

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TİTANYUM ALAŞIMLARININ FARKLI KAYNAK  
YÖNTEMLERİYLE KAYNAĞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisi İlter KİLERCİ**

**Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği**

**Programı : Konstrüksiyon ve İmalat**

**MANİSA 2011**

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TİTANYUM ALAŞIMLARININ FARKLI KAYNAK  
YÖNTEMLERİYLE KAYNAĞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisi İlter KİLERCİ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Temmuz 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Temmuz 2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. N. Sinan KÖKSAL**

**Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK  
Doç. Dr. Mustafa TOPARLI**

**MANİSA 2011**

## İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ.....	1
2. TİTANYUM'UN METALURJİSİ .....	7
2.1. Titanyum'un Genel Özellikleri .....	7
2.2. Alaşım Elementlerinin Saf Titanyuma Etkisi.....	8
2.3. Titanyum Kullanımının Avantajları .....	11
2.4. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması .....	11
2.4.1. Ticari Saf Titanyum (Cp- Ti) .....	12
2.4.2. $\alpha$ Titanyum Alaşımları.....	13
2.4.3. Yakın $\alpha$ Titanyum Alaşımları .....	13
2.4.4. $\alpha+\beta$ Titanyum Alaşımları .....	14
2.4.5. $\beta$ Titanyum Alaşımları .....	16
2.5. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları .....	17
2.5.1. Titanyum ve Alaşımlarının Biyomedikal Uygulamaları .....	17
2.5.2. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Uygulamaları .....	19
2.5.3. Titanyum ve Alaşımlarının Otomotiv Uygulamaları .....	21
2.5.4. Titanyum ve Alaşımlarının Diğer Uygulamaları .....	23
3. LAZER SİSTEMLERİ .....	25
3.1. Lazer Sisteminin Temel Elemanları .....	26
3.1.1. Lazer Üretici .....	26
3.1.2. Pompalama Kaynağı .....	26
3.1.3. Optik Resonatörler .....	26
3.1.4. Odaklama Optik Elemanları .....	27
3.2. Lazer Sistemleri.....	29
3.2.1. Katı Hal Lazer Sistemleri.....	30
3.2.1.1. Nd:YAG Lazer Sistemi .....	30
3.2.1.2. Nd: CAM Lazer Sistemi .....	34
3.2.1.3. Ruby Lazer Sistemi .....	34

3.2.2.	Gaz Lazer Sistemleri .....	35
3.2.2.1.	CO <sub>2</sub> Lazer Sistemi .....	35
4.	TİTANYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ.....	37
4.1.	Titanyum ve Alaşımlarının Ergitmeli Kaynak Yöntemleri .....	40
4.1.1.	TIG Kaynağı .....	40
4.1.1.1.	Titanyum ve Alaşımlarının TIG Kaynağında Kullanılan İlave Metaller .....	42
4.1.1.2.	Kaynak Ağızı Hazırlığı .....	42
4.1.2.	Lazer Kaynağı .....	43
4.1.2.1.	İletimle Kaynak .....	45
4.1.2.2.	Derinlemesine Nüfuz Eden Kaynak (Anahtar Deliği Kaynağı) .....	47
4.1.3.	Lazer ile Kaynak İşlemi Sırasında Gerçekleşen Fiziksel Olaylar .....	49
4.1.3.1.	Soğurma .....	50
4.1.3.2.	İletim .....	50
4.1.3.3.	Erime ve Buharlaşma .....	51
4.1.4.	Lazer Kaynağının Kullanım Alanları .....	52
4.1.5.	Lazer Kaynağının Avantajları .....	53
4.1.6.	Lazer Kaynağı ve Konvansiyonel Kaynak Yönteminde Isı Tesiri Altında Kalan Bölgelerdeki Mikoyapılar .....	53
4.1.7.	Atımlı Nd:Yag Lazer Parametrelerinin Dikiş Kaynağına Etkisi .....	54
4.1.7.1.	Atımın Tepe Gücü .....	56
4.1.7.2.	Atım Süresi .....	58
4.1.7.3.	Atımın Odak Konumu .....	59
4.1.7.4.	Atım Frekansı ve Hız .....	59
4.1.7.5.	Atım Şekli .....	60
4.1.7.6.	Koruyucu Gaz .....	61
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	63
5.1.	Malzeme .....	63
5.2.	TIG Kaynağı Uygulaması .....	64
5.3.	Atımlı Nd:YAG Lazer Kaynağı Uygulaması .....	65

5.4.	Deney Numunelerinin Hazırlanışı .....	67
5.5.	Çekme Deneyi.....	68
5.5.1.	Esas Malzemeye Ait Çekme Deneyi Sonuçları.....	69
5.5.2.	Lazer Kaynaklı Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçları .....	70
5.5.3.	TIG Kaynaklı Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçları .....	71
5.6.	Üç Nokta Eğme Deneyi.....	73
5.6.1.	Esas Malzemeye Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları.....	73
5.6.2.	Lazer Kaynaklı Malzemeye Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları .....	74
5.6.3.	TIG Kaynaklı Malzemeye Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları .....	75
5.7.	Mikrosertlik Ölçümü.....	78
5.8.	Metalografik İncelemeler .....	79
6.	DENEY SONUÇLARI.....	100
7.	GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	102
8.	KAYNAKLAR.....	104

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İlmenit ve Rutil örnekleri .....	7
Şekil 2.2. a) $\alpha$ Titanyumun b) $\beta$ Titanyumun kristal yapıları ve kafes parametreleri .....	8
Şekil 2.3. Ti- Sn, Ti- Al, Ti- Mo ve Ti- Mn için faz diyagramları .....	8
Şekil 2.4. Alaşım elementlerinin titanyumun faz diyagramına etkisi.....	9
Şekil 2.5. Titanyum'un üstün özellikleri.....	11
Şekil 2.6. Ti6Al4V'nin a) 1050°C'den c)800°C'den e) 650°C'den yavaş soğutma sonunda, b)1050°C'den d)800°C'den f)650°C'den hızlı soğutma sonunda oluşan mikroyapı görüntüleri...15	
Şekil 2.7. Titanyum alaşımlarının kalça protezlerindeki kullanımı.....	18
Şekil 2.8. Titanyum alaşımlarının diş implantlarındaki kullanımı.....	18
Şekil 2.9. SR- 71 tipi uçak .....	20
Şekil 2.10. F-22 Raptor tipi uçak .....	20
Şekil 2.11. Otomotiv sektöründe genel olarak titanyum kullanımı.....	22
Şekil 2.12. Otomobil ve motosiklet üretiminde titanyum kullanımı .....	22
Şekil 2.13. İnşaat sektöründe titanyum kullanımı .....	23
Şekil 2.14. İnşaat sektöründe titanyum kullanımı .....	23
Şekil 3.1. Lazer ışını .....	25
Şekil 3.2. Nd:YAG lazer kovuğu .....	27
Şekil 3.3. Optik resonatörde dalga oluşumu.....	27
Şekil 3.4. Odaklama başlığı prensip şeması .....	28
Şekil 3.5. Odaklama başlığı.....	28
Şekil 3.6. Bir Nd:YAG lazeri odaklama başlığı .....	29
Şekil 3.7. Lazer kaynağı temel eleman şeması.....	29
Şekil 3.8. Bir Nd:YAG lazer sisteminin temel elemanları .....	31
Şekil 3.9. Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi.....	32
Şekil 3.10. JK760TR atımlı Nd:YAG lazerinin kovuğu .....	32
Şekil 3.11. Lazer demetinin TEM <sub>11</sub> modunun demet şekil belirleyici ile elde edilmiş görüntüsü 33	
Şekil 3.12. Lazer odaklama ve koruyucu gaz ünitesi .....	33
Şekil 3.13. Ruby lazer sistemi .....	34

<b>Şekil 3.14.</b> CO <sub>2</sub> lazer sistemi .....	35
<b>Şekil 3.15.</b> Farklı dalga boylarındaki lazer ışınının metal yüzeyinden yansıma yüzdeleri .....	36
<b>Şekil 4.1.</b> Kaynak kabiliyeti .....	37
<b>Şekil 4.2.</b> Titanyumun kaynağında ortaya çıkan tav renkleri .....	40
<b>Şekil 4.3.</b> TIG kaynağı prensibi .....	41
<b>Şekil 4.4.</b> Tipik kaynak ağzı çeşitleri .....	42
<b>Şekil 4.5.</b> Lazer kaynağı prensibi .....	43
<b>Şekil 4.6.</b> Kaynak işlemi sırasında oluşan bölgeler .....	44
<b>Şekil 4.7.</b> Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak, iletimle ve derinlemesine kaynak işleminin paslanmaz çelik üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması .....	44
<b>Şekil 4.8.</b> Lazer ışınının güç yoğunluğuna bağlı olarak sınıflandırılması .....	45
<b>Şekil 4.9.</b> İletimle kaynak .....	46
<b>Şekil 4.10.</b> İletimle kaynaktan derinlemesine kaynağa geçiş için kritik güç yoğunluğu .....	46
<b>Şekil 4.11.</b> Derinlemesine kaynak .....	47
<b>Şekil 4.12.</b> Derinlemesine nüfuz eden kaynaktaki aşamalar .....	48
<b>Şekil 4.13.</b> Lazer iletim ve lazer nüfuziyet kaynağı .....	49
<b>Şekil 4.14.</b> Yüksek şiddetli lazer ışınının metal yüzeye çarptığında gerçekleşen fiziksel süreç .....	51
<b>Şekil 4.15.</b> Lazer kaynağının otomotiv sanayisinde kullanımı .....	52
<b>Şekil 4.16.</b> Konvansiyonel kaynak yöntemi ve lazer kaynak yönteminin ısı tesiri altında kalan bölgeler açısından karşılaştırılması .....	53
<b>Şekil 4.17.</b> Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı .....	54
<b>Şekil 4.18.</b> Lazer kaynak kalitesini etkileyen parametreler .....	55
<b>Şekil 4.19.</b> Nd:YAG lazeri kullanılarak 2124 alüminyum alaşımlarının kaynağında tepe gücünün kaynak derinliğine etkisi .....	56
<b>Şekil 4.20.</b> Tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi .....	57
<b>Şekil 4.21.</b> Farklı alaşımların lazer kaynağında tepe gücünün kaynak derinliğine etkisi .....	57
<b>Şekil 4.22.</b> Sabit tepe gücünde lazer atım süresinin kaynak derinliği üzerindeki etkisi .....	58
<b>Şekil 4.23.</b> Lazer kaynağında darbe süresindeki değişimin kaynak nüfuziyeti ve dikiş genişliğine etkisi .....	58
<b>Şekil 4.24.</b> Odak konumunun lazer kaynağındaki etkisi .....	59

<b>Şekil 4.25.</b> Atımlı lazer ile kaynak işlemi sırasında üst üste binen periyodik spotlar.....	59
<b>Şekil 4.26.</b> GSI Lumonics firmasının ürettiği atımlı Nd:YAG lazerlerin atım şekli .....	60
<b>Şekil 4.27.</b> Soğutucu atım şekli kullanılarak yapılmış örnek bir çalışma.....	61
<b>Şekil 4.28.</b> Lazerle kaynak sırasında kullanılan koruyucu gazın akış yönünden kaynaklanan kusurlar.....	62
<b>Şekil 4.29.</b> Ti6Al4V alaşımının farklı koruyucu gaz basınçlarının kaynak dikişine etkileri .....	62
<b>Şekil 5.1.</b> Grade 2 Titanyum levha .....	63
<b>Şekil 5.2.</b> TIG kaynağı uygulaması.....	64
<b>Şekil 5.3.</b> TIG kaynağı uygulanmış titanyuma ait kaynak dikişi.....	65
<b>Şekil 5.4.</b> Lazer kaynağı uygulaması.....	66
<b>Şekil 5.5.</b> Lazer kaynağı ile birleştirilmiş titanyuma ait kaynak dikişi.....	66
<b>Şekil 5.6.</b> TS 5789'a göre çekme ve eğme numuneleri.....	67
<b>Şekil 5.7.</b> Esas malzemeye ait çekme ve eğme numuneleri .....	67
<b>Şekil 5.8.</b> Lazer kaynaklı malzemeye ait çekme ve eğme numuneleri.....	68
<b>Şekil 5.9.</b> TIG kaynaklı malzemeye ait çekme ve eğme numuneleri.....	68
<b>Şekil 5.10.</b> Esas malzemeye ait numunelerin gerilme-yüzde uzama grafikleri .....	69
<b>Şekil 5.11.</b> Esas malzemeye ait numunelerin çekme deneyi sonu durumları .....	69
<b>Şekil 5.12.</b> Lazer kaynaklı numunelere ait gerilme-yüzde uzama grafikleri .....	70
<b>Şekil 5.13.</b> Lazer kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonundaki durumları .....	70
<b>Şekil 5.14.</b> TIG kaynaklı numunelere ait gerilme-yüzde uzama grafikleri .....	71
<b>Şekil 5.15.</b> TIG kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonundaki durumları .....	71
<b>Şekil 5.16.</b> Çekme deneyi sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği.....	72
<b>Şekil 5.17.</b> Üç nokta eğme deneyi aşamasına ait görüntüler .....	73
<b>Şekil 5.18.</b> Esas malzemelerin eğme deneyleri sonucunda gerilme-yüzde uzama grafikleri.....	73
<b>Şekil 5.19.</b> Esas malzemeye ait numunelerin eğme deneyleri sonundaki durumları .....	74
<b>Şekil 5.20.</b> Lazer kaynaklı numunelerin eğme deneylerinde elde edilen gerilme-yüzde uzama grafikleri.....	75
<b>Şekil 5.21.</b> Lazer kaynaklı numunelerin eğme deneyleri sonundaki durumları .....	76
<b>Şekil 5.22.</b> TIG kaynaklı numunelerin eğme deneylerinde elde edilen gerilme-yüzde uzama grafikleri.....	76

<b>Şekil 5.23.</b> TIG kaynaklı numunelerin eğme deneyleri sonundaki durumları .....	77
<b>Şekil 5.24.</b> Eğme deneyleri sonunda numunelerin durumları.....	77
<b>Şekil 5.25.</b> Numunelere ait eğilme mukavemeti değerlerinin karşılaştırmalı grafiği .....	78
<b>Şekil 5.26.</b> Mikrosertlik ölçüm esnasına ilişkin örnek .....	78
<b>Şekil 5.27.</b> Numunelerin karşılaştırmalı sertlik dağılım grafikleri.....	79
<b>Şekil 5.28.</b> Esas malzemeye ait mikroyapı görüntüsü.....	79
<b>Şekil 5.29.</b> Esas malzemeye ait mikroyapı görüntüsü.....	80
<b>Şekil 5.30.</b> Esas malzemeye ait mikroyapı görüntüsü.....	80
<b>Şekil 5.31.</b> TIG kaynaklı numuneye ait mikroyapı görüntüler .....	80
<b>Şekil 5.32.</b> TIG kaynaklı numuneye ait esas metal bölgesi.....	81
<b>Şekil 5.33.</b> TIG kaynaklı malzemeye ait esas metal- ITAB.....	81
<b>Şekil 5.34.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB .....	82
<b>Şekil 5.35.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB .....	82
<b>Şekil 5.36.</b> TIG kaynaklı numuneye ait kaynak metali.....	82
<b>Şekil 5.37.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait mikroyapı görüntüleri .....	83
<b>Şekil 5.38.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait esas metal bölgesi.....	83
<b>Şekil 5.39.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait esas metal-ITAB görüntüsü .....	84
<b>Şekil 5.40.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak metali.....	84
<b>Şekil 5.41.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait esas metal-ITAB .....	84
<b>Şekil 5.42.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesi.....	85
<b>Şekil 5.43.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesi.....	85
<b>Şekil 5.44.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesinin SEM görüntüsü .....	86
<b>Şekil 5.45.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesinin SEM görüntüsü .....	86
<b>Şekil 5.46.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesinin SEM görüntüsü .....	87
<b>Şekil 5.47.</b> Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal böl. SEM görüntüsü .....	87
<b>Şekil 5.48.</b> Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal böl. SEM görüntüsü .....	88
<b>Şekil 5.49.</b> Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal böl. SEM görüntüsü .....	88
<b>Şekil 5.50.</b> Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal böl. SEM görüntüsü .....	89
<b>Şekil 5.51.</b> Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesi genişliği.....	89

<b>Şekil 5.52.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölgesi SEM görüntüsü .....	90
<b>Şekil 5.53.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölgesi SEM görüntüsü .....	90
<b>Şekil 5.54.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölg. SEM görüntüsü .....	91
<b>Şekil 5.55.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölg. SEM görüntüsü .....	91
<b>Şekil 5.56.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü .....	92
<b>Şekil 5.57.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü .....	92
<b>Şekil 5.58.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların uzunluk ölçümü .....	93
<b>Şekil 5.59.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların genişlik ölçümü .....	93
<b>Şekil 5.60.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü .....	94
<b>Şekil 5.61.</b> TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü .....	94
<b>Şekil 5.62.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü .....	95
<b>Şekil 5.63.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü .....	95
<b>Şekil 5.64.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü .....	96
<b>Şekil 5.65.</b> TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü .....	96
<b>Şekil 5.66.</b> Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü .....	97
<b>Şekil 5.67.</b> Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü .....	97
<b>Şekil 5.68.</b> Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü .....	98
<b>Şekil 5.69.</b> Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü .....	98
<b>Şekil 5.70.</b> Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü .....	99
<b>Şekil 5.71.</b> Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü .....	99

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 2.1.</b> Titanyumun elementel haldeki özellikleri.....	7
<b>Tablo 2.2.</b> Alaşım elementlerinin saf titanyumun yapısındaki etkileri.....	10
<b>Tablo 2.3.</b> Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri.....	12
<b>Tablo 2.4.</b> Bazı $\alpha$ - yakın alaşımlarının mekanik özellikleri .....	14
<b>Tablo 2.5.</b> Bazı $\beta$ titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri .....	16
<b>Tablo 2.6.</b> Titanyumun otomotiv sektöründe kullanımı.....	21
<b>Tablo 3.1.</b> Nd:YAG lazeri karakteristik özellikleri.....	31
<b>Tablo 4.1.</b> Titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri .....	39
<b>Tablo 4.2.</b> Farklı kaynak yöntemlerine ait güç yoğunlukları .....	43
<b>Tablo 5.1.</b> Titanyum Grade-2 kimyasal özellikler .....	63
<b>Tablo 5.2.</b> ERTi-2 kimyasal bileşim .....	64
<b>Tablo 5.3.</b> TIG kaynağında kullanılan parametreler .....	64
<b>Tablo 5.4.</b> Atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri .....	65
<b>Tablo 5.5.</b> Lazer kaynağında kullanılan parametreler .....	66
<b>Tablo 5.6.</b> Esas malzemeye ait çekme deneyi sonuçları .....	69
<b>Tablo 5.7.</b> Lazer kaynaklı numunelere ait çekme deneyi sonuçları .....	70
<b>Tablo 5.8.</b> TIG kaynaklı numunelere ait çekme deneyi sonuçları .....	71
<b>Tablo 5.9.</b> TIG kaynaklı ve lazer kaynaklı numunelerin kaynak verimleri .....	72
<b>Tablo 5.10.</b> Esas malzemeye ait eğilme mukavemeti değerleri .....	74
<b>Tablo 5.11.</b> Lazer kaynaklı numunelere ait eğilme mukavemeti değerleri .....	75
<b>Tablo 5.12.</b> TIG kaynaklı numunelere ait eğilme mukavemeti değerleri .....	76

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>A</b>	: Amper
<b>CpTi</b>	: Ticari saflıkta Titanyum
<b>Co</b>	: Kobalt
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>Cr</b>	: Krom
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>EBW</b>	: Elektron Işın Kaynağı
<b>Fe</b>	: Demir
<b>FSW</b>	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
<b>GMA</b>	: Gaz Metal Ark
<b>HMK</b>	: Hacim merkezli kübik kafes
<b>HRB</b>	: Rockwell Sertliği
<b>HSP</b>	: Hekzagonal sıkı paket
<b>HV</b>	: Vickers Sertlik Değeri
<b>ITAB</b>	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
<b>kW</b>	: KiloWatt
<b>Nd:YAG</b>	: Neodymium: Yttrium Aluminium Garnet
<b>Ni</b>	: Nikel
<b>Pd</b>	: Paladyum
<b>TIG</b>	: Tungsten Inert Gaz
<b>Ti</b>	: Titanyum
<b>V</b>	: Vanadyum

## TEŐEKKÜR

Tez çalıőmalarım sırasında her zaman yardım ve desteğini gördüğüm değerli Danıőman Hocam Yrd. Doç. Dr. N. Sinan KÖKSAL' a saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Malzeme temininde yardımları için TİMET Titanyum A.Ő.'ye, numune hazırlama işlemlerinde yardımları için İbrahim KOŐAROęLU ve Micron Kalıp çalıőanlarına, lazer kaynağı uygulamalarında tecrübelerini benimle paylaőan Uzman Erhan AKMAN ve Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'ndeki değerli hocalarıma teőekkür ederim.

Beni bu günlere kadar yetiőtiren ve maddi-manevi desteklerini esirgemeyen aileme teőekkürü bir borç bilirim.

## ÖZET

Bu çalışmada, 2,5 mm kalınlığındaki ticari saflıktaki titanyum (Grade-2) levhalar lazer kaynağı ve TIG kaynağı yöntemleriyle kaynak edilerek, farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilen titanyumun mekanik özellikleri incelenmiştir. TIG kaynağı ile yapılan birleştirmeler ERTi-2 ilave kaynak teli kullanılarak 80A doğru akımda pozitif polaritede ve 220V voltajda çift taraflı olarak birer pasoda gerçekleştirilmiştir. Lazer kaynağı ile yapılan birleştirmeler ilave tel kullanılmadan, 5 ms pulse süresinde, 30 Hz tekrarlama oranında ve 270 W ortalama güç ile atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak çift taraflı olarak gerçekleştirilmiştir. Her iki kaynak yönteminde de Argon koruyucu atmosferi kullanılmıştır.

Kaynak işlemleri gerçekleştirilen levhalardan TS 5789'a göre çekme ve eğme deney numuneleri elde edilmiş olup, lazer kaynaklı ve TIG kaynaklı numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulanarak elde edilen sonuçlar ana malzemeye ait değerler ile mukayese edilmiştir. Yapılan çekme ve eğme deneyleri sonucunda; ana malzemeye ait mukavemet değerlerinin en yüksek olduğu, lazer kaynaklı numunelerin mukavemet değerlerinin ise TIG kaynaklı numunelerin mukavemet değerlerinden yüksek olduğu belirlenmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda kopmaların esas metal kısmından gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ticari saflıkta titanyum levhaların kaynak işlemleri esnasında açığa çıkan ısı değişimlerinin neden olduğu sertlik değişimleri Vickers sertlik ölçümleri ile belirlenmiştir. Ana malzemenin sertliği yaklaşık olarak 190-200 HV iken, lazer kaynaklı numunelerin kaynak bölgesindeki sertliğin yaklaşık olarak 280-300 HV olduğu belirlenmiş ve TIG kaynaklı numunelerin kaynak bölgesindeki sertliğin 400 HV'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Numunelerdeki içyapı değişimlerini belirlemek amacıyla optik mikroskop ve SEM incelemeleri kaynak bölgesinden esas metal bölgesine doğru yapılmıştır.

Yapılan mekanik testler ve metalografik incelemelerin sonucu olarak, ticari saflıktaki titanyumun (Grade-2) konstrüksiyonlarda kaynak edilerek kullanılmasının gerektiği durumlarda lazer kaynağının en uygun kaynak yöntemi olduğu belirlenmiştir.

## ABSTRACT

In this study, 2.5 mm of thickness commercially pure titanium sheets (Cp-Ti) were welded by laser welding and TIG welding methods. The mechanical properties of titanium sheets which were welded by different welding methods were investigated. TIG welding was carried out double sided and one pass by using ERTi-2 filler rod in 80A, 220V with DC voltage of positive polarity. Laser welding was carried out double sided without using filler rod, in 5 ms pulse duration, 30 Hz repetition rate and 270 W average power with a pulsed Nd:YAG laser. In both welding methods, Ar shielding gas were used.

According to the TS-5789, tensile and bending test specimens were obtained from welded sheets. The results were compared with the values of the main material by applying tensile and bending tests to the laser welded and the TIG welded specimens. As a result of the tensile and bending tests, it was specified that the strength of the main material was the highest; the strength of laser welded specimens had higher values than TIG welded specimens. All specimens fractured from main material part. By using Vickers Hardness measurements, it is determined the hardness variation caused by temperature changes during the welding operations of commercially pure titanium sheets. The hardness of main material was nearly 190-200 HV, in the weld zone of the laser welded specimens was 280-300 HV but in the weld zone of the TIG welded specimens was higher than 400 HV. In order to determine the microstructural changes of the specimens optical microscope and SEM analysis were performed from weld zone to base metal.

As a result of mechanical tests and metallographic investigations if we want to use the welded commercially pure titanium (Grade-2) in constructions it is determined that laser welding is the most suitable welding method.

## 1. GİRİŞ

Titanyum, yoğunluğunun düşük ve mekanik özellikler/yoğunluk oranının yüksek olmasından dolayı cazip bir malzeme haline gelmiştir. Titanyumun yoğunluğu  $4,5 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Bu değer alüminyumun yoğunluğu ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ) ile demirin yoğunluk değeri ( $7,86 \text{ g/cm}^3$ ) arasında yer almaktadır [1].

Titanyum ve alaşımları, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve yüksek korozyon direnci nedeniyle önemi son yıllarda giderek artan mühendislik malzemelerinden biri olmasına karşın, düşük aşınma direnci nedeniyle, sürtünme ve aşınmanın önemli olduğu mühendislik uygulamalarında tercih edilememektedir [2].

Titanyum esaslı malzemeler; yüksek maliyetleri ile tanınırlar da, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek kırılma direnci ve yüksek korozyon direnci özelliklerini bir arada bulundurabilmeleri sayesinde diğer malzemelerden ayrılırlar ve başta uçak ve uzay endüstrisinde olmak üzere, kimya endüstrisinde, tıpta, denizcilikte, otomotiv endüstrisinde, biyomedikal ve yiyecek endüstrisinde sıklıkla tercih edilirler. Tüm geleneksel talaş kaldırma yöntemlerinin uygulanabildiği bu malzemeler; kendilerine has bazı özellikleri nedeniyle, işlenmesi zor malzemeler grubuna girmektedirler [3]. Titanyum ve alaşımları, yüksek korozyon direnci özelliğine sahip olmaları sayesinde kimya endüstrisinde kullanılan aparatlarda, gemi yapımında, otomotiv sektöründeki bağlama elemanlarında ve egzoz sistemlerinde, uzay araçları yapımında ve inşaat sektöründe sık olarak kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının düşük sıcaklıklarda yüksek korozyon direnci özelliğinin olmasına rağmen yaklaşık  $425 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldıklarında oksijen ve azot ile reaksiyona girme eğilimleri arttığından, atmosferik havayla temas edecek şekilde kaynak edilmeleri sakıncalıdır. Titanyum ve alaşımlarının kaynağını zorlaştıran etkenlerden bir diğeri ise gevrek-sünek geçiş bölgesine sahip olmalarıdır. Bu, malzemenin sünek kırılma davranışı gösterirken, gevrek kırılma davranışını göstermeye başladığı sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Geçiş sıcaklığının yükselmesi, malzemenin daha düşük sıcaklıklarda gevrekleşebileceğini gösterir. Kaynak işleminden önce malzemenin temizlenmemesi veya kaynak yapılırken malzemenin yeniden kristalleşmesi, kaynak sonunda gevrek bir yapıya sahip bir malzeme elde etmemize neden olacaktır. Titanyum ve alaşımlarının kaynak işleminden önce malzeme yüzeylerindeki oksit tabakası ve pisliklerin arındırılması ve kaynak esnasında atmosferik hava ile temasının engellenmesi gereklidir. Bu gibi hassas durumlardan dolayı Titanyum kullanılan tasarımlarda, malzeme özelliklerinin yanı sıra kaynak edilebilirliğinin ve farklı kaynak yöntemlerine göre mekanik davranışlarının da bilinmesi gereklidir.

Akman [4], 30x30x3 mm boyutlarındaki Ti6Al4V titanyum alaşımlarına atımlı Nd:YAG lazeri ile lazer kaynağı uygulayarak optimum dikiş kaynağı parametrelerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Atım enerjisi ve atım süresi arasındaki oranın kaynak derinliğini belirlemekteki en önemli faktör olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle ilk olarak atım enerjisi ve atım süresi belirlenmiştir, istenilen kaynak kalitesini elde etmek için atım şekli belirlenmiştir. Lazer atım frekansı, kaynak hızına göre belirlenmiştir. Kaynak işlemlerinde odak pozisyonu -2 mm, frekans 43 Hz, kaynak hızı 5 mm/s, koruyucu gaz basıncı 1.5 bar da sabit tutulmuş olup, atım enerjisi ve atım uzunluğu parametreleri değiştirilerek farklı kaynak dikişleri elde edilmiştir. Kullanılan atımlı Nd:YAG lazerine ait kaynak parametrelerinin kaynak işlemine olan etkileri yapılan testler sayesinde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre atım enerjisinin atım süresine oranına eşit olan lazer tepe gücünün, kaynak derinliğini belirlemede en önemli parametre olduğu belirlenmiştir. Lazer frekansı, lazer kaynak hızına göre belirlenmiş, yüksek hızlarda çalışılmak istenildiğinde lazer frekansının artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kaynak işlemlerinde kaynak bölgesinin, çevredeki gazlarla reaksiyona girip, malzemenin oksitlenmesine neden olması nedeniyle, koruyucu gazın bu noktada çok önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

Atasoy [5], 40x10x1,5 mm boyutlarında ticari saflıktaki (Grade 2) titanyum ve düşük karbonlu (% 0,01 C) çelik sacları, gümüş (A 1306) ara bağlayıcı kullanarak; 3 MPa basınç, 700, 750, 800 ve 850 °C sıcaklıklarda ve 30, 60, 90 ve 120 dk bekleme sürelerinde difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Elde edilen birleştirmelerin mukavemetini belirlemek için çekme-makaslama testi ve sertlik ölçümü uygulanmıştır. Ayrıca bağlantının arayüzey özelliklerinin belirlenmesi amacıyla optik mikroskop ve SEM çalışmaları ile SEM'e monte edilmiş EDS ünitesinde element analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, bu çalışmada kullanılan kaynak parametreleri dahilinde, en yüksek arayüzey dayanımı 850 °C'de ve 90 dakika süre ile birleştirilen numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca artan sıcaklık ve süre ile birlikte mukavemetin bir noktaya kadar arttığı, ancak bu noktadan sonra mukavemetin azaldığı belirlenmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda en yüksek sertlik değerinin arabağlayıcı malzemede olduğu ve ara bağlayıcının her iki tarafındaki sertlik değerlerinin giderek azaldığı tespit edilmiştir. Makro ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, farklı kaynak şartlarında birleştirilen numunelerin tümünde, artan sıcaklık ve süre ile birlikte birleşme bölgesinin (arabağlayıcı) daraldığı ve de tane irileşmesinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. EDS analiz çalışmalarında, sıcaklığın artışına bağlı olarak ara bağlayıcıdaki gümüş miktarının % ağırlık olarak belirgin şekilde azaldığı, ancak difüzyon süre artışına bağlı olarak çok az miktarda azaldığı görülmüştür. Ayrıca, kaynak ara yüzeyinden uzaklaştıkça yayılım miktarının giderek azaldığı tespit edilmiştir.

Doğan [6], 3 mm kalınlığında ve 110x210 mm boyutlarında titanyum (Kalite 265.2) sacları, 80, 90 ve 100 A kaynak akımında, AWS ERTİ-1 kaynak teli kullanarak TIG kaynak yöntemiyle birleştirmiştir. Kaynaklı numuneler, çekme, eğme, mikrosertlik ve optik mikroskop çalışmalarıyla incelenmiştir. Mekanik testler sonucunda artan akım şiddeti ile sertlik ve çekme değerlerinde düşme olduğu, eğme açısında da artış olduğu görülmüştür. Akım şiddetine orantılı olarak ısı girdisi arttıkça ITAB genişliğinin arttığı görülmüştür.

Uzun ve arkadaşları [1]; Ø10x 4 mm ebatlarındaki Ti6Al4V örnekleri çap doğrultusunda ikiye bölmüş, kaynak hızı ve güç gibi parametreleri değiştirerek CO<sub>2</sub> kaynağı uygulamış ve değişen bu parametrelere göre kaynak dikişindeki değişimi gözlemleyerek optimum kaynak parametrelerini belirlemeye çalışmıştır. Yapılan sertlik incelemelerinde; kaynak bölgesinde aşırı sertlik değişimi görülmemekle birlikte, eriyen bölgede sertlik değerlerinin ana malzemeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Mikroyapı incelemelerinde kaynak metali ve ITAB bölgesinde iğne görünümlü yapılarla karşılaşmıştır. İncelemeler sonucunda kaynak hızı azaldıkça malzemede erimenin olduğu ve kaynak dikişi kalınlığının arttığı, uygulanan gücün artırılmasıyla kaynak dikişi kalınlığının yine arttığı rapor edilmiştir. Kaynak dikiş kalitesi ve nüfuziyet açısından yapılan gözlemlerinde Ti6Al4V alaşımının lazer kaynağının optimum parametrelerinin kaynak bölgesinin sertlik değeri yaklaşık olarak 40 HRC, kaynak dikiş kalınlığı yaklaşık 4,20 mm ve nüfuziyet derinliği 3,00 mm olarak gözlemlendiği güç değeri %100 (~2200 W), hız değeri 1m/dak., odak mesafesi 174 mm olduğu belirlenmiştir.

Üngören [7], yaptığı çalışmada; plastik şekil verme ile üretilmiş ASME SB 348 Grade 5 (Ti6Al4V) boru malzemesinden alınmış 12x12x8 mm boyutlarındaki numuneleri, 600°C - 900°C sıcaklık aralığı, 1,36 – 5 MPa basınç aralığı ve 60 – 90 dakika zaman aralıklarında seçilen parametreleri kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirmiştir. Farklı kaynak parametreleri ile elde edilen numunelere kesme testleri, mikrosertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri yapılarak Ti6Al4V malzemesi için optimum difüzyon kaynağı parametrelerini tespit etmeye çalışmıştır. Yapılan incelemeler sonunda 815 °C sıcaklıkta, 2,72 MPa basınçta ve 90 dakika süre ile uygulanan kaynaklı numunenin kesme dayanımının 564 MPa ile en yüksek dayanıma sahip olduğu ve bu numuneye uygulanan kaynak parametrelerinin en ideal parametreler olduğunu belirlemiştir.

Choi ve arkadaşları [8], yaptıkları çalışmada değişen kaynak parametrelerinin ticari saflıktaki titanyumun (Grade 2) mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş olup, kullanılan paso sayısı, koruyucu gaz miktarı ve kaynak hızı gibi parametrelerin saf titanyumun kaynak kabiliyetine etkileri incelenmiş ve optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen kaynak koşulları (4 pasoda, 5 pasoda, 7 pasoda kaynak ve gaz akışı 15 lt/dk- 20 lt/dk- 25 lt/dk) altında çekme, çentik darbe ve sertlik testleri yapılmıştır. Uygulanan çekme deneyleri sonucunda en yüksek

çekme dayanımının 4 pasoda ve 25 lt/dk koruyucu gaz akışının sağlandığı kaynaklı numuneye ait olduğu saptanmıştır. Paso sayısı arttıkça darbe emiliminin arttığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak 25 lt/dk debili koruyucu gazın kullanıldığı yöntemde darbe emiliminin 20 lt/dk debili koruyucu gaz kullanılan yöntemle göre daha iyi olduğunu belirlemiştir. Sertlik deneylerinde gaz akışına bağlı en yüksek sertliğin 15lt/dk olan numunelerde olduğu görülmüş, diğer debilerdeki numunelerin sertlikleri birbirine benzer çıkmıştır. Paso sayısı arttıkça sertliğin azaldığı görülmüştür.

Lathabai ve arkadaşları [9]; anahtar deliği yöntemiyle TIG kaynağı ve konvansiyonel TIG kaynağı yöntemlerini 12,7 mm kalınlığındaki ticari saflıktaki (Grade-2) titanyum malzemeleri kullanarak kaynak etmiştir. Anahtar deliği yöntemiyle TIG kaynağında ilave tel kullanılmamış olup, Konvansiyonel TIG kaynağı yönteminde ERTi-1 ilave kaynak teli kullanılmış ve V kaynak ağızı açılarak 6 pasoda kaynak edilmiştir. Elde edilen numunelerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Mikroyapıların birbirine benzer olduğu tespit edilmiş olup anahtar deliği kaynağında çentik darbe tokluğunun konvansiyonel TIG kaynağından yüksek olduğu belirlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda anahtar deliği TIG kaynağının ticari saflıktaki titanyuma başarılı olarak uygulandığı tespit edilmiştir.

Lee ve arkadaşları [10]; 5,6 mm kalınlıklı saf titanyum parçalar sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ile birleştirmiş ve elde edilen numunelere; mikrosertlik ölçümü, çekme-makaslama testi, optik mikroskop incelemeleri ve TEM çalışmalarıyla incelemiştir. Mikroyapısal inceleme ve mekanik testler sonucunda, titanyum parçaların FSW ile kaynağı başarıyla uygulandığı tespit edilmiştir. Kaynak çekirdeğinin mikroyapısını, dislokasyon yapısının yüksek yoğunluğu ve rastgele yönelmiş ikiz yapının büyük miktarda kaba tane içermesinden oluştuğu, titanyumun FSW kaynaklı bölgesinde mikroyapının baskın olarak ikiz tanelerden oluşumu, hegzagonal sıkı paket yapıları malzemelerde kayma sisteminin zayıf olmasıyla açıklanabileceği rapor edilmiştir.

Li ve arkadaşları [11] yaptıkları çalışmada; 200x50x1,5 mm boyutlarındaki ticari saflıktaki (Grade-2) titanyumu, 1,2 mm çapında AWS ERTİ-2 ilave metal kullanarak fiber lazer ve fiber lazer - Gaz Metal Ark (GMA) hibrit kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Yüksek saflıktaki argon gazı akış oranı 10, 15 ve 20 lt/dk, lazer gücü 1 kW- 2 kW aralığında, kaynak hızı 4 m/dk ile 9 m/dk aralığındaki parametrelere ayarlanmıştır. Kaynak parametrelerinin tane yapısına, malzeme sertliğine, çekme dayanımına etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, Lazer-GMA Hibrit ve Lazer kaynak yönteminde, 9 m/dk kaynak hızında kaynak bölgesinde gümüş renkli haz renginin oluştuğu ve tam nüfuziyet elde edildiği bildirilmiştir. Hibrit ve lazer kaynaklarında farklı mikro yapılar elde edilmesine rağmen çekme dayanımı ve mikrosertlik değerlerinde önemli derecede benzerlik görüldüğü, fiber lazer ve Lazer-GMA Hibrit kaynaklı numunelerin ikisinde de esas metalden daha yüksek çekme mukavemeti ve mikrosertlik değeri ölçüldüğü rapor

edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde Lazer ve Lazer-GMA Hibrit kaynak yöntemleriyle birleştirilmiş numunelerde sadece alfa titanyum fazı görülmüştür. Fiber Lazerli birleşme bölgesinde kaba sütunlu alfa ve az miktarda ince taneli iğnemsiz alfa fazlarının gözlemlendiği rapor edilmiştir. Lazer- GMA hibrit kaynaklı numunenin mikroyapısı iğnemsiz alfa yapıyı içerir. Bu tip mikroyapıların, Lazer-GMA kaynaklı malzemelerde daha iyi dayanım ve süneklik sağladığı rapor edilmiştir.

Meshram ve arkadaşları [12]; Fe-Ti, Cu-Ti, Fe-Cu, Fe-Ni ve Cu-Ni farklı metal kombinasyonlarını sürtünme kaynağı ile birleştirmiş ve optik mikroskop, çekme-makaslama, mikrosertlik, SEM, EPMA ve XRD çalışmalarıyla incelemişlerdir. Genişletilmiş etkileşim zamanının, çözünmez sistemler (Fe-Cu) ve ötektoid yapı sistemlerde (Fe-Ti ve Cu-Ti) kalın intermetalik tabaka oluşumundan dolayı mukavemet düşmesine sebep olduğu, çözünebilir sistemlerde katı eriyik oluşumundan dolayı artan etkileşim zamanı ile mukavemet artışı gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Wang ve arkadaşları [13], yaptıkları çalışmada; Ti-6Al-4V alaşımını lazer ışın kaynağı ile birleştirmiş ve 450 °C'nin altındaki sıcaklıklardaki çekme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kaynak metali çekme mukavemetinin, ana metalden daha iyi olduğunu fakat uzama miktarının % 5 daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek sertliğin ergime bölgesinde olduğunu ve sıcaklığın artmasıyla kaynak genişliği ve derinliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

Watanabe ve Topham [14], yaptıkları çalışmada; döküm Titanyum Grade 2, Ti-6Al-7Nb, Neyoro 60 altın alaşımı, ve Co-Cr alaşımı malzemelerin Atımlı Nd:YAG lazer kaynağında Argon gazının kullanımının mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır. 0.5 × 3.0 × 10 mm boyutlarındaki kaynak çifti metaller 10 ms pulse süresi, 1 mm spot çapı, 200 V kaynak parametrelerinde 3 spot ve 5 spot kaynak edilmiş argon kullanılan ve kullanılmayan 5 er adet numune kaynak edilmiştir. Titanyum numunelerin çekme deneyi sonucunda, Argon gazı kullanıldığında ve spot sayısı arttığında çekme dayanımının yüzde uzamaların arttığı, Argon gazı kullanılmadığı durumda ise spot sayısı arttıkça çekme dayanımının ve yüzde uzamanın azaldığı belirlenmiştir. Altın alaşımlarında Argon gazı kullanımının çekme dayanımında fazla etkili olmadığı, her durumda kontrol numunelerinin yarısı değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşın Co-Cr alaşımlarının lazer kaynağında argon gazı kullanımının çekme dayanımı ve yüzde uzamayı azalttığı belirlenmiştir. Genel olarak, lazer kaynağında argon gazı kullanımının, titanyum malzemelerin oksijenle tepkimeye girip sert ve kırılğan olmasını engellediğini tespit etmiştir.

Yung ve arkadaşları [15]; Ti6Al6V2Sn ve Ti6Al4V titanyum alaşımlarını TIG kaynağı ile birleştirerek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda en iyi mukavemet 1048 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer esas metalin değerinden % 3,2 daha düşüktür. Düşük soğuma hızı seçildiğinde oksijen ve azot gibi elementlerin tane sınırlarındaki varlığı

azaldığından daha homojen bir yapı elde edilmektedir. Sonuç olarak, yüksek soğuma hızının göreceli olarak sünekliği arttırdığı belirtilmiştir.

Yunlian [16], 100x80x 0.5 mm boyutlarında Cp Ti örneklerine 150 kV voltajda 2.3 mA akımda 30 mm/s kaynak hızı ve  $9.5 \times 10^{-3}$  Pa basınçta Elektron Işın Kaynağı, 18V voltajda 25 A Akımda 8 mm/sn kaynak hızında TIG kaynağı ve 2kW güçte ve 50 mm/sn kaynak hızında CO<sub>2</sub> Lazer kaynağı uygulamıştır. Kaynak bölgelerinin mikroyapılarını incelemiş olup, TIG kaynağı yapılan numunelerin kaynak bölgelerindeki tanelerin en büyük olduğu, Lazer kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinde ise tanelerin en küçük olduğunu belirlemiştir. Kaynak merkezi ve kaynak dikişi dışındaki tane boyutu farklılıkları TIG kaynağında, Elektron Işın Kaynağı uygulanmış malzemelerdeki tanelerin 1.5 katı daha büyük, Lazer kaynağı uygulanmış malzemelerdeki tanelerin ise 4 katı büyüklükte olduğunu tespit etmiştir. Numunelere ait çekme deneylerinde EBW ve TIG kaynaklı numuneler esas metal kısmından kırılırken, Lazer kaynaklı numunelerin IEB den kırıldığını belirtmiş olup, titanyumun kaynağında en uygun metodun EBW olduğunu rapor etmiştir.

Bu çalışmada; birçok alanda çok geniş kullanım alanına sahip olan ticari saflıktaki titanyum (Grade-2) malzemelere TIG kaynağı ve lazer kaynağı uygulanmıştır. Standartlara uygun olarak elde edilen kaynaklı numunelerin birleştirme esnasında maruz kaldığı ani ısı değişimlerinden kaynaklanan sertlik değişimleri mikro sertlik ölçümleri ile belirlenmiştir. Kaynak bölgesinin metalografik incelemesi optik mikroskop ve SEM ile yapılarak malzeme içyapısındaki değişimler incelenmiştir. Numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulanarak kaynaklı numuneler ana malzeme ile kıyaslanmıştır. Kırılma yüzeylerinin görüntüleri alınarak sünek/gevrek kırılma durumu hakkında bilgi elde edilmiştir. Tüm bu kaynaklı birleştirme sonuçları esas malzeme ile karşılaştırılarak titanyum alaşımlarına uygulanabilecek en uygun kaynak yöntemi belirlenmiştir.

## 2. TİTANYUM'UN METALURJİSİ

Titanyum, yer kabuğunda bulunma miktarına göre metaller arasında demir, alüminyum, magnezyumdan sonra dördüncü sırada, elementler arasında ise dokuzuncu sırada yer almaktadır [17]. Titanyum element olarak yer kabuğunun %0,6' sını oluşturmaktadır [18]. Ayrıca Apollo 17'nin Ay'dan getirdiği taşlarda %12'ye varan oranlarda Titanyumdioksit bulunmuştur[19].

### 2.1. Titanyum'un Genel Özellikleri

Titanyum, yer kabuğunda %0.6 oranında bulunmaktadır ve bu durumu ile dünyadaki alüminyum (Al), demir (Fe) ve magnezyumdan (Mg) sonra dördüncü en bol bulunan metaldir. En önemli kaynakları İlmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ) ve Rutil ( $\text{TiO}_2$ )' dir [18]. Şekil 2.1.'de İlmenit ve Rutil'e ait örnekler gösterilmektedir.



**Şekil 2.1.** İlmenit ve Rutil örnekleri [20, 21]

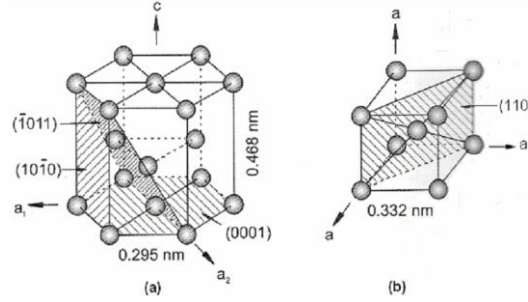
Mendeleyev'in periyodik cetvelinin dördüncü grubunda ve dördüncü periyodunda bulunan Titanyum; 22 atom numaralı ve atom ağırlığı 47.87 g/mol olan bir geçiş elementidir [22]. Titanyum  $4.51 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğuna sahip oldukça hafif bir metaldir. Titanyumun elementel haldeki bazı özellikleri Tablo 2.1.'de verilmiştir [23].

**Tablo 2.1.** Titanyumun elementel haldeki özellikleri [23]

Yoğunluk	$4.51 \text{ g/cm}^3$
Renk	Koyu Gri
Ergime Noktası	$1668 \text{ }^\circ\text{C}$
Kaynama Noktası	$1725 \text{ }^\circ\text{C}$
Isıl İletkenlik	$11.4 \text{ W/m.K}$
Özgül Isı ( $25^\circ\text{C}$ )	$0.5223 \text{ kJ/kg. K}$
Sertlik	70- 74 HRB
Çekme Dayanımı	240 MPa
Poisson's Oranı	0.361

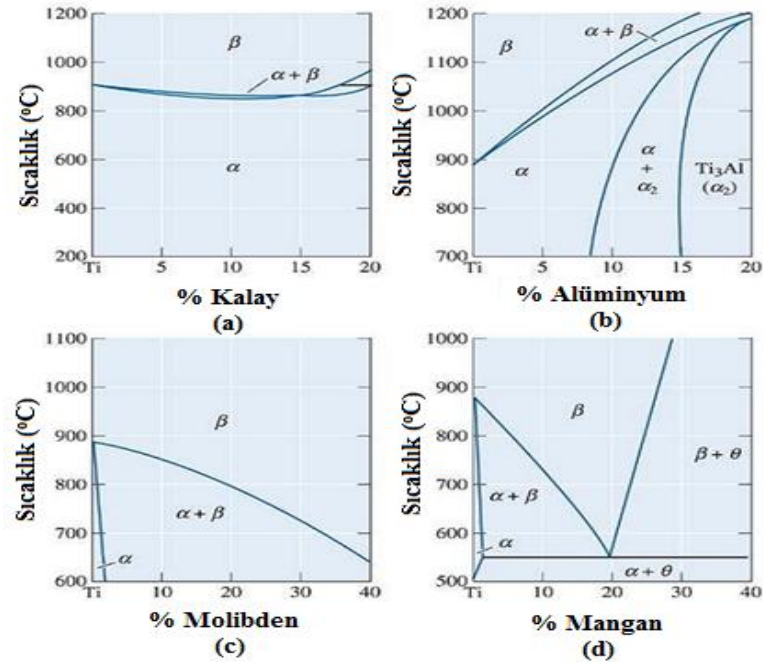
## 2.2. Alaşım Elementlerinin Saf Titanyuma Etkisi

Titanyum allotropik bir yapıya sahiptir. Düşük sıcaklıklarda hekzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapısındaki alfa ( $\alpha$ ) faz yapısına sahip iken, 882 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapısına ( $\beta$ ) sahiptir [24]. Şekil 2.2.'de  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının kristal yapıları ve kafes parametreleri verilmiştir. Saf titanyum için  $\alpha$  fazından  $\beta$  fazına geçiş sıcaklığına "β dönüşüm sıcaklığı" adı verilir [25].



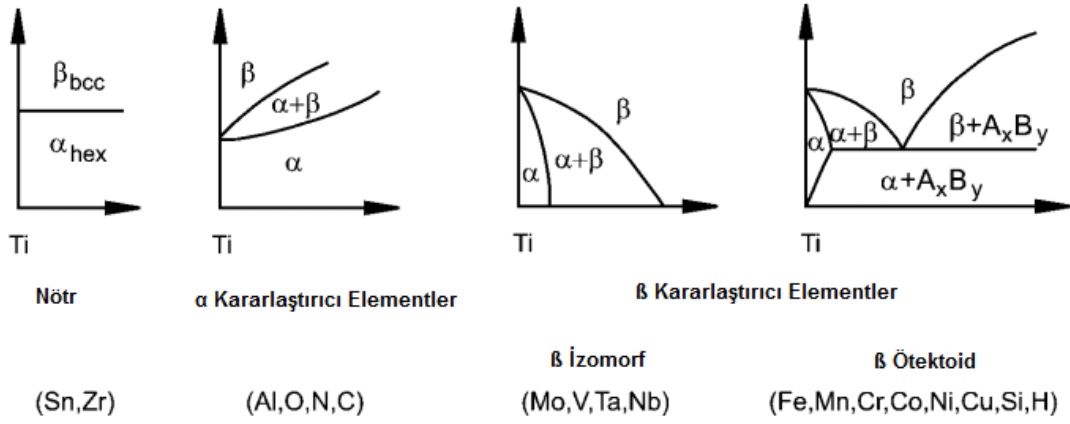
Şekil 2.2. a)  $\alpha$  Titanyumun b)  $\beta$  titanyumun kristal yapıları ve kafes parametreleri [25]

Kalay (Sn), alüminyum (Al), molibden (Mo), Zirkonyum (Zr) ve mangan (Mn) gibi alaşım elementleri katı çözelti sertleştirme sağlar ve Şekil 2.3.' de görüldüğü üzere allotropik dönüşüm sıcaklığını değiştirir [24]. Sn ve Zr dönüşüm sıcaklığına tesir etmeden katı çözelti sertleştirmesini sağlar [18, 26, 27].



Şekil 2.3. Ti- Sn, Ti- Al, Ti- Mo ve Ti- Mn için faz diyagramları [24]

Şekil 2.4.'de alaşım elementlerinin titanyum alaşımları faz diyagramına etkisi görülmektedir [25].



**Şekil 2.4.** Alaşım elementlerinin titanyumun faz diyagramına etkisi [25]

Alüminyum  $\alpha$  fazını kararlı hale getiren ve dönüşüm sıcaklığını yükselten en önemli alaşım elementidir. Arayer elementlerden olan Oksijen, Azot ve Karbon  $\alpha$  fazını kararlı hale getiren elementlerdendir [25]. Dönüşüm sıcaklığını düşürerek  $\beta$  fazını kararlı hale getiren iki grup element vardır. Bunlar  $\beta$ -izomorf ve  $\beta$  ötektik elementleri olarak adlandırılırlar. İzomorf grup  $\beta$  fazı içinde tamamen çözünebilir molibden, tantal, vanadyum ve kolombiyum elementlerinden oluşmaktadır. Diğer grup olan  $\beta$  ötektik elementleri ise titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir. Bunlar manganez, demir, krom, silisyum, nikel, bakır ve kobalttır [28]. Bu elementler  $\alpha$  fazında düşük çözünürlüğe sahiptirler ve dönüşüm sıcaklığını düşürmektedirler. Gerek  $\beta$  fazını kararlı hale getirmek, gerekse yüksek sıcaklıktaki kullanımlarda görülen metaller arası bileşiklerin oluşumunu azaltma için, bu  $\beta$ -izomorf grup elementleri alaşım içine katılmalıdır [28].

Alaşım elementleri titanyumun mikroyapısında farklı fazlarda alaşım oluştururlar. Al ve Sn gibi elementler, oksijen (O), hidrojen (H) gibi ametaller  $\alpha$  fazı düzenleyici elementleri olarak  $\alpha$ 'nın  $\beta$ 'ya dönüşümündeki sıcaklığı artırır.  $\beta$  fazı düzenleyicileri vanadyum (V), tantal (Ta), molibden (Mo) ve niyobyum (Nb) dönüşüm sıcaklığını azaltır ve hatta  $\beta$ 'nın oda sıcaklığında kararlı olmasına neden olur. Mn, Cr ve Fe ötektik reaksiyona sebep olur, böylece  $\alpha$ - $\beta$  dönüşümünün meydana geldiği sıcaklık azalır ve oda sıcaklığında iki fazlı yapı gelişir [24]. Faz sabitleyici olarak Al, oda sıcaklığından 550 °C'ye kadar geniş bir aralıkta etkin olarak kullanılabilmesi ve düşük yoğunluğu ile dikkat çeker. Oksijen ise ticari safiyette titanyum malzemelerde mukavemet ve imalat kolaylığı özelliklerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır [23, 27, 29]. Tablo 2.2.' de alaşım elementlerinin saf titanyumun yapısındaki etkileri gösterilmektedir.

**Tablo 2.2.** Alaşım elementlerinin saf titanyumun yapısındaki etkileri [23]

Alaşım Elementi	% Oranı	Yapıdaki Etkileri
Alüminyum	2-7	$\alpha$ - Dengeleyici
Kalay	2-6	$\alpha$ - Dengeleyici
Vanadyum	2-20	$\beta$ - Dengeleyici
Molibden	2-20	$\beta$ - Dengeleyici
Krom	2-12	$\beta$ - Dengeleyici
Bakır	2-6	$\beta$ - Dengeleyici
Zirkonyum	2-8	Nötr
Silisyum	0.2-1	Sürünme Dayanımını Artırır.

Titanyum alaşımlarının özellikleri genel olarak,  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının yapıdaki hacimsel oranlarına ve dağılımlarına bağlılık göstermektedir. HMK  $\beta$  ile kıyaslandığında, HSP  $\alpha$  daha yoğun paketlenmiştir ve anizotropik bir kristal yapıya sahiptir.  $\alpha$  fazının,  $\beta$  ile kıyaslanmasıyla; plastik deformasyona daha yüksek dayanım gösterdiği, sünekliğinin daha düşük olduğu, mekanik ve fiziksel özelliklerinin anizotropik olduğu, difüzyon hızının yaklaşık  $\beta$  difüzyon hızının iki katı olduğu ve daha yüksek sürünme dayanımı sergilediği söylenebilir. En önemli  $\alpha$  kararlaştırıcı elementi olan alüminyumun yoğunluğu titanyumun yaklaşık yarısıdır. Bu sebeple  $\alpha$  alaşımlarında V ve Mo gibi ağır elementler kullanılsa da,  $\beta$  alaşımlarından daha hafiftirler.  $\alpha$  alaşımları genelde orta derece mukavemete sahiptir.  $\alpha+\beta$  alaşımları ve yarı kararlı  $\beta$  alaşımları ise, sırasıyla yüksek ve çok yüksek mukavemete sahip olabilirler. Ancak çok yüksek mukavemet değerlerine erişebilen  $\beta$  alaşımları bu özellik için sünekliklerinden taviz vermek durumundadırlar. Süneklik büyük ölçüde mikroyapıya bağlı olsa da,  $\beta$  alaşımlarına yaşlandırma sertleştirme uygulanmadığı zaman sünekliği  $\alpha$  ve  $\alpha+\beta$  alaşımlarıninkine yakın olabilir [30].

Titanyumun yüksek oksijen afinitesi, oda sıcaklığında dahi yüzeyinde çok ince (nm) bir oksit tabakası oluşmasına sebep olur. Titanyum esaslı malzemelerin yüksek korozyon dayanımlarının sebebi yüzeyde oluşan bu oksit tabakasıdır.  $\alpha$  alaşımlarının korozyon dayanımları,  $\beta$  alaşımlarından daha yüksektir [31].

Titanyum özellikleri üzerine alaşım elementlerinin etkileri farklı olmaktadır. Örneğin; Al, V, Fe, Cr, Sn ve Si elementleri titanyumun çekme dayanımını artırırken, tokluğunu ve sünekliğini düşürürler. Titanyumun korozyon direnci; Mo, Nb, Zr, Ta ve Pd elementleri tarafından artarken, Al, Zr ve Mo ile sıcaklığa olan direnci artar [23].

### 2.3. Titanyum Kullanımının Avantajları

- ✓ Titanyum' un yoğunluğu çelik veya nikel bazlı süperalaşımların sadece %60' ı kadardır.
- ✓ Titanyumun çekme dayanımı (alaşım olarak) martenzitik çelik ve östenitik veya ferritik çelik ile karşılaştırıldığında daha iyidir. Buna ek olarak kopma dayanımı demir bazlı A286 veya kobalt-demir bazlı L605 alaşımlarıyla mukayese edilebilir.
- ✓ Titanyumun ticari alaşımları bileşime bağlı olarak 538 °C ile 595 °C arasındaki çalışma sıcaklıklarında elverişlidir. Bazı alaşım sistemleri bu sıcaklıkların üzerindeki sıcaklıklarda da gerekli dayanımlara sahip olabilir.
- ✓ Titanyum, çok iyi korozyon direncine sahiptir. Birçok ortamda korozyon direnci paslanmaz çeliklerden daha iyidir. İnsan vücudundaki uygulamalarda üstün bir korozyon direnci sağlar [23]. Şekil 2.5.' de Titanyum'un üstün özellikleri gösterilmektedir [32].



Şekil 2.5. Titanyum'un üstün özellikleri [32]

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri bünyesinde bir arada barındıran önemli mühendislik malzemeleridir.

### 2.4. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları genelde  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  ve  $\beta$  alaşımları olarak sınıflandırılırlar. Sınıflandırma derinleştirildiğinde ise  $\alpha'$  ya yakın (near  $\alpha$ ) ve yarı kararlı  $\beta$  alaşımları karşımıza çıkmaktadır. Titanyum;

- ❖ Alaşımlandırılmamış (Saf) Titanyum (Cp-Ti)
- ❖  $\alpha$  alaşımları
- ❖ Yakın  $\alpha$  (near-  $\alpha$ ) alaşımları
- ❖  $\alpha+\beta$  alaşımları
- ❖  $\beta$  alaşımları olarak gruplandırılır [23].

Esas olarak başlıca  $\alpha$  fazından oluşan alaşımlar  $\alpha$  alaşımı olarak adlandırılırken, küçük miktarlardaki  $\beta$  kararlaştırıcı elementlerle birlikte prensip olarak  $\alpha$  fazı içerenler yakın  $\alpha$  titanyum alaşımları olarak adlandırılırlar.  $\alpha+\beta$  karışımından oluşan alaşımlar  $\alpha+\beta$  alaşımları olarak sınıflandırılırlar. Son olarak çözündürme ısıl işleminden soğutmadan sonra oda sıcaklığında  $\beta$  fazının kararlı hale getirildiği titanyum alaşımları  $\beta$  alaşımları olarak sınıflandırılırlar [33].

#### 2.4.1. Saf Titanyum (Cp- Ti)

Ticari saflıktaki titanyum (Cp-Ti), %98.635 - %99.5 oranında titanyum içermektedir [34].

Ticari saf titanyum; titanyumun oksijen, azot, hidrojen, karbon ve demir ile birlikteki çok seyreltik alaşımı olarak görülür. Oksijen, azot ve karbon; süneklığı azaltırken aynı zamanda malzemeyi kuvvetlendirir. Bu malzemenin mikroyapısı tamamen  $\alpha$  fazından ibarettir. Saf titanyumun 650-700°C' de tavlanaarak kullanılması çok yaygındır. Böyle bir ısıl işlemde sonra mikroyapı ince eş eksenli  $\alpha$  taneciklerinden oluşmaktadır. Şayet saf titanyum  $\beta$  alanı içinde ısıtılırsa (900-950°C) hızlı bir tane büyümesi meydana gelir ve soğumayla birlikte kaba tırtıllı  $\alpha$  şekillendirilir [35].

Alaşımlandırılmamış titanyumun kullanılma nedeni üstün korozyon direncine sahip olmasıdır. Ticari saflıktaki titanyum nispeten zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybeder. Fakat çok iyi korozyon direncine sahiptir. Bu sınıftaki alaşımlar çok düşük sıcaklık uygulamaları için gereklidir. Uygulamaları; ısı eşanjörleri, boru donanımları, reaktörler, pompalar ile kimya ve petrol endüstrilerinde kullanılan valfları içerir [35,36]. Ayrıca titanyum rafinerilerde kullanılır; çünkü sülfidler, kloritler ve petrol rafine elde etmede karşılaşılan pek çok diğer kimyasallara karşı dirençlidirler [35]. Tablo 2.3' de ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Ticari saflıktaki titanyum alaşımlarının genel özellikleri [23]

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

Ticari safiyette titanyum; bünyesinde bulunan oksijen (O) ve demir (Fe) içeriğine göre 4 kaliteye sahiptir. Oksijen ve demir en önemli alaşım elementleri olup, bunlar arttıkça ticari safiyette titanyumun çekme ve akma mukavemeti artmaktadır [37].

#### 2.4.2. $\alpha$ Titanyum Alaşimleri

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren  $\alpha$  alaşimleri daha çok yüksek sıcaklık ya da çok soğuk ortamlarda tercih edilmektedir.  $\alpha$  fazı zengin olan alaşım,  $\beta$  alaşımına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı genellikle daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda ara yer atomu içeren  $\alpha$  alaşimleri, süneklik ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir [20].

$\alpha$  alaşimleri,  $\alpha+\beta$  alaşimleri ve  $\beta$  alaşımının aksine kararlı  $\alpha$  fazına sahip olduklarından ısıtım işlemi ile sertleştirilememektedir. Fakat soğuk işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri yok etmek için yeniden kristalleştirme tavlama veya sadece tavlama işlemi yapılabilmektedir. Dövülebilme kabiliyeti çok düşüktür ve dövme sıcaklığı aralığı  $\alpha+\beta$  alaşimleri veya  $\beta$  alaşımından daha dardır. Dövme sırasında oluşan yüzey ve/veya göbek çatlakları bunu açıkça göstermektedir. Böyle bir oluşumu önlemek için de dövme işleminde deformasyon miktarının daha küçük seçilmesi ve malzemenin sık sık tavlama işlemine gerektirir. Tek fazlı yapıya sahip  $\alpha$  alaşımına Ti5Al2.5Sn örnek olarak gösterilebilir [38].

$\alpha$  alaşimleri en çok kimya sanayi ve proses mühendisliğince kullanılır. Bu uygulamalarda gerekli olan çok yüksek korozyon dayanımı ve deformasyon kabiliyetine sahiptirler. Cp- Titanyum'un mukavemet gereksinimini karşılayamadığı yerlerde, en eski titanyum alaşımı olan ve uzun zaman önce kabul görmüş Ti5Al2.5Sn alaşımı tercih edilir. Düşük sıcaklıklı uygulamalar olan hidrojen depolama ve basınçlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [39].

#### 2.4.3. Yakın $\alpha$ Titanyum Alaşimleri

Yakın  $\alpha$  titanyum alaşimleri bir başka tüm  $\alpha$  faz yapısında bir miktar  $\beta$  fazı dağılımını içeren alaşımlardır.  $\beta$  kararlaştırıcı elementler olan küçük miktarlardaki molibden ve vanadyum (yaklaşık %1-2) oda sıcaklığında bu alaşımın bir miktar  $\beta$  fazı bırakması için ilave edilir. Kalay ve zirkonyum bu alaşımın pek çoğuna ilave edilir. Böylece alüminyum içerikleri azaltılabilirken, dayanımları hala korunabilir [40].

Yakın  $\alpha$  alaşımının yapısındaki  $\alpha$  fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda  $\beta$  fazını kararlaştırıcı elementler içerebilir. Ti-8Al-1Mo-1V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo gibi malzemeler yakın  $\alpha$  alaşımına birer örnektir. Bu alaşımın;  $\alpha$  alaşımına benzer özellikler göstermek ile birlikte 400-520°C sıcaklık aralığında yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır[37].

Ti8Al1Mo1V alaşımı orijinal olarak jet motorlarının kompresör kısmında orta yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve uçak dış kaplama parçaları için kullanılmıştır. Bu alaşım iyi kaynaklanabilirlik, iyi sürünme direnci, tokluk, yüksek dayanım ve düşük süneklik gibi istenen özelliklere sahiptir. Bu alaşımın bir dezavantajı tuz ortamında gerilim korozyonuna karşı hassas olmasıdır [35]. Bazı yakın  $\alpha$  alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 2.4.'de verildiği gibidir.

**Tablo 2.4.** Bazı  $\alpha$ - Yakın alaşımlarının mekanik özellikleri [35]

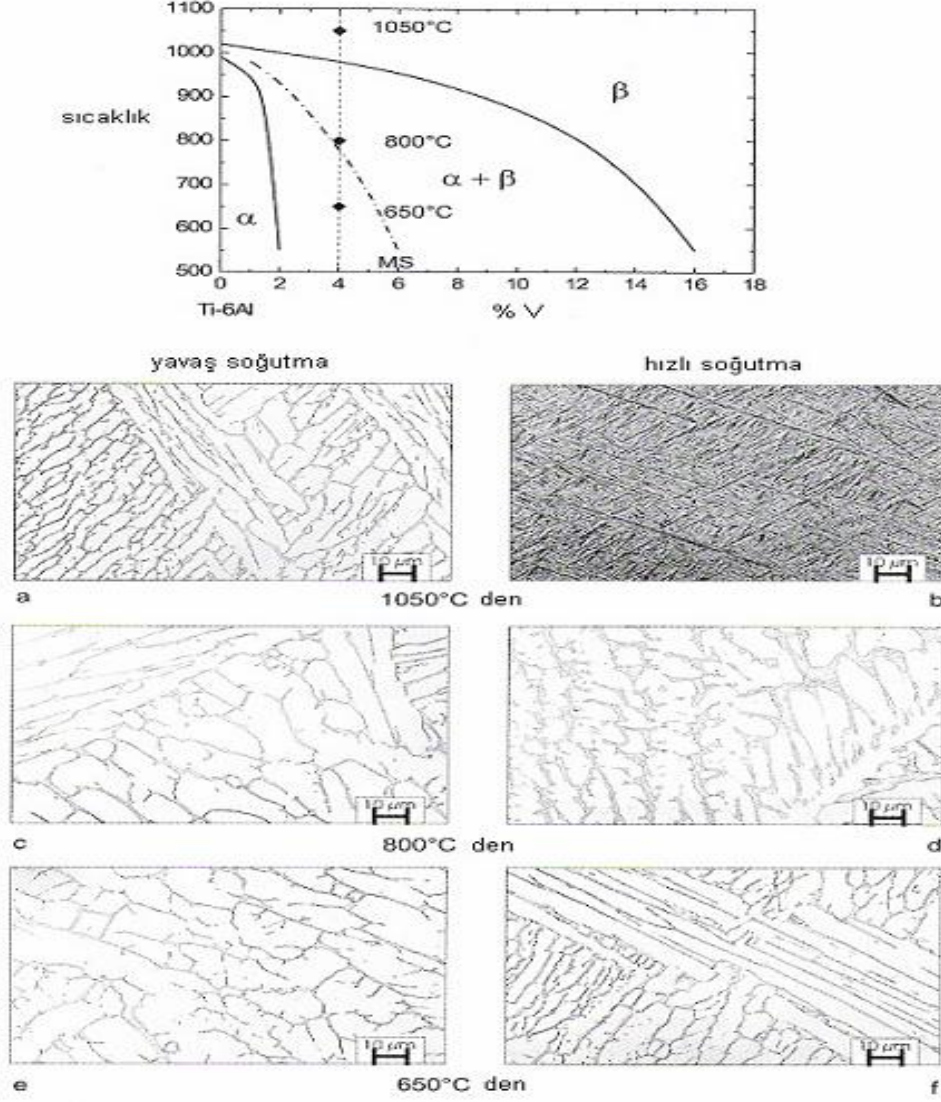
Alaşım Cinsi	Şartlar	Deney Sıcaklığı (°F)	Çekme Dayanımı (psi)	Akma Dayanımı (psi)	% Uzama	% Kesit Daralması
Ti8Al1Mo1V	Çift Tavlama	600	115.000	90.000	20	38
Ti6Al2Sn4Zr2Mo	-	600	112.000	85.000	16	42
		800	102.000	75.000	21	55
		1000	94.000	71.000	26	60
Ti 5Al5Sn	975°C 1/2 Saat Havada Soğutulmuş	600	115.000	82.000	15	-
Ti 2Zr2Mo0.2Si	600°C 2 Saat Havada Soğutulmuş	800	113.000	77.000	17	-
Ti6Al1Mo2Cb1Ta	-	1000	100.000	73.000	19	-

#### 2.4.4. $\alpha+\beta$ Titanyum Alaşımları

$\alpha$  ve  $\beta$  dengeleyicilerin uygun dengesi ile oda sıcaklığında  $\alpha$  ve  $\beta$ 'nin bir karışımı üretilir. Tavlama, yüksek süneklik, üniform özellikler ve iyi dayanım kombinasyonu oluşturur. Yakın alfa alaşım grubuna göre daha yüksek dayanım, iyi şekillendirilebilirlik gibi özelliklere sahip olan bu gruba Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-2S alaşımları örnek gösterilebilir. Alüminyum alaşımlarına ve düşük alaşımlı çeliklere göre yüksek korozyon direncine sahip olan alfa+beta alaşım grubu havacılık ve uçak sanayinde genellikle çelik ve alüminyuma göre tercih edilmektedir [41].

$\alpha+\beta$  titanyum alaşımlarına çözündürme ısıl işlemi uygulanabilir, su verilebilir ve dayanımı artırmak için yaşlandırma yapılabilirler. Bu alaşımların mikroyapıları öncelikle kimyasal kompozisyona, işlem geçmişine ve ısıl uygulamalara bağlıdır [42].

Şekil 2.6.' da Ti6Al4V alaşımının farklı sıcaklıklarda, yavaş soğutma ve su vererek soğutma sonucunda oluşan mikro yapıları gösterilmektedir [25].



**Şekil 2.6.** Ti6Al4V' nin a) 1050°C'den c)800°C'den e) 650°C'den yavaş soğutma sonucunda, b)1050°C'den d)800°C'den f)650°C'den hızlı soğutma sonucunda oluşan mikroyapı görüntüleri [25]

$\alpha + \beta$  alaşımları genellikle; uçak sanayi, makine parçaları, petrokimyasal fabrikalar için malzemeler ve tıbbi implant endüstrisinde kullanılmaktadır. Ayrıca, uçak iskeleti, roketler, jet motorları ve iniş takım dişlileri için parçalar, ısıl işlem görmüş  $\alpha + \beta$  alaşımları için tipik uygulamalardır [43]. Ekstrüze edilmiş veya haddelenmiş işlem ürünleri geniş çapta uçak parçalarında kullanılırken; hassas döküm daha düşük maliyet ve yüksek hasar toleransı

özelliğinden dolayı karmaşık (komplike) parçaların üretimi için mükemmel bir teknolojidir. Bu alaşımdaki birçok döküm hataları sıcak izostatik presleme işlemi ile giderilebilir. Bu malzemenin birleştirilmesi için kaynak teknolojisine ihtiyaç vardır [44].

#### 2.4.5. $\beta$ Titanyum Alaşımları

Bu alaşımlar önemli miktarda  $\beta$  fazı kararlaştırıcı elementler olan vanadyum ve molibden içerirler. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekil verebilme ve de yüksek yoğunluk gibi özelliklere sahiptirler. Beta alaşımları  $\beta$  dengeleyicilerle zenginleştirilmişlerdir. Bu nedenle hızlı soğutma ile hepsi  $\beta$ ' dan oluşan dengesiz bir faz oluşur. Tavlanmış şartlarda mikroyapıda sadece  $\beta$  fazı vardır.  $\beta$  matrisi içinde  $\alpha$  fazının çökmesi ile sertleştirilebilirler. Asıl dayanım katı eriyik mukavemetlenmesi ile sağlanır [42]. Uygulamaları; yüksek dayanımlı bağlama elemanları ile kırımları ve uzay uygulamalarındaki bağlantıları içerir

$\beta$  titanyum alaşımları yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler ve molibden içeren  $\beta$  alaşımlarının korozyona karşı dirençleri yüksektir. Şartlı olarak kaynak edilebilen  $\beta$  alaşımları  $\alpha+\beta$  alaşımlarına göre ısı işleme yatkın olup, iyi işlenebilmektedirler [45]. Şu anda büyük miktarlarda üretilen sadece bir tane  $\beta$  titanyum alaşımı ( $Ti_{13}V_{11}Cr_{3}Al$ ) vardır. Bu alaşımlar genellikle en yüksek dayanımlarını elde etmek için çözündürme ısı işleme uygulanmış ve yaşlandırılmış şartlarda kullanılırlar. Bu alaşımlar 1448 MPa'a kadar ulaşan bütün titanyum alaşımlarının en yüksek dayanımlarına sahiptirler [42]. Bazı  $\beta$  titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 2.5.'de verilmiştir [46].

**Tablo 2.5.** Bazı  $\beta$  Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri [46]

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

## 2.5. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum ve alaşımlarının; kimyasal, endüstriyel, denizcilik ve uzay ile ilgili uygulamaların geniş bir yelpazesinde üstün, oldukça güvenilir ve ekonomik olduğu teknik açıdan kanıtlanmıştır. Geleneksel olarak titanyumun kullanımı; uzay, uçak ve deniz sanayisi alanlarında yoğunlaşmıştır. Metalin kuvvetli ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve hafif oluşu, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci, kullanımın bu özel alanlarda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Son otuz yılda metalin yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı artmaktadır. Son yıllarda titanyum ve alaşımlarının, medikal ve dental uygulamalarında ciddi bir artış görülmektedir [47].

Titanyum halen diğer yaygın kullanıma sahip metaller gibi kesintisiz üretim yöntemine sahip olmayışı ve cevherlerinin düşük tenorlu oluşu nedeniyle pahalı bir malzemedir. Yine de diğer metallerin bir arada sunamadığı özelliklere sahip oluşu sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

### 2.5.1. Titanyum ve Alaşımlarının Biyomedikal Uygulamaları

Biyomalzemeler, insan vücudundaki organ ya da dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek amacıyla kullanılan malzemeler olup, metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere dört gruba ayrılırlar. Biyomalzemelerde en önemli özellik biyouyumluluk olup, kendisini çevreleyen dokuların normal değişimlerine engel olmayan ve dokuda istenmeyen tepkiler (iltihaplanma, pıhtı, vb.) oluşturmayan malzemelerdir [34].

Metalik biyomalzemelerden olan titanyum ve titanyum alaşımları, kemikle bağlanması iyi olan ve doku tarafından kabul edilirliliği yüksek olan malzemelerdir [34].

Titanyum ve alaşımlarının biyomedikal alanda kullanımlarını sağlayan faktörler şunlardır [34]:

- ❖ Mekanik dayanıklılığın uygun olması
- ❖ Titanyum ve alaşımlarının havada okside olmasıyla meydana gelen oksit tabakasının, materyalin fizyolojik çevrede kararlı kalmasını sağlamak
- ❖ Bu oksit tabakasının vücut içinde titanyumu korozyona karşı dirençli kılması
- ❖ Titanyumun diğer benzeri olan pasif olmayan metallerle kaplanabilir olması ve vücutta galvanik akıma neden olmaması
- ❖ Titanyum alaşımının elastik modülünün diğer tüm implant materyallerine nazaran kemiğe daha yakın olması
- ❖ Biyolojik olarak uyumlu olması

Biyolojik ortamda kullanılması istenen malzemelerde aranması gereken ilk şart, o malzemenin işlevini gerçekleştirdiği ortamda tolere edilebilmesidir. Yani kullanıldığı ortam tarafından reddedilmemesidir. Yapılması gereken öncelikle hangi malzemelerin bu özelliklere sahip olduğunun belirlenmesi ve bunların sınıflandırılmasıdır. Daha sonra bu malzemeler gösterdikleri mekanik özelliklere göre vücut içerisinde değişik bölgelerdeki tedavi metotları için aday olarak gösterilebilirler. Bu kriterlere sahip olan ve bugün kullanılmakta olan bu malzemelere biyomalzemeler denilmektedir [48]. Şekil 2.7.'de titanyumun kalça protezlerindeki kullanımına ilişkin örnekler gösterilmektedir [49].



**Şekil 2.7.** Titanyum alaşımlarının kalça protezlerindeki kullanımı [49]

Titanyum oksijenle çok çabuk reaksiyona girdiği için yüzeyinde daima koruyucu bir titanyum dioksit tabakası görülür. Bu sayede korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Dolayısıyla doku uyumu en iyi olan metaldir. Günümüzde metal alerjisinin korozyon kaynaklı olduğu kanıtlanmıştır. Titanyum korozyona karşı dirençli olduğu için metal alerjisi olan hastalarda kullanılabilir. Titanyum alaşımları mikro cerrahinin hassasiyetine uygundur. Yine çok önemli bir özellik olarak titanyumun bazı alaşımları aşınmaya dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür. Sert oluşuyla ince uçları güçlü kullanıma imkan sağlar. Titanyum alaşımlarının yorulma dayanımı da diğer metallerin yorulma dayanımlarına göre önemli ölçüde üstündür. Son yıllarda en çok kullanılan implant titanyumdur [50]. Şekil 2.8.'de titanyum alaşımlarının diş implantlarındaki kullanımına ilişkin örnekler gösterilmektedir.



**Şekil 2.8.** Titanyum alaşımlarının diş implantlarındaki kullanımı [51]

Titanyum, ticari saflıkta titanyum ve Ti6Al4V olmak üzere iki şekilde kullanılır. Saf titanyum mekanik özellikler açısından zayıftır ve protez üzerine poroz kaplama olarak kullanılır. Poroz kaplamalar kalça protezlerinde ve diş implantlarında, kaplamadaki porların içinde kemik büyümesini sağlamak amacıyla sık sık kullanılırlar [52].

Sonuç olarak titanyum esaslı alaşımların biyolojik olarak uyumlu oldukları histolojik deneylerle kanıtlanmış olup, tek dezavantajının oldukça pahalı olmasıdır.

### 2.5.2. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Uygulamaları

Titanyum kullanımı ilk olarak uçak ve uzay endüstrisiyle başlarken, zamanla söz konusu üstün özellikleri nedeniyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılık uygulamalarında kendine yer bulmuştur. Titanyumun havacılık sanayinde yaygın olarak kullanımının önemli sebepleri;

- ✓ Hafiflik
- ✓ Çalışma sıcaklığı
- ✓ Korozyon direnci
- ✓ Polimer matrisli kompozitlerle galvanik uyumluluk
- ✓ Hacim kısıtlamasıdır.

Günümüzde otomobil sanayi, ürettiği bir aracın ağırlığındaki bir kilogramlık hafifletme için 15\$ maliyeti tolere edebilirken, havacılıkta bu rakam atılan her bir kilogram fazladan ağırlık için 1500\$' a çıkmaktadır. Eğer üretim çok daha ileri teknoloji gerektiren uzay faaliyetleri ile ilgili ise bu rakam 15000\$ civarına yükselmektedir. Bu durum titanyumun diğer üstün özellikleri dışında sadece düşük yoğunluğu sayesinde kendisine havacılık sanayinde önemli bir pazar yakaladığını açıklayan güzel bir örnektir [25].

Büyük ticari uçaklara bakıldığında, gövde yapısında ortalama %5-9 arasında titanyum kullanılmaktadır. Ancak, çalışma sıcaklığının, çok dikkate alındığı motorlarda ise titanyum kullanımı %33-38 civarındadır. Uçak motorlarında hacimsel oranlara bakıldığında titanyum alaşımları en çok kullanılan malzemelerdir. Havacılık sanayinde, mekanik özellikler kadar üretilen parçaların kullanım ömürleri de önemlidir. Titanyum alaşımlarının kullanıldığı parçaların uzun kullanım ömürleri, o parçaların fiyat-kullanım ömrü kıyaslamasında öne geçmektedir. Uçak gövdelerinde yapısal olarak titanyum kullanılmasındaki maksat, yorulma çatlakları ilerleyişini durdurmaktır [25]. Titanyumun ilk uygulamaya yönelik üretimi, ilk uçuşunu 1952'de yapan DC-7 tipi uçağın motorundaki yanma odası ve uçağın kanatlarındaki motor bağlantı yeri için yapılmıştır. İlerleyen zamanlarda geliştirilen titanyum alaşımları; kompresör disklerinde, askeri ya da ticari uçaklardaki jet motorlarının pervane kanatları ile bu uçakların iskeletinde kullanılmıştır [28].

1979 yılında, üretilen titanyum miktarının %35' i ticari uçaklar için, %28' i korozyona yönelik uygulamalar için, %37' si de askeri uçak ve füzeler için kullanılmıştır. Titanyum; uçak uygulamalarında hem uçağın iskeletinde hem de jet motorlarındaki parçalarda kullanılmıştır. Şekil 2.9.'da Titanyum kullanılan SR-71 tipi uçak gösterilmektedir.



**Şekil 2.9.** SR- 71 tipi uçak [23]

Boeing 747, Douglas DC-10, A300 Airbus, F22 Raptor ve SR- 71 gibi uçakların jet motorlarındaki bazı parçalar için, yüksek özgül dayanıma sahip malzemelerin dışında başka bir malzemenin kullanılmasının uygun olmadığı saptanmıştır [28]. Şekil 2.10'da F22 Raptor tipi uçak gösterilmektedir.



**Şekil 2.10.** F-22 Raptor tipi uçak [53]

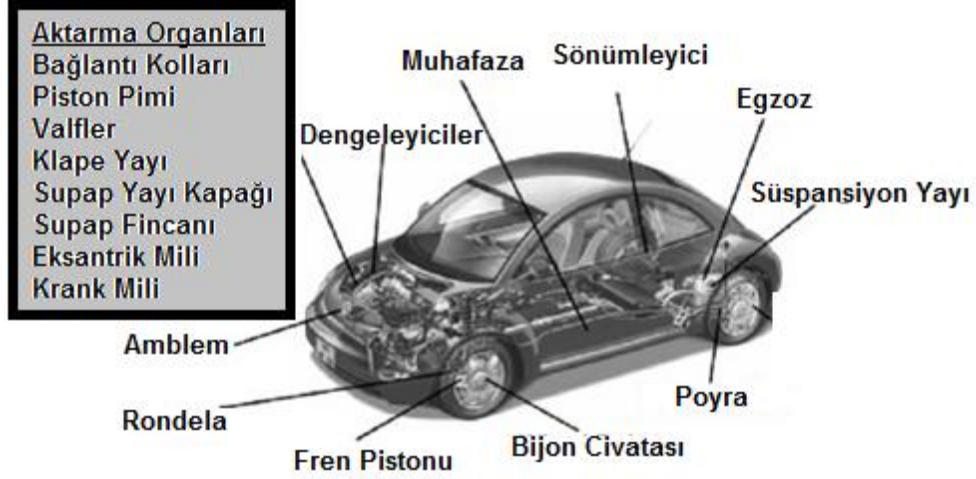
### 2.5.3. Titanyum ve Alaşımlarının Otomotiv Uygulamaları

Yakıt tasarrufu sağlayan ve çevreye daha az zarar veren araçlara olan talebin artması; araçların ağırlığının hafiflemesi ve performansın artırılmasını gerektirmiştir. Bu noktada yüksek korozyon direnci ve güce sahip titanyum alaşımları başlıca tercih maddesi olmuştur. Ancak titanyumun maliyeti artırması, otomotiv endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeldir ve kullanımını yarış otomobilleri, motorları ve Formula 1 araçları gibi yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren araçlarla sınırlamıştır [54]. Tablo 2.6.'da otomotiv sektöründe titanyum kullanımı gösterilmektedir.

**Tablo 2.6.** Titanyum'un otomotiv sektöründe kullanımı [25]

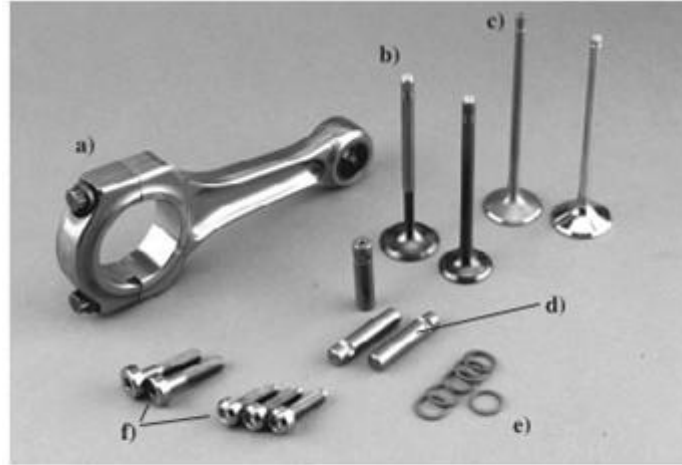
Yıl	Kullanılan Eleman	Malzeme	Üretici	Model	Yıllık Tüketim
1998	Fren Kılavuz Pimleri	Grade 2	Mercedes- Benz	S- Sınıfı	~8 ton/ yıl
1998	Salmastra Rondelası	Grade 1s	Volkswagen	Tümü	~40 ton/ yıl
1998	Vites Kolu	Grade 1	Honda	S2000 Roadster	Bilinmiyor
1999	Biyel Kolu	Ti-6Al-4V	Porsche	GT3	~1 ton/ yıl
2000	Valf Kapakları	β Titanyum Alaşımları	Mitsubishi	Tümü	Bilinmiyor
2001	Egzoz Sistemi	Grade 2	General Motors	Corvette Z06	>150 ton/ yıl

Süspansiyon yayları çelik yerine titanyumun kullanımının oldukça ekonomik olduğu bir otomotiv elemanıdır. Özellikle titanyumun çeliğe oranla çok daha düşük elastik modüle ve düşük kayma modülüne sahip olması tercih sebebidir. Geleneksel süspansiyon yayı malzemesiyle karşılaştırıldığında; düşük modül, artan süspansiyon sarmasına ve bir sarmal hareketinde daha az süspansiyon hareketine yol açmaktadır. Böylelikle ağırlık sadece titanyumun düşük yoğunluğundan değil aynı zamanda süspansiyon sarmallarının daha kısa olmasından da kaynaklanmakta ve hem artan taşıma kapasitesine hem de motor ya da yolcu alanının daha geniş olmasına katkıda bulunmaktadır [25]. Şekil 2.11.'de otomotiv sektöründe titanyum kullanımına ait örnekler gösterilmektedir.



**Şekil 2.11.** Otomotiv sektöründe genel olarak titanyum kullanımı [25]

Titanyumun pahalı bir malzeme olması kullanım yaygınlığının önündeki en önemli engeldir. Yakın gelecekte titanyum fiyatlarının çok fazla düşmesi beklenmemektedir. Umut edilen yüksek hacimli otomotiv pazarında fiyatların, havacılık alanındakinin yarısı ya da üçte biri oranında ucuzlayacağı ve böylece otomotiv endüstrisinde de titanyumun daha yaygın olarak kullanılabilmesidir [34]. Şekil 2.12.'de otomotiv ve motosiklet üretiminde titanyum kullanımına ilişkin örnekler gösterilmektedir.



a) Biyel Kolu (Ducati), b) Emme Valfi, c) Valfler,  
d) Fren Pimi (Mercedes-Benz), f) Bijonlar  
e) Fren Sistemi Contaları (Volkswagen),

**Şekil 2.12.** Otomobil ve motosiklet üretiminde titanyum kullanımı [25]

#### 2.5.4. Titanyum ve Alaşımlarının Diğer Uygulamaları

Titanyum daha çok asit yağmuru, volkanik serpinti, kentsel kirlilik gibi şiddetli atmosfer koşullarına maruz kalan parçalarda da kullanılmaktadır. Bu da titanyum binaların atmosfer koşullarından en az hasar almasını sağlamaktadır. Şekil 2.13.'de İspanya'da bulunan ve saf titanyumdan inşa edilen Guggenheim Bilbao Sanat Müzesi görülmektedir [25].



**Şekil 2.13.** İnşaat sektöründe titanyum kullanımı [25]

Titanyumun bir başka avantajı da; paslanmaz çeliğin yarısı, alüminyumun da üçte biri kadar bir ısı genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Bu durum; inşasında fazla cam ya da beton kullanılan binalarda titanyum kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Düşük ısı genleşme katsayısının bir sonucu olarak hareketli çatılar gibi büyük titanyum yapılarda gece gündüz ısı farkının neden olduğu gerilim en aza indirilebilmektedir. Şekil 2.14.'de Japonya' da bulunan ve hareketli çatısı saf titanyumdan imal edilmiş Fukuoka Dome beyzbol stadı görülmektedir [18,25].



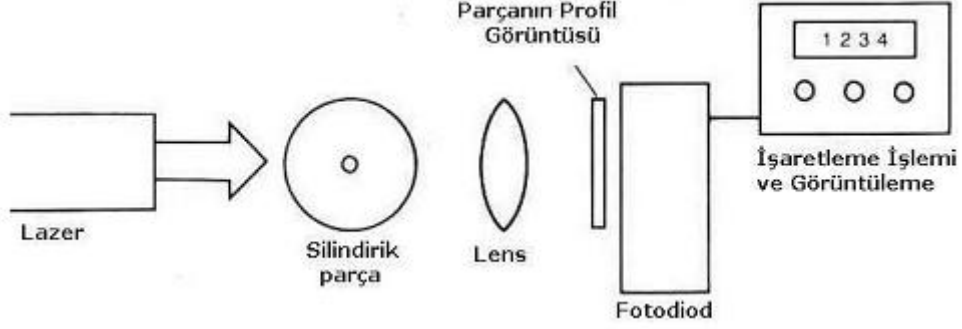
**Şekil 2.14.** İnşaat sektöründe titanyum kullanımı [18]

Titanyum alaşımları yüksek performanslı malzemeler olarak bilinmektedir. Yeni kullanım alanları araştırılırken yine yüksek performans gerektirecek alanların araştırılması gerekmektedir. Bu

durum özellikle yüksek performans gerektiren spor dallarını öne çıkarmaktadır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı başlıca alanlar; golf, tenis, bisiklet, su altı sporları, dağcılık, trekking ve kış sporlarıdır. Örneğin golf oynarken ana amaç topu mümkün olduğunca uzağa atabilmektir ve bunu sağlamak için golf sopasının ucu en önemli elemandır. Önceleri ağaç kullanılarak üretilen uçlar daha sonra çelik kullanılarak üreilmeye başlamıştır. 1990' ların ortalarında ise ilk kez titanyum kullanılarak üretilen uçlar pazara sürülmüştür. Düşük ağırlıklı metaller kullanmak üreticilere daha büyük uçlar üretip ağırlığı hafif tutma şansını tanımaktadırlar. Üretimde genellikle Ti6Al4V kullanılmakla birlikte Ti3Al2.5V gibi diğer  $\alpha+\beta$  alaşımlar da kullanılmaktadır [25].

### 3. LAZER SİSTEMLERİ

Uyarılmış yayılma ile ışığın güçlendirilmesi anlamına gelen “Light Amplification by Simulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harfleri ile simgelenen LASER, çeşitli yollarla elde edilen elektromanyetik ışımayı güçlendiren ve mor ötesi bölgesinden kızılötesi bölgeye kadar geniş bir spektrumda ışıma verebilen bir alettir [55].



Şekil 3.1. Lazer ışını (ASTM) [56]

Bir lazer ışını elde etmek için gerek ve yeter şartlar [57]:

- Işığın kuvvetlendirilmesini sağlayan kazanç ortamı,
- Ortamı uyaran güç kaynağı,
- Doyuma ulaşabilmek için geri besleme sistemleri olmak üzere üç grupta ele alınır.

Yirminci yüzyılın en büyük buluşlarından biri olan lazerlerin temelini oluşturan uyarılmış ışıma kavramı; 1917 yılında Einstein tarafından ortaya konmuştur [58]. Mikrodalga güçlendirici sistemi ile uyarılmış yayılma sürecinin avantajının kullanıldığı MASER, mikrodalga bölgesinde ışıma yapan bir alet olarak Townes tarafından geliştirilmiştir [55,59]. İletişimde kullanılmak amacıyla geliştirilen, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde uyumlu (coherent) bir demet üreten bu ilk maserde, amonyak buharı kullanılarak 1.25 cm dalgaboyunda kazanç gözlemlenmiştir. Townes ve Schawlow; üretilen demetin kuvvetlenmesi için çevresi aynalar ile çevrili bir optik yükselteç sistemi tasarlamışlar ve bu çalışmaları ile Nobel ödülü almışlardır [55]. Theodore Maiman 1960 yılında, kazanç ortamı olarak yakut kristali ve enerji kaynağı olarak flaş lambası kullanarak ilk lazeri üretmiştir [60]. Takip eden yıllarda, yüksek şiddet gerektirmeyen ilk gaz lazeri olan helyum- neon lazeri; iletişim konusunda oldukça geniş bir kullanım alanı bulan ilk yarıiletken lazer; kesme, delme, kaynak gibi endüstriyel işlemlerde yaygın olarak kullanılan kızılötesi bölgesinde ışıma veren CO<sub>2</sub> lazeri ve yine kesme, delme, kaynak gibi endüstriyel işlemlerinin yanında cerrahi uygulamalar ve askeri alanlarda da kullanılan Nd:YAG lazeri üretilmiştir. Organik boya lazeri, soy gaz excimer lazeri, serbest elektron lazeri gibi çeşitli türde

ve dalgaboylarında lazerlerin üretilmesi, endüstri, sağlık ve savunma alanlarında teknolojik gelişmelere yol açmıştır. Lazerle üretilen plazma ortamının kazanç ortamı olarak kullanıldığı ve elektromanyetik spektrumun x- ışını bölgesinde demet üreten ilk x- ışını lazeri de 1985 yılında yapılmıştır [4].

Lazerler, yüksek yoğunluklu enerji kaynağı olarak endüstride; kesme, delme, kaynak, yüzey işleme, markalama, kaplama gibi işlemlerde sıklıkla kullanılırlar. Lazer ile malzeme işleme (özellikle kaynak), yüksek işlem hızı, yüksek kalite, düşük ısıl zarar gibi özelliklerinden dolayı, diğer işlem çeşitlerine göre daha çok tercih edilmektedirler [4].

### 3.1. Lazer Sisteminin Temel Elemanları

Birçok lazer sistemi dört temel elemandan oluşmaktadır. Bunlar:

- Lazer üretici (aktif materyal)
- Pompalama kaynağı
- Optik resonatör
- Odaklama optik elemanlarıdır [61].

#### 3.1.1. Lazer Üretici

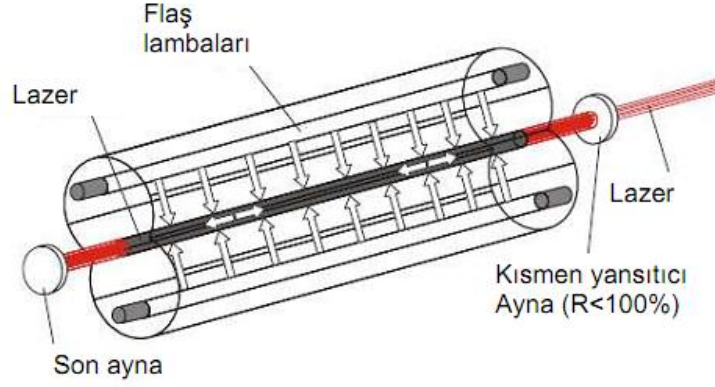
İçerisinde uyarılmış emisyonun gerçekleştiği bölgedir. Lazer aracı malzemesi; katı (Nd:YAG, Nd:CAM, alexandrite, zümrüt, Cr:Safir, Ti:Safir ve içerisinde üç değerlikli  $Nd^{+3}$ ,  $Ho^{+3}$ ,  $Gd^{+3}$ ,  $Tm^{+3}$ ,  $Er^{+3}$ ,  $Pr^{+3}$  elementleri bulunan cam, vb.), sıvı, gaz veya plazma olabilir [61].

#### 3.1.2. Pompalama Kaynağı

Uyarılmış emisyonun gerçekleşmesi için gerekli enerjiyi sağlayan kaynaktır. Lazerler, lambalar veya diğer lazerlerle, p- n malzeme bileşimi ile (yarı iletken diotlarda), elektrik boşalmasıyla (en çok gaz lazerinde) veya bir kimyasal reaksiyonla (HF, iyot vb.) pompalanabilirler.

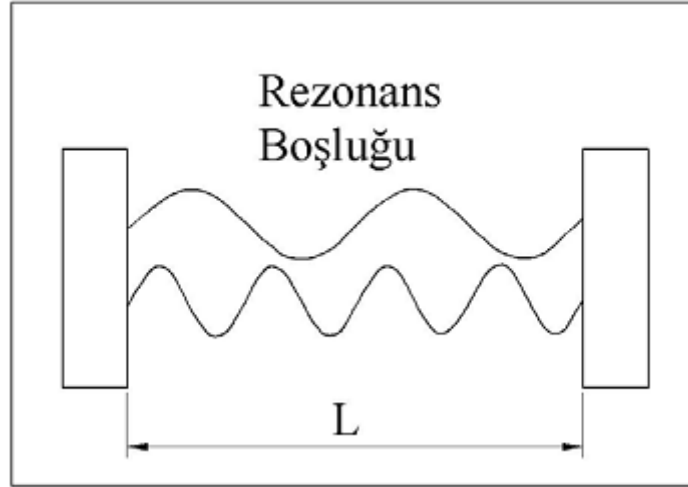
#### 3.1.3. Optik Resonatörler

Optik resonatör, foton yayılımı için bir patika oluşturur. Optik resonatörün asıl fonksiyonu lazerlerin fiziksel boylarının kısalmasını sağlamak ve elektromanyetik mod profilini oluşturmaktır. Lazer oluşumunun başlangıcında, uyarılmış emisyonla yayılan fotonların yanında; kendiliğinden emisyonla yayılan fotonlarda görülür. Eksenel ışın demeti, aktif ortamda resonatör aynalarına çarparak ileri geri hareketlerle gelişimini sürdürür. Şekil 3.2.'de aynalar gösterilmektedir.



**Şekil 3.2.** Nd:YAG lazer kovuğu [4]

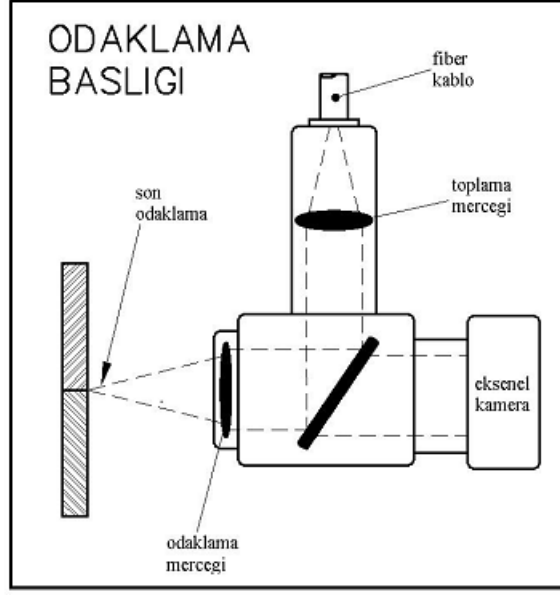
Sonunda, faz uyumlu bir düzlem dalga elde edilir. Yani bu ortam, dalga yükseltici gibi görev yapmaktadır. Lazer ışını dalgasının dalga boyu, aynalar arasındaki mesafe ile uyumludur. Aynalar arası uzaklık, yarım dalga boyunun tam katına eşit olduğunda optik resonatör rezonansa geçer. Bunun anlamı resonatörde duran dalga oluşumudur. Optik resonatörle bir optik geri besleme sağlanmakta ve bir osilasyon oluşmaktadır [61]. Şekil 3.3.'de optik resonatörde dalga oluşumu görülmektedir.



**Şekil 3.3.** Optik resonatörde dalga oluşumu [61]

#### 3.1.4. Odaklama Optik Elemanları

Odaklama başlığı, ışığı verimli şekilde fiberin sonundan parçanın üzerine iletir. Odaklama başlığına bir aksenal kamera yerleştirilir. Böylece kaynak işleminden önce ve kaynak esnasında kaynak alanını, lazer ışınının yolu boyunca doğrudan izlemek mümkün olmaktadır. Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'de görüldüğü üzere odaklama dağıtıcı ve toplayıcı optik merceklerde sağlanmaktadır.

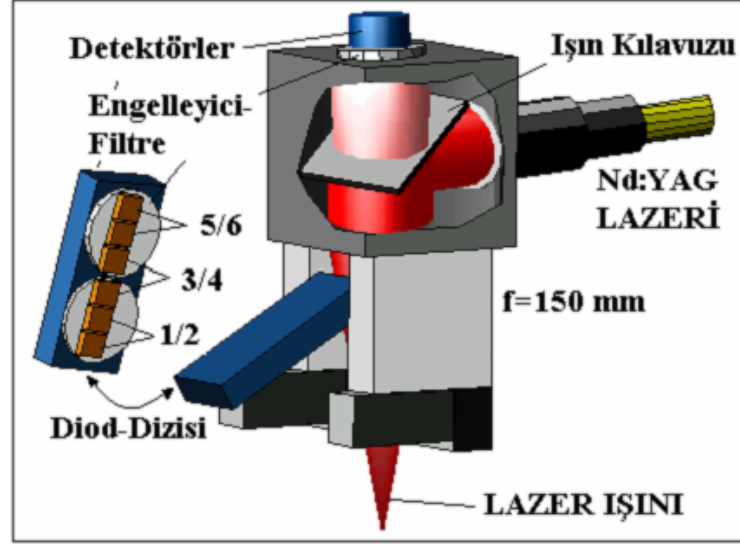


**Şekil 3.4.** Odaklama başlığı prensip şeması [61]



**Şekil 3.5.** Odaklama başlığı [62]

Lazer operasyon alanına bir fiber optik kablodan geçerek bırakılabilir. Bu kablo; lazer taşıyıcı merkezi bir öz, tüm ışığın merkezde kalmasını sağlayacak bir şekilde ayna giydirilmiş bir bölge ve en dış kısımda ise ışığın dışarı sızmasını önleyecek bir metal ceket giydirilmiş şekilde dizayn edilmiştir. Fiberin öz çapı, lazer gücüne göre değişik çaplarda yapılabilir [61]. Şekil 3.6.'da bir Nd:YAG lazerine ait odaklama başlığı görülmektedir.



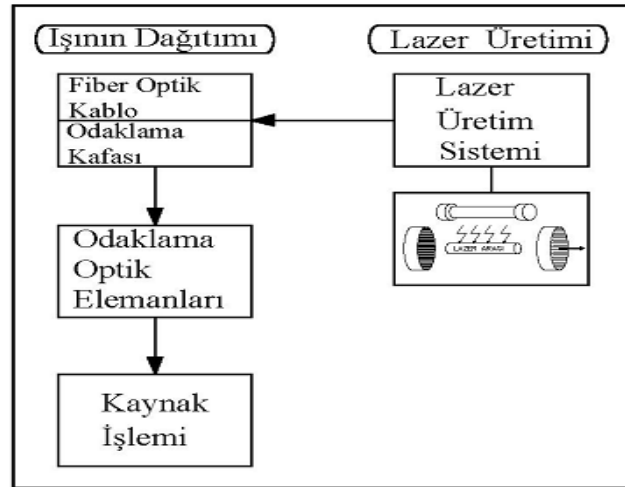
Şekil 3.6. Bir Nd:YAG lazeri odaklama başlığı [61]

### 3.2. Lazer Sistemleri

Lazer sistemleri iki grupta incelenmektedir. Bunlar:

- Katı hal lazer sistemleri
- Gaz lazer sistemleri

Lazer sistemlerini daha iyi anlayabilmek için öncelikle lazer sistemini oluşturan temel elemanları incelemek gerekmektedir. Şekil 3.7.'de lazer kaynağı için gerekli temel eleman şeması verilmiştir [61].



Şekil 3.7. Lazer kaynağı temel eleman şeması [61]

### 3.2.1. Katı Hal Lazer Sistemleri

Lazer kaynak işlemlerinde en çok kullanılan ışıklardan biri olup; dalgaboyu yaklaşık olarak 170nm ile 3900 nm arasında değişmektedir.

Katı hal lazer malzemelerinin iki önemli sınıfı bulunmaktadır. Bunlar:

- Kristal katı hal lazer malzemeleri (Nd:YAG gibi)
- İzotropik katı hal lazer malzemeleri (Cam gibi)

Katı hal lazerlerinde, istenen mekanik ve ısıl özelliklere sahip bir ev sahibi malzeme (tıpkı YAG gibi) içine istenen lazer özelliklerine sahip bir element depolanır (Neodimyum gibi).

Malzemenin yapısal ve lazer özellikleri depolanan element atomunun atomik çevresi ile ilişkili olduğundan, lazer geçişinin doğasını belirlemektedir. Nd:YAG ve Nd:CAM lazerlerinde, lazer geçişi oldukça dardır ( $300^{\circ}\text{K}$ ' de yaklaşık  $5\text{\AA}$ ) ve  $1064\text{ nm}$  dalga boyundadır. Örneğin; Nd:CAM ve Nd:YAG lazerlerinde depolanan element olarak neodimyum kullanılır. Nd:YAG lazerlerinde kristal kafes içine hapsedilmiş atom arasında, her atom iyi düzenlenmiş ve simetriktir. Nd:CAM lazerlerinde atom amorf bir yapı içindedir, en yakın çevre atomlarının her biri kötü düzenlenmiştir ve her bir atom için farklıdır. Sonuçta, lazer geçişi Nd:YAG lazerlerinden daha geniştir ( $300^{\circ}\text{K}$ ' de yaklaşık  $300\text{ \AA}$ ) ve dalgaboyu  $1062\text{ nm}$  (silikat cam) ile  $1054\text{nm}$  (fosfat cam) aralığındadır [61].

#### 3.2.1.1. Nd:YAG Lazer Sistemi

Lazer aracı olarak içerisinde Neodimyum ( $\text{Nd}^{+3}$ ) aktif elementini barındıran ve YAG (Yttrium Aluminium Garnet) suni kristali kullanılan lazer sistemidir. Dalgaboyu  $1064\text{ nm}$  olan ışınım yaymaktadır. Kaynak uygulamaları için kullanılan mevcut Nd:YAG lazerlerinin ortalama çıkış güçleri  $0.3\text{--}3\text{ kW}$  aralığındadır. Fakat lazer teknolojisindeki son gelişmelerle elde edilebilir maksimum güç  $4\text{ kW}$ ' a kadar çıkmaktadır. Bu lazerler:

- Sürekli modda
- Darbeli modda
- Q anahtarlamalı modda çalıştırılabilirler.

Uygulama koşullarına göre Nd:YAG lazer karakteristikleri Tablo 3.1.' de gösterilmiştir.

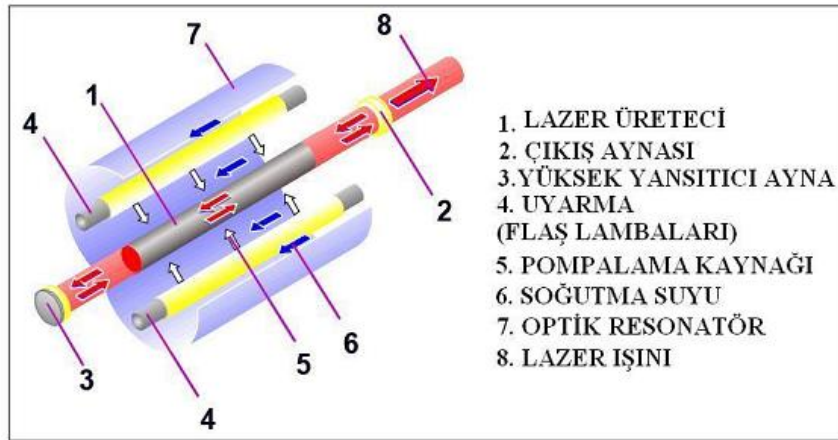
**Tablo 3.1.** Nd:YAG lazeri karakteristik özellikleri [61]

Mod	Ortalama Güç (kW)	Tepe Gücü (kW)	Darbe Süresi (ms)	Darbe Frekansı	Enerji/Darbe
Sürekli	0.3- 4	-	-	-	-
Darbeli	→4	→50	0.2 – 20	1- 500 Hz	→ 100
Q Anahtarlama	→4	→100	< 1	→ 100 kHz	$10^{-3}$

Darbeli pompalamalarda, pompa girişi, lazer çıkış darbelerinin zamansal olarak şekillenmesiyle kontrol edilmektedir. Darbe şekillerinin düzenlenmesi sık sık kaynak koşullarının optimizasyonu için yararlıdır. Darbe şekillerinin düzenlenmesine ilişkin tam bir çalışma 1987 yılında Weedon tarafından yapılmıştır.

Darbeli pompalama ~0.1 ms' den başlayan ve sürekli moda kadar uzanan bir darbe genişliği imkanı sunmaktadır. Kaynak uygulamaları için kullanılan genel darbe süreleri 0.1- 20 ms aralığındadır. Bu aralığın sonunda darbe tekrar frekansları 1 kHz' e ulaşabilir.

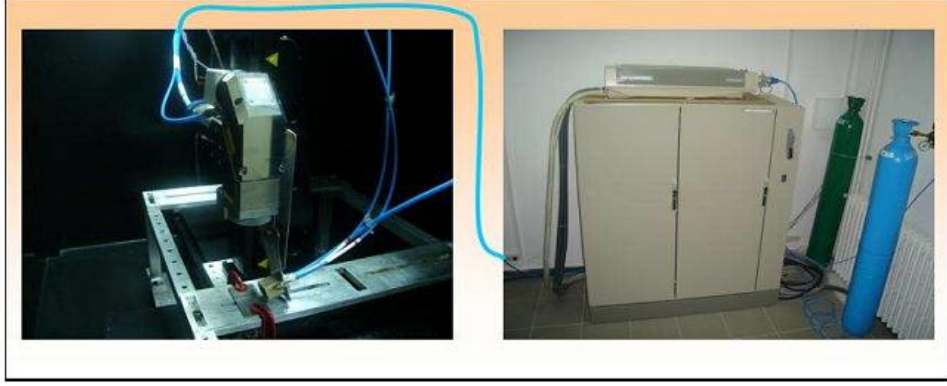
Lazer güç çıkışının Q- anahtarlama; kaynak uygulamaları için daha az yararlıdır. Çünkü darbe süresi darbe tekrar frekansları 100 kHz' e kadar yükselmesine rağmen 1  $\mu$ s' den çok daha kısadır. Bu darbelerde daha yüksek tepe gücü plazma oluşumunu ve gaz kesilmesini kolaylaştırmaktadır. Yüksek ortalama güçlü ( $\geq 1$  kW) lazerlerle sürekli moda lazer nüfuziyet kaynağı mümkün olduğu halde bu durum düşük ortalama güç ile sürdürülemez [58]. Şekil 3.8.' de bir Nd:YAG lazer sisteminin temel elemanları görülmektedir.



**Şekil 3.8.** Bir Nd:YAG lazer sisteminin temel elemanları [61]

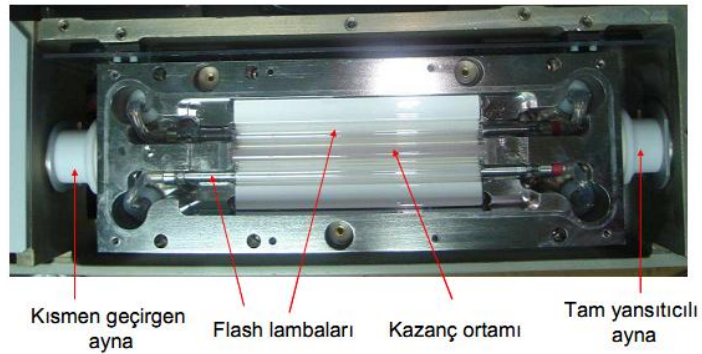
Nd:YAG Lazer sistemi, Şekil 3.9.' da gösterildiği üzere:

- Kovuk içinde yer alan flaş lambaları için gerekli elektrik akımını sağlayan güç ünitesi
- Lazer ışınının olduğu lazer kovuğu
- Odaklama ünitesi olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır.



**Şekil 3.9.** Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi [63]

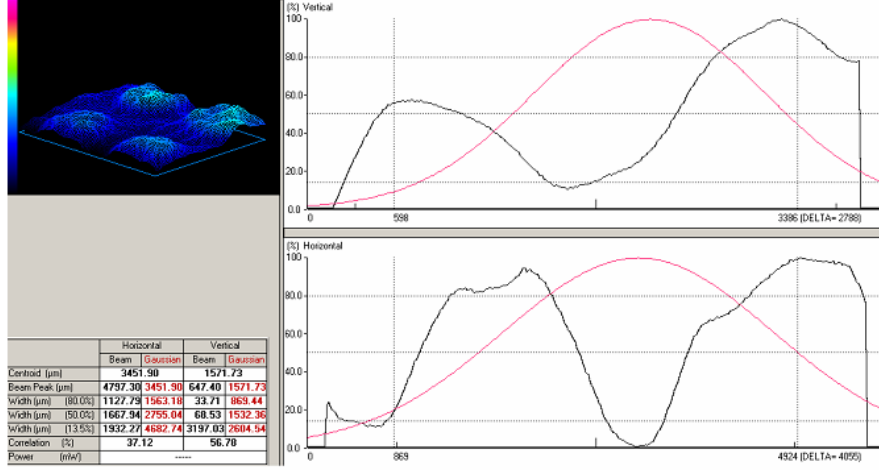
Lazer kovuğu, iç yüzeyleri yüksek yansıtıcılığa sahip, birer merkezleri çakışan, alüminyumdan yapılmış elipslerden oluşmaktadır. Her bir elipsin merkezlerinin birinde flaş lambaları, diğer merkezinde kazanç kristali olacak şekilde ayarlanmıştır. Biri tam yansıtıcı, diğeri kısmen geçirgen iki ayna arasında yer alan kazanç ortamından çıkan lazer ışınları, lazerin kontrolünü sağlayan ve bilgisayar destekli elektro- optik aletlerden geçirilerek fiber kabloya gönderilir. 600 µm çekirdek çapına ve 10 m uzunluğuna sahip fiber kablo aracılığıyla lazer ışınları, odaklama ünitesinin yer aldığı lazer ışığının dışarı sızmasını önleyen kara kutu içerisine gönderilir. Kullanılan Nd:YAG lazerine ait kovuk Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.10.** JK760TR Atımlı Nd:YAG lazerinin kovuğu

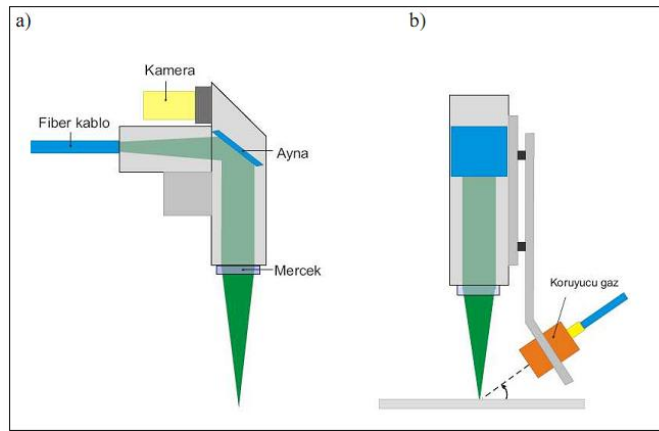
Lazer kovuğunda bulunan flaş lambaların soğutma işlemi, şehir hattından alınan su ile sağlanırken, kristali soğutmak için iyonize su kullanılır. Lazer odaklama ünitesine aktarılan lazer

demetinin enine modları, demet şekil belirleyici (LPB serisi Newport) kullanılarak  $TEM_{11}$  olarak belirlenmiştir. Lazer demetinin TEM modu Şekil 3.11.' de gösterilmektedir.



**Şekil 3.11.** Lazer demetinin  $TEM_{11}$  modunun demet şekil belirleyici ile elde edilmiş görüntüsü [4]

Lazer odaklama ünitesinde bulunan bir mercekle lazer demeti malzeme üzerine odaklanmıştır. Kaynak işlemi görüntülemek için lazer kafasında bir kamera bulunmaktadır. Bu kamera; merceğe göre ayarlanarak görüntünün en iyi olduğu nokta belirlenir ve lazer demetinin bu noktaya odaklanması sağlanır. Odaklama ünitesinin hareketi, 3 eksende mikrometre hassasiyette hareket sağlayabilen bilgisayar kontrollü bir CNC sistem sayesinde sağlanmıştır. Kaynak sırasında, erimiş metalin, çevredeki hava ile reaksiyona girmesiyle oksitlenmesini önlemek ve kaynak havuzunun kararlılığını sağlayabilmek için sisteme koruyucu bir gaz ilave edilmiştir. Gaz çıkışı sağlayan ünitenin çapı 24 mm olup, yatay eksen ile  $39^\circ$  açı yapacak şekilde ayarlanmış ve lazer demeti ile eş zamanlı olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Koruyucu gaz olarak Argon kullanılmıştır. Odaklama ünitesine ve koruyucu gaz ünitesine ait bir şema Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.



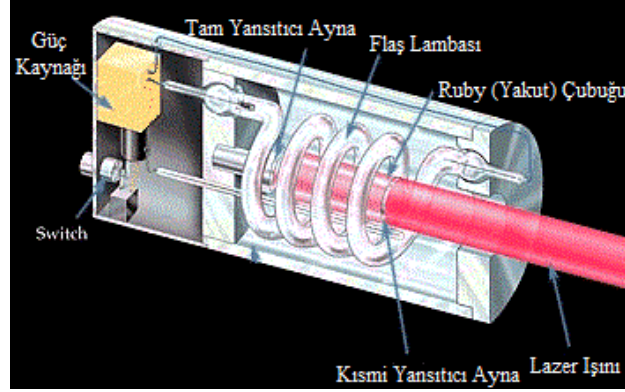
**Şekil 3.12.** Lazer odaklama ve koruyucu gaz ünitesi [4]

### 3.2.1.2. Nd: CAM Lazer Sistemi

Lazer aracı olarak içerisinde neodimyum ( $\text{Nd}^{+3}$ ) aktif elementi depolanmış cam kullanılmaktadır. Optik özellikleri çok iyi olmasına karşın, düşük bir ısıl iletkenliğe sahiptir. Darbeli veya Q-anahtarlamalı şekilde dizayn edilebilir. Lazer çubuğunun boyu Nd:YAG sisteminde kullanılanlara göre oldukça uzundur. Pompalama kaynağı ve rezonans boşluğu geometrisi ve özellikleri Nd:YAG sistemine benzerdir. Ancak; boşlukta kullanılan flaş lambası sayısı daha fazladır.

### 3.2.1.3. Ruby Lazer Sistemi

Lazer üretici; içine 0.001 oranında aktif element olarak  $\text{Cr}^{+3}$  ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) iyonu depolanmış  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kristalinden yapılmıştır. Yani aktif ortam sentetik açık pembe bir yakuttur. Silindirik çubuğun her iki ucu eksene dik doğrultuda kesilmiş ve parlatılmıştır. Bir ucu tamamen, ikinci ucu ise kısmen gümüş kaplanmıştır. Bu şekilde bir rezonans oyuğu oluşturulmuştur. Yüksek ısıl iletkenliğe, iyi optik kaliteye sahip, oldukça sert ve dayanıklıdır [61]. Şekil 3.13.'de Ruby lazer sistemi gösterilmiştir.



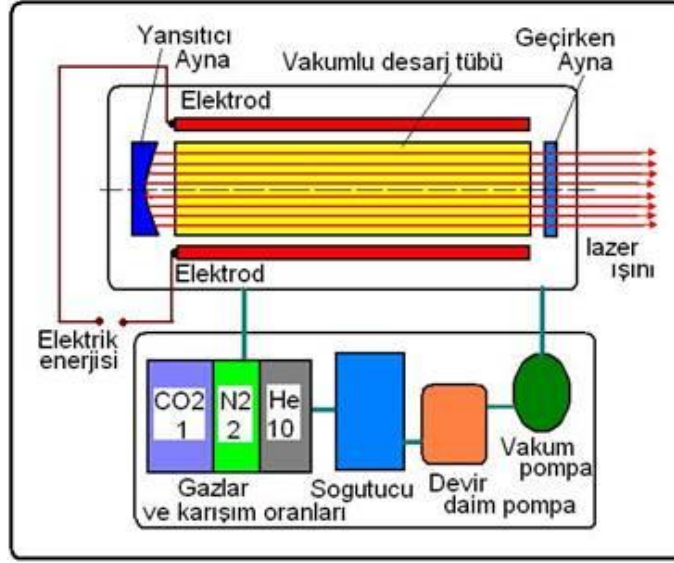
Şekil 3.13. Ruby lazer sistemi [63]

Optik pompalama; lazer çubuğunun etrafına sarılmış helisel flaş tüpü ile sağlanmaktadır. Flaş tüpünün ateşlenmesiyle birkaç milisaniyelik şiddetli bir ışık patlaması olur. Bu esnada enerjinin bir kısmı  $\text{Cr}^{+3}$  iyonlarını uyarır, geri kalanı ise ısı enerjisi şeklinde kaybolur. İyonlar, çok kısa sürede uyarılmış duruma geçerler. İyonlar taban durumlarına dönerlerken; yakut kristali kırmızı ışımalarını yapar. Işıma, tüm doğrultularda olur ve faz uyumu yoktur. İşte bu durumlarda optik pompalama hızı artırılırsa; "nüfus terslenmesi" oluşur. Kendiliğinden yayınan fotonlarla olay başlatılır. Enerji; yarı kararlı atomlardan, ışık dalgasına aktarılır. Dalga, aktif ortam içinde gidip gelerek gelişimini sürdürür. Kısmen gümüşlenmiş uçtan bir ışık atması olur. Lazer karakteristikleri, lazer çubuğunun sıcaklığıyla yakından ilgili olduğundan dolayı efektif bir soğutma işlemi gerekmektedir.

### 3.2.2. Gaz Lazer Sistemleri

#### 3.2.2.1. CO<sub>2</sub> Lazer Sistemi

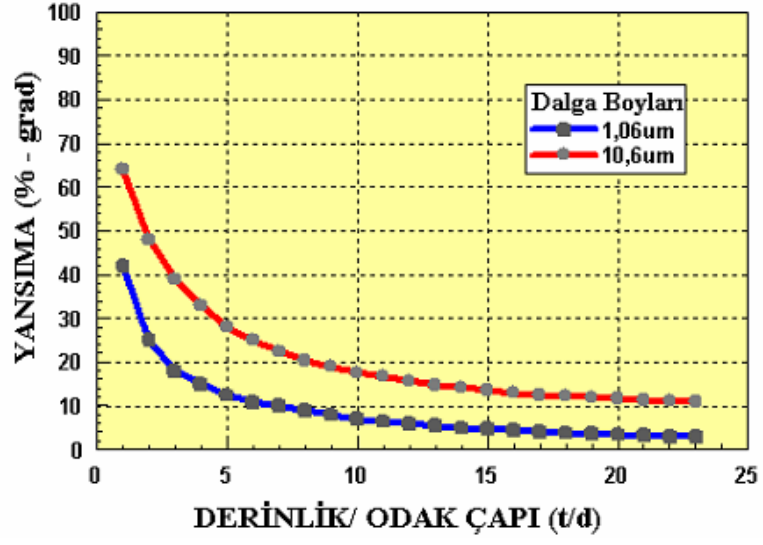
Yüksek ve devamlı güç (50 kW' a kadar) elde edilebilen bir lazer sistemidir. Diğer sistemlere göre verimi en yüksek olan sistemdir. Çıkış verimi; çıkış lazer gücünün elektriksel giriş gücüne oranı olarak tanımlanır ve %10' a yaklaşır. Lazerin üretimi bir doğru akım kaynağıyla veya radyo frekanslarıyla sağlanabilmektedir. Dalga boyu 9-11  $\mu\text{m}$  arasında değişen kızılötesi ışınım yayarlar. En çok kullanılan dalga boyu 10.6  $\mu\text{m}$ ' dir. Şekil 3.14'de bir CO<sub>2</sub> lazer üretim sistemi gösterilmiştir [64].



Şekil 3.14. CO<sub>2</sub> lazer sistemi [64]

Gaz lazer sistemlerinde aktif ortam olarak bir gaz karışımından faydalanılmaktadır. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He gazlarının karışımı, tüp içerisine sürekli olarak pompalanır. Bu işlemin amacı; tüp içinde lazer olayının meydana geldiği esnada oluşabilecek bozulma ve yığılmaları engellemek içindir. CO<sub>2</sub> gazı, lazer ışığını oluşturmaktadır. N<sub>2</sub> molekülleri, CO<sub>2</sub> moleküllerinin uyarılmasına yardım ederler ve ışık üretimi işleminin verimini artırır. Helyum burada ikili rol oynamaktadır. Gaz içerisindeki ısı transferine ve ayrıca CO<sub>2</sub> moleküllerine taban enerji konumlarına geri dönmelerinde yardımcı olmaktadır. Tüp, su soğutmalı olup, katı hal lazer sistemlerinde olduğu gibi iki ucuna tam ve kısmi yansıtıcı aynalar yerleştirilmiştir [61].

CO<sub>2</sub> lazer ışını ve Nd:YAG lazer ışınının yansıma yüzdeleri ile derinlik/odak çapına bağlı olarak değişimini gösteren grafik Şekil 3.15.' de gösterilmiştir.



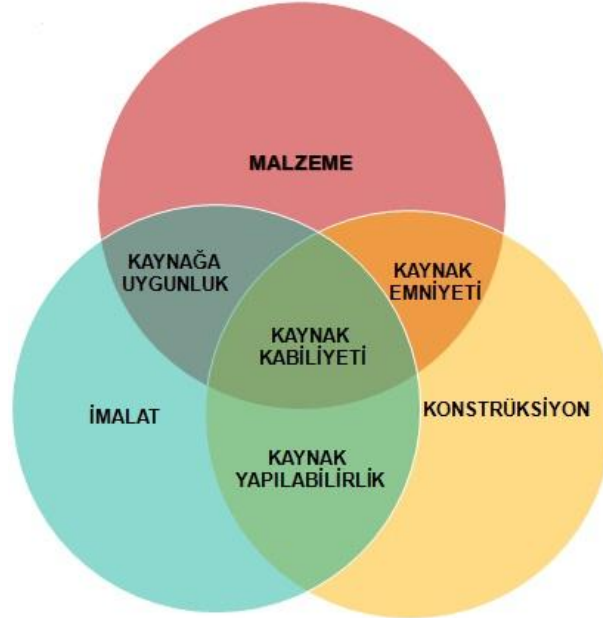
Şekil 3.15. Farklı dalga boylarındaki lazer ışınının metal yüzeyinden yansımaya yüzdeleri [61]

#### 4. TİTANYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ

Kaynak, birbirinin aynı veya ergime aralıkları birbirine yakın iki veya daha fazla metalik veya termoplastik parçayı ısı, basınç veya her ikisini birden kullanarak, aynı türden bir malzeme katarak veya katmadan birleştirmektir [65].

Kaynak kabiliyeti kesin ve kantitatif olarak ifade edilebilen bir özellik olmayıp, karmaşık bir anlam taşır. Uluslararası Kaynak Enstitüsü' nün IX numaralı "Kaynak Kabiliyeti" Komisyonu, kaynak kabiliyetini şöyle tanımlamaktadır: "Bir metalik malzeme, verilen bir yöntem ile bir amaç için bir dereceye kadar kaynak yapılabilir diye kabul edilir. Uygun bir yöntem kullanarak kaynaklı metalik bağlantı elde edildiği zaman, bağlantı yerel özellikleri ve bunların konstrüksiyona etkileri bakımından belirlenmiş bulunan şartlar sağlanmalıdır." Tanımdan da anlaşılacağı gibi kaynak kabiliyeti yalnız malzemeye bağlı bir özellik değildir. Aynı zamanda kaynak yöntemine ve kaynaklı konstrüksiyona da bağlıdır. Bir metal veya alaşım bir kaynak yönteminde gayet iyi derecede bir kaynak kabiliyeti göstermesine rağmen, diğer bir yöntemde zayıf bir kaynak kabiliyetine sahip olabilir [32]. Bir malzemenin yüksek kaynak kabiliyetine sahip olması; kaynak şartları geniş bir aralıkta değişirken hiçbir tedbire gerek kalmadan tatminkâr bir kaynak kalitesinin elde edilebilmesi demektir.

Kaynak kabiliyeti deyimi; kaynağa elverişlilik, konstrüksiyonun kaynak emniyeti ve üretimde kaynak yapılabilme kavramlarını içine alır. Bu kavramlarda malzeme, imal usulü ve konstrüksiyonun etkisi altındadır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Kaynak kabiliyeti [32] [66]

Bir malzemenin kaynak kabiliyetinden söz edebilmek için en azından aşağıdaki iki şart sağlanmalıdır:

- ✓ Parçaların belirli bir kaynak usulü ile birleştirilebilmesi mümkün olmalıdır. (Kaynak yapılabirlik)
- ✓ Kaynak edilen malzeme, maruz kalacağı zorlamalara dayanmalıdır. (Kaynak emniyeti)

Titanyum ve alaşımlarının gazlara karşı duyarlılığı çeşitli kaynak yöntemlerinin kullanılmasını sınırlamakta ve bir dizi ek önlemlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu sınırlamalar bir yana, titanyum ve titanyum alaşımlarının büyük bir kısmının iyi bir kaynak kabiliyeti olduğu söylenebilir[67]. Titanyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda havada bulunan gazları bünyesine almasından dolayı yapıda gevrekleşme meydana gelmektedir. Bundan dolayı kaynak işlemi koruyucu gaz atmosferi altında yapılmalıdır. Ana metal ve ilave metal, kaynak sırasında, kirlenmeyi önlemek için temiz olmalıdır [68].

Alaşımsız titanyum ve bütün  $\alpha$  alaşımları kaynak edilebilirler. Ti6Al4V  $\alpha+\beta$  alaşımı ile diğer hafifçe  $\beta$  kararlaştırılmış alaşımlar da kaynak edilebilirler. Ancak; kuvvetli  $\beta$  kararlaştırılmış  $\alpha+\beta$  alaşımları kaynak esnasında gevrekleşirler.  $\beta$  alaşımlarının çoğu başarıyla kaynak edilebilirler. Bununla birlikte kaynağın yaşlandırma sertleşmesiyle kuvvetlendirme işlemi dikkatle uygulanmalıdır. Aksi halde bazı  $\beta$  alaşımlarında yaşlandırılmış kaynaklar tamamen gevrek hale gelebilir [67].

Alaşımsız titanyumlar %98.5 ile %99.5 oranında saflıktadırlar. Saf titanyumun bütün türleri genellikle tavllanmış şartlarda, soğuk işlem görmüş olanlardan daha iyi kaynak edilebilirler.  $\alpha$  alaşımları Ti-5Al-20Sn, Ti-5Al-5Sn-5Zr, Ti-7Al-12Zr, Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo ve Ti-8Al-1Mo-1V daima tavllanmış şartlarda kaynak edilebilirler.  $\alpha+\beta$  alaşımlarından Ti-6Al-4V alaşımı özellikle tavllanmış şartlarda veya eriyik işlem ve kısmi yaşlanma koşullarında kaynak edilebilir. Yaşlandırma, kaynak sonrası gerilim giderme işlemi sırasında tamamlanır [35]. Tablo 4.1.'de titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri [35]

Alaşım Türü	Alaşım Sembolü	Kaynak Edilebilirlik
Ticari Safılıktaki Titanyum (CpTi)	-	Çok İyi
$\alpha$ Alaşımları	Ti- 0.2Pd	Çok İyi
	Ti-5Al-2.5Sn	İyi
	Ti-5Al-2.5Sn-ELI	Çok İyi
Yakın $\alpha$ Titanyum Alaşımları	Ti-8Al-1Mo-1V	Çok İyi
	Ti-6Al-2Cb-1Ta-0.8Mo	Çok İyi
	Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	İyi
$\alpha+\beta$ Titanyum Alaşımları	Ti-6Al-4V	İyi
	Ti-6Al-4V-ELI	Çok İyi
	Ti-7Al-4Mo	Özel Uygulamalar İçin Sınırlı
	Ti-6Al-4V-2Sn	Özel Uygulamalar İçin Sınırlı
	Ti-8Mn	Önerilmez
$\beta$ Titanyum Alaşımları	Ti-13V-11Cr-3Al	İyi

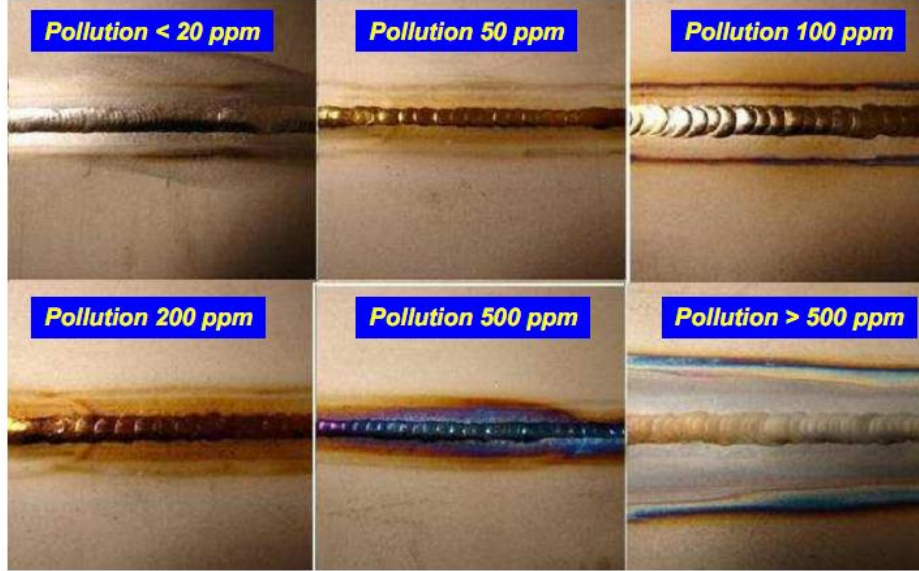
$\alpha+\beta$  alaşımlarının çoğunun düşük kaynak sünekliğine sahip olması, kaynak bölgesi veya ısının tesiri altında kalan bölgede meydana gelen faz dönüşümlerinden ileri gelmektedir. Bu nedenle  $\alpha+\beta$  alaşımları, ergime bölgesinin  $\beta$  içeriğini düşürüp kaynağın sünekliğini artırmak üzere alaşımsız Ti veya  $\alpha$  Ti alaşımı ilave metalleriyle kaynak edilirler. Ancak hassas alaşımlarda bu tür ilave metallerin kullanılması, ısının tesiri altında kalan bölgenin gevrekleşmesini önlemez[67].

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında kaynak kabiliyetini iyileştirmek ve daha iyi sonuçlar alabilmek için uygun bir alaşım türü seçmek kadar, çevre şartlarını ve kaynak yöntemini seçmek de önemlidir. Titanyumun ısı iletkenliği düşük olduğundan, kaynak dikişi uzun süre yüksek sıcaklıkta kalmakta, dolayısıyla havanın etkisinden korunması gereken dikiş uzunluğu artmakta ve ITAB daralmaktadır. Yavaş soğuma, tane büyüklüğü üzerinde etkili olduğundan, soğutma süresinin artması; tane irileşmesine yol açmaktadır. Titanyumun kaynağında soğuma hızını artırmak için kaynak bölgesinde ısı yoğunluğu dar bir alanda artırılmalı ve kaynak hızı da yükseltilmelidir. Bu yüzden titanyumun kaynağında ITAB'ın dar bir alanda tutulabildiği kaynak yöntemleri uygulanır [35].

#### 4.1. Titanyum ve Alaşımlarının Ergitmeli Kaynak Yöntemleri

Titanyum ve alaşımları, ergitmeli kaynak yöntemlerinden; TIG kaynağı, gaz metal ark kaynağı (GMAW), plazma ark kaynağı (PAW), lazer ışın kaynağı (LBW), elektron ışın kaynağı (EBW) ve nokta direnç kaynağı (RSW) ile kaynaklanabilmektedir [9].

Uygulamalar ve donanım, genellikle östenitik paslanmaz çelik veya alüminyumda kullanılanların aynıdır. Ancak, titanyum ve alaşımlarının 535 °C'ın üstünde fevkalade aktif olmaları itibariyle, kaynağın ve birleştirmenin sıcak kök tarafının korunmasına, östenitik paslanmaz çelik veya alüminyum alaşımlarında olduğundan daha fazla özen gösterilmesini gerektirir. Sağlam bir kaynağın belirtilerinden biri, kaynak yüzeyinde sertleşme (tav) renklerinin hasıl olmamasıdır. Maviye kadar koyulaşan renk, kaynak sırasında malzemenin gerektiği gibi korunmadığını gösterir [67]. Şekil 4.2.'de Titanyumun kaynağında ortaya çıkan tav renkleri gösterilmektedir.

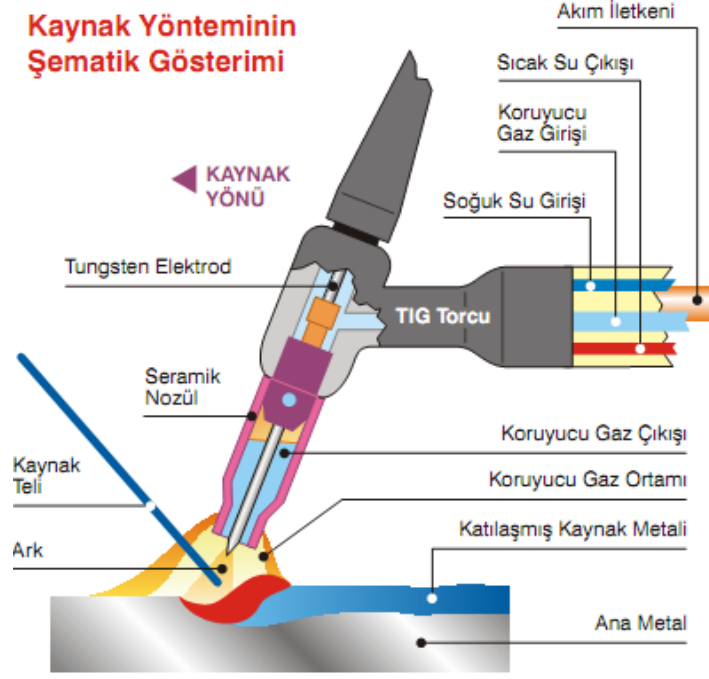


Şekil 4.2. Titanyumun kaynağında ortaya çıkan tav renkleri [69]

##### 4.1.1. TIG Kaynağı

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en ekonomik ve en çok kullanılan kaynak yöntemidir. Bu yöntemle; dar bir alanda ve yüksek ısı yoğunluğu sağlanarak kaynak hızı artırılır ve deformasyon minimuma indirilir [70]. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en çok kullanılan yöntem olan TIG kaynağı, tükenmeyen bir elektrot, gerektiğinde ilave bir metal ve koruyucu gaz olarak Argon veya Helyum gazının kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde kaynak akımının artmasıyla malzemeye verilen ısı artacağından bu artış da ITAB'ın genişlemesine sebep olacaktır [25]. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında en büyük problem,

yükseltilen sıcaklıklarda titanyumun içerisindeki oksijen, azot ve hidrojenin çözülmesidir. Küçük miktarlardaki oksijen ve azot artışı sertliği artırır. Yüksek miktardaki yağ ve rutubet gibi istenmeyen artıklar veya elementler titanyumun kırılgen olmasına neden olurlar[35].Şekil 4.3.'de TIG kaynağı prensip resmi gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** TIG kaynağı prensibi [71]

Titanyum ve alaşımlarının TIG kaynağında ilave önlemlerle havanın sadece kaynak yerine girişini değil, ITAB' a da girişi önlenmelidir. Kaynak koruyucu gazı ve kök koruyucu gazı olarak normal argon gazı değil, yüksek saflıktaki argon gazı kullanılmalıdır. Titanyum'un oksijen, azot ve hidrojene ilgisi özellikle çok yüksektir. Kaynak banyosuna gaz girişi, tam bir gevrekleşmeye yol açabilir. Bundan başka, titanyum katı halde yaklaşık 250 °C'nin üzerine kadar oksijenle reaksiyona girer. Bunun için kaynak dikişinin yanında uzanan bölgenin de gerekli önlemler alınarak korunması gerekir [72].


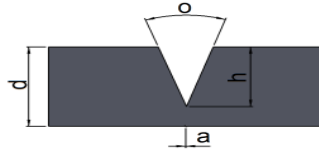
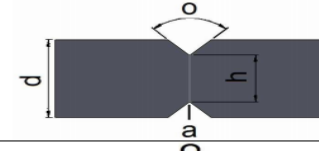
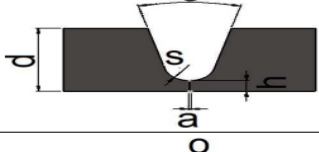
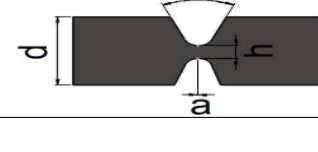
Titanyum ve alaşımlarının TIG Kaynağında sadece argon, helyum ve bunların karışımı kullanılmalıdır. Argon ince sacların kaynağında etkili olurken, helyum derin nüfuziyet kabiliyetinden dolayı kalın parçaların kaynağında kullanılır. Bu özelliğinin bir sonucu olarak helyum gazı kullanımında kaynak hızı daha büyük olmalıdır [68]. Koruyucu gaz olarak helyumun kullanıldığı durumlarda, ark kararlılığını sağlamak için %2-5 argon ilave edilir. Böylece kararlı bir ark elde edilir. Argon gazının havadan ağır olması yatay pozisyonda daha iyi kaynak koruması sağlar. Helyum gazının da havadan hafif olması nedeniyle tavan ve dik kaynak pozisyonlarında daha verimli koruma sağlar [67].

#### 4.1.1.1. Titanyum ve Alaşımlarının TIG Kaynağında Kullanılan İlave Metaller

Yaklaşık 2.5 mm' den kalın titanyumun TIG kaynağında, bir ilave metal kullanılacaktır. İlave metal bileşimi mutlak olarak kaynak edilen Titanyum Grade'ine eş olur. Alaşımsız titanyumun yüksek mukavemetli gradelerinin kaynağında artırılmış birleştirme sünekliği elde etmek için bazen ana metalinkinden daha alçak akma sınırlı bir ilave metal kullanılır. Aynı nedenle Ti5Al2.5Sn ile Ti6Al4V'yi kaynak etmek için alaşımsız ilave metal kullanılır. AWS A5.16- 70'de on dört Titanyum ve Titanyum alaşımı ilave metal (veya elektrot) sınıflandırmaları verilmiştir. Bunlardan beşi esas itibariyle alaşımsız titanyum olup, gerisi alaşımlı titanyum ilave metalleridir[67].

#### 4.1.1.2. Kaynak Ağızı Hazırlığı

Kaynağın, kaynak odası dışında yapılması halinde, birleştirme bölgesinin özenle tasarlanması gerekir. Şöyle ki kaynağın üst ve altı korunabilmelidir. Tipik birleştirmeler Şekil 4.4.'de gösterilmiştir [67].

Ağız Şekli	Kalınlık d (mm)	Tabaka Sayısı ve Sırası	Elektrod Çapı (mm)	Ağız ve Kök Aralığı (mm)	Ağız Açısı (°)	Kök Yüksekliği h (mm)
	0.2.....2 1.....3 1.....3	1 2 taraflı 1	1.6 1.6 3.2	0 0 0.1d	- - -	- - -
	2.....3 3.....6 3.....12	1 2 1	1.6.....2.4 1.6.....2.4 2.4.....3.2	0.....0.1d 0.1d 0.1d	30.....60 30.....60 30.....90	0.1.....0.25d 0.1.....0.25d 0.1.....0.25d
	6.....12 6.....20	2.....4 2.....6	2.4 3.2	0.1d 0.1d	30.....90 30.....90	0.1.....0.25d 0.1.....0.25d
	6.....20	2.....10	2.4.....3.2	0.1d	15.....30	0.1.....0.25d
	20.....38	8.....20	3.2	0.1d	15.....30	0.1.....0.25d

Şekil 4.4. Tipik kaynak ağızı çeşitleri [67]

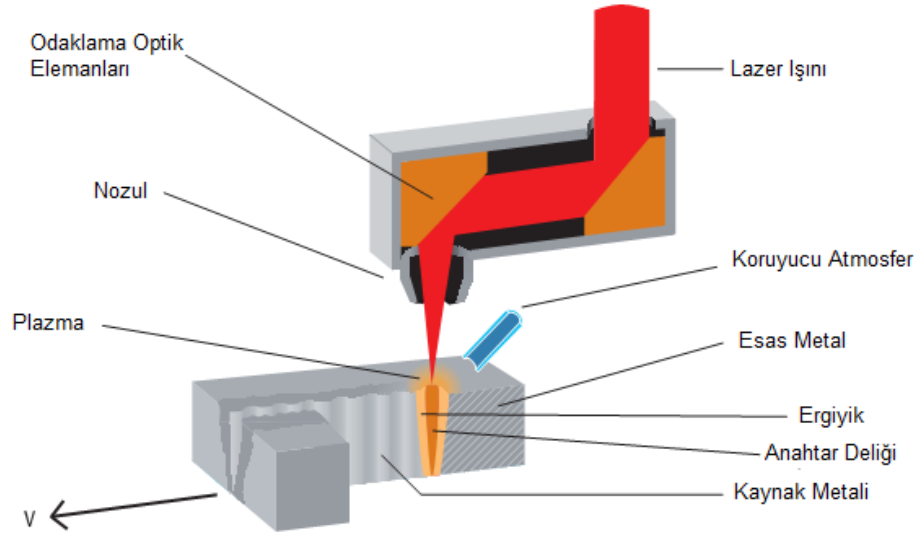
#### 4.1.2. Lazer Kaynağı

Ticari olarak metallerin kaynağı için; yüksek güvenilirlik, kolay operasyon ve düşük maliyetli lazer kaynak sistemleri gerekmektedir [58]. Lazer demetinin yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilmesi için küçük bir alana odaklanabilir olması kaynak işlemlerinde tercih edilen bir alet olmasını sağlar. Tablo 4.2.'de farklı kaynak işlemleri için güç yoğunlukları görülmektedir.

**Tablo 4.2.** Farklı kaynak yöntemlerine ait güç yoğunlukları [4]

Kaynak İşlemi Türü	Güç Yoğunluğu (W/m <sup>2</sup> )
Tozaltı Ark Kaynağı	$5 \times 10^6 - 10^8$
Gazaltı Ark Kaynağı	$5 \times 10^6 - 10^8$
Plazma Kaynağı	$5 \times 10^6 - 10^{10}$
Lazer veya Elektron Kaynağı	$5 \times 10^{10} - 10^{12}$

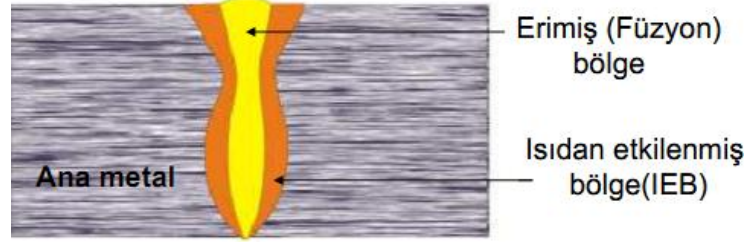
Lazer ile yapılan kaynak işlemi, maddelerin birbirlerine temas eden yüzeyleri eritildikten sonra soğumaya bırakılması ile gerçekleştirilen bir füzyon işlemidir [73]. Şekil 4.5.'de lazer kaynağı prensibi gösterilmektedir.



**Şekil 4.5.** Lazer kaynağı prensibi [74]

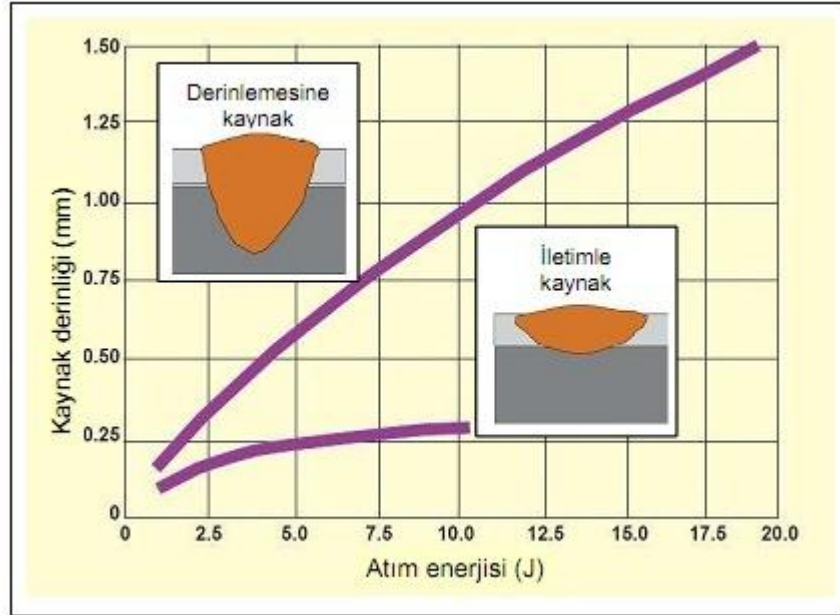
Lazer ile kaynak işlemi sırasında Şekil 4.6.'da görüldüğü üzere birbirinden farklı yapıda üç bölge oluşur. Birinci bölge esas metaldir ve kaynak yapılan metali içeren bu bölge, kaynak işlemi süresince hiçbir değişime uğramaz. İkinci bölge füzyon bölgesidir (ergimiş metal). Füzyon bölgesi kaynak işlemi süresince ergitilen metali içeren bölgedir. Isıdan etkilenmiş bölge (IEB)

olarak da bilinen üçüncü bölge; kaynak işlemi süresince ana metalde oluşan ısı ile birlikte bazı değişimlere uğrar.



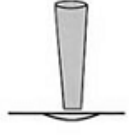
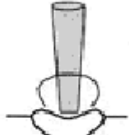
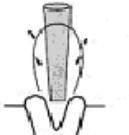
Şekil 4.6. Kaynak işlemi sırasında oluşan bölgeler [75]

Lazer demetinin enerji yoğunluğuna bağlı olarak, ince metallerin birleştirilmesinde kullanılan iletimle kaynak ve daha kalın metallerin birleştirilmesinde kullanılan derinlemesine kaynak olmak üzere iki çeşit kaynak yöntemi vardır. Şekil 4.7.'de derinlemesine ve iletimle kaynağın paslanmaz çelik örnekleri üzerinde kaynak derinliğine bağlı olan etkisi gösterilmektedir. Bu iki kaynak çeşidi arasındaki temel fark; iletimle kaynak sırasında kaynak havuzunun kapalı, derinlemesine kaynak işleminde kaynak havuzunun açık olması ve lazer demetinin daha derine etki etmesidir [4].



Şekil 4.7. Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak, iletimle ve derinlemesine kaynak işleminin paslanmaz çelik üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması [76]

Metal malzemeler üzerindeki lazer ışın absorpsiyonu ve kaynak mekanizması, lazer ışınının güç yoğunluğuna bağlı olarak, Şekil 4.8.'deki gibi üç şekilde sınıflandırılmaktadır [61].

(1)Metal yüzeyinden ısı iletme bağlı olarak kaynak edilir.	(2)Kaynak yüzeyinde absorpsiyon ve buharlaşma meydana gelir.	(3) Kaynak edilmiş metal parlak ışık yayar, bir anahtar deliği oluşturur.
		
< İletim Biçimi >		< Nüfuziyet Biçimi >
Düşük		Güç Yoğunluğu

**Şekil 4.8.** Lazer ışınının güç yoğunluğuna bağlı olarak sınıflandırılması

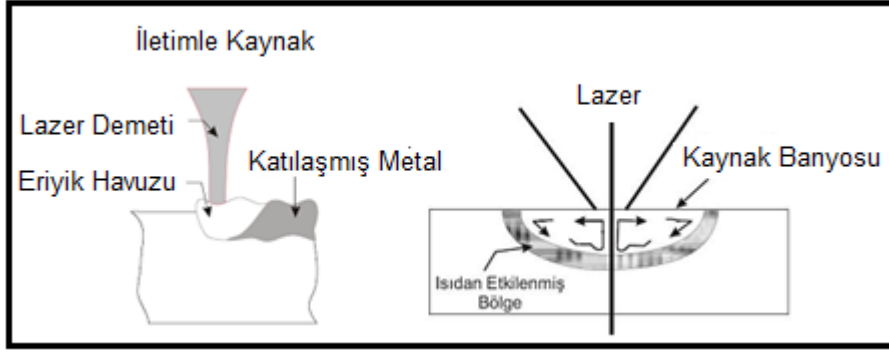
Lazer ışınının verilisinin esnekliğine göre (güç yoğunluğu ve süre) iki çeşit kaynak yapılabilmektedir. Bunlar:

- İletimle Kaynak
- Derinlemesine Nüfuz Eden Kaynaktır. (Anahtar Deliği Kaynağı)

#### 4.1.2.1. İletimle Kaynak

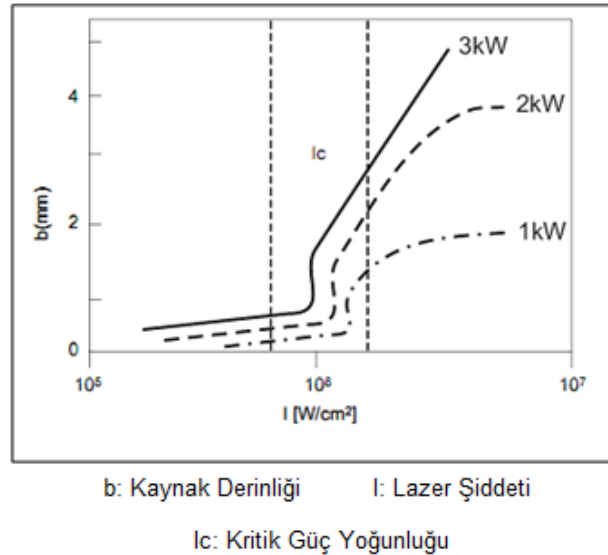
İletim ile kaynak işleminde, kaynak derinliği çok fazla olmadığından, ince metallerin birleştirilmesinde kullanılan bir tekniktir. Bir lazer demeti, odaklama sistemleri kullanılarak malzeme yüzeyi üzerine düşürülür. Odak pozisyonu, genelde malzemenin yüzeyi üzerinde veya malzemenin içinde olacak şekilde ayarlanır. Gelen ışığın bir kısmı; madde yüzeyi tarafından soğurulurken, bir kısmı geri yansır. Soğurulan enerji, malzemenin yüzeyinde depolanır ve iletkenliğe bağlı olarak malzeme içinde dağılır. Bu işlem, ince metaller için malzemenin kalınlığı boyunca hızlı bir şekilde meydana gelir. Bu nedenle sıcaklığın derinlik boyunca düzenli olarak yayıldığı kabul edilir. İletim ile kaynak işlemi; lazer şiddetinin malzemeyi kaynatmaya yeterli olmadığı, erimeye yeterli olduğu durumlarda gerçekleşir [77]. Maksimum kaynak derinliğine; malzeme yüzey sıcaklığının, kaynama noktasının hemen altında olduğu sıcaklıklarda erişilir. Soğurulan enerji yerel olarak ısınmaya neden olur. Yeterli enerjiye ulaşıldığında malzeme erir ve lazer demeti hareket ettirildiğinde eriyik soğumaya başlar ve katılaşır. Böylece birleşme

sağlanmış olur. İletimle kaynak işlemleri sırasında erimiş metal ile dış atmosfer arasındaki etkileşim nedeniyle erimiş metal, yüzeyde oksitlenme oluşturur. Bu durumu önlemek için; koruyucu gazlar kullanılmaktadır. Koruyucu gaz, sisteme, lazer demeti ile eş eksenli veya belli bir açı yapacak şekilde eklenebilir. En çok kullanılan koruyucu gazlar Argon ve Helyum'dur. Bunlara ek olarak karışık gazlar ve karbondioksit gazının kullanılabileceği rapor edilmiştir [4].



**Şekil 4.9.** İletimle kaynak [4]

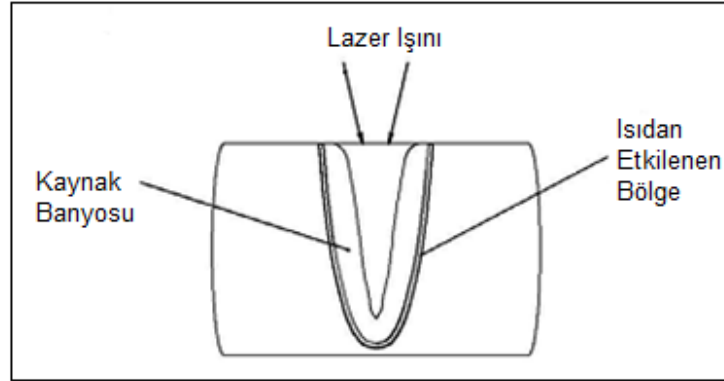
Şekil 4.10.'da görüldüğü üzere, iletim ile kaynak koşulları altında, yüzey ergime işleminin başlaması için sıcaklık değeri büyük önem arz etmektedir. İletim ile kaynak işleminden, derinlemesine kaynak işlemine geçiş; lazer şiddetinde ve atım süresindeki artma ile meydana gelir [77]. İletimle kaynaktan, derinlemesine nüfuz eden kaynağa geçişler Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Çoğu metal için kritik güç yoğunluğu  $10^6$  W/cm<sup>2</sup>'dir [4]. Bu değerden sonra buharlaşma artmaya başlar ve anahtar deliği (keyhole) oluşur.



**Şekil 4.10.** İletimle kaynaktan derinlemesine kaynağa geçiş için kritik güç yoğunluğu [4]

#### 4.1.2.2. Derinlemesine Nüfuz Eden Kaynak (Anahtar Deliği Kaynağı)

Yeterince güç yoğunluğuna sahip ( $10^6$  W/cm<sup>2</sup>) bir lazer demeti, malzeme yüzeyine odaklandığında malzeme yüzeyini hızlı bir şekilde eriterek buharlaştırmaya başlar [4]. Buharlaşmanın ve buhar basıncının etkisi ile eriyik havuzunun içinde bir buhar kanalı (anahtar deliği) oluşur. Eriyen metal ve bunları çevreleyen katı metalden oluşan buhar kanalının yarıçapı, malzeme yüzeyindeki odak yarıçapına eşittir. Eriyik halde bulunan malzemede yüzey gerilimi, buhar basıncı ve yer çekimi arasındaki kararlı denge sonucu, anahtar deliği açık tutulmaktadır. Derinlemesine kaynak işlemlerinde, metal buharı ile lazer demeti arasındaki etkileşim, metal buharının kısmen iyonlaşmasına ve biri anahtar deliğinin içinde, diğeri anahtar deliğinin üzerinde olmak üzere iki farklı noktada plazma oluşumuna neden olur. Anahtar deliğinin üzerindeki plazma parlak, yeşil- mavi arası bir renge sahiptir. Gelen lazer demetini ters Bremsstrahlung soğurma mekanizmasının etkisi ile soğurabilir, yansıtabilir veya odak konumundan saptırabilir. Tüm bu etkiler, yetersiz kaynak derinliği, düzensiz kaynak şekli veya odaklama ünitesinde bulunan optik aksamın zarar görmesine neden olabilir.

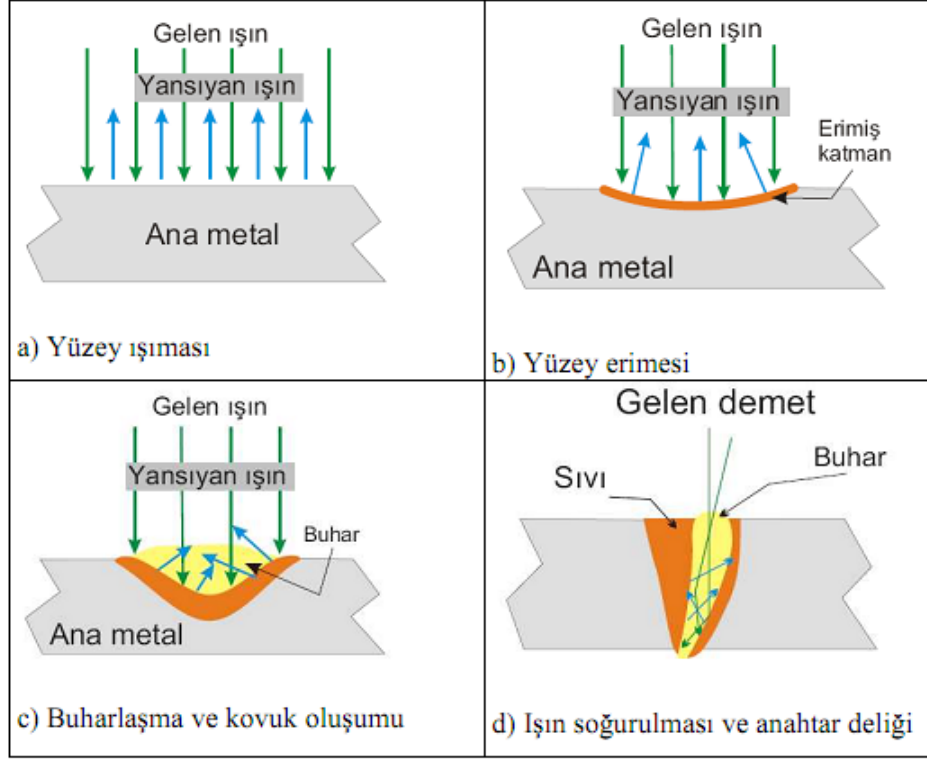


Şekil 4.11. Derinlemesine kaynak [61]

Odaklama ünitesini ısısal zararlardan korumak için; sisteme lazer demeti ile eş eksenli olarak koruyucu gaz ilave edilir. Aynı zamanda koruyucu gaz, kaynak işlemi süresince, erimiş metalin atmosferdeki gazlarla etkileşime girip oksitlenmesini önler. Anahtar deliği içinde oluşan plazma; Frensel soğurması ve çoklu yansımaların etkisi ile lazer enerjisinin malzemeye aktarılmasında çok önemli rol oynar ve kara cisim gibi davranarak gelen lazer demetinin büyük kısmını soğurarak, anahtar deliği duvarlarındaki sıcaklığı sabit ve malzemenin kaynama sıcaklığında tutar. Anahtar deliğinin oluşması, derinlemesine kaynak işleminin oluşabilmesi açısından çok

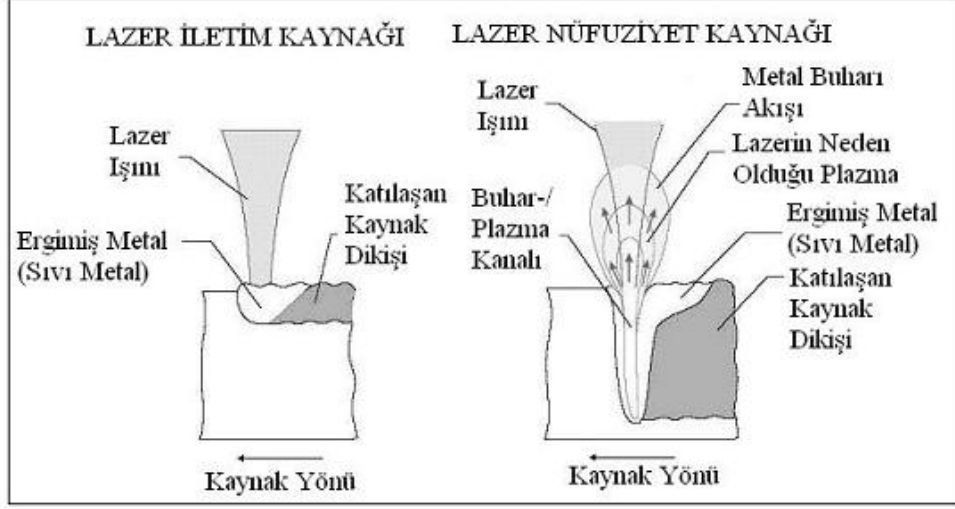
önem taşımaktadır. Daha sonra malzeme veya lazer demeti sabit hızla hareket ettirilir. Bu yolla metal, lazer demetinin hareket doğrultusunda eritilir, geride kalan eritilmiş metal ise katlaşır[78].

Kaynak çukuru oluşturarak malzemelerin kaynatılması işlemi, özellikle kalın sacların kaynak edilmesi için uygun bir yöntemdir [78]. Derinlemesine nüfuz eden kaynak işleminde meydana gelen aşamalar Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.12.** Derinlemesine nüfuz eden kaynakta aşamalar [4]

İletim ve nüfuziyet kaynağı arasındaki en temel fark; iletim kaynağı esnasında kaynak banyosu aralıksızdır, yani lazer ışını tarafından kesilmemiş olmasıdır. Ancak nüfuziyet (anahtar deliği) kaynağında, kaynak banyosu kaynak boyunca açılır ve lazer ışınının ergimiş banyonun içine girmesine izin verir. İletim kaynağı, sistem için daha az rahatsızlık vericidir. Çünkü lazer ışınımı, kaynak edilmiş malzeme içine nüfuz etmez. Sonuç olarak, iletim kaynakları; kaynak esnasında daha az gaz tutucu özelliğe sahiptir. Nüfuziyet kaynağı ise kaynak banyosunun aralıklı kapanmaları nedeniyle gözenekliliğe neden olabilmektedir. Şekil 4.13.'de lazer iletim ve lazer nüfuziyet kaynağı gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Lazer iletim ve lazer nüfuziyet kaynağı [61]

#### 4.1.3. Lazer ile Kaynak İşlemi Sırasında Gerçekleşen Fiziksel Olaylar

Lazer ile malzeme işlemlerinde en önemli fiziksel olay lazer enerjisinin malzeme tarafından soğurulmasıdır. Bu etkileşimde, lazer enerjisi hedef tarafından soğurulur ve hedef içerisinde ısıya dönüştürülür. Bu nedenle hedefin fiziksel özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

Madde ile ışığın etkileşimi sırasında önem taşıyan hedef özellikleri şöyledir:

**Işığı soğurma özelliği:** Işıktan gelen enerjinin ne derece hedef tarafından soğurulduğunun göstergesidir. Malzeme yüzeyi, soğurma katsayısı ve lazer dalga boyundaki yansıma önemli fiziksel parametrelerdir.

**Isısal transfer özelliği:** Madde içindeki ısısal enerji akışını ve sıcaklık dağılımını belirler. Isısal iletkenlik ve ısısal dağılım önemli fiziksel parametrelerdir.

**Termodinamik özelliği:** Malzemede meydana gelebilecek erime, buharlaşma gibi faz değişiklikleri için gerekli enerji miktarını belirleyen özelliktir. Yoğunluk, ısı kapasitesi, erime ve buharlaşma sıcaklıkları önemli fiziksel parametrelerdir [4].

Yüksek güçlü lazer ile malzeme işleme sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar bu bölümdeki alt başlıklarda incelenecektir.

#### 4.1.3.1. Soğurma

Bir lazer ışını, hedef yüzeyine çarptığında; gelen ışının bir kısmı soğurulur ve bir kısmı yansır. Lazer demetinin metal tarafından soğurulması dalga boyu, metalin iletkenlik gibi elektriksel özelliklerine, lazer demetinin metal yüzeyine gelme açısına, polarizasyona ve odaklama şiddetine bağlıdır. Malzemelerde soğurma mekanizması, kullanılan lazerin dalga boyuna göre farklılaşmaktadır. CO<sub>2</sub> lazerinin soğurulması metalin elektriksel iletkenliği ile belirlenir. Metalin iletkenliği ise serbest iletim elektronunun yoğunluğuna bağlıdır. Serbest iletim elektronları CO<sub>2</sub> lazerinin düşük frekansından dolayı CO<sub>2</sub> lazerinin elektrik alanında salınım yaparlar. Elektronların bu hızlı hareketinden dolayı gelen lazer enerjisinin bir kısmı ikinci bir yayılma olarak geri yansır. Bu sebeple altın, gümüş, alüminyum ve bakır gibi yüksek iletkenliğe sahip metaller CO<sub>2</sub> lazer ışınının küçük bir kısmını soğururlar. Nd:YAG lazeri, dalga boyuna gelindiğinde, yüksek frekanstan dolayı elektron yansıtma mekanizması bu dalgaboyuna uygulanamaz [4]. Bu dalga boyunda soğurma işlemi, örgü atomları tarafından yapılır. Plastik gibi yalıtkanlarda, iyonlaşma için enerji gereksinimi fazla olduğundan önemsiz derecede soğurma, mükemmel derecede geçirgenlik gözlenir. Metallerde ise bu mekanizma iyi derecede soğurmaya neden olur. Metaller için soğurulma katsayısı 10<sup>5</sup> cm<sup>-1</sup> mertebelerindedir ve enerji yaklaşık 10<sup>-5</sup> cm kalınlıkta depo edilir.

#### 4.1.3.2. İletim

Elektromanyetik ışınım; elektron alan vektörü ve manyetik alan vektörü ile tasvir edilebilir. Işınım, elastik bağlı yüklü bir parçacık üzerinden geçtiğinde, parçacık elektrik alanın yarattığı güç ile harekete zorlanır. Işımanın frekansı, parçacığın doğal rezonans frekansına karşılık gelmediği durumlarda florasan veya soğurulma meydana gelmeyecek, ancak bir titreşim başlayacaktır. Güç, ışığın elektrik alanından kaynaklanmaktadır ve bir atomun çekirdeğini hareket ettiremeyecek kadar küçüktür. Fotonların, atomlar tarafından soğurulması olayına Ters Bremsstrahlung (ters frenleme ışınımı) etkisi denir. Foton soğuran atomlar titreşime başlayacak, ya tüm yönlerde ışınım yapacak ya da örgü fotonları tarafından sabit tutulacaktır. İkinci durum gerçekleştiği takdirde, moleküller arasındaki bağlar sebebiyle titreşim tüm yapıya normal yayılma koşullarına göre yayılacaktır. Yapı içindeki titreşim, ısı olarak ortaya çıkacaktır. Eğer yeterli enerji soğurulursa, titreşim çok şiddetli bir hal alacak ve moleküller arasındaki bağlar uzayacaktır. Bu durumda yapı daha önceki mekanik etkiyi gösteremeyecek ve madde eriyik halini alacaktır.

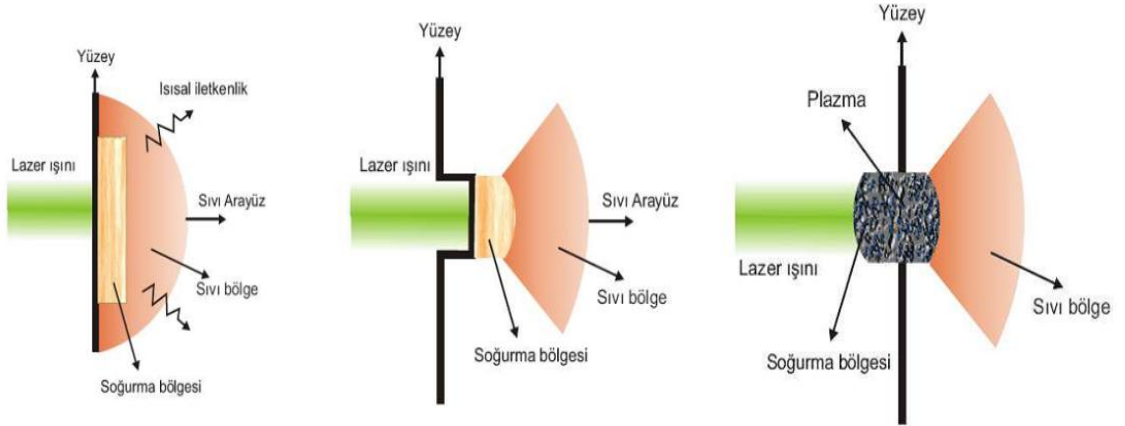
Etkin bir lazer kaynağı elde edebilmek için lazer atım süresi ile metalin ısıl zaman katsayısı yaklaşık olarak eşit olmalıdır. İnce metaller için (0.1- 0.2 mm), ısıl zaman sabiti, normal lazerlerin atım süresinden (ms) kısadır. Ancak Q- anahtarlama ile karakterize edilen lazerlerin atım süresinden çok uzundur. Bu nedenle etkin bir ergitme işlemi Q- anahtarlama lazerler ile

pratik olmamaktadır. Kalın (~1 mm), ısıl dağılımı düşük olan metaller için, makul bir atım süresinde ısının metal içine aktarılması sırasında ısıl zaman katsayısı çok büyük duruma gelir. Ancak yüksek ısıl iletkenliğe sahip metallerde, ısıl zaman katsayısı birkaç milisaniye mertebelerinde olabilir. Bu tür metallerde ısı, normal lazer atımları ile derinlemesine daha fazla ilerleyebilir.

Isıl dağılımın düşük olması, ısının derinlemesine iyi ilerlememesi anlamına gelir. Ama ısıl dağılımın yüksek değerleri, ısının yüzeyden hızlı bir şekilde yok olması gibi bazı problemleri ortaya çıkarır. Bu durum eritme miktarını azaltabilir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için, farklı metaller için farklı lazer parametreleri kullanmak gereklidir [4].

#### 4.1.3.3. Erime ve Buharlaşma

Yüzeyde depolanan lazer enerjisi, hedefe ısıl iletkenlik sayesinde nüfuz eder. Yüzey, erime sıcaklığına ulaştığında, metal içinde sıvı bir ara yüzey oluşur. Işıma devam ettiğinde malzeme buharlaşmaya ve bir delik oluşmaya başlar. Eğer ışımaya yeteri kadar güçlü olursa, buharlaşan metal içindeki soğurma ışık geçirmez bir plazmanın oluşmasını sağlar. Oluşan bu plazma, lazere doğru büyüyebilir ve gelen lazer ışınını soğurarak metal yüzeyine ulaşma oranını azaltır. Yüksek şiddetli bir lazer ışınının, metal yüzeye çarptığında gerçekleşen fiziksel süreç Şekil 4.14.'de gösterilmektedir [4].

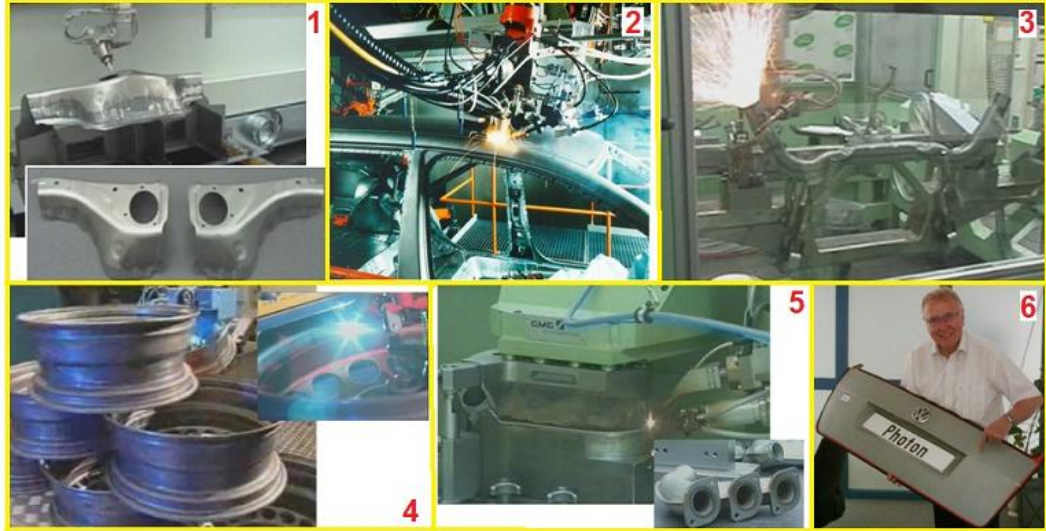


**Şekil 4.14.** Yüksek şiddetli lazer ışınının metal yüzeye çarptığında gerçekleşen fiziksel süreç

Yüksek güçlü bir lazerin soğurulmasından dolayı gerçekleşen ısınma etkisi çok hızlı gerçekleşebilir ve yüzey, hızlı bir şekilde erime sıcaklığına ulaşır. Maksimum erime derinliğine, yüzeyde buharlaşma oluşmadan erişebilmek istenen bir durumdur. Ancak bu durum, lazer parametreleri açısından sadece dar bir menzilde gerçekleşir. Eğer lazer ışıması çok fazla ise erimiş metal yeteri kadar derinliğe ulaşmadan, metal yüzeyi buharlaşmaya başlar. Bu da kaynak uygulamaları için maksimum ışımaya ulaşılmış olduğunu gösterir. Lazer- malzeme etkileşimi sırasında, malzeme yüzeylerinde erime sağlanırken, yüzeyde oluşabilecek buharlaşmayı önlemek; etkili erime ve kaynak işlemi gerçekleşmesini sağlar [4].

#### 4.1.4. Lazer Kaynağının Kullanım Alanları

Lazer kaynağı, uçak sanayinde, otomotiv sanayinde, savunma sanayinde, elektronik sanayinde, bakım- onarım sektöründe, petrol ve gaz sanayisinde, paketleme sektöründe, güç üretim sektöründe, işleme santrallerinde ve gemi inşasında sıkça kullanılmaktadır. Uçak sanayinde; uçak gövdesindeki parçaların kaynakla birleştirilmesinde, uçak motorundaki parçaların birleştirilmesinde, yanma odasındaki parçaların birleştirilmesinde, otomotiv sektöründeki preslenmiş gövde parçalarının birleştirilmesinde, yüksek mukavemetli çeliklerin birleştirilmesinde, katalitik dönüştürücülerin kaynaklanmasında, petrol ve gaz sanayinde ince cidarlı boruların kaynağında, gemi inşa sektöründeki alın ve köşe kaynak işlemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Şekil 4.15.'de otomotiv sektöründeki lazer kaynağının kullanımına ilişkin örnekler gösterilmektedir.



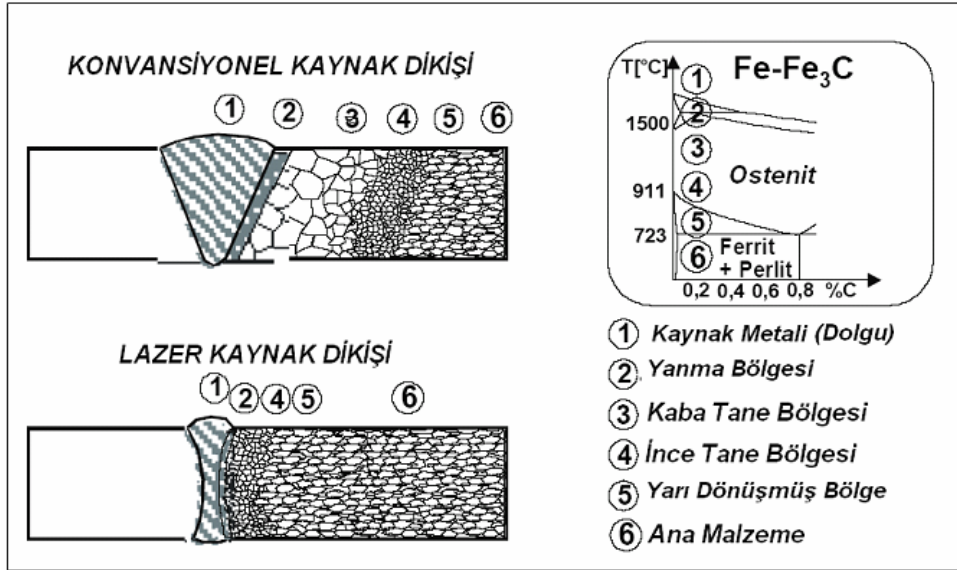
Şekil 4.15. Lazer kaynağının otomotiv sanayisinde kullanımı [79]

#### 4.1.5. Lazer Kaynağının Avantajları

- Hızlı kaynak yapabilme özelliği ve sonuç itibarıyla daha düşük ısı girdisi gerçekleşir.
- Kaynak bölgesinde yüksek nüfuziyet sağlanır.
- Kaynak esnasında çarpılmaların oluşmaz.
- Isı tesiri altındaki bölge çok dardır.
- Yüksek derinlik/ genişlik oranına sahiptir.
- Minimum kirlilik oluşturur.
- Mikroyapıların daha ince olması ve diğer yöntemlere göre aşınmaya daha dirençli olması
- Oda sıcaklığında kullanılabilir [75,80].

#### 4.1.6. Lazer Kaynağı ve Konvansiyonel Kaynak Yönteminde Isı Tesiri Altında Kalan Bölgelerdeki Mikoyapılar

Kullanılan malzemeye ve kaynak yöntemine bağlı olarak kaynak bölgesindeki malzeme, ısı çevrimleri nedeniyle meydana gelen içyapı değişimlerinden dolayı olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. Şekil 4.16.'da konvansiyonel bir kaynak yöntemi ve lazer kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynaklarda ısı tesiri altında kalan bölgeler karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.16.** Konvansiyonel kaynak yöntemi ve lazer kaynak yönteminin ısı tesiri altında kalan bölgeler açısından karşılaştırılması [61]

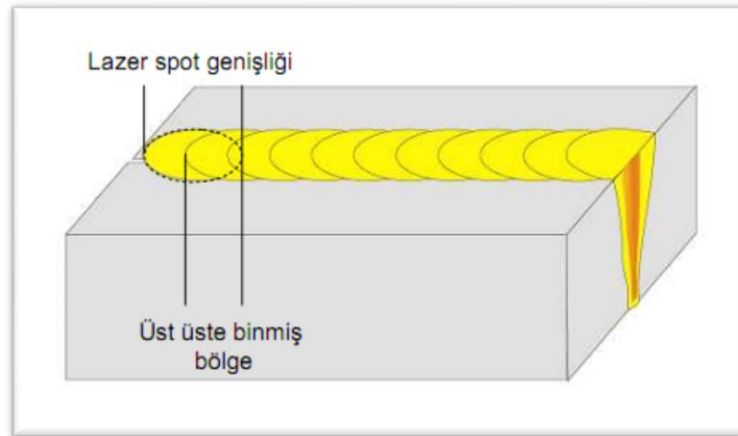
Şekilde görüldüğü üzere lazer kaynak yöntemiyle yapılmış olan birleştirmede, konvansiyonel kaynak yöntemine göre hem kaynak dikişi, hem de ITAB oldukça dar bir bölgede oluşmakta ve bunun sonucunda ana metalde ısı etkileri minimuma inmektedir.

Konvansiyonel kaynak yöntemiyle yapılan kaynak işleminde toplam altı bölge var iken, lazer kaynak yöntemiyle yapılan birleştirmede sadece beş bölge oluşur. Konvansiyonel kaynak yöntemiyle yapılan birleştirmede, ergime bölgesi (kaynak metal), kısmi ergime bölgesi, kaba tane bölgesi, ince tane bölgesi, yarı dönüştürmüş bölge ve ana malzeme olmak üzere altı bölge vardır. Lazer kaynak yöntemiyle yapılmış olan birleştirmede, kaba taneli bölgenin oluşmadığı görülmektedir. Bu yöntemde, hızlı soğumadan dolayı, konvansiyonel kaynak yönteminde oldukça geniş bir alanı kapsayan kaba taneli bölgesi oluşmaz. Bu da lazer kaynağında oldukça yüksek dayanım sağlamaktadır [61].

#### 4.1.7. Atımlı Nd:YAG Lazer Parametrelerinin Dikiş Kaynağına Etkisi

Endüstriyel lazer kaynak uygulamalarında kullanılan Nd:YAG lazerler, günümüzde 0.3- 3 kW ortalama güç çıkışı sağlayabilmektedirler. İleri uygulamalarda ise bu güç çıkışı 4 kW' a kadar artırılabilir [81]. Nd:YAG lazerler, sürekli çıkış modu, atımlı çıkış modu ve Q-anahtarlamalı mod olmak üzere üç farklı şekilde çıkış sağlar [82]. Atımlı Nd:YAG lazerleri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı yeni bir teknolojidir. Özellikle otomotiv, elektrik ve elektronik endüstrisinde çok ilgi gören bir birleştirme yöntemidir [81].

Atımlı lazerler ile dikiş kaynağı işlemi; periyodik bir şekilde tekrarlanan lazer atımlarının, malzeme yüzeylerinin kısmen üst üste getirildiği kaynak bölgesinde bir eriyik veya dikiş oluşturması ile gerçekleşir. Dikiş kaynağının oluşumu Şekil 4.17.'de gösterilmiştir [83].



Şekil 4.17. Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı

Dikiş kaynağının oluşumu ve kalitesi:

- Kullanılan atımlı lazerin atım enerjisi,
- Lazerin atım süresi,
- Lazerin atım şekli,
- Lazerin frekansı
- Lazerin odak genişliği,
- Lazerin kaynak hızı olmak üzere bir çok parametreye bağlıdır.

Bu parametrelere ek olarak Nd:YAG lazerleri kHz tekrarlama oranlarında da atım şeklini kontrol etme olanağı sağlar. Bu esneklik; ısı aktarımını daha önce hiç elde edilememiş doğrulukta kontrol etme imkanı vermektedir [71]. Bunlara ek olarak nüfuz etme derinliği, eriyik havuzu şekli ve boyutu, kaynamaya başlama süresi ve anahtar deliği kontrolü de kaynak kalitesinde önemli etkenlerdir. Kaliteli bir kaynak, bu parametrelerin doğru kombinasyonu sağlandığında mümkün olmaktadır. Atımlı lazer kaynak kalitesini etkileyen tüm parametreler Şekil 4.18.'de bir parametre diyagramı halinde görülmektedir [4, 83].



Şekil 4.18. Lazer kaynağı kalitesini etkileyen parametreler

Düşük gücüne rağmen, sürekli modda çalışan CO<sub>2</sub> lazerleri ile Nd:YAG lazerleri karşılaştırıldığında; atımlı moddaki Nd:YAG lazerleri, özellikle küçük endüstriyel ürünlerin kesme, delme, kaynak işlemlerinde tercih edilirler [81].

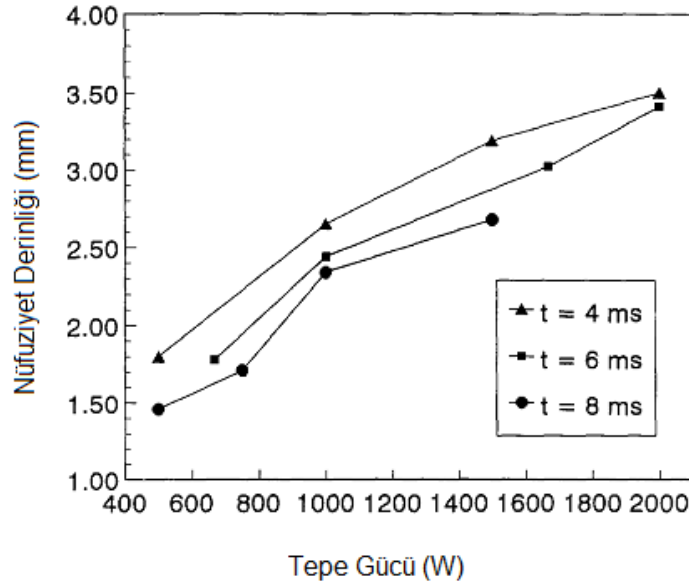
Dikiş kaynağına etki eden atımlı Nd:YAG lazer parametreleri:

- Kullanılan lazer atımının tepe gücü,
- Kullanılan lazer atımının süresi,
- Kullanılan lazer atımının frekansı,
- Kullanılan lazer atımının şekli,
- Kullanılan lazer atımının odak konumu,
- Koruyucu gazdır.

#### 4.1.7.1. Atımın Tepe Gücü

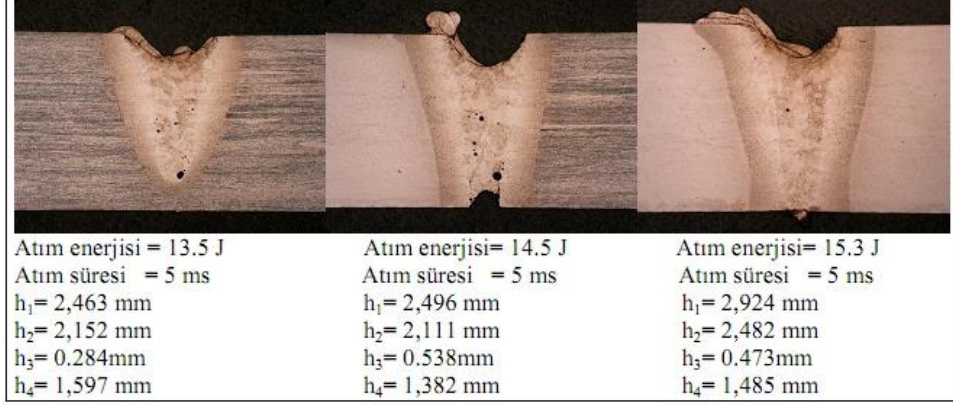
Atımlı bir lazerin tepe gücü; bir atımın enerjisinin, atım uzunluğuna oranı ile elde edilir. Çalışılacak materyal üzerinde yüksek güç yoğunluğu elde edebilmek, anahtar deliği kaynağına erişebilmek ve kaynak oluşumunu kontrol edebilmek için atımın tepe gücü önemli bir parametredir. Eğer kaynak havuzu çok büyük veya çok küçük olursa veya aşırı derecede buharlaşma meydana gelirse iyi sonuçlar elde edilemez [4].

Şekil 4.19.'daki grafikte Nd:YAG lazeri kullanılarak 2124 Alüminyum alaşımların kaynak işlemi sırasında tepe gücünün, kaynak derinliği üzerindeki etkisi gösterilmektedir [84]. Şekilde de görüldüğü üzere, atım süresi sabit tutulduğunda, atım enerjisi ve tepe gücü artarken, kaynak derinliği de artmıştır.

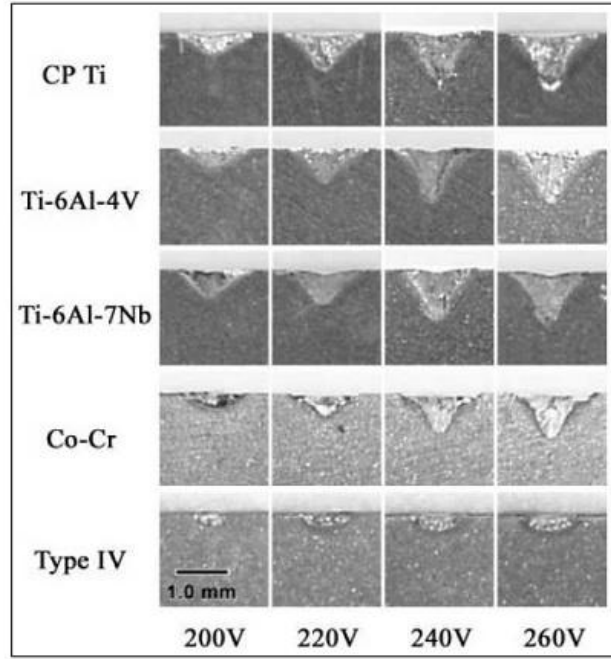


**Şekil 4.19.** Nd:YAG lazeri kullanılarak 2124 alüminyum alaşımlarının kaynağında tepe gücünün kaynak derinliğine etkisi [84]

Değişik alaşımlarla yapılan çalışmalarda da aynı etki görülmüştür. Farklı alaşımlar için tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de gösterilmiştir [4].



**Şekil 4.20.** Tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi [4]

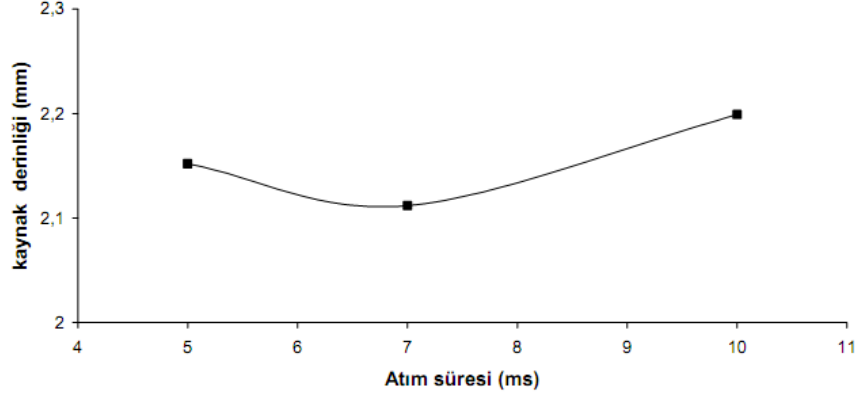


**Şekil 4.21.** Farklı alaşımların lazer kaynağında tepe gücünün kaynak derinliğine etkisi [85]

Kısa atım süreli bir lazer ile daha derin kaynak elde edilir. Ancak, gereğinden fazla şiddet ise çatlama ve gözenek gibi kaynak kusurlarının meydana gelmesine neden olur [84].

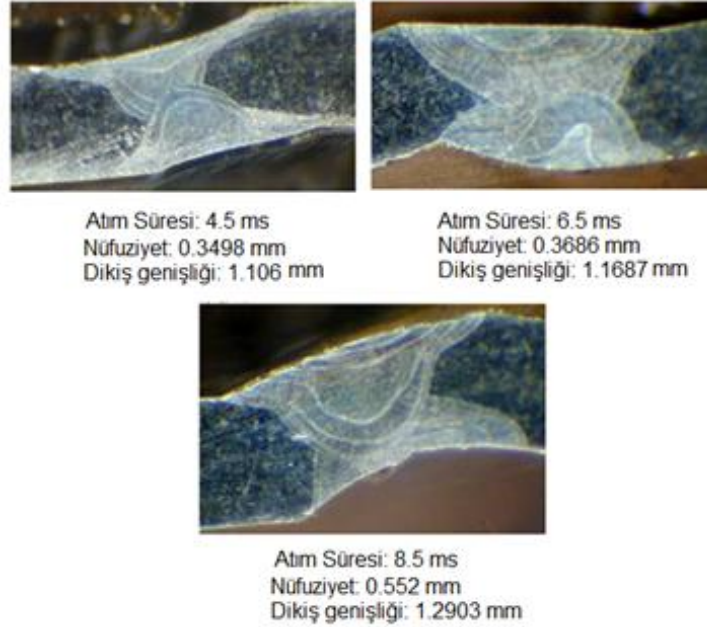
#### 4.1.7.2. Atım Süresi

Tepe gücü sabit tutularak atım süresi artırıldığında; atım başına düşen enerji miktarının arttığı belirlenmiştir. Bu durumda lazer demeti ile metal arasındaki etkileşim zamanı artar ve buna bağlı olarak daha geniş erime bölgesi meydana gelir [73]. 3 mm kalınlığındaki Ti6Al4V levhaların sabit 2.7 kW tepe gücünde atımlı Nd:YAG lazer ile kaynak işlemi sırasında, atım süresindeki artışın kaynak genişliğine etkisinin sonuçları Şekil 4.22.'de görülmektedir [4].



**Şekil 4.22.** Sabit tepe gücünde lazer atım süresinin kaynak derinliği üzerindeki etkisi [4]

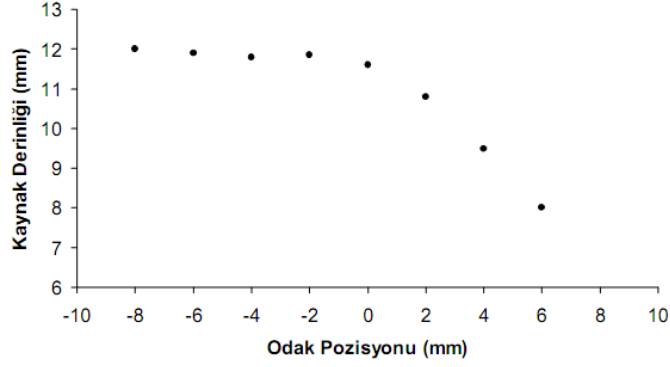
Şekil 4.23.'de 304 serisi östenitik paslanmaz çeliğin 4.5 ms, 6.5 ms ve 8.5 ms gibi farklı atım sürelerindeki nüfuziyet farklılıkları görülmektedir [61].



**Şekil 4.23.** Lazer kaynağında darbe süresindeki değişimin kaynak nüfuziyeti ve dikiş genişliğine etkisi [61]

#### 4.1.7.3. Atımın Odak Konumu

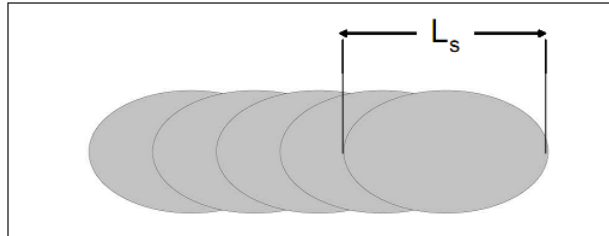
Atımın odak noktasının konumu, kaynak işlemi ve kalitesi için önemli bir parametredir. Lazer demeti tam olarak parçanın yüzeyine veya parçanın yüzeyinin altına odaklanabilir. Lazer demeti, parça yüzeyinin üzerinde bir noktaya odaklandıktan sonra, açılmaya başlayan demet malzeme yüzeyine düştüğünde, enerjinin büyük kısmı yansılardan dolayı kaybolmakta ve yeteri kadar kaynak derinliği sağlanamamaktadır. Odak düzlemi, malzemenin yüzeyinde (0) ve yüzeyin altında oluşturulduğunda, kaynak derinliğinde bir artış gözlemlenmektedir. İyi derecede kaynak boyutu ve kalitesi elde edebilmek için lazer odağının malzeme yüzeyinden, malzemenin kalınlığının 1/3'ü kadar mesafe altına odaklanması gerekir [86]. Şekil 4.24.'de atımlı Nd:YAG lazeri kullanarak (40 Hz frekans, 4.5 kW ortalama güç ve 0.4 m/dk kaynak hızı ile) 14 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik malzemelerin kaynak işlemi sırasında odak konumunun kaynak derinliğine etkisi görülmektedir [87].



Şekil 4.24. Odak konumunun lazer kaynağındaki etkisi [87]

#### 4.1.7.4. Atım Frekansı ve Hız

Atımlı lazerler ile kaynak işlemi; kısmen üst üste binen periyodik spotlar ile gerçekleşir [87]. Bu spotların üst üste binme oranının, kaynak kalitesi üzerindeki etkisi çok fazladır.

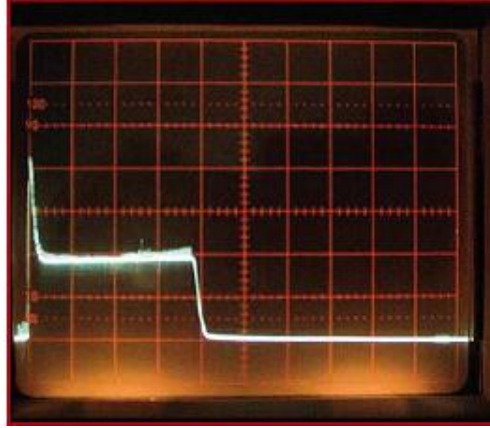


Şekil 4.25. Atımlı lazer ile kaynak işlemi sırasında üst üste binen periyodik spotlar [4]

Magnezyum ile ilgili yapılan bir çalışmada, en iyi çekme dayanımının, üst üste gelme oranının %75 olduğu durumda sağlandığı gözlenmiştir [88]. Lazer atım süresinin sabit tutulduğu bir kaynak işleminde, üst üste binme oranının istenilen değerde tutulabilmesi için kaynak hızı ile frekans birbirlerine bağımlı hale getirilir. Kaynak işleminin, yüksek hızlarda gerçekleşmesi isteniyorsa, buna bağlı olarak frekans da aynı oranda yüksek olmalıdır. Bu nedenle lazer frekansı ile kaynak hızı arasında hassas bir denge vardır [4].

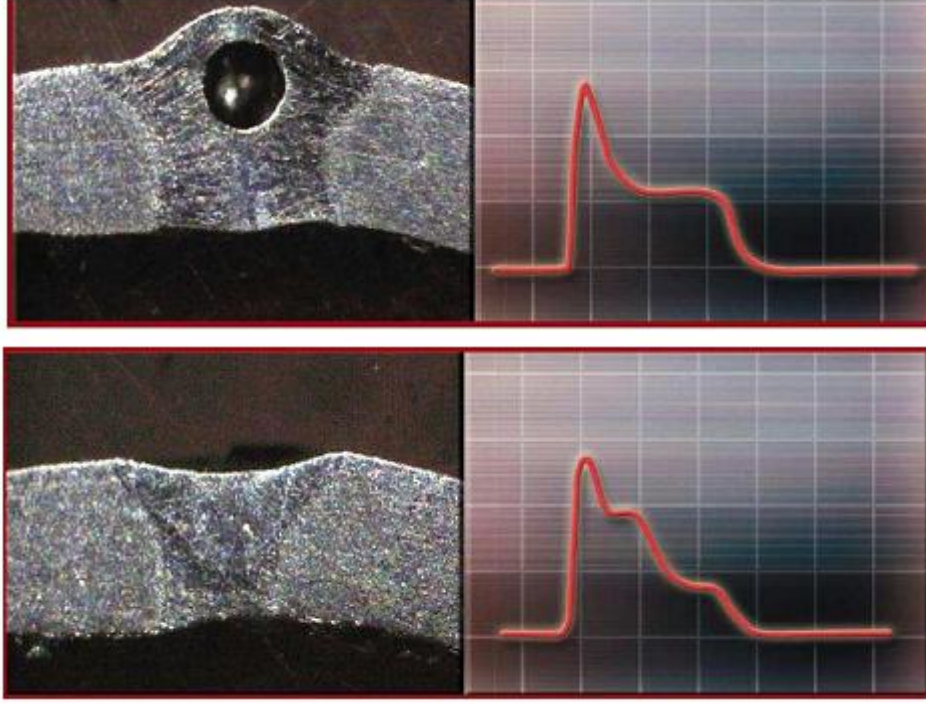
#### 4.1.7.5. Atım Şekli

Atımlı Nd:YAG lazerler, yüksek tepe gücüne sahip olduklarından dolayı, bakır, alüminyum alaşımları gibi yüksek yansıtıcılığa ve ısıl iletkenliğe sahip metallerin kaynağında iyi sonuçlar vermektedir. Ancak yüksek karbon içeren; çelik, döküm alaşımlar ve alüminyum alaşımlarının büyük kısmında standart atım şekli ile kaynak yapılması durumunda çatlamlar, gözenekler ve diğer kaynak hataları meydana gelebilir. Oluşabilecek bu hataları ortadan kaldırmak için atım şekillendirilmesi tekniği kullanılmaktadır. Atım şekillendirme işlemi sayesinde, lazer atımının enerji dağılımını zamana bağlı olarak kontrol etmek mümkün olur. Şekil 4.26.'da GSI Lumonics firmasının ürettiği atımlı Nd:YAG lazerlerin atım şekli görülmektedir [89].



**Şekil 4.26.** GSI Lumonics firmasının ürettiği atımlı Nd:YAG lazerlerin atım şekli [89]

Lazer atım şeklinin değiştirilmesi, ana atıma ek olarak değişik enerji ve sürelerde atımlar eklemek ile gerçekleştirilir [89]. Bu sayede, malzemenin daha yavaş soğuması, yüzey yansıtıcılık etkilerinin giderilmesi veya yüzeyinin temizlenmesi sağlanabilir. Yüksek karbon içeren çelik, gevrek alaşımlarda yapılan kaynak işlemlerinde veya erime noktaları farklı iki metalin kaynatılması işleminde, soğutucu atım şeklinin, çatlamları ve gözenekleri ortadan kaldırdığı gözlenmiştir [89]. Soğutucu atım şekli kullanılarak yapılmış örnek bir çalışma Şekil 4.27.'de görülmektedir.



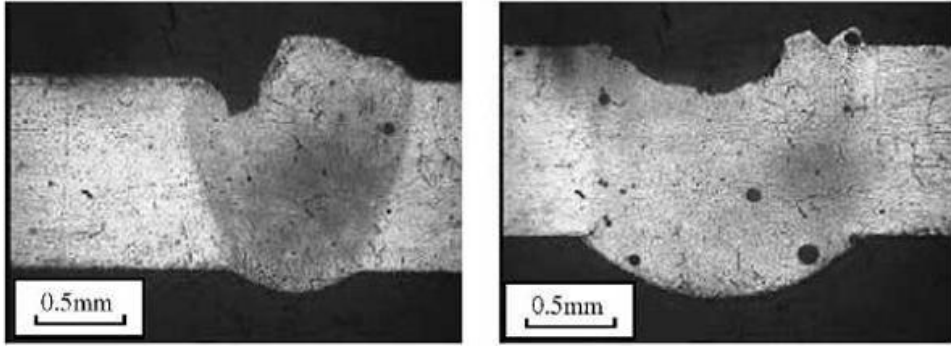
**Şekil 4.27.** Soğutucu atım şekli kullanılarak yapılmış örnek bir çalışma [89]

#### 4.1.7.6. Koruyucu Gaz

Bütün kaynak işlemlerinde en önemli parametrelerden biri koruyucu gazın özellikleridir. Örneğin; ark kaynağında gaz özellikleri ve gaz karışımı kompozisyonu kaynak edilecek malzemeye bağlı olarak değişir. Koruyucu gazın seçiminde gazlar ve ergimiş metal arasındaki kimyasal ve metalürjik etkileşimler dikkate alınmalıdır. Ark kaynağında arkın korunmasında koruyucu gazın yoğunluğunun önemli bir etkisi varken, lazer kaynağında ise koruyucu gaz plazma oluşumunu minimuma indirerek istenilen kaynak nüfuziyetini elde edebilmek açısından önemli bir role sahiptir. Bu gazın ilk rolü kaynak bölgesinde oksidasyonu önlemektir. İkinci ve kritik fonksiyonu da, kaynak bölgesi üzerindeki buhar ve kaynak bölgesi içinde yaratılabilecek plazma oluşumunu bastırmak ve plazma oluşumunu durdurmaktır. En son rolü ise, lazer ışınının kaynak bölgesine minimum kesilme ile ulaşmasını temin etmektir. Böylece kaynak kalitesi iyileştirilir. Koaksiyel ve taraflı gaz akış nozullarıyla gazı kaynak bölgesine yönlendirmenin her ikisi de kullanılan alışlagelmiş yöntemlerdir. Genellikle koruyucu gaz olarak Helyum ve Argon kullanılmaktadır, yüksek iyonizasyon enerjisinden dolayı Helyum gazı tercih edilir. Azot da Helyum ile yer değiştirebilecek ve genellikle kullanılan bir gazdır, aynı özelliklerin birçoğuna sahiptir fakat daha ucuzdur.

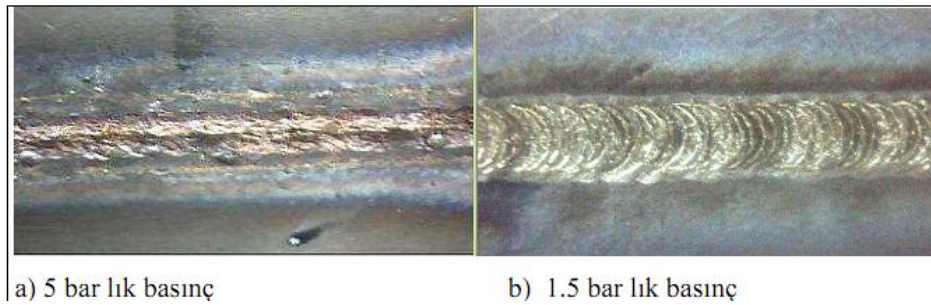
Alüminyum ve titanyum gibi hızlı oksitlenebilen malzemelerin kaynağı yapıldığı zaman kaynağın kökünün havadan çok etkilenen arka tarafından korunması gereklidir. Argon ve  $N_2$  gazları bu uygulamada sık sık kullanıldığı halde, He gazı tercih edilir çünkü havadan hafif olduğu için kaynağın altından iş parçasının yüzeyine doğru yükselir.

Koruyucu gazlar ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda istenilen amaçlara ulaşmak için, numune yüzeylerinde gaz akışı tarafından yaratılan basınç kaydedilerek çalışma parametreleri üzerindeki etkisi analiz edilmektedir. Bu sebepten araştırmalarda genellikle malzemeyi oksidasyondan korumayı garanti edecek, plazma oluşumunu bastırarak maksimum kaynak nüfuziyeti gerçekleştirecek minimum gaz akış hızlarının belirlenmesi gerekir [61]. Eğer gaz akışı yavaş ise erimiş metali oksitlenmeden korumada yetersiz kalır, gaz akış hızı yüksek olursa kaynak geometrisi bozulur veya kusurlar ortaya çıkar. Bunun yanı sıra koruyucu gazın akış yönü iyi ayarlanmazsa Şekil 4.28.'de görüldüğü gibi kaynağın üst kısmında bozulmalar meydana gelebilir [90].



**Şekil 4.28.** Lazerle kaynak sırasında kullanılan koruyucu gazın akış yönünden kaynaklanan kusurlar [90]

Şekil 4.29.'da Ti6Al4V titanyum alaşımının Helyum koruyucu atmosferi altında farklı basınçlar ile Nd:YAG lazeri ile kaynak edilmesinin kaynak dikişine etkileri gösterilmiştir [4].



**Şekil 4.29.** Ti6Al4V alaşımının farklı koruyucu gaz basınçlarının kaynak dikişine etkileri [4]

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada; düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti, yüksek korozyon direnci özelliklerini bir arada bulundurmasından dolayı, kimya endüstrisi, petrol endüstrisi, otomotiv endüstrisi, uzay ve havacılık endüstrisi ile tıpta implant malzemeleri yapımında kullanılmakta olan ticari saflıktaki titanyuma (Grade 2) uygulanabilecek TIG kaynağı ve lazer kaynağı yöntemlerinin, malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

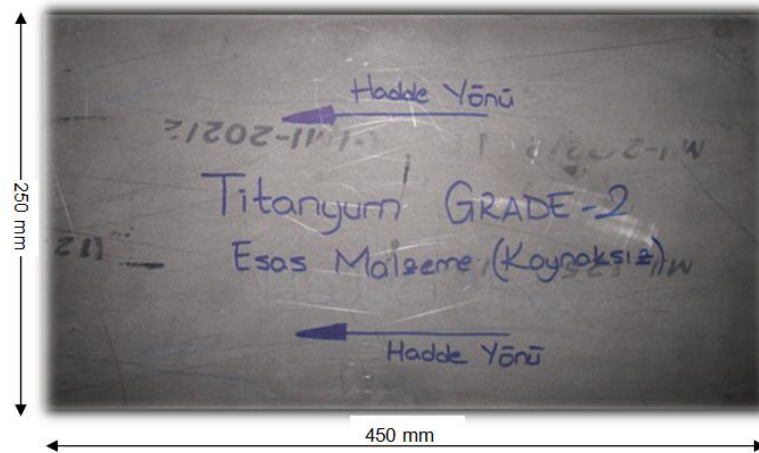
### 5.1. Malzeme

Çalışmada kullanılacak olan ticari saflıktaki titanyum (Grade 2) levha; 1000x 450x 2.5 mm boyutlarında olmak üzere Kocaeli Timet Titanyum Medikal ve Madencilik A.Ş.'den temin edilmiştir. Malzemeye ait kimyasal bileşim Tablo 5.1.'de verilmiştir [91].

**Tablo 5.1.** Titanyum Grade-2 kimyasal özellikler [91]

Element Adı		Fe	C	N	O	H	Al	V	Ti
Element Yüzdesi	Bulunması Gereken	Max. 0.3	Max. 0.08	Max. 0.03	Max. 0.25	Max. 0.015	-	-	Kalan
	Bulunan	0.15	0.02	0.02	0.13	0.002	-	-	Kalan

Temin edilmiş olan levha, Şekil 5.1.'de görüldüğü üzere tel erozyon tezgahı ile bir adet 250x 450x 2.5 mm boyutlarında, altı adet ise 125x 450x 2.5 mm boyutlarında kesilmiştir. 250x 450x 2,5 mm boyutlarındaki levha, çalışmalarımızda referans alacağımız esas malzemeyi temsil eder. 125x 450x 2.5 mm boyutlarındaki levhaların ise her iki adedi birbiriyle kaynaklanmak suretiyle birleştirilmiştir.



**Şekil 5.1.** Grade 2 titanyum levha

## 5.2. TIG Kaynağı Uygulaması

Ticari saflıktaki titanyum levhalar, 250x 450x 2,5 mm boyutlarından, 125x 450x 2,5 mm boyutlarındaki kaynak çiftleri oluşturacak şekilde, tel erozyon tezgâhında hassas bir şekilde kesilmiş olduğundan dolayı, levhaların alın kısımlarından talaş kaldırarak düzeltilmesine gerek kalmamıştır. TIG kaynağı işlemi öncesinde, ticari saflıktaki titanyumun yüzeyindeki  $TiO_2$  tabakası solvent ile temizlenmiş ve alın altına pozisyona getirilmiştir.

TIG kaynağı için AWS A5.16-70'de belirtildiği üzere ilave kaynak teli Timet Titanyum A.Ş.' den temin edilmiş olup, kaynak işlemleri Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş.' de yapılmıştır. ERTi-2 ilave kaynak teline ait kimyasal özellikler Tablo 5.2.'de gösterilmiştir [92].

**Tablo 5.2.** ERTi-2 kimyasal bileşim [92]

Element	Fe	C	N	H	O	Ti
Element Yüzdesi	0.09	0.01	0.01	0.006	0.09	Kalan

Ticari saflıktaki titanyumun TIG kaynağında kullanılan parametreler Tablo 5.3.'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.3.** TIG kaynağında kullanılan parametreler

Kullanılan Kaynak Makinesi	Oerlikon CITIG 1700
Kutiplama Biçimi	DC(+)
Gerilim	220 V
Akım	80 A
İlave Tel	ERTi-2

TIG kaynağı uygulama durumu, Şekil 5.2' de gösterilmektedir.



**Şekil 5.2.** TIG kaynağı uygulaması

TIG kaynağı işlemi gerçekleştirilmiş olan numuneye ait kaynak dikişi Şekil 5.3.'de gösterilmektedir.



**Şekil 5.3.** TIG kaynağı uygulanmış titanyuma ait kaynak dikişi

### 5.3. Atımlı Nd:YAG Lazer Kaynağı Uygulaması

Atımlı Nd:YAG Lazer Kaynağı uygulaması Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde, GSI Lumonics şirketi tarafından üretilen, atımlı JK760TR Nd:YAG lazeri ile yapılmıştır. Bu tip lazerler, tüm metaller için; kesme, delme ve kaynak işlemlerini yapabilecek kapasitededir. Yüksek frekanslarda dahi atım şeklinde değişiklik yapma olanağı vererek zamana bağlı ısı aktarımını kontrol edebilen Nd:YAG lazerinin özellikleri Tablo 5.4.'de görülmektedir [4].

**Tablo 5.4.** Atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri [4]

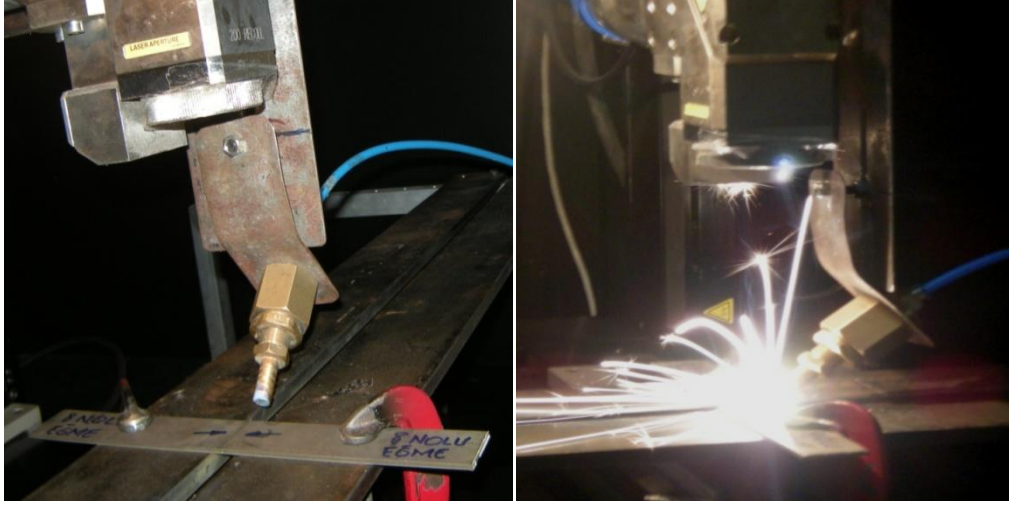
Maksimum Ortalama Güç	600 W
Maksimum Tepe Gücü	10 kW
Atım Uzunluğu Değişim Aralığı	0.3ms – 50 ms
Frekans Değişim Aralığı	5 Hz- 500 Hz
Demet Kalitesi	28 mm.mrad
Dalgaboyu	1064 nm

Kaynak işlemlerine başlanmadan önce, işlemlerde kolaylık sağlanması açısından, kaynak edilecek levhalar, TS 5789 da belirtilen boyutlarda çekme ve eğme numuneleri kesilmiştir. Kesilen numuneler Şekil 5.4.'de görüldüğü üzere alın altına pozisyona getirilmiştir. Kaynak edilecek numunelerden bir tanesi üzerinde kaynak parametreleri denenmiş olup, optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Atımlı Nd:YAG lazeri ile kaynak işlemi uygulamasında kullanılan parametreler Tablo 5.5.'de gösterilmiştir.

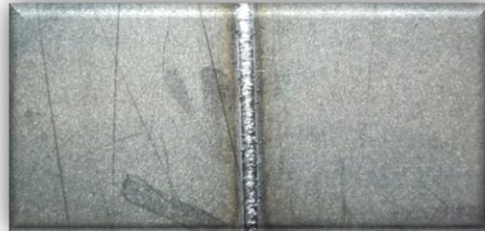
**Tablo 5.5.** Lazer kaynağında kullanılan parametreler

Pulse Süresi	5 ms
Tekrarlama Oranı	30 Hz
Atım Enerjisi	9 Joule
Tepe Gücü	1.8 kW
Ortalama Güç	270 W
Odak Pozisyonu	Malzeme yüzeyinden 1 mm içerde
Hız	4 mm/sn
Koruyucu Gaz	Argon

Atımlı Nd:YAG lazeri ile titanyumun lazer kaynağı uygulamasına örnek Şekil 5.4.'de gösterilmektedir.

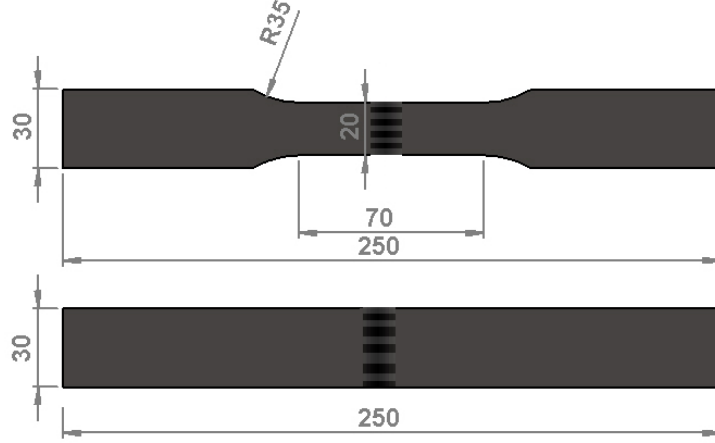
**Şekil 5.4.** Lazer kaynağı uygulaması

Şekil 5.5.' de lazer kaynağı ile birleştirilmiş ticari saflıktaki titanyum numunenin kaynak dikişi gösterilmektedir.

**Şekil 5.5.** Lazer kaynağı ile birleştirilmiş titanyuma ait kaynak dikişi

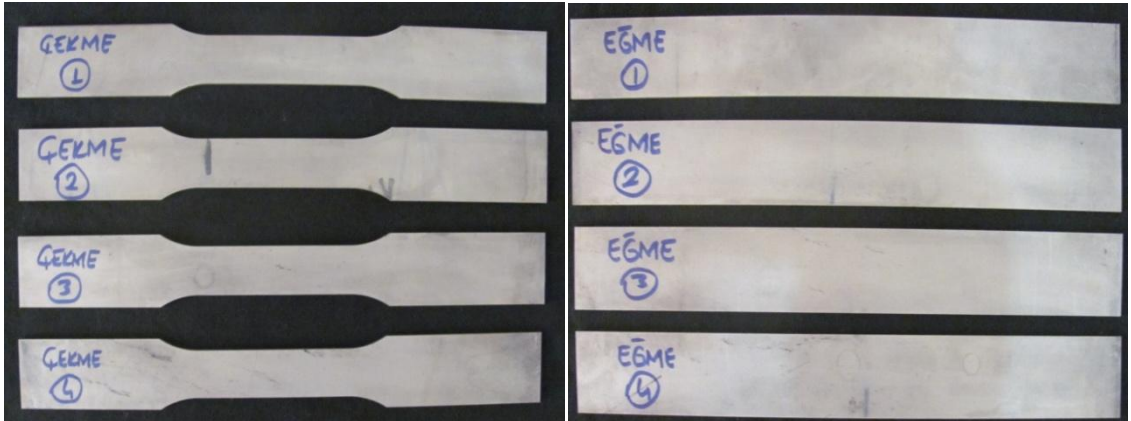
#### 5.4. Deney Numunelerinin Hazırlanışı

TIG Kaynağı ve Atımlı Nd:YAG Lazer Kaynağı ile birleştirilmiş levhalardan TS 5789 Türk Standartları doğrultusunda çekme ve eğme numuneleri elde edilmiştir. Kaynaklı levhalardan, deney numuneleri; tel erozyon tezgahı ile hassas bir şekilde kesilerek elde edilmiştir. Şekil 5.6.'da Çekme ve eğme numuneleri ölçüleri ile birlikte gösterilmiştir [93].

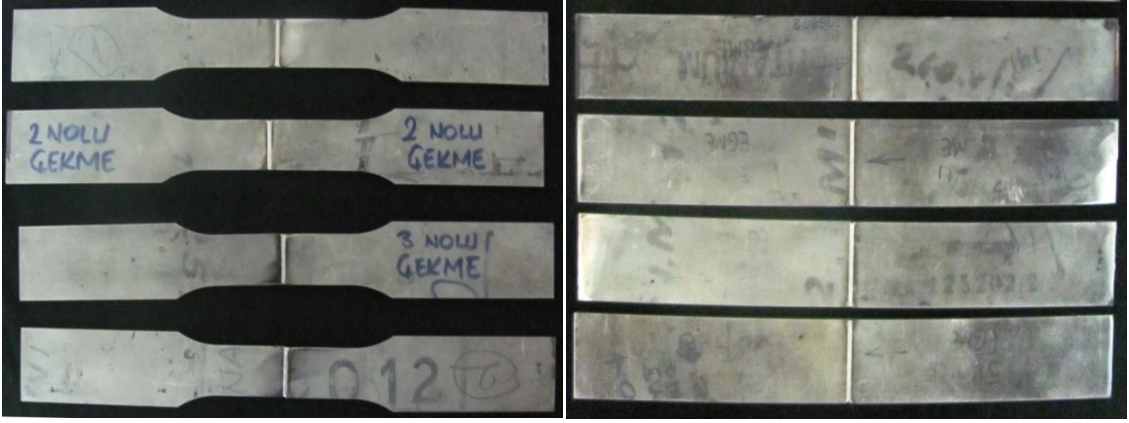


Şekil 5.6. TS 5789'a göre çekme ve eğme numuneleri

Standartlar doğrultusunda elde edilen çekme ve eğme numuneleri Şekil 5.7.- 5.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Esas malzemeye ait çekme ve eğme numuneleri



**Şekil 5.8.** Lazer kaynaklı malzemeye ait çekme ve eğme numuneleri



**Şekil 5.9.** TIG kaynaklı malzemeye ait çekme ve eğme numuneleri

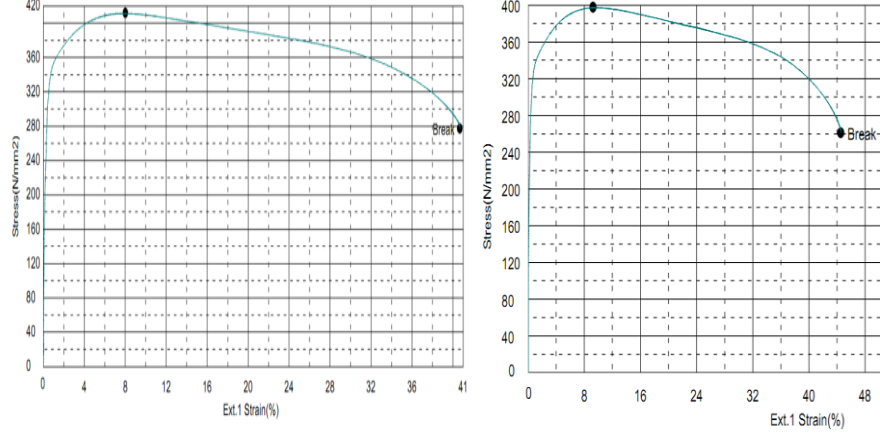
### 5.5. Çekme Deneyi

Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında esas dizayn bilgilerini saptamak ve malzemelerin özelliklere göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile geniş çapta kullanılır. Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparılıncaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan bir çekme kuvveti uygulandığında, aynı esnada da numunenin uzaması kaydedilir.

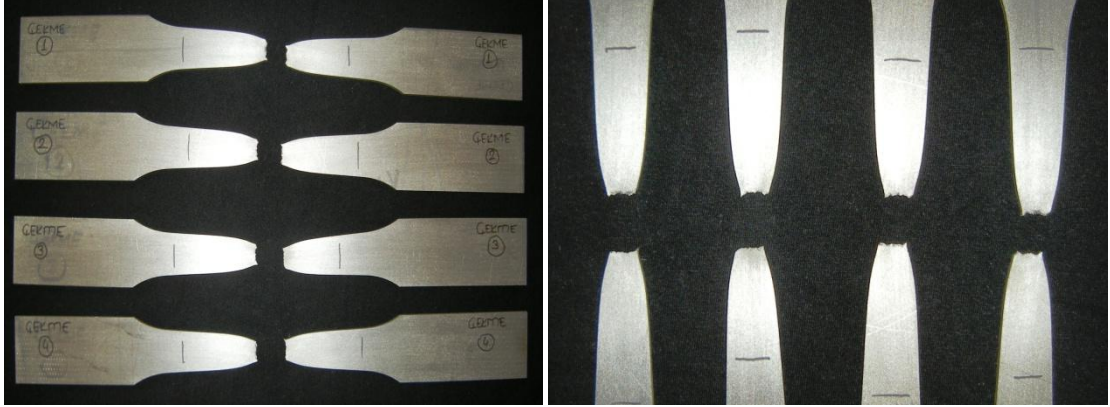
Çekme deneyleri; Shimadzu AG- IS (100 kN) marka çekme deney cihazı ve ekstansiyometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler; oda sıcaklığında ve 1mm/ dk çekme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her çekme testi numune tipine göre en az 4 kere tekrarlanmış olup, ortalama değer çekme dayanımı olarak alınmıştır.

### 5.5.1. Esas Malzemeye Ait Çekme Deneyi Sonuçları

Esas malzemeden elde edilen numunelere uygulanan çekme deneyleri sonucunda, elde edilen veriler Şekil 5.10. , Şekil 5.11. ve Tablo 5.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Esas malzemeye ait numunelerin gerilme-yüzde uzama grafikleri



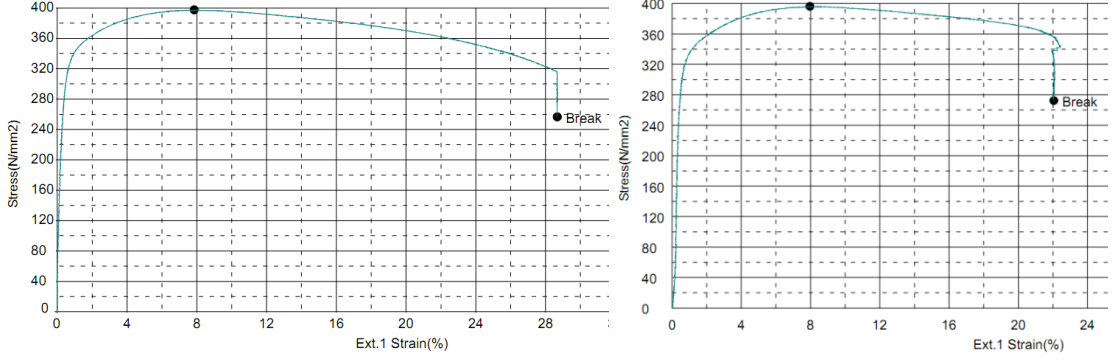
Şekil 5.11. Esas malzemeye ait numunelerin çekme deneyi sonu durumları

Tablo 5.6. Esas malzemeye ait çekme deneyi sonuçları

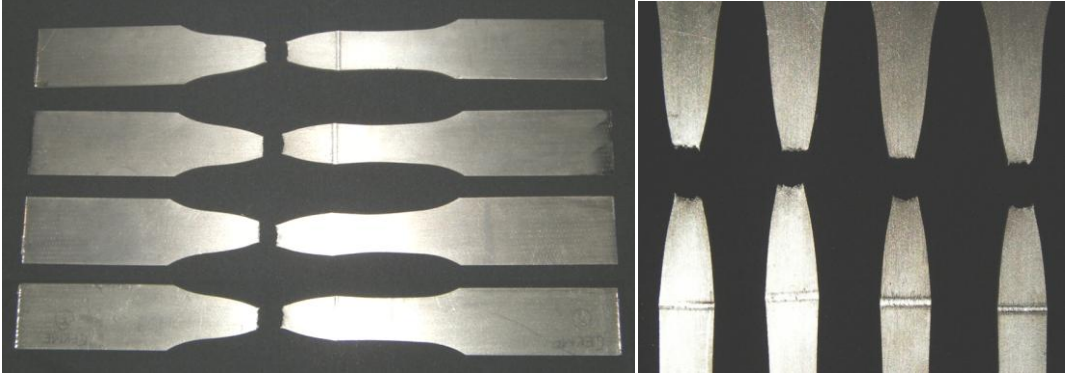
Numune No	Çekme Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
1	411.9	277.3
2	403.7	267.4
3	415.4	252.3
4	397.8	261.3
	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
	407.3	264.6

### 5.5.2. Lazer Kaynaklı Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçları

Lazer kaynaklı numunelere uygulanan çekme deneyleri sonucunda elde edilen veriler, Şekil 5.12., Şekil 5.13. ve Tablo 5.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Lazer kaynaklı numunelere ait gerilme-yüzde uzama grafikleri



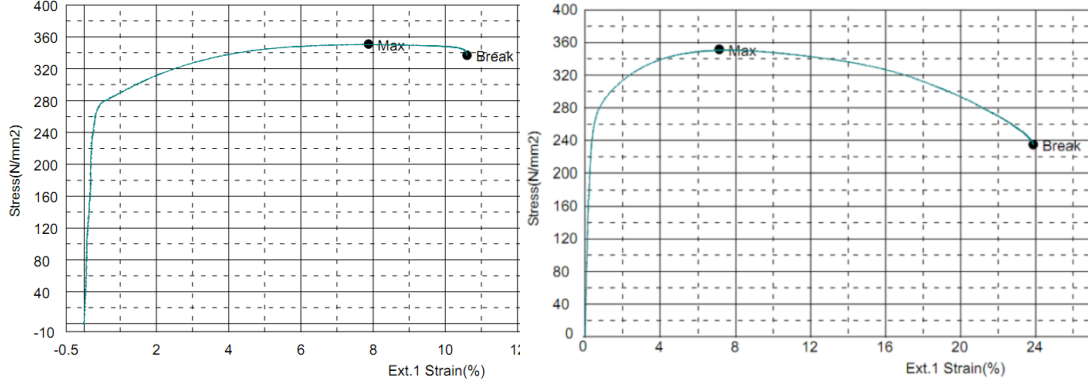
Şekil 5.13. Lazer kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonundaki durumları

Tablo 5.7. Lazer kaynaklı numunelere ait çekme deneyi sonuçları

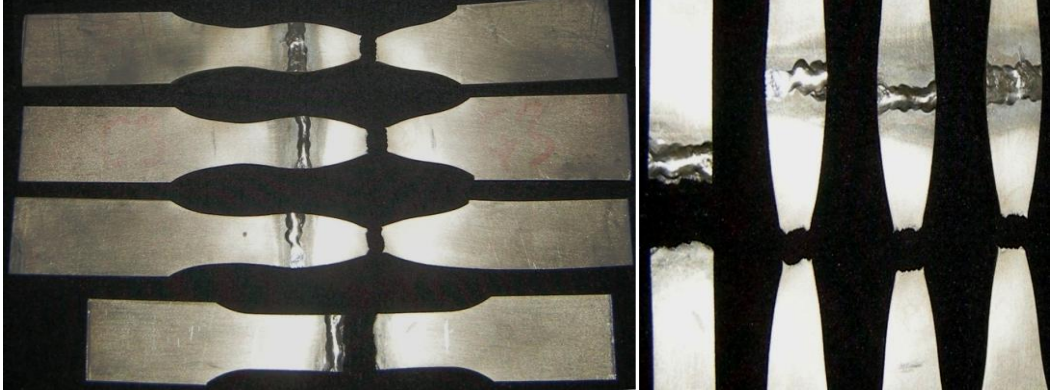
Numune No	Çekme Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
1	378.7	217.9
2	396.1	272.4
3	376.3	242.2
4	397.7	256.6
	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
	387.2	247.3

### 5.5.3. TIG Kaynaklı Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçları

TIG kaynaklı numunelere uygulanan çekme deneyleri sonucunda elde edilen veriler; Şekil 5.14., Şekil 5.15. ve Tablo 5.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.14. TIG kaynaklı numunelere ait gerilme-yüzde uzama grafikleri

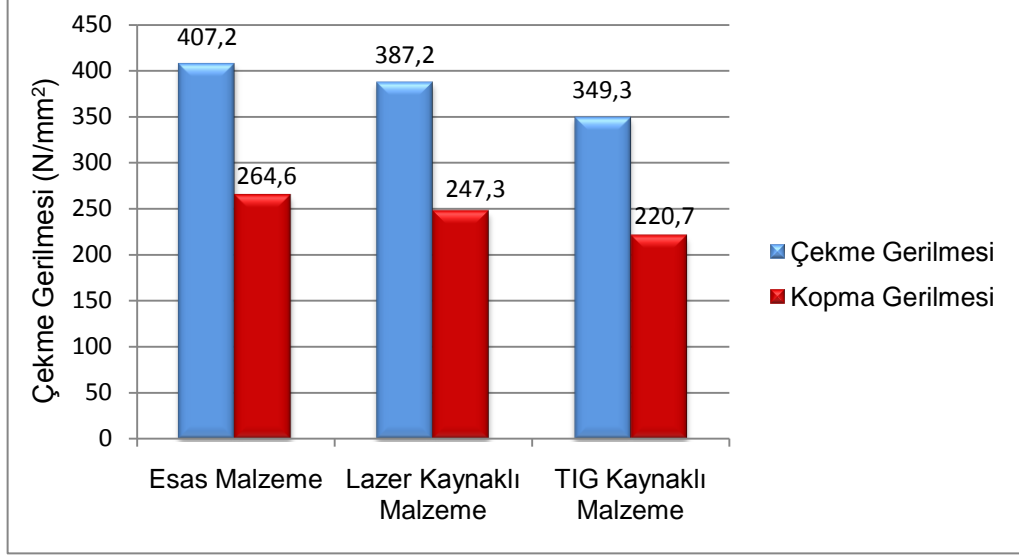


Şekil 5.15. TIG kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonundaki durumları

Tablo 5.8. TIG kaynaklı numunelere ait çekme deneyi sonuçları

Numune No	Çekme Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
1	360.4	239.4
2	333.8	171.9
3	351.8	234.8
4	351.1	236.8
	Ortalama Çekme Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )	Ortalama Kopma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
	349.3	220.7

Esas malzemeye, Lazer kaynaklı malzemeye ve TIG kaynaklı malzemeye ait numunelerin çekme deneylerinden elde edilen ortalama çekme ve ortalama kopma gerilmelerini içeren karşılaştırma Şekil 5.16.'da gösterilmektedir.



**Şekil 5.16.** Çekme deneyi sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği

Kaynak verimi; kaynaklı numunenin maksimum çekme mukavemetinin, esas malzemenin maksimum çekme mukavemetine oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\text{Kaynak Verimi} = \frac{\text{Kaynaklı Malzemenin Maksimum Çekme Mukavemeti}}{\text{Esas Malzemenin Maksimum Çekme Mukavemeti}} \times 100$$

Buna göre TIG kaynaklı ve lazer kaynaklı numunelerin kaynak verimleri Tablo 5.9.'da verilmiştir.

**Tablo 5.9.** TIG kaynaklı ve lazer kaynaklı numunelerin kaynak verimleri

Numune Adı	Kaynak Verimi
Lazer Kaynaklı	%95.1
TIG Kaynaklı	%85.7

## 5.6. Üç Nokta Eğme Deneyi

Numunelere kaynaklı birleştirme işlemi uygulandıktan sonra oluşan yapı değişikliklerinden dolayı eğilme dayanımı değerlerini ve bu deney sonucunda kaynaklı birleştirme bölgelerindeki mekanik değişimleri saptamak amacıyla üç nokta eğme deneyi yapılmıştır.

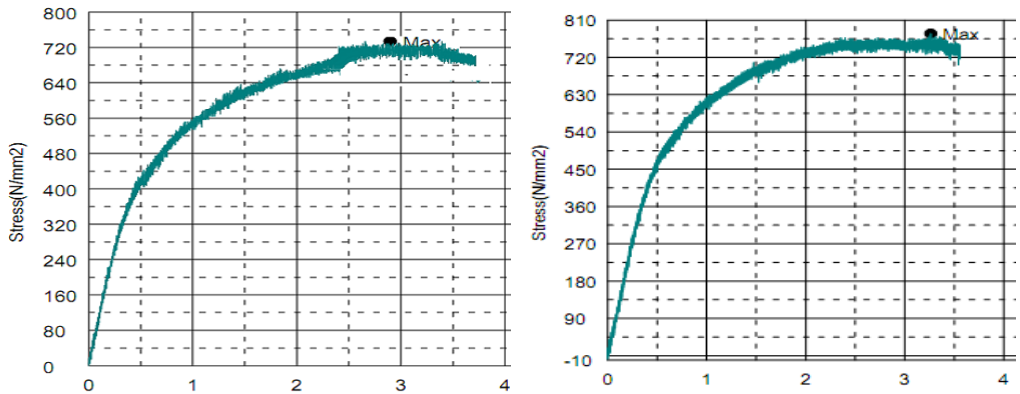


Şekil 5.17. Üç nokta eğme deneyi aşamasına ait görüntüler

Numuneler TS 5789'da belirtilen boyutlarda kesildikten sonra Şekil 5.17.'de gösterildiği üzere üç nokta eğme deneyleri uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin eğme deneyleri, Shimadzu AG- IS 100 kN cihazında, destekler arası açıklık TS EN ISO 5173'e göre (L) =100 mm ve makine basma hızı 1mm/dakika ile yapılmıştır [94].

### 5.6.1. Esas Malzemeye Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Esas malzemeye ait numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucundaki gerilme-yüzde uzama grafikleri Şekil 5.18.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.18. Esas malzemelerin eğme deneyleri sonucunda gerilme-yüzde uzama grafikleri

Esas malzemeye ait numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen eğilme mukavemeti değerleri Tablo 5.10.'da gösterilmektedir.

**Tablo 5.10.** Esas malzemeye ait eğilme mukavemeti değerleri

Numune No	Eğilme Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
1	745
2	777
3	756
Ortalama	759

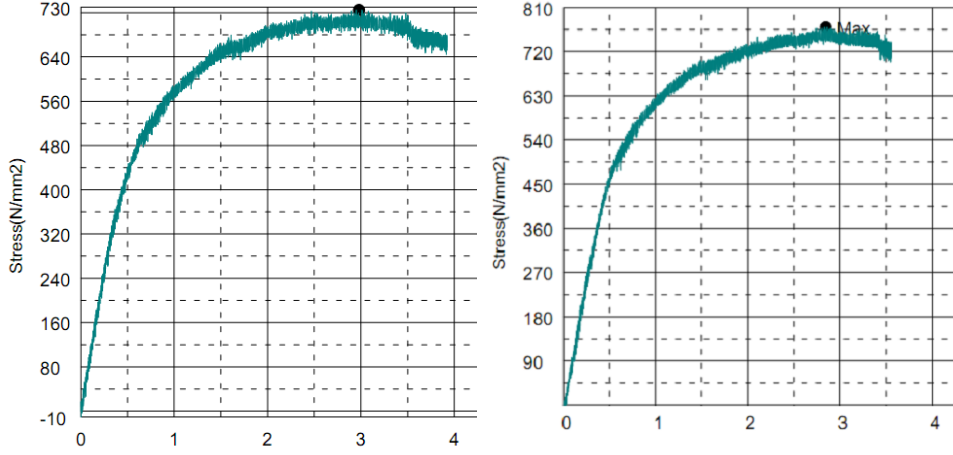
Esas malzemeye ait numunelerin eğme deneyi sonucundaki durumları Şekil 5.19.'da gösterilmektedir.



**Şekil 5.19.** Esas malzemeye ait numunelerin eğme deneyleri sonundaki durumları

### 5.6.2. Lazer Kaynaklı Malzemeye Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Lazer kaynaklı malzemeye ait numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucundaki gerilme-yüzde uzama grafikleri Şekil 5.20.'de gösterilmektedir.



**Şekil 5.20.** Lazer kaynaklı numunelerin eğme deneylerinde elde edilen gerilme-yüzde uzama grafikleri

Lazer kaynaklı malzemeye ait numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen eğilme mukavemeti değerleri Tablo 5.11.'de gösterilmektedir.

**Tablo 5.11.** Lazer kaynaklı numunelere ait eğilme mukavemeti değerleri

Numune No	Eğilme Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
1	747
2	770
3	725
Ortalama	747

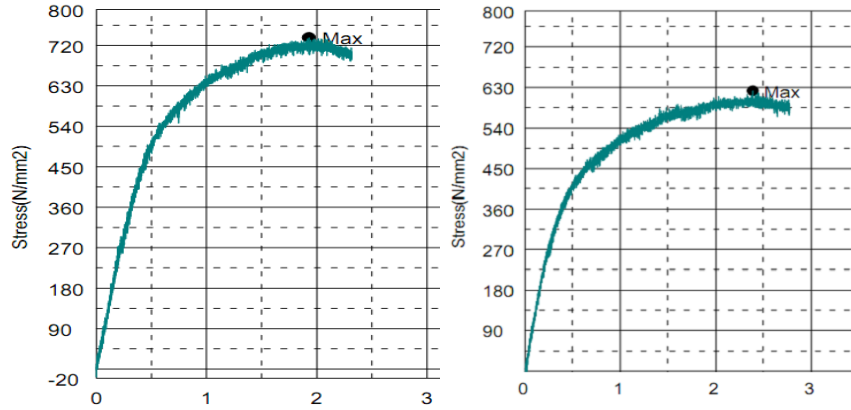
Lazer kaynaklı malzemeye ait numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucundaki görüntüleri Şekil 5.21.'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.21.** Lazer kaynaklı numunelerin eğme deneyleri sonundaki durumları

### 5.6.3. TIG Kaynaklı Malzemeye Ait Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

TIG kaynaklı malzemeye ait numunelerin eğme deneyi sonucundaki gerilme-yüzde uzama grafikleri Şekil 5.22.'de gösterilmektedir.



**Şekil 5.22.** TIG kaynaklı numunelerin eğme deneylerinde elde edilen gerilme-yüzde uzama grafikleri

TIG kaynaklı malzemeye ait numunelerin eğme deneyi sonucunda elde edilen eğilme mukavemeti değerleri Tablo 5.12.'de gösterilmektedir.

**Tablo 5.12.** TIG kaynaklı numunelere ait eğilme mukavemeti değerleri

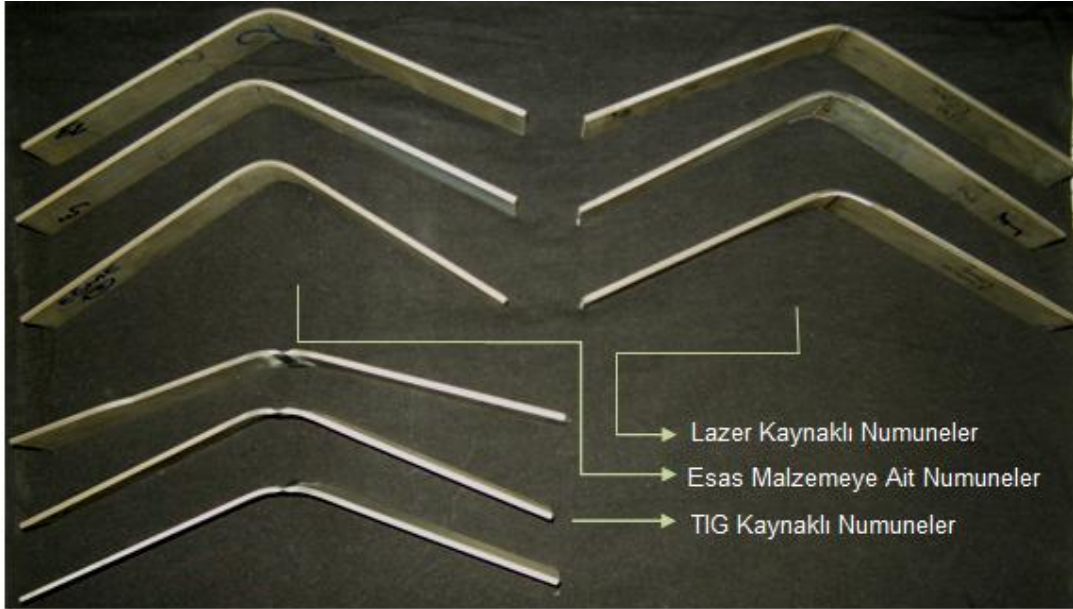
Numune No	Eğilme Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
1	550
2	622
3	737
Ortalama	636

TIG kaynaklı numunelerin eğme deneyleri sonucundaki görüntüleri Şekil 5.23.'de gösterilmektedir.



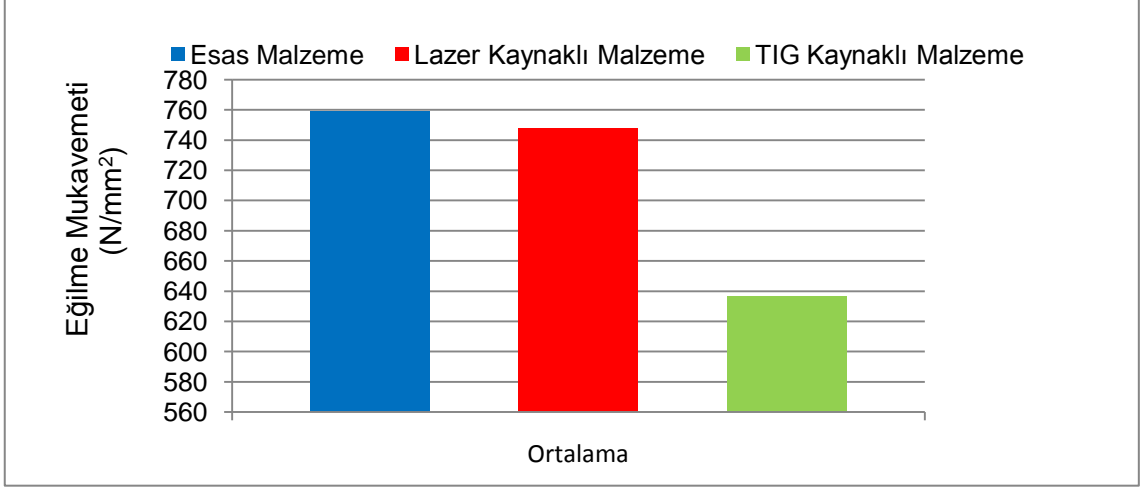
**Şekil 5.23.** TIG kaynaklı numunelerin eğme deneyleri sonundaki durumları

Esas malzemeye, lazer kaynaklı malzemeye ve TIG kaynaklı malzemeye ait numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen görüntüler Şekil 5.24.'de gösterilmektedir.



**Şekil 5.24.** Eğme deneyleri sonunda numunelerin durumları

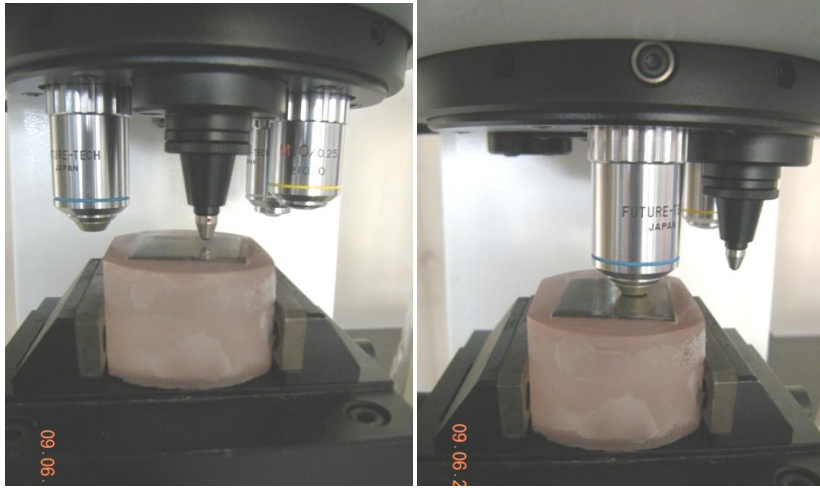
Yapılan üç nokta eğme deneyleri sonucunda; numunelerden elde edilen eğilme mukavemeti değerleri Şekil 5.25.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.25. Numunelere ait eğilme mukavemeti değerlerinin karşılaştırmalı grafiği

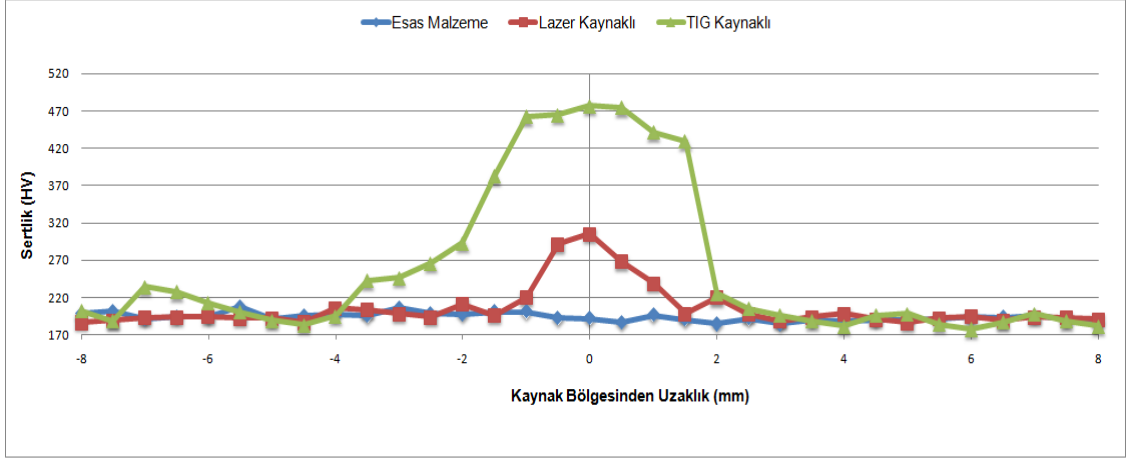
### 5.7. Mikrosertlik Ölçümü

Mikrosertlik ölçüm cihazında (FUTURETECH FM700) 300 gf'lık kuvvet 10 saniye boyunca 500µm aralıklarla kaynak bölgesinden, esas metale doğru uygulanarak iz oluşturulmuş ve uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile sertlik değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.26. Mikrosertlik ölçüm esnasına ilişkin örnek

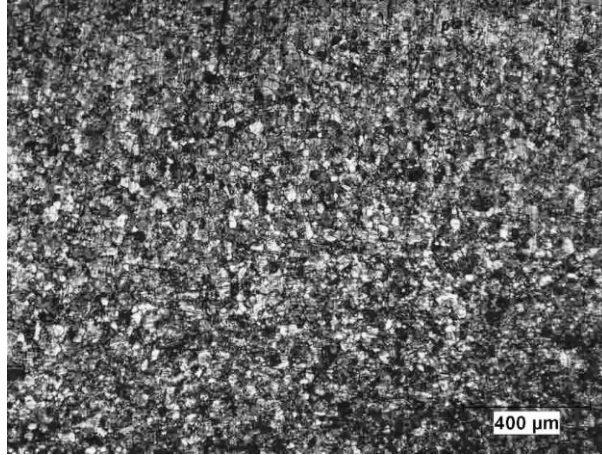
Şekil 5.27.'de esas malzemeye, TIG kaynaklı malzemeye, lazer kaynaklı malzemeye ait numunelerin Vickers sertlik dağılımlarının grafiği gösterilmektedir.



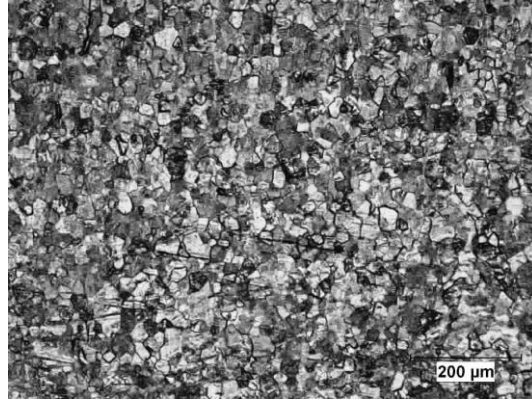
Şekil 5.27. Numunelerin karşılaştırmalı sertlik dağılım grafikleri

### 5.8. Metalografik İncelemeler

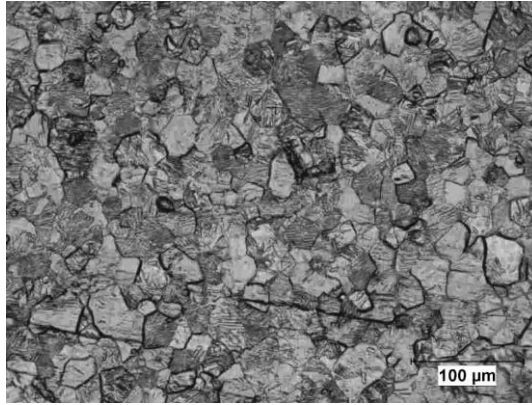
Mikroskobik çalışmalar Nikon marka stereo mikroskopta yapılmıştır. Mikroskobik incelemeler, numuneler polyestere alındıktan sonra 220, 400, 600, 800, 1000,1200 gridlik SiC zımparalarla zımparalanmıştır. Yüzeyleri düzeltilen numuneler 3µ elmas pasta ile parlatılarak, 50 ml H<sub>2</sub>O, 40ml HNO<sub>3</sub> ve 10 ml HF' den oluşan çözeltide dağlanarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin optik mikroskop incelemesine ek olarak, kaynak metalinden ana malzemeye doğru SEM incelemesi yapılmış ve kaynak işleminin malzeme yapısında neden olduğu değişimler gözlemlenmiştir.



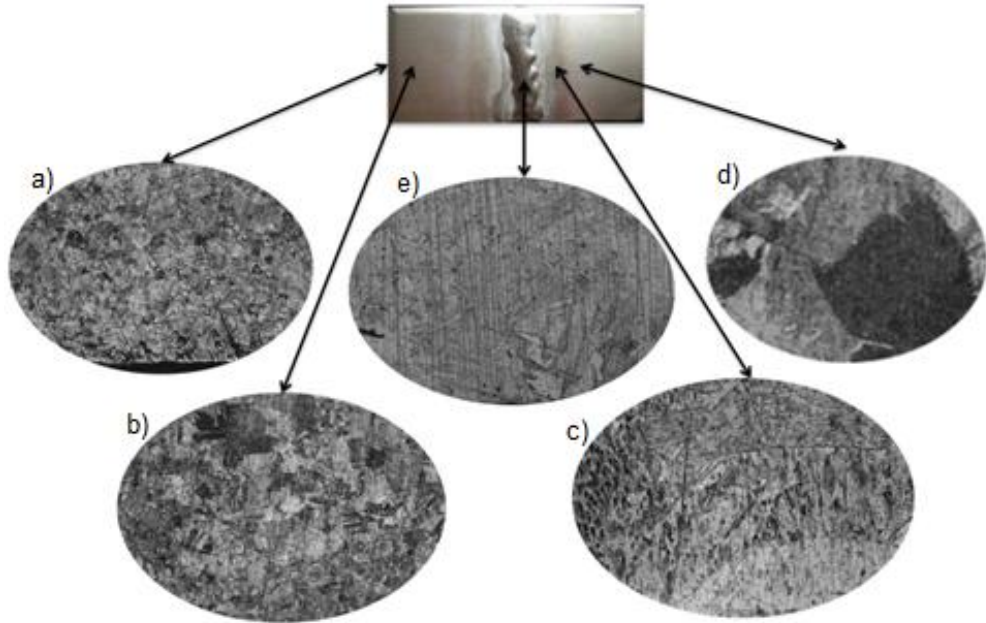
Şekil 5.28. Esas malzemeye ait mikroyapı görüntüsü



**Şekil 5.29.** Esas malzemeye ait mikroyapı görüntüsü

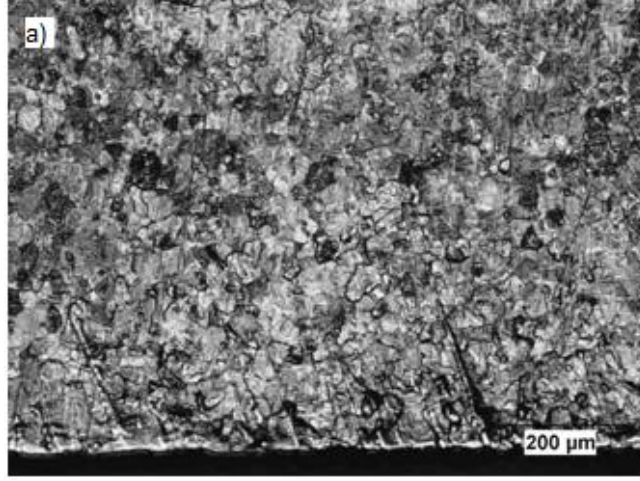


**Şekil 5.30.** Esas malzemeye ait mikroyapı görüntüsü

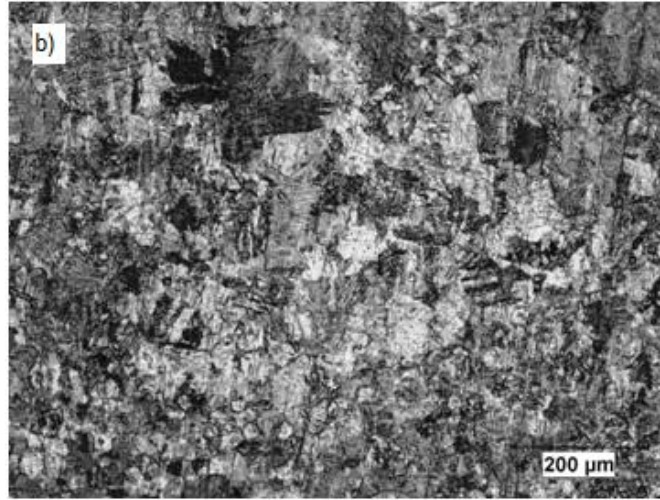


**Şekil 5.31.** TIG Kaynaklı numuneye ait mikroyapı görüntüleri

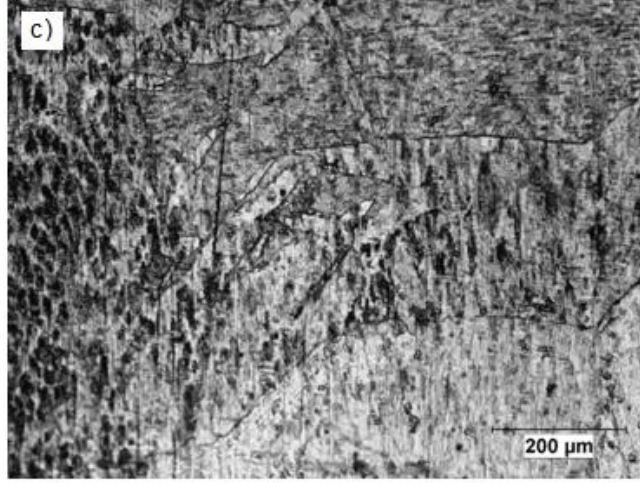
Şekil 5.31.'de gösterilmiş olan mikroyapıların detaylı örnekleri Şekil 5.32.-Şekil 5.36.'da gösterilmektedir.



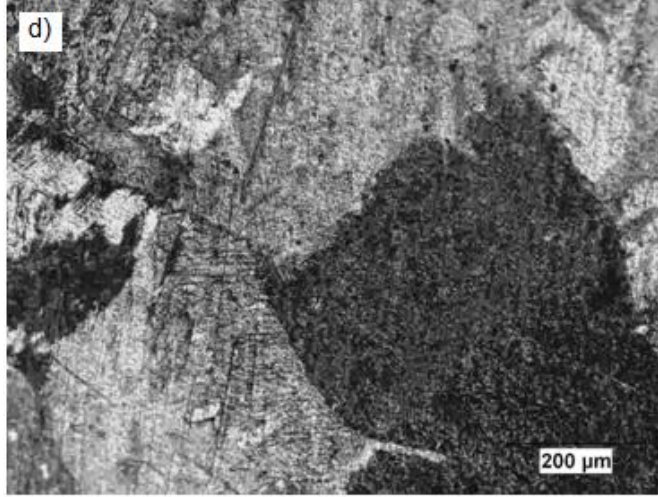
**Şekil 5.32.** TIG kaynaklı numuneye ait esas metal bölgesi



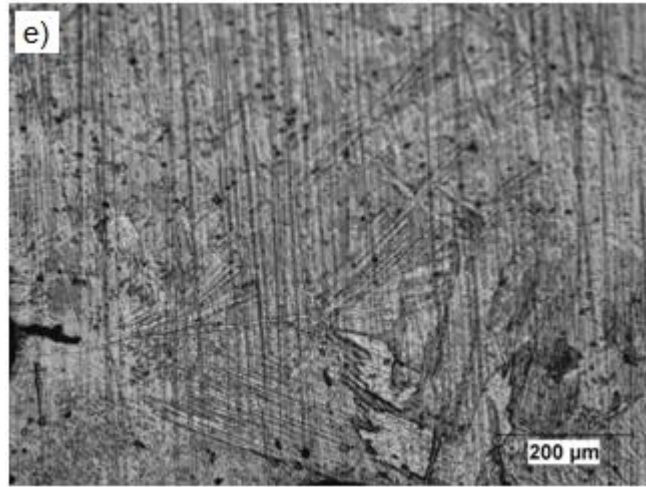
**Şekil 5.33.** TIG kaynaklı malzemeye ait esas metal-ITAB



**Şekil 5.34.** TIG kaynaklı numuneye ait ITAB

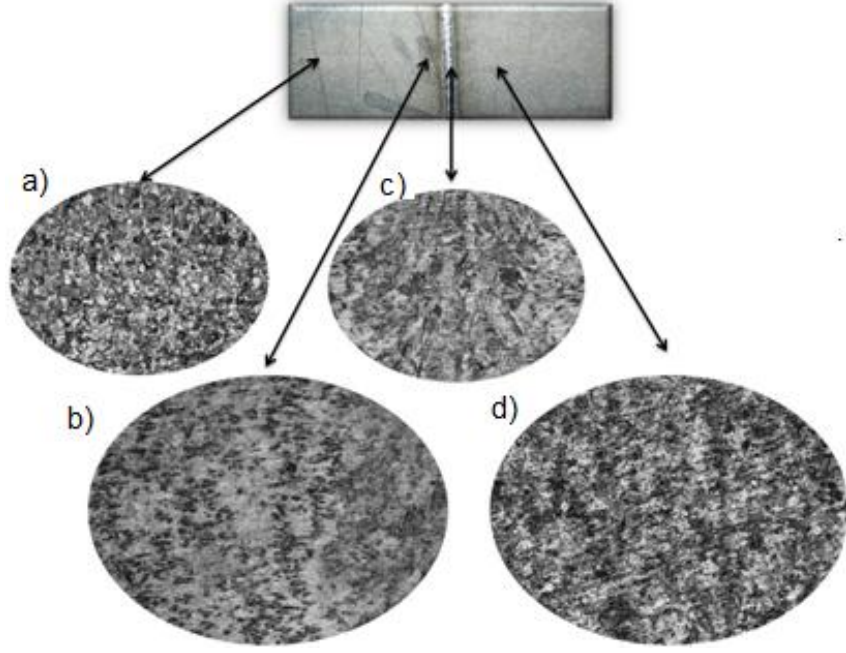


**Şekil 5.35.** TIG kaynaklı numuneye ait ITAB



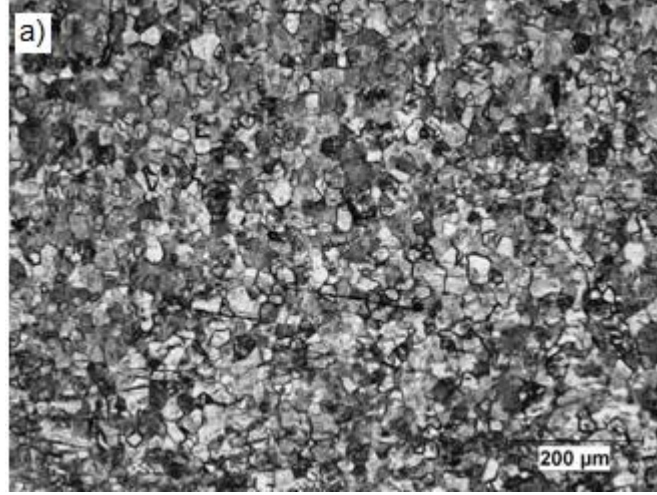
**Şekil 5.36.** TIG kaynaklı numuneye ait kaynak metali

Şekil 5.37.'de lazer kaynaklı numuneye ait mikroyapılar gösterilmektedir.

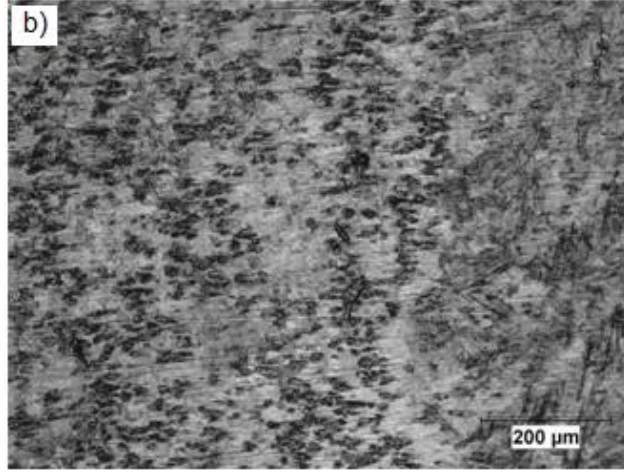


**Şekil 5.37.** Lazer kaynaklı numuneye ait mikroyapı görüntüleri

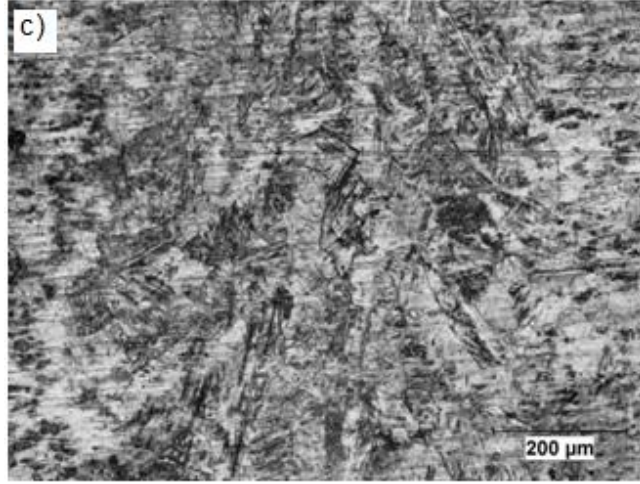
Şekil 5.37.'de gösterilmiş olan mikroyapıların detaylı örnekleri Şekil 5.38.-Şekil 5.41.'de gösterilmektedir.



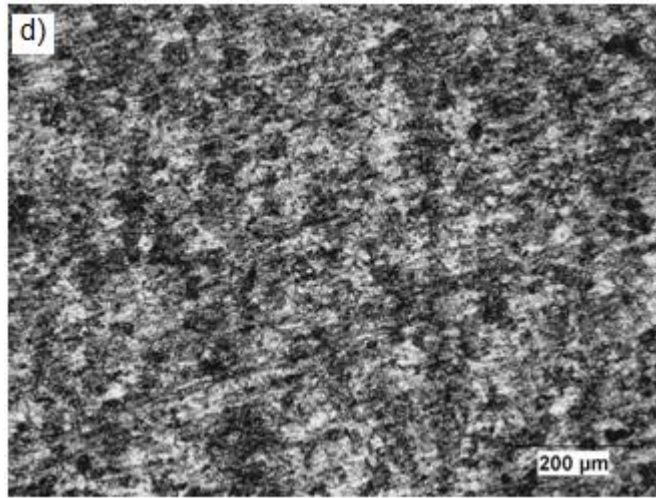
**Şekil 5.38.** Lazer kaynaklı numuneye ait esas metal bölgesi



**Şekil 5.39.** Lazer kaynaklı numuneye ait esas metal-ITAB görüntüsü

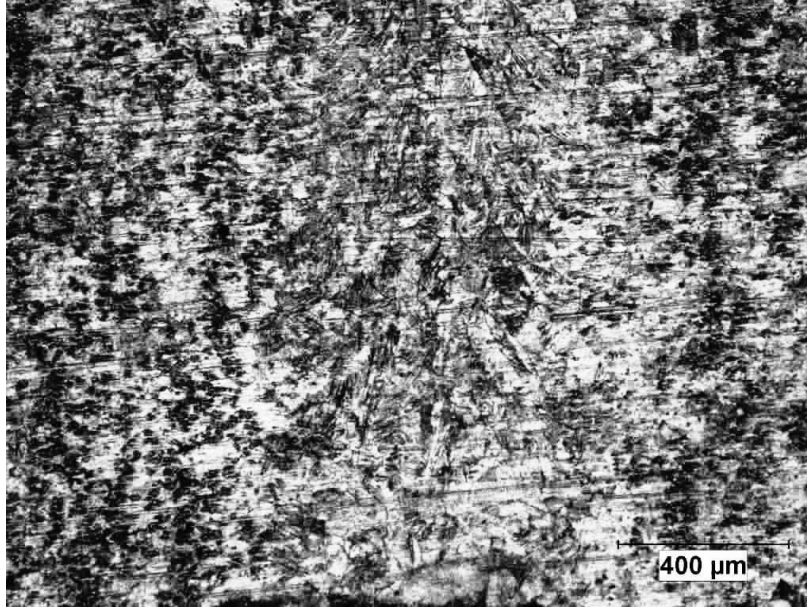


**Şekil 5.40.** Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak metal

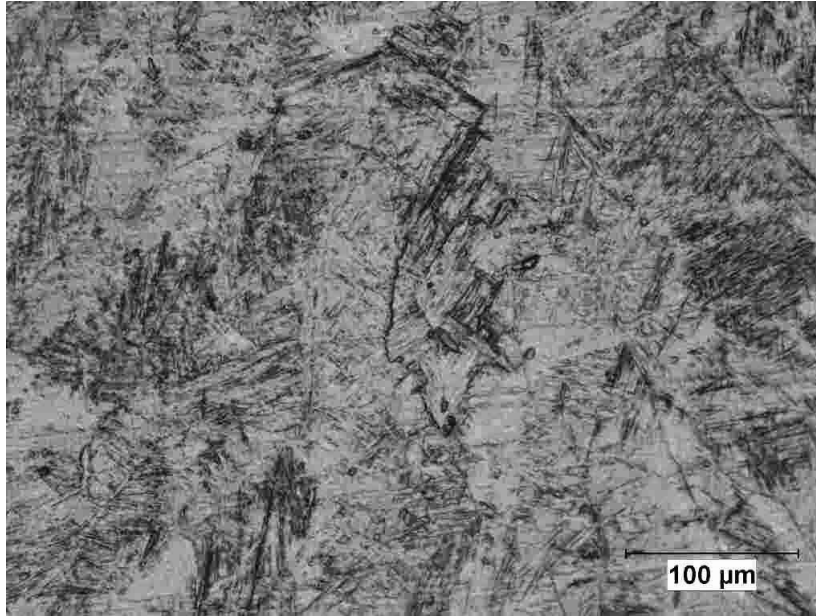


**Şekil 5.41.** Lazer kaynaklı numuneye ait esas metal-ITAB

Şekil 5.42. ve Şekil 5.43.'de lazer kaynaklı numunenin kaynak bölgesi gösterilmektedir.

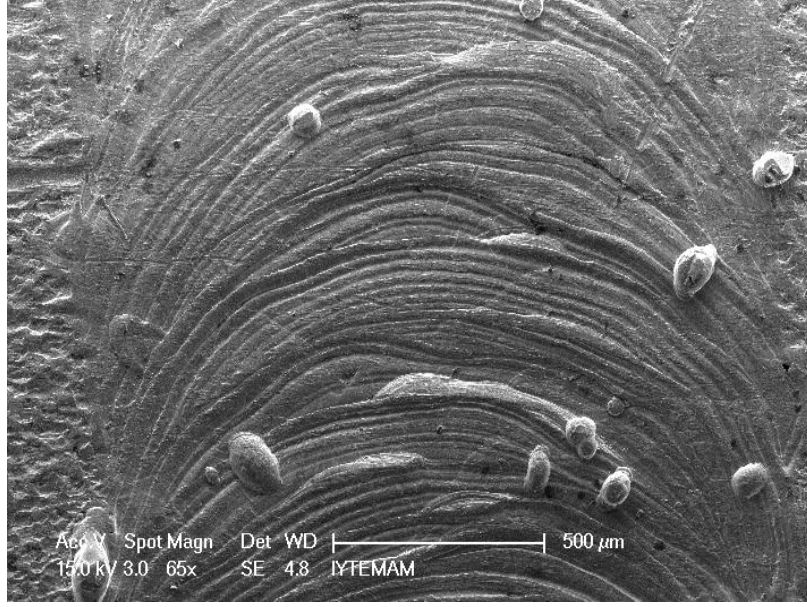


**Şekil 5.42.** Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesi

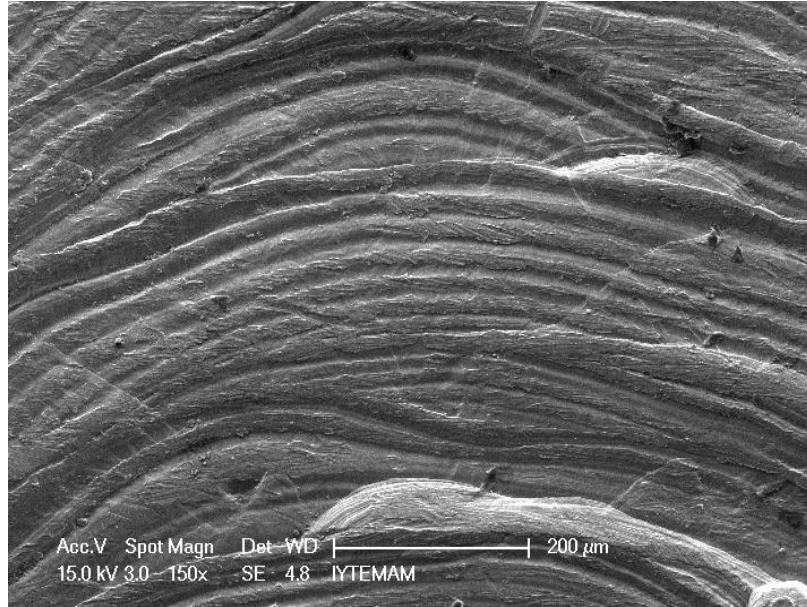


**Şekil 5.43.** Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesi

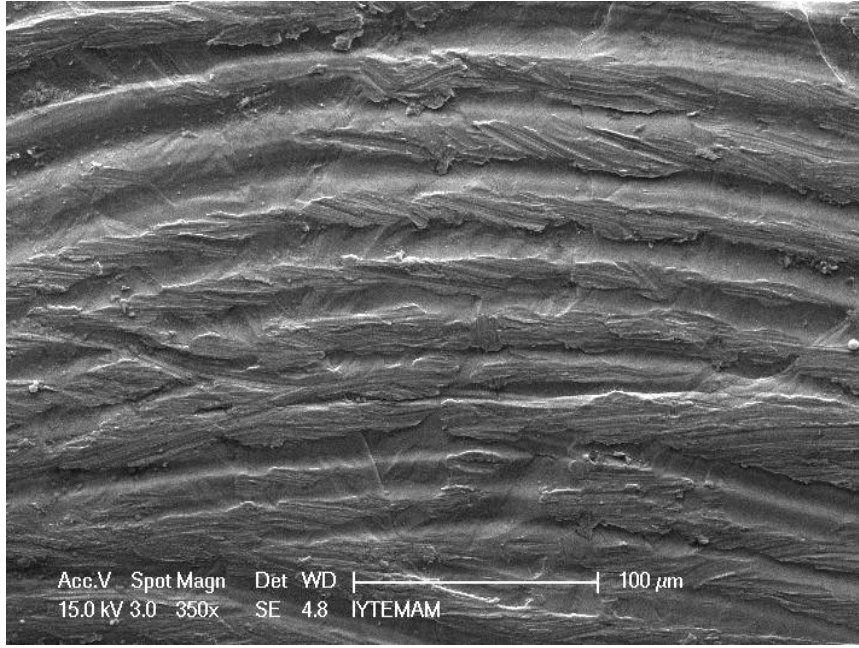
Lazer kaynaklı numuneye ait SEM incelemeleri kaynak metalinden başlanarak esas metale doğru yapılmıştır. SEM incelemelerinde elde edilen görüntüler Şekil 5.44.-Şekil 5.51.'de gösterilmektedir.



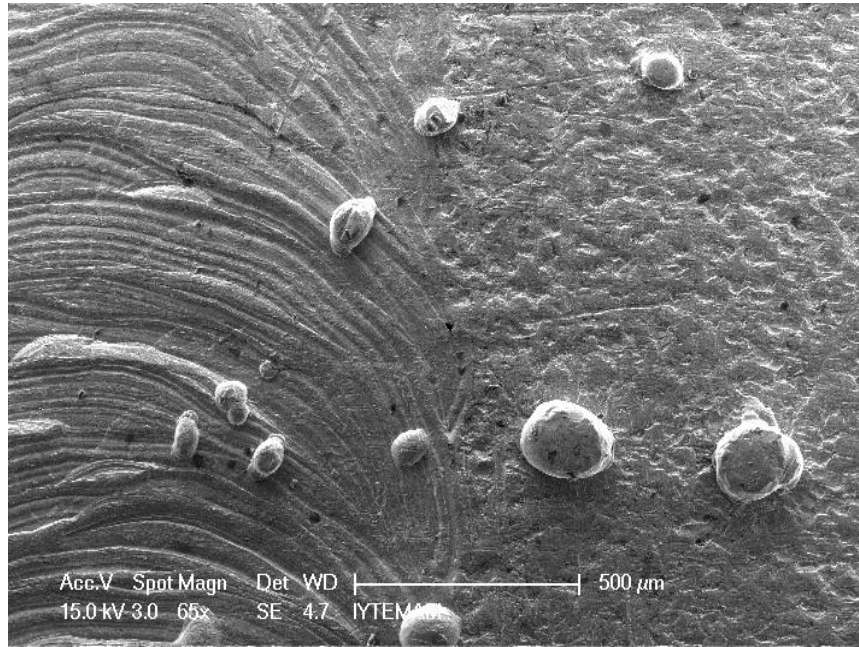
**Şekil 5.44.** Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesinin SEM görüntüsü



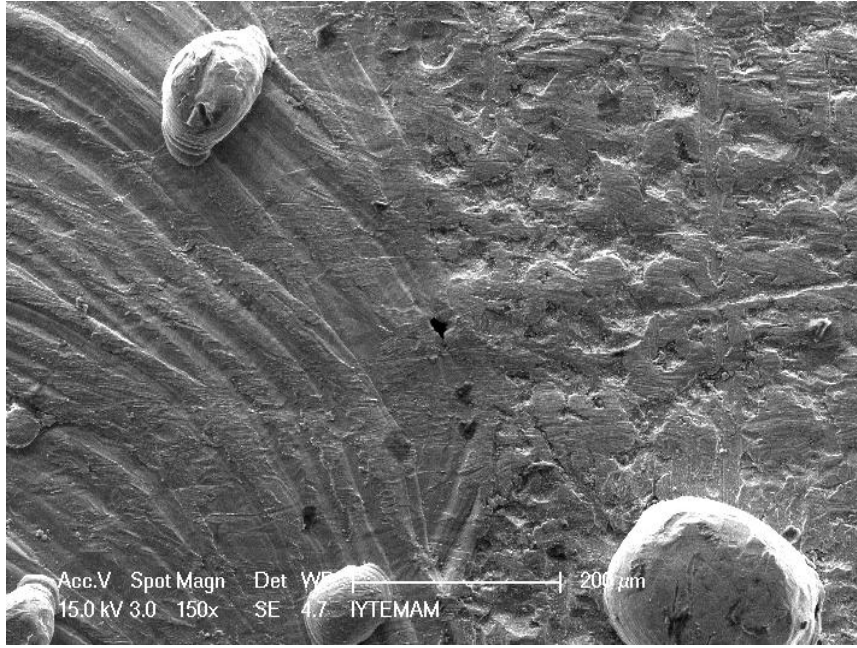
**Şekil 5.45.** Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesinin SEM görüntüsü



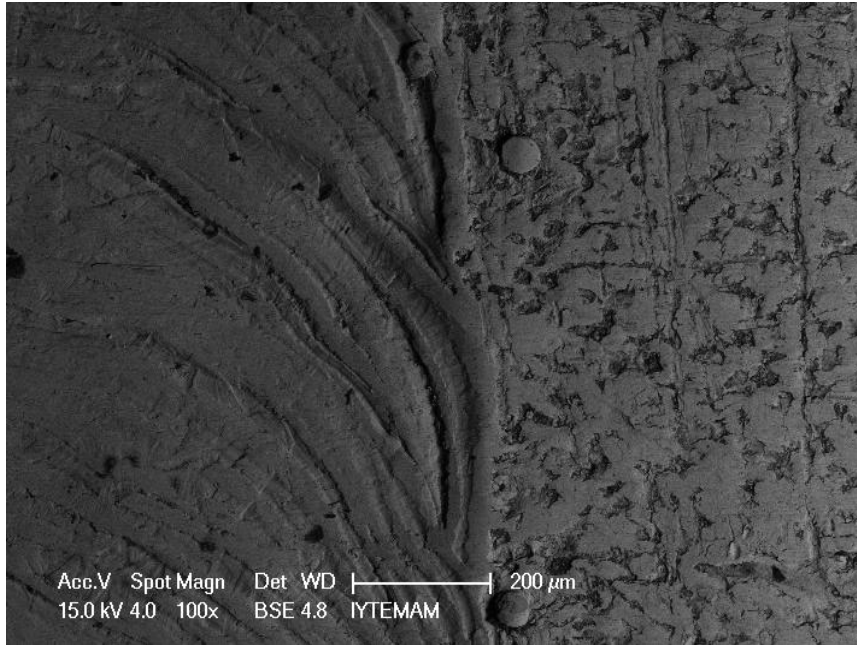
**Şekil 5.46.** Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesinin SEM görüntüsü



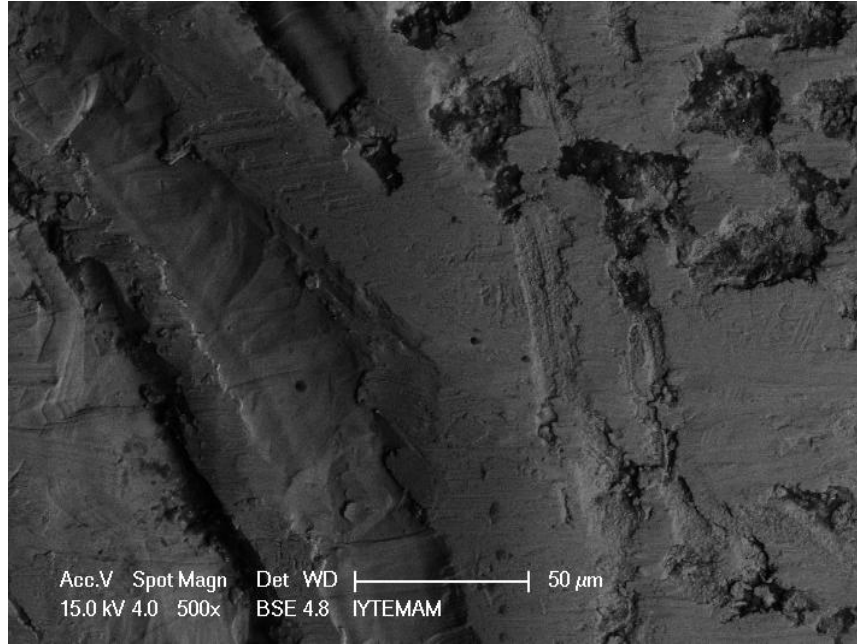
**Şekil 5.47.** Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal bölgesi SEM görüntüsü



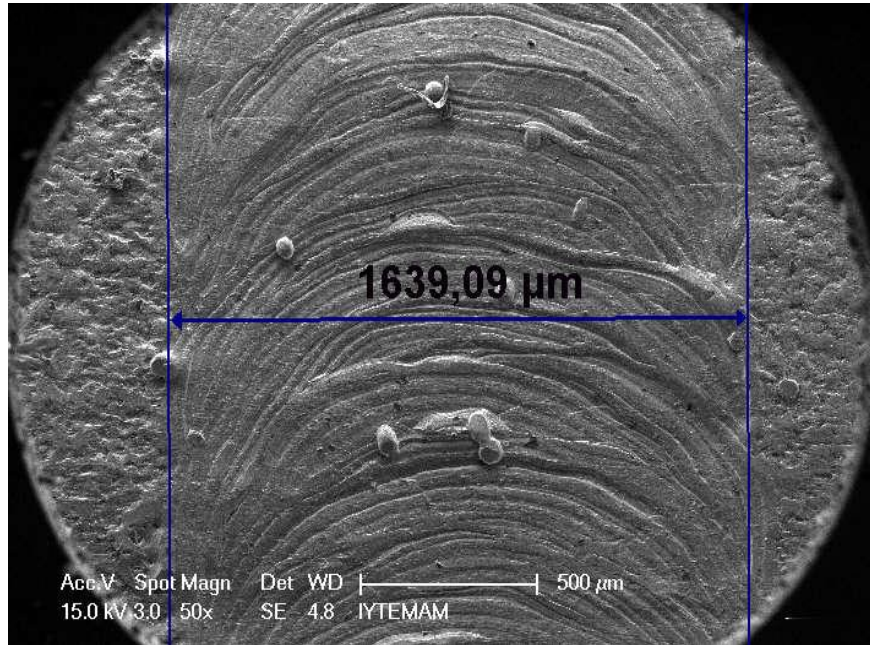
**Şekil 5.48.** Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal bölgesi SEM görüntüsü



**Şekil 5.49.** Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal bölgesi SEM görüntüsü

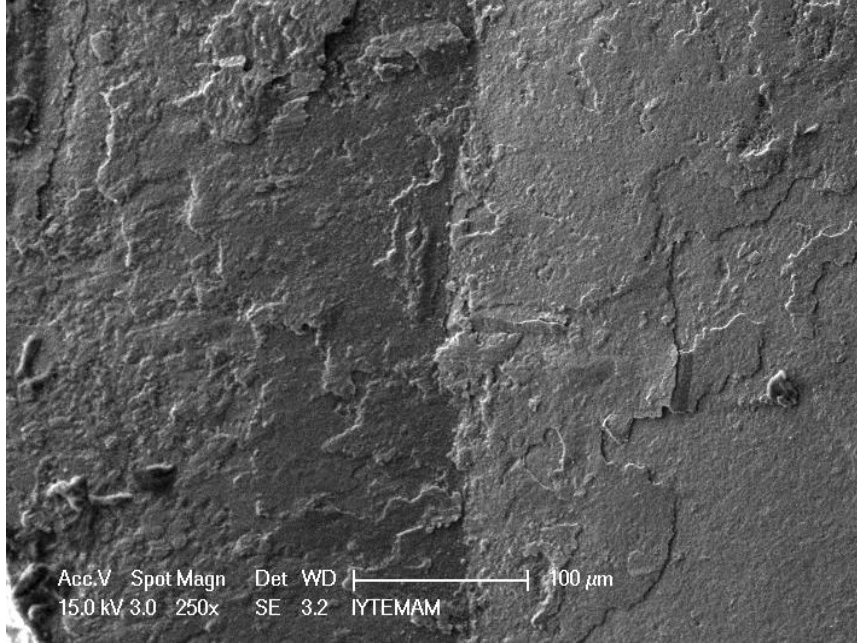


**Şekil 5.50.** Lazer kaynaklı numunenin kaynak metali-esas metal bölgesi SEM görüntüsü

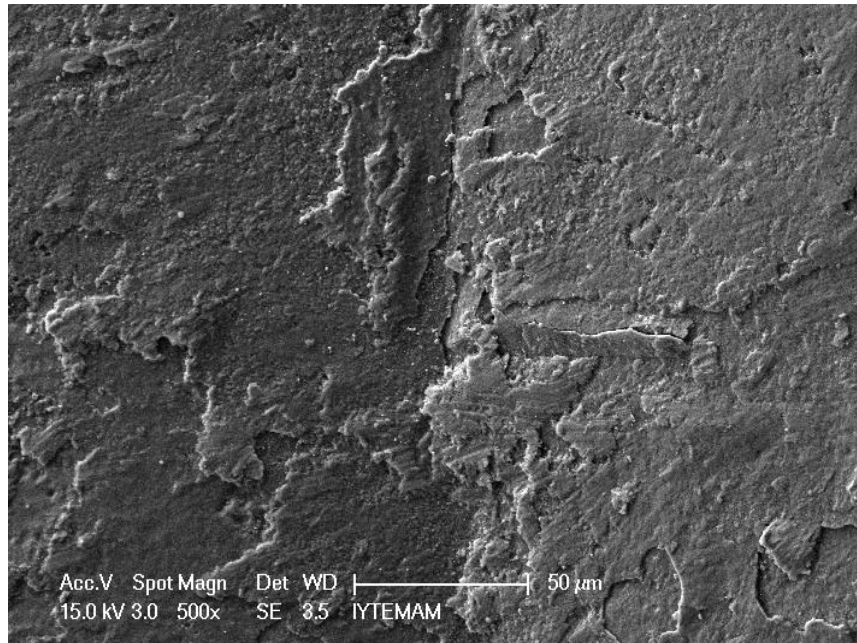


**Şekil 5.51.** Lazer kaynaklı numuneye ait kaynak bölgesi genişliği

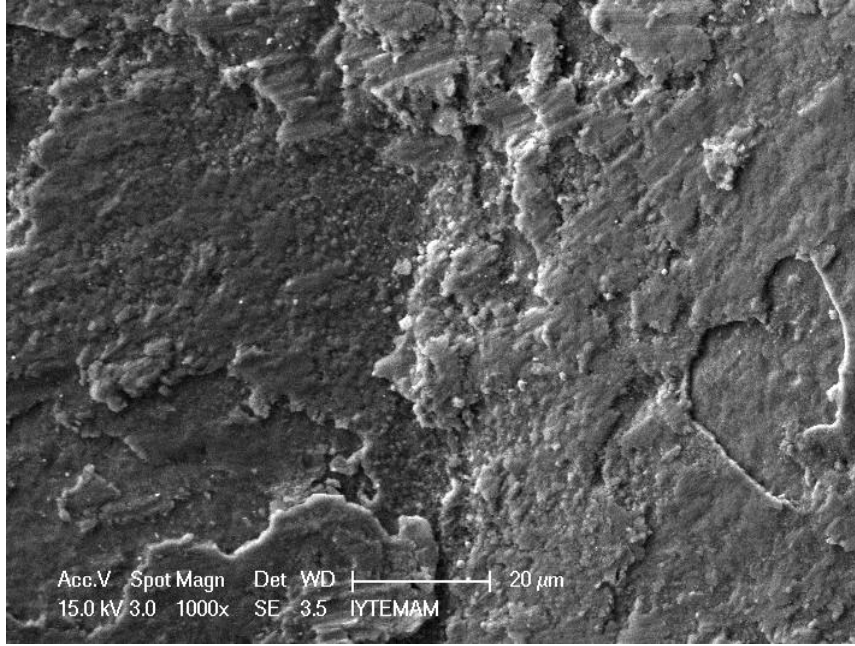
TIG kaynaklı numuneye ait SEM incelemeleri kaynak metalinden başlanarak esas metale doğru yapılmıştır. SEM incelemelerinde elde edilen görüntüler Şekil 5.52.-Şekil 5.65.'de görülmektedir.



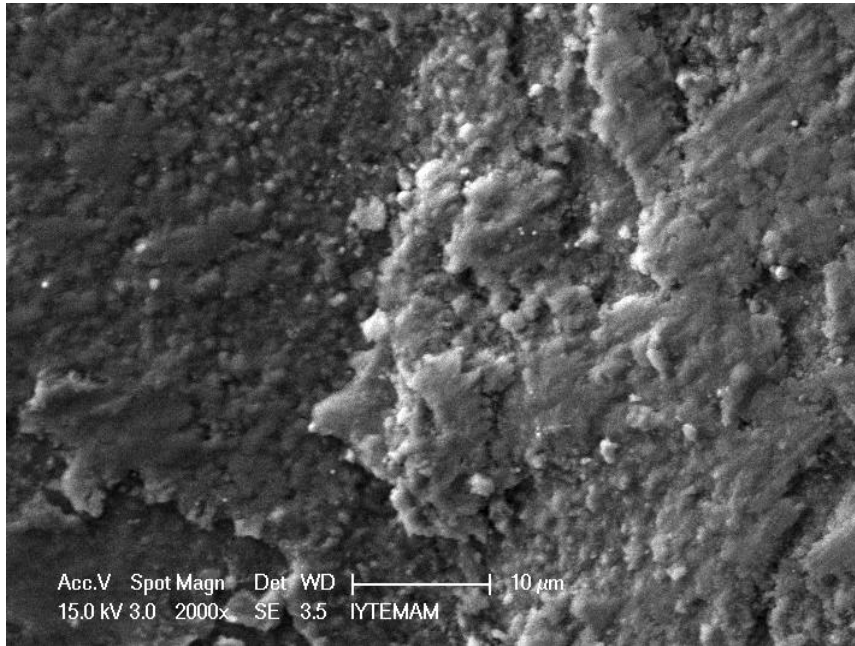
Şekil 5.52. TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölgesi SEM görüntüsü



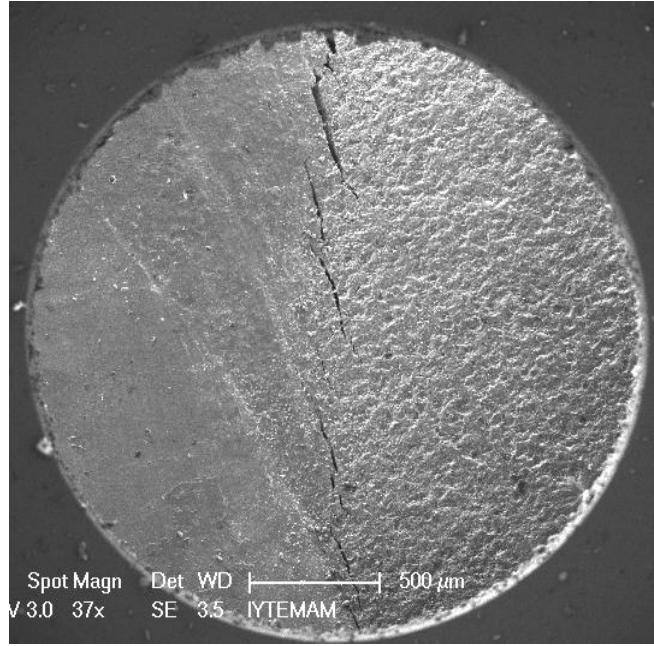
Şekil 5.53. TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölgesi SEM görüntüsü



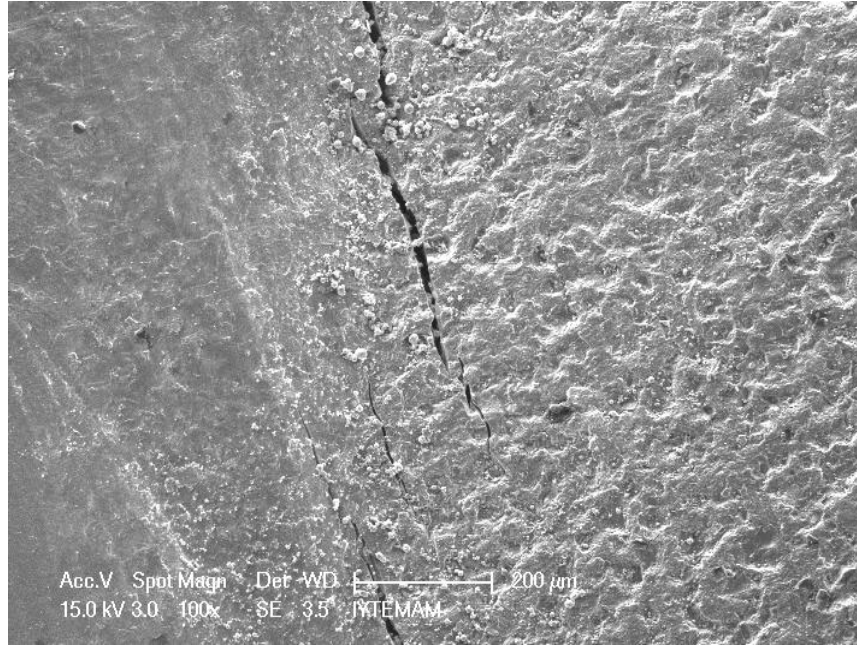
**Şekil 5.54.** TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölgesi SEM görüntüsü



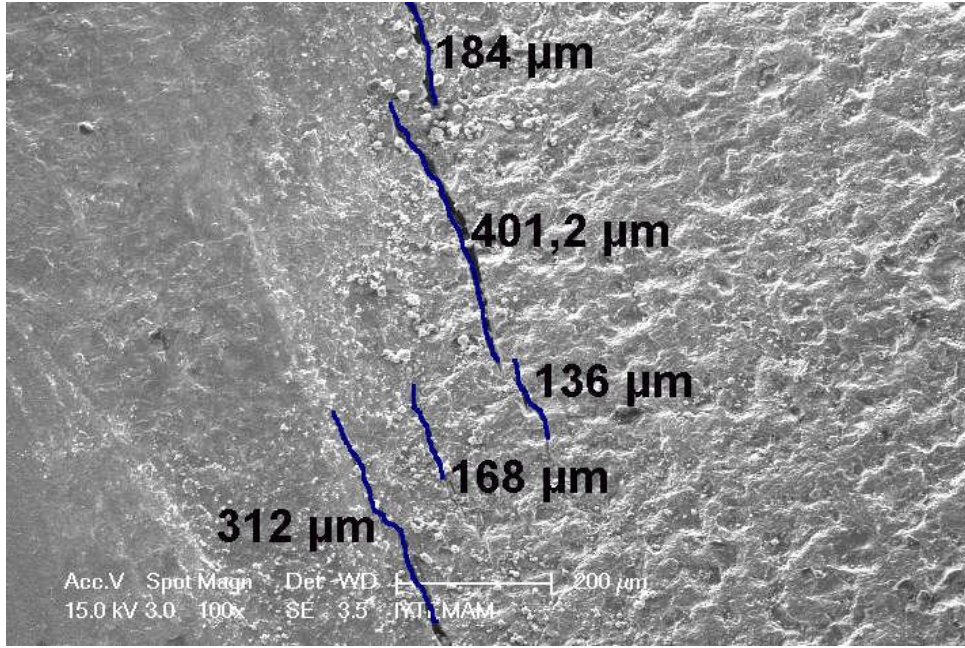
**Şekil 5.55.** TIG kaynaklı numunenin esas metal-kaynak metali bölgesi SEM görüntüsü



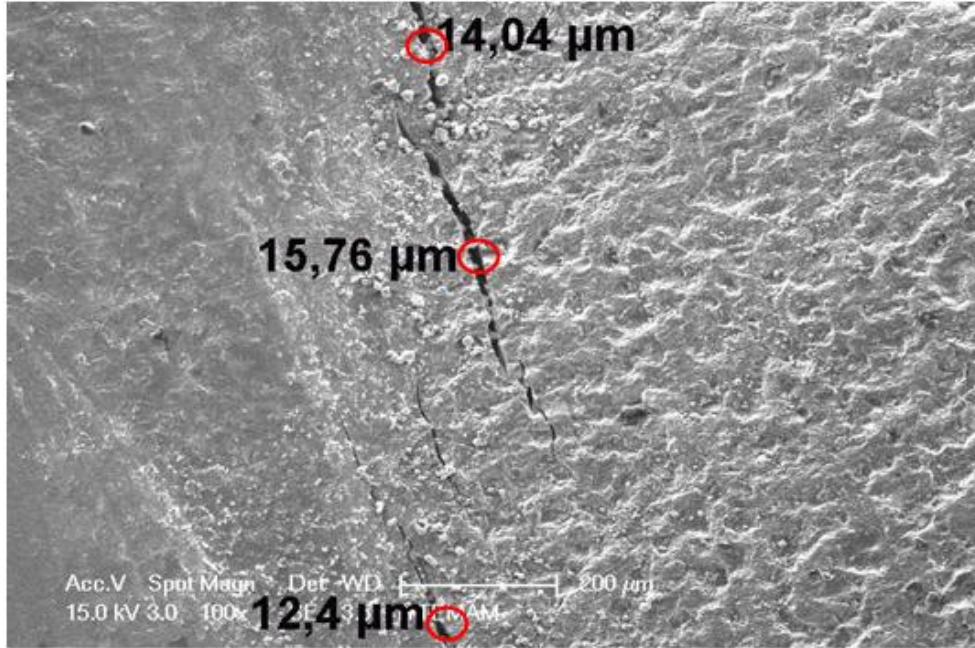
**Şekil 5.56.** TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü



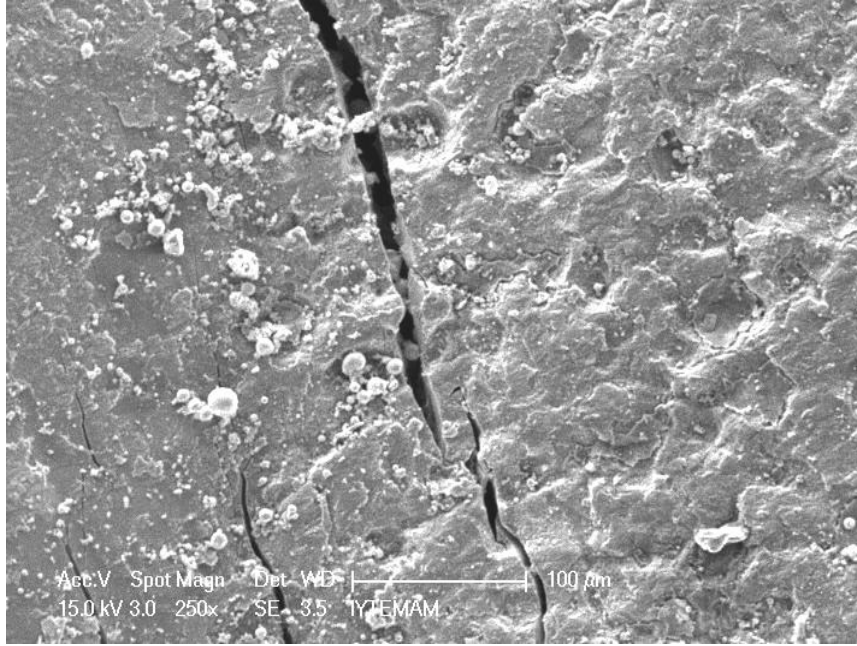
**Şekil 5.57.** TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü



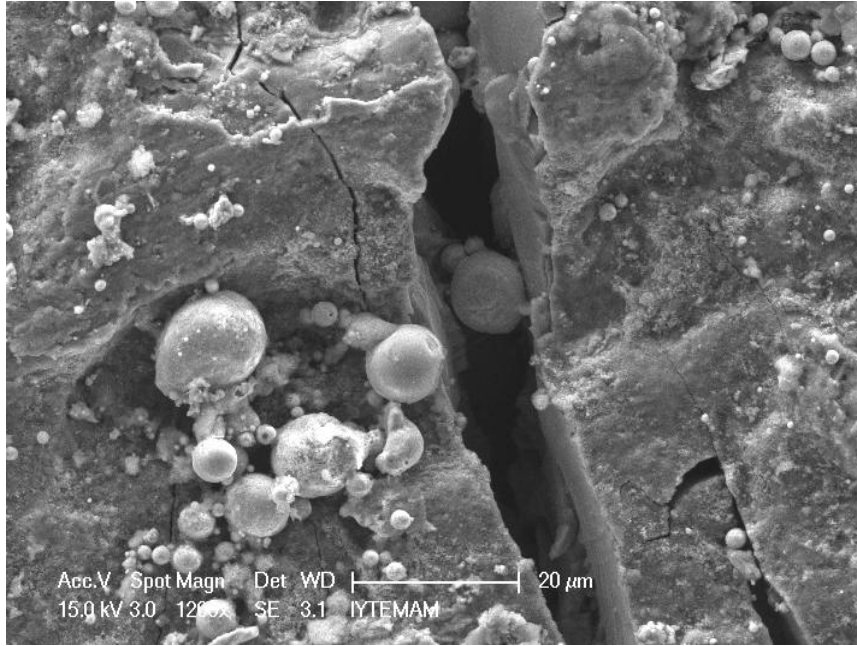
Şekil 5.58. TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların uzunluk ölçümü



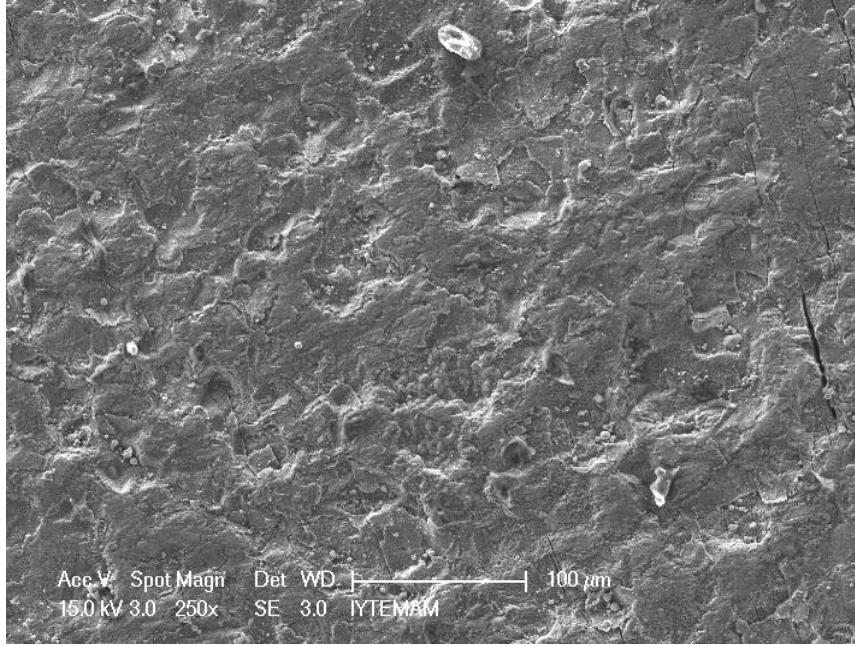
Şekil 5.59. TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların genişlik ölçümü



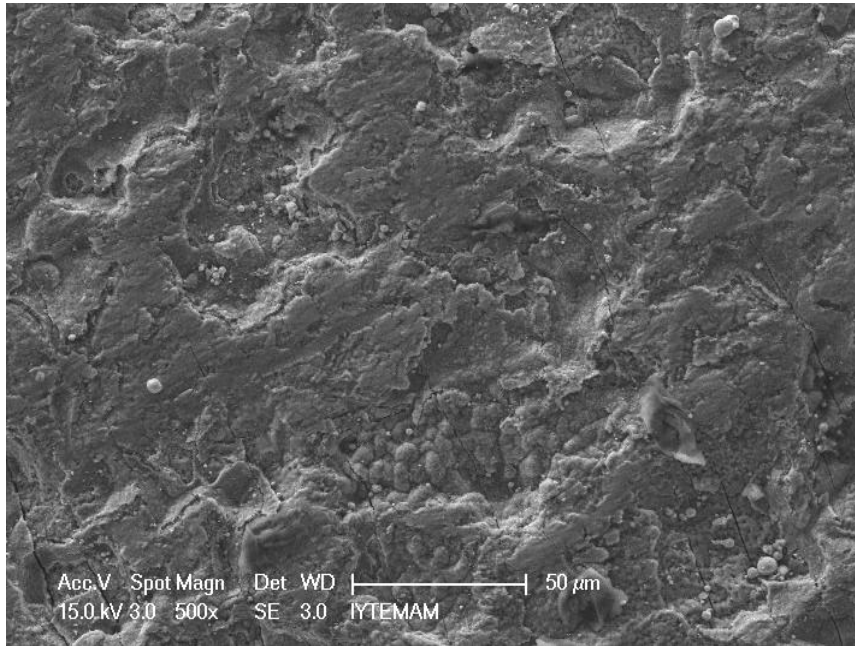
**Şekil 5.60.** TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü



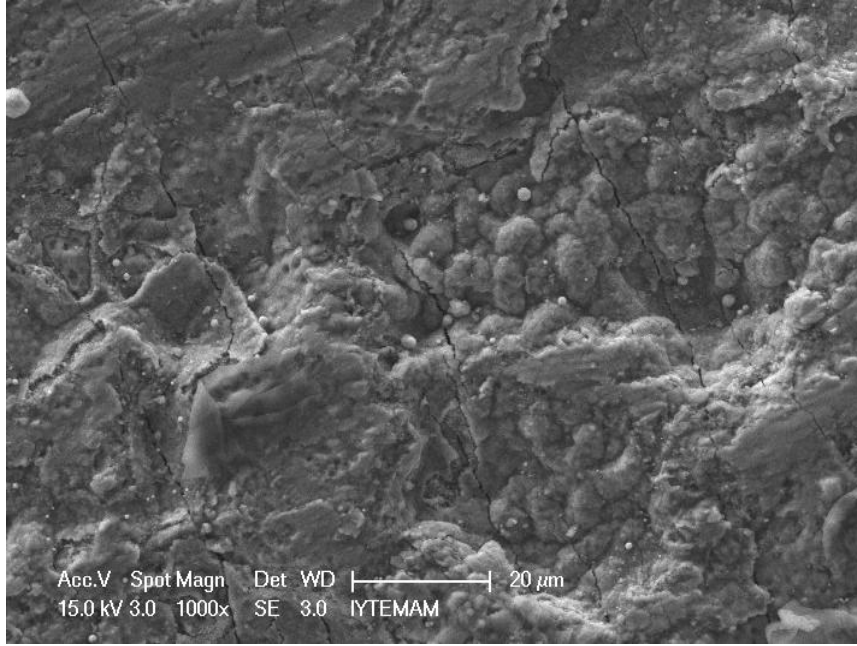
**Şekil 5.61.** TIG kaynaklı numuneye ait ITAB'da oluşan çatlakların SEM görüntüsü



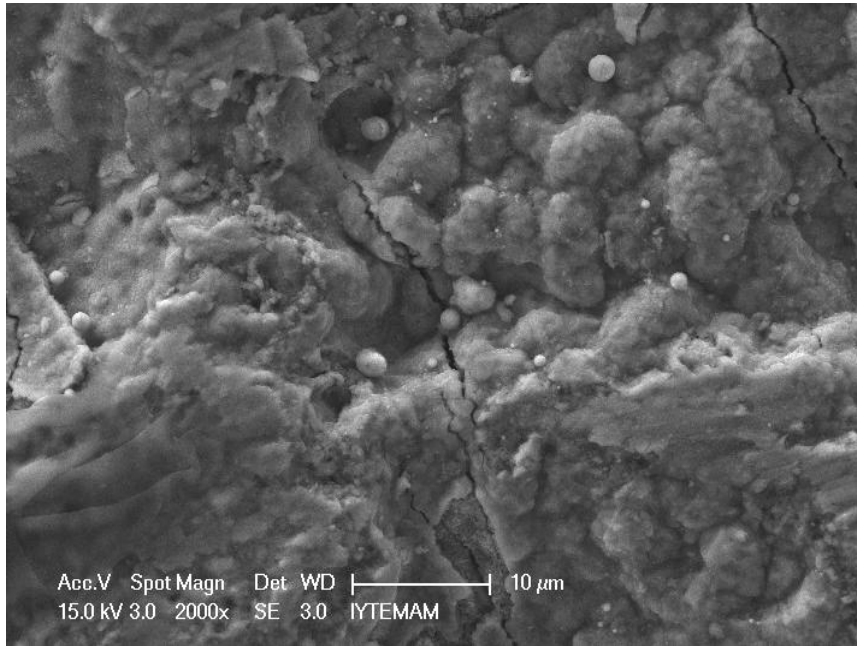
**Şekil 5.62.** TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü



**Şekil 5.63.** TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü

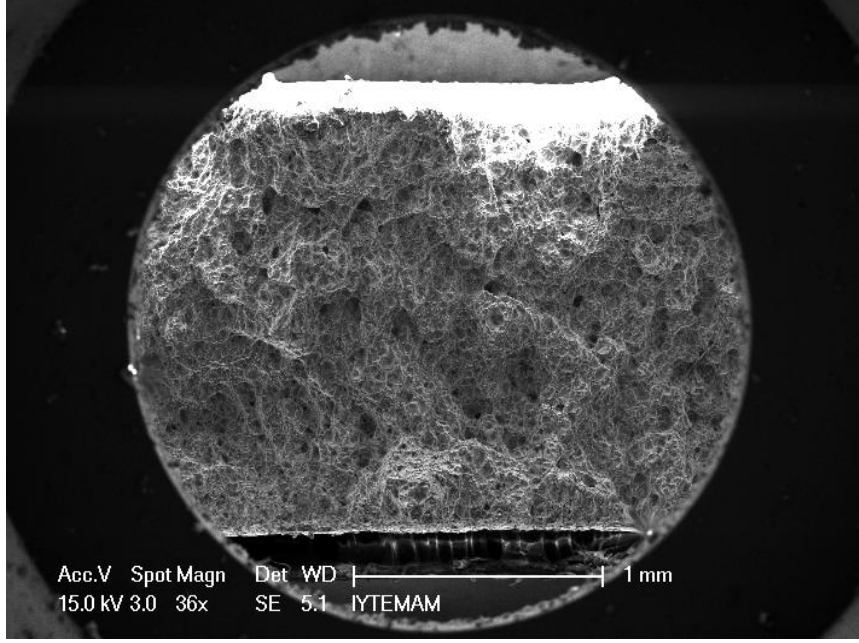


**Şekil 5.64.** TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü

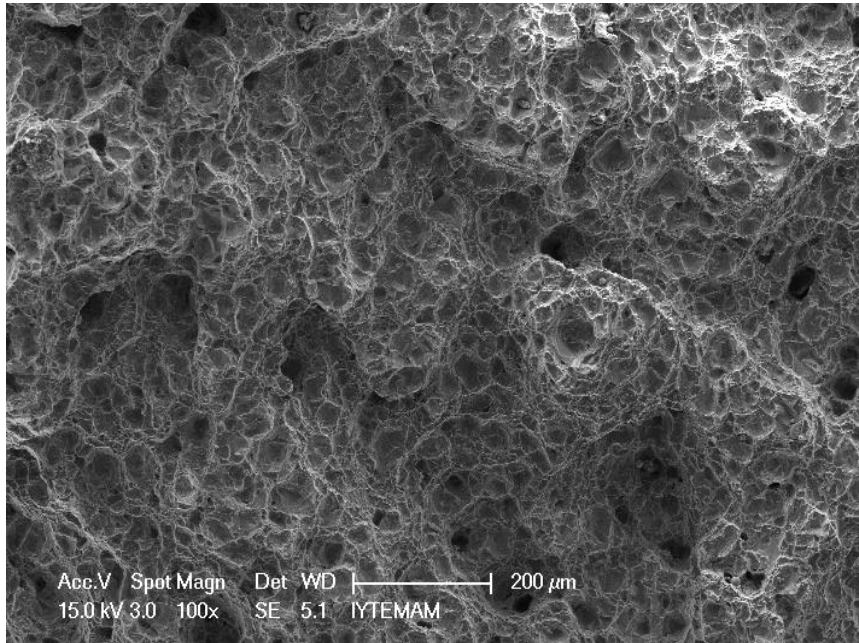


**Şekil 5.65.** TIG kaynaklı numunenin esas metal bölgesinin SEM görüntüsü

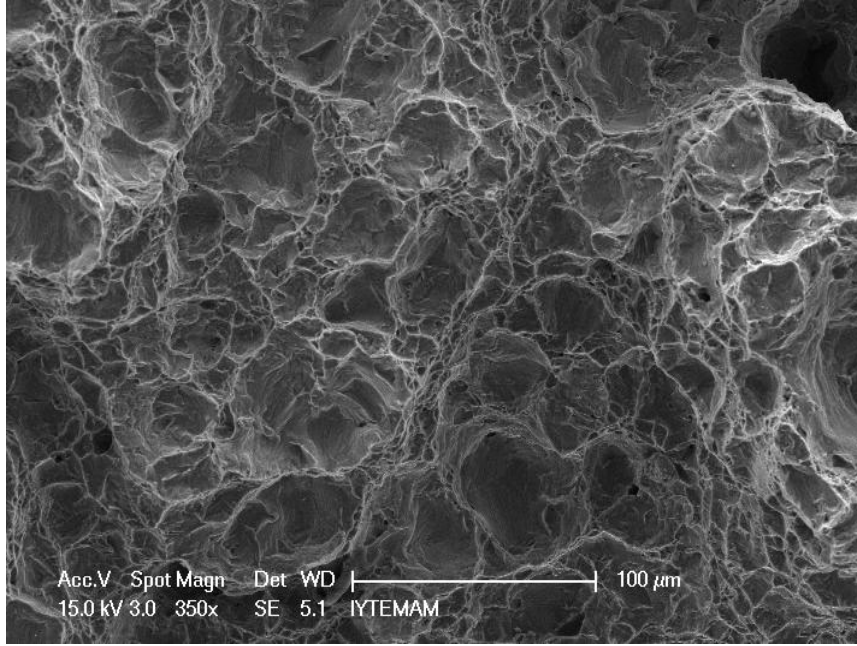
Numunelerin çekme testlerindeki kırılma yüzeylerinden alınan örneklerin SEM incelemelerine ilişkin görüntüleri Şekil 5.66.-Şekil 5.71.'de gösterilmektedir.



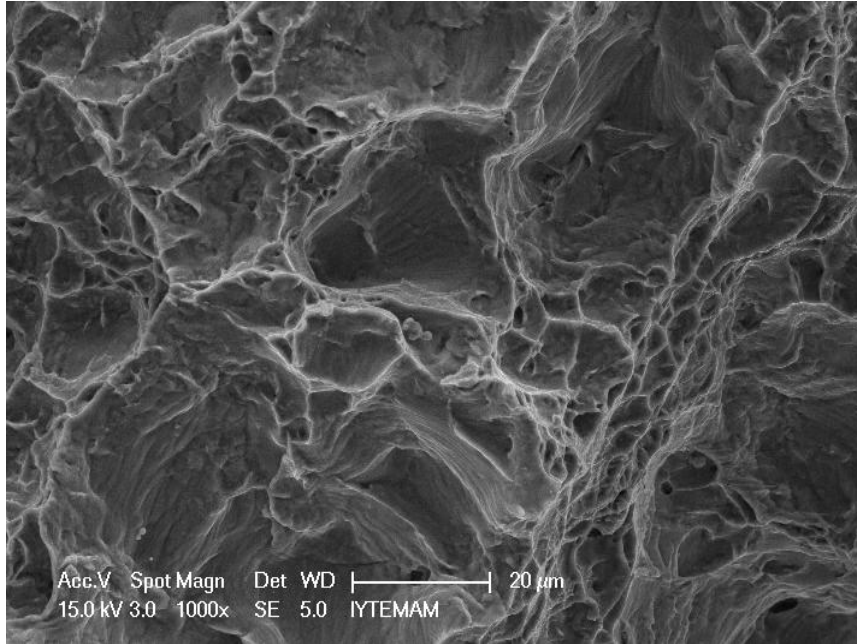
Şekil 5.66. Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü



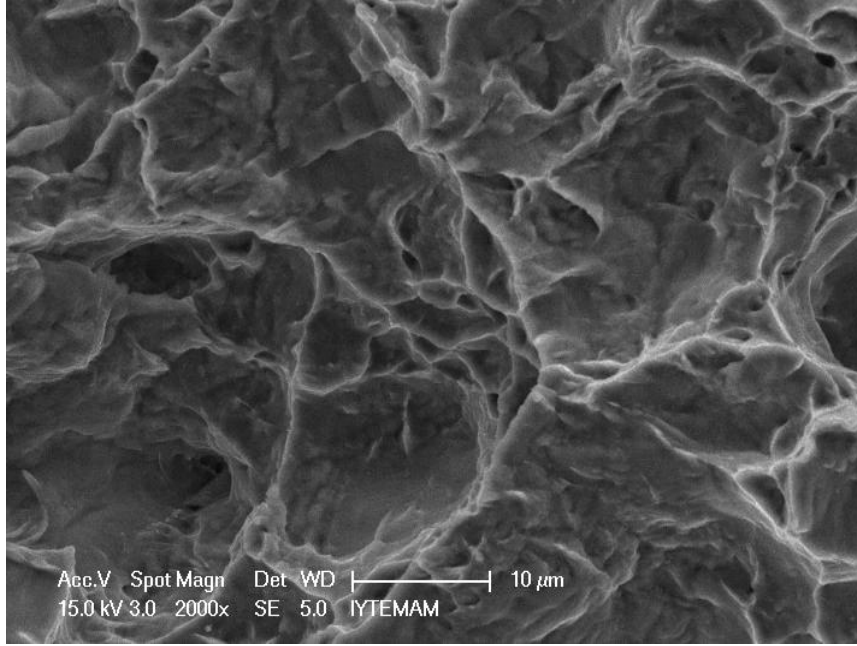
Şekil 5.67. Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü



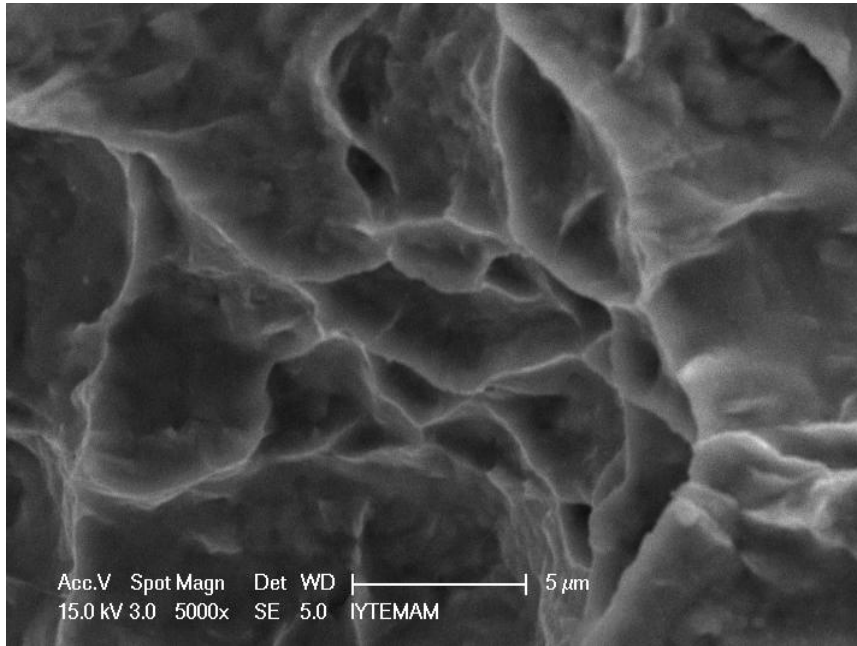
**Şekil 5.68.** Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü



**Şekil 5.69.** Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü



**Şekil 5.70.** Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü



**Şekil 5.71.** Esas metal kısmından kırılma yüzeyine ait SEM görüntüsü

## 6. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada ticari saflıktaki titanyuma (Grade-2) lazer kaynağı ve TIG kaynak yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan kaynak yöntemine göre ticari saflıktaki titanyumun mekanik özellikleri, sertlik dağılımları, içyapı değişimleri ve SEM incelemeleri yapılmıştır.

Lazer kaynağı, çift taraflı ve bir pasoda ilave tel kullanılmadan uygulanmış, TIG kaynağı ise 80A akım ve 220V voltaj ile ilave tel kullanılarak uygulanmıştır. Kaynak sonrası yapılan görsel incelemelerde levhalarda herhangi bir çarpılma gözlenmemiştir.

Lazer kaynaklı ve TIG kaynaklı numunelerin çekme deneyleri sonrası kopmaların esas metalden gerçekleştiği belirlenmiştir. Çekme deneylerinde elde edilen kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri yapıldığında, kırılmaların sünek bir şekilde gerçekleştiği Şekil 5.66.- Şekil 5.71.'de görülmektedir.

Esas malzeme, lazer kaynaklı malzeme ve TIG kaynaklı malzemelerin çekme deneyleri sonucunda; Şekil 5.16.'da görüldüğü üzere esas malzemenin ortalama çekme gerilmesinin  $407,2 \text{ N/mm}^2$ , ortalama kopma gerilmesinin  $264,6 \text{ N/mm}^2$ , lazer kaynaklı malzemeye ait numunelerin ortalama çekme gerilmesinin  $387,2 \text{ N/mm}^2$ , ortalama kopma gerilmesinin  $247,3 \text{ N/mm}^2$ , TIG kaynaklı malzemeye ait numunelerin ortalama çekme gerilmesinin  $349,3 \text{ N/mm}^2$ , ortalama kopma gerilmesinin  $220,75 \text{ N/mm}^2$  olduğu saptanmıştır. Kaynaklı malzemelerin kaynak verimleri incelendiğinde; lazer kaynağının kaynak veriminin %95,1, TIG kaynağının kaynak veriminin %85,7 olduğu saptanmıştır.

Yapılan üç nokta eğme deneyleri sonucunda; esas malzemenin ortalama eğilme dayanımının  $759,3 \text{ N/mm}^2$ , lazer kaynaklı malzemeye ait numunelerin ortalama eğilme dayanımının  $747,5 \text{ N/mm}^2$ , TIG Kaynaklı malzemeye ait numunelerin ortalama eğilme dayanımının  $636,6 \text{ N/mm}^2$  olduğu saptanmıştır.

Sertlik incelemeleri sonucunda, esas metale ait sertliğin 190-200 HV civarında değerlerde olduğu, lazer kaynaklı numunelerde kaynak bölgesindeki sertliğin 300 HV değerine ve TIG kaynaklı numunelerde kaynak bölgesindeki sertliğin 480 HV civarlarına kadar arttığı gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak Şekil 5.27.'de görüldüğü üzere lazer kaynaklı numunenin sertlik değerlerinin, TIG kaynaklı numunenin sertlik değerlerine kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, kaynak işlemleri esnasında ısı girdisinden dolayı mikroyapıların değişimlere uğradığı belirlenmiştir. TIG kaynaklı numunede kaynak bölgesine yaklaşıldıkça tanelerin büyüdüğü ve kaynak bölgesinde iğnemsî şekilde ve ikizlenmeye benzer

yapıların oluştuğu görülmektedir. Lazer kaynaklı numunelerin metalografik incelemesinde, kaynak bölgesine doğru yaklaşıldıkça tane boyutlarının incelendiği ve iğne yapılı tanelerin ve ikizlenmelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Lazer kaynaklı numunelerde kaynak dikişi genişliğinin tüm numunelerde aynı genişliğe sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.50.). Buna karşın TIG kaynaklı numunelere ait kaynak dikişlerinin genişliklerinin farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 5.3.).

SEM incelemelerinde, lazer kaynaklı numunelerdeki ITAB'ın çok dar bir aralıkta gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 5.44.). Şekil 5.47. ve Şekil 5.48.'de kaynak metali ve esas metal bölgelerinde oluşan küçük parçacıkların lazer kaynağı esnasında kaynak banyosundan sıçrayan ergimiş titanyum olduğu element analizi ile belirlenmiştir. TIG kaynaklı numuneler; Şekil 5.51.- Şekil 5.55.'de görüldüğü üzere kaynak bölgesi ve esas metale ait bölgelerde yüzey kalitesinin bozulduğu gözlemlenmiştir. TIG kaynaklı numunelerin SEM görüntülerinde malzeme yüzeyinde beyaz yapıdaki oksit taneleri görülmektedir. Şekil 5.56.-Şekil 5.61.'de görüldüğü üzere ITAB'da yoğun olmak üzere yüzeyde çatlamların olduğu gözlemlenmiştir. Bu çatlakların uzunluklarının 136  $\mu\text{m}$  ile 401,2  $\mu\text{m}$  arasında, genişliklerinin ise 12,4  $\mu\text{m}$  ile 15,76  $\mu\text{m}$  arasında değiştiği görülmektedir. Şekil 5.64.-Şekil 5.65.'de görüldüğü üzere çatlamların esas metal bölümünde de devam ettiği görülmektedir.

## 7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çekme ve eğme deneyleri sonucunda lazer kaynaklı numunelerin çekme dayanımının ve eğilme dayanımının, TIG kaynaklı numunelerin çekme dayanımı ve eğilme dayanımından yüksek olduğu belirlenmiştir. Lazer kaynağında ısı girdisinin dar bir alana yoğunlaşması nedeniyle malzemede hızlı bir şekilde soğuma olmakta bu da malzeme içyapısında küçük taneli yapıların oluşmasına neden olmaktadır. TIG kaynağında ise ısı girdisi arttıkça ergime artmakta ve kaynak bölgesi genişlemektedir. Bu da malzemenin yavaş soğuması ve kaba tanelerin oluşmasına neden olmaktadır. Lazer kaynağında küçük tane boyutu elde edildiğinden dolayı çekme ve eğme dayanımlarının daha yüksek çıktığı düşünülmektedir. Buna ek olarak Şekil 5.56.-Şekil 5.61.'de görüldüğü üzere TIG kaynaklı numunenin SEM görüntülerinde malzeme yüzeyinde çatlakların oluştuğu gözlemlenmektedir. Bunun sebebi olarak; artan ısı girdisiyle beraber titanyumun oksijen, hidrojen, karbon ve azot gibi elementleri bağlama özelliğinin artması ve bu elementlerin titanyumun kafes yapısına girerek kaynak esnasında ortaya çıkan gerilme ile kafes yapısını bozmasının kirlenme çatlamaına neden olduğudur. Kirlenme çatlamaının da TIG kaynaklı numunelerin mukavemet değerlerinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Yunlian ve arkadaşları [16], yapmış olduğu çalışmada elektron ışın kaynaklı, lazer kaynaklı ve TIG kaynaklı ticari saflıktaki titanyumun mekanik özelliklerini incelemişler ve lazer kaynaklı titanyum örneklerinin çekme dayanımının, TIG kaynaklı örneklerin çekme dayanımından daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Numunelerin sertlik incelemelerinde TIG kaynaklı numunenin kaynak bölgesindeki sertliğin, lazer kaynaklı numunenin kaynak bölgesindeki sertliğinden çok fazla olduğu belirlenmiştir. TIG kaynaklı numunelerin yüzeylerinde oluşan oksitlenmelerin malzemeyi gevrekletirmesi ve lazer kaynağında ısı girdisinin çok küçük bir alana odaklanabilmesinden dolayı lazer kaynaklı numunelerin sertlik değerlerinin daha düşük çıktığı düşünülmektedir.

Yapılan mikroyapı incelemelerinde Şekil 5.36.'da da görüldüğü üzere TIG kaynaklı numunenin kaynak bölgesinde iğnesel yapıda oluşumlar gözlemlenmektedir. Sert, gevrek yapıya sahip olan iğnesel yapıların malzeme dayanımında düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Lazer kaynaklı numunelerde ise kaynak bölgesine yaklaşıldıkça tane boyutlarının incelendiği gözlemlenmiştir. Uzun ve arkadaşları [1], yaptıkları çalışmada, kaynak bölgesinde iğne görünümlü yapılara rastlamışlardır. Yunlian ve arkadaşları [16], yaptıkları çalışmada; TIG kaynağında oluşan tane boyutlarının, lazer kaynağında oluşan tane boyutlarından büyük olduğunu belirlemişlerdir.

TIG kaynaklı numunenin SEM incelemelerinde malzeme yüzeyinde oksitlenmelerin ve yüzeyde bozulmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oksitlenmenin de malzemeyi gevrek bir yapı haline getirdiği düşünülmektedir.

Yapılan tüm bu çalışmalar doğrultusunda; ticari saflıktaki titanyumun konstrüksiyonlarda kaynak edilerek kullanılması durumunda uygulanabilecek en iyi kaynak yönteminin lazer kaynak yöntemi olduğu saptanmıştır.

Kaynaklı numunelerin farklı korozif ortamlardaki (yapay tükürük ortamı, asidik ortam, tuzlu su ortamı) korozyona karşı dirençleri ölçülebilir.

Farklı kaynak yöntemleriyle birleştirilmiş titanyum levhaların yorulma dayanımları üzerine çalışmalar yapılabilir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1]: Uzun R. O., Durmuş H., Meriç C., "CO<sub>2</sub> Lazer Kaynağıyla Birleştirilmiş Ti64 Titanyum Alaşımının Optimum Kaynak Şartlarının Belirlenmesi" Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi, Vol.1, No. 5, Jan 2006. Sf: 1-10
- [2]: Cingi M., Meydanoğlu O., Baydoğan M., Çimenoğlu H., Kayalı E. S., "Ticari Saf Titanyumun Yorulma Davranışı", 8. Uluslar arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, Kasım 2007, pp. 236-241.
- [3]: Ensarioğlu C., Çakır M. C., "Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü Bölüm 1", Mühendis ve Makina, Cilt: 46, Sayı: 546, 2005, Sf: 36-46
- [4]: Akman E., "Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi", Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006, KOCAELİ.
- [5]: Atasoy E., "Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Çiftinin Arabağlayıcı Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması", Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi A.B.D. Bilim Uzmanlığı Tezi, Haziran 2007, KARABÜK
- [6]: Doğan İ., "Titanyum Malzemenin (Kalite 265.2) TIG Kaynak Yöntemiyle Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002, ANKARA
- [7]: Üngören S., "Ti-Al-V Alaşımlarının Difüzyon Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi", Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007, KOCAELİ
- [8]: Choi B. H., Choi B. K., "The Effect of Welding Conditions According to Mechanical Properties of Pure Titanium", Journal of Materials Processing Technology 201, pp 526- 530, 2008.
- [9]: Lathabai S., Jarvis B. L., Barton K. J., "Comparison of Keyhole and Conventional Gas Tungsten Arc Welds in Commercially Pure Titanium", Materials Science and Engineering A299, pp. 81- 93, 2001.
- [10]: Lee W-B., Lee C-Y., Chang W-S, Yeon Y-M, Jung S-B., "Microstructural Investigation of Friction Stir Welded Pure Titanium", Materials Letters 59, pp. 3315- 3318, 2005.
- [11]: Li C., Muneharua K., Takao S., Kouji H., "Fiber Laser- GMA Hybrid Welding of Commercially Pure Titanium", Materials and Design 30, pp. 109- 114, 2009.

- [12]: Meshram S. D., Mohandas T., Reddy G. M., " Friction Welding of Dissimilar Pure Metals", Journal of Materials Processing Technology 184, pp. 330- 337, 2007.
- [13]: Wang S. H., Wei M. D., Tsay L. W., " Tensile Properties of LBW Welds in Ti-6Al-4V Alloy at Evaluated Temperatures Below 450°C", Materials Letters 57, pp. 1815- 1823, 2003.
- [14]: Watanabe I., Topham S., " Laser Welding of Cast Titanium and Dental Alloys Using Argon Shielding", Journal of Prosthodontics, Vol. 15, No: 2, pp. 102- 107, 2006.
- [15]: Yung W. K. C., Ralph B., Lee W. B., Fenn R., " An Investigation into Welding Parameters Affecting the Tensile Properties of Titanium Welds", Journal of Materials Processing Technology 63, pp. 759- 764, 1997.
- [16]: Yunlian Q., Ju D., Quan H., Liying Z., " Electron Beam Welding, Laser Beam Welding and Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Sheet", Materials Science and Engineering A280, pp. 177- 181, 2000.
- [17]: Orhon A. V., " Mimarlıkta Titanyum", Yapı Dergisi, Sayı: 278, Sf: 82-86, Ocak 2005.
- [18]: Lütjering G., Williams J. C., " Titanium", Springer- Verlag, ISBN: 3-540-42990-5, 2003, GERMANY
- [19]: İçdem C., " Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımlarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2007, İSTANBUL
- [20]: Weller R., " Ilmenite Photos, Ilmenite Massive-1", Cochise College, America, 2010.
- [21]: Weller R., " Rutile Photos, Red Rutile Crystal-1", Cochise College, America, 2010.
- [22]: Callister W. D., "Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition," John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [23]: Donachie M. J., "TITANIUM A Technical Guide 2nd Edition", ASM International, 2000.
- [24]: Yılmaz H., "Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Yüzey Özelliklerinin Plazma (İyon) Nitrüleme İle Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2008.
- [25]: Leyens C., Peters M., " Titanium and Titanium Alloys", WILEY- VCH Verlag, 2003.

- [26]: Zhecheva A., Wei S., Malinov S., Long A., “ Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods”, Surface & Coatings Technology 200, 2005, pp. 2192-2207.
- [27]: Silva L. L., Ueda M., Silva M. M., Codaro E. N.,” Effects of the High- Temperature Plasma Immersion Ion- Implantation Treatment on Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 34, No. 4, August 2006, pp. 1141-1147.
- [28]: Destefani J. D., “ Introduction To Titanium and Titanium Alloys”, ASM International, Metals Handbook, 10th Edition, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, pp. 586-591, 1990.
- [29]: Kapczinski M. P., Gil C., Kinast E. J., Santos C. A., “ Surface Modification of Titanium by Plasma Nitriding”, Materials Research, Vol. 6, No. 2, 2003, pp. 265-271.
- [30]: Kubiak K., Sieniawski J., “ Development of the microstructure and fatigue strength of two phase titanium alloys in the processes of forging and heat treatment”, Journal of Materials Processing Technology 78, 1998, pp. 117-121.
- [31]: Bloyce A., Qi P. Y., Dong H., Bell T., “Surface modification of titanium alloys for combined improvements in corrosion and wear resistance”, Surface and Coatings Technology 107, 1998, pp. 125-132.
- [32]: Yeşildal C., “ Otomotiv Sektöründeki Birleştirmelerde Seçilen Kaynak Parametreleri ve Kullanılan Teknolojiler: Geleneksel Yöntemler ve Laser Tekniği”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008, İSTANBUL.
- [33]: Joshi V. A., “ Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features”, CRC Press, 2006.
- [34]: Akagündüz E., “ Isıl İşlem Görmüş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Mikroyapı ve Yüzey Çizilme Dayanımları Açısından İncelenmesi”, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008, GEBZE.
- [35]: Kaya Y., “ Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması”, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi A.B.D., Ocak 2010, KARABÜK.
- [36]: Ezugwu E. O., Bonney J., Yamane Y., “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, Journal of Materials Processing Technology 134, 2003, pp. 233-253.

- [37]: Massaro C., Rotolo P., De Riccardis F., Milella E., "Comparative investigation of the surface properties of commercial titanium dental implants. Part I: chemical composition", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 13, 2002, pp. 535-548.
- [38]: Khan A. S., Kazmi R., Farrokh B., Zupan M., "Effect of oxygen content and microstructure on the thermo-mechanical response of three Ti-6Al-4V alloys: Experiments and modeling over a wide range of strain-rates and temperatures", *International Journal of Plasticity* 23, 2007, pp. 1105-1125.
- [39]: Tian Y. S., Chen C. Z., Chen L. B., Chen L. X., " Study on the microstructure and wear resistance of the composite coatings fabricated on Ti-6Al-4V under different processing conditions", *Applied Surface Science* 253, 2006, pp.1494-1499.
- [40]: Polmear I. J., "Recent Developments in Light Alloys", *Materials Transactions, JIM*, Vol. 37, No. 1, 1996, pp. 12-31.
- [41]: Üçüncüoğlu S., "Titanium Sert-Alfa Fazının Değişik Yöntemlerle Üretilmesi ve Karakterizasyonu", *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2008, İSTANBUL.
- [42]: Türen Y., "Met 201 Malzeme Ders Notları", *Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü*, 2010.
- [43]: Askeland D. R., "The Science and Engineering of Materials", Third S.I. Edition, 1998.
- [44]: Oh J., Kim N. J., Lee S., Lee E. W., "Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds", *Materials Science and Engineering A340*, 2003, pp.232-242.
- [45]: Phillips D. H., "Selection and Weldability of Advanced Titanium-Base Alloys", *ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, Soldering*, 1993, pp. 524-527.
- [46]: Black J., Hastings G., "Handbook of Biomaterial Properties", First Edition, 1998.
- [47]: Lauer G., Wiedmann A. A., Otten J. E., Hübner U., Schmelzeisen R., Schilli W., " The titanium surface texture effects adherence and growth of human gingival keratinocytes and human maxillar osteoblast-like cells in vitro", *Biomaterials* 22, 2001, pp. 2799-2809.
- [48]: Citeau A., Guicheux J., Vinatier C., Layrolle P., Nguyen T. P., Pilet P., Daculsi G., " In vitro biological effects of titanium rough surface obtained by calcium phosphate grid blasting", *Biomaterials* 26, 2005, pp. 157-165.
- [49]: Sermed Tıbbi Malzeme İthalat ve Ticaret Ltd. Şti., "Consensus ® Hip System"

- [50]: Anselme K., Bigerelle M.,” Topography effects of pure titanium substrates on human osteoblast long-term adhesion”, Acta Biomaterialia 1, 2005, pp. 211-222.
- [51]: Tschernitschek H., Borchers L., Geurtsen W., “ Nonalloyed Titanium as a Bioinert Metal- A review”, Quintessence International, Volume 36, Number 7, 2005.
- [52]: Imam M. A., Fraker A. C., “ Titanium Alloys As Implant Materials”, ASTM International, 1996.
- [53]: Mcgee C., “ F- 22 Mission Brief”, A Monthly Report on the F- 22 Raptor Program, 2011
- [54]: Fujii H., Takahashi K., Yamashita Y., “Application of Titanium and Its Alloys for Automobile Parts”, Nippon Steel Technical Report, No:88, July 2003, pp. 70-75.
- [55]: Demir A., “Lazer Teknolojilerindeki Gelişmeler ve Sanayideki Uygulamaları”, Yüzey Teknolojileri Dergisi, Sayı: 13, Ocak 2008.
- [56]: Durmuş H., “ CO<sub>2</sub> Lazer Kaynağıyla Birleştirilmiş Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2006, MANİSA
- [57]: Silfvast W. T., “Laser Fundamentals”, Second Edition, Cambridge University Press, 2004.
- [58]: Einstein A., “On The Quantum Theory Of Radiation”, March 3, 1917.
- [59]: Schawlow A. L., Townes C. H., “Infrared and Optical Masers”, Physical Review, Vol. 112, No. 6, 1940-1949, 1958
- [60]: Maimann T. H., “Stimulated Optical Radiation In Ruby”, Nature, Vol. 187, Aug 6, 1960, pp. 493-494.
- [61]: Çelen S., “Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006, İZMİR.
- [62]: Unitek Miyachi Corp., “Nd:YAG Laser Welding Guide”, 2003.
- [63]: Latarum, “Lazerler”, Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi Sunusu, 2006.
- [64]: Özden H., “Lazer ile İmalat Yöntemleri”, Makinatek Dergisi, Sayı:151, Mayıs 2010, Sayfa. 106-112.
- [65]: Anık S., “ Kaynak Tekniği El Kitabı: Yöntemler ve Donanımlar”, Gedik Eğitim Vakfı, 1991.

- [66]: Ayyıldız C., "Demir (Fe) Esaslı Toz Metal (TM) Parçaların Farklı Kaynak Yöntemleri ile Birleştirilmesinde Kaynak Bölgesinin İncelenmesi", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008, İSTANBUL.
- [67]: Oğuz B., "Demir Dışı Metallerin Kaynağı", Oerlikon Yayınları, 1990.
- [68]: Baeslack III W. A., "Selection and Weldability of Conventional Titanium Alloys", ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, Soldering, 1993, pp. 507-523.
- [69]: Bianchini L., Busti P., "Titanium Laser Beam Welding: A Breakthrough Technology For Next-Gen Aircrafts", Aeromart, Parc des Expositions de Toulouse, Dec 2010.
- [70]: Webster R. T., "Welding of Titanium Alloys", ", ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, Soldering, 1993, pp. 783-786.
- [71]: Askaynak Yayınları, " Lincoln Electric TIG Kaynağı", 2005.
- [72]: Anık S., Vural M., " Gazaltı Ark Kaynağı (TIG MIG MAG), Gedik Eğitim Vakfı, Yayın No:3
- [73]: Han W., "Computational and Experimental Investigations of Laser Drilling and Welding for Microelectronic Packaging", Worcester Polytechnic Institute, Degree of Doctor of Philosophy, 2004.
- [74]: Linde Group, "Laser Welding Laserline Technical", 2009.
- [75]: Demir A., Bingül Z., Ertürk S., Sınmazçelik T., "Görüntü İşleme Kontrollü Nd:YAG Lazer ile Ti6Al4V ve Magnezyum Alaşımların Dikiş Kaynak İşlemleri", BAPB-Proje No: 2004/033.
- [76]: Kugler T., "When Does Laser Welding Become Microwelding", The Fabricator, GSI Lumonics, May 2003.
- [77]: Majumdar J.D., Manna I., "Laser Processing of Materials", Sādhana, Vol. 28, Parts 3&4, 2003, India, pp. 495- 562.
- [78]: Özcan M., Tarakcıoğlu N., Kahramanlı Ş., "Saç Malzemelerin Lazer Kaynak Parametreleri", Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online Dergi, Cilt 3, Sayı:1, 2004.
- [79]: Özden H., " Otomotiv Sektöründe Lazerli Üretim Yöntemleri Lazerli İmalat, Ölçme ve Kalite Kontrol", Mühendis ve Makina, Cilt: 50, Sayı: 596, sayfa: 38- 43.
- [80]: Taşkın M., Çalığılü U., "AISI 430/1010 Çelik Çiftinin Lazer Kaynağında Kaynak Gücünün Birleşmeye Etkisi", Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 21(1), 11-22, 2009.

- [81]: Tzeng Y. -F., "Process Characterisation of Pulsed Nd:YAG Laser Seam Welding", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16, 2000, pp. 10-18.
- [82]: Ion J. C., "Laser Processing of Engineering Materials", Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, 2005.
- [83]: Tzeng Y. -F., "Parametric Analysis of the Pulsed Nd:YAG Laser Seam-Welding Process", Journal of Materials Processing Technology 102, pp. 40- 47, 2000.
- [84]: Yue, T. M., Xu J. H., Man H. C., "Pulsed Nd-YAG Laser Welding of A SiC Particulate Reinforced Aluminium Alloy Composite", Applied Composite Materials 4, pp. 53- 64, 1997.
- [85]: Baba N., Watanabe I., " Penetration Depth into Dental Casting Alloys by Nd:YAG Laser", Wiley InterScience, pp. 64- 68, 2004.
- [86]: Demir A., Akman E., Ertürk S., Kaya A. A., Kenar N., Sınmazçelik T., Urhan O., "Optimization of Nd:YAG Laser Welding of Magnesium", JLMN- Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 2, No. 1, pp. 108- 113, 2007.
- [87]: Shimokusu Y., Fukumoto S., Nayama M., Ishide T., Tsubota S., "Application of High Power YAG Laser Welding to Stainless Steel Tanks", Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review Vol. 38, No. 1, 2001.
- [88]: Pan L. K., Wang C. C., Hsiao Y. C., Ho K. C., "Optimization of Nd:YAG Laser Welding onto Magnesium Alloy via Taguchi Analysis", Optics & Laser Technology 37, pp.33- 42, 2004.
- [89]: Naeem M., " Controlling the Pulse in Laser Welding", Welding Magazine, Jun 1, 2004.
- [90]: Zhu J., Li L., Liu Z., "CO<sub>2</sub> and Diode Laser Welding of AZ31 Magnesium Alloy", Applied Surface Science 247, pp. 300- 306, 2005.
- [91]: Timet Titanium, " Grade 2 Titanium Sac Levha Sertifikası", 2010.
- [92]: Timet Titanium, " ERTi-2 Kaynak Teli Sertifikası", 2011.
- [93]: Türk Standardları Enstitüsü, " TS 5789, Çekme Deneyi Demir Dışı Metallerin Ergitme Alın Kaynaklı Birleştirmeleri için", 1988.
- [94]: British Standard, " BS EN ISO 5173: 2010 Destructive Tests on Welds in Metallic Materials- Bend Tests", British Standards Institution.