20	Gri	Düşük akımlarda performansları iyi olduğundan boru, paslanmaz çelik ve ince parçaların kaynağında tercih edilir.

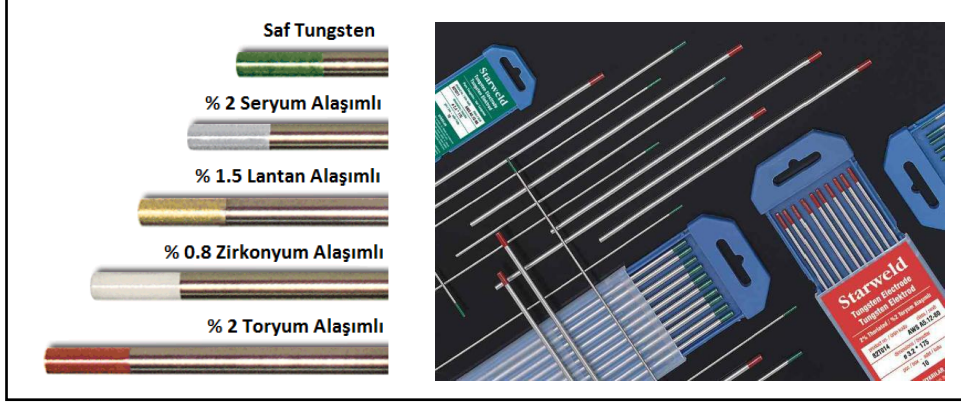
*Toryum içeren tungsten elektrod yerine (Toryum Radyoaktivite yaydığı için zararlıdır) seryum veya lantanyum bazlı elektrodlar tercih edilmelidir.*

### 3.4.1. % 2 Seryum Alaşımli Elektrodlar

Ark başlangıcının mükemmel olması nedeni ile seryum alaşımli tungsten elektrodlar; çelik ve paslanmaz çeliklerin, nikel alaşımlarının, titanyum malzemelerin, boru ve ince sac malzemelerin birleştirilmesinde tercih sebebidir. Bu elektrodlar, en iyi DC akımda performans göstermekle birlikte AC akımda kullanılabilirler. En az % 97.30 tungsten ve % 1.8 – 2.2 Se içermekle birlikte, AC akımda % 30-40 arası daha fazla akım yüklenbilmesi sebebiyle saf tungsten elektrod yerine de tercih edilebilirler [32].

### 3.4.2. % 2 Lantan Alaşımli Elektrodlar

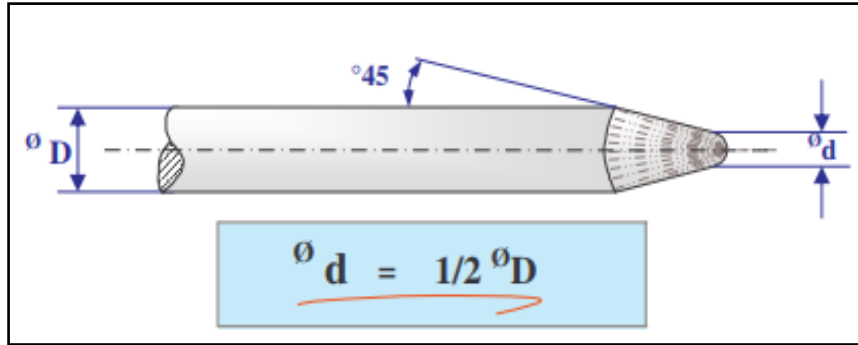
% 1.5 ve % 2 lantan alaşımli bu elektrodlar, düşük akım şiddetlerinde bile mükemmel bir ark başlangıcı sunmaktadırlar. Bu elektrodlar havacılık sanayi gibi kritik alanlarda tercih edilmekle birlikte, % 2 toryum alaşımli tungsten elektrodların yerine de tercih edilebilir. Her iki elektrod da çelik ve paslanmaz çeliklerin, Ni, Ti ve Al alaşımlarının kaynağında kullanılabilir. % 1.5 lantan alaşımli tungsten elektrodlar % 97.8 tungsten ve % yaklaşık 1.3 -1.7 aralığında lantan içermekte iken, % 2 lantan alaşımli tungsten elektrodlar ise % 97.3 tungsten ve % 1.8-2.2 lantan içermektedir. Şekil 3.3'te endüstride en çok kullanılan tungsten elektrod çeşitleri renkleriyle birlikte verilmiştir [32].



Şekil 3.3. Tungsten elektrod çeşitleri ve renklendirilmeleri.

### 3.4.3. Saf Tungsten Elektrodlar

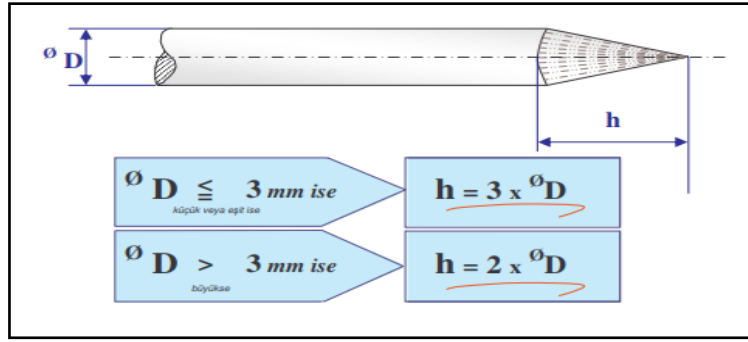
En az % 99.5 tungsten içeren bu elektrodların maliyetleri alaşımli türlere göre çok daha ucuzdur. AC akımda kaynak için, ısındığı zaman yuvarlak uç verecek biçimde iyi ark kararlılığı sağlamaktadır. Al ve Mg alaşımlarının AC güç üniteleri ile kaynağı için iyi bir ark stabilizasyonu sağlamakta olup, DC invertör güç üniteleri ile birlikte kullanılmamalıdır. Bu elektrodlar diğer elektrodlar gibi sivriltilmeyip kalınlıklarına göre uçlarına yuvarlak form verilebilir. Şekil 3.4'te saf tungsten elektrodun bileme ölçüsü verilmiştir [32].



Şekil 3.4. Yeşil renkli (Al vb. metallere için) tungsten elektrod bileme ölçüsü [33].

#### 3.4.4. % 2 Toryum Alaşımlı Elektrodlar

% 2 toryum alaşımlı bu elektrodlar iyi bir ark başlangıcı ve yüksek akım yüklenme kapasitesi sunmaktadır. İçeriğinde en düşük % 97.3 tungsten ve % 1.7-2.2 arası toryum barındıran bu elektrodlar, düşük tüketim oranı ile ark bozunumunu ve kaynak metali kirlenmesini engeller [32]. Bu elektrodların en büyük dezavantajı radyoaktif yayması ve insan sağlığı açısından zararlı olmasıdır. Bu elektrodlar saf tungsten elektrodların aksine kalınlıklarına göre farklı açılarda ve boylamasına taşlanmalıdır. Şekil 3.5’de toryum alaşımlı tungsten elektrodun bileme ölçüsü verilmiştir.



Şekil 3.5. Kırmızı renkli (Toryum alaşımlı) tungsten elektrod bileme ölçüsü [33].

#### 3.4.5. Zirkonyum Alaşımlı Elektrodlar

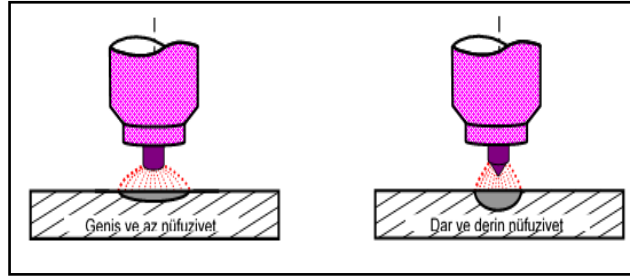
Bu elektrodlar genellikle Al ve Mg alaşımlarının kaynağı için kullanılmaktadırlar. % 98.6 tungsten ve % 0.7-0.9 Zi içeren bu elektrodlar, alternatif akım uygulamalarda kolayca yuvarlak uca sahip olmaktadır. Bu alaşıma sahip tungsten elektrodlar diğer çeşitler ile karşılaştırıldığında, kırılma olmaksızın en yüksek akım yüklenme kapasitesine sahip elektrodur. Bu sebep ile kaynak metaline en az tungsten geçişini bu elektrodlar sağlamaktadır. Ayrıca bu elektrodlar iyi bir ark kararlılığına ve güvenli bir ark başlangıcına sahiptir [32].

### 3.5. ELEKTROD UÇ FORMLARININ NÜFUZİYETE ETKİLERİ

Elektrot uç şeklinin TIG kaynağı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Diğer taraftan elektrot uc formu da ark ve parçaya verilen ısıya tesir eder. Ucuna yarım yuvarlak

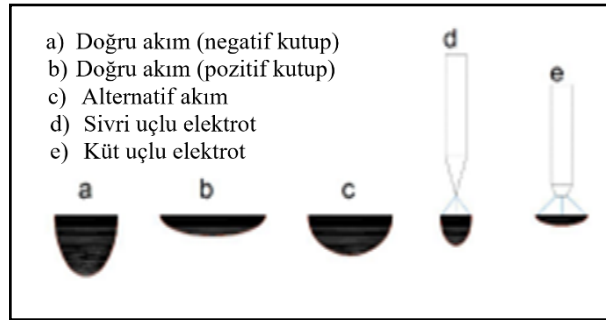


şekil verilmiş bir silindirik elektrotla yapılan kaynakta geniş ancak derinliği az bir nüfuziyet elde edilir. Diğer taraftan ucuna konik şekil verilmiş bir elektrotla aynı akım değerinde yapılan kaynakta ise, dar ve derinliği fazla bir nüfuziyet meydana gelir [34]. Şekil 3.6'da aynı akım şiddetiyle yapılan kaynakta elektrot ucu formunun nüfuziyete etkisi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.6. Aynı akımda yapılan kaynakta elektrot ucu formunun nüfuziyete etkisi.

TIG kaynağında akım türü ve kutuplamanın, her şeyden önce nüfuziyet formunu etkilediği bilinmektedir. Şekil 3.7'de bu durum şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Akım türü, kutup türü ve elektrot formuna göre nüfuziyet formları [35].

### 3.6. KORUYUCU GAZLAR

TIG kaynak yönteminde koruyucu gaz kullanmanın önemli iki amacı vardır. Bunlardan ilki; kaynak esnasında, kaynak banyosunu, ikincisi ise ergimeyen tungsten elektrodu ortamın olumsuz etkilerinden korumaktır. Bu kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazlar genellikle argon ve helyumdur. Ayrıca kaynak işlemlerinde bu iki gazın karışımı kullanılabilir. Bu gazlar, kimyasal bakımdan nötr karakterde, kokusuz

ve renksiz monoatomik gazlardır [5,35]. Bu gazlar kimyasal olarak nötr bir karakter taşır ve diğer elementler ile birleşmez ve yanmazlar. Argon gazının yoğunluğu havanın yoğunluğunun 1,4 katı iken (daha ağır) helyum gazının yoğunluğu havanın yoğunluğunun 0.14 katıdır (daha hafif). Koruyucu gaz ne kadar ağır ise verilen uygun bir debi ile arkı koruma ve kaynak bölgesini örtme o kadar etkili olur [5,35]. Çizelge 3.2’te Argon ve Helyum gazlarının TIG yönteminde davranışlarının karşılaştırılması ve Çizelge 3.3’te çeşitli metaller için TIG kaynağında önerilen koruyucu gazlar ve elektrodlar verilmiştir.

Çizelge 3.2. Argon ve helyum gazlarının özellikleri.

Argon	Helyum
<ul style="list-style-type: none"> <li>Düşük ark gerilimi sonucu ısı girdisinin azalması, 1.5 mm’den ince parçaların el ile kaynağında büyük bir üstünlük sağlar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüksek ark gerilimi sonucu oluşan daha sıcak ark, ısı iletkenliği yüksek malzemeler ile kalın parçaların kaynağında daha üstün sonuçlar verir.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Alüminyum ve alaşımları gibi yüzeyleri refrakter bir oksit tabakası ile kaplı malzemelerin kaynağında temizleme etkisi daha şiddetlidir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Havadan çok daha hafif olması sonucu koruyucu gaz sarfiyatı yüksektir ve torcun memesinden çıkan gaz akımı hava hareketlerine hassastır.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Arkın tutuşması daha kolaydır. Ark daha sakin ve daha stabil yanar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Yüksek ısı girdisi ve yüksek kaynak hızı, daha dar bir ITAB oluşturur ve bunun sonucu olarak kaynak bağlantısının mekanik özellikleri iyileşir. Böylece çarpılma ve kendini çekmeler azalır.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Havadan ağır olması nedeni ile daha az koruyucu gaz ile daha etkin bir koruma sağlar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Otomatik kaynak işlemlerinde yüksek kaynak hızlarında karşılaşılan gözenek ve yanma çentikleri oluşumu kontrol altına alınabilir.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Dik ve tavan kaynaklarında, gaz sarfiyatının fazla olmasına karşın, ısı girdisinin azlığı sonucu oluşan, daha ufak kaynak banyosuna kaynakçının kolaylıkla hakim olabilesine olanak sağlar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Havadan daha hafif olması sonucu tavan kaynaklarında daha iyi koruma sağlar ve bu yüzden altlık olarak kullanımı uygundur.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Otomatik kaynak işlemlerinde hızın yükselmesi, gözenek oluşumuna neden olur.</li> </ul>	

Çizelge 3.3. Çeşitli metaller için önerilen koruyucu gazlar ve elektrodlar.

Metalin türü	Kalınlığı	Akım Türü	Elektrod Türü	Koruyucu Gaz
Alüminyum	Tüm Kalınlıklar Kalın Parçalar İnce Parçalar	AA DAEN DAEP	W veya WT WT WT veya WZ	Ar veya Ar-He Ar-He veya Ar Ar
Bakır ve Bakır Alaşımları	Tüm kalınlıklar İnce parçalar	DAEN AA	WT W veya WZ	Ar veya Ar-He Ar
Magnezyum Alaşımları	Tüm Kalınlıklar İnce Parçalar	AA DAEP	W veya WZ WZ veya WT	Ar Ar
Nikel ve alaşımları	Tüm Kalınlıklar	DAEN	WT	Ar
Az karbonlu ve az alaşımlı çelik	Tüm kalınlıklar İnce parçalar	DAEN AA	WT W veya WZ	Ar veya Ar-He Ar
Paslanmaz çelik	Tüm kalınlıklar İnce parçalar	DAEN AA	WT W veya WZ	Ar veya Ar-He Ar
Titanyum	Tüm Kalınlıklar	DAEN	WT	Ar

### **3.7. TIG KAYNAK MAKİNALARI**

TIG kaynak metodunda sabit akım tipi kaynak makinaları kullanılır ki bu makinalardan hem alternatif akım hem de doğru akım elde edilebilir. Bunlar ya döner tip jeneratör ya da sabit tip transformatör/redresör kaynak makinalarıdır [26]. Hem doğru hem de alternatif akım veren sağlayan makinaları da mevcuttur. Günümüzde TIG kaynağında, genellikle düşük akımlarla çalışıldığından dolayı, akım üreteçlerinin ayarlarının hassas bir şekilde (ince ayar) yapılabilmesi gerekir [36].

#### **3.7.1. Jeneratör ve Alternatör Tipi Kaynak Makinaları**

Jeneratör tipi kaynak makinaları iki türdür. Bunlardan ilki fabrika veya atölyede kullanmak için bir elektrik motoru ile beslenmesi, ikincisi ise arazi de kullanmak için bir içten yanmalı (gazyağı, benzin veya mazotlu) bir motorla beslenmesidir. Bu tip kaynak makinaları genellikle örtülü elektrodla ark kaynağı için kullanılır. Ancak gerekli görülür ise koruyucu gaz ve/veya yüksek frekans aygıtları ilave edilerek TIG kaynak yönteminde de kullanılabilir. Bu kaynak makinalarından genellikle doğru akım elde edilir [26].

#### **3.7.2. Transformatör-Redresör Tipi Kaynak Makinaları**

TIG kaynak yönteminde transformatör-redresör tipi kaynak akım üreteçleri motor-jeneratör tipi akım üreteçlerine nazaran çok daha fazla ve yaygın olarak kullanılırlar. Bu makinalardan istenildiğinde alternatif, istenildiğinde de doğru akım alınabilir. Burada AC akım üreten tek fazlı transformatör, AC akımı DC çeviren bir redresörle bağlantılıdır. Dolayısıyla TIG kaynağında bu çeşit akım üreteçleriyle farklı tür metallerin kaynağı mümkün olmaktadır [26,37].

Makina üzerindeki bir kol veya düğme yardımıyla redresör veya transformatör devreye sokularak istenilen doğru veya alternatif akım alınır. Bu seçimi kaynakçı, kaynak yapacağı malzemenin cinsine göre yapar [37].

### **3.7.3. Üç Fazlı Redresör Tipi Kaynak Makinaları**

Bu tür kaynak makinalarında tek fazlı transformatör-redresör tipi kaynak makinalarının devrelerinde az da olsa görülen denge bozuklukları üç fazlı girişten dolayı azaltılmış veya yok edilmiştir. Bu kaynak makinalarından genellikle doğru akım elde edilmekte ve bir anahtar ile de hem ters kutuplamaya (elektrod pozitif) hem de düz kutuplamaya (elektrod negatif) değiştirilebilmektedir. Üç fazlı redresör tipi akım üreteçlerinin programlanabilir türleri de mevcuttur. Günümüzde en kararlı ve en stabil ark bu makinalarla elde edilmektedir [26,37]. Piyasada TIG kaynak yönteminde en çok kullanılan kaynak makinalarıdır.

### **3.7.4. Transformatör Tipi Kaynak Makinaları**

Transformatör tipi kaynak makinalarından sadece alternatif akım alınabildiğinden bu tip akım üreteçleri TIG kaynağında tercih edilmemektedir. Ancak bu makinalar sadece alüminyum ile magnezyumun TIG kaynağı için uygun olabilir [26,37].

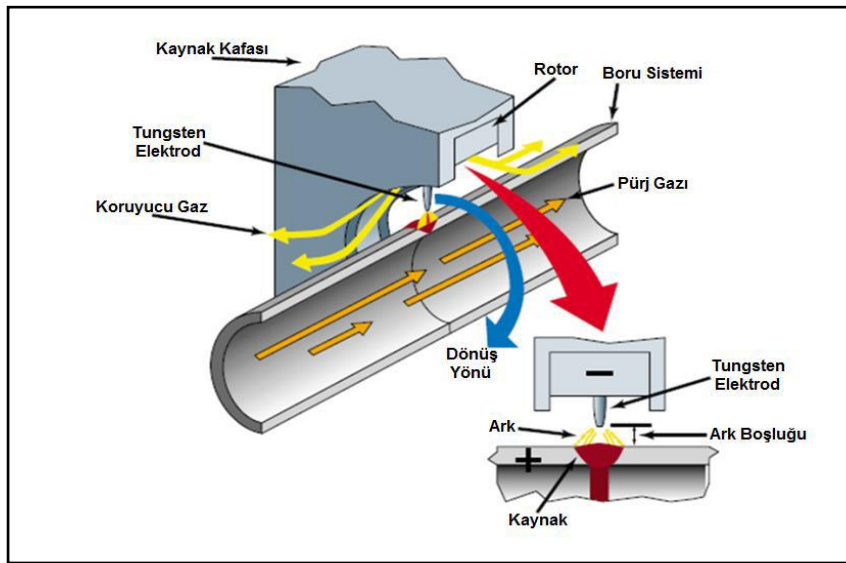
## **3.8. ORBİTAL TIG KAYNAĞI**

Orbital TIG kaynak yöntemi, alında TIG kaynak yönteminin aynısı olup, çevresel kaynaklı birleştirmelerde, kaynak torcunun mekanize olarak kaynaklı imalatı gerçekleştirdiği bir birleştirme yöntemidir [38].

Yatay ya da dikey olarak bir hizaya getirilmiş iki borunun alın-alına uygulamasında kullanılmak için geliştirilmiş; torçun borulardan birisi üzerinde bulunan taşıyıcı (traktör) yardımıyla, bir yörünge üzerinde boru çevresince yaptığı dönme sonucunda operasyonun gerçekleştirildiği mekanize sistemlerdir [39].

Yöntem ilk olarak 1960'lı yıllarda uzay ve havacılık sektöründe hidrolik devrelerin birleştirilmesinde kullanılmıştır. 1990'lı yıllardan sonra yöntem, mikro-işlemci teknolojisindeki ilerlemeler bağlı olarak daha yaygın ve tercih edilir hale bir gelmiştir [40].

Orbital yöntemde kaynakla birleştirilecek parçalar sabit durmakta, tungsten elektrot mekanize/otomotize olarak boru çevresinde hassas bir şekilde dönerek çevresel kaynak işlemini gerçekleştirmektedir. Her kaynak işleminin tekrarlanabilir ve yüksek hassasiyette olabilmesi için, tungsten elektrot cinsi ve uç geometrisi, boru parçalarının kaynak ağız hazırlığı, iki boru arasındaki mesafe, kaynak yüzey koruma ve kök koruma gazları vb. kaynak değişkenlerinin çok hassas bir biçimde hazırlanması gerekmektedir [38]. Şekil 3.8’de orbital TIG kaynak yönteminin şematik olarak resmi verilmektedir.



Şekil 3.8. Orbital kaynak yönteminin şematik olarak gösterimi [38].

Normalde kapalı tip kaynak başlıkları, havanın olumsuz etkilerinden kaynak bölgesini koruyan çember ile birlikte çok iyi bir hizalamayla 1.6 mm ile 152 mm çapında, max. 3.9 mm et kalınlığında boruların birleştirilmesinde kullanılır. Eğer daha büyük çap ve et kalınlıklarında birleştirme istenirse bu durumda genellikle açık tip başlıklar tercih edilirler [40].

Orbital kaynak tekniğinin kullanımı esnasında kaynak ağzının ve boru hizalanma işlem basamaklarının özenle hazırlanmasını gerektirir. Kaynak ağızları otomatik olarak ile açılmamış ise yüzeylerin düzgünlüğüne ve kaynak ağzının homojenliğine azami özen gösterilmelidir. Yapılan kaynak işlemleri API 1104 standardına göre hatasız ve kaliteli bağlantılar elde edebilmek amacıyla borularda bir eksen kaçıklığı

olmaksızın çok iyi bir şekilde alıştırılması gerekir. Özellikle spiral kaynaklı imal edilen borularda ovallik bozulacağından boruların hizalanması işlemine bilhassa itina gösterilmelidir. Ayrıca, boru dilimleri arasındaki hizasızlığın 2 mm'yi geçmemesi önerilmektedir.

Orbital kaynak yöntemi sadece boru-boru birleştirmeleri için değil, çok sayıda boru-gövde birleştirmelerinin bulunduğu kazan, ısı eşanjörleri ve basınçlı kap üretiminde de hızlı, güvenilir ve ekonomik olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [41].

### **3.8.1. Orbital Kaynak Sistemlerinin Kullanım Nedenleri**

Kaynaklı imalat sektöründe Orbital kaynak sistemlerinin kullanılmasının bir çok nedeni vardır. Yüksek derecede kaliteli kaynaklar, max. hızda ve tekrarlanabilir aynı kaynak kalitesi sağlayabilme kabiliyetinden dolayı kullanıcılara pek çok avantaj sağlamaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır;

- Üretkenlik: Bu sistem, manuel olarak yapılan kaynaklara göre üretkenlikte büyük oranda başarılıdır.
- Kalite: Doğru bir biçimde programlanmış orbital sistemden elde edilen kaynağın kalitesi, manuel olarak yapılan kaynağa göre çok daha üstündür. Yarı iletken sanayi ve ilaç sanayinde istenilen kaliteyi yakalamanın en önemli nedeni budur.
- Tutarlılık: Kaynak işlemi sonrasında meydana gelen hata ve kusur faktörünün yok edilmesi ve aynı kalitede tekrarlanabilirlik için önemlidir. Ayrıca kaynak programlarının kullanılmasıyla birlikte parametrelerin otomatik seçimi sayesinde manuel seçimde yapılan yanlışlıklar giderilebilir.
- Beceri seviyesi: İmalat süreçlerinde sertifikalı kaynakçıların bulunmasındaki zorluklar. Orbital kaynakta ise sadece operatör belgesinin yeterli olması.

- Özellikle büyük parçaların döndürme zorluğunun olması, orbital kaynağın tercih sebebi olabilir.
- Kaynak aparatının yeterli alan olmaması nedeniyle sığmadığı durumlarda da orbital sistem kullanılabilir. Özellikle kaynakçının sığmakta ve ulaşmakta zorluk çektiği dar alanlarda bu kaynak metodu kullanılabilir. Orbital kaynak sistemlerinin kullanılması için bir çok sebep vardır. Bunlardan bir tanesi de muayenelerdir. Kaynak yapılmış dar bir alanda muayenenin güç olduğu durumlar bunlara tipik bir örnektir. “Otomatik bir makinada belli bir program dahilinde yapılmış kaynak her zaman aynı kalitede olacaktır” düşüncesiyle önce pilot bir çalışma yapıp ilgili yöntem ile muayene edilir ve bundan sonraki kaynaklar da değişkenler sabit tutularak aynı kabulü görmesi sağlanır [42].

### 3.9. TIG KAYNAK YÖNTEMİNİN UYGULAMA ALANLARI

TIG kaynak yöntemi, kaynak yapılabilir tüm demir ve demirdışı malzeme ve uygulamalar için tercih edilen çok yönlü bir birleştirme yöntemidir. Ana uygulama alanları paslanmaz çelikler, alüminyum ve nikel alaşımlarıdır. Stabil ve kararlı bir ark sergileyişi, cüruf ve çapaksız yüksek kaliteli birleştirmeler temin eder. TIG kaynak yöntemi, nükleer reaktör imalatı gibi kalite beklenti seviyesi yüksek olan konstrüksiyonlar için ilk tercih sebebidir. [43].

TIG kaynak yönteminin endüstride tercih edildiği bazı önemli alanlar şunlardır [5].

- Alüminyum konstrüksiyonlar; mutfak malzemeleri, boru kaynakları, taşıt üretimi, teleferik kabinleri.
- Bakır ve alaşımları; kimya sanayi ve elektro-teknikte kullanılan bakır donanımlar.
- Sert yüzey dolgu kaynağı; sübapların oturma yüzeyleri, aşınan parçaların tamamlanması.
- İnce saclarla yapılan konstrüksiyonlar. DKP çelik saclar ve karoseri imalatı
- Özel işler; transformatör ve çinko kaplı saclar, nükleer reaktörlerin inşasında kullanılan farklı malzemelerin üretimi.

### 3.10. TİTANYUMUN TIG KAYNAK ÇALIŞMALARINDAN ÖRNEKLER

Kumar ve arkadaşları [44], çapı 9,5 mm kalınlığı 0,83 mm olan Ti-3Al-2,5V (ASM4945) alaşımlarını lazer ile temizleyerek darbeli TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve optik mikroskop, SEM, EDS ve XPS çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Kusursuz bir kaynak eldesi için darbeli ark kaynak parametrelerinin optimize edildiği, lazerle temizlenen borularda hatasız kaynaklara ulaşıldığı, lazer temizlemenin geleneksel temizleme işlemlerine göre daha az bakım, daha az yer kaplama ve minimum işletme harcaması sağladığı rapor edilmişlerdir. Ayrıca lazer temizlemenin kaynak sistemlerine kolayca entegre edilebileceği bildirilmiştir.

Chen ve Pan [45], 3,2 mm kalınlığında ticari sıcak haddelenmiş Ti-6Al-4V alaşımları ısı girdisini azaltan ve yüksek nüfuziyet sağlayan dinamik kontrollü plazma ark kaynak yöntemi, TIG ve geleneksel plazma ark kaynak yöntemleri ile birleştirerek; optik mikroskop, mikrosertlik ve SEM testleri ile kıyaslamışlardır. Dinamik kontrollü plazma ark kaynak yönteminin TIG ve geleneksel plazma ark kaynak yöntemlerine göre ısı girdisi ve kaynak havuzu hacmini daha da az tutmak için etkin bir yöntem olduğunu, ayrıca dinamik kontrollü plazma ark kaynak yönteminin tane boyutu azaltılması ve ergime bölgesinde sert martenzit fazların oluşumunu engellemesinin önemli avantajlar sağladığını rapor etmişlerdir. Ek olarak dinamik kontrollü plazma ark kaynak yönteminin titanyum alaşımlarının kaynağında istenilen kırılma yüzeylerinde süneklik ve sertlik değerlerinde artışı sağladığını bildirmişlerdir.

Kaya ve arkadaşları [1], 1.5 mm kalınlığında ticari saf (Grade 2) titanyum levhaları, iki farklı akım çeşidi kullanarak (geleneksel akım ve darbeli akım) TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Çalışmada 200x75 mm ebatların giyotin makas ile kesilen levhalar % 99 saflıkta aseton ile temizlenmişlerdir. TIG kaynak yöntemini kullanarak titanyum levhaları farklı akım türlerinde birleştirmiş ve elde ettikleri birleştirmelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynaklı numuneleri makro olarak gözle muayene etmişler, darbeli akım ile birleştirilen malzemelerde ısı girdisinin düşüklüğünden dolayı geleneksel akımla birleştirilen numunelere göre



daha dar bir kaynak bölgesi (kaynak metali ve ITAB) meydana getirdiğini, TIG kaynağı ile farklı akım kullanılarak birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgelerinden ölçülen sertlik değerlerinin esas metalden daha yüksek olduğunu, çekme testi neticesinde kesit daralması ve kopmanın ana metalde meydana geldiğini, kaynaklı numuneleri birbirleriyle karşılaştırmak için yapılan darbe çentik deney sonuçlarına göre, kaynaklı numunelerin tümünden alınan tokluk değerlerinin, ana malzemedan daha düşük olduğunu ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, ısı girdisine bağlı olarak kaynak bölgesindeki tanelerin irileştiğini ayrıca kaynak metalinde ikizlenmelerin oluştuğunu belirtmişlerdir.

Karpagaraj ve arkadaşları [46], 1.6 ve 2 mm kalınlığındaki saf titanyum malzemeleri hava soğutmalı torç kullanarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak işlemlerinde üç farklı kaynak akımı (75-90-105 A) ve üç farklı kaynak hızı (250–275–300 mms-1) ve saf argon gazı kullanmışlardır. Kaynak sonrası kaynaklı numunelerin sertlik, mekanik ve mikroyapı özelliklerini ile kırık yüzey morfolojilerini incelemişlerdir. Çekme testi sonucunda kaynaklı numunelerden 383 MPa çekme dayanımı ve % 15.7 uzama elde etmişlerdir. Sertlik çalışmaları sonucunda ergime bölgesindeki sertlik 191 HV, ana malzeme ise 153 HV olarak ölçülmüştür. SEM’de yapılan kırık yüzey incelemelerindeaşırı ısı nedeniyle çukurcuklu kırılmaların meydana geldiğini belirtmişlerdir. Eğme testlerinde ise kaynaklı numunelerin güzel süneklilik sergilediklerini rapor etmişlerdir.

Gope ve arkadaşları [47] 2.5 mm kalınlığında Ti-6Al-4V alaşımını 12 l/dk argon gaz koruması altında modifiye edilmiş bir üç garklı kaynak akımı ve üç farklı kaynak ilerleme hızı kullanarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Kaynak sonrası kaynaklı numunelere çekme ve sertlik testleri uygulamışlardır. Ayrıca numunelerin kaynak ergime bölgesi ve ITAB bölgeleri mikroyapısal olarak incelenmiştir. Çekme testi sonucunda, düşük akım ve yüksek kaynak hızında olan numunenin, çekme dayanımının altına kırıldığını ve numunelerin çoğunun ana metal bölgesinde kırıldığını belirtmiştir. Ayrıca metalin uzamasının öncelikle ısı girdisinden etkilendiğini, yüksek ısı girdisinin sertliği ve kırılabilirliği artırarak düşük sünekliliğe neden olduğunu rapor etmişlerdir. Sertlik ve mikroyapı çalışmaları sonucunda ise

kaynak metalinden ana malzemeye doğru azaldığını, mikroyapının ise ana metalde ergime bölgesi ve ITAB'dan düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Uygur ve Doğan [48] ticari saflıktaki 3 mm kalınlığındaki titanyum malzemeleri üç farklı kaynak akımı kullanarak TIG kaynak yöntemi ile saf argon gazı ortamında birleştirmişler ve kaynaklı birleştirmelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerini araştırmışlardır. Çekme deneyleri neticesinde kopmanın ITAB'da gerçekleştiğini, eğme testleri sonucunda kaynak bölgesinin 140 dereceden daha fazla eğildiğini belirtmişlerdir. Sertlik testleri sonucunda en düşük amperde birleştirilen numunede düşük ısı girdisi ve hızlı soğumadan dolayı sertliğin daha yüksek olduğunu ve mikroyapı çalışmalarında da kaynak metali, ITAB ve ana malzemenin farklı mikroyapılar sergilediklerini rapor etmişlerdir.

Gao ve arkadaşları [49], 0.8 mm kalınlığa sahip Ti6Al4V titanyum alaşımlı levhalar, sırasıyla darbeli Nd: YAG lazer ışını kaynağı (LBW) ve gaz tungsten ark kaynağı (TIG) kullanılarak birleştirmişler ve kaynaklı numuneleri kalıntı gerilmeler, kaynak geometrisi, LBW ve TIG kaynağı ile üretilen kaynakların mekanik ve mikroyapı özelliklerini birbirleriyle kıyaslamışlardır. Çekme deneyi sırasında, yüksek hızlı bir kızılötesi kamera yardımıyla, LBW ve TIG kaynağına karşılık gelen çekme örneklerinde plastik gerginliğin değişimi analiz edilmiştir. TIG ile karşılaştırıldığında, LBW'nin kaynak metali, küçük genel kalıntı, ince mikroyapı, dar ısıdan etkilenmiş bölge (ITAB) ve yüksek sertliğe sahip olduğunu ve LBW kaynak yönteminin, daha yüksek mukavemet ve süneklikli bağlantılar üretebildiğini rapor etmişlerdir. Sonuç olarak darbeli Nd: YAG lazer kaynağının, ince Ti6Al4V titanyum alaşımlı levhaların TIG kaynağından daha uygun olduğu belirtmişlerdir.

## BÖLÜM 4

### LAZER KAYNAĞI

Lazer ışın kaynağı, birbirinin aynı veya birbirinden farklı, bir ya da birden fazla malzemedен parçaları bir araya getirerek yapılan bir ergitmeli birleştirme işlemidir. Kaynak hızının yüksek olması, çok kolay bir biçimde otomatikleştirilebilir olması ve işlem sırasında operasyonun izleme imkanı ile sürecin kontrol edilebilirliği, lazer ışın kaynağını modern endüstride geniş bir alanda kullanılan bir ergitmeli birleştirme yöntemi haline getirmiştir. Lazer kelimesi, “LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, ışınmanın uyarılmış yayını ile ışığın güçlendirilmesi manasına gelen kelimelerin ilk harflerinin bir araya getirilmesiyle meydana gelmiştir [50].

#### 4.1. KAYNAĞIN TARİHÇESİ

Lazerin prensipleri, ışık yayını kuramı ve uyarılmış yayını ifadesi ile 1917 yılında Albert Einstein tarafından belirlenmiştir. İlk defa 1951 yılında, C. H. Townes tarafından ilk MASER (Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation-Işınmanın Uyarılmış Yayını ile Mikrodalga Yükseltilmesi) icat edilmiştir. 1958 yılında da C. H. Townes ve A. L. Schawlow ilk detaylı Optik Maser’i yani Lazer’i icat etmiştir. 1960 yılında bu iki bilim insanı ilk Laser’in patentini almışlardır. Aynı yıl Hughes Araştırma laboratuvarındaki çalışmasıyla Dr. T. Maiman ilk Rubin (Ruby) lazeri bulmuştur. 1961 yılında Bell laboratuvarlarında A. G. Fox ve T. Li optik resonatörlerin teorik analizini ortaya koymuşlardır. 1964 yılında yine aynı laboratuvarlarda J. E. Geusic, H. M. Marcos, L. G. Van Uteit ilk çalışan Nd: YAG lazeri bulmuşlardır. Aynı yıl yine aynı yerde Kumar N. PATEL tarafından CO<sub>2</sub> lazer bulunmuştur, Hughes Araştırma laboratuvarında W. Bridges tarafından Argon lazeri icat edilmiştir [50].

## 4.2. LAZER KAYNAĞI TANIMI VE ÖNEMİ

Lazer, en düşük ısı girdisi ile nüfuziyeti en üst düzeye yükseltmek için mükemmel bir kaynak kalitesi sağlayan yüksek güç yoğunluğuna sahip bir işlemdir. Klasik olarak kaynak yapılabilen hemen hemen tüm malzemeler, lazer ışın kaynak yöntemi ile de kaynak yapılabilir. Bu kaynak yöntemi kalite, hız ve ekonomi bakımından, diğer geleneksel yöntemlere göre daha avantajlıdır [51].

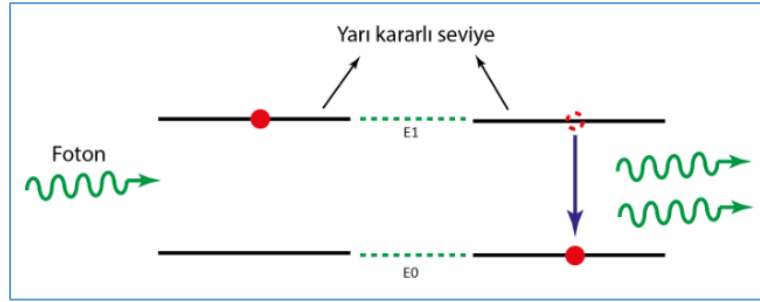
Lazer kaynak yöntemi; yüksek kaynak hızının yanında, düşük çarpılma, derin nüfuziyet ve düşük toplam ısı girdisi sebebiyle diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha üstün olup, endüstrinin birçok alanında tercih edilmektedir. Ayrıca, lazer ışınının hassas bir biçimde odaklanması ve kaynak bölgesine istenilen bir açıyla yönlendirilmesi, kaynak bölgesinin (kaynak metali ve ITAB) diğer ark kaynak yöntemlerine göre çok daha dar alanda olmasını sağlar. Lazer ışın kaynağı en modern kaynak yöntemlerinden biridir. Özetle bu yöntemin en önemli avantajları; düşük çarpılma, yüksek üretkenlik ve kolay otomasyondur. Ayrıca lazer kaynağında derin nüfuziyet ve yüksek kaynak kalitesi ile birlikte kaynak bölgesinin (kaynak metali ve ITAB) alanının diğer kaynak yöntemlerine göre daha dar bir alanda oluşu büyük avantajlar sağlar.

## 4.3. LAZERLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Lazer kaynağında ısı kaynağının ışık enerjisi olması sayesinde, iş parçasında kaynak yapılacak noktaya tamamen odaklanması sayesinde kaynak yerinin yorulma dayanımının çok iyi olması sağlanır [52].

Herhangi bir ortamda, belirli bir elementin atomları, molekülleri veya iyonları farklı enerji düzeyi sergilerler. Bu enerji düzeyleri arasında gidip gelirken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit miktarda fotonlar soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya eğilimli yüksek enerjili bir atom, tam olarak aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye “teşvik edilebilir” ve yayımlanan uyarıcı ışıkla bağdaşık (senkronize) olur [53].

Lazer ışını elde etmenin yöntemlerinden birisi de gaz kullanmak ile mümkündür. Piyasada en sık kullanılan gaz karbondioksit gazıdır. Karbondioksit atomu elektrik, ışık ya da başka bir şekilde uyarıldığında, diğer bir ifade ile karbondioksit gazına enerji verildiğinde atomun elektronları uyarılır ve düşük enerji düzeyinden, yüksek enerji düzeyine geçer ( $E_0 \rightarrow E_1$ ). Ancak bu uyarılmış elektron sonsuza dek bu yüksek enerji seviyesinde duramaz. Bu nedenle uyarılan elektron, yüksek enerji düzeyinden düşük enerji düzeyine geçer ( $E_1 \rightarrow E_0$ ). Geçiş esnasında yüksek enerji düzeyi ile düşük enerji düzeyi arasındaki fark kadar enerjiyi foton olarak dışarıya bırakır. Bırakılan bu foton başka bir atomun elektronunu harekete geçirerek benzer şekilde foton açığa çıkmasına olanak sağlar. Lazerin çalışma prensibi Şekil 4.1’de şematik olarak verilmiştir [54].



Şekil 4.1. Lazerin çalışma prensibi.

Lazer ışınının meydana gelmesi için gerekli olan dış enerji, genel olarak sisteme kimyasal, elektriksel ve optik olarak gönderilir. Günümüzde, endüstride kullanılan en yaygın uyarma yöntemi  $CO_2$  lazerlerde kullanılan yüksek frekanslı elektrik akımı ve katı hal (Nd: YAG ve Ytterbium Fiber vs.) lazerlerde kullanılan flaş lamba ve diyotlardır [55].

#### 4.4. LAZER SİSTEMİNİN TEMEL ELEMANLARI

Lazer sistemlerinin birçoğu genellikle dört temel kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar:

- Lazer üretici (aktif materyal),
- Pompalama kaynağı,

- Optik rezonatör,
- Odaklama optik elemanları'dır [17].

#### **4.4.1. Lazer Üretici (Aktif Madde)**

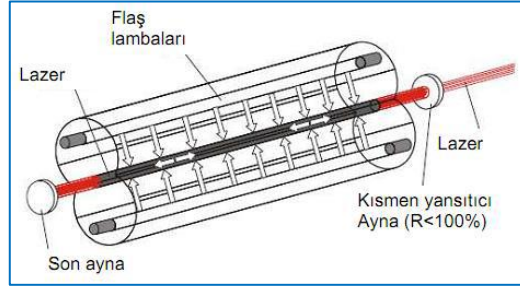
Aktif maddeler, lazer ışınlarını elde etmek için kullanılan maddelerdir. Aktif maddeleri; katı, sıvı ve gaz olarak üç ana grupta toplayabiliriz. Gaz lazerleri, kendi arasında atom, molekül, iyon, excimer lazerler şeklinde sınıflandırılabilir. Sıvı lazerler boya lazerler olup, katı lazerler ise piyasada yine en çok tercih edilen lazerlerden biri olan Nd:YAG lazeri ve bunun yanında yarı iletken-diyod lazerleri gösterilebilir [56].

#### **4.4.2. Pompalama Kaynağı**

Lazer aktif madde atomlarının, moleküllerinin uyarılması, alt enerji düzeylerinden üst enerji düzeylerine varmaları için gerekli olan enerjiyi sağlamaktadır. Üst enerji düzeylerine ulaşan atomlar, moleküller kendiliklerinden spontan alt enerji düzeylerine düşerken ışık saçarlar. Lazer aktif maddeye beslenen enerji, devir sürekli kaldığı müddetçe, ışık, ışın üretimi süreklilik kazanır. Lazer üretiminde pompalama enerji kaynağı olarak, elektrik enerjisi, doğru akım, ışık, ışın, ısı enerjileri, atom enerjisi, kimyasal reaksiyon enerjisi, direkt güneş enerjisi, diyod laser enerjisi gibi enerjiler kullanılmaktadır [57].

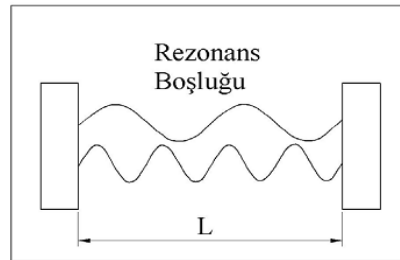
#### **4.4.3. Optik Rezonatörler**

Optik rezonatör, foton yayılımı için bir yol oluşturur. Optik rezonatörün asıl görevi lazerlerin fiziksel boylarının kısılmasını sağlamak ve elektromanyetik mod profilini meydana getirmektir. Lazer oluşumunun başlangıcında, uyarılmış emisyonla yayınan fotonlarla birlikte; kendiliğinden emisyonla yayınan fotonlarda gözlenir. Eksenel ışın demeti, aktif ortamda rezonatör aynalarına çarparak ileri-geri hareketlerle gelişimini sürdürür. Şekil 4.2'de Nd: YAG lazer kovuğu ve aynalar gösterilmektedir [17].



Şekil 4.2. Nd: YAG lazer kovuğu.

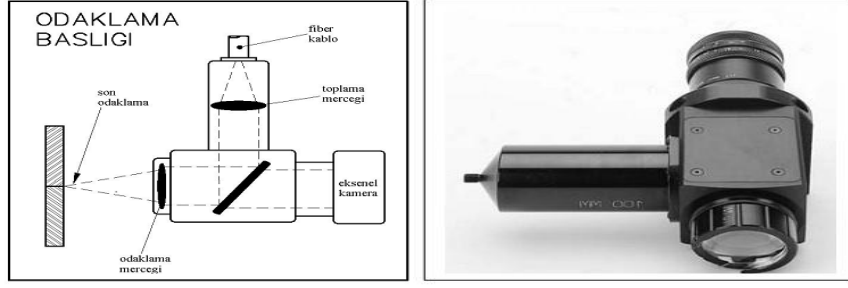
Sonunda, faz uyumlu bir düzlem dalga elde edilir. Ayrıca bu ortam, dalga yükseltici gibi davranarak görev yapmaktadır. Lazer ışının dalga boyu ile aynalar arasındaki mesafe uyum içerisinde. Aynalar arası mesafe, yarım dalga boyunun tam katına eşit olduğu zaman optik rezonatör rezonansa geçer. Bunun anlamı rezonatörde duran dalga oluşumudur. Optik rezonatörle bir optik geri besleme sağlanmakta ve böylelikle bir osilasyon oluşmaktadır. Şekil 4.3’de optik rezonatörde dalga oluşumu görülmektedir [17].



Şekil 4.3. Optik rezonatörde dalga oluşumu.

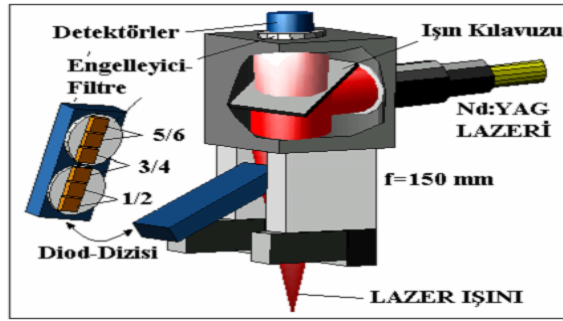
#### 4.4.4. Odaklama Optik Elemanları

Odaklama başlığı, lazer ışınını verimli bir biçimde fiberin sonundan parçanın üzerine ulaştırır. Odaklama başlığına aksenal tür bir kamera yerleştirilir. Böylelikle kaynaktan önce ve kaynak sırasında kaynak bölgesini, lazer ışınının yolu boyunca doğrudan izlemek mümkün olmaktadır. Şekil 4.4’de görüldüğü üzere odaklama dağıtıcı ve toplayıcı optik merceklerde sağlanmaktadır.



Şekil 4.4. Odaklama başlığı prensip şeması ve görünümü.

Lazer ışını operasyon bölgesine fiber optik bir kablodan geçerek ulaştırılabilir. Bu kablo; lazer taşıyıcı merkezi bir öz, ışığın tamamının merkezde kalmasını sağlayacak biçimde ayna giydirilmiş bir kısım ve en dış bölümde ise ışığın dışarı sızmasını engelleyecek bir metal ceket giydirilmiş biçimde düzenlenmiştir. Fiberin öz çapı, lazer ışınının gücüne göre farklı çaplarda yapılabilir. Şekil 4.5’de bir Nd:YAG lazerine ait odaklama başlığı görülmektedir [17].



Şekil 4.5. Bir Nd:YAG lazeri odaklama başlığı.

#### 4.5. LAZER IŞINININ ÖZELLİKLERİ

Elektromanyetik spektrumda görünür ışık ve kızıl ötesi alanda yer alan lazerin fiziksel bazı özellikleri şunlardır [58].

Monokromatizm (tek renklilik, fotonların birbirleriyle uyumu): Lazer ışınının en temel özelliklerinden birisi tek renkli oluşudur. Bir grup fotonun tek bir frekansa ait olması durumuna tek renklilik (Monochromaticity) adı verilir ve lazerdeki tüm fotonların aynı dalga boyuna sahip olması nedeniyle lazer ışığı tek renkli görünür



[59]. Buradan çıkan ışınlar bir prizmadan geçirilirse değişik birçok renge ayrılır. Genellikle her bir ışığın kendine özgü bir dalga boyu vardır ve bir lazer ışınının rengi, merkezi dalga boyu ile ifade edilir. Ayrıca da dalganın kendisini tekrarladığı mesafe de “dalga boyu” olarak bilinir ve “ $\lambda$ ” simgesi ile gösterilir [60].

Koherans (uyumluluk, dağılmazlık): Lazer ışığı haricindeki başka kaynaklarından elde edilen ışık, genellikle aynı fazda (bağdaşık) değildir. Bu ışınlar tabiatında birbirleri ile son derece uyumlu ışınlardır. Frekansı, fazı ve yönü aynı olan iki dalga birbiriyle uyumlu (coherece) olan dalgalar olarak isimlendirilir [59].

Küçük diverjans (Küçük oranlarda dağılırlık): Normal bir ışık, çok kısa bir süre içerisinde ve belirli mesafede yayılım göstermektedir. Lazer ışını ise küçük uzaksama göstermesi sebebiyle, uzak mesafelere saç kılı kalınlığında ulaşabilmektedir. Bu sebeple lazer ışını için doğrultulmuş ışın ibaresi kullanılmaktadır [58].

Enerji taşıyıcılık: Lazer ışınlarının yüksek oranda bir elektromanyetik alan gücü bulunmaktadır ve bu özellikleri sebebiyle de enerji taşıyıcıdırlar. Bu ışınlar çok küçük alanlara bile yoğun bir enerji gönderirler. Radyant enerjinin diğer türlerine benzer biçimde absorbe edilebilir, yansıtılabilir ve iletilebilirler [58].

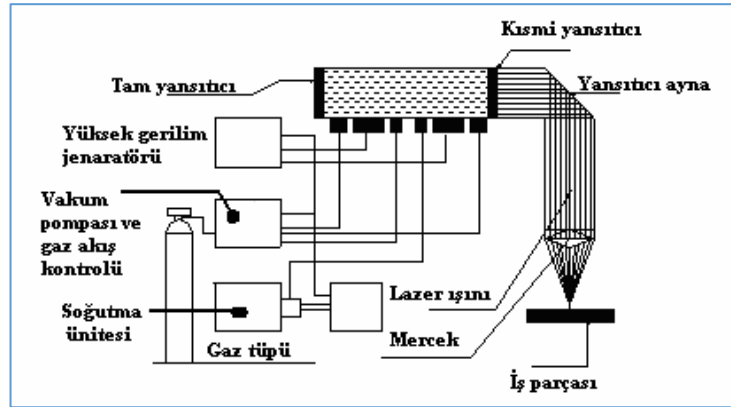
#### **4.6. KAYNAK İŞLEMLERİNDE KULLANILAN LAZERLER**

Endüstride sıklıkla kullanılan lazer ışının birçok çeşitleri bulunmaktadır. CO<sub>2</sub> lazeri, katı hal (Nd: YAG) lazeri, iyon lazeri, fiber lazerler, yarı-iletken diyot lazerler ve excimer lazeri bunlardan önemli olanlardır. Ancak ışınla kaynak/kesme için genellikle CO<sub>2</sub> lazeri ve katı hal (Nd: YAG) lazerleri tercih edilmektedir. Nd: YAG katı hal lazer yöntemi metalik malzemelerin mikro kaynak/kesme işlemlerinde, CO<sub>2</sub> lazer yöntemi ise makro ölçüde kaynak/kesme işlemlerinde tercih edilir. Uygulamada lazer ışın kaynağı; punta ve nüfuziyet kaynağı olmak üzere iki temel biçimde kullanılmaktadır [5].

#### 4.6.1. CO<sub>2</sub> Lazeri

Karbondioksit lazerleri kullanımı günümüzde, malzeme işleme uygulamalarında gittikçe artmaktadır. Kesme, ergitme, delme ve malzeme üzerindeki birçok diğer yüzeysel modifikasyonlar daha geleneksel imalat yöntemleri yerine, CO<sub>2</sub> lazer ile daha düşük maliyete yapılabilmektedir [59].

Lazer tüpü içerisinde genellikle CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve helyum gazları karışımı bulunur, lazer ortamının basıncı yaklaşık olarak 40 mbar ve ışığın gücü 10-20 kW arasında değişebilir. Günümüzde özellikle otomotiv sektöründe kullanımında robotlar yardımıyla uygulanarak otomatik hale getirilmiştir. CO<sub>2</sub> lazeri metal olmayan malzemelerin bazı türlerinde de uygundur. CO<sub>2</sub> lazerinin şematik resmi Şekil 4.6'da verilmiştir [61].



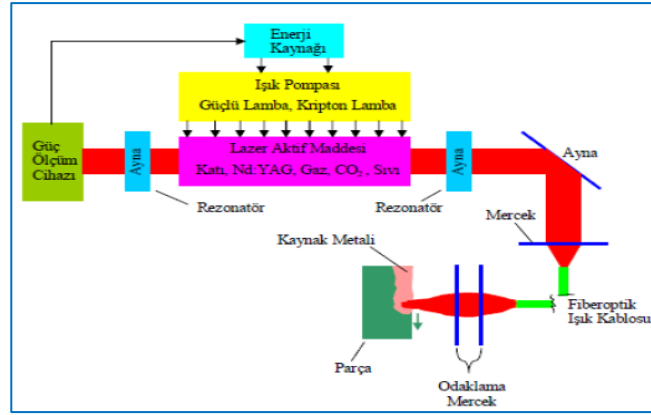
Şekil 4.6. CO<sub>2</sub> lazerinin şematik resmi.

#### 4.6.2. Katı Hal (Nd:YAG) Lazeri

Genel olarak silindirik bir çubuk şeklindeki kristalin iki ucu parlatılıp yansıma önleyici bir madde ile kaplanır. Daha sonra bu kristal, metalik bir kap içerisinde sabitlenir. Kap içerisinde uyarıcı olarak kullanılacak yonteme bağlı olarak özel flaş lambalar ve yansıtıcı aynalar yerleştirilir. Dış yüzeyinden çok yüksek enerjili ışık ile uyarılan Nd:YAG kristali, 1.064 nm dalga boyunda lazer ışını üretir [62]. Nd:YAG lazer sistemlerinin iki sürümü bulunmaktadır. Bunlardan birincisi uzun atımlı (milisaniye), ikincisi ise Q-anahtarlı sürümleridir.

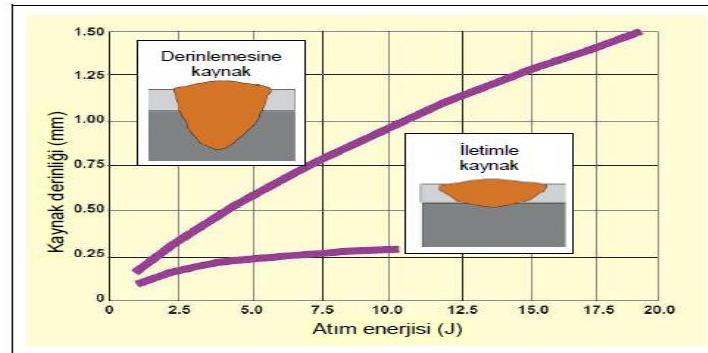
#### 4.7. LAZER KAYNAK YÖNTEMLERİ

Yüksek güç yoğunluğu ( $10^6$ – $10^8$  Wcm<sup>2</sup>) olan lazer ışını ve kolayca yönlendirilebilirlik özelliklerinden dolayı endüstride bir ısı kaynağı olarak kaynak/kesme işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [63]. Bu sayede birleştirilecek/kesilecek bölgeye istenilen miktarda enerji bölgesel olarak gönderilebilmektedir. Şekil 4.7’de bir lazer ışın cihazı ve elemanları şematik olarak gösterilmektedir. Burada ışık demeti lazer türüne göre ayna ve mercek yardımıyla veya ışık kablosu ile istenilen yere yönlendirilebilmektedir [64].



Şekil 4.7. Lazer ışın cihazının şematik yapısı.

Lazer ışınının enerji yoğunluğuna bağlı olarak iki çeşit yöntemi bulunmaktadır Bunlardan ilki ince metallerin birleştirilmesinde kullanılan iletimsel lazer ve ikincisi ise daha kalın malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan derinlemesine kaynaktır. Şekil 4.8’de derinlemesine ve iletimle lazer kaynağın paslanmaz çelik malzemeler üzerinde kaynak nüfuziyetine olan etkisi verilmiştir [17].



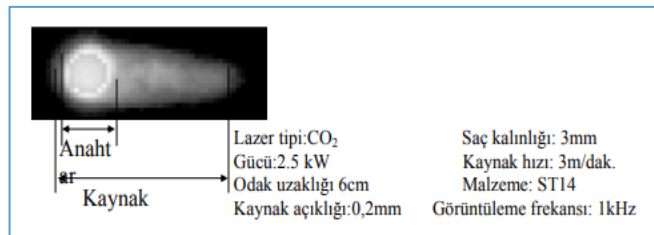
Şekil 4.8. İletim ve derinlemesine kaynak işleminin karşılaştırılması [63].

Bu iletimsel ve derinlemesine yöntem arasındaki en belirgin fark, iletim kaynağında, birleştirme esnasında oluşan kaynak banyosunun sürekli olması, nüfuziyet kaynağında ise, lazer ışını sıvı banyo içerisine nüfuz ederek ergimiş sıvı metal havuzunu ikiye ayırmasıdır. Burada oluşan boşluğun anahtar deliğine benzemesi, bu yönteme anahtar deliği (key hole) kaynağı da denmesine sebep olmuştur [63].

#### 4.7.1. Derinlemesine Nüfuz Eden Lazer Kaynağı

Derinlemesine nüfuz eden lazer yöntemi (Key hole laser welding) ile elde edilen lazer kaynağına “Anahtar Deliği” (klavuz çukur) anlamına gelen “KEY HOLE” yöntemi de denir. Eğer, lazer ışını yeterli güç yoğunluğuna sahip ise operasyon yapılacak malzeme yüzeye yönlendirilirse anahtar deliği elde edilir. Yoğun ışın demetinin gücü ile malzeme buharlaştırılarak bir delik oluşturulur. Bu anahtar deliğinin oluşturulduğu yerde sıvı bir ergime havuzu meydana getirilir. Söz konusu yerde ergiyik durumda bulunan malzeme yer çekimi, yüzey gerilimi ve buhar basıncının etkisi ile stabil bir dengede bulunur [65].

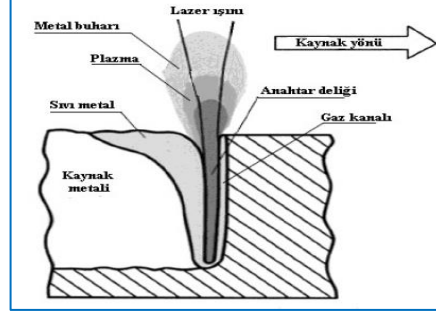
Anahtar deliği, ergiyen metal ve bunların etrafını çevreleyen katı maddeden oluşur. Bu delikte oluşan buhar basıncı, ergiyen malzemenin yüzey gerilimi ve ergiyen metalin hidrostatik basıncı ile dengelenir. Şekil 4.9’da CMOS kameradan alınan anahtar deliği görüntüsü verilmiştir [65].



Şekil 4.9. CMOS kameradan alınan anahtar deliği lazer kaynağı işlemi görüntüsü.

Sıvı metal ile plazma arasındaki basınç ve sıcaklık farklılıklarından dolayı şiddetli dolaşımların olduğu, akıcı fazlı bir buhar kanalı (klavuz çukur) oluşur ve bu oluşumun görüldüğü lazer birleştirmelerine de derinlemesine nüfuz eden lazer

kaynağı ismi verilir. Derinlemesine nüfuz eden lazer ışın kaynak uygulaması Şekil 4.10'da şematik olarak verilmiştir [63].

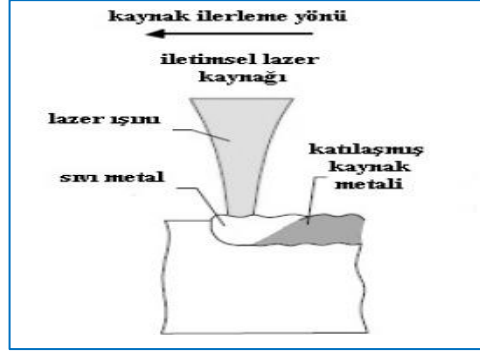


Şekil 4.10. Lazer kaynağında anahtar deliği ve plazma oluşumu.

#### 4.7.2. İletimsel Lazer Kaynağı

İletimsel lazer kaynağı, lazer güç yoğunluğunun operasyona tabi tutulacak malzemenin kaynama noktasına yükselmesine yetmediği, ancak malzemeyi sadece ergitebildiği durumlarda tercih edilir. İletimsel lazer işleminde dikiş formunun yüksek derinlik/genişlik oranına (derin nüfuziyet, az genişlik) sahip olması pek mümkün olmaz. Bunun yanında güç yoğunluğu yükseltilerek ince malzemeler birleştirilmeye çalışılırsa kaynak yerine kesme işlemi oluşur [65].

Yöntemde elde edilen lazer ışını odaklama sistemleri yardımıyla kaynak edilecek malzeme yüzeyine ya da malzemenin istenilen bölgesine odaklanır. Odaklanan ışının bir miktarı malzeme yüzeyinde absorbe edilirken bir kısmı da geri yansır. Malzeme tarafından absorbe edilen kısa süreli lazer ışınlarının etkisiyle açığa çıkan ısı, konveksiyon ve radyasyon biçiminde yatay yayılma fırsatı bulamadan ısıl iletkenliğe bağlı olarak, kalınlık ekseninde hızlı bir biçimde derinliklere dağılır. Bu sebeple ince malzemelerde lazer ışınının odak çapındaki silindirik bölümde sıcaklığın, derinlik boyunca homojen olduğu kabul edilir [63]. İletimsel lazer ışın kaynağı Şekil 4.11'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.11. İletimsel lazer kaynağının şematik gösterimi.

#### 4.8. LAZER KAYNAK UYGULAMALARI

Lazer ışın kaynağı son zamanlarda endüstriyel üretimde önemli oranda gelişme göstermiştir. Bu gelişme, lazer kaynak işleminin anlaşılmasıyla daha da artmaktadır. Konu ile ilgilenen taraflar, lazer kaynağı uygulamalarının daha geniş çapta olması için çalışmalarını sürdürmektedirler [66]. Lazer ışın kaynağının uygulama alanları, endüstrinin gelişmesi ile birlikte, çok farklı alanlarda uygulanmaya başlamıştır. Bunlar; üretim teknolojileri, bilişim teknolojileri, sağlık teknolojileri, savunma ve uzay teknolojileri ve otomotiv teknolojileri olarak sayılabilir.

##### 4.8.1. Üretim Teknolojileri

Lazer sistemlerinin en çok kullanıldığı anan imalat sektörüdür. Özellikle üretim aşamasında çok küçük (mikron ve nano) seviyelere inilmesi, malzeme teknolojilerindeki ilerlemeye bağlı olarak, üretilen özel alaşımların talaşlı üretime karşı hassasiyetinin artması ile lazer ışın teknolojilerinin geliştirilmesinin yolunu açmaktadır. Yeni nesil akıllı imalat sistemleri, takım tezgâhları, katmanlı üretim ve üç boyutlu yazıcılar lazer ışınının üretim hatlarında kullanımını yaygınlaştırmaktadır. İmalat sanayinde lazer kullanım alanları gittikçe artmaktadır. Bu kullanımın avantajları [67];

- Çok küçük alanlara odaklanabilme kabiliyeti; 10W/cm'nin üzerindeki yüksek ışın güç yoğunluğu nedeniyle tungsten gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip

olan metaller kolaylıkla ergirler ve ısıya hassas bitişik bölgeler üzerindeki etki en azıdır.

- Lazer temassız bir ışın olarak çalıştığından kafa ile iş parçası arasında fiziksel bir temas oluşmaz. Böylelikle iş parçasında istenmeyen alaşımın, hatta bozunumu engellenmiş olur.
- Işınla kaynak/kesme süresi, tane irileşmesine, yeniden kristalleşme ve segregasyon (bölgesel ayrışma) gibi istenmeyen içyapı değişimlerine mani olacak ve hızlı bir üretim gerçekleştirecek kadar azdır.
- İşlem esnasında ısı girdisi yeterince az olduğundan, yüksek ısıdan dolayı meydana gelecek olan metalürjik etkiler ve distorsiyon az olacaktır.

#### **4.8.2. Bilişim Teknolojileri**

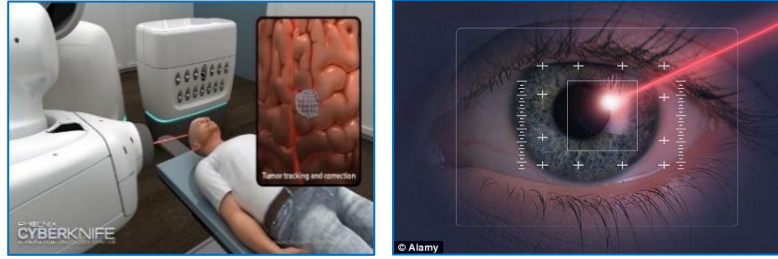
Lazerle veri aktarım işlemlerine ilk olarak 1990'larda başlanmış ve laboratuvar ortamlarında yapılan testler ile geliştirilmeye çalışılmaktadır. Böylelikle kısa mesafelerde saniyede 2.5 terabit veri aktarabilen sistemler geliştirilmiştir. Sonuç itibarıyla lazer aracılığıyla süper hızlı veri gönderimi, eş zamanlı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Son yıllarda özellikle sosyal medyada yüksek çözünürlükte veri paylaşımı kullanıcılar arasında yaygınlaşmaktadır. Bu nedenle özellikle sosyal medya firmaları lazer veri tabanlı internet teknolojisi ile hızı ve kaliteyi artırmayı amaçlamaktadırlar. Ayrıca uydu ile haberleşmede sıklıkla kullanılan elektromanyetik dalgaların ve sinyallerin girişimlere hassas olması, mesafeye bağlı olarak enerji seviyelerinde kayıpların meydana gelmesi lazerle iletişimi daha da önemli hale getirmiştir [67].

#### **4.8.3. Sağlık Teknolojileri**

Gücü yüksek ve dokuda kolayca buharlaşma yapabilen CO<sub>2</sub>'li lazerler, 1960'lı yıllarda cerrahi operasyon amaçlı kullanılan ilk lazerler olmuştur. Aşağıda lazerin sağlıkta kullanıldığı alanlar maddeler halinde verilmiştir. Şekil 4.12'de ise lazer ışınının sağlık sektöründe kullanımına örnek verilmiştir [67].

- Böbrek taşlarını kırma,

- Kalp ve damar cerrahisi,
- Beyin cerrahisi,
- Sindirim sistemi problemleri,
- Deri ve cilt hastalıkları,
- Kulak burun boğaz ve göz hastalıkları,
- Ortopedik sorunlar,
- Estetik operasyonlar.



Şekil 4.12. Lazer ışınının sağlıkta kullanımı.

#### 4.8.4. Savunma ve Uzay teknolojileri

Lazer üretim yöntemleri çok sayıdaki üstünlükleri sebebiyle savunma sanayinde geleneksel üretim metodlarının yerine tercih edilmektedir. Askeri alanlarda (kara, deniz, hava) silah, makine ve cihazların imalatında lazer ışın kaynağının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır [63]. Ayrıca;

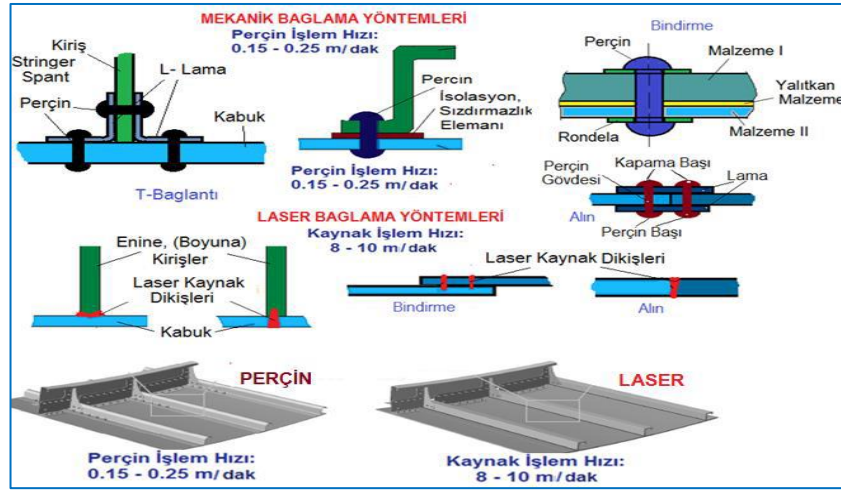
- Lazer ışını, güçlendirilmiş konvansiyonel kimyasal patlayıcı ateşli silahların geliştirilmesinde,
- Askeri alanlarda kontrol, gözetleme ve ölçme uygulamalarında,
- Askeri silahların, araç ve gereçlerin dolaylı olarak imalat süreçlerinde,
- Doğrudan kalıcı ya da geçici imha edici lazer silahların imalinde lazer teknolojisi kullanılmaktadır [67].

Tüm bunların yanında savunma sanayide, lazer algılayıcı sensörler füze veya bomba üzerlerinde konumlandırılarak bu silahlara yol göstermek ve ayrıca da yol haritasını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Lazer ışını bugünlerde özellikle



uçaksavarlarda, deniz kuvvetlerinde, insansız hava araçlarında, uçak ve helikopterlerde hedef karşısında taarruz cihazı olarak kullanılmaktadırlar [61].

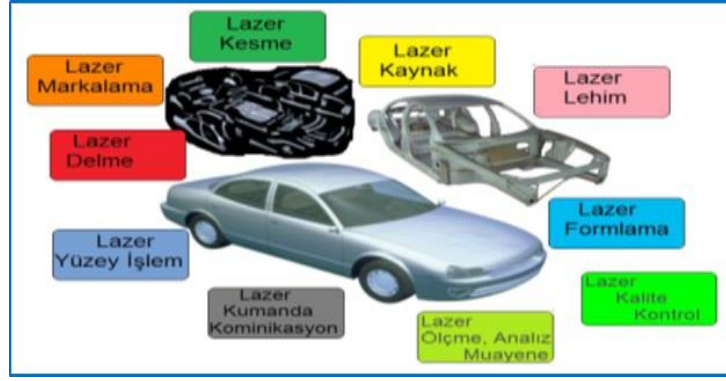
Havacılık ve uzay sanayinde, uçak ve helikopter imalatlarında perçin, cıvata gibi mekanik birleştiriciler yerine, lazer ışını ile kaynaklı birleştirmelerin tercih edilmesi ile % 20'lere varan ağırlık tasarrufu, yaklaşık bir o kadar da işçilik ve yakıttan tasarruf sağlanmaktadır. Savunma ve havacılık sanayinde mekanik bağlayıcılarla lazer ışını ile kaynak birleştirmelerinin şekilsel bir karşılaştırılması Şekil 4.13'de şematik olarak gösterilmektedir [57].



Şekil 4.13. Mekanik bağlama ile lazer kaynaklı bağlantıların karşılaştırılması.

#### 4.8.5. Otomotiv Teknolojileri

Otomotiv sektöründe lazer ışınli kaynak, kesim, lehim ve lazer ışınli delme yöntemleri bilinen klasik kaynak, lehim, kesme ve delme metodlarının yerini almıştır [68]. Şekil 4.14'de lazer ışınının otomotiv endüstrisinde kullanım alanları verilmiştir.



Şekil 4.14. Otomotiv üretiminde lazerlerin kullanım alanları.

Otomotiv sanayinde kullanılan ilk lazerler; basit silindirik parçalarının birleştirilmesi işlemi için kullanılırken, günümüzde otomotiv sanayinde açılır tavanların kesilmesinden, kapı kaynaklarına; üç boyutlu malzemelerin kesiminden, kapı yaylarının ısıl işlemine; plastik malzemelerin kazınarak markalanmasında ön panel ve hava yastığı parçalarının, rulmanların, yakıt deposunun ve diğer birçok parçanın takibi açısından markalanmasına kadar birçok imalat aşamasında yaygın bir biçimde kullanılmaktadırlar [69].

#### 4.9. LAZER KAYNAĞINDA KULLANILAN KORUYUCU GAZLAR

Lazer ışın kaynağında kullanılan koruyucu gaz, plazma oluşumunu önleyerek istenilen kaynak nüfuziyetini sağlamak açısından önemli bir göreve sahiptir. Bu gazın ilk görevi kaynak bölgesinde oksidasyonu önlemek olup, ikinci ve kritik görevi de, kaynak bölgesi içinde meydana gelebilecek plazma oluşumunu önlemektir. En son görevi ise, lazer ışınının kaynak alanına en az kayıp ile ulaşmasını sağlayarak kaynak kalitesi iyileştirmektir. Genellikle bu amaç için koruyucu gaz olarak argon ve helyum kullanılmaktadır. Kalın malzemelerin kaynağında yüksek iyonizasyon enerjisinden dolayı ergimeyi kolaylaştırdığı için helyum gazı tercih edilir [70].

#### 4.10. LAZER KAYNAĞININ METALURJİK ÖZELLİKLERİ

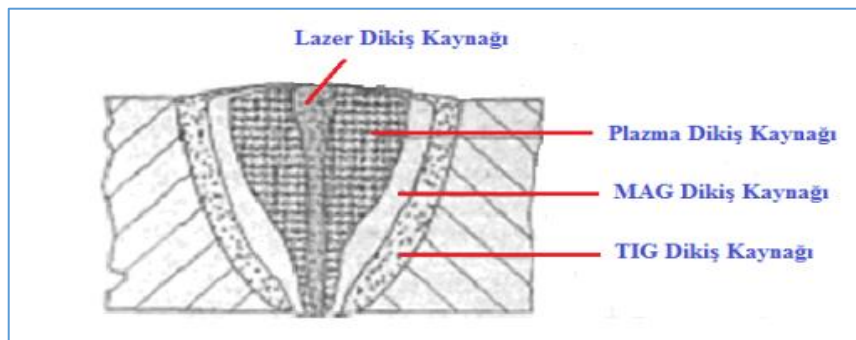
Lazer ışın kaynağı temassız yüksek enerji yoğunluklu bir ışın kaynak yöntemidir. Kaynak, şiddetli lazer ışınının mili-saniyelerle hesaplanan seviyelerde malzemeleri hızlı bir şekilde ısıtıp ergitmesiyle yapılmaktadır. Lazer ışını, malzeme tarafından

absorbe edilebilecek ve sonrasında ısı enerjisine dönüştürülebilecek ışık enerjisi üretirler. Lazer ışınının enerji yoğunluğu ışık dalgalarının konsantrasyonu ile gerçekleştirilir. Işık ışını elektromagnetik spektrumun görünür veya kızıl ötesi kısımda kullanmakla, optik elemanlar yardımıyla odaklayarak enerjiyi istenen noktaya yüksek bir yoğunlukla bırakabilmektedir. Lazer ışını küçük alanlara ısı enerjisi uygulamada, diğer metodlar ile kıyaslandığında çok verimli bir metottur [70].

#### 4.11. LAZER KAYNAĞI İLE DİĞER KAYNAK YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Geleneksel elektrik ark kaynak metodları ve lazer ışın kaynağı arasındaki en önemli fark, enerjideki transfer modudur. Elektrik ark enerjisi transferinin aksine, malzeme tarafından lazer ışın enerjisinin absorpsiyonu, lazerin çeşidi, gelen güç yoğunluğu ve ana malzeme yüzeyinin durumu gibi birçok faktörden etkilenmektedir [71].

Kaynaklı bağlantının mukavemeti doğrudan kaynak dikişin şekli ile ilişkilidir. Bu da seçilen kaynak metodu ve bu metodun çeşitlerine bağlı olmaktadır. Farklı kaynak yöntemlerine göre oluşan bazı önemli kaynak dikişleri, ince dikiş (elektron ışın ve lazer ışın kaynağı), yanal tip dikiş (plazma kaynağı) ve vazo şeklinde dikiş (TIG kaynağı) olarak elde edilmektedir. Bu dikiş şekillerinin çeşitleri kaynak yöntemlerine göre ortaya çıkarken, aynı zamanda kaynak yönü, kaynağın dik veya açılı uygulanması ve ayrıca kullanılan koruyucu gazların gaz bileşimlerine göre de değişmektedir Şekil 4. 15’de kaynak yöntemine göre elde edilen dikiş geometrileri şematik olarak gösterilmiştir [71].



Şekil 4.15. Kaynak yöntemine göre elde edilen dikiş geometrileri.

#### 4.12. Lazer kaynağının avantaj ve dezavantajları

Lazer ışın kaynağının avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir [52,56,70];

- Lazer ışın gücüne ve malzeme cinsine bağlı olarak 10 m/dk'nın üzerinde kaynak hızlarına imkan verir.
- Derin ve sınırlı (dar) kaynakların yapılabilmesinde etkilidir.
- Çok küçük ve ince malzemelerin bile kaynak edilebilmesi mümkündür.
- Yüksek enerji yoğunluğu sayesinde, yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller kolaylıkla kaynatılabilmektedir.
- Karmaşık tasarımlı parçaların kaynakları gerçekleştirilebilmektedir.
- Isı girdisinin çok düşük olması nedeniyle deformasyon ve distorsiyonlar çok az veya yoktur.
- Estetik açıdan güzel görünümlü kaynak dikişleri sağlar ve taşlama gerektirmez.
- Yöntem otomasyona oldukça elverişlidir.
- Şeffaf malzemelerin kaynağı yapılabilir.
- Lazer ışın kaynak yöntemine, ışın gücüne ve kalitesine bağlı olarak 50 mm'ye kadar nüfuziyet elde edilse de genellikle uygulamalarda 20 mm'den daha kalın malzemeler tavsiye edilmezler [72].

Lazer ışın kaynağının birçok avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır [70]. Bunlar;

- Bazı malzemelerde son derece sert kaynak metali; hızlı ısıtma ve soğumaya bağlı olarak soğuk veya sıcak çatlaklar meydana gelebilir.
- Diğer birçok kaynak yöntemiyle kıyaslandığında ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. Ancak kaliteli kaynaklar elde edilmesi, zaman tasarrufu, düşük işletme ve bakım/onarım giderleri bu dezavantajı giderebilir.
- Kullanılan lazer ışınları göz veya deriye direkt veya indirekt olarak temas ettiklerinde, ciddi sağlık problemlerine sebep olmaktadır. Lazer ile çalışan personelin tamamının lazer ışın tehlikelerini bilmesi gereklidir.
- Özellikle yüksek yansıtma özelliğine sahip, yüzeyi parlak malzemelerin operasyonlarında ek önlemler gerekebilir. Yüzey matlaştırma, boyama gibi.

#### 4.13. TİTANYUMUN LAZER KAYNAK ÇALIŞMALARINDAN ÖRNEKLER

Kilerci ve Köksal [73], 125x450x2,5 mm boyutlarında Grade 2 titanyum levhaları lazer (ilave metalsiz) ve TIG kaynak (ERTI-2 ilave metal kullanarak) yöntemleri ile birleştirmişler, mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Makroskobik incelemelerin sonucunda, lazer kaynaklı numunenin kaynak dikişi parlak gümüş renkte iken, TIG kaynaklı numunenin kaynak dikişi ise gri renkli olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca mikrosertlik testlerinde en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinden ölçüldüğünü (lazer ~300HV ve TIG ~480HV) onu sırasıyla ITAB ve ana malzemenin takip ettiği belirtilmiştir. İlaveten lazer kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerinde (çekme ve eğme) çok az miktar azalma olur iken heterojen yapıdan oluşan TIG kaynaklı numunelerde ise azalmanın daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Carvalho ve arkadaşları [74], uçak pnomatik sistemlerinde kullanılan çapı 50 mm, kalınlığı 0,05 mm, uzunluğu 300 mm olan Grade 2 titanyum boruların lazer kaynak yöntemi (ilave metalsiz) ile birleştirmiş ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Kaynak öncesinde gerginliklerini almak için 560 °C 150 dk tavladıktan sonra, önce lazer kaynağı daha sonra ise tam nüfuziyet için TIG kaynak yöntemi ile kaynak işlemini tamamlamışlardır. Kaynaklı numuneler üzerinde optik mikroskop, X-ray, mikrosertlik, çekme ve yorulma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Lazer kaynak yöntemi ısı girdisinin TIG kaynak yöntemine göre neredeyse 15 kat daha düşük, soğuma hızının ise 70 kat daha hızlı olduğunu ve lazer kaynaklı numunelerin daha ince taneli yapıda olduğunu, pnomatik tezgahda test edilen borularda çatlak veya kırılma tespit edilmediği, mikrosertlik testlerinde ergimiş bölgenin ana malzemeye göre daha yüksek sertlik değerleri verdiği tespit edilmiştir. Kaynaklı numune çekme dayanımlarının ana malzemeye göre daha yüksek ölçüldüğünü, X-ray incelemelerinde kırınım tepe noktaları pozisyon ve genliğinde fark olmadığı ve deformasyon birikimine neden olmadığı ayrıca yorulma testleri sonrasında kaynaklı numunelerin ana malzemeye (kaynaksız) benzer ve daha yüksek yorulma dayanımı sonuçları verdiği bildirilmiştir.

Palanivel ve arkadaşları [75], 60 mm çapında, 3,9 mm kalınlığında ve 75 mm uzunluğunda olan Grade 2 titanyum boruları 5 farklı kaynak hızında (2.5, 2.75, 3,

3.25 ve 3.5 m/dk) lazer kaynak yöntemi ile programlanabilir KUKA kaynak robotu kullanarak birleştirmişler ve kaynaklı numuneler üzerinde optik mikroskop, SEM, EDS, mikrosertlik ve çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Kaynak hızı artışına bağlı olarak ergime bölgesinin azaldığı, kaynak hızı artması ile artan soğuma hızından dolayı tane irileşmesinin azaldığı, 3 m/dk kaynak ilerleme hızında büyük küresel ve düzensiz şekilli gözeneklerin oluştuğu tespit etmişlerdir. Mikro sertlik testlerinde ergime bölgesi sertlik değerlerinin ana metal sertlik değerlerinden daha yüksek ölçüldüğü, çekme testlerinde ise düşük kaynak hızlarında oluşan gözeneklerin dayanımı azalttığı ve ergime bölgesinden kırılmaya sebep olduğu ve yüksek kaynak hızlarında büyük gözeneklerin oluşmamasının ergime bölgesi dayanımını arttırdığı ve kırılmanın ana malzemeden gerçekleştiğini bildirmişlerdir.

Palanivel ve arkadaşları [76], çapı 60 mm, kalınlığı, 3,9 mm ve uzunluğu 75 mm olan Grade 2 titanyum boruları 2 farklı kaynak yöntemi ile (sürtünme kaynağı ve lazer kaynağı) birleştirerek bağlantıları birbirleriyle kıyaslamışlardır. Sürtünme kaynağında kaynak parametreleri dönme hızı 2200 dv/dk, sürtünme süresi 32 s, yakma mesafesi 1,4 mm, sürtünme kuvveti 20 kN ve yığma kuvveti de 30 kN olarak seçilmiştir. Lazer kaynağında ise 4.4 kW Nd:YAG lazer kaynak makinası kullanılmış ve lazer gücü 4 kW, kaynak hızı ise 3.5 m/dk olarak belirlenmiş ve işlemler programlanabilir kaynak robotu kullanarak gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numuneler üzerinde makroyapı-mikroyapı, SEM, EDS, mikrosertlik ve çekme testleri gerçekleştirmişlerdir.

Çalışmaları sonucunda hem sürtünme hem de lazer ışını kullanılarak iyi kalitede titanyum tüp bağlantıları elde edildiği, sürtünme kaynaklı bağlantılarda ITAB'ın oluşumu için net bir sınır oluşmadığı, ancak lazer ışını kaynaklı bağlantı yeri için ITAB ve kaynak bölgesi arasında net bir sınır oluştuğu, ITAB'ın uzun kaba taneler gösterdiği belirlenmiştir. Sürtünme kaynaklı bağlantı, dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle ince taneler, lazer ışını kaynaklı bağlantıda ergime bölgesinde düzensiz sınırları olan kaba taneler gözlenmiştir. Ergime bölgesinin dış kenarında, çevreden 0,2 mm derinlikte asiküler taneleri oluşmuştur. Sertlik testleri sonucunda her iki kaynak tipi de kaynak bölgesinde çok daha yüksek bir sertlik sergilediği, sertliğin lazer kaynağı için sürtünme kaynağından daha geniş bir alanda gerçekleştiği

(yaklaşık 2.5 mm'ye karşı 1.0 mm) belirlenmiştir. Çekme testleri sonucunda her iki kopmanın da ana malzemeden ve sünek tipte olduğu ve birbirleriyle karşılaştırıldığında, her iki teknik de ticari olarak saf Grade 2 titanyum tüplerini etkin bir şekilde birleştirmek için uygun olduğu rapor edilmiştir.

Wang ve arkadaşları [77] 2 mm kalınlığında sıcak haddelenmiş TA15, (Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V) titanyum alaşımli tüpleri lazer ışın kaynağı kullanarak, 3.0 kW nominal gücünde (ROFIN-SINAR DC030) bir difüzyon soğutma karbondioksit lazeri ile birleştirmişlerdir. İşlem sırasında kaynaklı boru üzerindeki kaynak dikişinin sınırını daraltmak ve kaynak dikişinin genişliğini azaltmak için farklı kaynak parametreleri kullanmışlardır. Kaynak sırasında oksidasyonu önlemek için Argon gazı koruması kullanılmıştır. Odak uzunluğu ve spot büyüklüğü sırasıyla 192 mm ve 0,15 mm olarak seçilmiş ve hem sac hem de tüpü kaynaklamak için aynı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Kaynak sonrası kaynaklı numuneler 800 °C tavlansak kaynak metali ve ana malzeme arasındaki gerilim farkının azaltılması amaçlanmıştır. Kaynak bölgesinin deformasyonunu değerlendirmek için tavlansmış borunun gazla şişirilmesi gerçekleştirildi. Mikroyapı gelişimi, yumuşatma mekanizmasının düzensizlik deformasyonu üzerindeki etkisini belirlemek için OM ve EBSD (electron backscattered diffraction) analizleri yapılmıştır. Çalışmaları sonucunda yeniden kristalleştirme tavlansmasının, lazer kaynaklı TA15 Ti alaşım ek yerinin deformasyon homojenliğini geliştirmediğini, kaynak bölgesinde meydana gelen tane büyümesinin ve kaynak dikişinde  $\alpha$ -martensitik yapının ayrışması nedeniyle yeniden kristalleştirme tavlansmasından sonra mukavemetin azaldığını rapor etmişlerdir.

Li ve arkadaşları [78] Ti-6Al-4V titanyum alaşımlarına 4 kW ROFIN fiber lazer kaynağı ile dikiş kaynağı gerçekleştirmişlerdir. Kaynak işlemleri için 105 mm × 15 mm × 6 mm ebatlarında bir altlık (skeleton) ve 100 mm × 80 mm × 1.6 mm ana malzeme kullanarak bir robot yardımıyla üst üste dikiş kaynağı (Stitch welding) yapılmıştır. Kaynak esnasında yaklaşık 0.4 mm'lik bir odak noktası oluşturmak için bir kolimasyon merceği, bir odak merceği ve bir optik fiber kullanılmıştır. Kaynak işlemlerinde iki çeşit gaz memesi dizay ederek kullanılmıştır. Bunlardan ilki tek ikincisi ise üç borudan oluşmaktadır. İlk boru esas olarak bağlantı oksidasyonunu önlemek ve kaynak işlemi sırasında plazma korumanın etkisini ortadan kaldırmak için gaz sağlamak, diğerinin ise kaynak ve soğutma işlemi sırasında kaynak

oksidasyonunu önlemek içindir. Deneysel çalışmalarda lazer kaynak parametrelerinin makroskopik geometri, gözeneklilik, mikro yapı ve dikiş kaynaklı dikişlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri dijital mikroskop, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve üniversal çekme test cihazı ile incelenmiştir.

Çalışmalar sonucunda 5 l/dk'dan daha büyük gaz akış hızına sahip üç borulu memenin, tek borulu meme ile karşılaştırıldığında daha iyi koruma etkisi sağlayarak oksitlenmeyi önlediği, levha ve altlık arasındaki boşluk 0,1 mm'den daha az olduğunda gözeneklilik oluşumu baskı altına alınırken (suppressed) mevcut gözenekliliğin yeniden ergitilerek azaltılabileceği ve en az poroziteye sahip kaynak dikişinin maksimum kayma dayanımının, 1700 W lazer gücü, 1.5 m / dk kaynak hızı ve +8 mm odak uzaklığı kullanılarak elde edildiğini rapor etmişlerdir.

Wang ve arkadaşları [79] çalışmalarında 2 mm kalınlığında TA15 sıcak haddelenmiş sac kullanılmıştır. Kaynak işlemleri 3.0 kW gücünde (ROFIN-SINARDC030) bir difüzyon soğutma karbondioksit lazeri ile yapılmıştır. Çıkış gücü ve kaynak hızı sırasıyla 1.0 kW ve 1.2 m/dk seçilmiştir. TA15 Ti alaşımlı sac malzemenin ve lazer kaynaklı tüpün yüksek sıcaklık deformasyon davranışı hem sıcak çekme testleri hem de yüksek basınçlı gaz ile şekillendirme testleri ile araştırılmıştır.

Lazer kaynaklı bağlantıdaki mikro yapının homojen olmadığı, ergime bölgesindeki beta matristeki ince alfa üssü asiküler ferrit içeren kaba sütunlu tanelerden oluştuğu, ITAB'ın alfa üssü, birincil alfa ve birincil beta ile dönüştürülmüş beta fazların bir karışımını içerdiği, ergime bölgesinin, ince asiküler alfa üssü martensitik yapının oluşması nedeniyle en yüksek sertliğine sahip olduğu, bitişik ITAB'da sertlik hızla düştüğünü ve ana malzemenin en düşük sertliğe sahip olduğunu, eş eksenli mikroyapıya sahip ana malzemenin % 447'lik bir uzama ile süperplastik özelliğini gösterdiğini, yüksek basınçlı gaz deneyleri sırasında, lazer kaynaklı TA15 tüpün 800 °C'de çok iyi bir şekillendirilebilirliğe sahip olduğunu ve maksimum şişirme oranının % 77,4'e kadar yükseldiğini rapor etmişlerdir.



## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 5.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada özellikle kimya, uzay, havacılık ve medikal sektörlerde sıklıkla kullanılan titanyum boru malzemelerin kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Ülkemizde levha veya sac halinde bulunan titanyum malzemelerin kaynağı ile ilgili sayıları çok olmasa da bazı çalışmaların yapıldığı bilinmektedir [1,9,17,21]. Ancak ülkemizde titanyum malzemelerin sadece sac veya levha formunda kullanılmadıkları da bir gerçektir. Yapılan literatür araştırmalarında titanyum boruların TIG kaynağı ile birleştirildiği bir deneysel çalışmaya [38], lazer kaynağı ile birleştirildiği de bir çalışmaya [80] rastlanılmıştır. Açıkçası Ülkemizde titanyum boruların farklı kaynak yöntemleri kullanılarak yapılmış deneysel bir çalışma bulunmaması bu çalışmanın başlatılmasının ana sebeplerinden birisi olmuştur. Ayrıca Ülkemiz bilim camiasının gerek titanyum malzemeleri gerekse lazer kaynağını tam olarak imalat sektörüne tanıtarak kazandıramamış olması da bir eksiklik olarak görülmüş ve bu eksikliklerin çalışmanın özgünlüğünü arttıracacağı düşünülmüştür.

Bu amaçlar doğrultusunda titanyum boru malzemeler, hem TIG hem de lazer kaynak yöntemi ile farklı parametrelerde birleştirilmiştir. Birleştirme işlemlerinde kullanılan kaynak parametrelerinin seçimine önem verilmiştir. Birleştirme işlemi yapılan titanyum borulara kaynak işlemi sonunda kaynak kalitesini belirlemek için göz ile muayene testi yapılmıştır. Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testi uygulanmıştır. Ayrıca içyapıdaki kusurların belirlenmesi için bu test yöntemlerinin yanı sıra kaynak bölgesinin mikroyapı ve sertlik incelemeleri yapılmıştır.

## 5.2. MALZEMELER

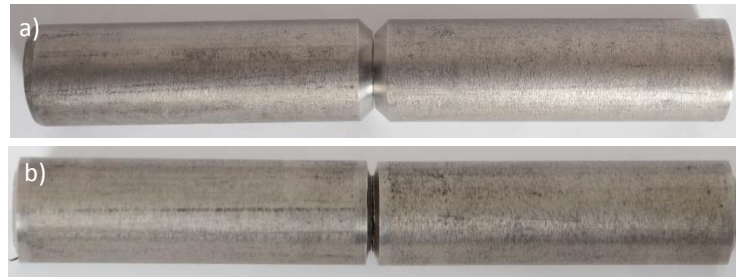
Bu çalışmada piyasadan ticari olarak temin edilen  $\varnothing$  21 mm çapında, 2 mm et kalınlığında ve 600 mm uzunluğunda titanyum borular kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan titanyum boruların kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Titanyum boruların kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).

Alaşım elementi	Al	Si	Fe	Zr	Ti
Miktarı (%)	2,1848	0,0266	0,0791	2,3390	Kalan

## 5.3. KAYNAĞA HAZIRLIK

600 mm uzunluğunda olan borular su soğutmalı metal kesme diski ile kesme cihazında 60 mm boylarında kesilmişler ve yüzey çapakları hassas bir tornada işlenerek giderilmiştir. Kaynak işlemlerinde tam bir nüfuziyet elde etmek için TIG kaynağı yapılacak 3 çifte (toplam 6 adet)  $40^\circ$  kaynak ağzı açılmıştır (Şekil 5.1a). Lazer kaynağı ile birleştirilecek malzemelere ise kesme esnasında Şekil 5.1b’de görüldüğü gibi çok küçük bir kaynak ağzı formu (yaklaşık toplam  $5^\circ$ ) verilmiştir. Her iki kaynak yöntemi için de kaynak yüzeyleri kaynak işlemi öncesinde temizlenerek kaynağa hazır duruma getirilmişlerdir. Şekil 5.1’de TIG ve lazer kaynağı için kaynak ağzı açılan titanyum boruların görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Kaynak ağzı açılmış parça görüntüleri a) TIG kaynağı ve b) lazer kaynağı.

## 5.4. KAYNAK UYGULAMALARI

Titanyum boruların birleştirilmesi için önceki bölümde bahsedildiği gibi TIG ve lazer ışın kaynak yöntemleri kullanılmıştır.

### 5.4.1. TIG Kaynağı

TIG kaynağı ile titanyum boru parçaların kaynak işlemleri öncesinde kaynak yüzeyleri ince bir zımpara ile ardından aseton ile temizlenmiştir. Eksenel kaçıklıkların önüne geçmek için boru iç çapına uygun seramik bir malzeme yerleştirilmiş ve kaynağa başlamadan önce boru malzemeler dört noktadan puntalanmışlardır. Daha sonra Çizelge 5.2’de belirtilen parametreler çerçevesinde malzemelerin birleştirilme işlemleri yapılmıştır. Ayrıca kaynak işlemleri esnasında boruların iç kısımlarına kök paso koruma gazı gönderilmiştir. Kaynak işlemlerinde ilave metal olarak 1,2 mm çapında Grade 2 Cp titanyum ilave metal seçilmiş ve ilave metal kaynak bölgesine manuel olarak verilmiştir. Kaynak işlemleri TIG 4300i AC/DC kaynak makinası ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kaynak makinasının resmi Şekil 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. TIG kaynak parametreleri.

	TIG 1	TIG 2	TIG 3
Akım (A)	45	55	65
Gerilim (V)	20	20	20
Kaynak hızı (mm/sn)	2	2	2
Isı girdisi (kJ/mm)	0,36	0,44	0,52
Koruyucu gaz (argon) (l/dk)	14	14	14
Kök gazı (argon) (l/dk)	7	7	7
İlave tel çapı (mm)	1,2	1,2	1,2
Paso sayısı	2	2	2

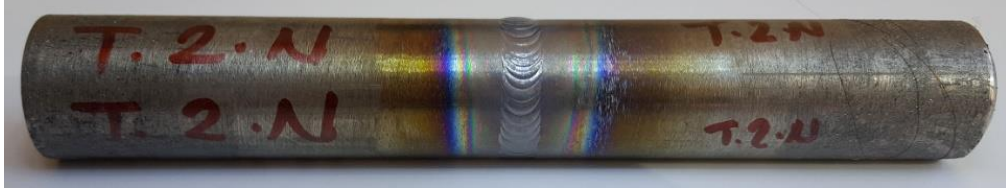
$$Q = \frac{(I) \times (V)}{S \text{ (mm/sn)}} \times \eta$$

Q : Isı girdisi (kJ/mm)  
I : Akım  
V : Gerilim  
S : Kaynak ilerleme hızı (mm/sn)  
 $\eta$  : Verim (TIG için 0,8)



Şekil 5.2. TIG kaynak makinası.

TIG kaynak esnasında kullanılan kök koruyucu gazı ile normal nozuldan gönderilen koruyucu gazlar 30 s süre ile devam ettirilerek sıcak kaynak metalinin oksitlenmesine engel olunmaya çalışılmıştır. Gaz gönderimine son verilmesinin ardından kaynaklı numuneler açık havada soğumaya bırakılmışlardır. Şekil 5.3'de örnek olması açısından TIG kaynağı ile yapılmış titanyum boru numunelerinden bir tanesinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.3. Titanyum borunun TIG kaynağı ile birleştirilmesine ait bir örnek.

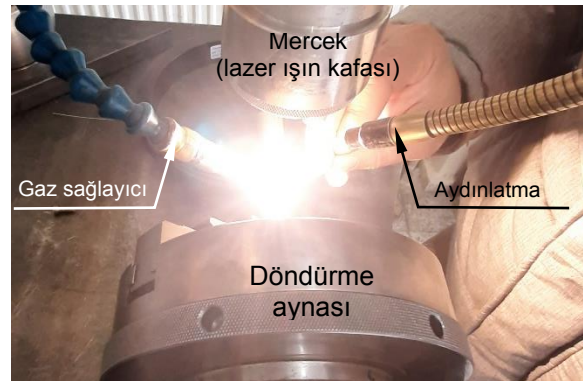
#### 5.4.2. Lazer Kaynağı

Kaynağa başlamadan önce titanyum boruların kaynak yüzeyleri ince bir zımpara parlatmasından sonra aseton ile temizlenmişlerdir. Titanyum borular hassas bir biçimde merkezlenerek dört noktadan punta yapılmışlardır. Puntalanan numuneler Çizelge 5.3'de verilen parametreler kullanılarak, Sigma Laser 400 lazer ışın kaynak makinası ile birleştirilmişlerdir. Kaynak esnasında boru içerisinden düşük debili bir argon kök gazı gönderilmiştir. Lazer kaynağında ısı girdisi, El-Batahgy'nın [81]

östenitik paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak bölgesinin şekli ve katılaşması çalışmasında kullandığı formül dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemleri esnasında yine 0,4 mm kalınlığında Grade 2 saf titanyum ilave metal kullanılmış ve kaynak bölgesine manuel olarak beslenmiştir. Birleştirilen tüm numuneler açık havada soğumaya bırakılmıştır. Kaynak işlemlerinin gerçekleştirildiği kaynak makinası ve kaynak esnasındaki görüntüsü Şekil 5.4’de, kaynak sonrası elde edilen kaynak numune görüntüsü ise Şekil 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Lazer kaynak parametreleri.

	Lazer 1 (L1)	Lazer 2 (L2)	Lazer 3 (L3)
Odak mesafesi (mm)	100	100	100
Lazer gücü P (W)*	130	140	160
Işın çapı (mm)	0,6	0,6	0,6
Darbe gücü (ms)	4,0	4,0	4,0
Kaynak Hızı (mm/sn)	3	3	3
Koruyucu gaz (argon) debisi (l/dk)	14	14	14
Kök gazı (argon) debisi (l/dk)	7	7	7
İlave tel çapı (mm)	0,4	0,4	0,4
Isı girdisi (kJ/mm)**	0,043	0,046	0,053
Paso sayısı	10	10	10
* Kaynak makinasının maksimum gücü 400 W. Kaynak esnasında bunun sırasıyla % 32,5, 35 ve 40’ını kullandı. Örnek: P= 400 x % 32,5 = 130 W.	** $Q = \frac{P}{S}$ Q : Isı girdisi (kJ/mm) P : Lazer gücü (kW) S : Kaynak ilerleme hızı (mm/sn)		



Şekil 5.4. Lazer kaynak makinası ve kaynağın yapılışı.



Şekil 5.5. Lazer kaynak numunesi.

## **5.5. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI**

Titanyum boru malzemelerin üçer farklı parametre kullanılarak TIG ve lazer ışın kaynak yöntemi ile birleştirildiği çalışma sonucunda kaynaklı numuneler üzerinde bir dizi çalışma ve testler yapılmış ve bu durum sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

### **5.5.1. Numunelerin Kesilmesi**

Hem TIG hem de lazer ışın kaynağı ile birleştirilen kaynak numuneleri yapılacak olan testlerde iyi bir sonuç olmak amacıyla tel erozyon yöntemi ile dört eşit parçaya bölünmüşlerdir. Tel erozyon yöntemini parçaların kaynak bölgelerinde (kaynak metali ve ITAB) meydana gelebilecek ısı değişikliklerini ortadan kaldırmak amacıyla tercih edilmiştir. Bu dört numuneden 3 tanesi çekme testlerinde bir tanesi ise sertlik ve mikroyapı testlerinde kullanılmıştır.

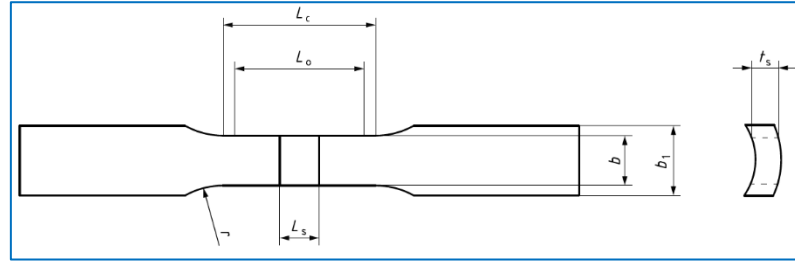
### **5.5.2. Gözle Muayene**

Gözle muayene malzemenin yüzeyinde gözle görünebilen hataların belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Muayene çıplak gözle ve gerektiğinde büyüteç, ayna, mastar gibi yardımcı elemanlar kullanılarak ve TS EN ISO 17637 (Ergitme kaynaklı birleştirmelerde gözle muayene) göre yapılır. Çalışmada kaynakların değerlendirilmesi TS EN ISO 5817'e göre (Kaynak-çelik, nikel, titanyum ve alaşımlarında ergitme kaynaklı birleştirmeler-kusurlar için kalite seviyeleri) standardına göre yapılmıştır. Bu çalışmada muayene işlemleri standartlar dahilinde aydınlatma, mesafe ve açı dikkate alınarak çıplak göz ile yapılmıştır.

### **5.5.3. Çekme Testi**

TIG ve lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin statik yükler altındaki davranışlarını belirlemek için kaynaklı numuneler çekme testi uygulanmıştır. TS EN ISO 4136:2012 standardına göre çekme numuneleri plakalar, dolu silindirik malzemeler ve boru malzemeler olmak üzere üç tür yapılmaktadır. Boru malzemelerin çekme testinde eğer boru ebatları uygunsa direk boruların başları

doldurularak direkt çekme testi yapılır. Ancak boru ebatları büyük ise bu durumda Şekil 5.6'da gösterildiği gibi yapılır. Ayrıca standartta “borudan talaşlı imalatla elde edilen deney numuneleri için tutma uçlarının düzleştirilmesi gerekir. Ancak, bu düzleştirme kalınlıktaki olası bir değişme paralel uzunluğu ( $L_c$ ) değiştirmemelidir” denilmektedir. Bu bilgiler ışığında kaynaklı numunelerin çene tutma yerleri Şekil 5.7’de gösterildiği gibi pres yardımı ile düzleştirilmiştir. Çalışmada kaynaklı numuneler direkt tel erozyon işlemiyle düz halde kesildiği şekliyle teste tabi tutulmuştur. Bir başka ifade ile çekme bölgesi  $L_0$  uzunluğu ve  $b$  kaynak genişliği işlenerek elde edilmemiştir. Çekme esnasında  $L_0$  çekme numunesi üzerinde işaretlenerek uzama işaretlemeye göre yapılmıştır. Burada  $b$ :12 mm,  $L_0$ : 60 mm, toplam boz 120 mm olarak seçilmiştir.

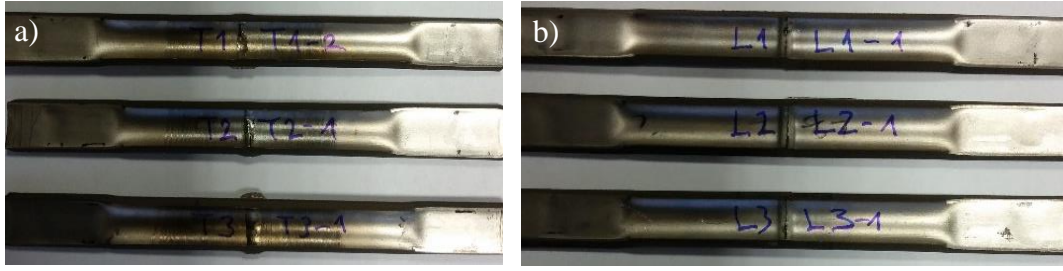


Şekil 5.6. Boru malzemeler için çekme testi numune ölçüleri.

Tel erozyon kesme yöntemi ile dört eşit parçaya bölünen kaynaklı numunelerin çene tutma yerlerinin preste düzeltilmesi esnasındaki bir görüntü Şekil 5.7’de, düzeltme işlemi gerçekleştirilen numunelerin düzeltme sonrası görüntüleri ise Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Çekme numunelerinin çekme çenesi tutma yerlerinin preste düzeltilmesi.



Şekil 5.8. Kaynaklı numunelerin düzleştirilmiş hali a) TIG kaynağı ve b) lazer kaynağı.

Çekme testi Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme laboratuvarlarında bulunan, 50 KN kapasiteli SHIMADZU marka çekme test cihazı ile 2 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9’da ise çekme testi cihazının resmi verilmiştir. Çekme testi sonrasında kopma yüzeyleri SEM yardımıyla kırık yüzey incelemesine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.9. Çekme testi cihazı.

#### 5.5.4. Sertlik Testi

Kaynaklı birleştirmelerin sertlik ölçümleri için hazırlanan numuneler öncelikle 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış sonrasında ise 6 ve 3 mikron keçelerde parlatılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Hazırlanan numunelerin sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme yöntemiyle 500 gr yük uygulanarak kaynak metali, ısı tesiri altında kalan bölge ve ana malzemeyi kapsayacak şekilde mikro sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümü testi yapılan cihazın görüntüsü Şekil 5.10’da verilmiştir.





Şekil 5.10. Sertlik deneyi test cihazı.

### 5.5.5. Mikroyapı Çalışmaları

Titanyum boru malzemelerin TIG ve lazer kaynaklı birleştirmelerine ait mikroyapı incelemesi yapılabilmesi için, SiC zımpara kâğıdı ile (80, 120, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200) ve elmas pasta ile 3 aşamalı parlatma (6 $\mu$ , 3 $\mu$  ve 1 $\mu$ ) basamakları takip edilerek kaynaklı numune yüzeyleri hazırlanmıştır. Kaynaklı malzeme yüzeyleri görüntü alabilmek için 10 ml HCl, 5 ml HF ve 85 ml saf su ile dağlanmıştır. Dağlama işlemi 20 sn uygulanmıştır.

Mikroyapı çalışmaları, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarındaki Nikon Epiphot 200 optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar esnasında kaynak bölgesinin tamamında (kaynak metali, ITAB ve ilave olarak ana malzemenin bir kısmı) ve her bir bölgedeki farklılıkların kolaylıkla gözlemlenebilmesi için farklı büyütmelerde çalışmalar yapılmıştır.

### 5.5.6. EDS Çalışmaları

TIG ve lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş titanyum boruların kaynak metaline SEM’de EDS analiz çalışmaları yapılmıştır. Burada amaç titanyum boru malzemenin kimyasal bileşimleri ile hem TIG kaynağında hem de lazer ışın kaynağında kullanılan ilave malzemelerin bileşimlerinin aynı olmaması, ayrıca da kaynak

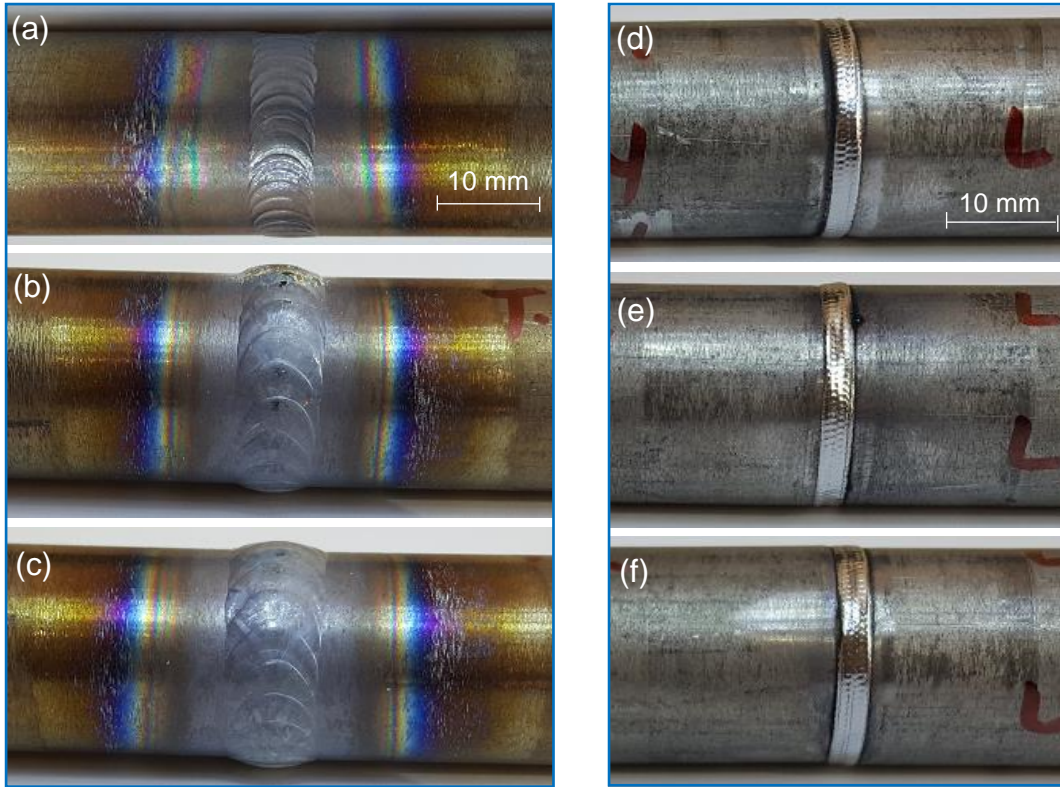
yöntemine göre farklı paso sayılarının etkilerini görmektir. Bu doğrultuda kaynaklı numunelerin EDS analizleri Karabük Üniversitesi Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) Laboratuvarlarında bulunan CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM cihazında gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 6.1. GÖZLE MUAYENE

Gözle muayene çok basit bir yöntem olarak görünse de en önemli tahribatsız muayene yöntemlerinden biridir. Genellikle bir başka tahribatsız muayene yönteminden önce yapılması gereken bir çalışmadır. Tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standartlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenir. Titanyum boruların TIG ve lazer ışın kaynağı ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirildiği çalışmalar sonucu elde edilen kaynaklı bağlantıların makro görüntüleri Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kaynaklı numunelerin makro görüntüleri (a, b, c TIG ve d, e, f lazer kaynaklı).

Kaynaklı numunelerin göz ile muayene işlemleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada hem TIG hem de lazer ışını ile birleştirilmiş numunelerin kaynak kepleri direkt olarak muayene edilirken, ikinci aşamada kaynak kök incelemesi için numuneler tel erozyon ile dört eşit parçaya bölüdükten sonra gerçekleştirilmiştir. TIG ve lazer ışın kaynaklı numunelerin yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumları incelenmiş ve TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kep ve köklerinde herhangi bir hataya rastlanılmazken, lazer ışını ile birleştirilmiş numunelerin köklerinde kısmi nüfuziyetsizlik hatasının olduğu gözlemlenmiştir. Bu birleştirmelerin kaynak kepinde ise TIG kaynaklarında olduğu gibi herhangi bir hataya rastlanılmamıştır. Tüm kaynaklı numunelerin yüzeylerinde yanma oluklarına ve gaz gözeneklerine rastlanmamış olması kaynak parametrelerinin doğru bir aralıkta seçildiğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Kaynaklı numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde TIG kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak genişlikleri 5-7 mm arasında ölçülürken lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde bu değerin 2-2.5 mm civarında olduğu görülmüştür. Buradan TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak dikiş genişliğinin, lazer kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden yaklaşık 3-4 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Titanyum malzemelerin kaynağında kaynak metalinde meydana gelen farklı renkler, kaynağın kalitesi hakkında fikir sahibi olunmasını, hatta renk değişimine göre kaynakların kabul ve reddedilebileceğini işaret etmektedir (Çizelge 6.1). Kaynak metali renkleri artan bulaşma sırasına göre, şöyle olur: parlak gümüşî, açık saman (sarı), koyu saman, açık mavi, koyu mavi, gri mavi, gri ve beyaz. Bir açık saman (sarı) renk genellikle, çok kesin şartnameler dışında kabul edilebilir [82]. Kaynak metali renklerinin kaynak esnasında artan bulaşma sırasına göre dizildikleri bilinmektedir.

Çizelge 6.1. Titanyum kaynağının renk değerlendirmesi.

Renk	Kaynak kalitesi	Karar
Gümüş parlaklığı	Mükemmel	Kabul
Saman sarısı	İyi	
Altın sarısı	İyice	
Koyu mavi	Kötü	Red
Mat gri	Çok kötü	

Şekil 6.1 a, b ve c’de verilen TIG kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metal renklerinin gümüş renginde olduğu, ITAB’ın ise ağırlıklı saman sarısı olmak üzere kısmen altın sarısı renkler sergilediği ve bu durumda “kabul” kriterinden mükemmel/iyi kaynak kalitesine sahip olduğu görülebilir. Şekil 6.1 d, e ve f’de verilen lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metalleri ve ITAB’ları incelendiğinde ise tamamının gümüş parlaklığı renginde olduğu ve kabul kriterinden “mükemmel” kaynak kalitesine sahip olarak değerlendirilebilir.

Carvalho ve arkadaşları [74] titanyum malzemeleri hem lazer hem de TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynaklı numuneleri görsel olarak kıyaslamışlardır. Çalışmalar sonucunda her iki yöntemde de tam nüfuziyetin sağlandığını, ancak lazer kaynaklı numunelerin kaynak dikiş genişliklerinin TIG kaynaklı numunelerden 5 kat daha küçük olduğunu, lazer kaynaklı numunelerde yeterli bir gaz koruması olduğunu gösteren gümüş renkli ve pürüzsüz bir yüzeye karşın TIG kaynağında borunun ortasında sarı renkte, her iki uçta da açık mavi olduğunu ve titanyum yüzeyindeki bu renklerin oksidasyon seviyesini temsil ettiğini ve oluşan renklerin oksit filminin oluştuğu sıcaklık ile ilgili olduğunu rapor etmişlerdir.

## **6.2. ÇEKME TESTİ**

Çekme deneyi hem TIG kaynağı hem de lazer ışını ile farklı parametrelerde birleştirilmiş kaynaklı numunelere üçer adet uygulanmış ve tüm ölçüm sonuçları (çekme dayanımı ve % uzama) ile ortalamaları Çizelge 6.2’de verilmiştir. Çizelge 6.2’de ayrıca kaynak prosesinin ve değişkenlerin etkilerini belirleyebilmek için ana malzemeye de aynı sayıda yapılan çekme testi sonuçları verilmiştir. Şekil 6.2’de örnek olması açısından her bir kaynak yönteminden en yüksek (TIG kaynaklı) ve en düşük (lazer kaynaklı) parametrelerde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin çekme test grafikleri verilmiştir.

Çizelge 6.2. Çekme test sonuçları.

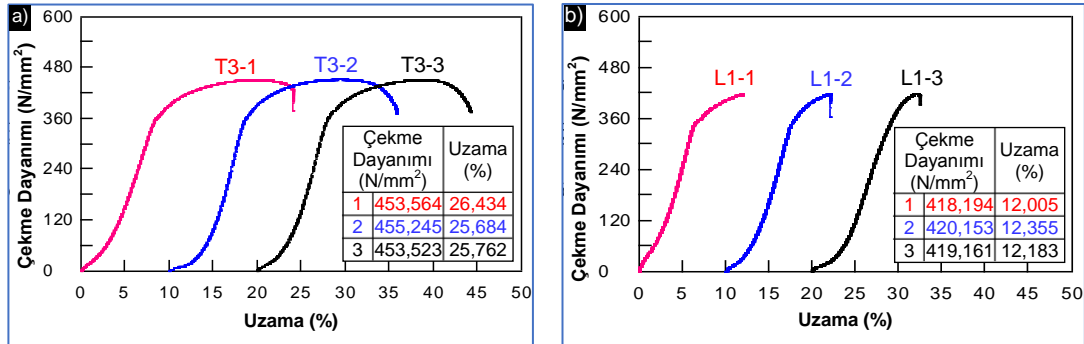
	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		Uzama (%)	
	Ölçümler	Ortalama	Ölçümler	Ortalama
<b>Ana malzeme</b>	454,781		33,483	
	455,183	<b>454,74</b>	33,551	<b>33,42</b>
	454,262		33,231	

Numune	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		Uzama (%)	
	Ölçümler	Ortalama	Ölçümler	Ortalama
<b>TIG 1</b>	453,174		24,547	
	452,065	<b>453,16</b>	24,134	<b>24,22</b>
	454,242		23,981	
<b>TIG 2</b>	452,896		24,252	
	452,585	<b>453,10</b>	24,391	<b>24,20</b>
	453,822		23,961	
<b>TIG 3</b>	453,564		26,434	
	455,245	<b>454,11</b>	25,684	<b>25,96</b>
	453,523		25,762	

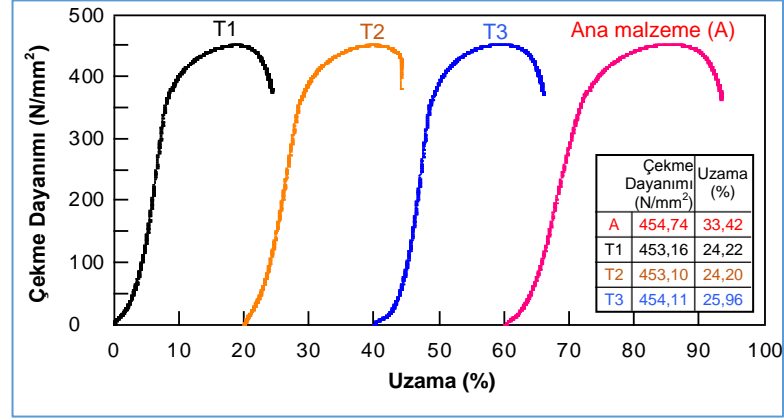
Numune	Çekme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )		Uzama (%)	
	Ölçümler	Ortalama	Ölçümler	Ortalama
<b>Lazer 1</b>	418,194		12,005	
	420,153	<b>419,16</b>	12,355	<b>12,18</b>
	419,161		12,183	
<b>Lazer 2</b>	434,902		12,298	
	433,863	<b>434,61</b>	12,261	<b>12,18</b>
	435,071		11,992	
<b>Lazer 3</b>	453,483		25,641	
	454,349	<b>453,74</b>	25,149	<b>25,38</b>
	453,391		25,351	



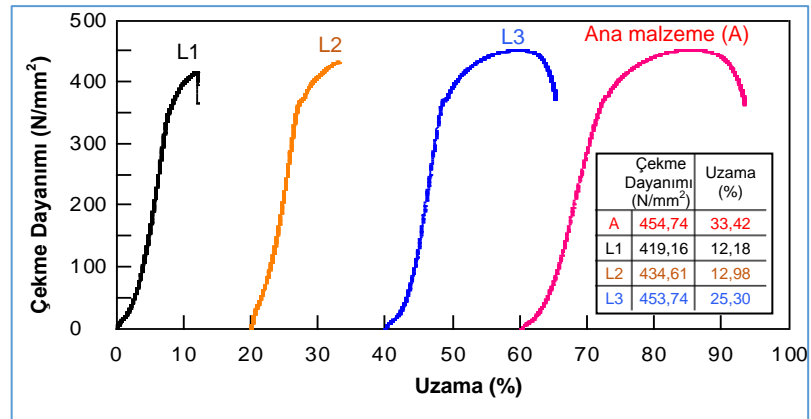
Şekil 6.2. Üçlü çekme grafikleri, a) TIG 3 ve b) lazer 1 kodlu numune.

Şekil 6.2’de verilen grafikler incelendiğinde her bir yöntemde ve her bir test parametresinde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin çekme test sonuçlarının birbirlerine yakın sonuçlar verdikleri görülmektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki her bir test parçasında kaynak kalitesi numunenin her yerinde birbirine son derece yakındır. Burada, borunun her yerinde dayanımın birbirine yakın olması, kaynak esnasında borunun sabit bir hızda döndürülmesi (dolayısıyla kaynağın sabit bir hızda yapılması) ve kaynağın tamamının PA (yatay alın) pozisyonunda yapılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 6.3’de TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş, Şekil 6.4’de ise lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden elde edilen ortalama

çekme grafikleri verilmiştir. Bu grafiklere, kıyaslamanın kolay yapılabilmesi için ana malzeme grafiği de ilave edilmiştir.

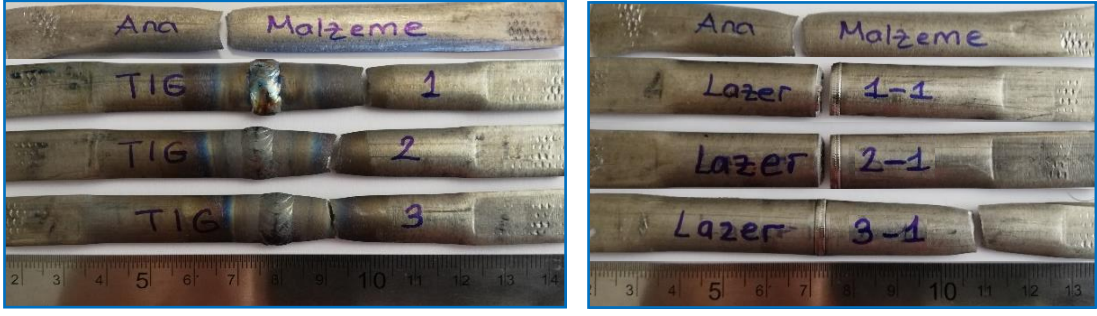


Şekil 6.3. TIG kaynaklı numunelerin çekme grafikleri.



Şekil 6.4. Lazer ışın kaynaklı numunelerin çekme grafikleri.

Şekil 6.3’de TIG kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin çekme grafiklerinin birbirlerine son derece benzer oldukları açıkça görülmektedir. Hatta bu üç grafiğin aynı grafik üzerinde mevcut olan ana malzeme ile aynı çekme seyrini izledikleri söylenebilir. Şekil 6.4’de verilen lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelere bakıldığında ise benzerliğin ikili gruplar halinde olduğu açıkça görülmektedir. Burada L1 ve L2 nolu numuneler benzer bir durum sergilerken, L3 ve ana malzeme de benzer çekme seyri göstermiştir. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 için verilen bu bilgileri gerekçeleriyle birlikte açıklayabilmek için Şekil 6.5’de kaynaklı malzemelerin çekme test sonrası kopma görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.5. TIG ve lazer kaynaklı numunelerin çekme testi sonrası kopma bölgeleri.

Şekil 6.5’de verilen fotoğraflar incelendiğinde TIG kaynak yöntemi ile üç farklı kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin tamamında kopma kaynak metali dışından ana malzemedan gerçekleşmiştir. Burada kritik nokta T3 nolu numunenin kopma yerinin ITAB’ın düşük sıcaklık kısmında görünmesidir. Ancak max çekme ve % uzama değerlerine bakıldığında T3 nolu numuneden elde edilen değerlerin diğer iki (T1 ve T2) numuneden elde edilen değerler ile aynı olması kopmanın ITAB dışından olduğunu destekler niteliktedir.

Şekil 6.5’de lazer ışın kaynağı ile üç farklı kaynak parametresinde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kopma bölgelerinin farklı yerlerden olduğu görülmektedir. Burada L1 ve L2 numunelerin kopma yeri kaynak metali iken, L3 nolu numunede ise ana malzeme olarak görülmektedir. Bu iki farklı sonuç, çekme sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, L3 nolu numunenin ana malzeme ile aynı çekme mukavemetini sergilemesi, diğer iki numunenin (L1 ve L2) ise ana malzemeye göre yaklaşık % 5-8 düşük dayanım sergilemiş olması kopma-çekme dayanımı ilişkisini doğrular niteliktedir.

Çekme test sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde kaynak metalinden ve düşük çekme yüklerinde kopan numunelerin yanlış ilave metal seçimi ve yetersiz/fazla kaynak parametrelerinden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu durumda TIG kaynağında kullanılan ilave metal ve kaynak değişkenlerinin doğru seçildiği söylenebilir. Lazer ışın kaynağında kopmaların birinin olumlu (ana malzemedan), ikisinin olumsuz (kaynak metalinden) olması, her üç birleştirmede aynı ilave metalin kullanılmış olması dolayısıyla, ilave metal seçiminin en azından yanlış olmadığı bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Burada başarısızlığın sebebinin ilave metalden



ziyade kaynak değişkenlerinden kaynaklandığı, özellikle düşük ısı girdisinde birleştirilen numunelerde (L1 ve L2) tam bir nüfuziyetin sağlanamadığı, dolayısıyla da yeterli kök elde edilememesinden dolayı hatanın kaynak metalinde kopmaya sebep olduğu görülmüştür.

TIG ve lazer ışın kaynağı ile birleştirilen numunelerden elde edilen % uzama miktarlarına bakıldığında (Şekil 6.3 ve 6.4), max çekme dayanımının benzeri sonuçların olduğu, yani TIG kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin uzamalarının birbirlerine çok yakın, lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin uzamalarının ise farklı olduğu görülmektedir. TIG kaynağı ile üç farklı kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin tamamında % uzamanın orijinal titanyum ana malzemeye göre yaklaşık % 30 azaldığı belirlenmiştir. Lazer ışın kaynağında ise en yüksek ısı girdisinde (L3) birleştirilmiş numunenin TIG kaynağına benzer biçimde % uzama gösterdiği, ancak düşük kaynak ısı girdilerinde birleştirilen numunelerde ise (L1 ve L2) uzamanın % 60'dan fazla azaldığı hesaplanmıştır. Zaten % uzaması çok düşük ölçülen bu iki numunede kopmaların kaynak metalinden, diğer tüm birleştirmelerde ise ana malzemedan olması, çekme testlerindeki kopma/uzama arasındaki ilişkinin doğruluğunu vurgulamaktadır. Burada kaynak metalinden kopan numunelerden ziyade, ana malzemedan kopan numunelerdeki uzamanın orijinal titanyum malzemeye göre belirgin bir düşüş göstermesidir. Bunun sebebinin de çekme esnasında kaynaklı bölgenin (kaynak metali ve ITAB) deformasyona uğramaması olarak gösterilebilir. Bir başka ifade ile kaynak bölgesindeki yüksek sıcaklıktan dolayı meydana gelen değişim ve dönüşümler bu bölgenin sertliğinin artmasına, dolayısıyla da çekme esnasında bu bölgedeki dislokasyon yoğunluğunun uzamaya fırsat vermemesiyle açıklanabilir.

Carvalho ve arkadaşları [74] Grade 2 saf titanyum boruları hem lazer hem de TIG kaynağı ile birleştirmişler ve kaynaklı numunelere çekme testi uygulamışlardır. Çekme testleri sonucunda hem lazer kaynaklı hem de TIG kaynaklı birleştirmelerin akma ve çekme dayanımlarının ana malzemeye göre arttığı belirtilmiştir. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin akma ve çekme dayanımlarının ana malzemeye göre arttığı, bununla birlikte, toplam uzamanın ise azaldığı belirlenmiştir.

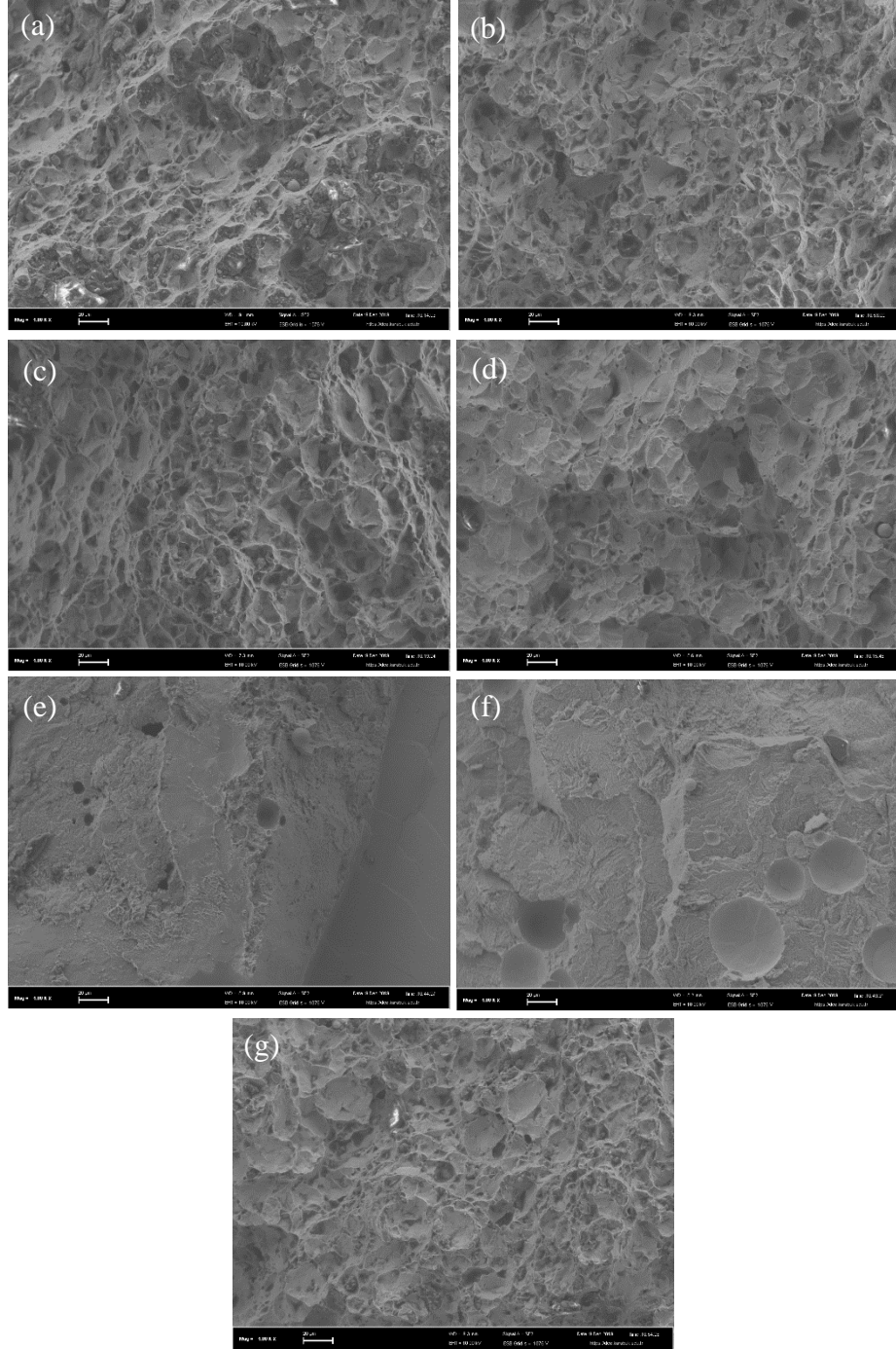
Ayrıca çekme testi esnasında numunelerin kopmadan önce boyun verdiğini ve sünek kırılma tipi sergilediklerini rapor etmişlerdir.

Palanivel ve arkadaşları [75] Grade 2 titanyum malzemeleri beş farklı kaynak hızında (2.50, 2.75, 3.00, 3.25 ve 3.50 m/dk) Nd:YAG lazer kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çekme testleri sonucunda düşük kaynak hızda birleştirilen (2.50m/dk) numunede kopma kaynak metalinden olurken, diğer kaynak ilerleme hızlarında birleştirilen numunelerde ise kopma kaynak metalinin dışından gerçekleşmiştir. Kaynak metalinden kopan numunenin ergime bölgesinde iri tanelerden dolayı büyük boşlukların ve gözeneklerin oluştuğu, bu yüzden de kesit alanının azaldığı ve bu bölgenin kırılma başlangıç noktası olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle düşük kaynak hızında birleştirilen kaynaklı numunenin çekme dayanımı düşük ve kırılma türü ise gevrek olarak gerçekleşmiştir. 2.75 m/dk kaynak hızının üzerindeki birleştirilen numunelerde ise kırılma kaynak bölgesi dışından (ana malzeme) gerçekleşmiştir. Bu numune yüzeylerinde önemli boşlukların olmadığı ve kırılmaların sünek tipte oldukları görülmüştür. Çalışma sonucunda, kaynak hızındaki artışın, kırılma modunu gevrekten süneğe değiştirdiği rapor edilmiştir.

Yine bir başka çalışmalarında Palanivel ve arkadaşları [76] Grade 2 titanyum boruları sürtünme ve lazer kaynak yöntemleri ile birleştirmişler ve kaynaklı numunelere çekme testi uygulamışlardır. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin ergime bölgesinde hızlı soğuma nedeniyle alt tane sınırlarının oluştuğunu (substructure boundaries) bu sınırların dislokasyon hareketlerinin önünde bir engel oluşturduğunu ve bu nedenle de mekanik özelliklerin attığını rapor etmişlerdir. Ayrıca mukavemetin artmasının bir diğer sebebinin de ergime bölgesine çevre atmosferden gelen N ve O gibi mikro alaşım elementleri olduğunu belirtmişlerdir. Bu iki güçlendirme mekanizması sayesinde lazer kaynaklı numunelerin ana malzemedan koptuğunu ve ergime bölgesinde önemli bir gözenek görülmezken, ana malzemenin sünek kırılmasına sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Çekme sonucunda kopması gerçekleşen kaynaklı numunelerin kırık yüzeyleri morfolojileri SEM'de incelenerek değerlendirilmiştir. Şekil 6.6'da orijinal ana

malzeme ile hem TIG kaynağı, hem de lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kopma yüzeylerinden elde edilen görüntüler verilmiştir.



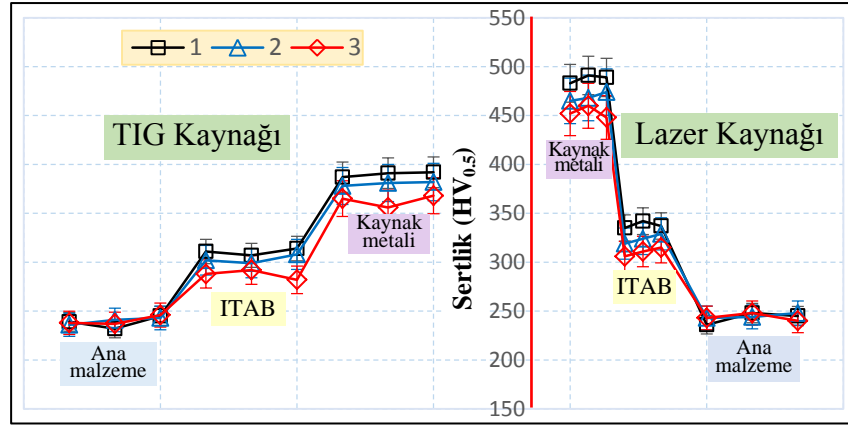
Şekil 6.6. Ana malzeme ile kaynaklı numune kırık yüzey görüntüleri; a) Ana malzeme, b) TIG 1, c) TIG 2, d) TIG 3, e) lazer 1, f) lazer 2 ve g) lazer 3.

Şekil 6.6 a'da verilen orijinal titanyum ana malzemenin kırık yüzey görüntüleri ile yine Şekil 6.6 c, d ve e'de verilen TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numune kırık yüzey morfojilerinin birbirlerine son derece benzedikleri açıkça görülmektedir. Burada hem ana malzeme hem de TIG kaynaklı numunelerin kırılma tiplerinin sünek tipte ve peteksi yapıda oldukları, ayrıca yüzeylerde az miktarda yer yer çukurcukların (dimple) olduğu görülmektedir. En yüksek ısı girdisinde birleştirilen ve ITAB'a en yakın bölgeden kopan kaynaklı numunede (Şekil 6.6 d) çok kısmi bölgede (sol üst köşe) klivaj kırılma görülmektedir. Ayrıca kırılmaların ağırlıklı olarak taneler arası kırılma olduğu tespit edilmiştir. Ana malzeme mikroyapısının ince tanelerden oluşması ve çekme testi esnasında hem ana malzeme hem de TIG kaynaklı numunelerde boşlukların birleşmesi nedeniyle kopmanın sünek kırılma biçiminde olmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak kopma öncesi numunelerin büyük miktarda plastik deformasyona uğrayarak sünek kırılma davranışı sergiledikleri görülmüştür.

Şekil 6.6 e, f ve g'de verilen lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, düşük lazer ışın gücünde birleştirilen L1 ve L2 numune kırık yüzeylerinin, yüksek ışın gücünde birleştirilen L3 numune kırık yüzeyinden farklı olduğu görülmektedir. Burada L1 ve L2 numunelerin kaynak metalinden L3 numunesinin ise ana malzemedan kopması bu farklılığın temel sebebidir. L1 ve L2 numunelerinde tane içi kırılmaların yoğunlukta olduğu için klivaj düzlemlerin oluştuğu ve dolayısıyla da kırılmanın gevrek tipte olduğu görülmektedir. Ayrıca kaynak metalinde iri taneli yapıdaki boşlukların birleşmesiyle gevrek kırılma sergilediği söylenebilir. L3 numunesindeki kopma yüzeyi incelendiğinde ise ana malzeme kırık yüzeyi ile aynı sünek kırılma davranışı sergilediği görülmüştür. L3 numunesinde ısı girdisinin yüksek olması bu numunede kaynak sonrası soğuma hızını azalttığından kopma kaynak bölgesi dışından ve sünek olarak gerçekleşmiştir. Köse ve Karaca [21], Ti6Al4V alaşımının fiber lazer kaynak kabiliyetini araştırmışlar ve bazı numunelerde kırılma biçiminin sünek, bazılarının ise klivaj kırılmayla birlikte tanelerarası gerçekleştiğini, Palanivel ve arkadaşları [75], ise Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirdikleri titanyum boru malzemelerin kırık yüzeylerinin küçük tane boyutunun peteksi bir doku nedeniyle sünek kırılma sergilediklerini rapor etmişlerdir.

### 6.3. SERTLİK TESTİ

Titanyum boruların TIG ve lazer ışını ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirildiği kaynaklı numunelere sertlik testi uygulanmış ve her bir kaynaklı numunenin kaynak bölgesi (kaynak metali ve ITAB) kendi aralarında ana malzeme ile ayrıca iki kaynak yöntemiyle birleştirilmiş numunelerin birbirleriyle kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Bu amaç ile hem TIG kaynağı hem de lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerleri Şekil 6.7’de bir grafikte verilerek kıyaslama kolaylaştırılmaya çalışılmıştır.



Şekil 6.7. TIG ve lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin sertlik grafikleri.

Şekil 6.7’de verilen sertlik grafiği incelendiğinde lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden (kaynak metali ve ITAB) ölçülen sertlik değerlerinin TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Farklı iki kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak metallerinden ölçülen sertlik sonuçları incelenecek olursa lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin sertlik aralığının 450-500 ±4 HV, TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerin kaynak metallerinden ölçülen sertlik aralığının 350-400 ±4 HV olduğu görülecektir. Benzer biçimde her iki kaynak yönteminin ITAB’ından ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında, lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin ITAB’larından ölçülen sertlik aralığının 300-340 ±4 HV, TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerden ölçülen sertlik aralığının ise 280-315 ±4 HV olduğu görülmüştür.

TIG kaynak yöntemi ile farklı kaynak akımlarında birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak metallereinden ölçülen sertlik değeri kendi aralarında kıyaslanacak olursa kaynak akımının, dolayısıyla ısı girdisinin artmasına bağı olarak sertliklerde yaklaşık 10-15  $\pm$ 4 HV'lik bir azalmanın olduğı belirlenmiştir. Benzer şekilde bu numunelerin ITAB'larından ölçülen sertlik değeri incelendiğinde ısı girdisinin artmasına bağı olarak, dolayısıyla yavaş soğumanın etkisi ile sertliklerin kaynak metaline benzer şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

Lazer ışın kaynak yöntemi ile üç farklı lazer gücü (130, 140 ve 160 W) kullanılarak yapılan birleştirmelerin kaynak metallereinden ve ITAB'larından ölçülen sertlik değeri bakıldığında kaynak ısı girdisinin artmasına bağı olarak kaynak sonrası soğuma hızı azaldığından sertliğin de yaklaşık 10-20  $\pm$ 4 HV arasında bir düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

Sertlik sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde hem TIG kaynaklı numunelerin kaynak metaline ve ITAB'larından ölçülen sertlik değeri, hem de lazer ışın kaynaklı numunelerin kaynak metaline ve ITAB'larından ölçülen sertlik değeri orijinal titanyum ana malzemeden daha yüksek olduğı belirlenmiştir. Bir başka ifade ile her iki kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerde de ana malzemeden kaynak metaline doğru gidildikçe sertliklerin arttığı tespit edilmiştir. TIG kaynak yönteminin güç yoğunluğunun lazer kaynak yönteminin göre düşük olması nedeniyle, yüksek ısı girdisi ve yavaş katılma oluşturmakta ve kaynaklı birleştirmelerden düşük sertlik değeri elde edilmektedir.

Kahraman ve arkadaşları [83] saf titanyum malzemeleri plazma ark kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve yaptıkları sertlik testleri sonucunda ana malzemeden kaynak metaline gidildikçe sertliğin arttığını, benzer şekilde Dikbaş ve Katı [84] Ti6Al4V alaşımını plazma ark kaynağıyla 1800 W kaynak gücünde birleştirmişler ve mikrosertlik testlerinde ana metalden ergimiş bölgeye ilerledikçe sertliğin arttığını ve en yüksek değere ergimiş bölgede ulaştığını, ayrıca mikrosertlik değeri kaynak hızına bağı olarak ters orantılı arttığı, yani yüksek kaynak hızında düşük değerde düşük kaynak hızında ise yüksek değerde olduğunu rapor etmişlerdir.

Köse ve Karaca [21], Ti6Al4V alaşımını fiber lazer kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve sertlik testi ölçümlerinde farklı ısı girdisi ile birleştirilen numunelerin kaynak metali ve ITAB sertliğinin ortalama sertlik değerlerinin ana metalden daha yüksek olduğunu, ısı girdisi arttıkça, sertlik değerinde azalmalar meydana geldiğini, ısı girdisinin artışına bağlı olarak birincil  $\beta$  yapısının irileşmesi neticesinde sertlikte düşüşler meydana geldiğini rapor etmişlerdir.

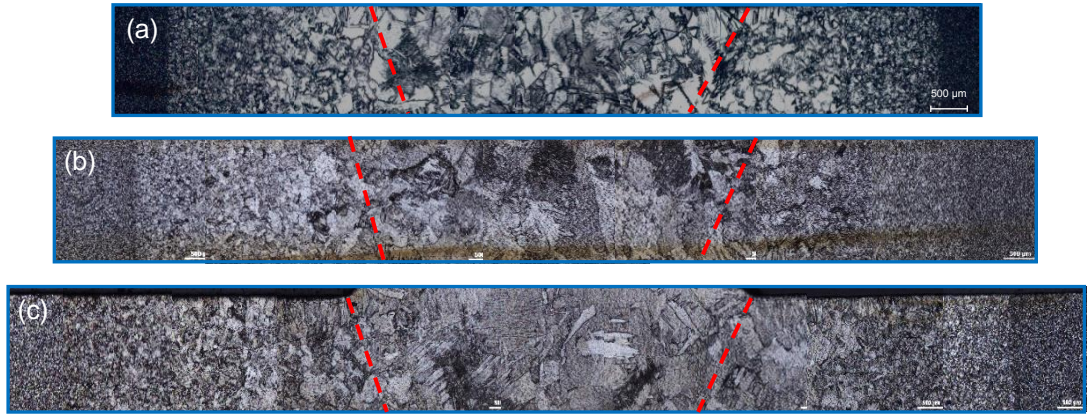
Wang ve arkadaşları [79] TA15 Ti-alaşımını karbondioksit lazer kaynak yöntemi ile 1.0 kW lazer gücünde ve 1.2 m/dk kaynak ilerleme hızında birleştirmişler ve bağlantının kaynak bölgesinin sertlik ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Lazer kaynaklı numuneler üzerinde yaptıkları sertlik ölçümleri sonucunda ergime bölgesinin ince asiküler  $\alpha'$  martenzitik yapının oluşması nedeniyle en yüksek sertliğine sahip olduğunu, bitişik olan ısı tesiri altında kalan bölgede ise sertliğin hızla düştüğünü ve ana malzemenin en düşük sertliğe sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Fraga ve arkadaşları [85] diş protez yapımında kullanılan Grade 2 saf titanyum malzemeleri hem TIG hem de lazer kaynağı ile birleştirmişler ve kaynak yönteminin etkilerini kaynaklı numuneler üzerinde kıyaslamalı olarak araştırmışlardır. Kaynak işlemlerinde 4.32 kW lazer gücü ve Nd:YAG lazer yöntemi, TIG kaynağında ise 43 A akım şiddeti ve invertör türü kaynak makinası kullanmışlardır. Sertlik ölçümleri için öncelikle ITAB genişliklerini ölçmüşler ve bu değeri lazer kaynağı için 0.8 mm, TIG kaynağı için ise 1.7 mm olarak tespit etmişlerdir. Sertlik ölçümleri sonucunda her iki kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin ITAB'larının 252 HV civarında olduğunu, ancak kaynak metallerinden ölçülen sertlik değerlerinin lazer kaynağında 420 HV, TIG kaynağında ise 284 HV olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak lazer kaynağının sertliği daha yüksek soğutma hızı nedeniyle, TIG kaynağında olduğundan daha yüksek olduğu ve kaynak metalinde martenzitik mikroyapıya yol açtığını rapor etmişlerdir.

#### 6.4. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

TIG ve lazer ışın kaynak yöntemleri ile farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak bölgesini makro ve mikro olarak karakterize edebilmek için kaynaklı numuneler üzerinde optik mikroskop çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

TIG kaynak yöntemi ile üç farklı kaynak parametresinde birleştirilen kaynaklı numunelerin ana malzemeyi de kapsayan kaynak bölgesi (ITAB ve kaynak metali) makro/mikroyapı resimleri Şekil 6.8’de verilmiştir.

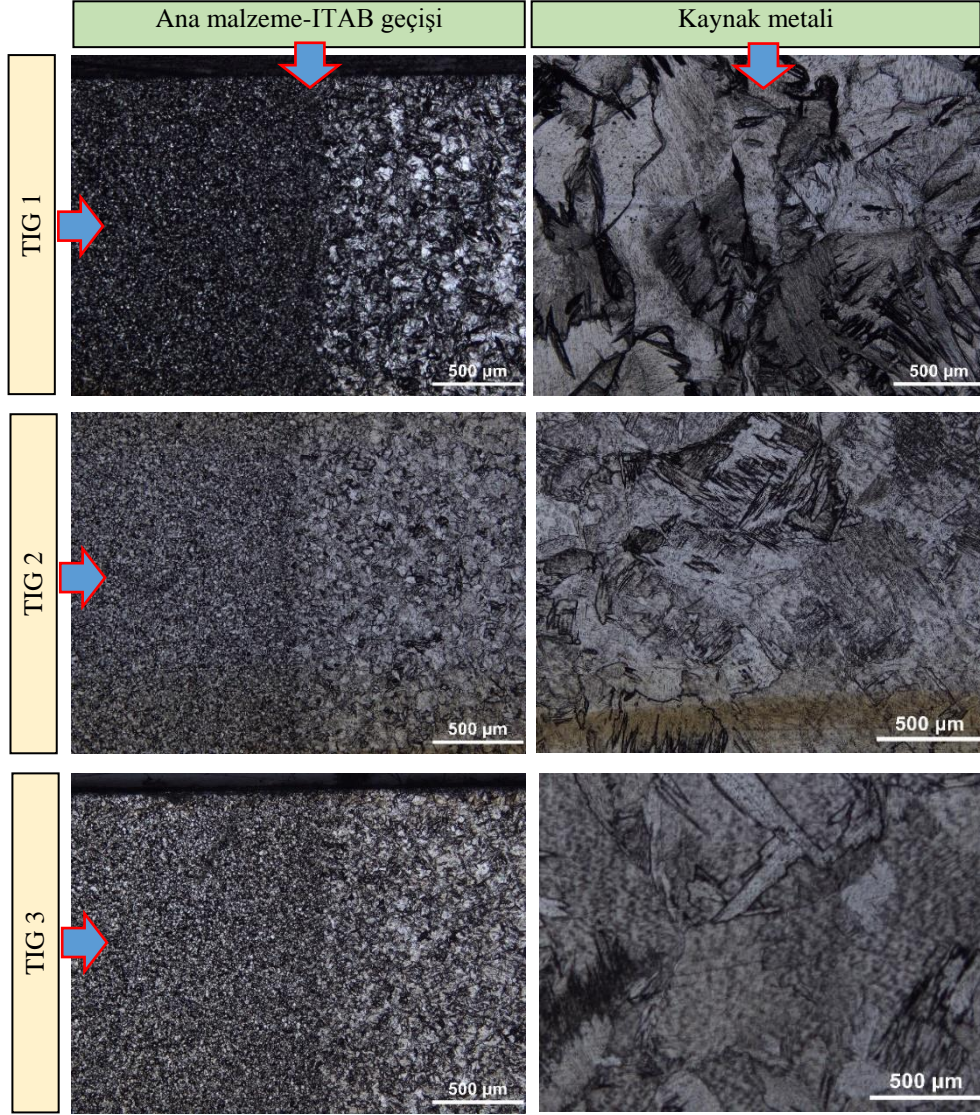


Şekil 6.8. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgeleri; a) TIG 1, b) TIG 2 ve c) TIG 3.

Şekil 6.8 incelendiğinde TIG kaynak parametrelerinden kaynak akımının artmasıyla kaynak bölgesinin (kaynak metali ve ITAB) genişlediği açıkça görülmektedir. Ayrıca gerek kaynak metali gerekse ısı tesiri altında kalan bölgede tane yapısının az da olsa irileştiği görülmektedir.

Kaynak bölgesi (kaynak metali ve ITAB) bir başka açıdan değerlendirilecek olursa gerek kaynak metalindeki gerekse ısı tesiri altında kalan bölgedeki tane büyüklüklerinin irili ufaklı olduğu, bir başka ifade ile buralarda tane büyüklüklerinin homojen olmadıkları belirlenmiştir. Şekil 6.9’da bu oluşumu daha yakından görebilmek için hem kaynak metalleri hem de ana malzeme-ITAB geçişleri daha fazla büyütmede verilerek kıyaslanmanın kolaylaşması amaçlanmıştır.

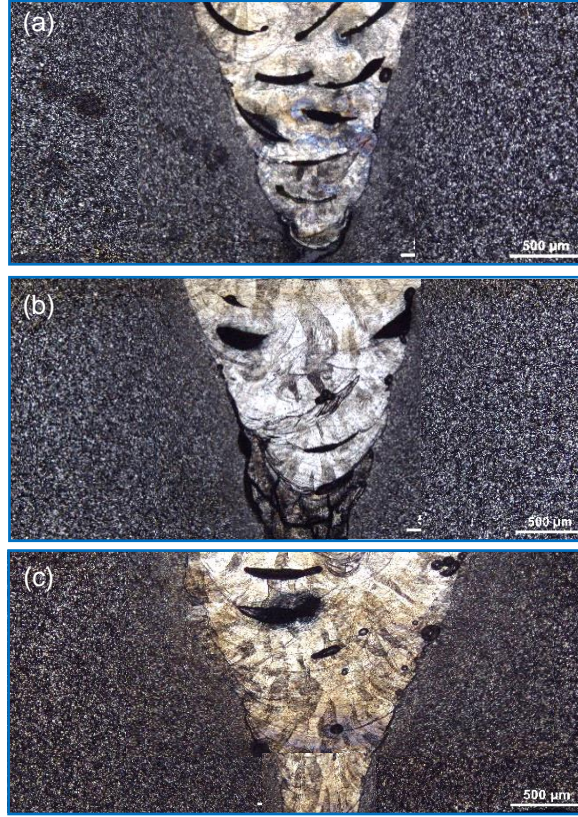




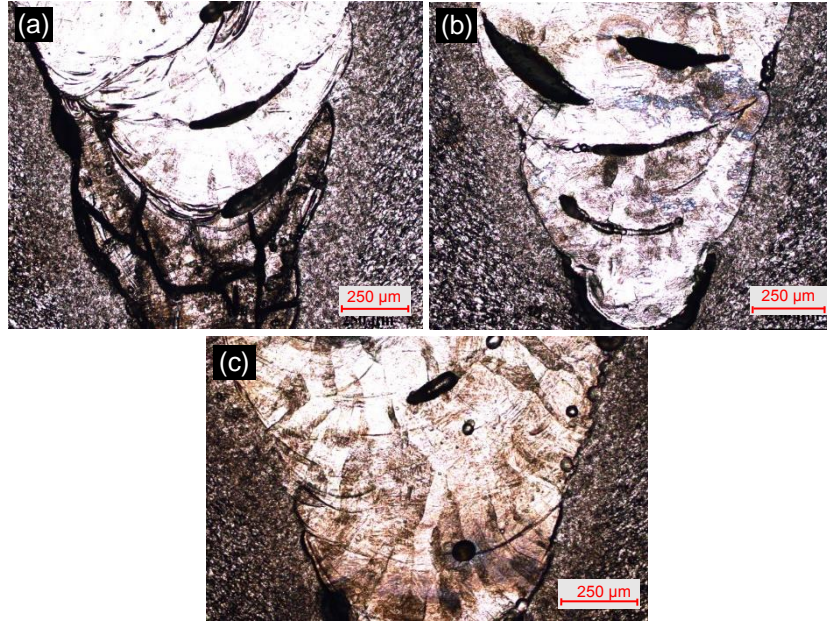
Şekil 6.9. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları.

Şekil 6. 9 incelendiğinde ana malzemenin oldukça ince tanelerden oluştuğu, ısının en düşük olduğu kısmen dönüşüme uğramış bölgede ise tanelerin ana malzemeye göre bir miktar irileştiği görülmüştür. Kaynak metaline gelindiğinde ise tane irileşmesinin ana malzemeye göre dikkate değer bir biçimde arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kaynak metali tane ebatlarının ısı girdisi artışına bağlı olarak, dolayısıyla soğuma hızının azalmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Karpagaraj ve arkadaşları [46] titanyum malzemeleri TIG kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve ergime bölgesinde (kaynak metali) ana metaldeki eşeksenli ince tanelerin aksine kayda değer bir tane irileşmesinin meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Şekil 6.10 ve 6.11’de lazer ışın kaynak yöntemi

ile farklı lazer ışın güçlerinde birleştirilmiş kaynaklı numunelerin makro/mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.10. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak bölgeleri; a) L1, b) L2 ve c) L3.



Şekil 6.11. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin mikroyapıları a) L1, b) L2 ve c) L3.

Şekil 6.10'da verilen makro fotoğraflar incelendiğinde kaynak metali içerisinde, özellikle pasolar arasında kısmen boşlukların meydana geldiği görülmektedir. Meydana gelen bu boşlukların en düşük lazer ışın gücünde birleştirilen numunede daha çok ve lazer ışın gücünün artmasına bağlı olarak azaldığı, bu boşlukların mekanik özellikleri olumsuz olarak etkilediği, hatta bu boşlukların kaynak metalinden kopmalara sebep olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.11'de verilen mikroyapılara bakıldığında ise ana malzeme tane yapısının kaynak metaline göre çok daha küçük olduğu, kaynak metalinin iri tanelerden oluştuğu gözlenmektedir. Kaynak metali ergime sınırına bitişik ITAB'da ise orijinal tane yapısının bozulduğu ancak hızlı soğumadan dolayı tane irileşmesinin kısmen meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca L3 nolu numunede daha belirgin olmak üzere kaynak metalinde oluşan tanelerin kaynak merkezine doğru sıcaklığın etkisi ile yönlendikleri tespit edilmiştir.

TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numuneler (Şekil 6.8 ve 6.9) ile lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş (Şekil 6.10 ve 6.11) kaynaklı numuneler kıyaslanacak olursa lazer kaynaklı numunelerin gerek kaynak metali gerekse ITAB'ın çok daha dar bir alanda oluştuğu kolaylıkla görülebilir. Ayrıca TIG kaynağında daha belirgin olmak üzere her iki yöntemde de ergime bölgesinin (kaynak metali) testere dişine benzer ve düzensiz sınırları olan iri tanelerden meydana geldiği görülmüştür. Palanivel ve arkadaşları [75] çalışmalarında titanyum malzemelerin lazer kaynağında hızlı soğuma nedeniyle tırtıklı (serrated) düzensiz sınırları olan iri tanelerden meydana geldiğini rapor etmişlerdir.

TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde ilave tel çapının büyük (1,2 mm) olması kaynak işlemlerinin iki pasoda, lazer ışın kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerde ise ilave tel çapının çok daha küçük (0,4 mm) olmasından dolayı on pasoda yapılması kaynak metalinde oluşan boşluk miktarını etkilemiş gözükmektedir. Son olarak da hem TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerde, hem de lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş numunelerde artan ısı girdisi (akım ve lazer gücü) nedeniyle soğuma hızı yavaşlamış dolayısıyla kaynak metali tanelerinin irileştiği belirlenmiştir.

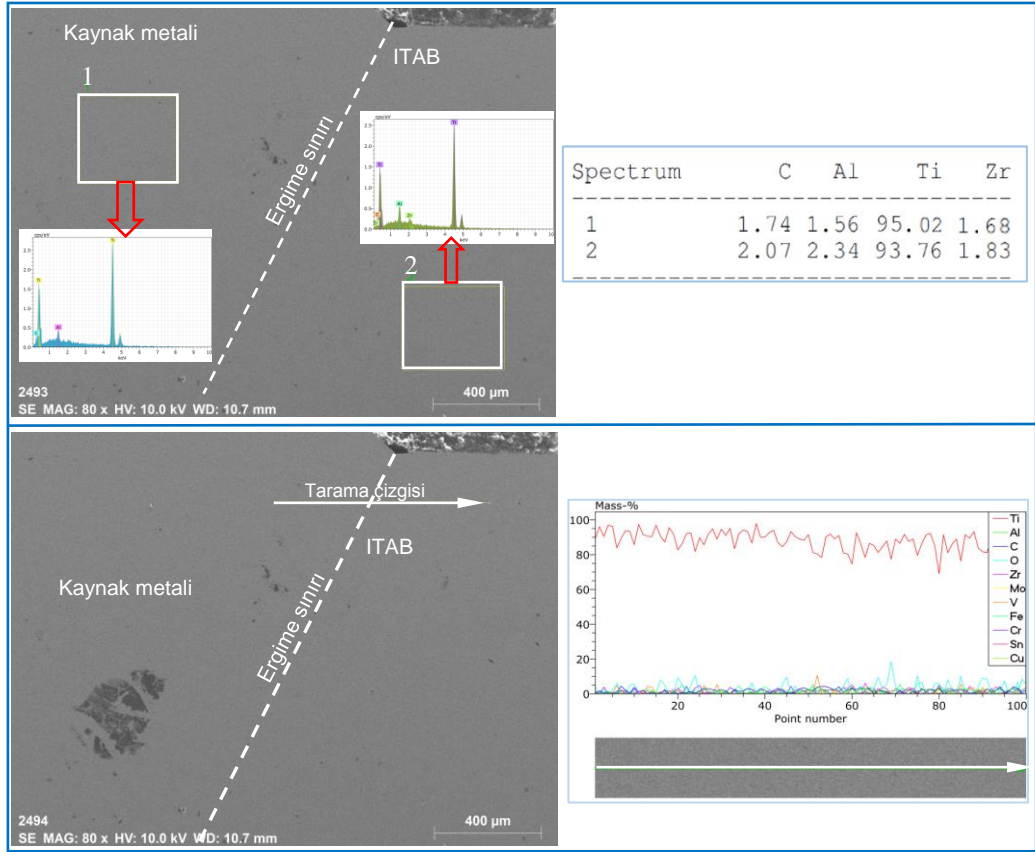
Gao ve arkadaşları [49] TIG ile karşılaştırıldığında, lazer ışın kaynaklı titanyum malzemelerin dar bir kaynak metali ve ısıdan etkilenmiş bir bölgeye sahip olduğunu, ayrıca lazer ışın kaynaklı numunelerin, kaynak bölgesinin yüksek kaynak hızı ve düşük ısı girdisi nedeniyle kaynak metalindeki tane boyutunun, nispeten TIG kaynaklı numunelerin tane boyutundan daha küçük olduğunu rapor etmişlerdir.

Palanivel ve arkadaşları [76] titanyum malzemeleri lazer ışın kaynağı ile birleştirmişler ve tane büyüklüğü açısından ana malzeme ile kaynak metalinin farklılık gösterdiğini, bunun sebebinin de kaynak sırasındaki ısıl çevrimden kaynaklandığını, ayrıca kaynak bölgesinde düzensiz sınırları olan kaba tanelerin gözlemlendiğini ve düşük toplam ısı girdisi nedeniyle de ITAB'ın dar bir aralıkta oluştuğunu belirtmişlerdir.

## **6.5. SEM (EDS) ÇALIŞMALARI**

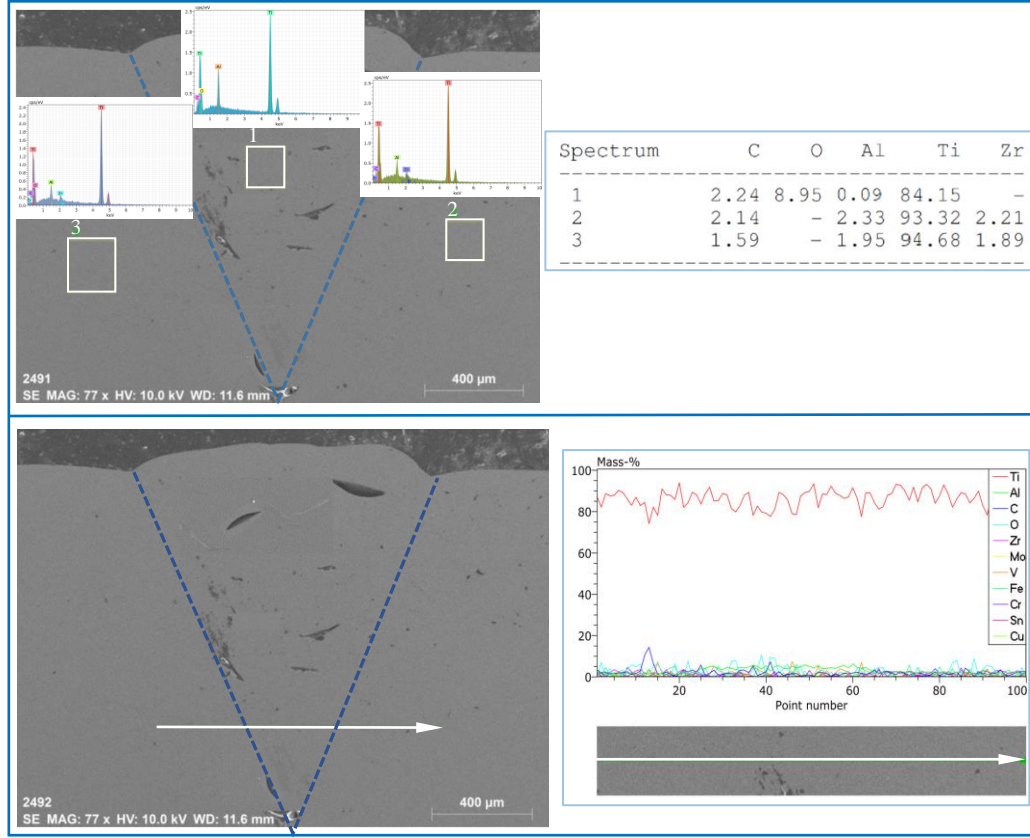
Titanyum boru malzemelerin TIG ve lazer ışın kaynak yöntemi ile farklı parametrelerde birleştirildiği kaynaklı numunelerin kaynak bölgeleri (kaynak metali ve ITAB) hem belirli bir alan analizine hem de çizgisel analize tabi tutulmuştur. Kaynaklı numunelere bu testi yapmanın amacı, her bir kaynak yönteminin kendine özgü kaynak karakteristiklerinin olması ve kaynak esnasında gerçekleştirilen paso sayısı farklılıklarının kaynak metaline etkilerini görmektir.

Şekil 6.12'de TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numuneden alınan analiz bölgeleri ve sonuçları, Şekil 6.13'de ise lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numuneden alınan analiz bölgeleri ve sonuçları verilmiştir. Burada analiz işlemleri tüm numunelerde birbirine yakın sonuçlar vereceği düşüncesiyle her bir kaynak yöntemi için sadece birer numuneye gerçekleştirilmiştir. Bu seçim de her bir yöntem için orta parametrede birleştirilen kaynaklı numuneler (T2 ve L2) tercih edilmiştir.



Şekil 6. 12. TIG kaynağı ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz sonuçları.

Şekil 6.12’de verilen TIG kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunenin analiz sonuçları incelendiğinde, 1 nolu bölgenin kaynak metali olması sebebiyle, kaynak metalinin de kaynak esnasında ilave metal ile ana malzemenin ergiyen kısmından oluştuğu düşünüldüğünde analiz sonucunun ortalama değerleri yansıttığı görülmektedir. Bir başka ifade ile kaynak esnasında kullanılan ilave metalin Cp titanyum olmasına rağmen kaynak metali analizinde alüminyum ve zirkonyuma rastlanılmış olması kaynak metalinde iyi bir karışım olduğunu göstermektedir. Çizgisel analiz grafiği incelendiğinde ise kaynak metalinden ana malzemeye doğru gidildikçe Al ve Zr miktarının artması, bu artış miktarı kadar da titanyumun azalması doğal olarak beklenen bir sonuçtur.



Şekil 6.13. Lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunenin EDS analiz sonuçları.

Şekil 6.13’de verilen lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunenin analiz sonuçları incelenecek olursa 1 nolu kaynak metalinde eser miktarda alüminyuma (0.09 Al) rastlanırken, aynı alanda zirkonyuma hiç rastlanılmamıştır. Kaynak metalinde (1 nolu alan) ana malzemede mevcut olan Al ve Zr elementlerine burada rastlanılmamasının sebebi olarak lazer kaynak işleminin çok pasolu olarak gerçekleşmesi gösterilebilir. Dolayısıyla çok pasolu kaynaklarda ana malzemeye yakın bölgelerde (ergime sınırı) kaynak metalî yapısı ana malzeme ve ilave metal karışımından olurken orta pasolarda ağırlıklı olarak ilave metalden oluşmaktadır. Çizgisel analiz grafiği incelendiğinde ise ana malzemede titanyum matris elementin yanında normal miktarda Al ve Zr görülürken, kaynak metaline gelindiğinde Al ve Zr miktarının bir miktar azaldığı görülmektedir. Alan analizinde görülmeyip çizgisel analizde kaynak metalinde Al ve Zr görülmesinin sebebi; çizgisel analizin kaynak merkezinden ziyade kaynak köküne yakın bölgeden yapılmasından kaynaklanmaktadır. Yani bu bölgede, kaynak esnasında ilave metal ile ana malzemenin karışımı söz konusudur.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

TIG ve lazer ışın kaynağı ile birleştirilen titanyum buruların kaynak bölgelerinin çekme testi, sertlik testi ve mikroyapı çalışmalarıyla karakterize edildiği bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Göz ile yapılan muayene sonucunda hem TIG kaynağı ile hem de lazer kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin kaynak metali renklerinin gümüş parlaklığı renklerinde (kaynak kalitesi mükemmel) oldukları görülmüştür. Benzer şekilde lazer kaynaklı numunelerin ITAB'ının da gümüş parlaklığı renginde olmasına rağmen TIG kaynaklı numune ITAB'larının ağırlıklı saman sarısı olmak üzere kısmi altın sarısı renginde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak kaynaklı numunelerde kabul edilemez gri renk gözlenmemiştir.
- Her iki kaynak yöntemi ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin göz ile muayene sonucunda kaynak yüzey hatalarına (gözenek, yenme olukları, eksik/fazla dikiş yüksekliği, makro çatlak vb) rastlanılmamıştır. Kaynak kökleri incelendiğinde ise TIG kaynaklı numunelerde nüfuziyet eksikliği hatasına rastlanmazken, lazer kaynaklı numunelerin düşük lazer gücünde birleştirilen iki numunede kısmi nüfuziyetsizlik hatasının olduğu görülmüştür.
- Çekme testleri sonucunda TIG kaynaklı numunelerin tamamında kopma ana malzemedenden gerçekleşirken, lazer kaynaklı numunelerde en yüksek lazer gücünde birleştirilen numunede kopma ana malzemedenden, diğer iki numunede ise kaynak metalinden gerçekleşmiştir. Bir başka ifade ile ana malzemedenden kopan dört numune (3 TIG, 1 lazer kaynaklı) orijinal ana malzeme ile aynı çekme dayanımı sergilemiştir.

- Ana malzemedeki kopan kaynaklı numunelerin (TIG 1, 2, 3 ve Lazer 3) kırılma yüzeylerinin, kopma öncesinde büyük plastik deformasyona maruz kaldığını gösteren çok sayıda çukurcuğun oluştuğu belirlenmiştir.
- Sertlik testleri sonucunda en yüksek sertlikler lazer kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelerin kaynak metallere 450-490 HV olarak ölçülmüştür. Aynı numunelerin ITAB sertlik değerleri ise 305-340 HV aralığında bulunmuştur. TIG kaynağı ile birleştirilen numunelerde ise sertlik değerleri kaynak metalinden 365-395 HV, ITAB'dan ise 280-315 HV arasında ölçülmüştür. Sertlik testleri sonucunda en düşük sertlik ölçümleri ana malzemelerden 232-240 HV aralığında belirlenmiştir.
- Makroyapı görüntülerinden lazer ışın kaynağı ile birleştirilmiş kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi (kaynak metal ve ITAB) genişliğinin TIG kaynaklı numunelere göre dar bir alanda oluştuğu görülmüştür.
- Mikroyapı çalışmaları sonucunda, her iki kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelerde, kaynak metallere düzensiz sınırları olan büyük tanelerden oluştuğu belirlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre gelecekte bu konuda çalışmayı düşünen araştırmacılara aşağıdaki öneriler yapılabilir;

- Lazer kaynağı ile birleştirilecek malzemelerde, lazer ışın gücü ve ilave metal çapı artırılarak daha az paso sayısı ile kaynaklar yapılabilir. Böylelikle pasolar arası hatalar en aza indirgenebilir.
- Her iki kaynak yönteminde de ilave metal, otomatik olarak kaynak bölgesine beslenerek homojensizlikler giderilebilir.



## KAYNAKLAR

1. Kaya, Y., Durgutlu, A., Kahraman, N. ve Gülenç, B., “Titanium levhaların TIG kaynağı ile birleştirilmesinde akım türünün mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi”, *International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elâzığ, 288-293 (2011).
2. Subaşı, M., Karataş, Ç., “Titanium ve titanium alaşımlarından yapılan implantlar üzerine inceleme”, *Politeknik Dergisi*, 15(2), 87-103 (2012).
3. Erdem, M. S., Aydın, K., Uçak motoru ve elektrojen gruplarındaki gaz türbini teknolojisindeki ilerlemeler, Malzeme, yüzey teknolojileri ve imalat süreçlerindeki gelişmeler (Bölüm 1), *Mühendis ve Makina Dergisi*, 1, 1-10 (2004).
4. İnternet: “TIG for titanium tubing”, <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/arcwelding/tig-for-titanium-tubing>, (2019).
5. Kahraman, N., Gülenç, B., “Modern Kaynak Teknolojisi”, *Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti*, Ankara, 99-134, (2016).
6. Uzunonat, Y., “TIG kaynağı uygulanmış Inconel 718 malzemenin darbe dayanımının incelenmesi” *Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 11-16, (2012).
7. İnternet: “Laser Uygulamaları”, <https://www.laseral.com.tr/uygulamalar>, (2019).
8. İnternet; “Makinatek”, <http://makinatek.com.tr/uncategorized/lazer-kaynady-ve-uygulamalar>. (2019).
9. Demirbağ, A. K., “Dental uygulamalarda kullanılan Ti-6Al-4V alaşımına lazer kaynak uygulamasının incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 2-4 (2018).
10. Kadir, A., “Farklı elektrolitik çözeltilerde mikro ark oksidasyon işlemi uygulanan Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerinin karşılaştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21-46, (2011).
11. İşler, A., “Titanium alaşımlarının ısıl işlem ve mekanik özellikleri”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-67 (1999).

12. Uzun, İ. H., Bayındır, F., “Dental uygulamalarda titanyum ve özellikleri”, *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 20(2), 213-220 (2010).
13. Güler, K. A., “Uçak yapımında kullanılan malzemeler ve özelliklerinin incelenmesi”, Bitirme Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, 33-35 (2003).
14. Gökdemir, Y., “Saf Titanyum ve Ti6Al4V alaşımının yüksek sıcaklıkta oksidasyon davranışı”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 3-24 (2005).
15. İnternet: Totalmateria, “Metal Özellikleri”, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=MetalProperties&LN=TR>. (2019).
16. İnternet: Malzeme bilimi, “Titanyum nedir? Titanyum nerelerde kullanılır?”, <https://malzemebilimi.net/titanyum-nedir-nerelerde-kullanilir.html>. (2019).
17. Kilerci, İ., “Titanyum alaşımlarının farklı kaynak yöntemleriyle kaynağının incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 11-16 (2011).
18. Oyar, P., “Titanyum ve özellikleri”, *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 25(1) 1-22 (2015).
19. İçdem, C., “Saf titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb alaşımlarının akışkan yatak ortamında termal oksidasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 12-25 (2007).
20. İnternet: Totalmateria, “Chemical and Mechanical Properties of Titanium and Its Alloys”, <http://www.totalmateria.com/article126.htm>. (2019).
21. Köse, C., Karaca, E., “Ti6Al4V alaşımının fiber lazer kaynak kabiliyeti”, *Technological Applied Sciences (NWSATAS)*, 12(3),140-152 (2017).
22. İnternet: Chemicool, “Titanium Element Facts”, <https://www.chemicool.com/elements/titanium.html>. (2019).
23. Akdaş, Y. F., “Termal oksidasyon yöntemi ile Cp-Ti ve Ti6Al4V alaşımının yüzey modifikasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 12-26 (2006).
24. Boyer, R., “Titanium for Aerospace: Rationale and Applications”, *Advanced Performance Materials*, 2, 349-368 (1995).
25. Yılmaz, N., “Mimaride titanyum kullanımı” *Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 23-27 (2008).

26. Bulut, E. B., “Bakır (Cu) ve çelik (St-37) plakalarının TIG (Tungsten Inert Gas) Kaynağı Yöntemiyle Kaynaklanabilirliği”, *Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 21-38 (2008).
27. Altıntaş, H. İ., “Plastik enjeksiyon kalıplarının onarım kaynağında tungsten elektrod ile koruyucu gazaltı kaynağı ve lazer kaynak parametreleri ve etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 27-37 (2018).
28. Seyitoğlu, M. N., “TIG Kaynağı ile kaynatılmış otomotiv saclarının mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 48-68 (2013).
29. Elektrikçi, O., “TIG kaynağı ile birleştirilmiş demir esaslı T/M malzemelerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 49-56 (2007).
30. Gözütok, E., “Paslanmaz Çeliklerin TIG Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Kaynaklı Bağlantının Yorulma Dayanımı ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisinin Araştırılması” *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 23-34 (2009).
31. İnternet: “Material Selection” <https://www.profusiononline.com/tungsten/material.htm> (2019).
32. Kırmacı, A. T., “Tungsten elektrodların hazırlanması ve seçilmesi için ipuçları”, *Askaynak Kaynak Tekniği ve San AŞ*, İstanbul, 1-7 (2007).
33. Komaç, E., “Kaynak Teknik Eğitim El Kitabı, TIG Kaynağı Yöntemi”, *Askaynak yayınları*, 47-53 (2014).
34. Anık, S., “Kaynak tekniği el kitabı, Yöntemler ve donanımlar”, *Gedik Holding yayını*, İstanbul, 75-78, (1991).
35. Sağkol, Y., “Paslanmaz çeliklerde A-TIG uygulamaları”, *Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 13-15 (2013).
36. Anık S., Vural, M., “Gazaltı ark kaynağı (TIG • MIG • MAG)”, *Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, Yayın No:3*, 56-60, (1992).
37. Eratıcı, E., “Magnezyum alaşımlarının TIG kaynak özellikleri”, *Yüksek Lisans Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 17-37 (2011).
38. İnternet: Can, G., “Titanium alaşımı borular için orbital tungsten asal gaz (TIG) Kaynak Proses Parametrelerin Elde Edilmesi”, [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/e187c30f54e0286\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/e187c30f54e0286_ek.pdf). (2019).

39. Çapın, H. F., “S235 JR alaşımsız çelik boruların dik pozisyonda orbital kaynak cihazı ile birleştirilmesi ve uygulamanın optimizasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 23-33 (2014).
40. Sönmez, U., Çavuşoğlu N., Ceyhun, V., “Orbital TIG kaynak yöntemiyle kaynak edilmiş dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik, metalurjik ve korozyon özellikleri”, *Kaynak kongresi IX. Ulusal kongre ve sergisi bildiriler kitabı, Yayın No: 649*, Ankara, 329-344 (2015).
41. İnternet: “Gedik kaynak”, <http://www.gedikkaynak.com.tr/boru-kaynaginda-orbital-kaynak-cozumleri.html>, (2019)
42. İnternet: “Boru kaynak”, <http://www.borukaynak.com/index.php/makaleler/orbital-otomatik-boru-kaynag-n-n-esaslar>, (2019).
43. İnternet: “TIG (Argon) Kaynağı”, <https://malzemebilimi.net/tig-argon-kaynagi.html>. (2019),
44. Kumar, A., Sapp, M., Vincelli, J., Gupta M. C., “A study on laser cleaning and pulsed gas tungsten arc welding of Ti-3Al-2.5V alloy tubes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(1) 64-71 (2010).
45. Chen, J. C., Pan, C. X., “Welding of Ti-6Al-4V alloy using dynamically controlled plasma arc welding process,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(7) 1506-1512, (2011).
46. Karpagaraj, A., Sivashanmugam, N., Sankaranarayananasamy, K., “Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets”, *Materials Science & Engineering A*, 640, 180–189 (2015).
47. Gope, D. K., Kumar U., Chattopadhyaya S., Mandal S., “Experimental investigation of pug cutter embedded TIG welding of Ti-6Al-4V titanium alloy”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32 (6) 2715-2721 (2018).
48. Uygur İ., Doğan İ., “The effect of TIG welding on microstructure and mechanical properties of a butt-jointed unalloyed titanium”, *Metalurgija*, 44 (2) 119-123 (2005).
49. Gao, X. L., Zhang, L. J., Liu, J., Zhang. J. X., “A comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate”, *Materials Science & Engineering A*, 559, 14-21 (2013).
50. Tokdemir, M., “Lazer kaynağı ile birleştirilmiş demir esaslı t/m malzemelerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, *Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 1-4 (2007).

51. İnternet: “Lazer Kaynak Teknolojisinin Uygulamaları”, <https://www.laseral.com.tr/uygulamalar/5/lazer-kaynak>. (2019).
52. Ovalı, C. K., “TRIP800 / DP800 / DP600 çeliklerinin lazer kaynak kabiliyetinin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 35-37 (2014).
53. Erdoğan, Ş., “Lazerle delmede işlem parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14-16 (2007).
54. İnternet: “Lazerin Çalışma Prensibi”, <https://electrolog.blog/2017/12/27/lazerlazerin-calisma-prensibi-ve-lazer-cesitleri/>. (2019).
55. Güneş, C., “Benzinli enjektörlerin lazer kaynağı ve lazer kaynak parametreleri”, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 14-17 (2012).
56. Önçağ, A. Ç., “Çelik jant üretiminde lazer imalat yöntemlerinin kullanımı ve konvansiyonel yöntemlerle karşılaştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 25-27 (2009).
57. Özden, H., Eryavuz, A., “Savunma sanayinde, uçak ve havacılık sektöründe lazer kaynak yöntemlerinin değerlendirilmesi”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 57(673), 54-63 (2016).
58. Boyraz, İ., Yıldız, A., “Lazer çeşitleri ve yüksek yoğunluklu lazer kullanımı”, *Journal of Contemporary Medicine*, 6 (Case Reports): 104-109, (2016).
59. Arcan, A., “Lazer ışını ile metallerin kesilmesine etki eden parametrelerin incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 34-37 (2011).
60. Çolpan, M. H., “Lazer gücünün fonksiyonu olarak lazer yüzey işleme üzerine bir çalışma”, *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 46-48 (2008).
61. Çalığılı, U., “AISI 304–430 paslanmaz–AISI 1010 çelik çiftlerinin lazer yöntemi ile kaynağında birleşme özelliklerinin incelenmesi”, *Doktora Tezi Eğitimi Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 60-65 (2009).
62. Püskülcü, G., Koçlular, F., “Lazer kaynak yöntemi ve uygulamaları”, *Mühendis ve Makine*, 50(599) 8-17 (2009).
63. Özdemir, U., “Lazer kaynaklı alüminyum alaşım bağlantıların kırılma mekaniği ve mukavemet açısından incelenmesi”, *Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 16-20 (2012).

64. Aydın K., Karaağaç, İ., “Lazer kaynağı ve lazer kaynağının başlıca uygulamaları”, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2) 693-705 (2018).
65. Özcan, M., Tarakcıoğlu, N., Kahramanlı, Ş., “Sac malzemelerin lazer kaynak parametreleri”, *Selçuk Teknik Dergisi*, 3(1), 14-25 (2004).
66. Durmus, H., “CO2 lazer kaynağıyla birleştirilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 65-70 (2006).
67. İnternet; “Lazer teknolojisi ve uygulama alanları”, <https://anahtar.sanayi.gov.tr/tr/news/-lazer-teknolojisi-ve-uygulama-alanlari/9686>, (2019).
68. Özden, H., “Otomotiv sektöründe lazerli üretim yöntemleri lazerli imalat, ölçme ve kalite kontrol”, *Mühendis ve Makina*, 50(596) 38-43 (2009).
69. İnternet: “Fiberlast otomotiv endüstrisinde lazer uygulamaları”, «<http://makinatek.com.tr>,» <http://makinatek.com.tr/uncategorized/135-fiberlast-otomotiv-endustrisinde-lazer-uygulamalari/>. (2019).
70. Köse, C., “Medikal alanda kullanılan paslanmaz çeliklerin lazer kaynak kabiliyeti ve kaynaklı bağlantıların biyoaktivite ve biyokorozyon davranışlarının araştırılması”, *Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 35,36 (2015).
71. Üzgür, S., “Lazer kaynaklı Inconel 718 süper alaşımının kaynak hassasiyeti için Vareststraint test düzeneğinin geliştirilmesi”, *Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*,52-57 (2013).
72. Ertem R. U., Paslanmaz çeliklerde lazer kaynak parametre değişimlerinin dikiş geometrisine etkisinin incelenmesi, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma* 31, 583-593, (2013).
73. Kilerci, İ., Köksal, N. S., “Investigation of mechanical and metallurgical properties of titanium alloys by using laser and GTA welding”, *Kovove Materialy* 51(5) 299-304 (2013).
74. Carvalho, S., Dinaharan, I., Laubscher, R., “Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in aircraft pneumatic systems”, *International Journal of Fatigue*, 90, 47–56 (2016).
75. Palanivel, R., Dinaharan, I., Laubscher, R., “Microstructure evolution and mechanical characterization of Nd:YAG laser beam welded titanium tubes”, *Materials Characterization*, 134, 225–235 (2017).
76. Palanivel, I., Dinaharan, R. F., Laubscher., “A comparative study on microstructure and mechanical properties between friction and laser beam welded titanium tubes” *Optik*,177, 102-111 (2019).

77. Wang, K., Liua, G., Politis, D. J., Wang L., “Correlation between softening mechanisms and deformation non-uniformity of laser-welded titanium alloy tube during gas bulging process”, *Materials Characterization*, 133, 196-205, (2017).
78. Li ,C., Li, B., Wu, Z. F., Qi, X. Y., Ye, B., Wang, A. H., “Stitch welding of Ti-6Al-4V titanium alloy by fiber laser”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 27, 91-101 (2017).
79. Wang K., Liu, G., Yuan, S., “Deformation behaviour of laser-welded tube blank of TA15 Ti-alloy for gas forming at elevated temperature”, *MATEC Web of Conferences*, 21, 06005, 1-6, (2015).
80. Uzun, R. O., Durmuş, H., Meriç C., “CO2 lazer kaynağıyla birleştirilmiş Ti64 titanyum alaşımının optimum kaynak şartlarının belirlenmesi”, *SMYO Teknik Bilimler Dergisi*, 1-10 (2006).
81. El-Batahgy A. M., “Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels”, *Materials Letters* 32 155-163 (1997).
82. Oğuz B., “Demirdışı metaller kaynağı”, *Oerlikon yayınları*, İstanbul, 577-611 (1990).
83. Kahraman, N., Taşkın, M., Gülenç, B., Durgutlu, A., “An investigation into the effect of welding current on the plasma arc welding of pure titanium”, *Kovove Mater.*, 48, 179-184 (2010).
84. Dikbaş, H., Katı, N., Ti6Al4V alaşımının PTA kaynağında 1800 W kaynak gücünde birleştirilebilirliğin araştırılması”, *Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi*, 6(1) 19-30 (2015).
85. Fraga, A. F., Santos, M. L., Almeida, F. E., Guastaldi, A. C., “A comparative study of TIG and laser welded joints using commercial purity titanium used in prostheses supported by implants”, *Welding International*, 22(12) 834-839 (2008).

## **ÖZGEÇMİŞ**

30.12.1971 yılında Kars'ın Digor ilçesinde doğdu. İlkokulu 1978-1983 tarihleri arasında Kars Merkez İsmet Paşa İlkokulunda, ortaokulu 1983-1986 yılları arasında Kars Merkez 30 Ekim Ortaokulunda Liseyi ise 1986-1989 ılları arasında yine Kars Merkez Gazi Ahmet Muhtar Paşa Endüstri Meslek Lisesinde okudu. 1992 yılında başladığı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal İşleri Öğretmenliği Programını 1996 yılında tamamladı. 1996-1998 yılları arasında Kars-Akkaya Küçük Durduran İlköğretim Okulunda,1999-2009 yılları arasında Kars-Merkez Gazi Ahmet Muhtarpaşa Mesleki ve Teknik Lisesinde Meslek Bilgisi Öğretmenliği yaptı. 2009 yılından itibaren Ankara'da Pursaklar İMKB Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nde meslek bilgisi öğretmeni olarak çalışmaktadır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

**Adres** : Pursaklar İMKB Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi,  
Merkez, Saray Sokak Gülyaz Cad. No:21, 06145 Pursaklar/Ankara  
**Tel** : 505 660 99 94  
**E-posta** : erkanuygunturk@gmail.com